

**BEITRÄGE  
ZUR  
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

---

**Helmut Fleischer**

**SCHWINGUNG UND SCHALL  
EINES HACKBRETTS**

**Professor Hugo Fastl zum 60. Geburtstag gewidmet**

# **SCHWINGUNG UND SCHALL EINES HACKBRETTS**

von

**Helmut Fleischer**

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

**Professor Hugo Fastl zum 60. Geburtstag gewidmet**

**Heft 1/04 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:  
Schwingung und Schall eines Hackbretts  
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/04  
Neubiberg 2004  
**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.

## SCHWINGUNG UND SCHALL EINES HACKBRETTS

### *Zusammenfassung*

*Ein chromatisches Hackbrett mit 28 vierhörigen Saiten wurde untersucht. Im ersten Teil wurde die Mechanik des Instruments durchleuchtet. Die Schwingungsmoden des Korpus wurden durch Modalanalyse mittels „Fixed Response“ (Bewegungsaufnehmer fest, Kraftanregung wandert) und „Fixed Excitation“ (Kraftanregung fest, Bewegungsaufnehmer wandert) bestimmt. Darüber hinaus wurden die Betriebsschwingungsformen mit der Laser-Scanning-Vibrometrie untersucht. Die Schwingfreudigkeit der Stege an den Auflagepunkten der Saiten wurde durch die mechanische Admittanz gekennzeichnet. Der zweite Teil befasst sich mit der Akustik. Das Schallsignal einer jeden angeschlagenen Saite wurde mit Hilfe der Schnellen Fourier-Transformation und des gehörbezogenen Verfahrens VIPER analysiert. Insbesondere das Abklingen der Grundtöne wurde untersucht und die Abklingzeit mit der Admittanz verknüpft. Es offenbart sich eine umgekehrte Korrelation: Die Schwingung und der Schall einer Saite, die an einem Auflager eine hohe Admittanz „fühlt“, klingen rasch ab. Der Bericht ist als Sammlung von Material anzusehen, das im Detail später ausgewertet und mit weiteren Ergebnissen verknüpft werden sollte.*

## VIBRATION AND SOUND OF A HAMMERED DULCIMER

### *Summary*

*A chromatic hammered dulcimer (Hackbrett) with 28 strings of four courses was investigated. In the first part, the mechanics of the instrument was studied. The vibrational modes of the body were ascertained by Modal Analysis using fixed response and fixed excitation. In addition, the Operating Deflection Shapes of the top and back plates were determined by Laser Scanning Vibrometry. The “vibration willingness” of the bridges at the contact points of the strings was characterized by the mechanical admittance. The second part deals with the acoustics. The sound signal of each hammered string was analyzed by means of Fast Fourier Transformation and of the aurally-related approach VIPER. In particular, the decay of the fundamental tones was evaluated and the decay time related to the admittance. An inverse correlation becomes obvious: The vibration and sound of strings, which “feel” a high admittance at a termination, decay rapidly. The report is to be regarded as a collection of material whose details should be worked out and related to further findings later.*

# INHALT

VORWORT und Hinweis auf Nachtrag.....	7
1. EINLEITUNG.....	8
2. ZUM UNTERSUCHTEN INSTRUMENT.....	10
3. MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN ( <i>FIXED RESPONSE</i> ).....	13
3.1. Vorbemerkungen zur Modalanalyse.....	13
3.2. Geräte und Einstellungen.....	14
3.3. Ergebnisse.....	15
3.4. Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur.....	19
3.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	20
4. MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN ( <i>FIXED EXCITATION</i> ).....	21
4.1. Schwingungsmessung mit dem Laser.....	21
4.2. Transversalmoden der Deckenschwingung.....	22
4.3. Transversalmoden der Bodenschwingung.....	24
4.4. Zusammenfassende Bemerkung.....	27
5. UNTERSUCHUNG DER KORPUSSCHWINGUNGEN MIT DEM SCANNING VIBROMETER.....	28
5.1. Messung auf der Decke.....	28
5.2. Transversalschwingungen der Decke.....	29
5.2.1. Eigene Ergebnisse.....	30
5.2.2. Ergebnisse aus der Literatur.....	34
5.3. Messung auf dem Boden.....	36
5.4. Transversalschwingungen des Bodens.....	37
5.4.1. Eigene Ergebnisse.....	37
5.4.2. Ergebnisse aus der Literatur.....	41
5.5. Schwingungen von Decke und Boden.....	42
5.6. Zusammenfassende Bemerkung.....	46
5.7. Nachtrag vom Januar 3005 zum Kapitel 5.....	48
5.7.1. Schwingungen der Decke.....	48
5.7.2. Schwingungen des Bodens.....	49
5.7.3. Schwingungen von Decke und Boden.....	49
5.7.4. Fazit.....	51
6. MECHANISCHE ADMITTANZ.....	52
6.1. Messmethode und –aufbau.....	52
6.2. Admittanz an den beiden Auflagern der Saiten.....	53
6.2.1. Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.....	54
6.2.2. Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.....	56
6.3. Admittanz am linken hohen Steg.....	58
6.4. Admittanz am rechten hohen Steg.....	60
6.5. Zusammenhang mit Deckenschwingungen.....	62
6.6. Zusammenfassende Bemerkung.....	63

7.	FFT-ANALYSE DER SCHALLSIGNALS	65
7.1.	Instrumentierung und Messung	65
7.2.	Einzelpektren für die Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen	67
7.3.	Einzelpektren für die Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen	69
7.4.	Wasserfalldiagramme für die Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen	71
7.5.	Wasserfalldiagramme für die Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen	75
7.6.	Zusammenfassende Bemerkung	78
8.	ABKLINGEN DES GRUNDTONS	79
8.1.	Messung	79
8.2.	Abklingen der Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen	79
8.3.	Abklingen der Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen	82
8.4.	Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und Admittanz	85
8.5.	Zusammenfassende Bemerkung	88
9.	GEHÖRBEZOGENE ANALYSE DER SCHALLSIGNALS	89
9.1.	Verarbeitung und Auswertung	89
9.1.1.	Auditorisches Spektrogramm	89
9.1.2.	Frequenzkonturen und Frequenzspuren	90
9.2.	Anwendung auf Hackbrett-Klänge	91
9.3.	Zusammenfassende Bemerkung	94
10.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK	95
	LITERATUR	100
	ANHANG	
	Anhang 1: Betrachtungen zur mechanischen Admittanz	102
	Anhang 2: Admittanz an den hohen Stegen	105
	Anhang 3: Pegel-Frequenz-Spektren	109
	Anhang 4: Wasserfall-Diagramme (Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen)	111
	Anhang 5: Wasserfall-Diagramme (Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen)	112
	Anhang 6: Pegel-Frequenz-Spektren mit Abklingen des Grundtons	113
	Anhang 7: Betriebsschwingungsformen der Decke („Chladni-Figuren“)	117
	Anhang 8: Betriebsschwingungsformen der Decke (3D)	118
	Anhang 9: Betriebsschwingungsformen des Bodens („Chladni-Figuren“)	120
	Anhang 10: Betriebsschwingungsformen des Bodens (3D)	121
	Anhang 11: Frequenzspuren (Saiten auf dem linken hohen Steg) mit Farbskale	122
	Anhang 12: Frequenzspuren (Saiten auf dem rechten hohen Steg) mit Farbskale	125
	Anhang 13: Gesamtansicht des Hackbretts	128

## VORWORT

In den meisten vorhergehenden Bänden der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ stand an dieser Stelle ein knappes, aber stets überaus sachkundiges Vorwort des Mitherausgebers Hugo Michael Fastl. Aus gegebenem Anlass fühlt sich der andere Mitherausgeber dieses Mal bemüßigt, abweichend von dieser Regel selbst ein Vorwort zu verfassen.

Bereits vor langer Zeit hat Hugo Fastl zwei Studien parallel gemeistert. An der Musikhochschule München hat er Kontrabass und an der Technischen Hochschule (später: Technische Universität) München Nachrichtentechnik studiert. Geraume Zeit war nicht ganz klar, welcher seiner Begabungen und Neigungen er nachgehen sollte. Schließlich hat er sich dafür entschieden, die Ingenieurwissenschaft zu seinem Hauptberuf und die Musik zur schönen Beschäftigung ohne Zwang zum Geldverdienen zu machen. Die Assistentenzeit und Promotion bei Eberhard Zwicker haben ihn zur Hörforschung gebracht, der er bis heute treu geblieben ist. In diesem faszinierenden Zweig der Wissenschaft ist er seitdem äußerst ertrag- und erfolgreich tätig. Mehr noch im Ausland als im Inland sind sein Wissen, seine Erfahrung und sein Rat gefragt. Die Habilitation hat ihn zum selbständigen Hochschullehrer an der Technischen Universität München gemacht. Damit ist es ihm möglich, sein Wissen und seine Begeisterung für sein Fach an Studierende und auch Doktoranden weiterzugeben, von denen zahlreiche inzwischen an verantwortlicher Stelle arbeiten und wirken. Die Krönung seiner Laufbahn als Wissenschaftler ist, dass Hugo Fastl bei Vorliegen dieses Bandes der „Beiträge“ Präsident der Deutschen Gesellschaft für Akustik sein wird.

Dass speziell dieser Bericht ihm gewidmet ist, hat zwei Gründe. Zum einen hat Hugo Fastl im Frühjahr sein 60. Lebensjahr vollendet. Zum anderen hat er neben all der hauptberuflichen Anspannung sein musikalisches Talent nicht verkümmern lassen. Nach wie vor ist er als Musiker tätig. Allerdings hat er sich allmählich vom großen Orchester weg und mehr zur Stubenmusik hin entwickelt. Neben seinem Hauptinstrument, dem großen Bass, versteht er bereits seit vielen Jahren das Hackbrett virtuos zu bedienen. Zusammengefasst zu einem Satz: Das Hackbrett ist des nunmehr sechzigjährigen Hugo Fastls ureigenstes Instrument!

Es bleibt zu wünschen, dass Hugo Michael Fastl neben all seinen vielfältigen Tätigkeiten in Wissenschaft und Hochschule immer noch genügend Zeit für die schönen Dinge des Lebens bleiben möge. Nicht allein, aber nicht zuletzt, gehört dazu die Musik mit ihren Instrumenten.

*Ad multos annos, lieber Hugo!*

München, im September 2004

Helmut Fleischer

### **Hinweis auf Nachtrag vom Januar 2005**

Bei der weiteren Analyse der Schwingungsformen von Vorder- und Rückseite des Hackbretts haben sich neue Erkenntnisse ergeben. In diese Online-Version ist der Nachtrag integriert und als Abschnitt 5.7 an Kapitel 5 angehängt worden.

## 1. EINLEITUNG

Das Musikinstrument, das Gegenstand des vorliegenden Berichts ist, hat viele verschiedene Namen. Im Alpenraum wird es Hackbrett genannt. In anderen Regionen sind Bezeichnungen wie Cimbalom, Zymbal oder Zimbel, Psalterion oder Psalter, Santûr, Tympanon oder auch Dulcimer gebräuchlich. Die unterschiedlichen Bezeichnungen und Schreibweisen deuten darauf hin, dass es sich hierbei um ein sehr altes und sehr weit verbreitetes Instrument handelt. Nach allgemeinem Wissensstand ist es im vorderen Orient entstanden, mit Kreuzfahrern nach Europa und mit Auswanderern nach Amerika gekommen; siehe z.B. Burns (2002) und im Internet Kettlewell (1976) und Deutsches Museum (2003). Abb. 1 zeigt eine Zeichnung, wie sie im Handbuch der Musikinstrumente von Buchner (1995) nach einer älteren Vorlage wiedergegeben ist. Einige weitere Angaben zum Instrument finden sich bei Hänel (2004).



Abb. 1: Darstellung einer Frau, die Hackbrett spielt; entnommen aus Buchner (1995).

Zimbal (Hackbrett). Nach der Abbildung in *Les Echecs amoureux*, Ende des 15. Jahrhunderts, Paris, Bibliothèque Nationale

Das Hackbrett unterscheidet sich vom Aufbau her nicht sehr von der Zither oder ähnlichen Zupfinstrumenten mit kastenförmigem Resonanzkörper, wird aber im Gegensatz zu diesen mit zwei Klöppeln (Hämmern, Schlegeln) angeschlagen. Im Englischen wird es deshalb als *Hammered Dulcimer* (Fletcher und Rossing 1998) bezeichnet. Es fällt in diejenige Untergruppe der Chordophone (Hornbostel und Sachs 1914), bei denen die Saiten freie Schwingungen ausführen. In dieser Hinsicht ist es verwandt mit dem Klavier, als dessen Vorläufer es auch gelegentlich angesehen wird. Insbesondere das große ungarische Hackbrett, das im Wesentlichen von Josef Schunda (1845 – 1923) geprägte Cimbalom, legt diese Verbindung nahe.

Bevor sich die Betrachtungen auf das alpenländische Hackbrett konzentrieren, ist zur Illustration in Abb. 2 ein persischer Verwandter, das Santûr, abgebildet. Es zeigt den für diesen Instrumententyp charakteristischen trapezförmigen Schallkasten, über den die Saiten gespannt sind. Dessen Decke ist beim dargestellten Instrument reich mit Intarsien verziert.

Auf Grund ihrer geringen Querabmessungen ist die Saite nicht in der Lage, selbst genügend Schall abzustrahlen. Wie bei allen Chordophonen wird sie dazu an einen Abstrahlkörper angekoppelt. Beim Hackbrett ist dieser Körper ein hohler Kasten von Trapezform mit einem Schallloch, das meist kreisförmig ist und sich auf der Oberseite befindet. Die längere Seite mit den Basssaiten ist dem Spieler zugewandt.

Wesentliche Impulse zur Verbesserung des Instruments und zu seiner Verbreitung stammen von dem Virtuosen Pantaleon Hebenstreit (1667 – 1750), nach dem es manchmal auch als Pantaleon bezeichnet wird. Obwohl Fletcher und Rossing (1998) Hebenstreit das chromatische Hackbrett zuschreiben, dürfte die ursprüngliche Ausprägung des Instruments das diatonische Hackbrett sein. Bei dieser Bauform, die auch heute noch gebräuchlich ist, teilt ein hoher Steg die Saiten im Längenverhältnis 2:3. Durch Anschlagen des kürzeren Stücks wird ein Ton erzeugt, der um eine Quinte über der Note liegt, die beim Anschlagen des längeren Saitenstücks erklingt. Fletcher und Rossing (1998) weisen auf einige Besonderheiten hin, die aus der Kopplung und teilweisen Übereinstimmung der Schwingungsfrequenzen der beiden Teilstücke resultieren. Die Instrumente, deren Schwingungen Canfield und Rossing (1995) untersucht haben, gehören zu dieser Klasse.



Abb. 2: Persisches Santûr; entnommen aus Buchner (1995).

Das hier betrachtete Exemplar ist ein chromatisches Hackbrett. In Halbtönen ist jeder Note eine eigene Saite zugeordnet. Da die Saiten jeweils vierfach vorhanden sind, wird das Instrument als „vierhörig“ bezeichnet. Seine Bauform soll in der Mitte des letzten Jahrhunderts von Tobias Reiser entwickelt und von Heinrich Brandzauner vervollkommen worden sein. Dieser Typ wird als Steirisches oder auch als Salzburger Hackbrett bezeichnet. Das vorliegende Instrument stammt aus dem Besitz von Herrn Johannes Maria Guckel und damit aus Verwandtenkreis von Frau Dipl.-Ing. Birgit Hänel. Frau Hänel, die einige Jahre am Institut gearbeitet und die Zeit auch für eine Studie des Hackbretts (Hänel 2004) genutzt hat, sowie Herrn Guckel sei herzlich dafür gedankt, dass das Institut für Mechanik für einen längeren Zeitraum über das Instrument verfügen konnte.

*Es verdient besondere Erwähnung, dass der Mitherausgeber dieser Schriftenreihe, Professor Hugo Michael Fastl, nicht nur ein studierter Bass-Spieler ist, sondern auch das Hackbrett virtuos zu handhaben versteht - ein Grund mehr, ihm diesen Bericht, verbunden mit den besten Wünschen, zum 60. Geburtstag zu widmen.*

## 2. ZUM UNTERSUCHTEN INSTRUMENT

Abb.3 zeigt das im Folgenden behandelte chromatische Hackbrett aus der Sicht des Spielers. Das Instrument hat Trapezform und weist ein rundes Schalloch in der Mittellinie der Decke auf. Die dem Spieler zugewandte Seite des Trapezes ist 86 cm, die dem Spieler abgewandte Seite 42 cm lang. Der Abstand zwischen diesen parallelen Seiten beträgt 50 cm, die Dicke des Schallkastens ist 6,5 cm. Offensichtlich sind alle Teile fest miteinander verleimt. Hergestellt wurde das betrachtete Hackbrett von der Firma GEWA in Mittenwald (gezeichnet 3/74). Jeder musikalischen Note entspricht ein Chor (im Englischen: *course*) von vier Saiten gleicher Stimmung. Physikalische Erscheinungen, die mit der Kopplung *unisono* gestimmter Saiten über den Steg zusammenhängen, hat Weinreich (1977, 1979) am Beispiel des Klaviers untersucht. Diese Effekte sollen hier nicht betrachtet werden.

In Hinsicht auf den Zusammenklang der einzelnen Saiten eines Chores muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass das Instrument sich über Monate in den Räumen des Instituts für Mechanik befand und in dieser Zeit nicht nachgestimmt wurde. Die natürliche Folge war, dass die einzelnen Saiten der Chöre sich allmählich gegeneinander verstimmt haben, so dass beim Anschlagen teilweise deutlich ausgeprägte Schwebungen auftraten. Nachdem der Literatur zu entnehmen ist, dass ein geübter Spieler für das Stimmen durchaus 30 Minuten benötigen kann, wurde im wohlverstandenen Interesse des Besitzers auf eigene Stimm-Versuche verzichtet; die Schwebungen wurden in Kauf genommen.



Abb. 3: Gesamtansicht der Vorderseite des untersuchten Hackbretts.

Das Instrument hat 28 Saitenchöre im Halbtonabstand und umfasst damit etwas mehr als zwei Oktaven. An den Rändern der Decke erkennt man in Abb. 3 zwei niedrige durchgehende Stege. Hinter dem rechten dieser beiden Außenstege sind die Schleifen-Enden der Stahlsaiten eingehängt. Auf der gegenüber liegenden Seite, hinter dem linken niedrigen Außensteg, sind die 4\*28 Stimm-Wirbel angebracht. Mehr zur Mitte hin befinden sich weitere zwei Stege, auf denen jeweils jeder zweite Saitenchor aufliegt. Diese Stege sind deutlich höher als die am

Rande; siehe hierzu Abb. 4. Auf dem linken hohen Steg liegen die Saitenchöre G3 bis A5 auf. Deren Saiten sind durch weite Aussparungen unter dem rechten hohen Steg hindurch geführt, so dass sie auf der gesamten Länge zwischen dem linken hohen Steg und dem rechten Außensteg ungehindert schwingen können. Entsprechend liegen auf dem rechten hohen Steg die Saitenchöre Gis3 bis B5 auf, die ihrerseits nun unter dem linken hohen Steg hindurch bis zum linken Außensteg geführt sind. Damit sind die Saitenchöre gegeneinander verschränkt. Sie sind hinsichtlich der Höhe so angeordnet, dass beim Anschlagen nahe einem hohen Steg immer nur ein Saitenchor getroffen wird. Die benachbarten, um einen Halbton versetzten Saitenchöre liegen an der betreffenden Stelle deutlich tiefer und werden nicht getroffen. Um diese zum Erklingen zu bringen, muss sie der Spieler nahe dem anderen hohen Steg anschlagen.



Abb. 4: Detailansicht des untersuchten Hackbretts mit Blick auf das Herstellerschild im Inneren.

Auf der Rückseite (Abb. 5) ist das Hackbrett eben. Der Boden ist durchgehend geschlossen und weist lediglich zwei Bohrungen auf. Diese Öffnungen haben keine akustische Bedeutung. Vielmehr nehmen sie zwei hölzerne Fußchen auf, mit denen sich das Instrument auf einem Tisch so aufstellen lässt, dass seine Oberseite leicht zum Spieler hin gekippt ist. Die Schräglage erleichtert das Spielen.



Abb. 5: Rückansicht des untersuchten Hackbretts mit den beiden Stellfüßchen.

Angeschlagen werden die Saiten mit zwei leichten Holzklöppeln, wie sie in Abb. 6 wiedergegeben sind. Deren Masse liegt in der Größenordnung von 10 g. Die Klöppel werden zwischen Zeige- und Mittelfinger gehalten und mit dem Daumen gesteuert. Da sie die Saiten am hohen Steg nahe der Einspannung treffen, ist zu erwarten, dass sie neben der Grundschiwingung eine große Anzahl von höherfrequenten Saitenschwingungen anregen werden. Die Saitenklänge werden demnach eine große Zahl von Obertönen enthalten.



Abb. 6: Die beiden filzbezogenen Holzklöppel zum Anschlagen der Saitenchöre.

An diesem Hackbrett wurden im Institut für Mechanik Schwingungsuntersuchungen durchgeführt, von denen ein Teil im Bericht „Voruntersuchungen zur Modalanalyse an einem chromatischen Hackbrett“ (Hänel 2004) zusammengefasst ist. Ein weiterer Teil findet sich in der Diplomarbeit „Modalanalyse – Vergleich von *Operating Deflection Shapes* und Eigenformen und ihrer Analyseprogramme,“ (Roewer 2004). Gehörbezogene Untersuchungen der Schallsignale mit dem Programm VIPER hat Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg durchgeführt.

Diese sowie weitere eigene Untersuchungen sind im Folgenden zusammen gestellt. In Hinsicht auf den Instrumentenkörper umfassen sie

- Modalanalysen mit wandernder Anregung und festgehaltenem Bewegungsaufnehmer (*Fixed Response*),
- Modalanalysen ausgehend von Laser-Messungen mit dem Scanning Vibrometer (*Fixed Excitation*) und
- Untersuchungen von Betriebsschwingungsformen mit dem Scanning Vibrometer.

Weiterhin sind Versuchsreihen beschrieben und dargestellt, in denen die Schallsignale mittels

- objektiver Frequenzanalyse und
- mit dem gehörbezogenen Analyseverfahren VIPER

untersucht worden sind. Abschließend sollen an Hand von Beispielen einige Verknüpfungen zwischen Kenngrößen der Schallsignale und der mechanischen Schwingung des Korpus aufgezeigt werden. Insgesamt ist der vorliegende Bericht als eine Materialsammlung zu verstehen. Darauf können spätere Untersuchungen aufbauen, die mehr ins Einzelne gehen und auf konkrete musikalische Aufgabenstellungen ausgerichtet sind.

### 3. MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN (*FIXED RESPONSE*)

Der Autor musste bereits mehrfach feststellen, dass Modalanalyse vielfach mit „Hämmerchen-Methode“ gleichgesetzt wird. Zur Klärung der Sachverhalte werden deshalb einige Bemerkungen voran gestellt.

#### 3.1. Vorbemerkungen zur Modalanalyse

Bevor eine Analyse der Moden durchgeführt werden kann, muss im Rechner ein geometrisches Modell des untersuchten Systems erstellt werden, welches durch das Messnetz bestimmt ist. Für alle Punkte dieses Netzes müssen Übertragungsfunktionen gemessen werden. Dabei handelt es sich beispielsweise um Impedanzen bzw. Admittanzen, welche die Kraft (*Excitation*) an einem Punkt mit der Bewegung (*Response*) am anderen Punkt verknüpfen.

Da die zu Grunde liegenden Beziehungen als linear angenommen werden, gilt das Prinzip von der Umkehrbarkeit (Reziprozitäts-Theorem): Der Punkt A kann mit dem Punkt B dadurch verknüpft werden, dass im Punkt A mit der Kraft  $F$  angeregt wird und im Punkt B als Antwort die Bewegung gemessen wird. Genauso ist es zulässig, die Kraft im Punkt B einzuleiten und die Bewegung im Punkt A zu messen. Dabei kann – wie im Einzelfall gerade zweckmäßig – die Bewegung durch den Schwingweg  $w$ , die Schwinggeschwindigkeit  $v$  oder die Schwingbeschleunigung  $a$  gekennzeichnet werden. Die jeweiligen Übertragungsfunktionen lassen sich ineinander umrechnen. Infolge der Umkehrbarkeit steht es dem Experimentator frei,

- entweder einen Bewegungsaufnehmer an ein und demselben Messpunkt zu befestigen und die Anregungskraft zu diesem und zu allen anderen Messpunkten wandern zu lassen (*Fixed Response*)
- oder umgekehrt mit der Kraft an ein und demselben Messpunkt anzuregen und die Bewegung an diesem und an allen anderen Messpunkten zu messen (*Fixed Excitation*).

Grundsätzlich führen beide Wege zum Ziel. Welcher davon gewählt wird, ist allein eine Frage der Zweckmäßigkeit.

Bei der weit verbreiteten „Hämmerchen-Methode“ wird die anregende Kraft vom Aufprall eines Hammers geliefert, in dessen Spitze sich ein Kraftaufnehmer befindet. Es liegt nahe, diese Anregung über sämtliche Messpunkte wandern zu lassen. Sie wird häufig in Kombination mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer angewandt, der an einem Messpunkt befestigt ist und während der gesamten Messung dort verbleibt. Demnach handelt es sich hierbei um eine *Fixed Response*. Eine verwandte Methode, bei der die Kraft allerdings nicht als Hammerimpuls, sondern als Rauschsignal über einen Schwingerreger in das Hackbrett eingebracht worden ist, hat Hänel (2004) praktiziert. Sie wird im vorliegenden Kapitel beschrieben.

Über die andere Vorgehensweise wird im Kapitel 4 berichtet. Die Kraft wird ebenfalls über einen elektrodynamischen Schwingerreger eingebracht, nun jedoch an einem festgehaltenen Punkt (*Fixed Excitation*). Die Bewegung, die sich in der Folge einstellt, wird mit dem Laser an diesem und allen anderen Messpunkten erfasst. Da hierbei der Doppler-Effekt Anwendung findet, wird als Antwort des Hackbretts in diesem Fall nicht die Schwingbeschleunigung, sondern die Schwinggeschwindigkeit gemessen.

### 3.2. Geräte und Einstellungen

Das Messgitter, wie von Hänel (2004) festgelegt und verwendet, ist in Abb. 7 dargestellt. Es umfasst auf dem Hackbrett (bezeichnet aus der Sicht des Spielers)

- die Messpunkte 1 bis 134 auf der Decke,
- die Messpunkte 135 bis 143 auf der vorderen Zarge,
- die Messpunkte 144 bis 148 auf der rechten Zarge,
- die Messpunkte 149 bis 153 auf der linken Zarge,
- die Messpunkte 154 bis 158 auf der hinteren Zarge und
- die Messpunkte 159 bis 217 auf dem Boden.

An all diesen Punkten wurde das Hackbrett mit einem elektrodynamischen Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) jeweils senkrecht zur Oberfläche angeregt. Der Schwingerreger bietet gegenüber dem Krafthammer den Vorteil, dass sich das am besten geeignete Anregungssignal innerhalb weiter Grenzen elektronisch formen lässt, ohne dass – wie bei Impulsanregung – die Gefahr des Übersteuerns besteht. Auf dem Schwingerreger saß ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200). Um an Anregungspunkte gelangen zu können, die sich zwischen den eng benachbarten Saiten befanden, wurde eine rohrförmige Verlängerung aufgeschraubt. Eine aufgesetzte Spitze aus Kunststoff verhinderte Beschädigungen der Holzoberfläche. Die Masse, die zwischen dem Messelement des Kraftaufnehmers und dem Instrumentenkörper mitbewegt wurde, kann auf etwa 5 g geschätzt werden. Der Beschleunigungsaufnehmer (*Accelerometer* B&K 4344) war am Punkt 16 mit Klebewachs befestigt und maß die Schwingbeschleunigung senkrecht zur Oberfläche. Seine Masse betrug 2,5 g. In geringem Maße verfälschten beide Zusatzmassen das Messergebnis.

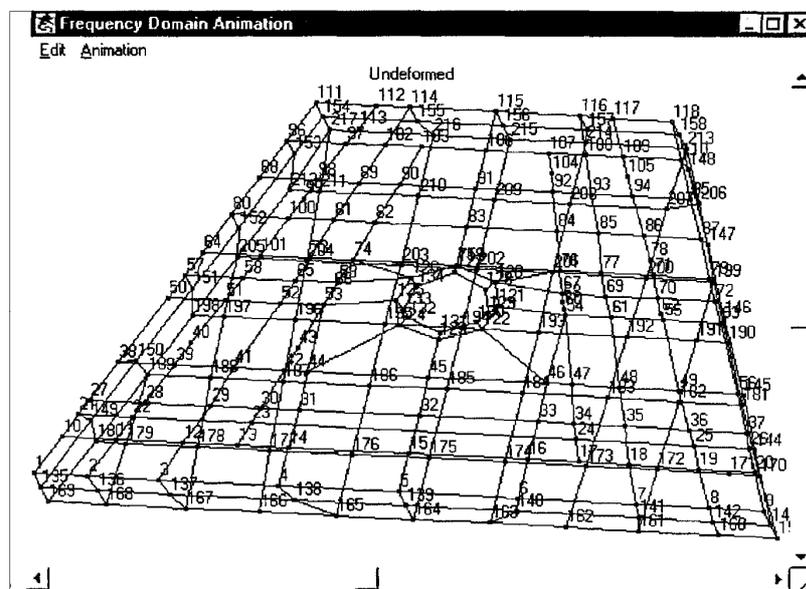


Abb. 7: Geometrisches Modell des Hackbretts, definiert durch das Messgitter, nach Hänel (2004).

Für die Messung wurde das Hackbrett möglichst wenig verändert und unter realitätsnahen Randbedingungen betrieben. So blieb es mit allen Saiten in weitgehend regulärer Stimmung bespannt. Deren Tonumfang reicht von G3 (nominale Grundfrequenz 196 Hz) bis B5 (nominale Grundfrequenz 932 Hz). An der Vorderkante lag der Instrumentenkörper, ähnlich wie im Spielbetrieb, bei der Messung auf einem Steintisch. Damit die Rückseite zugänglich war,

wurden die beiden in Abb. 5 sichtbaren Holzfüßchen entnommen und durch längere Metallrohre ersetzt. Ebenso wie beim Spielen war das Instrument an zwei Punkten aufgeständert, lediglich die Schräglage war ausgeprägter.

Der Rest der Messkette bestand aus einem FFT-Analysator (*4 Channel Intelligent FFT Analyzer* Ono Sokki CF-6400), mit dem die Übertragungsfunktionen bestimmt wurden und der als Anregungssignal ein angepasstes Pseudo-Rauschen im Bereich 0 ... 1 kHz lieferte. Bevor es zum Schwingerreger gelangte, wurde das Rauschsignal durch einen Leistungsverstärker (*Power Amplifier* B&K 4706) geführt. Die Messsignale der beiden piezoelektrischen Aufnehmer wurden vor der Eingabe in den Analysator mit zwei Ladungsverstärkern (*Conditioning Amplifier* B&K 2525) verstärkt.

Die aufgesetzte Spitze des Schwingerregers wurde mit der Hand senkrecht so gegen den Messpunkt gedrückt, dass ein charakteristisches gleichbleibendes Geräusch zu hören war. Die Messsignale wurden fünfmal gemittelt. So wurde für jeden der 217 Messpunkte im FFT-Analysator eine Übertragungsfunktion Schwingbeschleunigung/Anregungskraft bestimmt. Da das Pseudo-Rauschen in jedem Zeitrahmen immer dieselbe Zeitfunktion besaß, ließ es sich im Zeitbereich mitteln. Dies bewirkte eine wesentlich effizientere Störbefreiung, als sie durch Mitteln im Frequenzbereich erzielt werden konnte. Sobald eine Übertragungsfunktion als akzeptabel beurteilt war, wurde sie über GPIB (*General Purpose Interface Bus*) in den StarModal-Rechner übernommen. Im Programm-Paket StarModal 5.22 fand dann die weitere Verarbeitung statt. Details dazu können Hänel (2004) entnommen werden.



Abb. 8: Messsituation bei der Modalanalyse des Hackbretts. Links unten erkennt man den Schwingerreger mit Kraftaufnehmer, Verlängerung und Kunststoffspitze, rechts vorne den aufgeklebten Beschleunigungsaufnehmer.

### 3.3. Ergebnisse

Einige Ergebnisse nach Hänel (2004, Anhang A) sind in den beiden folgenden Abbildungen zusammen gestellt. Die Messdaten wurden mehrmals mit unterschiedlichen Analysemethoden bearbeitet. Die erste Auswertung der Messdaten unter „hb01“ hat im Bereich 0 ... 1 kHz insgesamt 74 Moden, eine zweite Analyse unter „hb02“ immerhin noch 54 Moden ergeben. Abb. 9 gibt eine kleine Auswahl wieder. Ein weiteres *Curve Fitting* „hb03“ führt auf 38 Moden, von denen einige exemplarisch in Abb. 10 wiedergegeben sind.

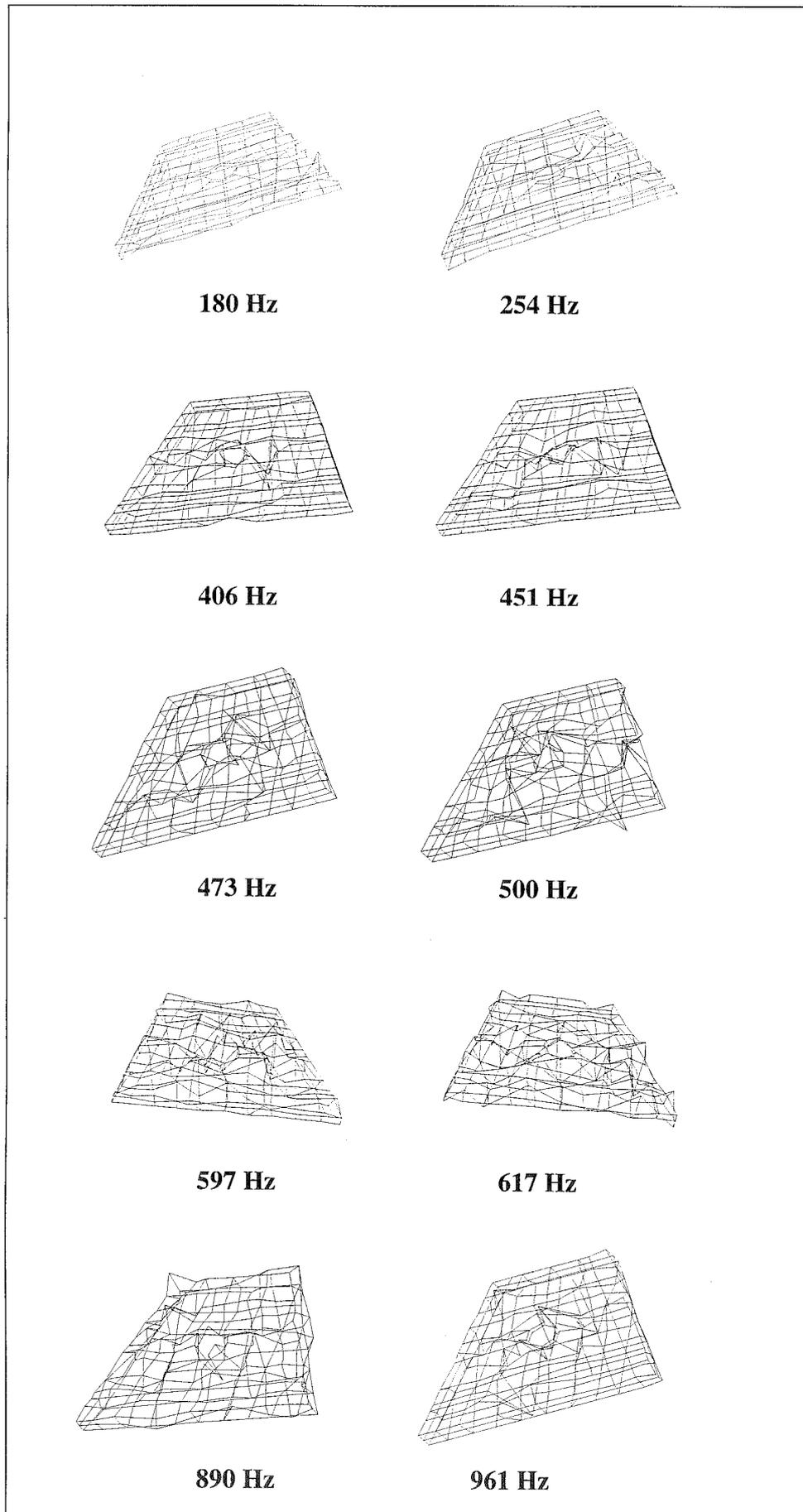


Abb. 9: Einige Ergebnisse der Modalanalyse nach Hänel (2004; in Anhang A, Projekte hb01 und hb02).

Die Schwingungsbilder in den Abb. 9 und 10 sind nicht einfach zu interpretieren. Ein Grund dafür ist die offenbar zu große Maschenweite, mit der feine Unterteilungen der schwingenden Oberfläche nicht mehr erfasst werden können. Ein anderer Grund liegt darin, dass der gesamte Korpus des Instruments untersucht wurde. Dies ist prinzipiell anzustreben, gestaltet jedoch die Auswertung und insbesondere die Darstellung der Ergebnisse mit der in StarModal 5.22 verfügbaren Grafik äußerst schwierig. Die Visualisierung der Ergebnisse wird dadurch nicht gerade vereinfacht, dass die Software-Version 5.22 den Stand von vor vielen Jahren widerspiegelt. So ist in der Grafik weder eine *Hidden-Line*- noch eine Farbdarstellung vorgesehen. Das Ergebnis lässt sich nur als Drahtmodell veranschaulichen.

Wesentliche Details erschließen sich erst in der Betrachtung der als *Complex Mode* animierten Schwingungsbilder, die sich beliebig im Raum drehen lassen. Hänel (2004) hat stehende Schwingungsbilder jeweils unter denjenigen individuellen Betrachtungswinkeln visualisiert, die ihr am besten geeignet erschienen. Als Ergebnis ihrer Auswertung unter Zuhilfenahme der Animation hält Hänel (2004) auf S. 46 u.a. folgende Beobachtungen fest:

- Die Moden bei 237 Hz (Abb. 10) und 254 Hz (Abb. 9) zeigen aktive Bereiche um das Schallloch.
- Die Moden bei 322 Hz (Abb. 10) und 406 Hz (Abb. 9) weisen um das Schallloch nierenförmige Schwingungen auf mit der Schalllochmitte als Grenzlinie. Der untere, breitere Teil des Instruments ist ebenfalls aktiv.
- Die Moden bei 401 Hz (Abb. 10) und 473 Hz (Abb. 9) weisen vier Teilbereiche um das Schallloch auf, ähnlich einem vierblättrigen Kleeblatt.
- Die Mode bei 500 Hz (Abb. 9) zeigt starke Aktivitäten rechts und links vom Schallloch mit nierenförmigem Erscheinungsbild, wie dies auch für die Moden bei 527 Hz und 538 Hz (beide Abb. 10) auftritt.
- Bei den Moden bei 597 Hz und 617 Hz (beide Abb. 9) sind Hoch-Tief-Bewegungen zu erkennen, wobei sich Kreise um das Schallloch bilden.
- Bei der Mode bei 984 Hz (Abb. 10) schwingen Teile gegenläufig, verstärkt in nierenförmigen Bewegungen im Bereich des Schalllochs.

Spätere Vergleiche werden zeigen, dass keine sehr weitgehende Übereinstimmung mit anderen Resultaten besteht.

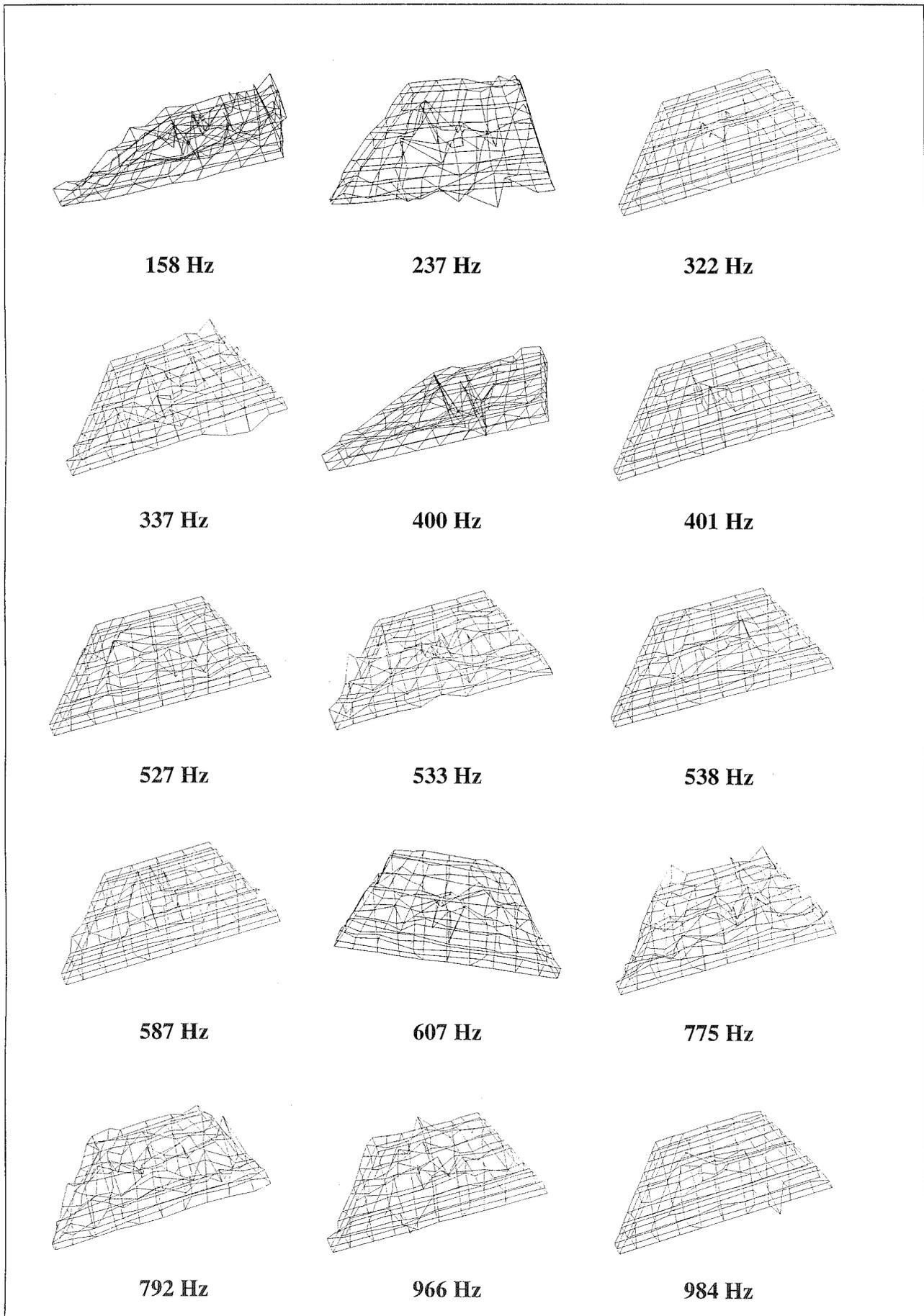


Abb. 10: Einige Ergebnisse der Modalanalyse nach Hänel (2004; in Anhang A, Projekt hb03).

### 3.4. Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur

Dem Autor sind nur wenige einschlägige Untersuchungen bekannt, z.B. eine von Canfield und Rossing (1995). In diesem Artikel wird die Modalanalyse an einem diatonischen Hackbrett des Herstellers Dusty Strings erwähnt. Das Instrument unterscheidet sich von dem hier betrachteten in mehrfacher Hinsicht. Es ist größer (Breite unten 104 cm und oben 50 cm, Höhe 43 cm). Die Decke ist mit den Seitenteilen verleimt. Offenbar ist die Luft im Inneren des Schallkastens nicht über ein zentrales Loch in der Decke, sondern über vier Öffnungen in den Seitenteilen mit der Luft im Außenraum verbunden. Ein mittiges Schallloch, wie es den Beobachtungen von Hänel (2004) zufolge für die Schwingungen der Decke eine große Rolle spielt, existiert demnach bei diesem Instrument nicht.

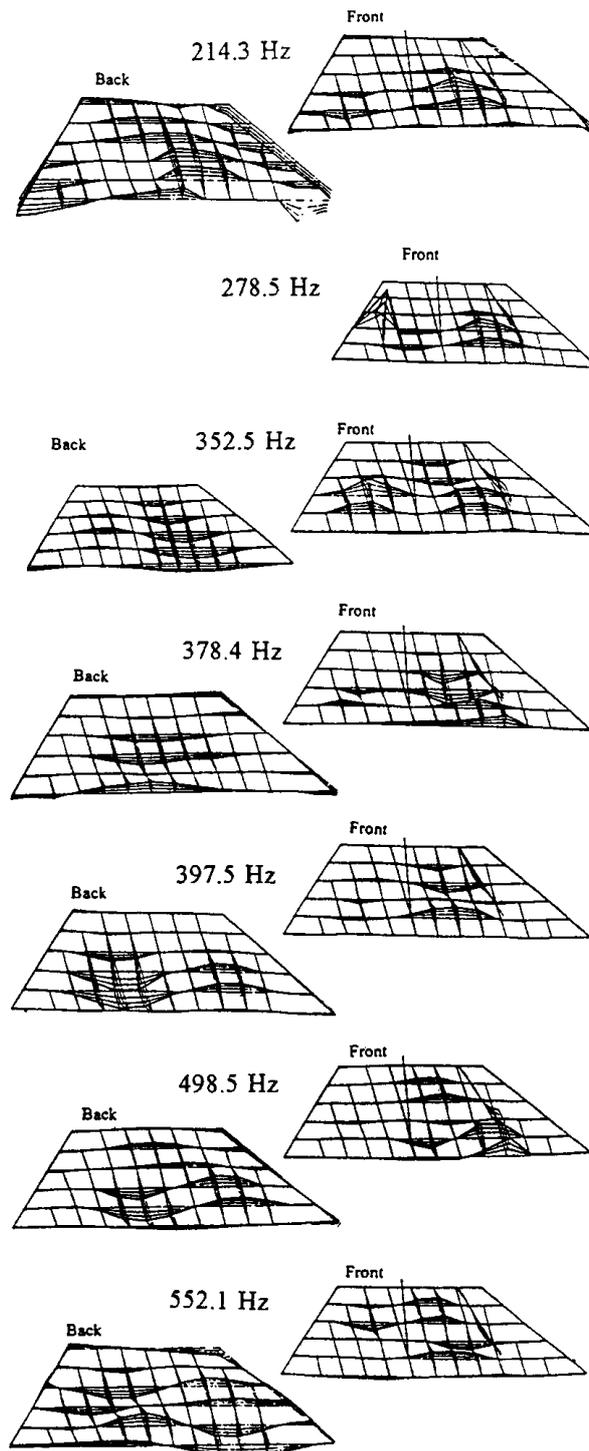


Abb. 11: Schwingungsmoden der Decke und des Bodens eines Hackbretts nach Canfield und Rossing (1995).

Die Autoren sprechen von impulshaltiger Anregung sowie Messung mit einem Mikrofon und einem Beschleunigungsaufnehmer. Dass es äußerst problematisch ist, aus dem gemessenen Schalldruck auf die Schwinggeschwindigkeit des benachbarten Punktes der Oberfläche schließen zu wollen, ist bereits mehrfach ausgeführt worden; siehe z.B. Fleischer (1981, 1982). Offenbar wurden die Decke und der Boden in getrennten Durchgängen unabhängig voneinander vermessen. Die Seitenteile blieben außer Betracht.

Die Ergebnisse sind in Abb. 11 wiedergegeben. Zur Interpretation erklären die Autoren, dass

- bei diesem Instrument, dessen Vorder- und Rückseite an die Seitenteile gelehmt sind, die Schwingungen der Decke und des Bodens stark gekoppelt sind;
- die Mode bei 214 Hz eine Biegemode ist und
- bei drei Moden (214 Hz, 378 Hz und 499 Hz) Decke und Boden in ähnlichen Mustern schwingen und sich in Phase bewegen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse keine allgemein gültigen Einblicke gewähren. In einigen Fällen weisen die Schwingungsmuster Verwandtschaft mit eigenen Ergebnissen auf; vgl. Abschnitt 5.5. Die Gemeinsamkeiten mit denjenigen nach Hänel (2004) sind jedoch, wohl auf Grund der unterschiedlichen Bauart und Größe der untersuchten Instrumente, gering. Offenbar sind die Versuchsmethoden und vor allem die Versuchsobjekte doch zu verschieden, um gemeinsame Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und aufzuzeigen.

### **3.5. Zusammenfassende Bemerkung**

Erste Versuche, eine Modalanalyse der Schwingungen des gesamten Korpus durchzuführen, sind grundsätzlich erfolgreich verlaufen. Jedoch ist die Interpretation der gewonnenen Schwingungsmoden schwierig. Die Versuchsparameter sind in wesentlichen Punkten verbesserungsbedürftig. Es hat sich gezeigt, dass das von Hänel (2004) gewählte Messgitter zu weitmaschig ist, obwohl es 217 Messpunkte umfasst. Manche Schwingungsmoden bilden sich somit nur sehr unzureichend ab. Zudem hat sich der zeitliche Aufwand, der für das Positionieren und Mitteln der Shaker-Anregung notwendig ist, als sehr groß erwiesen. Es wurde deshalb eine weitere Versuchsreihe konzipiert, bei der das institutseigene Scanning Vibrometer zum Einsatz kam.

## 4. MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN (*FIXED EXCITATION*)

Im Jahre 2004 hat Roewer am GEWA-Hackbrett Schwingungen mit einem Scanning Vibrometer der Firma Polytec gemessen und die damit gewonnenen Daten einer Modalanalyse unterworfen. Die Decke und der Boden, nicht jedoch die Seitenteile, wurden untersucht und die zugehörigen Messdaten getrennt verarbeitet.

### 4.1. Schwingungsmessung mit dem Laser

Die Vorgehensweise und die Apparatur, mit der die Messwerte gewonnen wurden, sind ausführlich im nächsten Kapitel geschildert. An dieser Stelle sollen nur kurz einige wesentliche Gesichtspunkte erwähnt werden. Die Schwingungen von Decke und Boden des Hackbretts wurden mit Hilfe eines Polytec *Optical Scanning Head* OFV 055 bestimmt. Im Messkopf ist ein Laser untergebracht. Dieser sendet einen Messstrahl aus, der über zwei Spiegel auf den vorher festgelegten Punkt der schwingenden Oberfläche gelenkt wird. Ein Teil des Laserlichts wird dort reflektiert und gelangt zum Messkopf zurück. In Folge des Dopplereffekts ist die Frequenz des reflektierten Lichts gegenüber derjenigen des Originalstrahls verändert. Aus der Frequenzverschiebung lässt sich auf die Schwinggeschwindigkeit am Messpunkt der reflektierenden Oberfläche schließen. Diese Methode hat den Vorteil, dass kein Messaufnehmer das schwingende Objekt verändert. Details zum Messaufbau können dem Abschnitt 5.1 im folgenden Kapitel entnommen werden.

Im Gegensatz zur vorher beschriebenen Methode wanderte hier der Punkt, an dem die Bewegung gemessen wurde, und der Anregungspunkt blieb während des gesamten Messablaufs derselbe. Die Mess-Situation, die hierbei vorlag, wird als „*Fixed Excitation*“ bezeichnet. Am drittuntersten Saitenchor (Note H3) des linken hohen Steges wurde eine Kraft senkrecht zur Decke aufgebracht und mit einem Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200) gemessen. Diese Art der Anregung wurde bei der Messung der Rückseite beibehalten. Die Messsignale wurden im Steuer- und Auswerterechner des Polytec-Systems gemittelt. Danach wurde für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/Anregungskraft bestimmt.

Vorder- und Rückseite mussten in getrennten Arbeitsgängen untersucht werden. Wie bei allen mechanischen Untersuchungen am Instrumentenkörper wurde versucht, möglichst realistische Anregung und Lagerung zu gewährleisten. Mit der längeren Kante lag das Instrument auf dem Fußboden des Labors auf. Die hölzernen Aufstellfüßchen waren abgenommen. Die Rückseite lehnte an einer quer liegenden Metallstange, so dass es nahezu aufrecht stand und der Messstrahl des Lasers weitgehend senkrecht auf die Oberfläche traf.

In analoger Weise wurde mit der Rückseite verfahren. Mit der längeren Seite ruhte das Hackbrett nach wie vor auf dem PVC-Fußboden. Es befand sich in einer ähnlichen Position wie bei der Vorderseiten-Messung, war allerdings in die andere Richtung gekippt. Nun stützte sich die Vorderseite gegen die waagrechte Haltestange ab. Der Messstrahl fiel annähernd senkrecht auf die Oberfläche. Die Anregung war dieselbe wie bei der Vorderseiten-Messung. Nähere Angaben hierzu finden sich bei Roewer (2004).

Im Anschluss an die Messung wurden sämtliche Übertragungsfunktionen zusammengefasst und in einem *Universal File* in den Modalanalyse-Rechner übernommen. Im Programm-Paket StarModal der Version 5.22 fand dann die abschließende Verarbeitung sowie die Visualisie-

ung der Ergebnisse statt. Nähere Einzelheiten zum Datentransfer, zu den verwendeten Analysemethoden usw. können Roewer (2004) entnommen werden.

## 4.2. Transversalmoden der Deckenschwingung

Da der Laserstrahl die wandnormale Komponente der Oberflächenschwingung erfasst hat, geben ebenso wie im vorhergehenden Kapitel die Messdaten Aufschluss über die Transversalschwingungen, die für den Betrieb wesentlich sind. Das Messgitter, das bei der Vorderseitenmessung Verwendung fand, ist in Abb. 12 dargestellt. Die Maschenweite betrug etwa 6 cm. Dieses Gitter lieferte das „Drahtmodell“ für die Darstellung der weiteren Ergebnisse.

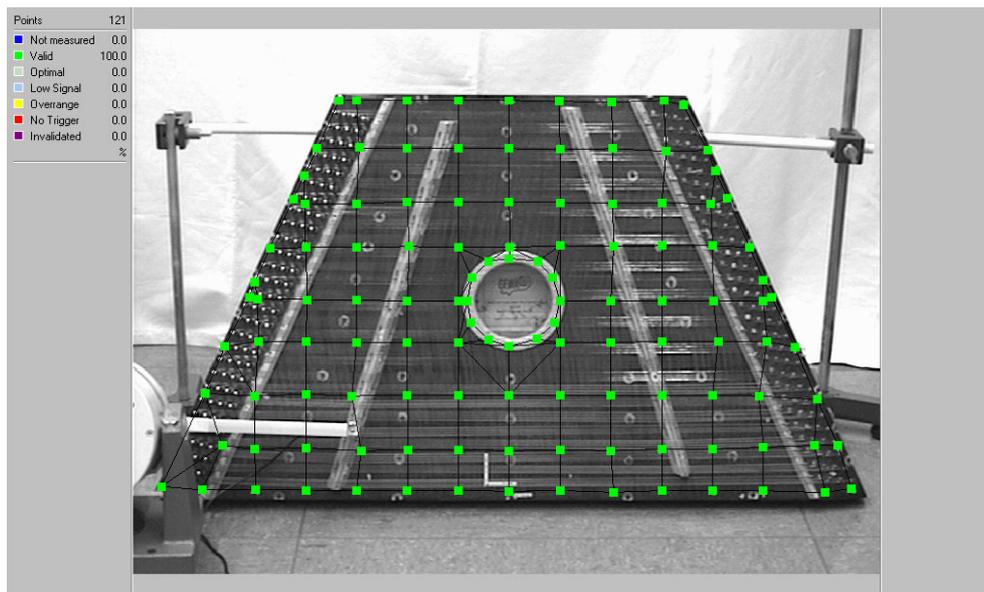


Abb.12: Messgitter bei der *Fixed Response*-Lasermessung auf der Decke.

Abb. 12 zeigt die 121 Messpunkte, an denen der Laser-Strahl die Schwinggeschwindigkeit der Decke abtastete. Roewer (2004) hat die Messdaten mit StarModal analysiert. In Abb. 13 ist

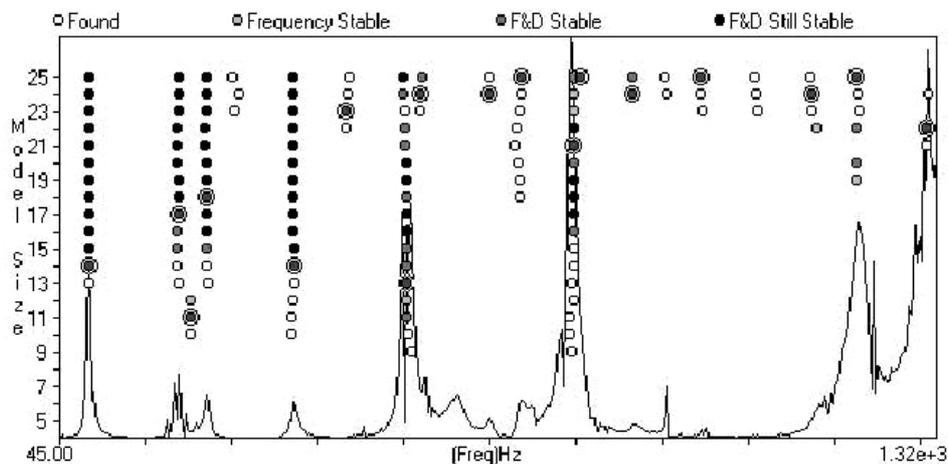


Abb.13: Stabilitätsdiagramm der *Fixed Response*-Lasermessung auf der Decke des Hackbretts.

das Stabilitätsdiagramm im Bereich zwischen 45 Hz und 1320 Hz wiedergegeben. Die eingetragenen Kreise vermitteln einen Eindruck davon, wie stabil die analysierten Moden sind. Je dunkler die Kreise werden, umso verlässlicher ist das entsprechende Analyseergebnis.

Modes	1	2	3	4	5	6
1	1.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
2	0.02	1.00	0.00	0.01	0.00	0.00
3	0.00	0.00	1.00	0.01	0.01	0.00
4	0.00	0.01	0.01	1.00	0.01	0.03
5	0.01	0.00	0.01	0.01	1.00	0.41
6	0.00	0.00	0.00	0.03	0.41	1.00

Abb.14: MAC-Matrix der *Fixed Response*-Lasermessung auf der Decke.

In Abb. 14 ist die MAC-Matrix (*Modal Assurance Criterion*) wiedergegeben. In ihr sind Werte zusammen gefügt, die ein Maß für die Kopplung der Moden darstellen. Die Zahlenwerte reichen von Null bis Eins. Vollständige Korrelation (z.B. einer Mode mit sich selbst) entspricht dem Zahlenwert Eins. Ist eine Mode völlig orthogonal zu einer anderen, wird dies durch den Zahlenwert Null gekennzeichnet. Werte zwischen diesen Extremen deuten auf teilweise Kopplung hin, d.h. dass eine Schwingung nicht vollständig unanhängig von der anderen ist.

Einige Ergebnisse, die sich auf die Vorderseite des Hackbretts beziehen, sind in Abb. 15 zusammen gestellt. Da die Rückseite hier nicht visualisiert ist, erscheint die Darstellung übersichtlicher als in den Abb. 9 und 10. Die Mode 1 ist eine Starrkörperschwingung, d.h. der Instrumentenkörper bewegt sich als Ganzes. Diese Art von Schwingungen wird besonders stark von der Lagerung bei der Messung beeinflusst, hat aber keinerlei musikalische Bedeutung. In der Mode 2 bewegt sich die Decke vergleichbar einem Rochen mit den beiden „Zipfeln“ in Phase. Die Mode Nr. 3 ist dagegen durch eine gegenphasige Bewegung der spitzen Enden geprägt. Sobald die Mode 4 angeregt wird, stülpt sich die Decke um das Schallloch herum ein bzw. aus. Die Mode 5 herauszuarbeiten, hat Schwierigkeiten bereitet. Roewer hat sie mit verschiedenen Verfahren zu extrahieren versucht. Die beiden Varianten der Schwingungsform, wie sie sich bei einer Analyse als Doppelspitze ergeben, sind in Abb. 15 mit den römischen Ziffern I und II gekennzeichnet. Eine andere Art der Verarbeitung ergibt die Form, die nur durch die arabische Ziffer 5 charakterisiert ist. Die Unterschiede sind nicht erheblich; in allen Fällen schwingt die Decke antimetrisch mit einer mittigen Knotenlinie. Bei der Mode 6 tritt, parallel zur Mittellinie, zu den seitlichen Rändern hin auf jeder Seite eine weitere Knotenlinie hinzu.

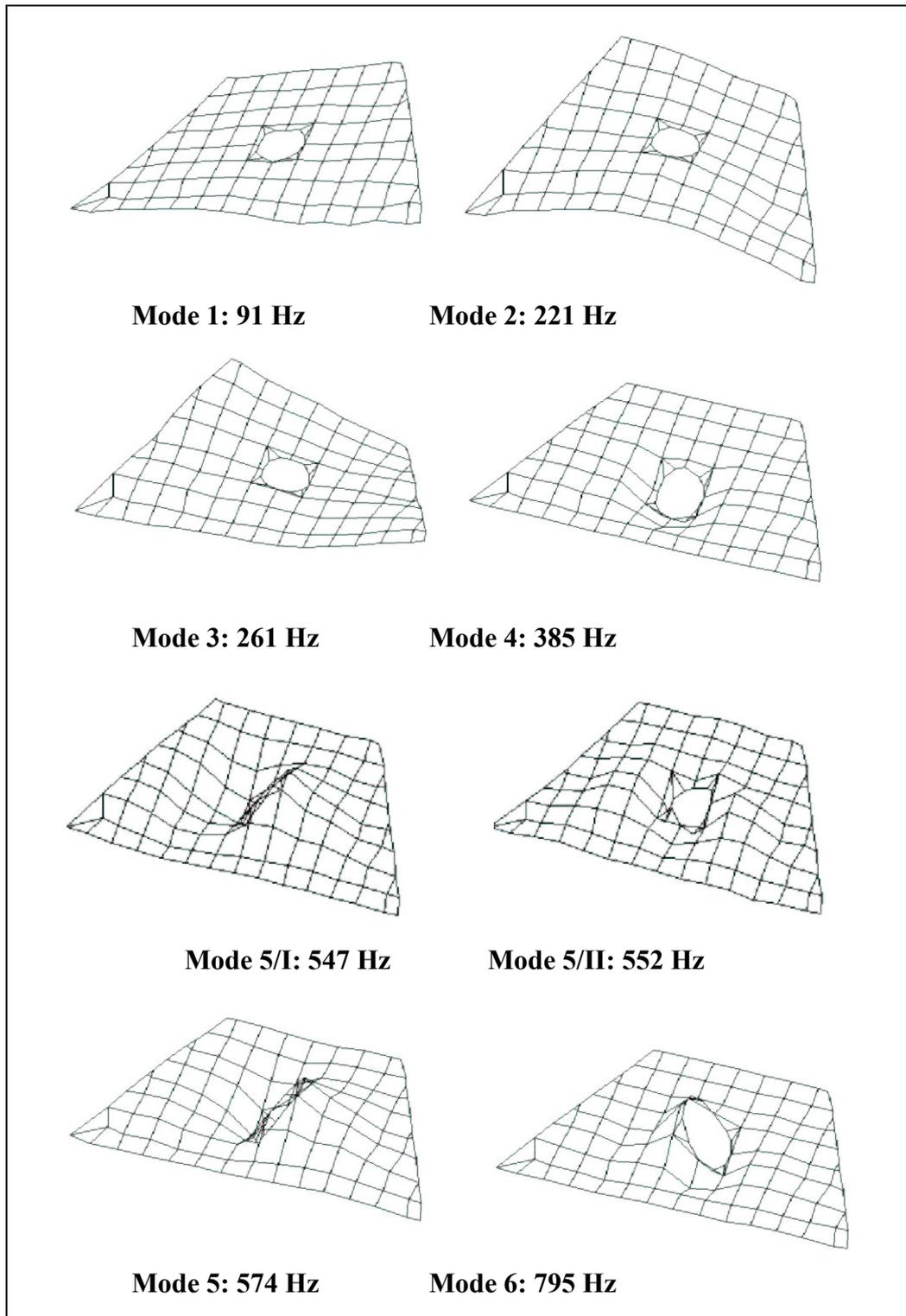


Abb. 15: Einige Schwingungsmoden auf der Decke des Hackbretts nach Roewer (2004).

### 4.3. Transversalmoden der Bodenschwingung

In analoger Weise hat Roewer die Schwingungen der Rückseite erfasst. Das Messgitter, das er dafür verwendet hat, zeigt Abb. 16. Da hier kein Schallloch nachgezeichnet werden musste, war die Anzahl der Messpunkte mit 113 etwas geringer als bei der Vorderseitenmessung.

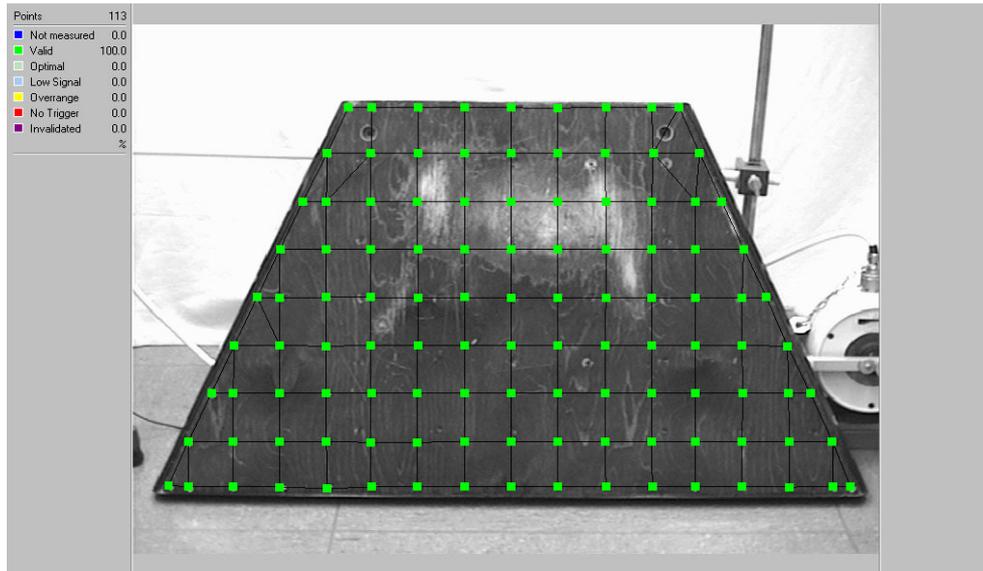


Abb. 16: Messgitter bei der *Fixed Response*-Lasermessung auf dem Boden.

Abb. 17 gibt das Stabilitätsdiagramm im Bereich zwischen 20 Hz und 1300 Hz wieder. Je dunkler die eingezeichneten Kreise sind, umso verlässlicher ist das entsprechende Analyseergebnis einzustufen. Die MAC-Matrix für die Moden, die Roewer als Ergebnis bekommen hat, ist in Abb. 18 dargestellt.

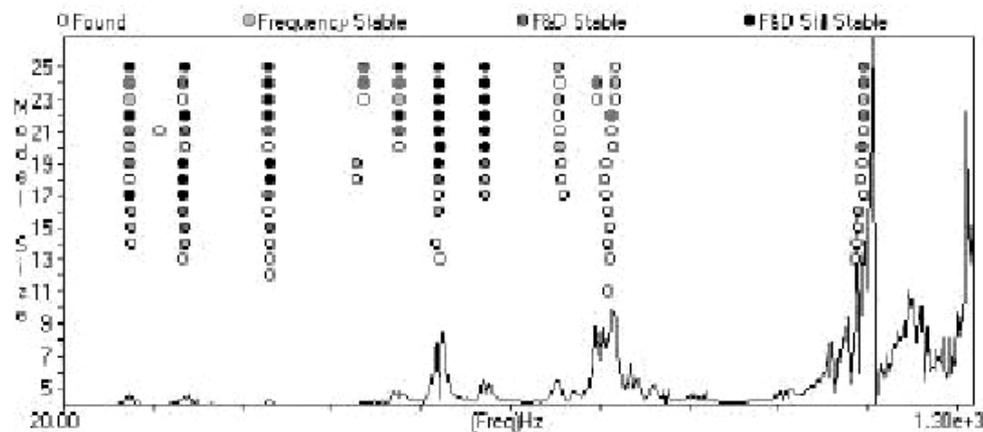


Abb.17: Stabilitätsdiagramm der *Fixed Response*-Lasermessung auf dem Boden des Hackbretts.

Modes	1	2	3	4	5	6	7
1	1.00	0.07	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00
2	0.07	1.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.03
3	0.00	0.00	1.00	0.01	0.01	0.01	0.02
4	0.02	0.05	0.01	1.00	0.12	0.01	0.05
5	0.02	0.00	0.01	0.12	1.00	0.23	0.03
6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.23	1.00	0.24
7	0.00	0.03	0.02	0.05	0.03	0.24	1.00

Abb.18: MAC-Matrix der *Fixed Response*-Lasermessung auf dem Boden.

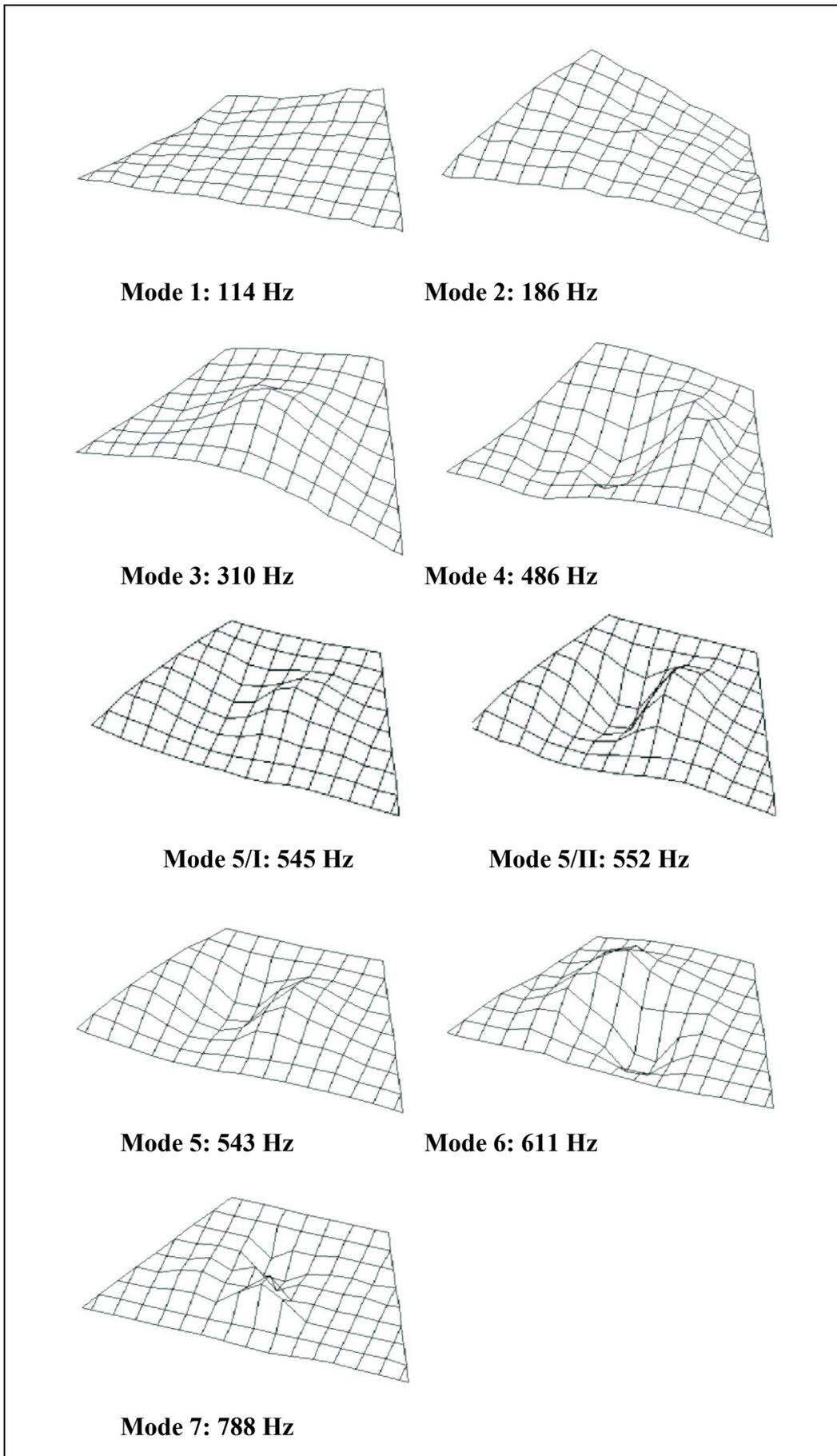


Abb. 19: Einige Schwingungsmoden auf dem Boden des Hackbretts nach Roewer (2004).

Wie für die Vorderseite sind für die Rückseite einige Moden wiedergegeben. Bei der Mode 1 scheint es sich überwiegend um eine Starrkörperschwingung zu handeln. Wider Erwarten stellt sie nicht das Spiegelbild der entsprechenden Deckenmode dar und tritt auch bei einer anderen Frequenz auf. Dieses Phänomen prägt sich mehr oder weniger bei allen Messungen aus, bei denen das Instrument für die Messung auf der Vorderseite nicht exakt so gelagert werden konnte, wie für die Messung auf der Rückseite. Da solche Schwingungen unterhalb des Frequenzbereiches liegen, in dem das Instrument musikalische Töne erzeugt, spielen sie für den musikalischen Betrieb keine Rolle. Solche Diskrepanzen der Schwingungsfrequenzen und -formen sind jedoch ein Indiz für verschiedenartige Auflagerung. Die dadurch bedingten Unterschiede können sich, wenn auch mit abnehmender Intensität, ebenfalls bei höherfrequenten Moden bemerkbar machen.

In der Mode 2 bewegen sich die beiden spitzen Enden des Bodens in Phase. Die Mode 3 ist durch eine zusätzliche Ausstülpung der Mitte geprägt. Im Gegensatz zu dieser symmetrischen Form ist die Mode 4 antimetrisch; sie weist eine Knotenlinie in der Mitte auf. Ähnlich wie bei der Decke hat auch beim Boden die Analyse der Mode 5 Schwierigkeiten bereitet. Es wurden deshalb unterschiedliche Auswertungsmethoden angewandt. Zwei Varianten der Eigenform, die sie sich mittels einer Analyse als Doppelspitze ergeben, sind durch die römischen Ziffern I und II unterschieden. Wird nur eine Mode zu Grunde gelegt, so ergibt sich die Form, die durch die arabische Ziffer 5 allein gekennzeichnet ist. Die Decke schwingt antimetrisch mit einer mittigen Knotenlinie. Bei der Mode 6 tritt eine diagonale Knotenlinie auf. Die Mode 7 weist eine Knotenlinie parallel zur Längsseite auf.

#### 4.4. Zusammenfassende Bemerkung

Ursprünglich war ein direkter Vergleich der hier betrachteten Ergebnisse mit denen des vorhergehenden Kapitels angestrebt gewesen. Dieser hat sich aus mehreren Gründen als nicht statthaft erwiesen. So hat Roewer (2004) Vorder- und Rückseite getrennt gemessen und analysiert. Eine gemeinsame Verarbeitung der Messdaten, wie sie Hänel (2004) durchgeführt hat, ist ihm nicht gelungen. Auch hat Roewer im Gegensatz zu Hänel die Seitenwände nicht untersucht. Offenbar war auch bei der Vibrometer-Messung nicht in ausreichendem Maße dafür gesorgt worden, dass über alle Arbeitsschritte hinweg die Lagerung des Instruments unverändert blieb.

Im hier betrachteten Fall wurden Decken- und Bodenschwingungen getrennt untersucht. Derzeit sind Bestrebungen im Gange, Vorder- und Rückseite in einem Arbeitsgang zu analysieren. Das Ziel ist es, nicht Decken- und Bodenmoden isoliert, sondern Korpusmoden *en bloc* aufzuspüren und darzustellen. In Hinsicht auf isolierte Decken- bzw. Bodenschwingungen hat die Modalanalyse von Typ *Fixed Excitation* im Vergleich zu derjenigen mit *Fixed Response* sehr brauchbare Resultate ergeben. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die Messung mit dem Laser-Vibrometer sehr rasch abläuft und es demzufolge leicht fällt, unzulängliche Messungen so lange zu wiederholen, bis die Eingangsdaten für die Modalanalyse von ausreichend hoher Qualität sind.

Vorhandenes Datenmaterial wird derzeit mit dem Ziel weiter verarbeitet, Schwingungen des Gesamtinstruments zu extrahieren. Darüber hinaus soll in einer gesonderten Arbeit geklärt werden, ob sich der hohe Aufwand einer nachgeschalteten Modalanalyse lohnt oder ob es im Zusammenhang mit Musikinstrumenten ausreichen könnte, Betriebsschwingungsformen zu ermitteln. Solche Schwingungsmuster, im Englischen als *Operating Deflection Shapes* bezeichnet, werden im Folgenden für Decke und Boden präsentiert. Der hierfür erforderliche Aufwand ist gering. Es lassen sich sehr rasch aussagekräftige Resultate erzielen, die wesentliche Einblicke in das Schwingungsverhalten des Instruments ermöglichen.

## 5. UNTERSUCHUNG DER KORPUSSCHWINGUNGEN MIT DEM SCANNING VIBROMETER

In Ergänzung der bereits vorliegenden Messergebnisse wurden eigene Untersuchungen durchgeführt, in denen die Schwingungen der Vorder- und Rückseite des Hackbretts mit dem Polytec Scanning Vibrometer gemessen und mit der mitgelieferten Software visualisiert wurden. Der Messaufbau ähnelt demjenigen, der schon beschrieben worden ist. Versuch und eigene Ergebnisse sind im vorliegenden Kapitel dargestellt.

### 5.1. Messung auf der Decke

Vorder- und Rückseite wurden getrennt untersucht. Abb. 20 zeigt die Situation bei der Messung der Vorderseite (Decke). Mit der Kante der längeren Seite lag das Instrument auf dem PVC-Fußboden auf. Die Lagerung am schmalen Ende war anders, als im vorhergehenden Kapitel (Roewer 2004) beschrieben. Anstelle der hölzernen Aufstellfüßchen waren zwei Metallrohre eingeschoben, so dass das Hackbrett nahezu aufrecht stand und der Messstrahl des Lasers möglichst senkrecht auf die Oberfläche traf. Links vorne im Bild erkennt man einen Teil des Schwenkgestells, in dem sich der Schwingerreger LDS V 406 befand. Hell bildet sich der metallene Ausleger ab, mit dem der Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200) beim drittuntersten Saitenchor (Note H3) senkrecht gegen den linken hohen Steg gedrückt wurde. Der Schwingerreger wurde mit einem Pseudo-Rauschsignal aus einem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A gespeist, das in einem Leistungsverstärker LDS PA 25 verstärkt wurde. Diese Art der Anregung wurde bei der Messung der Rückseite beibehalten.

Abb. 20: Messsituation bei der Vibrometer-Messung an der Decke des Hackbretts. Links unten erkennt man den Schwingerreger mit dem Ausleger (hell), an dem sich der Kraftaufnehmer befindet.



Das Signal des Kraftaufnehmers wurde in einem *Conditioning Amplifier* B&K 2626 verstärkt und diente als Eingangsgröße bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen. Die Ausgangsgröße wurde mittels eines Polytec *Optical Scanning Head* OFV 055 bestimmt. Der Messkopf enthält u.a. einen Laser. Dieser sendet einen Messstrahl aus, der vom schwingenden Objekt reflektiert wird und teilweise zum Messkopf zurück gelangt. Unter Ausnutzung des Dopplereffekts lässt sich aus der Frequenzverschiebung des Laserlichts auf die Schwinggeschwindigkeit der reflektierenden Oberfläche schließen. Die Messsignale wurden im Steuer- und Auswerterechner fünfmal komplex gemittelt. Für jeden Messpunkt auf der Oberfläche wurde eine Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/Anregungskraft bestimmt.

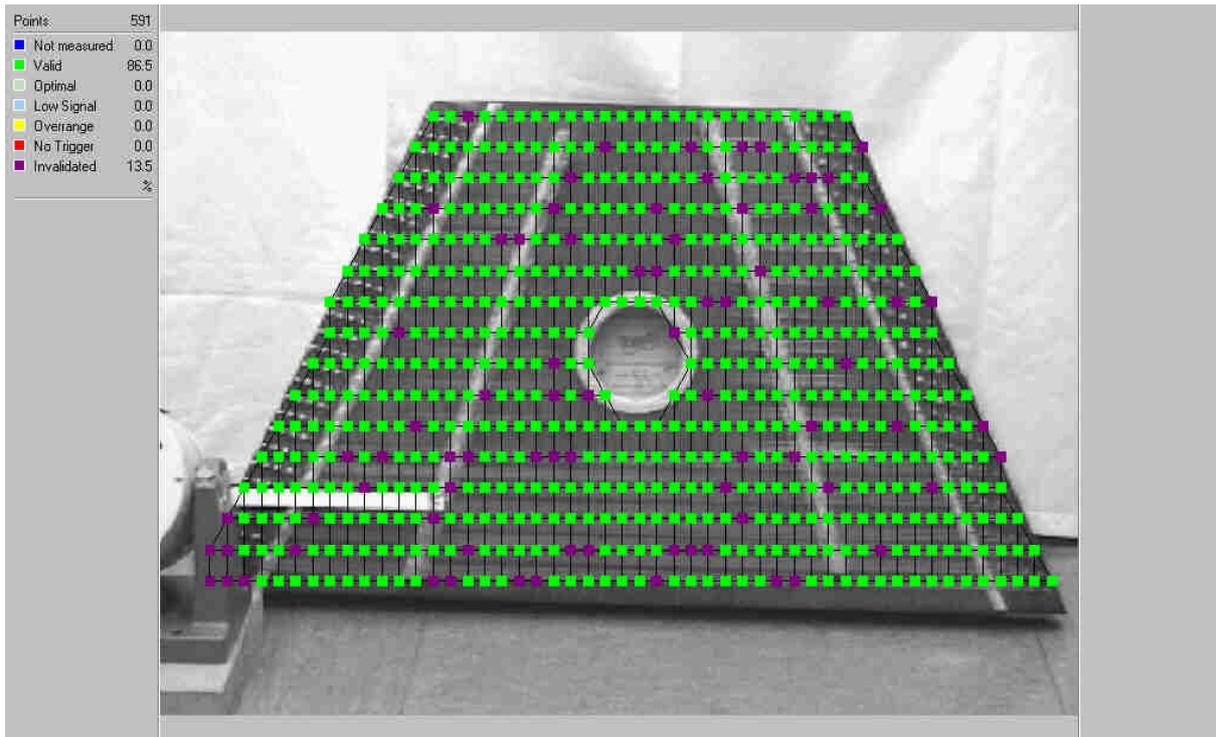


Abb. 21: Messgitter auf der Decke des Hackbretts.

Abb. 21 zeigt das Messgitter mit 591 Messpunkten. Dieses ist wesentlich dichter als das im vorhergehenden Kapitel (121 Messpunkte) beschriebene. Als Messbandbreite wurden Frequenzen bis 1 kHz gewählt. Mit 400 Frequenzlinien ergab sich daraus eine Frequenzauflösung von 2,5 Hz. In Anpassung an diese Parameter wurde im Generator hp 33120A als Messsignal ein Pseudo-Rauschen erzeugt. Messpunkte, die unbrauchbare Ergebnisse lieferten, beispielsweise weil sie auf eine Saite zu liegen kamen, wurden vor der Auswertung invalidiert. Im betrachteten Fall waren dies etwa 10% aller Punkte.

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel wurden die Vibrometer-Daten nicht im Sinne einer Modalanalyse ausgewertet. Vielmehr wurden sie lediglich mittels der Systemsoftware analysiert. Grundlage dafür liefert die Gesamt-Übertragungsfunktion, wie sie das obere Diagramm von Abb. 22 zeigt. Vor allem bei etwas mehr als 500 Hz erweist sich die Decke als sehr schwingfreudig, jedoch sind noch eine ganze Reihe weiterer lokaler Maxima zu erkennen.

An Hand von Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktion wählte der Experimentator diejenigen Frequenzen aus, für welche die Schwingungsverteilungen dargestellt werden sollten. Im unteren Diagramm sind bereits die Frequenzbänder eingezeichnet, die der Experimentator gesetzt hat. Die Schwingungsmuster, die sich für die markieren diejenigen Frequenzen ergeben, werden üblicherweise als Betriebsschwingungsformen, englisch *Operating Deflection Shapes* (ODSs; siehe Richardson 1997) bezeichnet und können auf unterschiedliche Weise visualisiert werden.

## 5.2. Transversalschwingungen der Decke

Zunächst werden die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen präsentiert. Danach werden die wenigen einschlägigen Resultate aus der Literatur zitiert, die dem Autor im Zusammenhang mit der vorliegenden Aufgabenstellung bekannt sind.

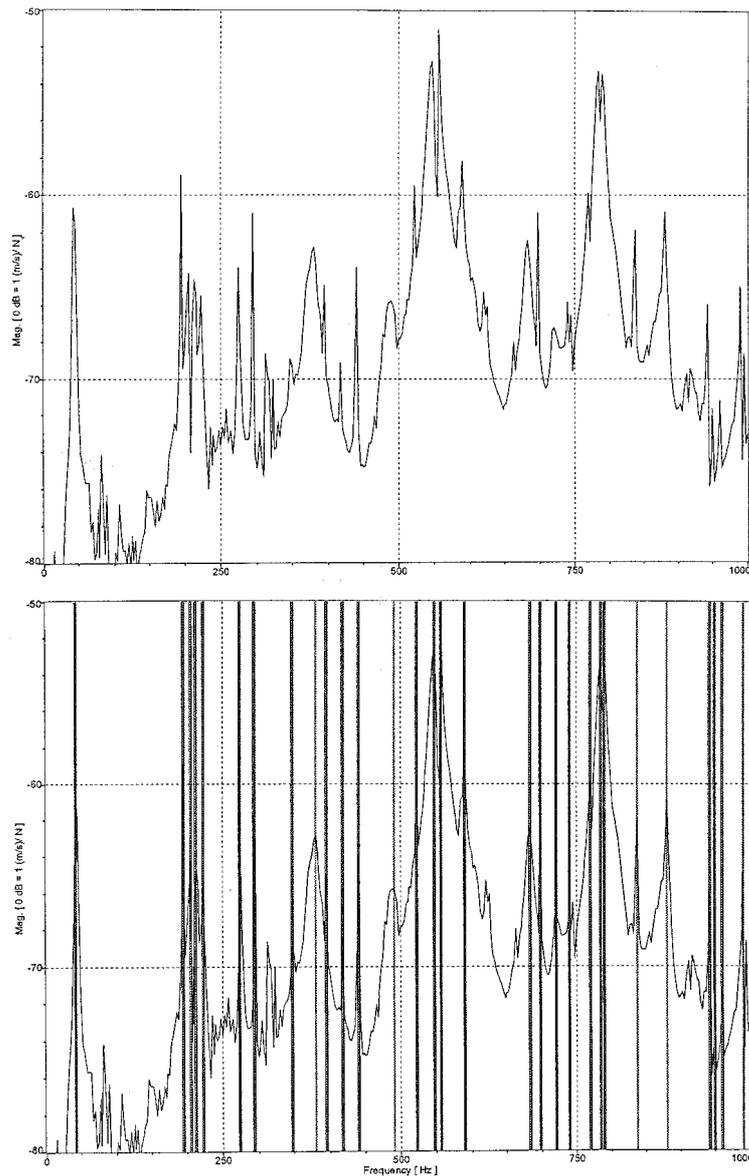


Abb. 22: Oben: Gesamt-Übertragungsfunktion der Deckenschwingung, dargestellt als Betrag im logarithmischen Maßstab in Abhängigkeit von der Frequenz.  
Unten: Mit Frequenzbändern für die Darstellung der Betriebsschwingungsformen (ODS).

### 5.2.1. Eigene Ergebnisse

Die Messung liefert eine Vielzahl von Betriebsschwingungsformen, von denen einige in Abb. 23 zusammen gestellt sind. Das Bewegungsmuster ist nach Art Chladni'scher Klangfiguren visualisiert. Man stelle sich ein Hackbrett mit heller Oberfläche vor. Auf das waagrecht liegende Instrument werden dunkle Körner aufgebracht und der Korpus mit der angegebenen Frequenz in stationäre Schwingungen versetzt. Wo die Oberfläche stark schwingt, hüpfen die Körner und bewegen sich zu den Stellen hin, an denen sich die Oberfläche in Ruhe befindet. Auf diese Weise bilden sich Schwingungsbäuche hell und Schwingungsknoten dunkel ab. Diese Darstellungsart gibt den Sachverhalt hinreichend wieder, wenn lediglich Schwarz-Weiß für die Wiedergabe zur Verfügung stehen. Kommen Farben hinzu, wird das Bild einprägsamer. Anhang 7 zeigt einige Schwingungsmuster der Decke, bei denen die Amplitude in verschiedenen Grüntönen kodiert ist. Das in Schwarz übergehende Grün kennzeichnet Schwingungsknoten, das in Weiß übergehende Grün dagegen Schwingungsbäuche.

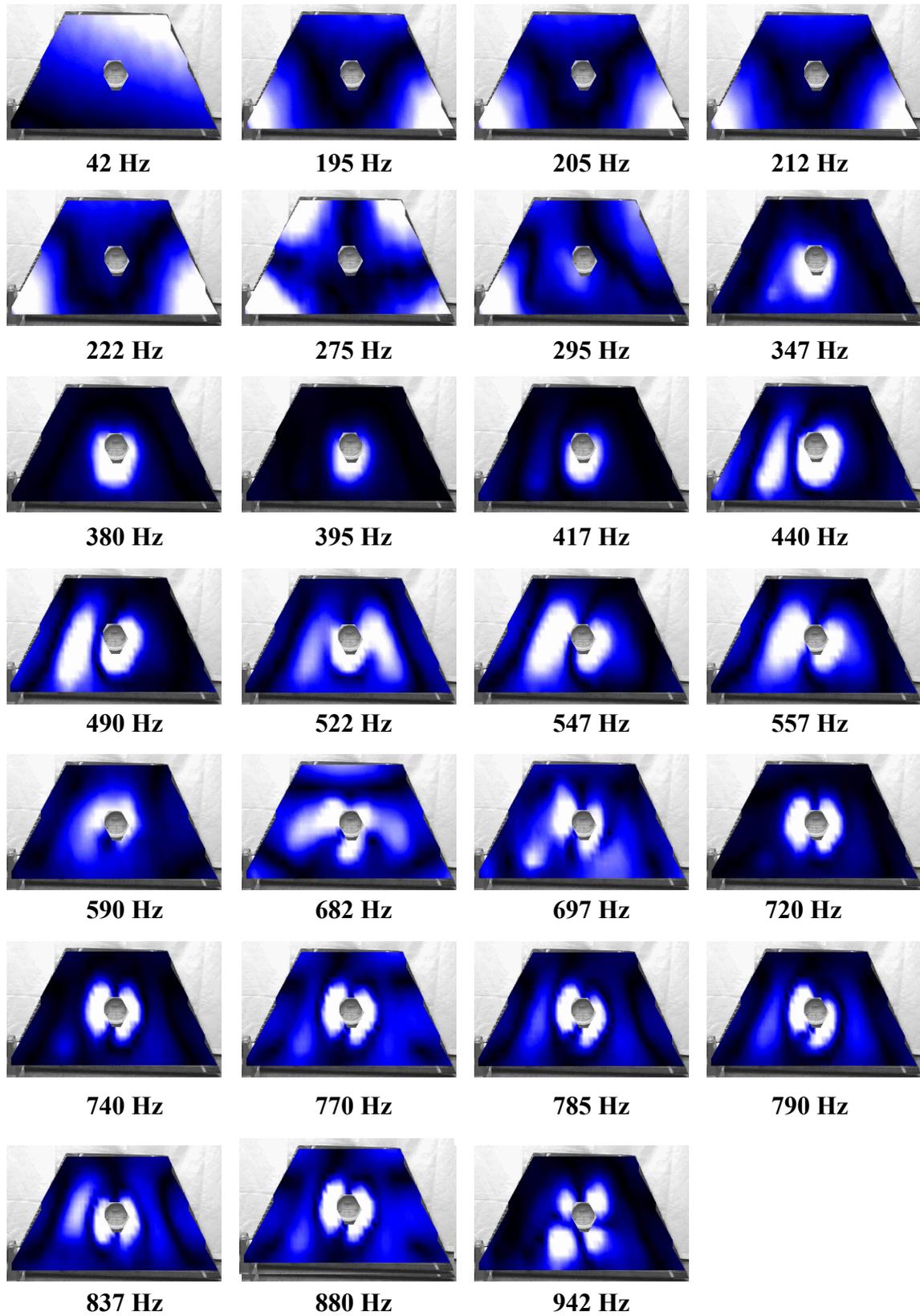


Abb. 23: Einige Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf der Decke des Hackbretts.

Das Vorzeichen, also die wesentliche Information, ob Teile der Oberfläche gleichsinnig oder gegensinnig schwingen, geht dabei naturgemäß verloren. Eine weitere Art der Visualisierung ist daher in den beiden Teilen von Anhang 8 angewandt worden. In einer dreidimensionalen Darstellung blickt man schräg auf die Decke und sieht in starker Überhöhung deren Verformung. Da sich die tatsächliche Schwingungsform nur im direkten Vergleich mit der unverformten Konfiguration beurteilen lässt, ist als erstes Bild einer jeden Zusammenstellung die Ruhelage wiedergegeben. Darüber hinaus ist das Vorzeichen in Farben umgesetzt. Rot entspricht der Bewegung aus der Deckenoberfläche heraus, grün in die Ebene hinein. Das Schwingungsbild stellt somit eine Art Blitzlichtaufnahme dar, d.h. die Bewegung ist „eingefroren“.

Gleichartige Schwingungsmuster treten häufig bei mehreren, meist dicht benachbarten Frequenzen auf. Dabei werden Grundformen erkennbar, die in Abb. 24 zusammen gefasst sind. Um die Zuordnung zur Oberfläche des Instruments - beispielsweise zu den Stegen - zu erleichtern, ist das überlagerte Schwingungsbild so transparent gemacht, dass Details des Videobildes erkennbar sind. Folgende Grundtypen der Deckenschwingung sind zu unterscheiden:

- Typ De0: Unsymmetrische Starrkörperschwingung bei 42 Hz; spielt für die Schallabstrahlung keine Rolle und wird nicht weiter behandelt.
- Typ De1: Bei 195 Hz bis 222 Hz symmetrische Bewegung nach Art eines Rochens.
- Typ De2: Bei 275 Hz asymmetrische Bewegung des „Rochens“.
- Typ De3: Bei 347 Hz bis 395 Hz stülpt sich die Decke um das Schallloch ein und aus; der Rest der Decke ist in Ruhe.
- Typ De4: Bei 417 Hz bis 490 Hz schwingt die Decke asymmetrisch; der linke Teil der Decke bewegt sich in Gegenphase zum mittleren Bereich um das Schallloch.
- Typ De5: Bei 522 Hz bis 557 Hz schwingt die Decke asymmetrisch mit den beiden äußeren Teilen in Gegenphase.
- Typ De6: Bei 720 Hz bis 740 Hz verläuft ein Knoten entlang der Mittellinie der Decke. Die beiden Bereiche in unmittelbarer Nähe des Schalllochs schwingen gegeneinander.
- Typ De7: Bei 770 Hz bis 790 Hz bilden sich zusätzliche Knotenlinien in Längsrichtung aus, so dass die Decke im Bereich der Stege sich jetzt ebenfalls mitbewegt.
- Typ De8: Bei 837 Hz erscheint im rechten Teil eine weitere Knotenlinie in Längsrichtung.
- Typ De9: Bei 880 Hz bis 942 Hz schwingt die Decke um das Schallloch herum mit zwei „Knotendurchmessern“.

Eine Gegenüberstellung mit den Resultaten von Hänel (2004; vgl. auch Kapitel 3) lässt in einigen wenigen Punkten Gemeinsamkeiten erkennen. So könnte Typ De3 mit den Moden bei 237 Hz (Abb. 10) und 254 Hz (Abb. 9) übereinstimmen. Schwingungstyp De5 zeigt Verwandtschaft mit der Mode bei 500 Hz (Abb. 9), die starke Aktivitäten rechts und links vom Schallloch mit nierenförmigem Erscheinungsbild aufweist, wie dies auch für die Moden bei 527 Hz und 538 Hz (beide Abb. 10) gilt. Die Beschreibung der Mode bei 984 Hz in Abb. 10 (Teile schwingen gegenläufig, verstärkt in nierenförmigen Bewegungen im Bereich des Schalllochs) könnte auch auf die Typen De8 und De9 der Deckenschwingung zutreffen.

Abgesehen von der Starrkörpermode De1 ähneln die oben angegebenen Grundformen den Moden, wie sie Roewer (2004) bestimmt hat und wie sie in Abb. 15 wiedergegeben sind. Einige Unterschiede in Details der Formen und Frequenzen bleiben jedoch. So ergibt der Vergleich mit den Ergebnissen dieser Modalanalyse im Großen und Ganzen Übereinstimmung. Abweichungen im Detail zu den eigenen Resultaten bleiben jedoch festzuhalten.

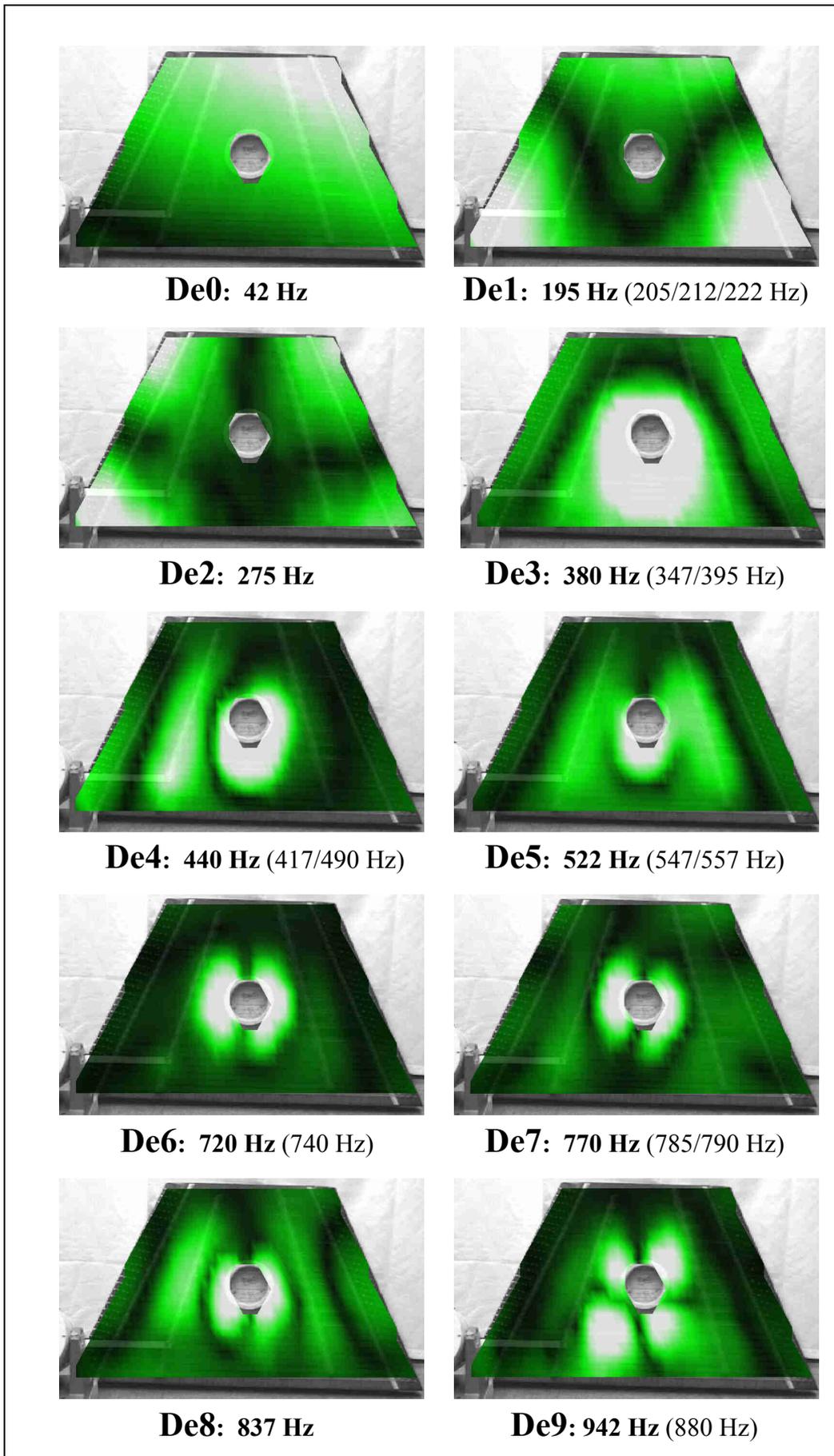


Abb. 24: Die neun Grundtypen der Deckenschwingung als Ergebnis der Vibrometer-Messung.

### 5.2.2. Ergebnisse aus der Literatur

Canfield und Rossing (1995) haben mittels holografischer Interferometrie zwei Arten von Hackbrettern untersucht. Diese Instrumente unterscheiden sich in wesentlichen Merkmalen vom hier betrachteten GEWA-Hackbrett. Um überhaupt einen Vergleich mit anderen Autoren zu haben, werden ihre Schwingungsmuster hier trotzdem präsentiert.

Beim diatonischen Hackbrett von Walter Sweet ist nach Canfield und Rossing (1995) die Decke nur seitlich mit dem Rahmen verleimt. Oben und unten kann sie dagegen frei schwingen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, dass sich in der Decke offenbar kein Schallloch befindet. Mit 90 cm an der Breitseite und 49 cm an der Schmalseite hat dieses Hackbrett etwa die Größe des Instruments von GEWA. Die Ergebnisse der Laser-Untersuchung können Abb. 25 entnommen werden. Die Verzerrungen der beiden Bilder rühren von einer schlechten Kopie der Veröffentlichung her.

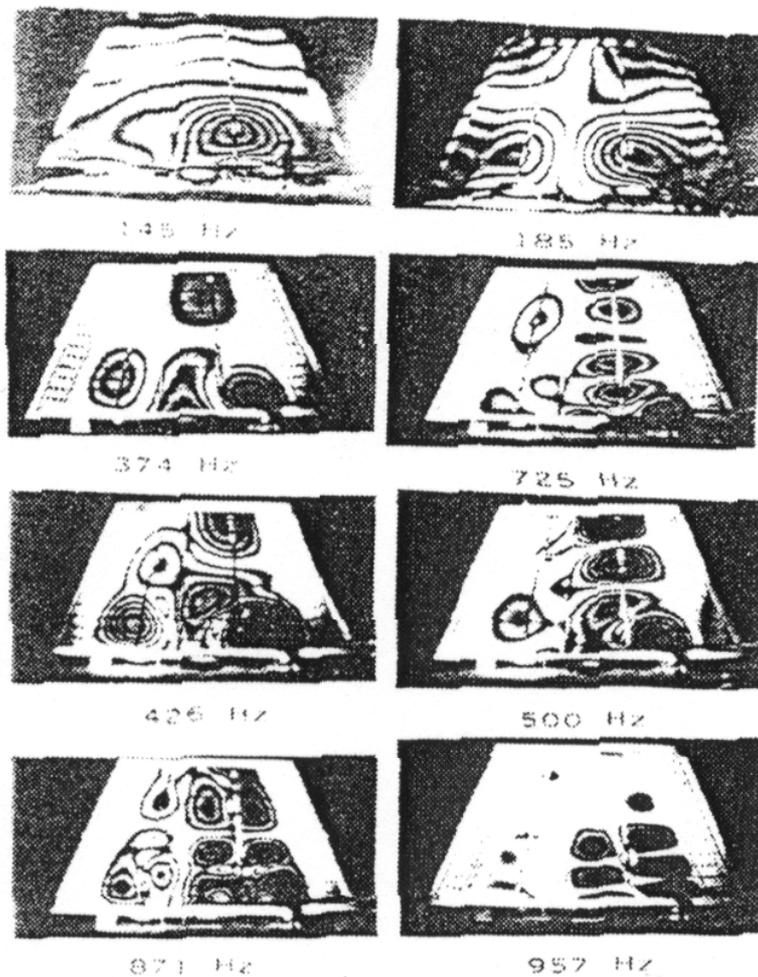


Abb. 25: Schwingungsmuster der Decke eines Walter-Sweet-Hackbretts, gemessen mit holografischer Interferometrie, nach Canfield und Rossing (1995).

Auffällig ist, dass den Schwingungsmustern von Abb. 25 weitgehend die Symmetrie fehlt. Dies ist möglicherweise eine Folge des außermittigen Stegs, wie er bei diatonischen Hackbrettern verwendet wird, und der daraus resultierenden asymmetrischen Belastung. Ebenso gravierend scheint sich auszuwirken, dass kein zentrales Schallloch die Schwingung mitbestimmt. Folgende Gemeinsamkeiten lassen sich hinsichtlich der beiden oberen Schwingungsbilder entnehmen:

- Bei 145 Hz (links oben) tritt ein Schwingungsbauch auf. Diese Schwingung hat Ähnlichkeit mit der Deckenschwingung De3; vgl. Abb. 24. Diese bildet sich allerdings erst bei wesentlich höheren Frequenzen aus.
- Das Schwingungsmuster bei 185 Hz (rechts oben) könnte der Grundform De2 entsprechen; vgl. Abb. 24 für 275 Hz.

Die übrigen Schwingungsmuster konnten bei den eigenen Messungen nicht nachgewiesen werden.

Canfield und Rossing (1995) haben noch ein weiteres diatonisches Hackbrett untersucht, das Greg Canfield selbst gefertigt hat. Es misst 106 cm an der Breitseite, 29 cm an der Schmalseite und ist 44 cm hoch. Das Instrument hat ein *Floating Soundboard*, offenbar ohne Schallloch. Die Deckenschwingungen sind in Abb. 26 einander gegenüber gestellt.

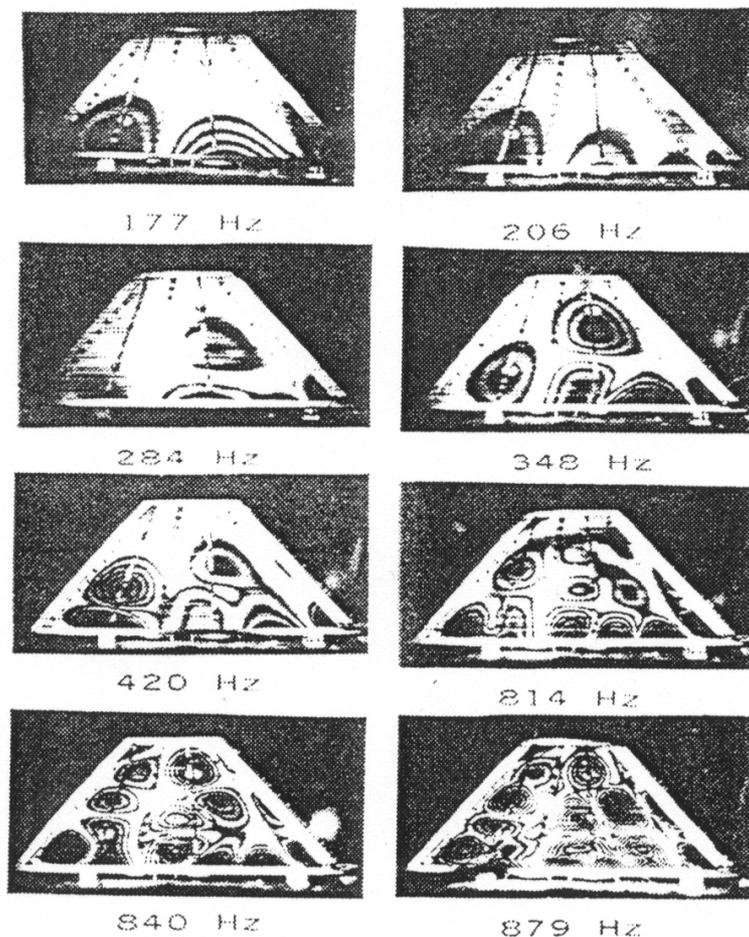


Abb. 26: Schwingungsmuster der Decke eines Greg-Canfield-Hackbretts, gemessen mit holografischer Interferometrie, nach Canfield und Rossing (1995).

Die Schwingungsmuster in Abb. 26 zeigen wenig Übereinstimmung mit den eigenen von Abb. 24. Allenfalls das Schwingungsmuster bei 177 Hz (links oben) ähnelt dem Grundtyp De1. Offenbar sind Abmessungen, Bauart und Randbedingungen der beiden Decken so unterschiedlich, dass jedes Instrument hinsichtlich der Schwingung ein anderes „Eigenleben“ entfaltet.

### 5.3. Messung auf dem Boden

Abb. 27 gibt die Situation wieder, als die Schwingung auf der Rückseite gemessen wurde. Mit der längeren Seite ruhte das Hackbrett nach wie vor mit der Kante auf dem Fußboden. Die hölzernen Aufstellfüßchen waren wieder eingesteckt. Sie waren an dem quergestellten Metallrohr befestigt, das im Foto hell abgebildet ist. Das Hackbrett befand sich somit in einer ähnlichen Position wie bei der Vorderseiten-Messung. Der Messstrahl des Lasers traf nunmehr nicht ganz, aber weitgehend senkrecht auf die Oberfläche. Die Anregung war dieselbe wie bei der Vorderseiten-Messung. Der Schwingerreger LDS V 406 wurde mitsamt dem Hackbrett gedreht und wirkte über einen Ausleger nach wie vor auf dieselbe Stelle, d.h. senkrecht gegen den linken hohen Steg beim drittuntersten Saitenchor. Rechts unten im Bild erkennt man den Schwingerreger samt dem metallenen Ausleger, der den Kraftaufnehmer B&K 8200 trug. Wiederum wurde ein Pseudo-Rauschen aus einem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A, verstärkt durch einen Leistungsverstärker LDS PA 25, verwendet. Der Rest der Messkette blieb ebenfalls unverändert.

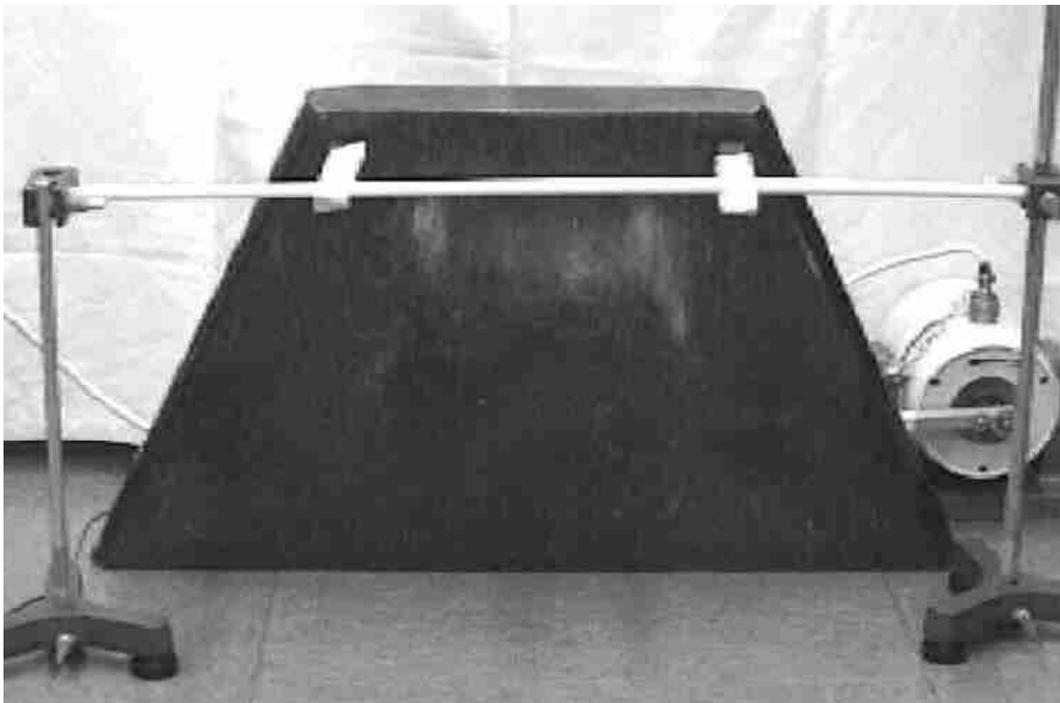


Abb. 27: Messsituation bei der Vibrometer-Messung am Boden des Hackbretts.  
Rechts hinten erkennt man den Schwingerreger mit dem Ausleger.

In Abb. 28 erkennt man das Messgitter mit 453 Punkten. Als Messbandbreite wurde 1 kHz beibehalten. Mit 400 Frequenzlinien folgte daraus eine Frequenzauflösung von 2,5 Hz. Da die Rückseite glatt und ohne Beschläge ist, erwiesen sich die Messungen für die meisten Punkte als brauchbar. Gleichwohl mussten einige der Messpunkte („Ausreißer“) vor der weiteren Verarbeitung invalidiert werden.

Abb. 29 zeigt, wie diese Vibrometer-Daten ausgewertet wurden. Es ist die Gesamt-Übertragungsfunktion der Boden-Messung wiedergegeben. Der Experimentator hat an Hand der Maxima dieser Übertragungsfunktion die Frequenzen festgelegt, für welche die Schwingungsformen visualisiert werden sollten. Die auf diese Weise gewählten Frequenzbänder sind im unteren Diagramm eingezeichnet. Die zugehörigen Betriebsschwingungsformen (ODSs) sind in den Abb. 30 und 31 sowie in Anhang 9 und 10 zusammen gestellt.

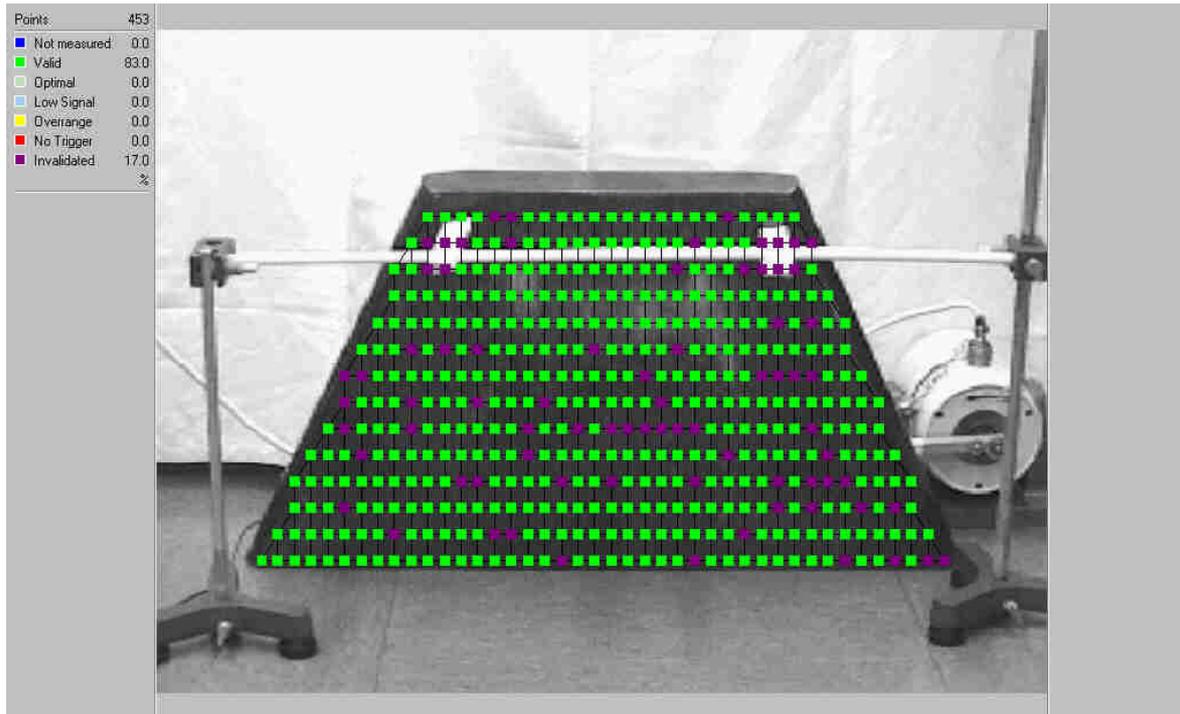


Abb. 28: Messgitter auf dem Boden des Hackbretts.

## 5.4. Transversalschwingungen des Bodens

Wiederum werden im ersten Schritt die Ergebnisse der eigenen Experimente präsentiert. Im Anschluss daran werden die wenigen einschlägigen Resultate angeführt, die der Autor hinsichtlich der vorliegenden Aufgabenstellung kennt.

### 5.4.1. Eigene Ergebnisse

Einige der Betriebsschwingungsformen sind Abb. 30 zu entnehmen. Wie auch in der Abb. 23 und in Anhang 9 ist das Bewegungsmuster nach Art Chladni'scher Klangfiguren visualisiert. Dunkle Bereiche kennzeichnen Schwingungsknoten, helle Schwingungsbäuche.

Da hierbei lediglich der Betrag, nicht jedoch die Richtung der Bewegung erkennbar wird, ist in Anhang 10 als weitere Art der Visualisierung eine dreidimensionale Darstellung angewandt worden. Man blickt von unten auf den Boden des Hackbretts und sieht in starker Überhöhung dessen Verformung. Als erstes Bild ist die Struktur im Ruhezustand wiedergegeben. Um die Interpretation zu vereinfachen, ist das Vorzeichen in Farben umgesetzt. Rot entspricht dabei der Bewegung aus der Deckenoberfläche heraus, grün in die Ebene hinein.

Abb. 30 ist zu entnehmen, dass wiederum ähnliche Schwingungsformen bei mehreren, in aller Regel dicht benachbarten Frequenzen auftreten. Die Grundtypen der Bodenschwingung sind in Abb. 31 nebeneinander gestellt, wobei hier auf die Wiedergabe von Starrkörperschwingungen verzichtet wurde. Die folgenden Typen von Biegeschwingungen des Bodens lassen sich identifizieren:

- Typ Bo1: Bei 195 Hz bis 210 Hz symmetrische Bewegung nach Art eines Rochens.
- Typ Bo2: Bei 247 Hz bis 282 Hz asymmetrische Bewegung des „Rochens“.
- Typ Bo3: Bei 347 Hz bis 380 Hz bildet sich in der Mitte ein Schwingungsbauch aus; der Rest des Bodens ist in Ruhe.

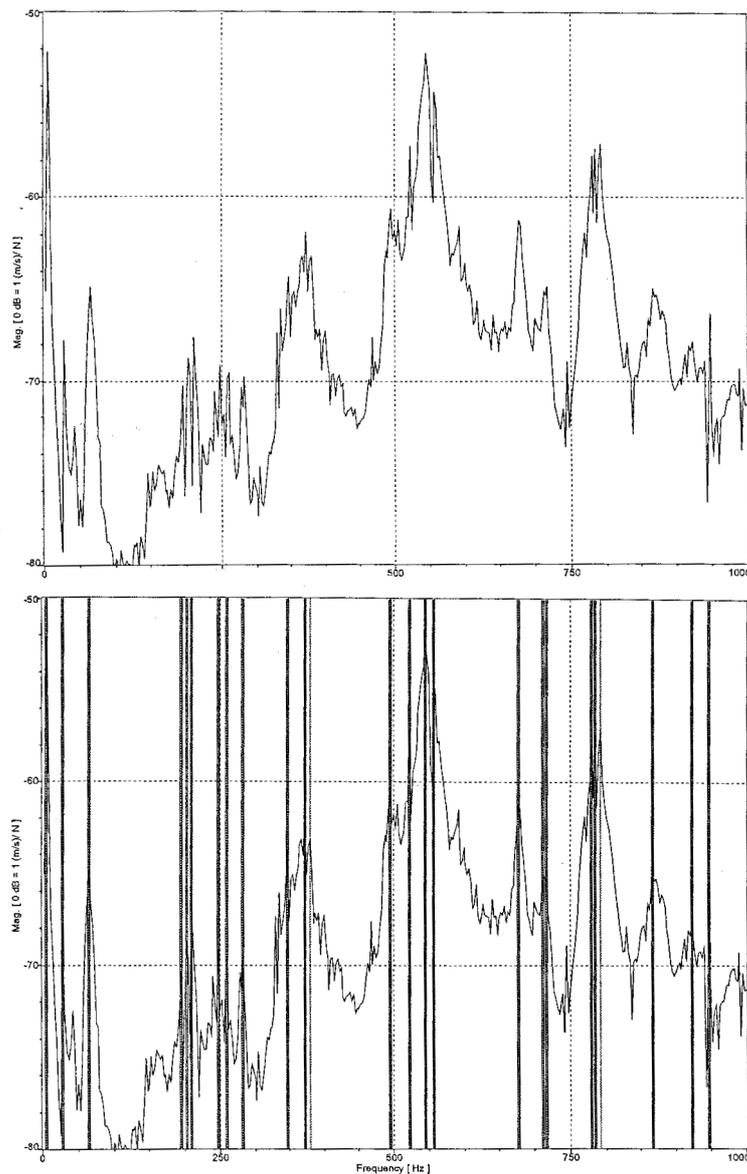


Abb. 29: Oben: Gesamt-Übertragungsfunktion der Bodenschwingung, dargestellt als Betrag im logarithmischen Maßstab in Abhängigkeit von der Frequenz.  
Unten: Mit Frequenzbändern für die Darstellung der Betriebsschwingungsformen (ODSs).

- Typ Bo4: Bei 522 Hz bis 557 Hz schwingt die Decke antimetrisch mit zwei großen gegenphasigen Schwingungsbäuchen.
- Typ Bo5: Bei 712 Hz und 717 Hz verläuft ein Knoten entlang der Mittellinie der Decke. Die Schwingung ist ähnlich dem Typ B4 geformt, jedoch sind die beiden Schwingungsbäuche räumlich enger begrenzt.
- Typ Bo6: Bei 780 Hz bis 792 Hz bilden sich weitere zwei weitere Knotenlinien in Längsrichtung aus, so dass jetzt insgesamt vier Schwingungsbäuche zu erkennen sind.
- Typ Bo7: Bei 867 Hz bis 947 Hz schwingt der Boden des Hackbretts mit zwei „Knotendurchmessern“.

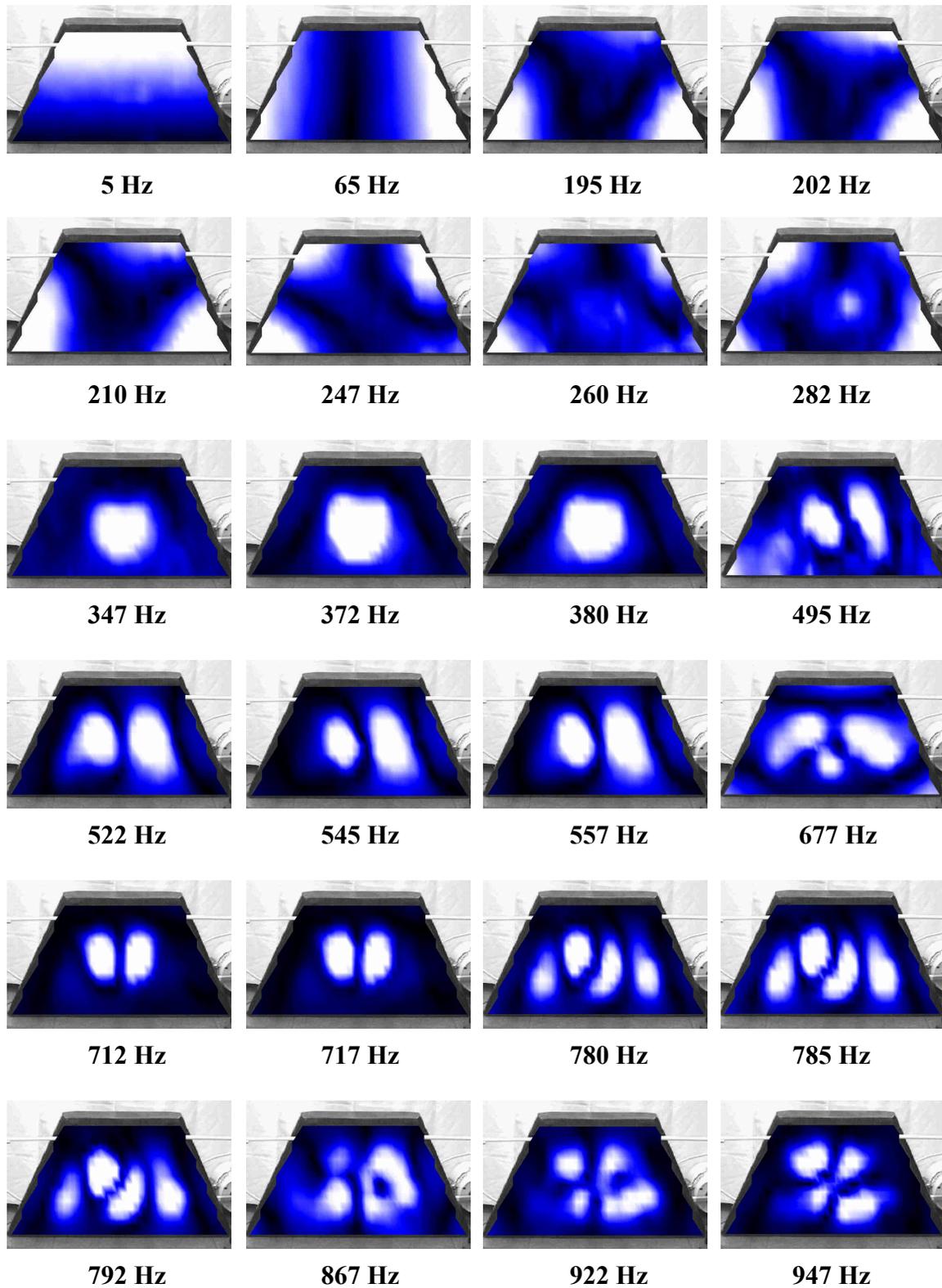


Abb. 30: Einige Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf dem Boden des Hackbretts.

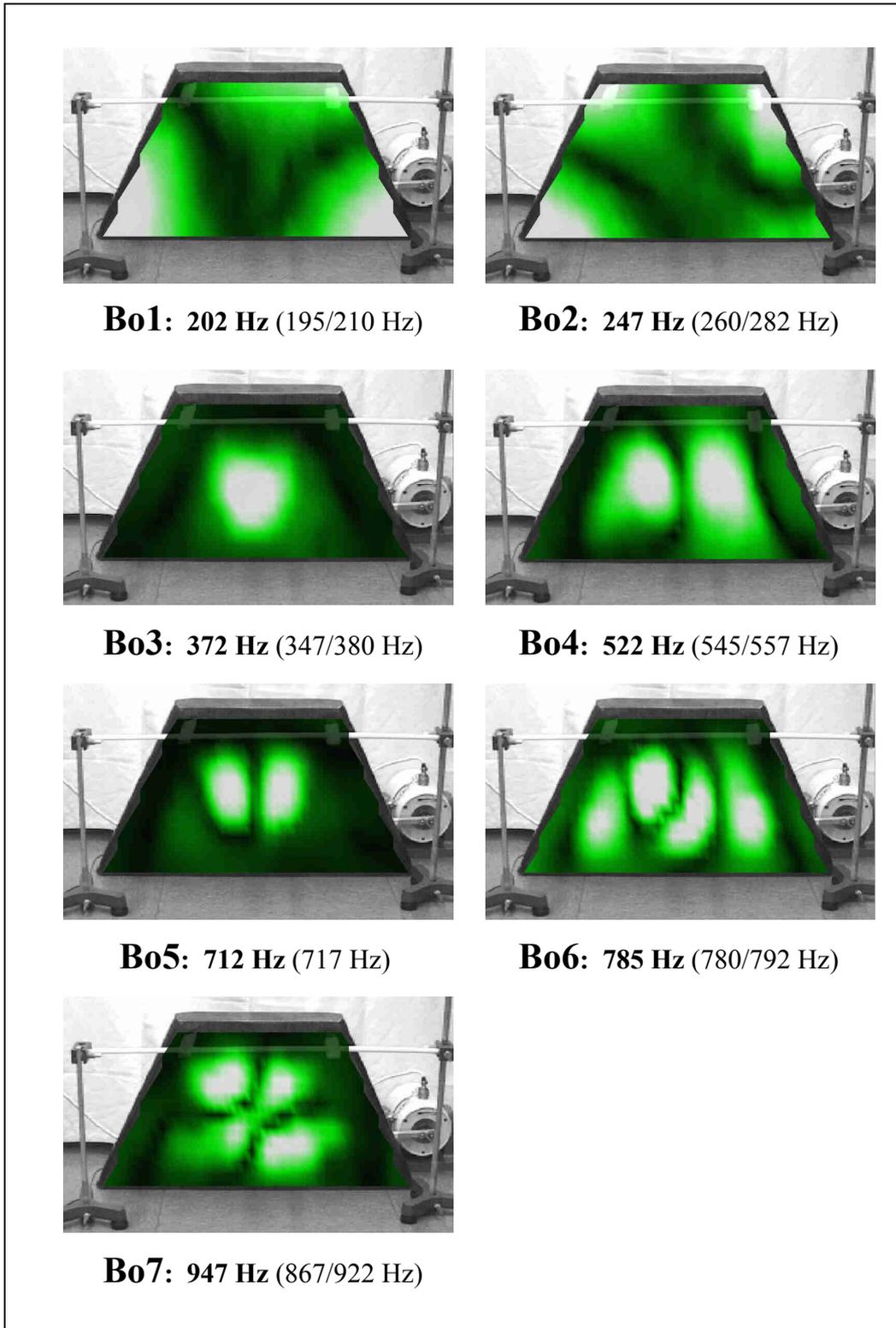


Abb. 31: Die sieben Grundtypen der Bodenschwingung als Ergebnis der Vibrometer-Messung.

### 5.4.2. Ergebnisse aus der Literatur

Canfield und Rossing (1995) haben mit Hilfe der Laser-Interferometrie die Böden zweier Hackbretter untersucht. Das diatonische Instrument von Walter Sweet misst 90 cm an der Breitseite und 49 cm an der Schmalseite. Die Schwingungen des Bodens sind Abb. 32 zu entnehmen.

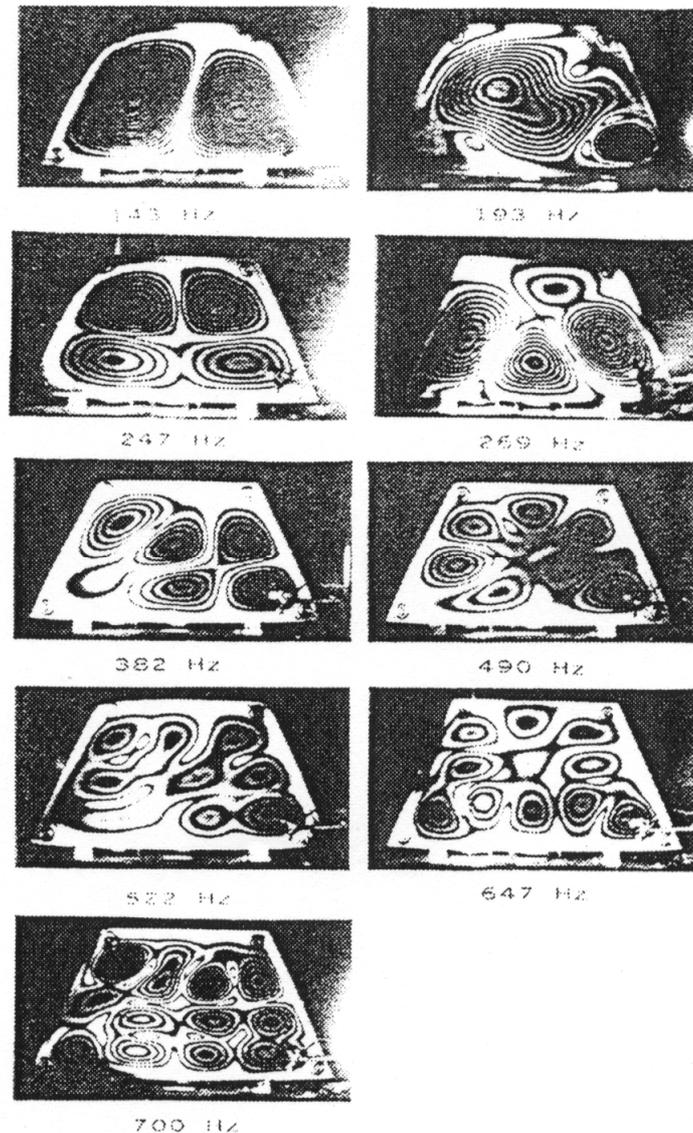


Abb. 32: Schwingungsmuster des Bodens eines Walter-Sweet-Hackbretts, gemessen mit holografischer Interferometrie, nach Canfield und Rossing (1995).

Beim Hackbrett von Walter Sweet bestehen feste Verbindungen zwischen Boden und Decke nur an den Seitenteilen. Schon auf Grund dieser Randbedingung, die deutlich anders als in der hier vorliegenden Situation ist, kann keine sehr weit gehende Übereinstimmung der Resultate erwartet werden. So zeigen sich teilweise unterschiedliche Schwingungsmuster, und auch die Frequenzen sind sehr verschieden. Gemeinsamkeiten mit den eigenen Ergebnissen sind praktisch nicht zu erkennen.

Das weitere diatonische Hackbrett, dessen Schwingungen Canfield und Rossing (1995) untersucht haben, stammt von Greg Canfield. Seine Breitseite misst 106 cm, seine Schmalseite 29 cm. Es ist 44 cm hoch und mit einem *floating soundboard* versehen. Die Schwin-

gungsformen des Bodens, die sie mit dem Laser gemessen haben, sind in Abb. 33 zusammen getragen.

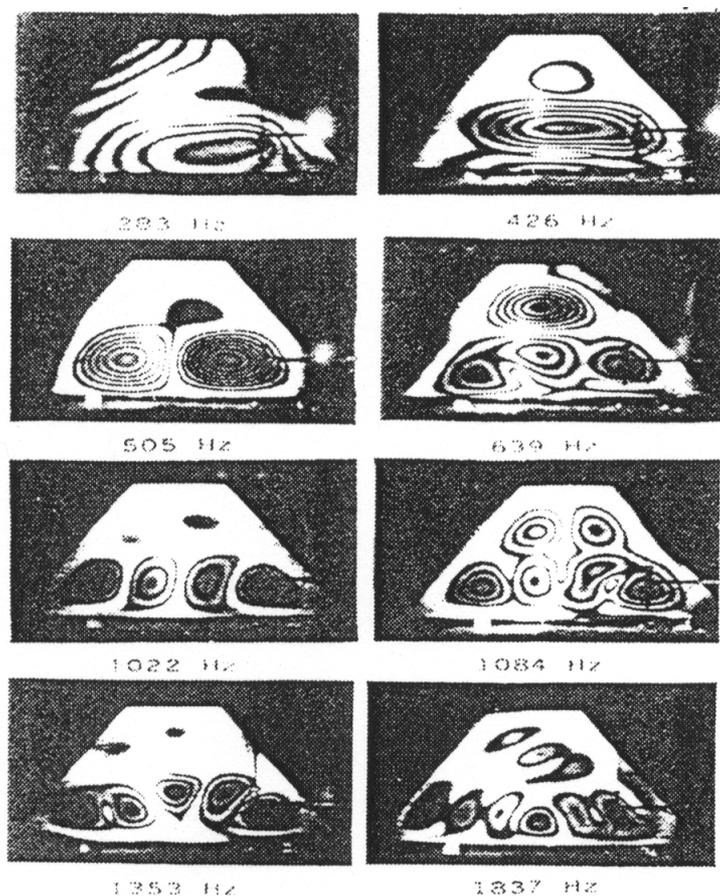


Abb. 33: Schwingungsmuster des Bodens eines Greg-Canfield-Hackbretts, gemessen mit holografischer Interferometrie, nach Canfield und Rossing (1995).

Auch in diesem Fall wirken sich die Diskrepanzen in der Geometrie und Bauart so aus, dass nicht viele Gemeinsamkeiten mit den eigenen Ergebnissen zu erkennen sind. Lediglich drei Muster zeigen eine gewisse Übereinstimmung. So ähnelt die symmetrische Schwingung bei 426 Hz dem Grundtyp Bo3 bei 347/380 Hz; vgl. Abb. 31. Die antimetrische Schwingung bei 505 Hz könnte dem Grundtyp Bo4 bei 522/557 Hz entsprechen, und vier Schwingungsbäuche wie bei 1022 Hz zeigen sich auch beim Grundtyp Bo6 (780/792 Hz).

## 5.5. Schwingungen von Decke und Boden

Da den Zargen aller Wahrscheinlichkeit nach für die Abstrahlung von Schall keine große Bedeutung zukommt, sind mit Decke und Boden die wesentlichen Bestandteile des Hackbretts untersucht. Jedoch sind diese beiden Abstrahlflächen im vorliegenden und im vorhergehenden Kapitel getrennt betrachtet worden. Sie wurden zwar auf dieselbe Weise, aber in zwei eigenständigen Messungen untersucht, deren Ergebnisse unabhängig voneinander ausgewertet worden sind. Sie liefern Betriebsschwingungsformen der Decke (z.B. Abb. 23) bzw. Betriebsschwingungsformen des Bodens (z.B. Abb. 30) bei teilweise unterschiedlichen Frequenzen. Damit stehen diese Betrachtungen bisher im Gegensatz zu denen von Hänel (2004; siehe auch

Kapitel 3), bei denen das gesamte Instrument in einem Durchgang vermessen wurde. Für die Schallabstrahlung ist es naturgemäß von großer Bedeutung, ob Decke und Boden beispielsweise im Sinne eines Monopols gegenphasig „pumpen“ oder sich im Sinne eines Dipols gleichphasig bewegen. Bei tiefen Frequenzen ist die Schallleistung, die ein Monopol abzugeben vermag, wesentlich größer als diejenige, welche ein gleich großer Dipol abstrahlen kann. Einige „numerische Experimente“ mittels *Contribution Analysis* sind am Beispiel einer Gitarre von Moosrainer und Fleischer (2000) beschrieben worden.

Abschließend soll nun versucht werden, Betriebsschwingungsformen aufzufinden, welche die Bewegung des gesamten Instruments beschreiben. Dazu werden solche Grundtypen aus den Abb. 24 und 31 ausgewählt, deren Frequenzen weitgehend übereinstimmen. Sie werden dreidimensional dargestellt. Als Betrachtungsrichtung wird der Blick aus der Sicht des Spielers gewählt. Die Anregung bei den zugrunde liegenden Vibrometer-Messungen war bei beiden Male gleich. Da die Bewegung jedoch gegensinnig gemessen wurde, muss ihr Vorzeichen bei einer der Messungen umgekehrt werden. Die Animation der Deckenschwingung wird in einem Zustand „eingefroren“, in dem die Bewegung gut zu erkennen ist. Die Schwingung des Bodens wird für einen um  $180^\circ$  größeren Phasenwinkel dargestellt, was einer Umkehr des Vorzeichens entspricht. Der Vergrößerungsmaßstab ist für Decke und Boden gleich. Das Bild des Bodens wurde zusätzlich um die Hochachse gespiegelt. Das Ergebnis wird als „Hauptform“ bezeichnet und mit einer römischen Ziffer versehen.

Abb. 34:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
195 Hz (Hauptform I).

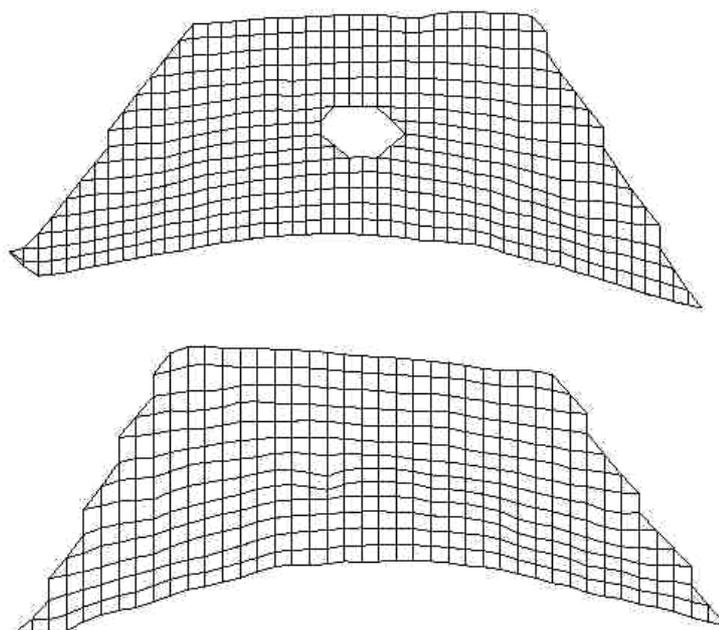


Abb. 34 gibt die erste Kombination wieder. Die Hauptform I setzt sich aus der Deckenschwingung  $De1$  und der Bodenschwingung  $Bo1$  zusammen. Decke und Boden schwingen spiegelsymmetrisch zur Mittellinie und in Gleichphase. Somit bewegt sich das gesamte Instrument ähnlich wie ein Rochen. Es erscheint nicht ausgeschlossen, dass Hänel (2004) diese Schwingung bei den Frequenzen 237 Hz und 254 Hz gefunden hat; vgl. die Abb. 9 und 10. Eine gewisse Verwandtschaft mit der Schwingungsform bei 214 Hz (Canfield und Rossing 1995) in Abb. 11 ist zu erkennen.

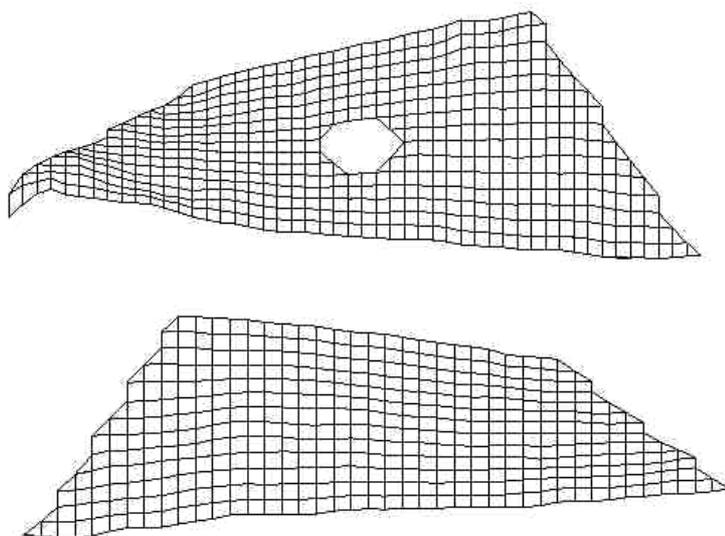


Abb. 35:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
280 Hz (Hauptform II).

In Abb. 35 bezieht sich die Schwingung der Decke auf die Frequenz 275 Hz (Grundtyp De2), die des Bodens auf 282 Hz (Grundtyp Bo2). In der Hauptform II verwindet sich der Korpus und schwingt antimetrisch. Decke und Boden führen weitgehend die gegenphasige, pumpende Bewegung aus. Die Randlinien an der vorderen Schmalseite laufen nicht parallel. Somit verbindet die Zarge in diesem Fall die Oberseite des Instruments nicht starr mit dessen Unterseite, sondern wirkt flexibel.

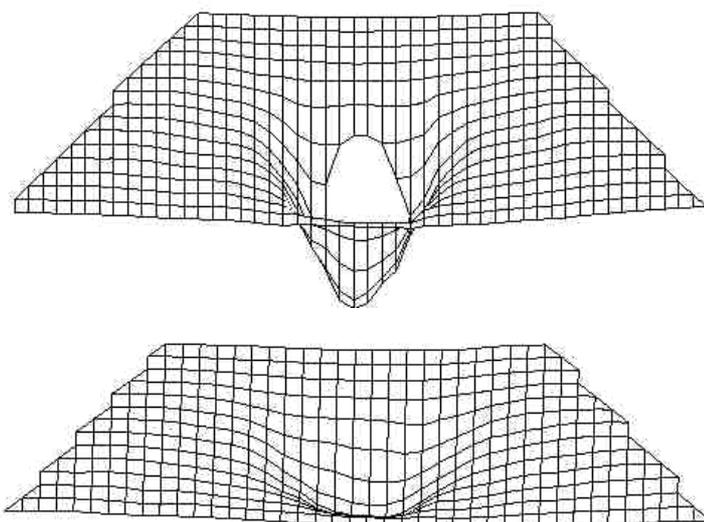
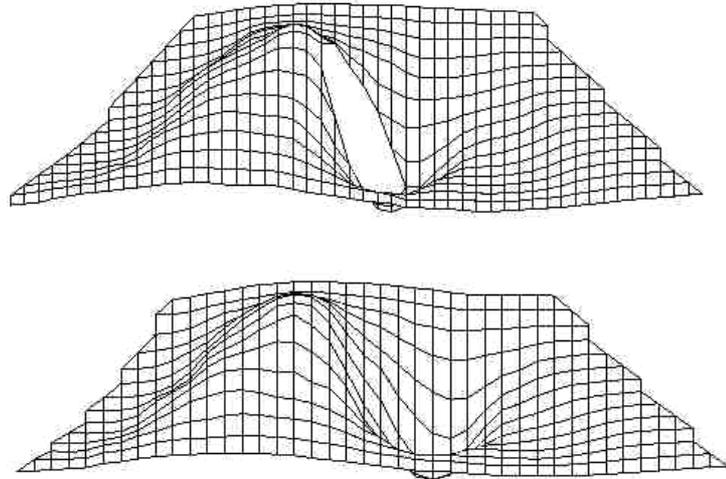


Abb. 36:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
380 Hz (Hauptform III).

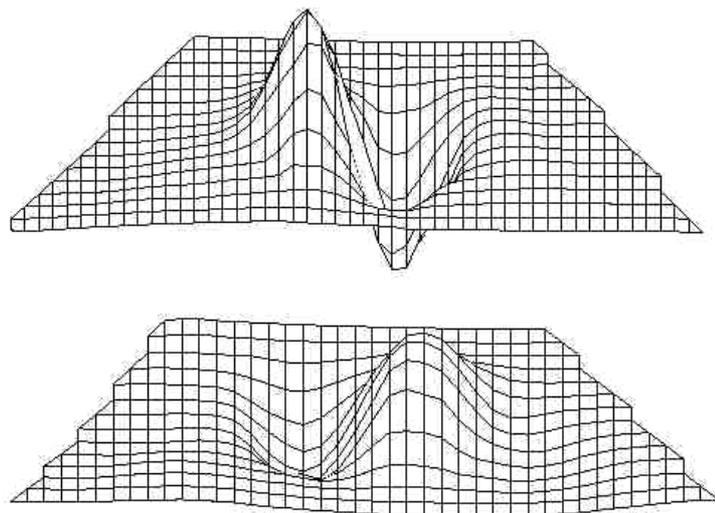
Die Hauptform III, die in Abb. 36 dargestellt ist, findet sich bei 380 Hz und in ähnlicher Form auch bei 347 Hz. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Decke (Grundtyp De3) und Boden (Grundtyp Bo3) gleichphasig ein- und ausbeulen. Offenbar schwingt die Decke um das Schalloch herum mehr als der Boden, der geschlossen ist und keine Aussparung aufweist. Möglicherweise wurde diese Schwingung von Hänel (2004) bei den Frequenzen 322 Hz und 406 Hz beobachtet; vgl. die Abb. 9 und 10. Eine ähnliche Mode zeigen Canfield und Rossing (1995) für 378 Hz; vgl. Abb. 11.

Abb. 37:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
557 Hz (Hauptform IV).



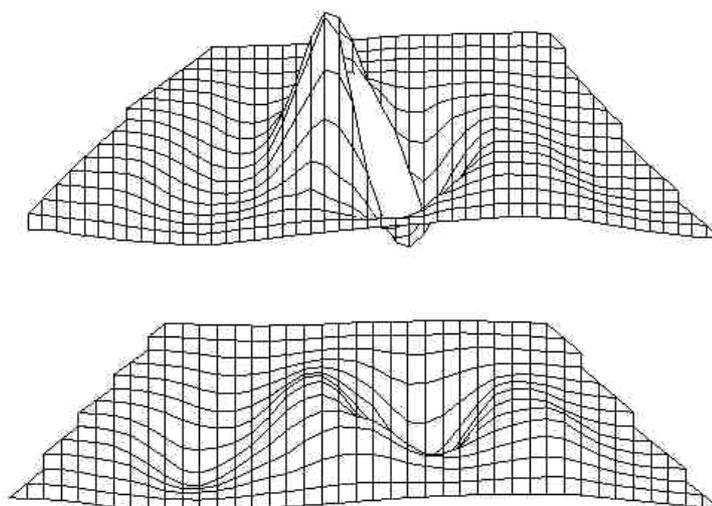
Die Hauptform IV tritt bei 522 Hz, 545/547 Hz und – wie in Abb. 37 dargestellt – bei 557 Hz auf. Sie weist auf der Decke (Grundtyp De5) ebenso wie auf dem Boden (Grundtyp Bo4) zwei gegenphasige Schwingungsbäuche auf. Decke und Boden bewegen sich weitgehend gleichphasig. Die Randlinien an der vorderen Schmalseite laufen parallel. Somit verbindet die Zarge in diesem Fall die Oberseite des Instruments starr mit dessen Unterseite. Hänel (2004) dürfte diese Schwingung bei 500 Hz bis 538 Hz gefunden haben; vgl. die Abb. 9 und 10. Eine gegenphasige Mode ähnlicher Art präsentieren Canfield und Rossing (1995) für 498 Hz; vgl. Abb. 11.

Abb. 38:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
720 Hz (Hauptform V).



Schwingt das Hackbrett in der Hauptform V, dann schwingen Decke (Grundtyp De6 bei 720 Hz) und Boden (Grundtyp Bo5 bei 717 Hz) in Gegenphase; vgl. Abb. 38. Gegenüber liegende Bereiche von Decke und Boden bewegen sich aufeinander zu bzw. voneinander weg. Die Form ist antimetrisch, d.h. Decke und Boden schwingen mit jeweils zwei Schwingungsbäuchen.

Abb. 39:  
Schwingung von  
Decke und Boden  
bei der Frequenz  
785 Hz (Hauptform VI).



Die Hauptform VI bei 785 Hz und ähnlich bei 790/792 Hz ist in Abb. 39 dargestellt. Wie die vierte Hauptform ist sie dadurch gekennzeichnet, dass Decke (Grundtyp De7) und Boden (Grundtyp Bo6) sich weitgehend konphas miteinander bewegen. Oben und unten erkennt man jeweils vier Schwingungsbäuche. Eventuell hat Hänel (2004) eine ähnliche Schwingung bei der Frequenz 984 Hz nachgewiesen; vgl. Abb. 10. Diskrepanzen zeigen sich zu den Ergebnissen von Roewer (2004 und Abb. 19). Seine Bodenschwingungen Mode 6 und 7 finden sich nicht in den eigenen Messungen und demzufolge auch nicht in Abb. 39 wieder. Mit dieser Ausnahme stimmen die Resultate in weiten Bereichen überein.

Aus den Ergebnissen der eigenen Messungen mit dem Scanning Vibrometer wurden im Frequenzbereich bis 1 kHz sechs ausgeprägte Hauptformen des Hackbrett-Korpus extrahiert. Bei vier Hauptformen (I, III, IV und VI) schwingen Decke und Boden weitgehend parallel. Die übrigen beiden Hauptformen (II und V) sind dadurch charakterisiert, dass Decke und Boden sich gegeneinander bewegen. Die Hauptformen I und III sind spiegelsymmetrisch in Bezug auf die Mittellinie des Hackbretts, die übrigen sind antimetrisch. Erwartungsgemäß unterteilen sich die schwingenden Flächen mit steigender Frequenz in immer mehr und immer kleinere Bereiche. Oberhalb von 800 Hz ist es nicht mehr gelungen, die vielfältigen Formen in ein klar erkennbares Schema einzuordnen. Eine „Helmholtz-Schwingung“, wie sie bei spanischen Gitarren für etwa 100 Hz zu beobachten ist, konnte beim Hackbrett durch die Vibrometer-Messungen nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise stellt sie sich nicht als Strukturschwingung, sondern lediglich als Luftschwingung dar, die durch die verwendete Laser-Vibrometrie naturgemäß nicht erfasst werden kann.

Bemerkung: Im Januar 2005 wurden diese Betrachtungen durch einen Nachtrag ergänzt, der als Abschnitt 5.7 eingefügt ist.

## 5.6. Zusammenfassende Bemerkung

Die Laser-Vibrometrie hat keine Schwingungsmoden im engeren Sinne, sondern vielmehr Betriebsschwingungsformen (ODSs, siehe Richardson 1997) geliefert. Welche Gemeinsamkeiten Betriebsschwingungsformen und Eigenmoden aufweisen, wenn beide auf Vibrometer-Messungen aufbauen, ist am Institut für Mechanik in einigen vergleichenden Studien untersucht worden. Danach stimmen die Formen und auch die Frequenzen, die eine sorgfältige

Auswertung der Vibrometer-Daten durch einen erfahrenen Experimentator liefert, meist gut mit den Eigenformen und Eigenfrequenzen überein, die mittels Modalanalyse ermittelt werden. Zwischen den in diesem Kapitel vorgelegten Resultaten und den Ergebnissen von Hänel (2004; vgl. Kapitel 3) ist allerdings nicht in allen Fällen Übereinstimmung zu beobachten. Dies gilt auch für Beobachtungen von Canfield und Rossing (1995) an diatonischen Hackbrettern. Hier scheinen die Unterschiede der verschiedenen Instrumente hinsichtlich Geometrie, Bauart und Material so ausgeprägt zu sein, dass keine allzu großen Gemeinsamkeiten im Schwingungsverhalten zu erwarten sind. Relativ gute Übereinstimmung tritt beim Vergleich mit den Ergebnissen von Roewer (2004) zu Tage. Kleinere Abweichungen lassen sich mit den verschiedenartigen Lagerungsbedingungen am schmalseitigen Ende erklären. Trotzdem verbleiben noch Diskrepanzen, die derzeit und zukünftig noch detailliert untersucht werden sollen. Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen wird dabei die Aufnahme der Messwerte mit dem Scanning Vibrometer favorisiert. Geplant ist, die Messdaten von Vorder- und Rückseite in einem Modalanalyse-System gemeinsam zu analysieren. Ziel dieser Bemühungen ist es, die Schwingungen des Gesamtinstruments zu extrahieren.

Welche der beobachteten Schwingungsformen für die Schallerzeugung von Bedeutung sind, kann erst an Hand weiterer Studien beurteilt werden. Dazu wird im nächsten Schritt die mechanische Admittanz gemessen, welche die Saiten an ihren Auflagern „sehen“. In einem weiteren Schritt werden dann die Langzeitspektren der Schalldruck-Signale analysiert, die das Anschlagen der einzelnen Saitenchöre liefert.

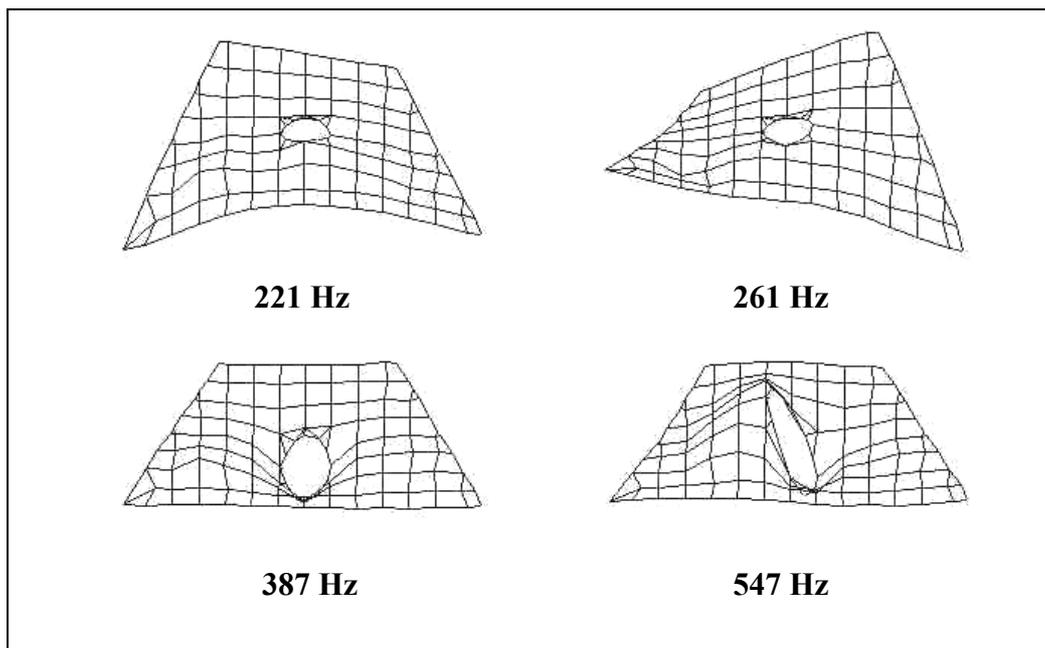
## 5.7. Nachtrag vom Februar 2005 zum Kapitel 5

In Abschnitt 5.5. war versucht worden, Decken- und Bodenschwingungen zusammen und unter Beachtung der korrekten Phasenbeziehungen darzustellen. Als Maß für die Phase war dabei der Winkel genommen worden, der bei der Darstellung von Betriebsschwingungsformen im Modus „3D Mesh“ der Vibrometer-Software angezeigt wird. Anschließende Untersuchungen haben den Verdacht bestätigt, dass dieser Winkel nicht - wie angenommen - auf die anregende Kraft bezogen ist, die in beiden Fällen als Referenz diente. Möglicherweise sind die in diesem Abschnitt dargestellten Schwingungsbilder hinsichtlich der Phasenbeziehungen nicht korrekt.

Ergänzend werden deshalb hiermit Ergebnisse mehrerer Modalanalysen beigelegt. Diese beruhen auf Messungen von Roewer (2004) mit jeweils etwa 120 Messpunkten. Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg hat sie einer Analyse mit der Software SMS StarModal der Version 5.22 unterzogen.

### 5.7.1. Schwingungen der Decke

Exemplarisch sind einige Ergebnisse dargestellt, wie sie eine zweidimensionale Modalanalyse des Datensatzes liefert, den die Vibrometer-Messung auf der Vorderseite des Hackbretts liefert.



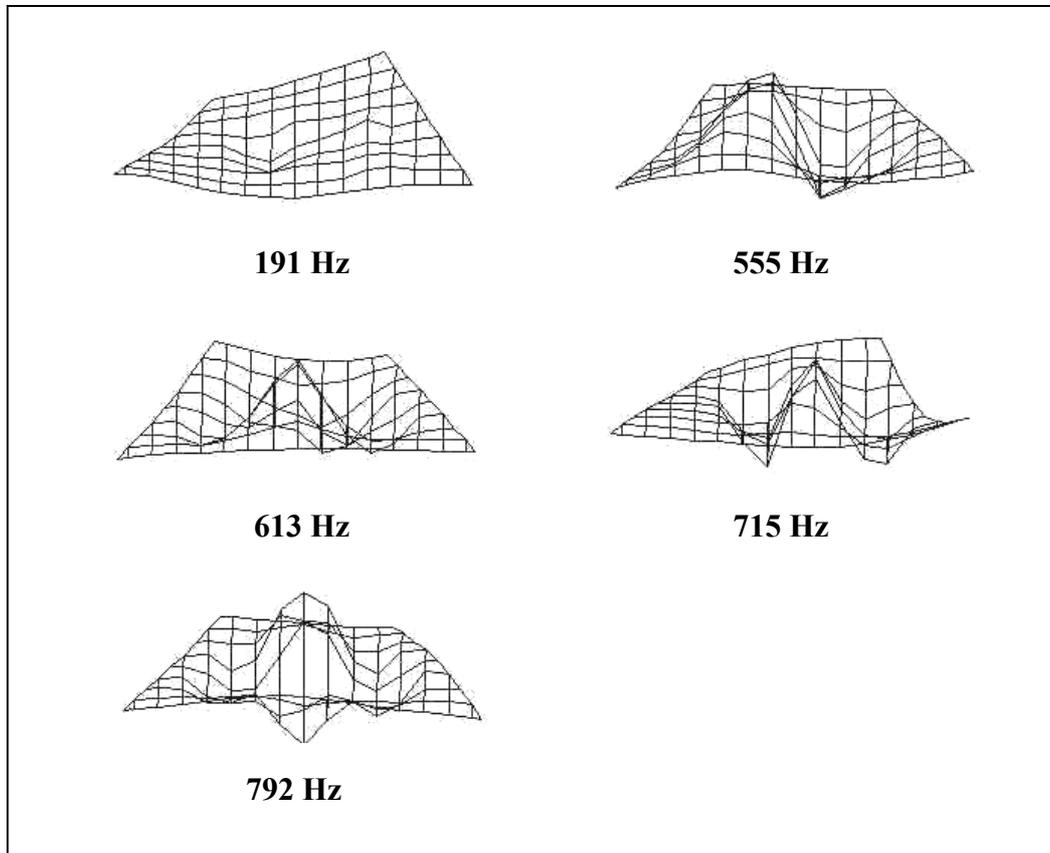
Eigenschwingungsformen der Decke des Hackbretts als Ergebnis der nachgeschalteten Modalanalyse von Vibrometer-Messdaten mit StarModal.

Die obigen Formen sind mit den Grundtypen der Deckenschwingung (siehe S. 32) zu vergleichen.

- Die Eigenschwingungsform bei 221 Hz stimmt mit dem Grundtyp De1 überein.
- Das Analoge gilt für die Eigenschwingungsform bei 261 Hz und den Grundtyp De2, der bei der Vibrometer-Messung allerdings bei 275 Hz lokalisiert worden war.
- Die Eigenschwingungsform bei 387 Hz stimmt mit dem Grundtyp De3 überein.
- Der Grundtyp De4 findet sich nicht als Eigenschwingungsform wieder. Offenbar handelt es sich hierbei um eine Mischform.
- Die Eigenschwingungsform bei 547 Hz stimmt mit dem Grundtyp De5 überein.

### 5.7.2. Schwingungen des Bodens

In der folgenden Tabelle sind Resultate der zweidimensionalen Modalanalyse für den Boden des Hackbretts zusammengestellt.



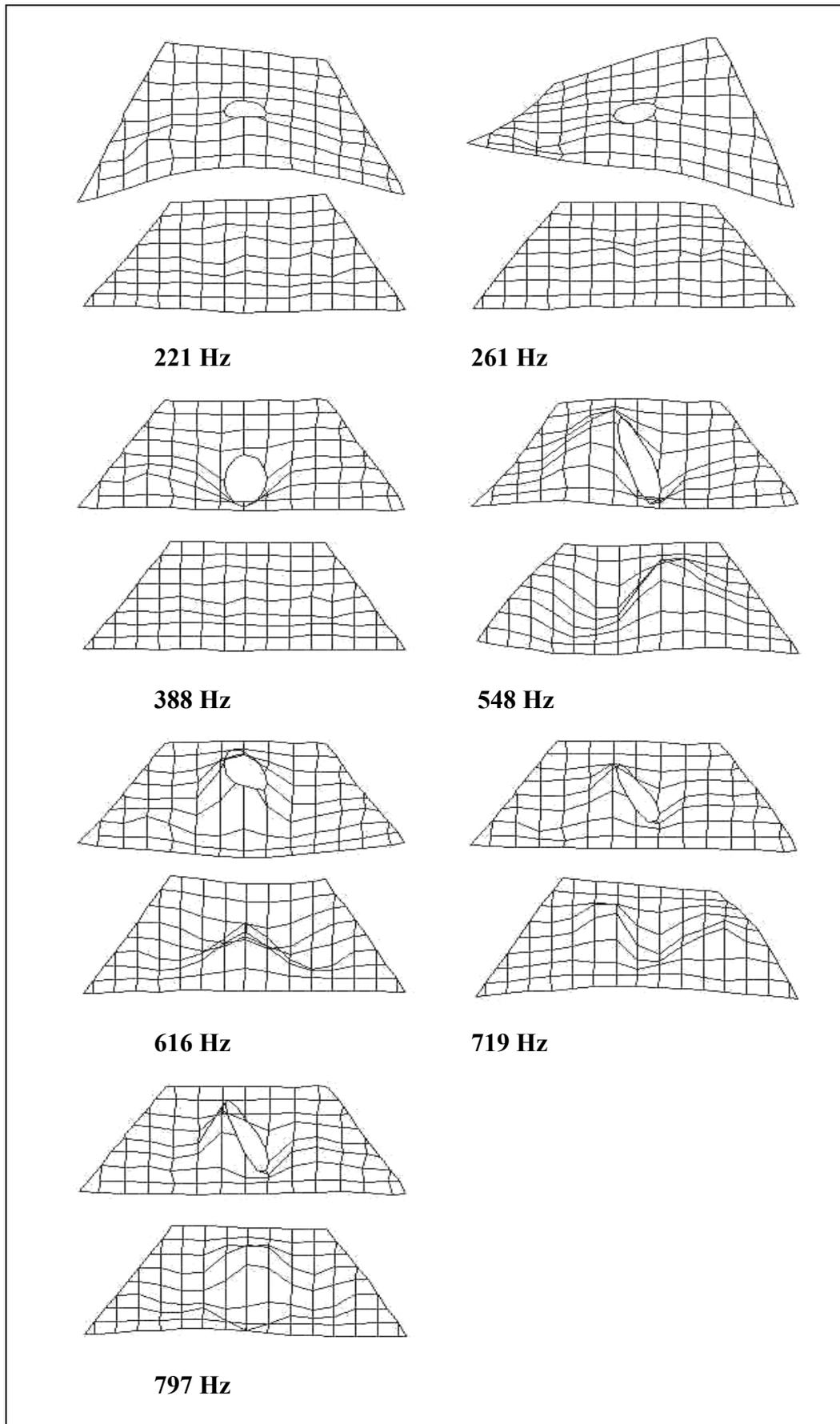
Eigenschwingungsformen des Hackbrett-Bodens als Ergebnis der nachgeschalteten Modalanalyse von Vibrometer-Messdaten mit StarModal.

Diese Schwingungsformen sind mit den Grundtypen der Bodenschwingung (siehe S. 37/38) zu vergleichen.

- Die Eigenschwingungsform bei 191 Hz stimmt mit dem Grundtyp Bo1 überein.
- Die Grundtypen Bo2 und Bo3 finden sich nicht als Eigenschwingungsformen wieder. Offenbar handelt es sich um Mischformen.
- Die Eigenschwingungsform bei 555 Hz stimmt mit dem Grundtyp Bo4 überein.
- Die Eigenschwingungsform bei 613 Hz spiegelt sich in keiner Betriebsschwingungsform wider.
- Der Grundtypen Bo5 und Bo6 (712 Hz bis 792 Hz) lassen sich mit der Eigenschwingungsform bei 715 Hz in Verbindung bringen. Auch hierbei scheint es sich um Mischformen zu handeln.
- Die Eigenschwingungsform bei 792 Hz zeigt eine gewisse Verwandtschaft mit dem Grundtyp Bo7.

### 5.7.3. Schwingungen von Decke und Boden

In der Tabelle sind die Resultate dargestellt, die sich bei einer gemeinsamen dreidimensionalen Modalanalyse der Messdaten für die Decke und den Boden des Hackbretts ergeben.



Eigenschwingungsformen der Decke (oben) und des Bodens (unten) als Ergebnis der Modalanalyse der zusammengefassten Vibrometer-Messdaten mit StarModal.

Zur Beurteilung der „Einzigartigkeit“ einer Mode wurde das *Modal Assurance Criterion* (MAC) herangezogen. Als Skalarprodukt der Eigenvektoren kann es Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Zwei Starrkörperschwingungen unterhalb des Bereichs der Saitenfrequenzen bleiben außer Betracht, da sie für die Schallerzeugung ohne Belang sind. Im untersuchten Frequenzbereich (G3  $\cong$  195 Hz bis B5  $\cong$  930 Hz) lassen sich insgesamt sieben Korpusmoden nachweisen, bei denen der MAC-Wert immer kleiner als etwa 0,1 war. Diese Moden sind mit den Hauptformen zu vergleichen, wie sie auf den S. 43 bis 46 zusammengestellt und beschrieben sind.

- Die symmetrische Mode bei 221 Hz stimmt mit der Hauptform I hinsichtlich der Bewegung der Decke weitgehend überein. Der Boden scheint sich jedoch relativ wenig zu bewegen.
- Die antimetrische Mode bei 261 Hz weist große Ähnlichkeit mit der Hauptform II auf.
- Die nächste Mode bei 388 Hz ist wiederum symmetrisch zur Mittellinie. In Hinsicht auf die Decke stimmt sie weitgehend mit der Hauptform III überein. Auch hier scheint sich der Boden nur wenig zu bewegen.
- Die antimetrische Mode bei 548 Hz zeigt gegenüber der Hauptform IV den wesentlichen Unterschied, dass sich Boden und Decke weitgehend gegenphasig bewegen.
- Die symmetrische Mode bei 616 Hz konnte bei der Auswertung der Betriebsschwingungsformen nicht nachgewiesen werden.
- Die antimetrische Mode bei 719 Hz entspricht bezüglich der isolierten Bewegung von Decke bzw. Boden der Hauptform V. Jedoch ergibt die dreidimensionale Modalanalyse, dass Boden und Decke sich im Wesentlichen gleichphasig bewegen.
- Bei der verbleibenden antimetrischen Mode (797 Hz) schwingt die Decke ebenso wie bei der Hauptform VI. Für den Boden ergeben sich dagegen andersartige Muster.

#### 5.7.4. Fazit

Messdaten der Vibrometer-Messung an Decke und Boden des Hackbretts, die Roewer (2004) durchgeführt hat, wurden einer Modalanalyse unterzogen. Resultate sind hier gezeigt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Modalanalyse in weiten Teilen mit den Betriebsschwingungsformen im vorliegenden Bericht „Schwingung und Schall eines Hackbretts“ übereinstimmen, die auf anderen Messdaten beruhen. Dies gilt, solange Decke und Boden jeweils für sich („zweidimensional“) untersucht worden sind. Erhebliche Diskrepanzen können dann auftreten, wenn Decke und Boden „dreidimensional“, d.h. im Zusammenspiel betrachtet werden. Da die Anregung bei den Messungen jeweils beibehalten wurde, liegt zwar eine gemeinsame Referenz vor. Die Phasenlage richtig anzugeben, wäre damit prinzipiell möglich, bleibt jedoch eine delikate Aufgabe.

Wesentlich einfacher ist diese Aufgabe, wenn die Datensätze von Decke und Boden einer gemeinsamen dreidimensionalen Modalanalyse unterzogen werden. Der Vergleich legt offen, dass die hier gezeigten Ergebnisse teilweise von denjenigen abweichen, die sich aus der Kombination von zwei getrennt ermittelten zweidimensionalen Betriebsschwingungsformen ergeben haben.

Für zukünftige Untersuchungen ist daraus zu schließen, dass es bei einfach aufgebauten Musikinstrumenten (z.B. Membranophonen wie Pauken oder Idiophonen wie Gongs o.ä.) ausreichen dürfte, ausgehend von Laser-Flächen-Scans zweidimensionale Betriebsschwingungsformen zu extrahieren. Bei kompliziert aufgebauten Musikinstrumenten wie Chordophonen sind in aller Regel mehrere unterschiedliche Flächen schwingungsfähig und tragen aktiv zur Abstrahlung von Schall bei. Bei solchen komplexeren Schwingern ist eine gemeinsame dreidimensionale Modalanalyse aller schwingenden Begrenzungen dringend anzuraten.

## 6. MECHANISCHE ADMITTANZ

Die Admittanz oder Schwingfreudigkeit an den Auflagepunkten der Saite gibt Aufschluss darüber, wie nachgiebig der Korpus reagiert. Damit lässt sich quantifizieren, bei welcher Frequenz das Instrument welche Schwingungsenergie aufzunehmen vermag. Einschränkend sei vorausgeschickt, dass die Kenntnis der Admittanz allein allerdings noch keine Aussagen darüber ermöglicht, ob diese Energie als kinetische oder potentielle Energie lediglich zwischengespeichert oder in eine andere Form, beispielsweise Wärme, umgewandelt wird.

### 6.1. Messmethode und -aufbau

Die Punktadmittanz stellt eine „objektorientierte“ Messgröße dar. Sie ist definiert als der Quotient aus der Schwinggeschwindigkeit (gemessen senkrecht zur Auflagefläche) und der Kraft (gemessen in derselben Richtung). Experimentell wurde sie mittels einer Vorrichtung bestimmt, wie sie in Abb. 40 zu sehen ist. Diese besteht aus einem elektrodynamischen Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) mit aufgesetztem Impedanzmesskopf (*Impedance Head* B&K 8001), der einen piezoelektrischen Kraftaufnehmer und einen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer enthält. Bei der Messung wurde in das oben sichtbare Gewinde Loch ein Verlängerungsstück mit einer Kunststoffkappe eingeschraubt. Schwingerreger samt Messkopf mit Verlängerungsstück wurden von Hand mit leichtem Druck gegen die Messstelle gehalten. Gemessen wurde auf dem Steg zwischen der zweiten und dritten Saite eines Saitenchores senkrecht zur Decke des Hackbretts. Der Schwingerreger wurde durch ein Pseudo-Rauschsignal aus dem Ono Sokki *Multi-Purpose FFT Analyzer* CF-5210 angetrieben, das durch einen Leistungsverstärker B&K 2706 verstärkt und über das untere der drei Kabel zugeführt wurde.



Abb. 40: Schwingerreger mit aufgesetztem Impedanz-Messkopf.

Über die beiden oberen Kabel, die in Abb. 40 erkennbar sind, wurden die Messsignale zu Ladungsverstärkern (*Charge Amplifier* B&K 2635) und weiter zur FFT-Analyse in den Fourier-Analysator Ono Sokki CF-5210 geführt. Dort wurde die Übertragungsfunktion berechnet, die der Admittanz entspricht. Dazu musste die gemessene Schwingbeschleunigung zur Schwinggeschwindigkeit integriert bzw. im Frequenzbereich durch  $i\omega$  geteilt werden. Das Ergebnis hat die Dimension m/s pro N bzw. s/kg. Nach zehnmaliger Mittelung wurde zwischen 100 Hz und 1600 Hz der Betrag im Bereich bis 0,030 m/s pro N (bzw. s/kg) dargestellt. Der Bildschirminhalt wurde über GPIB (*General Purpose Interface Bus*) in einen Plotter hp 7470A übernommen und ausgedruckt.

Es ist der vorliegenden Aufgabenstellung angemessen, die Admittanz an den zwei Kontaktpunkten der Saite zum Korpus zu ermitteln. Diese sind

- der hohe Steg, in dessen Nähe die Saite angeschlagen wird und
- der zugehörige Außensteg.

Messergebnisse werden in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels sowie im Anhang 2 präsentiert.

## 6.2. Admittanz an den beiden Auflagern der Saiten

Die Saiten sind in dem Sinne gegeneinander verschränkt, dass die mit den ungeraden Nummern 1 ... 27 über den linken hohen Steg, die mit den geraden Nummern 2 ... 28 über den rechten hohen Steg gespannt sind. Diese beiden hohen Stege mit den Aussparungen, die ihnen ein arkadenartiges Aussehen verleihen, sind in Abb. 41 links und rechts vom Schallloch zu erkennen. Zunächst wird an Hand von jeweils drei Beispielen untersucht, welche Admittanz eine Saite an diesem hohen Steg bzw. am zugehörigen niedrigen Außensteg vorfindet. Exemplarisch werden die tiefste, die höchste und eine mittlere Note betrachtet.

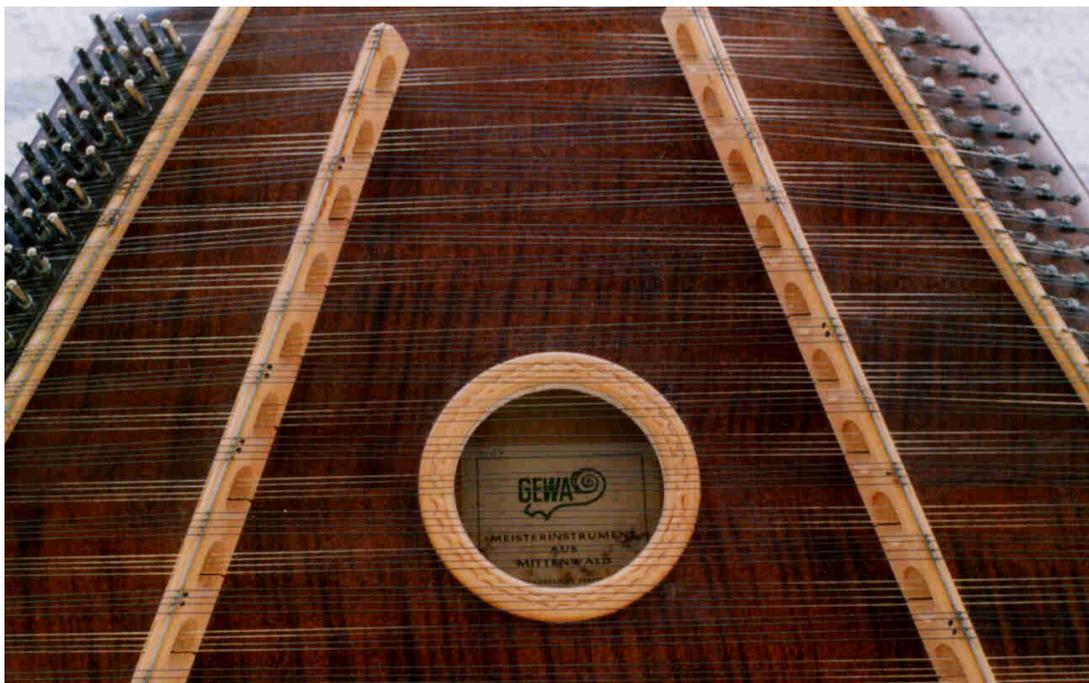
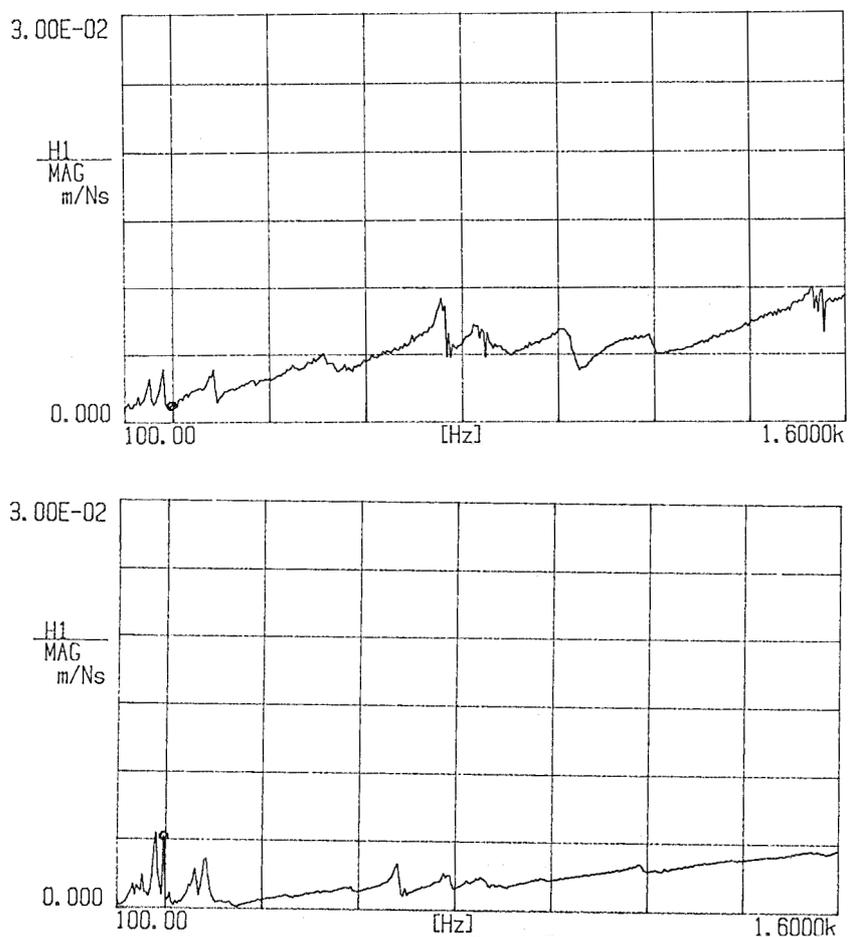


Abb. 41: Ansicht des Hackbretts mit den beiden Außenstegen und den Befestigungen der Saitenenden (rechts) sowie den Stimm-Mechaniken (links). Zu beiden Seiten des Schalllochs erkennt man die beiden hohen Stege mit den halbkreisförmigen Aussparungen.

### 6.2.1. Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen

Abb. 42 zeigt die Punktadmittanz an den beiden Enden der 1. Saite (Note G3), die links auf dem hohen Steg und rechts auf dem Außensteg aufliegt. Gemäß Tab. I in Kapitel 7 hat die Grundschwingung der Saite die Frequenz 195 Hz; diese ist durch den *Search Point* markiert. Mit wachsender Frequenz steigen beide Messkurven an. Am linken hohen Steg (oberes Teildiagramm) werden Maximalwerte von etwa 0,01 s/kg gemessen, während am rechten Außensteg (unteres Teildiagramm) nur etwa die Hälfte dieses Wertes erreicht wird. Dabei ist der Verlauf nicht immer stetig. Vielmehr spiegeln sich in den Admittanzen die Eigenschwingungen der Decke des Hackbretts wider. Im betrachteten Fall „sieht“ (oder vielleicht besser: „fühlt“) die G3-Saite am hohen Steg eine Admittanz, die kleiner ist als diejenige, die sie am Außensteg vorfindet. Dies stellt eine seltene Ausnahme dar, denn in aller Regel ist genau das Gegenteil zu beobachten.

Abb. 42: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der G3-Saite, gemessen oben: am linken hohen Steg; unten: am rechten Außensteg.



Dies belegt beispielweise die 13. Saite (Note G4, Abb. 43), deren Grundfrequenz 385 Hz beträgt. Am linken hohen Steg steigt die Admittanz auf nahezu 0,02 s/kg an und erreicht für die Grundschwingung der Saite etwa 0,005 s/kg. Am rechten Auflager „sieht“ die Saite dagegen bei dieser Frequenz nur etwas mehr als 0,001 s/kg.

Für die 27. Saite (Note A5, Abb. 44) bestätigt sich diese Tendenz: Bei der Frequenz 870 Hz der Grundschwingung beträgt die Admittanz links annähernd 0,007 s/kg, rechts dagegen etwa 0,002 s/kg. Damit ist das eine Auflager am hohen Steg deutlich schwingfreudiger als das andere am zugehörigen Außensteg. Abgesehen von wenigen Ausnahmen bei tiefen Frequenzen

Abb. 43: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der G4-Saite, gemessen oben: am linken hohen Steg; unten: am rechten Außensteg.

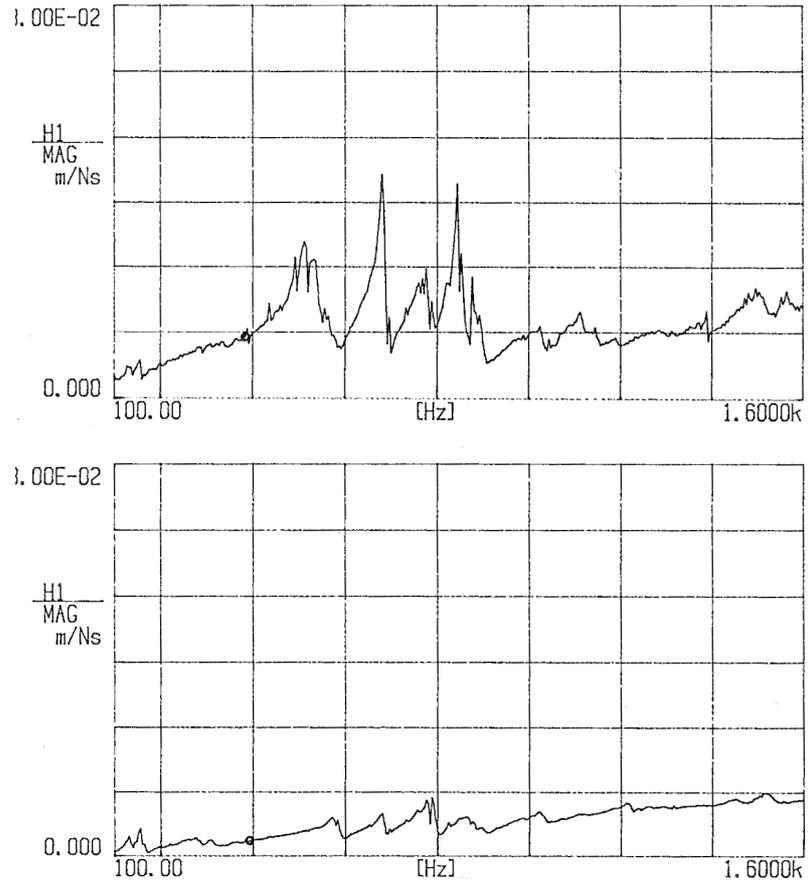
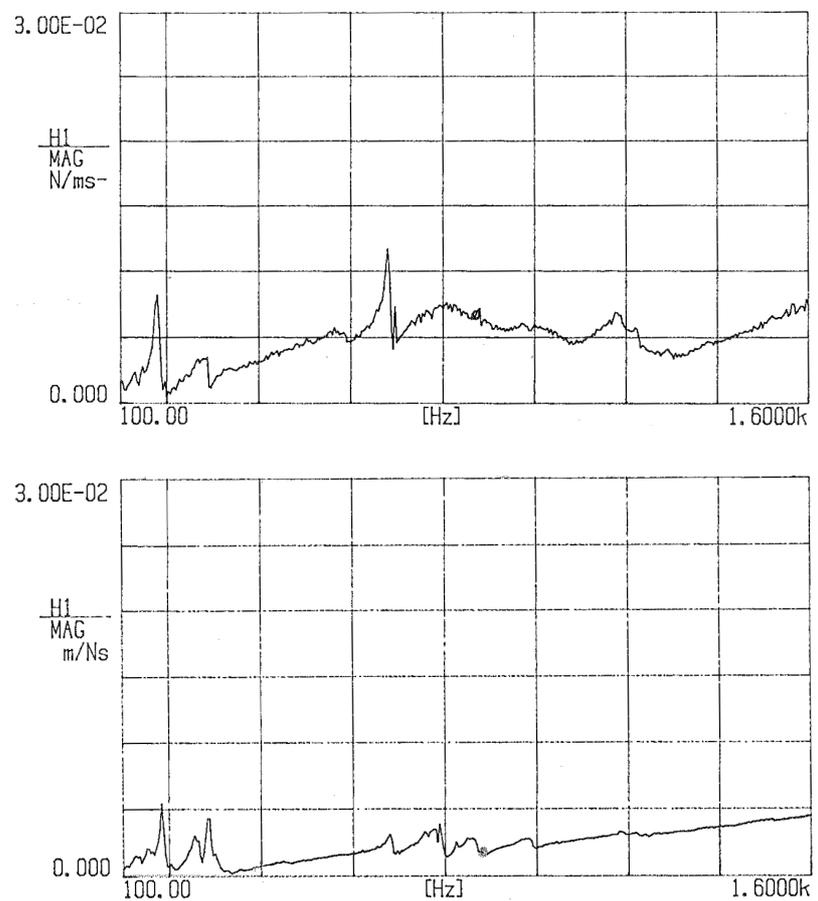


Abb. 44: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der A5-Saite, gemessen oben: am linken hohen Steg; unten: am rechten Außensteg.

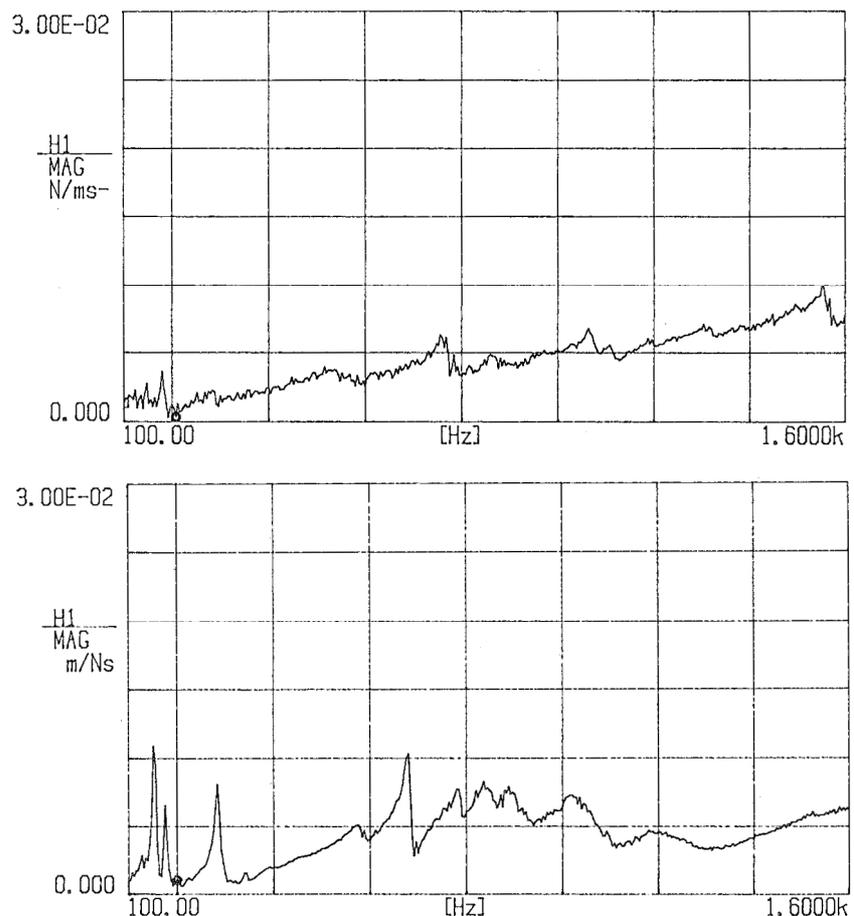


lässt sich feststellen, dass der hohe Steg der Saite ein beweglicheres Auflager bietet als der Außensteg. Der Grund ist, dass der hohe Steg sich mehr in der schwingungsfähigen Mitte der Decke befindet, der Außensteg dagegen am Rand und nahe der versteifenden Zarge sitzt. Somit zeichnet sich hier schon ab, dass der hohe Steg eher dazu beschaffen sein wird, Schwingungen von der Saite auf den Korpus zu übertragen, als dies beim Außensteg der Fall ist.

### 6.2.2. Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen

Als nächstes wird die andere Hälfte der Saiten betrachtet. Das sind diejenigen, welche über den rechten hohen Steg und den linken Außensteg geführt sind. Sie tragen die geraden Nummern 2 bis 28. Die Ergebnisse der Messungen für die 2. Saite (Note Gis3) sind Abb. 45 zu entnehmen. Auch hier tendieren beide Messkurven dazu, mit wachsender Frequenz anzusteigen und zeigen ähnliche Admittanzwerte von im Mittel 0,005 s/kg. Der *Search Point* markiert die Grundfrequenz 205 Hz. In Abweichung vom üblichen Sachverhalt, jedoch in Übereinstimmung mit der tiefen G-Saite, ist für die tiefe Gis3-Saite die Admittanz am hohen Steg mit 0,0004 s/kg kleiner als am Außensteg, wo sie etwa 0,001 s/kg beträgt.

Abb. 45: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der Gis3-Saite, gemessen oben: am rechten hohen Steg; unten: am linken Außensteg.



Als Beispiel für eine mittlere Lage dient die Gis4-Saite (14. Saite, Abb. 46). Am hohen Steg (oberes Teildiagramm) weist die Admittanz deutlich ausgeprägte Spitzen auf, die Eigenschwingungen der Decke widerspiegeln. Bei ihrer Grundschwingung (Frequenz 405 Hz) „sieht“ die Saite dort eine Admittanz von nahezu 0,006 s/kg, am Außensteg (unteres Teildiagramm) dagegen weniger als ein Drittel.

Abb. 46: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der Gis4-Saite, gemessen oben: am rechten hohen Steg; unten: am linken Außensteg.

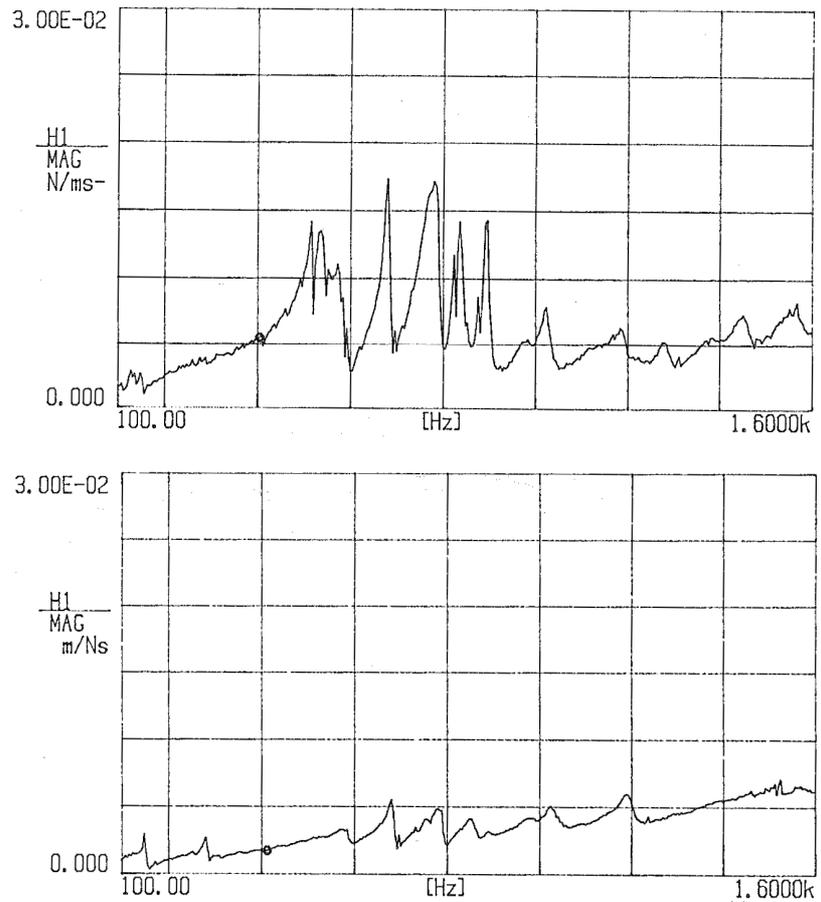
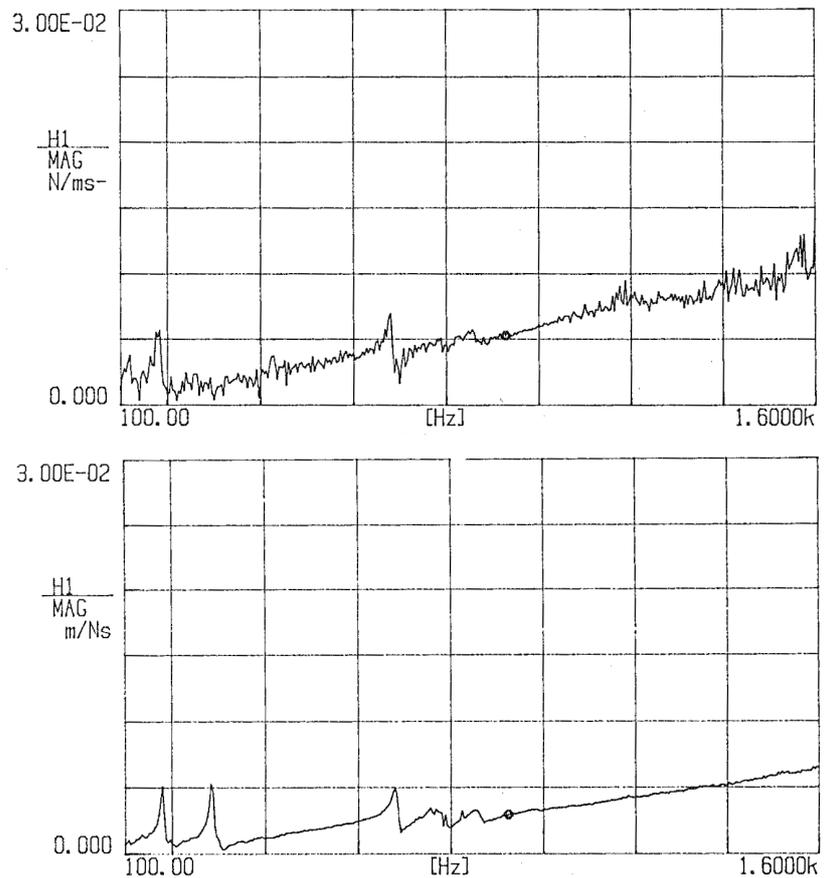


Abb. 47: Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz an den beiden Auflagepunkten der B5-Saite, gemessen oben: am rechten hohen Steg; unten: am linken Außensteg.



Für die höchste Saite (Nr. 28, Note B5, Abb. 47) ist die Grundfrequenz 930 Hz. Die Admittanz nimmt Werte von mehr als 0,005 s/kg am hohen Steg bzw. weniger als 0,003 s/kg am Außensteg an. Damit festigt sich die Tendenz, dass für die mittleren und hohen Lagen der hohe Steg eher zum Mitschwingen tendiert als der Außensteg.

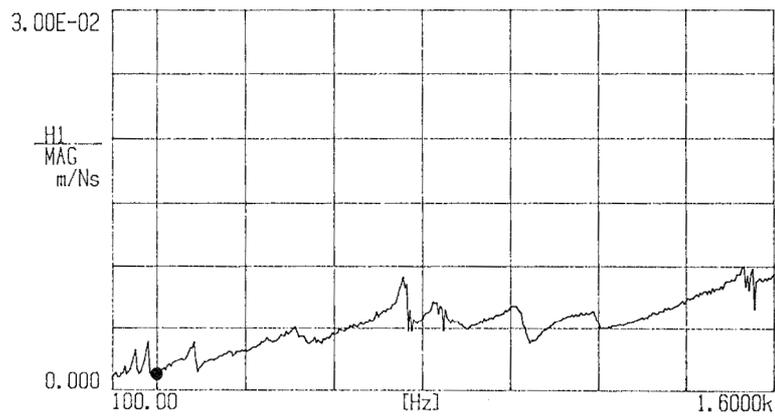
### 6.3. Admittanz am linken hohen Steg

Somit haben sich in der Mehrzahl der Fälle die hohen Stege, verglichen mit den jeweiligen Außenstegen, als schwingfreudiger erwiesen. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche wird deshalb die folgende Betrachtung auf die hohen Stege fokussiert. Um den direkten Vergleich zu ermöglichen, sind in Abb. 48 beispielhaft vier Admittanzkurven zusammen gestellt. Diese wurden an den Kontaktpunkten der angegebenen Saiten zum linken hohen Steg gemessen. In ihrer Gesamtheit können die Messergebnisse für diesen Steg dem Anhang 2 entnommen werden. Man erkennt bei allen Kurven eine ansteigende Tendenz. Gemäß Anhang 1 Teil 3 entspricht dies global dem Verhalten einer Feder. Diesem überlagern sich lokale Spitzen, die von den Eigenschwingungen der Decke herrühren.

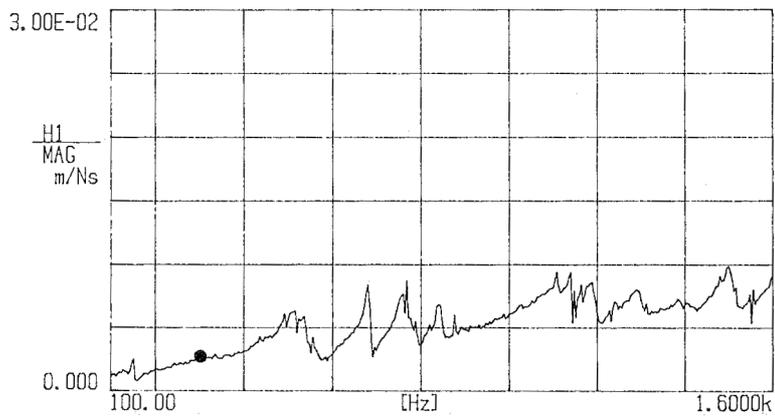
Ein Maß für die Energie, die irreversibel von der Saite in ein Auflager eingespeist werden kann, ist die mechanische Konduktanz; siehe hierzu z.B. Weinreich (1979), Fleischer (2000, 2001) und Boullosa (2003). Sie ist der Realteil der komplexen Admittanz und spiegelt die Dämpfer-Eigenschaften des Auflagers wider; siehe hierzu Anhang 1 Teil 1. Wie dort weiter ausgeführt ist, gibt der Imaginärteil der komplexen Admittanz an, welche Energie reversibel an das Auflager übertragen und dort gespeichert werden kann. Es gibt zwei Möglichkeiten: Ist der Imaginärteil negativ, wird kinetische Energie zwischengespeichert (Anhang 1 Teil 2: Masse). Ist er dagegen positiv, dann tritt potentielle oder Feder-Energie auf (Anhang 1 Teil 3: Feder).

Die Abstrahlung von Schallenergie wirkt sich für die Saite wie eine Dämpfung aus. Man verwendet deshalb häufig den Begriff „Strahlungsdämpfung“. Für den Nutzeffekt eines akustischen Instruments wäre folglich der Realteil der Admittanz die adäquate Messgröße. Bei der hier beschriebenen Messung konnte jedoch lediglich deren Betrag ermittelt werden. Da Real- und Imaginärteil nicht gesondert vorliegen, muss der Betrag der Admittanz zur Interpretation dienen. In einem Fall stimmen allerdings Admittanz und Konduktanz überein. Tritt Resonanz ein, so kompensieren sich Feder- und Masseanteil. In der Folge verschwindet der Imaginärteil, was bedeutet, dass in den Maxima der Messkurven die Admittanz rein reell ist.

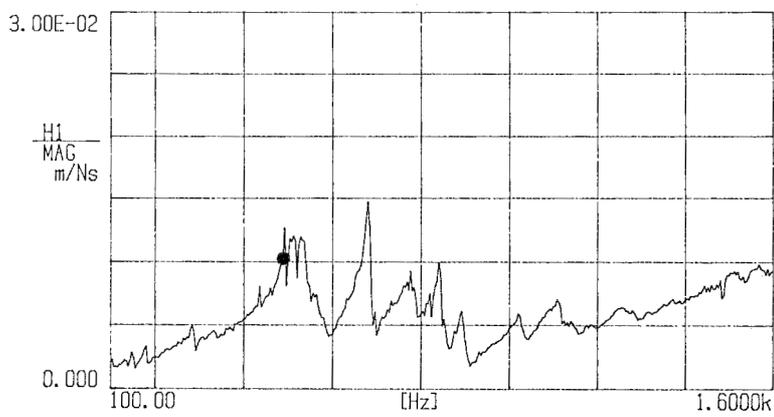
Die Frequenz der Grundschiwingung jeder Saite ist im zugehörigen Messdiagramm durch den *Search Point* markiert und als schwarzer Punkt hervorgehoben. Die zugehörigen Zahlenwerte wurden entnommen und sind in Abb. 49 für sämtliche Saiten mit ungeraden Ordnungszahlen aufgetragen. Die Saiten sind durch die musikalische Note ihres Grundtons gekennzeichnet. Die Abszisse kommt einer logarithmischen Frequenzskale gleich, die bei 195 Hz (1. Saite, Note G3) beginnt. Die kürzeste Saite des linken hohen Steges und damit die höchste „linke“ Note hat die Grundfrequenz 870 Hz. Die ausgefüllten Dreiecke in Abb. 49 stehen für die Admittanz am anderen Auflager der Saiten, d.h. am rechten Außensteg. Diese ist im Allgemeinen kleiner als die Admittanz am hohen linken Steg, die durch die ausgefüllten Kreise wiedergegeben ist. Abgesehen von den tiefen Lagen kennzeichnen die Kreise somit das schwingfreudigere der beiden Auflagere.



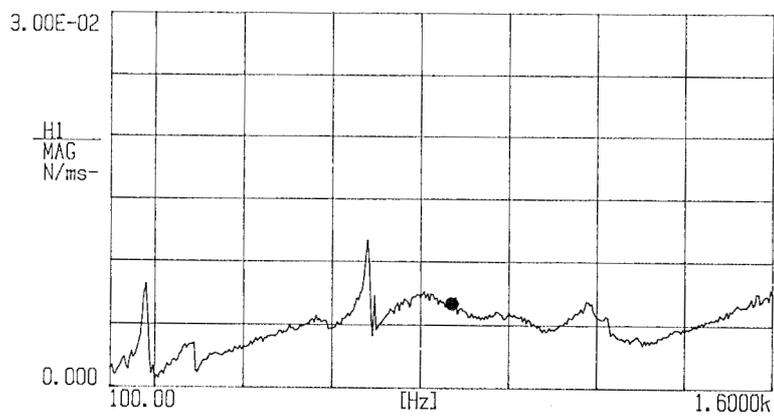
**1. Saite  
Note G3**



**9. Saite  
Note Dis4**



**17. Saite  
Note H4**



**27. Saite  
Note A5**

Abb. 48: Mechanische Admittanz (Betrag als Funktion der Frequenz) von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

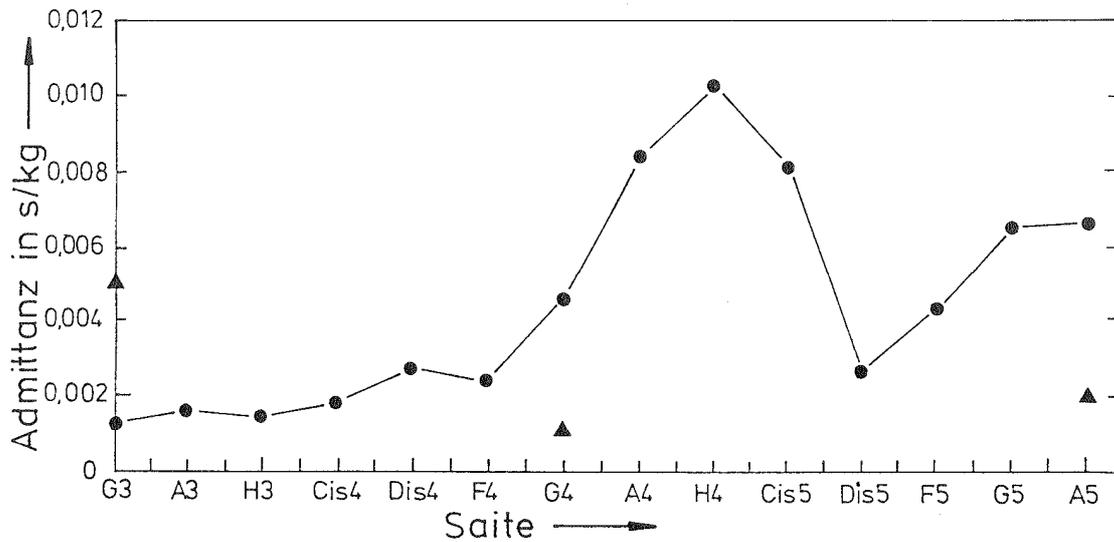


Abb. 49: Betrag der Admittanz, gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten auf dem linken hohen Steg (Kreise) bzw. am rechten Außensteg (Dreiecke)

Die Kreise sind in Abb. 49 durch Geraden zu einer Messkurve verbunden. In den tiefen Lagen steigt die Admittanz am hohen Steg von etwa 0,001 s/kg langsam an. Sie bildet zwei deutliche Maxima aus. Das erste ist zwischen der A4- und der Cis5- Saite zu beobachten und erreicht für die H4-Saite etwas mehr als 0,010 s/kg. In den hohen Lagen ist die Admittanz ebenfalls ziemlich groß. So werden sowohl für die G5- wie für die A5-Saite nahezu 0,007 s/kg gemessen.

## 6.4. Admittanz am rechten hohen Steg

In Analogie zu den bisher angestellten Überlegungen sind in Abb. 50 vier Beispiele für Admittanzkurven gegeben, die sich nun auf den rechten hohen Steg beziehen. Die Frequenz des Grundtons ist jeweils als schwarzer Punkt hervorgehoben. Weitere Ergebnisse finden sich im Anhang 2.

Die Admittanzwerte, die man den einzelnen Diagrammen bei der Grundfrequenz entnehmen kann, sind in Abb. 51 gesammelt. Sie umfassen sämtliche Saiten mit den geraden Ordnungszahlen und ergänzen demnach die Ergebnisse von Abb. 49. Die Abszisse kommt einer logarithmischen Frequenzskala gleich, die von 205 Hz (2. Saite, Note Gis3) bis 930 Hz (28. Saite, Note B5) reicht. Die ausgefüllten Kreise, verbunden durch Geraden, stehen für die Admittanz am rechten hohen Steg. Zum Vergleich sind als Dreiecke diejenigen Admittanzen eingetragen, die man für die Grundfrequenz am zugehörigen Außensteg misst. Diese Werte sind in aller Regel kleiner als die Messergebnisse für den hohen Steg. Auch hier lässt sich festhalten, dass die Saiten im Allgemeinen am hohen Steg eine höhere Admittanz „sehen“ als am niederen Außensteg. Ausnahmen sind lediglich in den tiefen Lagen zu beobachten. Somit finden auch hier die Saiten am hohen Steg in der Mehrzahl aller Fälle ein deutlich schwingfreudigeres Auflager vor als am Außensteg.

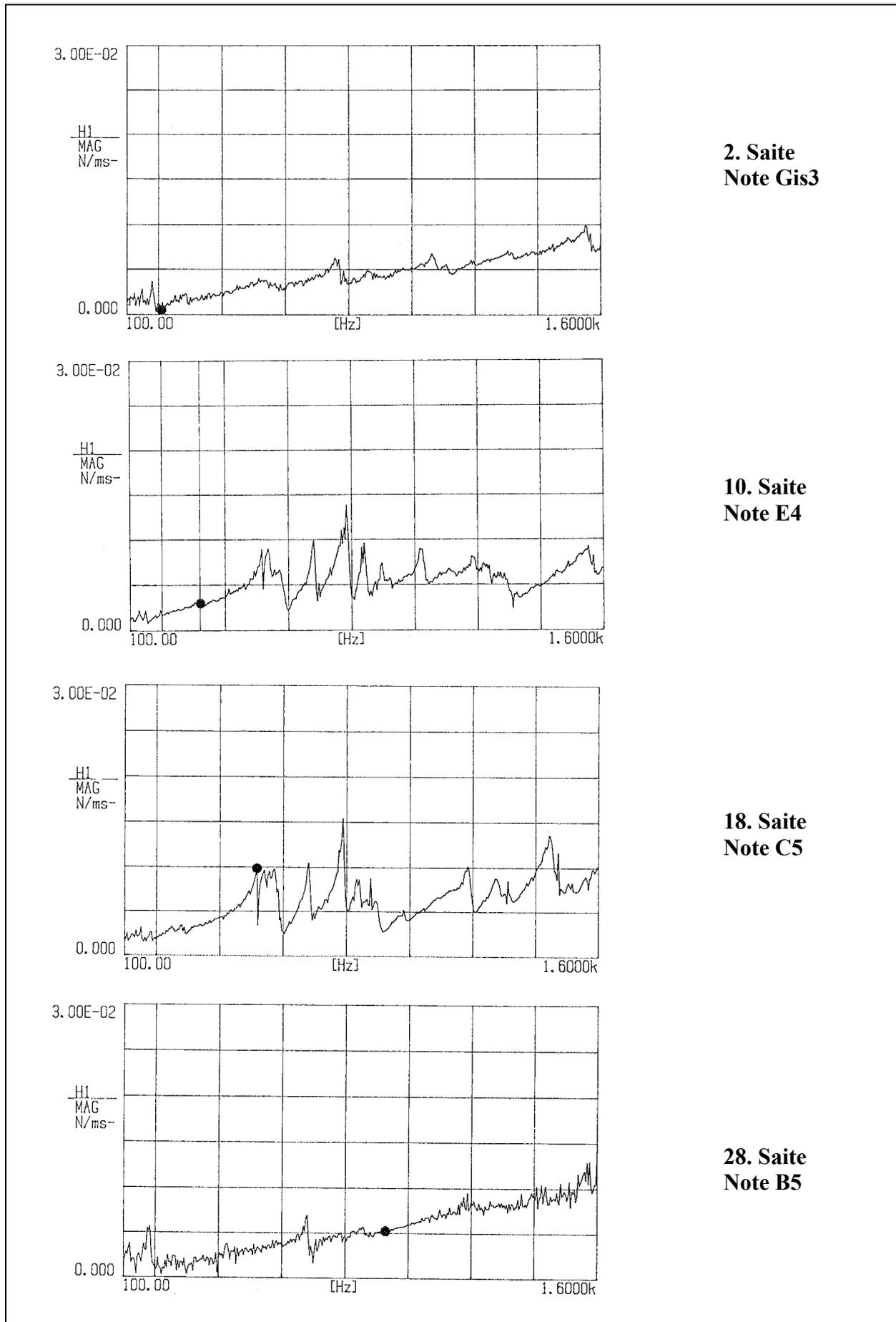


Abb. 50: Mechanische Admittanz (Betrag als Funktion der Frequenz) von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

Die Kreise in Abb. 51 sind zu einer Messkurve verbunden, die eine ähnliche Charakteristik wie Abb. 49 zeigt. Für die tiefen Lagen ist die Admittanz am rechten hohen Steg sehr klein (etwa 0,001 s/kg) und steigt langsam an. Im Bereich der mittleren Lagen tritt ein Maximum zwischen der B4- und der D5- Saite auf, das für die C5-Saite etwa 0,010 s/kg erreicht. In den hohen Lagen bildet die Admittanz ein weiteres Maximum aus. Für die Gis5-Saite werden nahezu 0,007 s/kg gemessen.

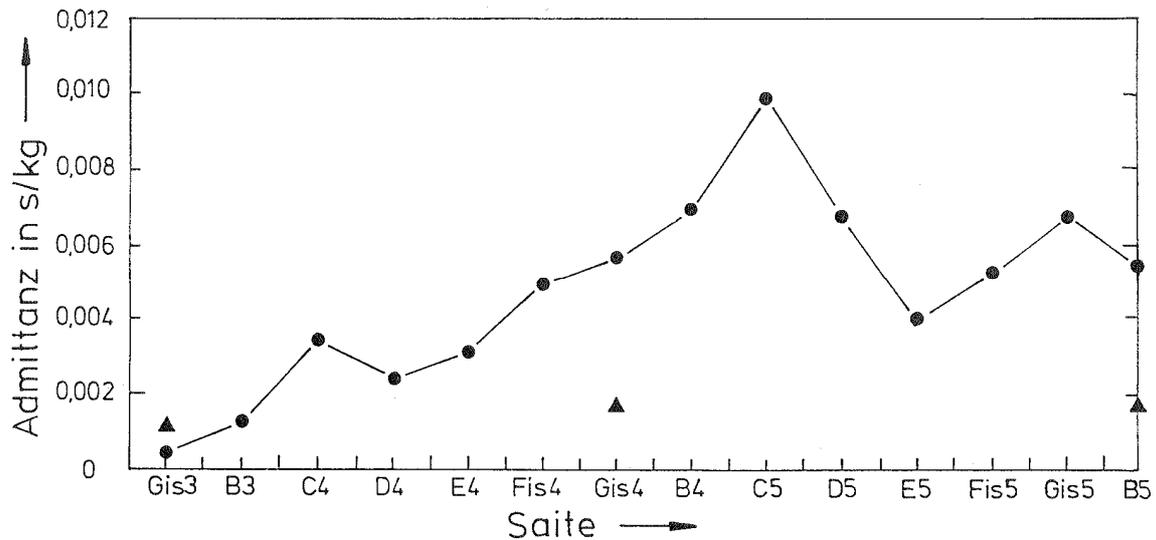


Abb. 51: Betrag der Admittanz, gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten auf dem rechten hohen Steg (Kreise) bzw. am linken Außensteg (Dreiecke)

## 6.5. Zusammenhang mit Deckenschwingungen

Die Punktadmittanz kennzeichnet, wie beweglich die Korpusdecke am betreffenden Messpunkt ist. Sie muss demnach die Schwingungsformen widerspiegeln, wie sie im vorhergehenden Kapitel dargestellt worden sind. Eine Schwingung kann dann angeregt werden und führt zu einer hohen Admittanz, wenn sowohl die Frequenz wie auch der Anregungspunkt „stimmen“. An Hand einiger Schwingungsformen sollen wesentliche Zusammenhänge exemplarisch dargestellt werden. Die Schwingungsformen werden in Anlehnung an die Nomenklatur von Abschnitt 5.5 bezeichnet.

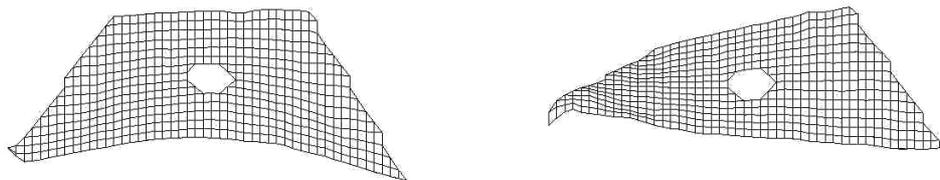


Abb. 52: Schwingungen der Decke  
links: Hauptform I bei 195 Hz (Note G3); rechts: Hauptform II bei 280 Hz (Note Cis4 bzw. D4).

Die beiden Schwingungsformen von Abb. 52 zeichnen sich dadurch aus, dass sich die Ränder, im Besonderen die Spitzen an der Basis des Trapezes, stark bewegen. Bei der Hauptform I (links in Abb. 52) schwingen sie in Phase, bei der Hauptform II (rechts in Abb. 52) in Gegenphase. Es darf vermutet werden, dass am Außensteg durch die tiefen Saiten insbesondere die Hauptform I stark angeregt werden kann. Dafür spricht nicht nur die Position der Saiten, sondern auch, dass diese beim Grundton ebenso wie der Korpus symmetrisch schwingen. Die ausgeprägte Bewegung der Ränder kann erklären, warum in den tiefen Lagen – und nur in den tiefen Lagen - die Admittanz am Außensteg größer ist als am weiter innen liegenden hohen Steg.



Abb. 53: Schwingungen der Decke  
links: Hauptform III bei 380 Hz (Note G4); rechts: Hauptform IV bei 545 Hz (Note C5 bzw. Cis5).

Die Admittanz an den inneren hohen Stegen ist dagegen am größten im Bereich der Noten H4 bzw. C5, deren Grundfrequenzen 488 Hz bzw. 515 Hz sind. Zwei Schwingungsformen der Decke sind in Abb. 53 dargestellt. Deren Frequenzen liegen zwar etwas tiefer bzw. etwas höher, jedoch in der Nähe derjenigen der Admittanzmaxima. Bei beiden Formen sind die Ränder weitgehend in Ruhe. Die größten Auslenkungen, insbesondere bei der Hauptform IV (rechts in Abb. 53), treten in der Nähe der inneren hohen Stege auf. Sie liegen auf der Höhe des Schallochs, d.h. im Bereich von Saiten der „mittleren Lagen“.

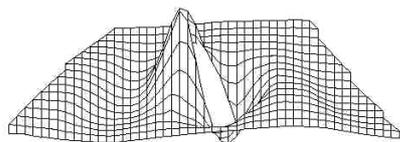


Abb. 54: Schwingung der Decke in der Hauptform VI bei 785 Hz (Note G5).

Die Admittanz weist an den inneren Stegen ebenfalls große Werte in den ganz hohen Lagen auf. Dieses zweite, nicht ganz so stark ausgeprägte Maximum kann an Hand der Abb. 54 erklärt werden. Bei den zugehörigen Frequenzen bewegt sich die Decke so, dass zwei weitere laterale Schwingungsbäuche erscheinen. Diese bilden sich etwa dort aus, wo die beiden Innenstege aufliegen. Dort finden die Saiten G5 (Grundfrequenz 780 Hz) bzw. Gis 5 (Grundfrequenz 820 Hz) besonders schwingfreudige Auflager vor.

## 6.6. Zusammenfassende Bemerkung

Diese qualitativen Vergleiche zeigen, dass Ergebnisse der Schwingungsexperimente mit dem Scanning Vibrometer im Einklang mit denen der Admittanzmessungen sind. Erstere (Kapitel

5) geben Aufschluss über die mechanischen Schwingungen aus globaler Sicht, letztere (Kapitel 6) lokal aus der „Sicht“ der Saiten. Stimmt die Frequenz einer Saitenschwingung mit einer Schwingungsfrequenz der Decke überein, so kann sich das Auflager einer Saite leicht bewegen. Voraussetzung dafür ist, dass sich dieses Auflager nicht in einem Knoten, sondern möglichst im Bauch einer Deckenschwingung befindet. Welcher Schall aus der Schwingung der Saiten und des Korpus unter Spielbedingungen dann tatsächlich resultiert, ist Thema des nächsten Kapitels.

## 7. FFT-ANALYSE DER SCHALLSIGNALLE

Im folgenden und einem weiteren Kapitel wird die Fourier-Analyse der Hackbrett-Klänge beschrieben. Jeder Saitenchor (im Weiteren meist vereinfacht als „Saite“ bezeichnet und durch die musikalische Note charakterisiert) wurde mit dem Klöppel angeschlagen. Das auf diese Art erzeugte akustische Signal wurde aufgezeichnet, mit Hilfe der Fourier-Transformation in seine Teiltöne zerlegt und untersucht.

### 7.1. Instrumentierung und Messung

Das Hackbrett stand in normaler Spielposition, d.h. mit der vorderen Kante aufliegend und am hinteren Ende mit den beiden Holzfüßchen hochgestellt, auf einem Tisch in einem Laborraum. Der Experimentator nahm einen der Klöppel, die in Abb. 55 vor dem Hackbrett liegen, zwischen Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand und schlug damit nacheinander jeden der Saitenchöre an. Das Schallsignal der angeschlagenen Saite wurde mit einem Kondensator-Mikrofon in etwa einem halben Meter Abstand seitlich neben dem Hackbrett aufgenommen. Der Anschlag und die folgenden 20 s eines jeden Saitenklanges wurden auf *Digital Audio Tape* (DAT) gespeichert.



Abb. 55: Hackbrett in Spielposition; vor dem Instrument liegen die beiden Klöppel.

Die auf DAT gespeicherten Schallsignale wurden mit einem Ono Sokki *Multi-Purpose FFT Analyzer* CF-5210 analysiert. Für eine Übersichtsmessung (siehe die Abschnitte 7.2 und 7.3) wurde der Frequenzbereich von 0 bis 10 kHz gewählt. Die Frequenzauflösung betrug 12,5 Hz. Ein 80 ms langer Abschnitt des Schallsignals unmittelbar nach dem Anschlag wurde mit einem Hanning-Fenster gewichtet und einer Schnellen Fourier-Analyse (*Fast Fourier Transformation*, FFT) unterzogen. Das Spektrum wurde in einem Pegelbereich von 60 dB darge-

stellt, über GPIB (*General Purpose Interface Bus*) in einen Plotter hp 7470A übernommen und ausgedruckt. In weiteren Messreihen wurde zusätzlich der zeitliche Verlauf untersucht; vgl. die Abschnitte 7.4 und 7.5 sowie vor allem Kapitel 8.

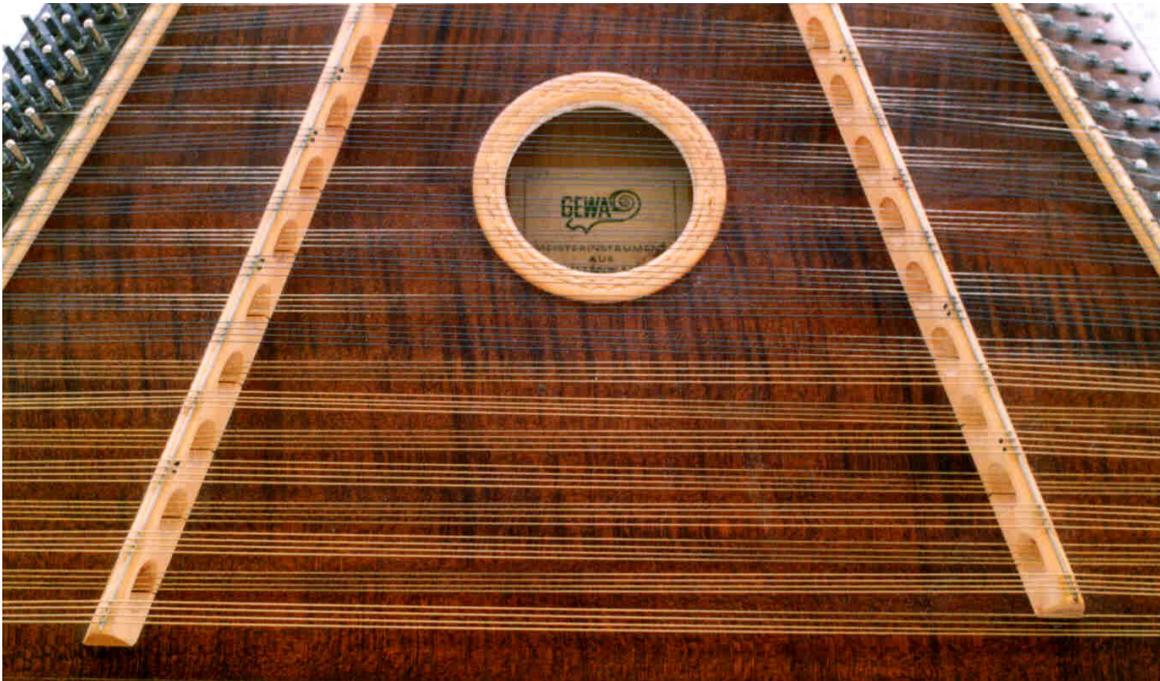


Abb. 56: Teilansicht des Hackbretts in Spielposition. Es ist zu erkennen, dass die Saitenchöre dadurch gegeneinander verschränkt sind, dass sie abwechselnd auf dem linken bzw. rechten hohen Steg aufliegen.

Wie bereits mehrfach beschrieben (siehe z.B. Kapitel 2 und Abschnitt 6.2), sind die Saiten über die beiden Außenstege geführt und am Rand des Korpus gefestigt. Ihre schwingende Länge ist dadurch reduziert, dass jede Saite noch zusätzlich durch einen hohen Steg aufgeständert ist. In Abb. 56 erkennt man, dass der 1., 3. usw. Saitenchor auf dem linken hohen Steg aufliegt. Sie sind ohne Kontakt unter dem rechten hohen Steg hindurch bzw. vor dem Ende des Stegs vorbei geführt und enden am rechten Außensteg. Entsprechend ist der 2., 4. usw. Saitenchor durch den rechten hohen Steg angehoben, unter dem linken hohen Steg hindurch geführt und am rechten Rand über den Außensteg gespannt. Zunächst wurden die vierzehn links aufliegenden Saitenchöre mit den ungeraden Nummern 1 ... 27 nahe dem hohen Steg angeschlagen und zum Klingen gebracht. Danach wurde auf analoge Weise mit den rechts aufliegenden geradzahlig Saitenchören 2 ... 28 verfahren.

Das Anschlagen der Saiten mit dem Klöppel kann als das punktuelle Aufbringen einer Anfangsgeschwindigkeit modelliert werden. Dabei können naturgemäß nur solche Schwingungsformen hervorgerufen werden, die am Ort des Anschlags keinen Knoten aufweisen. Mit steigender Frequenz unterteilt sich die Saite in immer mehr und immer kürzere Bereiche, die gegenphasig schwingen. Je höher die Frequenz der Saitenschwingung wird, desto mehr Schwingungsknoten bilden sich somit auf der Saite aus. Irgendwann tritt der Fall ein, dass am Anschlagort ein Knoten zu liegen käme. Schlägt beispielsweise der Klöppel bei einem Zehntel der Länge auf die Saite, dann träfe er einen Knoten der zehnten Teilschwingung. Folglich wird in diesem Beispiel die zehnte Teilschwingung nicht angeregt, bei einem Fünfzehntel der Saitenlänge die fünfzehnte Teilschwingung usw. Analoges gilt für die ganzzahligen Vielfachen. Das Linienspektrum der Saitenschwingung wird demnach Lücken aufweisen, die vom Ort des Anschlags bestimmt sind. Da immer nahe am hohen Steg angeschlagen wurde, treten diese Lücken erst bei den hohen Teiltönen auf. Im Bereich tiefer Frequenzen sind im Spektrum der Saitenschwingung lückenlos zahlreiche Anteile enthalten.

In Hinsicht auf die Amplituden, mit denen sich diese mechanischen Teilschwingungen ausbilden, spielt das Verhältnis der Massen des Klöppels und der Saiten eine wesentliche Rolle. Nach Fletcher und Rossing (1998; Abschnitt 2.9: *Struck String*) ist zu erwarten, dass im vorliegenden Fall die Schwingungsamplituden im Wesentlichen umgekehrt proportional zur Frequenz, d.h. entsprechend  $-6$  dB/Oktave, abnehmen werden.

## 7.2. Einzelspektren für die Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen

Abb. 57 gibt vier der Schallspektren wieder. Sie entstehen auf die beschriebene Weise für Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen und somit ungerade Nummern tragen. Weitere Ergebnisse für denselben Steg sind im Anhang 3 zusammen gestellt. An der Ordinate ist der Pegel zwischen  $-80$  dB und  $-20$  dB (in den Bildschirmausdrucken als dBVr gekennzeichnet) angetragen. Um daraus den Schalldruckpegel zu erhalten, sind diese Werte um  $100$  dB zu erhöhen, so dass die Schallpegel-Skala von  $+20$  dB bis  $+80$  dB reicht.

Mehrere Faktoren wirken sich auf den Schalldruck aus. Neben den mechanisch-akustischen Eigenschaften des Instruments können beispielsweise Unterschiede im Anschlag oder akustische Eigenheiten des Aufnahmerraumes die Amplituden und deren Relationen beeinflussen. Obwohl deshalb allgemeine Aussagen schwierig erscheinen, zeichnen sich in den Spektren doch folgende Gemeinsamkeiten ab:

- Nicht immer hat der erste Teilton den größten Schalldruckpegel. So prägt sich bei der 1. Saite der vierte Teilton, bei der 5. Saite der dritte Teilton und bei der 3., 9., 13. und 15. Saite der zweite Teilton am stärksten aus. Erst ab der 17. Saite hat der erste Teilton regelmäßig den größten Pegel.
- Die Frequenz des stärksten Teiltone liegt in aller Regel zwischen etwa  $400$  Hz und  $900$  Hz. Zwei Ausnahmen bei  $275$  Hz (7. Saite) und  $345$  Hz (11. Saite) bestätigen die Regel.
- „Formanten“, d.h. ausgeprägte Energieschwerpunkte, die durchgängig auftreten, sind bei etwa  $300$  Hz bis  $1000$  Hz,  $1600$  Hz bis  $2000$  Hz sowie zwischen  $4000$  Hz und  $5000$  Hz zu beobachten.

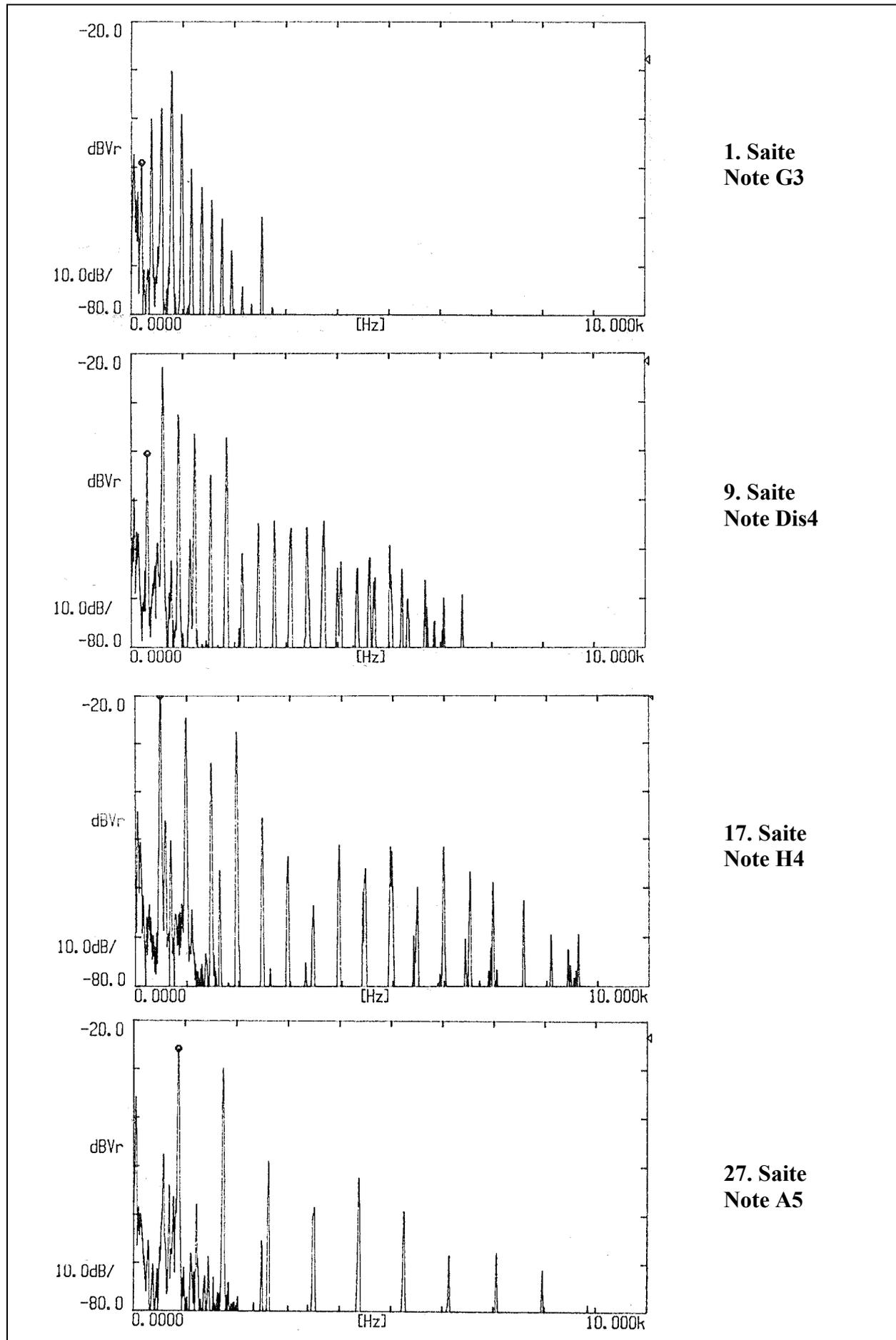


Abb. 57: Pegel-Frequenz-Spektren der Töne von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

Saite Nr.	Note	$f_{\text{real}}/\text{Hz}$
1	G3	195
3	A3	220
5	H3	248
7	Cis4	275
9	Dis4	305
11	F4	345
13	G4	385
15	A4	433
17	H4	488
19	Cis5	548
21	Dis5	613
23	F5	693
25	G5	780
27	A5	870

Tab. I: Tatsächliche Frequenzen  $f_{\text{real}}$  der Grundtöne der Saitenchöre, die auf dem linken hohen Steg und auf dem rechten Außensteg aufliegen, mit den zugehörigen Notenbezeichnungen.

Systembedingt sind bei der diskreten Fourier-Analyse die Frequenzen der Teiltöne „gerastert“. Da sie nur Werte im jeweiligen Raster, jedoch keine Zwischenwerte annehmen können, werden die Ergebnisse von der gewählten Frequenzauflösung beeinflusst. Die Frequenzen  $f_{\text{real}}$  der Grundtöne, die bei einer Auflösung von 2,5 Hz gemessen wurden, sind in Tab. I zusammen gestellt. Nach Maßgabe der jeweiligen Auflösung können diese Angaben von denjenigen abweichen, welche in den Diagrammen vermerkt sind. Die Messwerte spiegeln wider, dass das Instrument seine korrekte Stimmung verloren hat: Nur in einigen wenigen Fällen haben die Frequenzen von Tab. I die nominalen Werte, die sich auf den Kammerton A4 mit 440 Hz beziehen. Dass sie in den meisten Fällen etwas kleiner sind, ist auf die lange Zeit zurückzuführen, in der das Instrument nicht nachgestimmt worden ist.

### 7.3. Einzelspektren für die Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen

In Abb. 58 sind exemplarisch vier weitere Spektren wiedergegeben. Diese ergeben sich für Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen und gerade Nummern tragen. Die übrigen Ergebnisse sind dem Anhang 3 zu entnehmen. Die folgenden Gemeinsamkeiten sind zu erkennen:

- Auch hier hat nicht immer der erste Teilton den größten Pegel. Bei der 2. Saite ist beispielsweise der dritte Teilton, bei der 4., 6. und 8. Saite der zweite Teilton am stärksten ausgeprägt. Ab der 14. Saite ist dann der erste Teilton regelmäßig der mit dem größten Pegel.

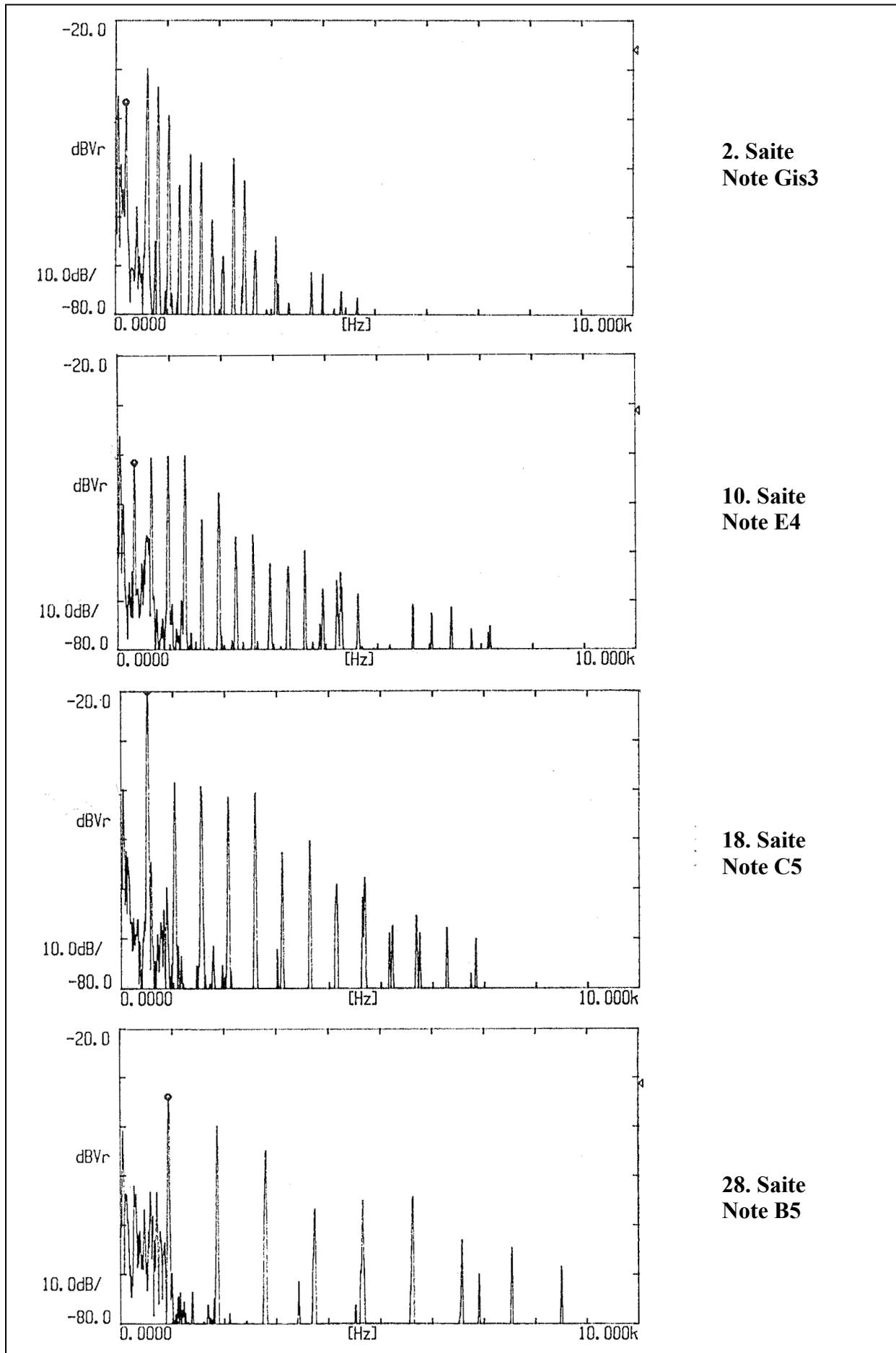


Abb. 58: Pegel-Frequenz-Spektren der Töne von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

- Die Frequenz des stärksten Teiltons liegt in aller Regel zwischen 412 Hz und 925 Hz. Eine Ausnahme bei 363 Hz kann als Bestätigung der Regel angesehen werden.
- Ausgeprägte Energieschwerpunkte, wie sie in der Sprachakustik als Formanten bezeichnet werden, sind zwischen etwa 400 Hz und 900 Hz, 1400 Hz und 1950 Hz, 2200 Hz und 2500 Hz, 3600 Hz und 4600 Hz sowie zwischen 5300 Hz und 6000 Hz zu beobachten.

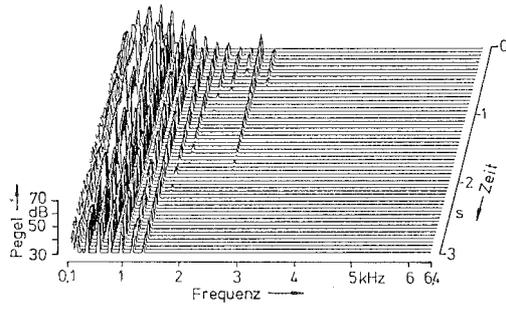
Saite Nr.	Note	$f_{\text{real}}/\text{Hz}$
2	Gis3	205
4	B3	230
6	C4	258
8	D4	293
10	E4	323
12	Fis4	363
14	Gis4	405
16	B4	460
18	C5	515
20	D5	583
22	E5	650
24	Fis5	725
26	Gis5	820
28	B5	930

Tab. II. Tatsächliche Frequenzen  $f_{\text{real}}$  der Grundtöne der Saitenchöre, die auf dem rechten hohen Steg und auf dem linken Außensteg aufliegen, mit den angegebenen Notenbezeichnungen.

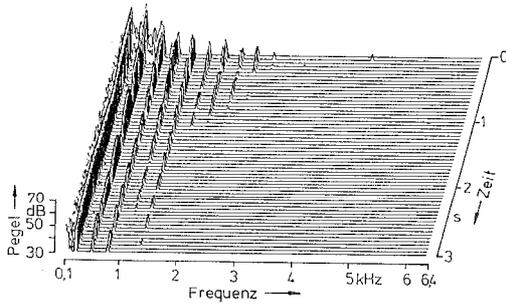
Angaben zu den Grundfrequenzen  $f_{\text{real}}$  der realen Saiten, gemessen mit FFT und der Auflösung 2,5 Hz, finden sich in Tab. II. Auch hier erweisen sich die Saiten als verstimmt. Ihre Grundfrequenzen liegen in aller Regel etwas tiefer, als es der Normstimmung entsprechen würde.

#### 7.4. Wasserfalldiagramme für die Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen

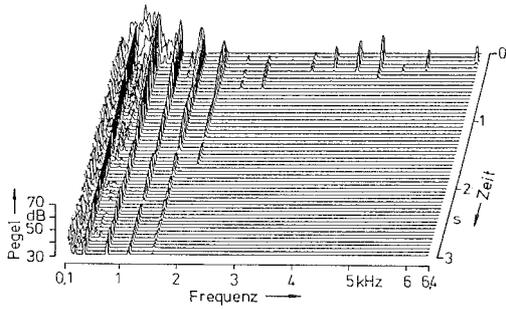
Tieferen Einblick in die Struktur eines musikalischen Tons ermöglicht eine Darstellung, bei der neben der spektralen Aufspaltung auch der zeitliche Verlauf erkennbar wird. Solch eine dreidimensionale Darstellung wird häufig als Wasserfall-Diagramm bezeichnet. In den folgenden beiden Abschnitten werden entsprechende Analysen präsentiert, die wiederum mit dem Ono Sokki *Multi-Purpose FFT Analyzer* CF-5210 gewonnen wurden. Das gespeicherte Schallsignal wurde vom DAT in den digitalen Speicher des Analysators überspielt und dort abschnittsweise einer FFT-Analyse unterzogen.



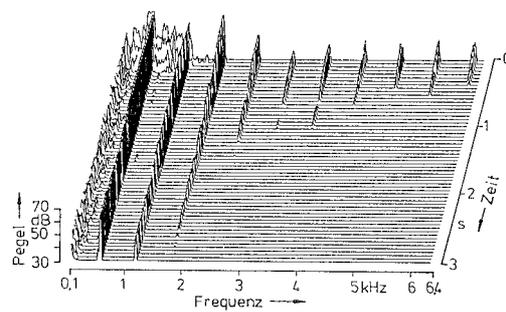
**1. Saite  
Note G3**



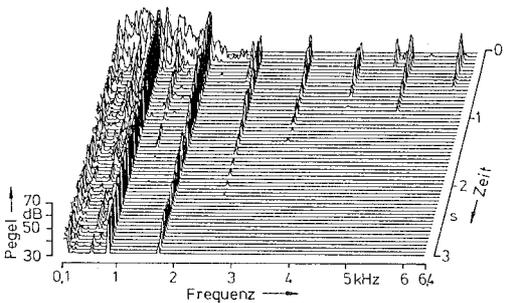
**7. Saite  
Note Cis4**



**13. Saite  
Note G4**



**21. Saite  
Note Dis5**



**27. Saite  
Note A5**

Abb. 59: Schallpegel über der Frequenz (6,4 kHz) und der Zeit (3 s) für fünf angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

Es wurden unterschiedliche Frequenzbandbreiten und Zeitdauern gewählt. Die einzeln analysierten Abschnitte der Schalldruck-Zeitfunktion wurden mit einem Hanning-Fenster gewichtet. Mittels Schneller Fourier-Analyse entstanden jeweils 60 Einzelspektren mit gleichbleibendem zeitlichem Versatz. Es wurde stets ein Pegelbereich von 40 dB dargestellt. Die auf diesem Wege ermittelten Einzelspektren wurden zu einem Wasserfall-Diagramm zusammengefügt. Im diesem Diagramm ist nach oben der Schallpegel, nach rechts die Frequenz und nach schräg vorne die Zeit aufgetragen.

In den folgenden Abb. 59 und 60 sowie weiteren Diagramme im Anhang 4 werden teilweise beträchtliche Schwankungen der Amplituden einzelner Teiltöne sichtbar. Hierin äußern sich Schwebungen, die daraus resultieren, dass die Saitenchöre nicht fachgerecht „in sich“ gestimmt waren. Diese Schwebungen müssen in Kauf genommen werden. Bereits mehrfach wurde darauf hingewiesen, dass im wohlverstandenen Interesse des Besitzers davon Abstand genommen worden war, das Instrument durch möglicherweise nicht sachgerechte Stimmversuche zu beschädigen.

Eine erste Übersicht vermittelt Abb. 59, in der fünf Beispiele zusammengestellt sind. Diese umfassen Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen, und schließen die tiefste und höchste ein. Über eine Dauer von 3 s sind Schallpegelspektren zusammengefügt, deren Analysebandbreite von 100 Hz bis 6400 Hz reicht. Der Bereich tiefer Frequenzen, der keine Teiltöne enthält, in dem aber die Umgebungsgeräusche des Aufnahmeraumes besonders stark sind, ist nicht wiedergegeben. Sehr plastisch stellt sich dar, wie beim Anschlag (am oberen Rand eines jeden Diagramms) nahezu gleichzeitig eine große Zahl von Teiltönen entsteht. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels deutlich geworden war, können deren Pegel sehr verschieden sein. Darüber hinaus ist nun zu erkennen, dass diese Teiltöne unterschiedlich lange „stehen“ (anhalten). Als allgemeine Tendenz ist zu beobachten, dass sie umso schneller abklingen, je höher ihre Frequenz ist. Ergänzt werden diese Ergebnisse durch weitere Diagramme im Anhang 4, für die eine etwas größere Analysebandbreite (10 kHz) gewählt wurde. Die „Lebensgeschichte“ des Saitenklanges wird nunmehr über eine Zeitdauer von insgesamt 6 s verfolgt.

Etwas andere Analyseparameter liegen den Diagrammen von Abb. 60 zu Grunde. Die Frequenz reicht bis 5 kHz. Um das Abklingen möglichst vollständig zu veranschaulichen, sind insgesamt 13 s dargestellt. Für die Note G der dritten Oktave (oberes Diagramm) sind dreizehn Teiltöne erkennbar. Deren tiefster klingt so langsam ab, dass sein Pegel am Ende des Zeitfensters immer noch nicht den kleinsten dargestellten Schallpegel von 30 dB erreicht hat. Die hohen Teiltöne klingen um ein Vielfaches schneller ab. Bei der zwei Oktaven höheren Note G (unteres Diagramm) sind sechs Teiltöne zu erkennen. Hier bestätigt sich wiederum die globale Beobachtung, dass ein Teilton umso rascher an Pegel verliert, je höher seine Frequenz ist.

Die Note G in der vierten Oktave (mittleres Diagramm in Abb. 60) weicht allerdings von dieser Regel ab. In den betrachteten Frequenzbereich fallen zwölf Teiltöne. Nennenswerte Amplituden und Abklingzeiten haben jedoch nur die ersten fünf Teiltöne. Es fällt auf, dass die Teiltöne allesamt sehr rasch abfallen. In ihrer Gesamtheit klingt diese Note weniger lang nach als die Note G5 im unteren Diagramm, von der auf Grund ihrer höheren Frequenzlage eigentlich das raschere Abklingen zu erwarten wäre.

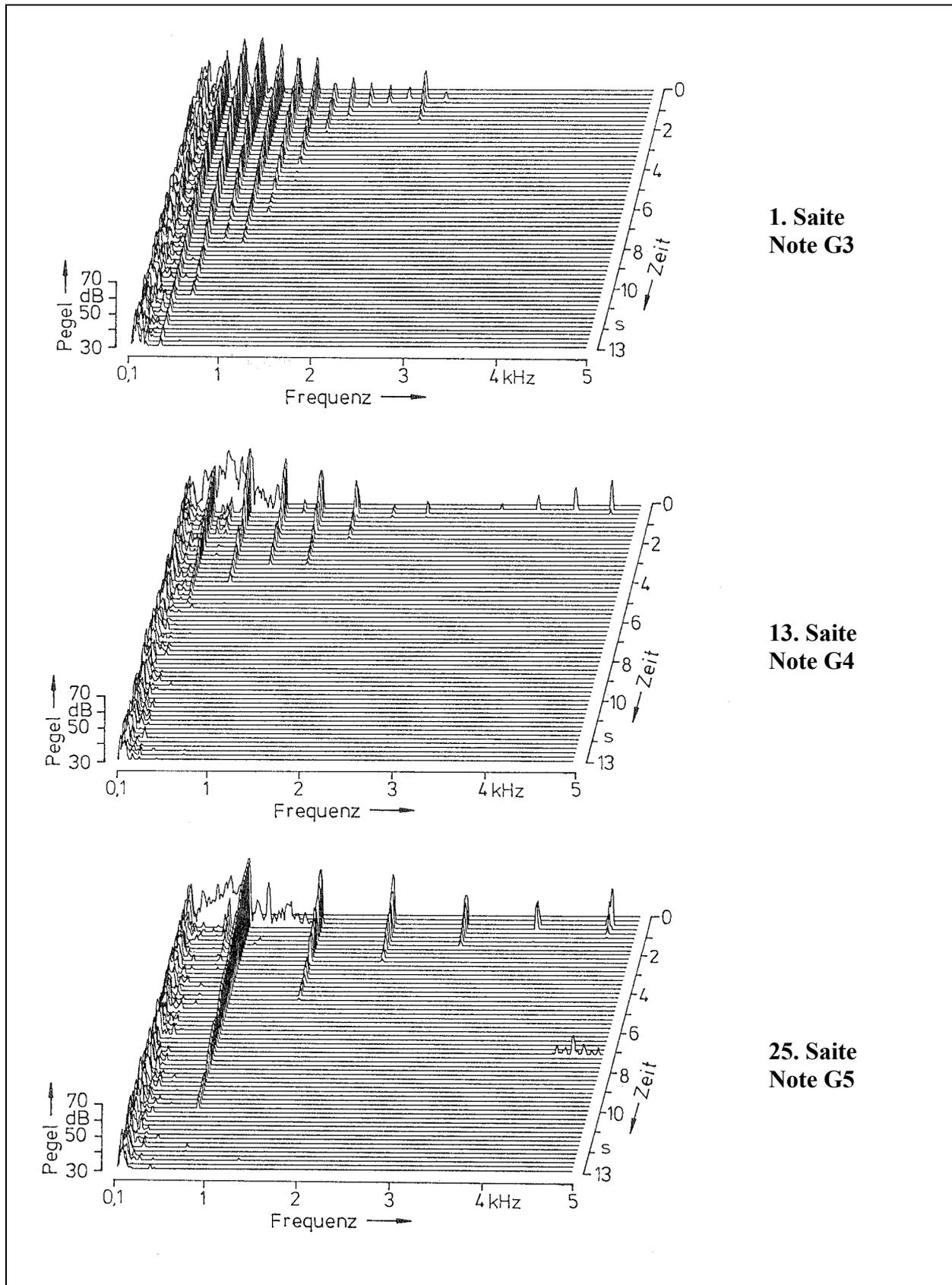
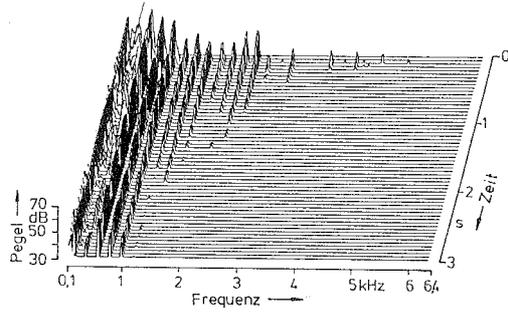


Abb. 60: Schallpegel über der Frequenz (5 kHz) und der Zeit (13 s) für drei angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

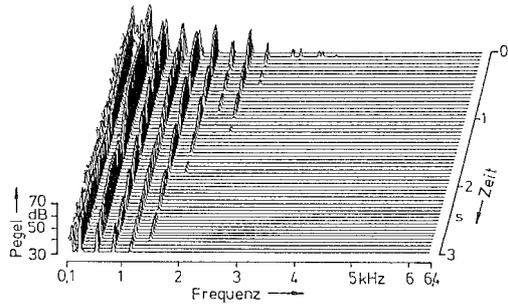
## 7.5. Wasserfalldiagramme für die Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen

Die Ergebnisse für diejenigen Saiten, welche über den rechten hohen Steg gespannt sind, finden sich in den Abb. 61 und 62 und im Anhang 5. Abb. 61 zeigt eine erste Zusammenstellung mit fünf Beispielen. Die Zeitdauer ist 3 s, die Bandbreite 6,4 kHz. Wiederum bleiben die ganz tiefen Frequenzen, bei denen die Lüftungs- und sonstigen Störgeräusche besonders stark sind, ausgespart. Bereits die bisherigen Abschnitte dieses Kapitels haben deutlich gemacht, dass die Anfangspegel sehr unterschiedlich sein können. Ebenfalls bestätigt sich die Tendenz, dass die Teiltöne mit steigender Frequenz immer rascher abklingen. Eine im Vergleich zu Abb. 61 vergrößerte Analysebandbreite (10 kHz) sowie eine verdoppelte Zeitdauer (6 s) charakterisiert die Diagramme im Anhang 5.

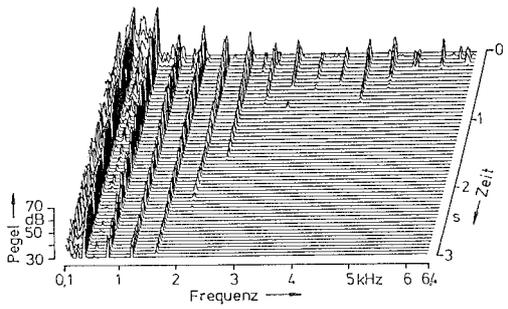
Andere Analyseparameter gelten für Abb. 62. Insgesamt sind drei Noten im Oktavabstand betrachtet. Für die beiden oberen Diagramme wurde die Frequenzbandbreite 5 kHz und die Zeitdauer 13 s gewählt. Die Note B der dritten Oktave (oberes Diagramm) weist ein sehr breites Spektrum auf. Es sind etwa zwanzig Teiltöne zu erkennen, bei denen das Abklingen bis auf den Schallpegel 30 dB verfolgt werden kann. Es zeigt sich, dass die hohen Teiltöne um ein Vielfaches schneller als die tieferen abklingen. Dies gilt ebenso für die beiden anderen Schallsignale. Bei der Note B in der vierten Oktave (mittleres Diagramm in Abb. 62) fallen zwölf Teiltöne in den betrachteten Frequenzbereich. Für die Note B eine Oktave höher (unteres Diagramm) wurde der Analysebereich auf 6,4 kHz vergrößert und die Zeitdauer auf 10 s verkleinert. Bei den sechs Teiltönen bestätigt sich die globale Beobachtung, dass ein Teilton im Allgemeinen umso rascher abklingt, je höher seine Frequenz ist. Eine markante Ausnahme stellt der zweite Teilton dar, der abweichend von der allgemeinen Regel schneller als der dritte Teilton abfällt.



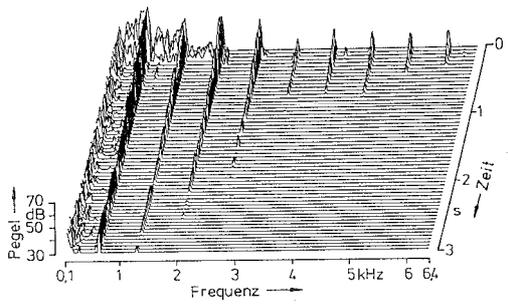
**2. Saite  
Note Gis3**



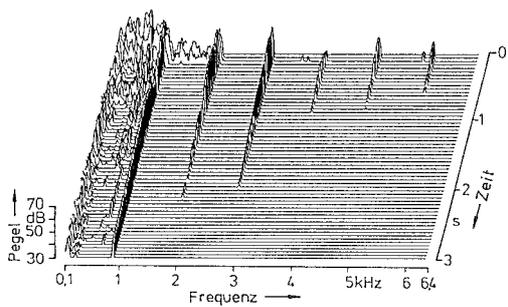
**8. Saite  
Note D4**



**14. Saite  
Note Gis4**



**22. Saite  
Note E5**



**28. Saite  
Note B5**

Abb. 61: Schallpegel über der Frequenz (6,4 kHz) und der Zeit (3 s) für fünf angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

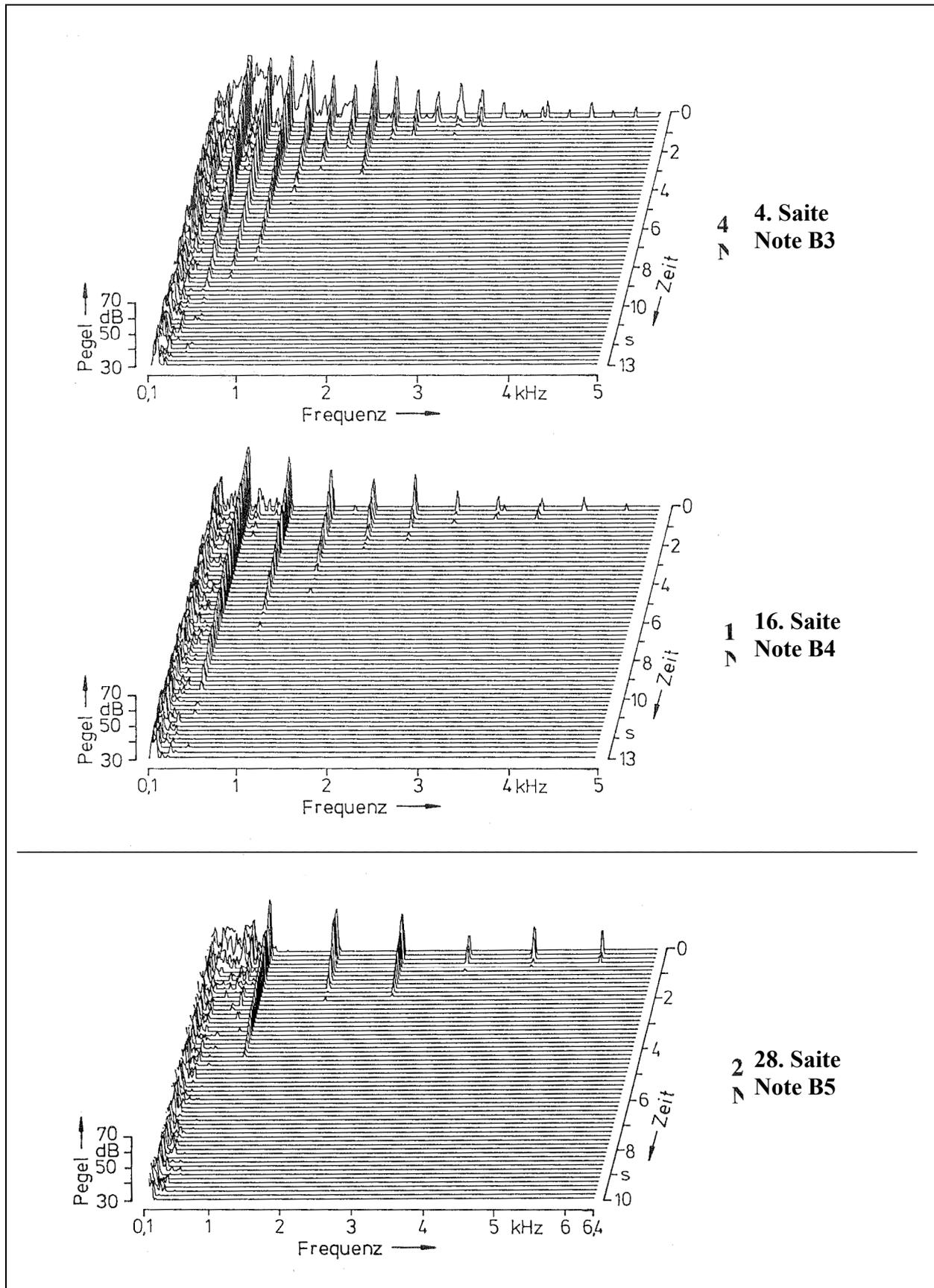


Abb. 62: Schallpegel über der Frequenz (5 kHz bzw. 6,4 kHz) und der Zeit (13 s bzw. 10 s) für drei angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

## 7.6. Zusammenfassende Bemerkung

Die objektiven Analysen des Schallsignals wurden mittels FFT auf unterschiedliche Weise durchgeführt. Zunächst wurde die Zeit nicht in die Betrachtung einbezogen. Das Ergebnis sind die Schallpegel-Frequenz-Spektren der Abschnitte 7.2 und 7.3. Sie geben wieder, welche Teiltöne in welcher Stärke im Schallsignal unmittelbar nach dem Anschlagen enthalten sind. Die Pegel der Teiltöne werden sowohl vom „System“ (dem Instrument samt seinen mechanischen und akustischen Bestandteilen) als auch von der Anregung (Beschaffenheit des Klöppels, Art und Ort des Anschlags) beeinflusst. Ersteres zu untersuchen ist Gegenstand des vorliegenden Berichts, letzteres dagegen nicht.

Diese Untersuchungen wurden dadurch erweitert, dass die Zeit mit einbezogen wurde. Eine Darstellung des Schallpegels über der Frequenz und der Zeit wird üblicherweise als Wasserfall-Diagramm bezeichnet. In einem Wasserfall-Diagramm wird nicht nur erkennbar, welcher Teilton wie stark hervorgerufen wird. Vielmehr zeigt sich auch, wie lange er „steht“ bzw. wie rasch er abklingt. Wie schnell ein Teilton abnimmt, ist allein eine Eigenschaft des Systems, das es zu untersuchen gilt. Dieses Abklingen ist demnach nicht nur von Interesse für das musikalische Signal, sondern gewährt auch Einblick in die frequenzabhängigen mechanoakustischen Eigenschaften des untersuchten Instruments. Über die qualitative Betrachtung dieses Kapitels hinaus soll es deshalb auch quantitativ ausgewertet werden. Dies ist der Gegenstand des nächsten Kapitels.

## 8. ABKLINGEN DES GRUNDTONS

Den Einzelspektren, wie sie im vorhergehenden Kapitel diskutiert worden sind, können die anfänglichen Amplituden der einzelnen Teiltöne entnommen werden. Aussagen über die Abstrahleigenschaften des Korpus sind jedoch nicht möglich. Ist eine Komponente im Schallsignal besonders stark vertreten, kommen hierfür unterschiedliche Gründe in Frage: Sie kann entweder besonders gut abgestrahlt werden oder auch beim Anschlagen mit dem Klöppel besonders stark angeregt worden sein. Während ersteres eine Eigenschaft des Instruments ist, wäre letzteres eine Folge des willkürlich geführten Anschlages. Andere Spieler, Klöppel, Anschlagweisen usw. würden zu anderen Ergebnissen führen. Diese Varianz zu erforschen, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Bei der Interpretation der Wasserfall-Diagramme hat sich nun herausgeschält, dass der Einfluss des Instruments (des „Systems“) im Abfließen der Energie zu Tage tritt und ausgewertet werden kann. Wenn ein Teilton besonders stark abgestrahlt wird, dann gibt die Saite ihre Schwingungsenergie auch besonders schnell in das Schallfeld ab. Es ist angezeigt und lohnend, nicht die Amplituden am Anfang, sondern deren Schwächerwerden im Verlauf der Zeit auszuwerten.

### 8.1. Messung

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse zum zeitlichen Ausschwingen des Grundtons präsentiert. Wiederum fand der Ono Sokki *Multi-Purpose FFT Analyzer* CF-5210 Verwendung. Das Schallsignal wurde vom DAT in den Speicher des Analysators überspielt und abschnittsweise analysiert. Die auf diese Weise gewonnenen Teilspektren wurden, ähnlich wie im Abschnitt 7.4 beschrieben, zu einem Wasserfall-Diagramm zusammen gestellt. Zusätzlich wurde in einem gesonderten Diagramm ein Schnitt durch das Wasserfalldiagramm in der Weise dargestellt, dass der Pegel des Grundtons als Funktion der Zeit sichtbar wird.

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen wurde ein einheitlicher Frequenzbereich von 0 bis 2 kHz gewählt, woraus die Frequenzauflösung 2,5 Hz resultiert. Jeder Abschnitt der Zeitfunktion, der zur Analyse anstand, wurde mit einem Hanning-Fenster gewichtet und der Schnellen Fourier-Transformation (FFT) unterzogen. Der Pegelbereich ist 40 dB, die 40 Einzelspektren entsprechen einer Zeitspanne von 5 s. Im unteren Teildiagramm ist jeweils das Schallpegel-Frequenz-Spektrum dargestellt, wie es sich beim Anschlag und im Verlauf der ersten Sekunden danach entwickelt. Im kleineren Teildiagramm darüber ist der Schallpegel des ersten Teiltönen in Abhängigkeit von der Zeit angetragen.

Wie die folgenden Diagramme (Abb. 63 und 64, 66 und 67 sowie Anhang 6) deutlich machen, erwies es sich auch hierbei als Nachteil, dass die Saitenchöre nicht fachgerecht gestimmt waren. Es traten teilweise erhebliche Schwebungen auf, die es erschwerten, die Messkurven auszuwerten. Dies musste in Kauf genommen werden, da bewusst darauf verzichtet worden war, eigene Stimmversuche am Instrument vorzunehmen.

### 8.2. Abklingen der Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen

In Abb. 63 sind zunächst vier Ergebnisse für Saiten dargestellt, die auf dem linken hohen Steg aufliegen. Als Beispiele sind der tiefste, der höchste sowie zwei dazwischen liegende Saitenchöre ausgewählt. Die unteren Teildiagramme vermitteln einen Eindruck vom Teiltonaufbau. Man erkennt in dieser Repräsentation, jedoch unter einem anderen Blickwinkel als in den vor-

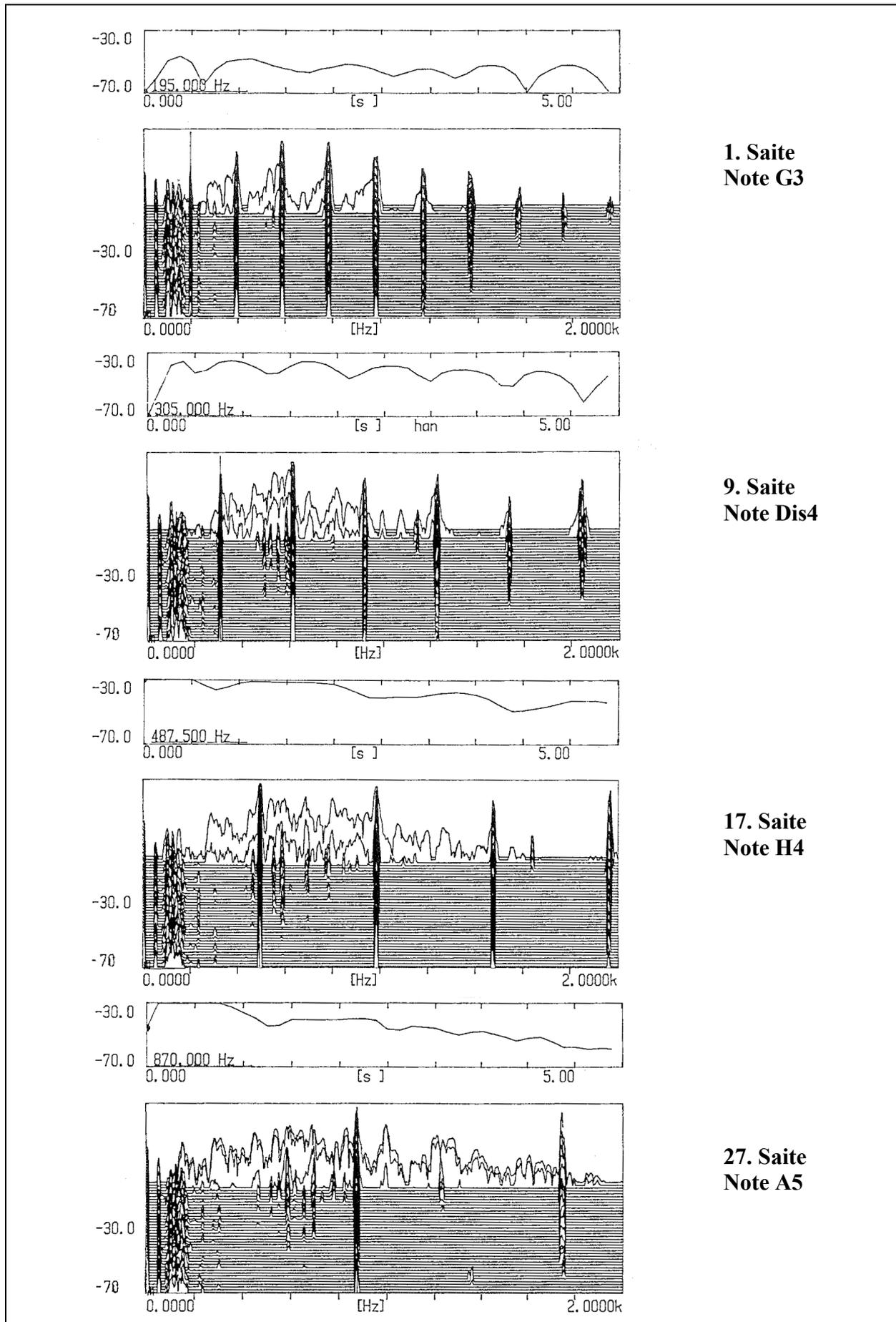


Abb. 63: Schallpegel-Frequenz-Spektren (Bandbreite 2 kHz) mit Abklingen des Grundtons (Zeitfenster 5 s) von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

her betrachteten Diagrammen, wie sich das Spektrum nach dem Anschlagen der Saite verändert. Für den Grundton zeigen sich große Unterschiede im Anfangswert des Pegels. Wie erwähnt, könnten diese Differenzen vom unterschiedlichen Anschlagen mit dem Klöppel herühren. Somit bilden sie nicht notwendigerweise eine reine Systemeigenschaft ab, sondern können auch den Einfluss des Spielers widerspiegeln.

In vielen Fällen klingt ein Teilton umso schneller ab, je höher seine Frequenz ist. Danach wäre zu erwarten, dass der Teilton mit der tiefsten Frequenz am längsten „steht“. Somit bestimmt der Grundton nicht nur die musikalische Tonhöhe, sondern meist auch das Abklingen des Gesamtklangs. Ihm kommt demzufolge besondere Bedeutung zu. Im oberen Teildia-gramm ist sein Pegel über der Zeit dargestellt. Diese Messkurve ist in Hinsicht auf die frequenzselektiven Abstrahleigenschaften des Instruments sehr aussagekräftig. Wie in Abb. 64 wiedergegeben ist, lässt sich mit Hilfe von Geraden extrahieren, um welchen Betrag der Pegel in der Zeitspanne von 5 s abfällt. Dieser Wert kann in die Nachhallzeit (meist mit den Formelzeichen  $T_N$  oder  $T_{60}$  versehen) umgerechnet werden, innerhalb derer der Schallpegel um 60 dB abnimmt. Die Nachhallzeit ist eine Systemkenngröße und hängt nicht von der Anregung ab.

Abgesehen von den überlagerten Schwebungen fällt der Schallpegel mit konstanter Steigung. Eine Unterteilung in eine Anfangsphase (*initial short-lived rapid decay*, „prompt sound“) und eine Endphase (*final long-lived slow decay*, „aftersound“) mit unterschiedlichen Abklingraten wurde nicht festgestellt. Weinreich (1979) hatte diese Zweiteilung bei Pianoklängen beobachtet und darauf zurückgeführt, dass die Saite anfänglich senkrecht zum Steg schwingt und ihre Energie rasch verliert. Im weiteren Verlauf verbleibt die Schwingung tangential zum Steg, deren Energie langsamer ins Schallfeld abfließt. Ein weiterer Effekt ist, dass mehrchörige Saiten über den Steg gekoppelt sind und Energie untereinander austauschen können. Offenbar ist der hier betrachtete Zeitabschnitt so kurz, dass er überwiegend die Anfangsphase abbildet.

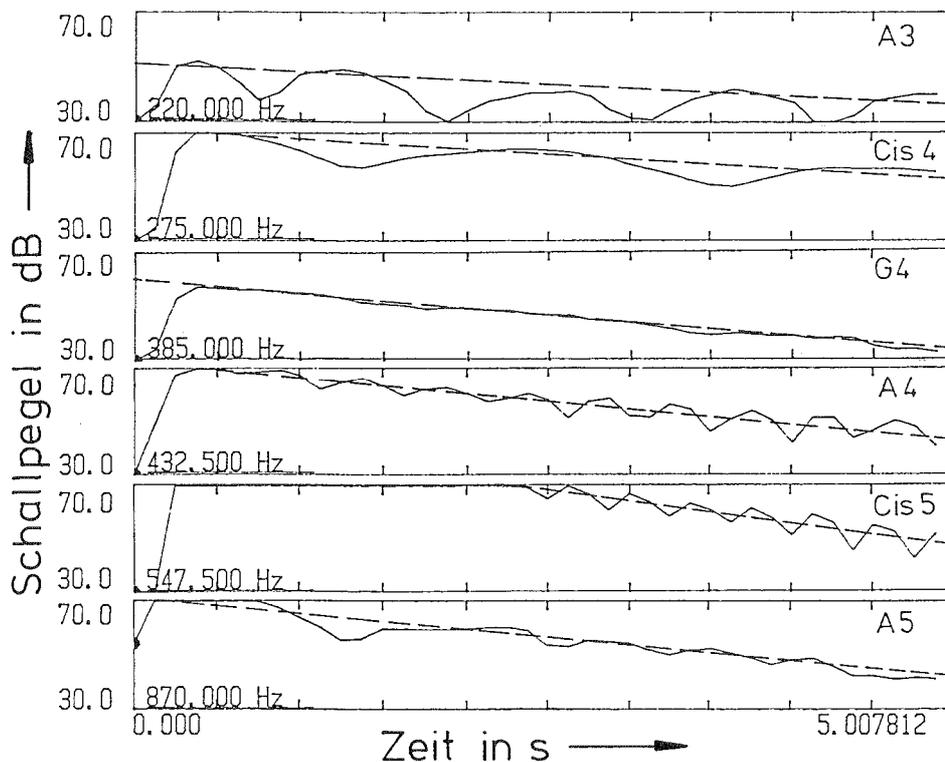


Abb. 64: Abklingen des Grundtons (Schallpegel über der Zeit) von Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen. Gestrichelt sind die Geraden, mittels derer die Nachhallzeit  $T_{60}$  errechnet wurde.

Abb. 65 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung. Die Nachhallzeiten bewegen sich zwischen etwa 6 s und 30 s. Angesichts der Schwebungen der überwiegend schlecht gestimmten Saitenchöre sind sie, wie Abb. 64 erkennbar gemacht hat, mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Es bestätigt sich die globale Tendenz, dass die Nachhallzeit umso kürzer wird, je höher die Saiten gestimmt sind. Jedoch prägen sich einige markante Abweichungen aus. Die Nachhallzeiten  $T_{60}$  der Grundtöne sind besonders niedrig bei den Noten G4 bis Cis5; hier betragen sie etwas mehr oder auch weniger als 10 s. Gemäß Tab. I liegen die zugehörigen Grundfrequenzen zwischen 385 Hz und 548 Hz. Wie die Untersuchungen mit dem Scanning Vibrometer (vgl. die Abb. 24, 36 und 37) gezeigt haben, lassen sich in diesem Frequenzbereich deutliche Schwingungen der Decke nachweisen. Folglich ist zu erwarten, dass die Admittanz am hohen Steg in diesem Frequenzbereich besonders groß sein muss, was in Abschnitt 8.4 überprüft werden soll.

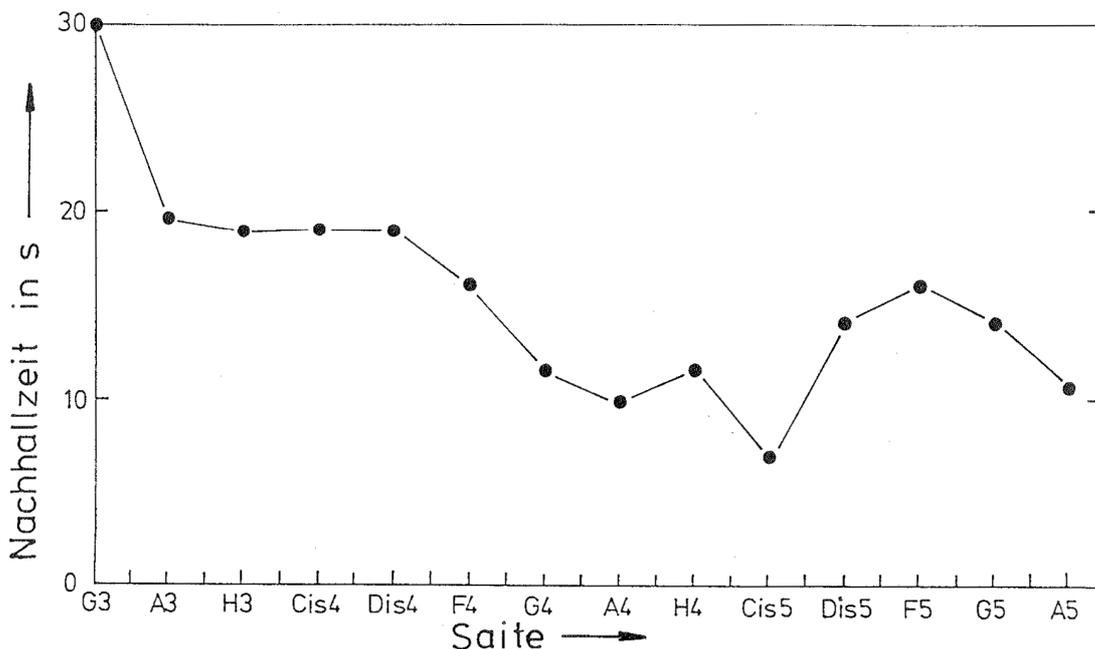


Abb. 65: Nachhallzeit  $T_{60}$  des Grundtons der Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

### 8.3. Abklingen der Saiten, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen

Für die Untersuchung der verbleibenden Saitenklänge (Abb. 66) wurde der Frequenzbereich von 0 bis 2 kHz mit der Frequenzauflösung 2,5 Hz beibehalten. Die betrachtete Zeitdauer beträgt nach wie vor 5 s, der Pegelbereich 40 dB. Das untere Teildiagramm gibt das Schallpegel-Frequenz-Spektrum für die ersten 5 s nach dem Anschlag wieder. Im Teildiagramm darüber ist der Schallpegel des Grundtons als Funktion der Zeit aufgetragen.

In Abb. 66 sind vier Ergebnisse für Saiten dargestellt, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen. Wiederum sind als Beispiele die Saitenchöre mit den tiefsten, höchsten und zwei dazwischen liegenden Noten gewählt. Die unteren Teildiagramme vermitteln einen Eindruck vom anfänglichen Teiltonaufbau des jeweiligen Klanges und davon, wie sich die Spektren unmittelbar nach dem Anschlag verändern. Die Unterschiede in den Anfangspegeln der einzelnen Teiltöne sollen nicht interpretiert werden, da sie möglicherweise nicht Systemeigenschaften, sondern den Einfluss des (hier absolut ungeübten) Spielers widerspiegeln.

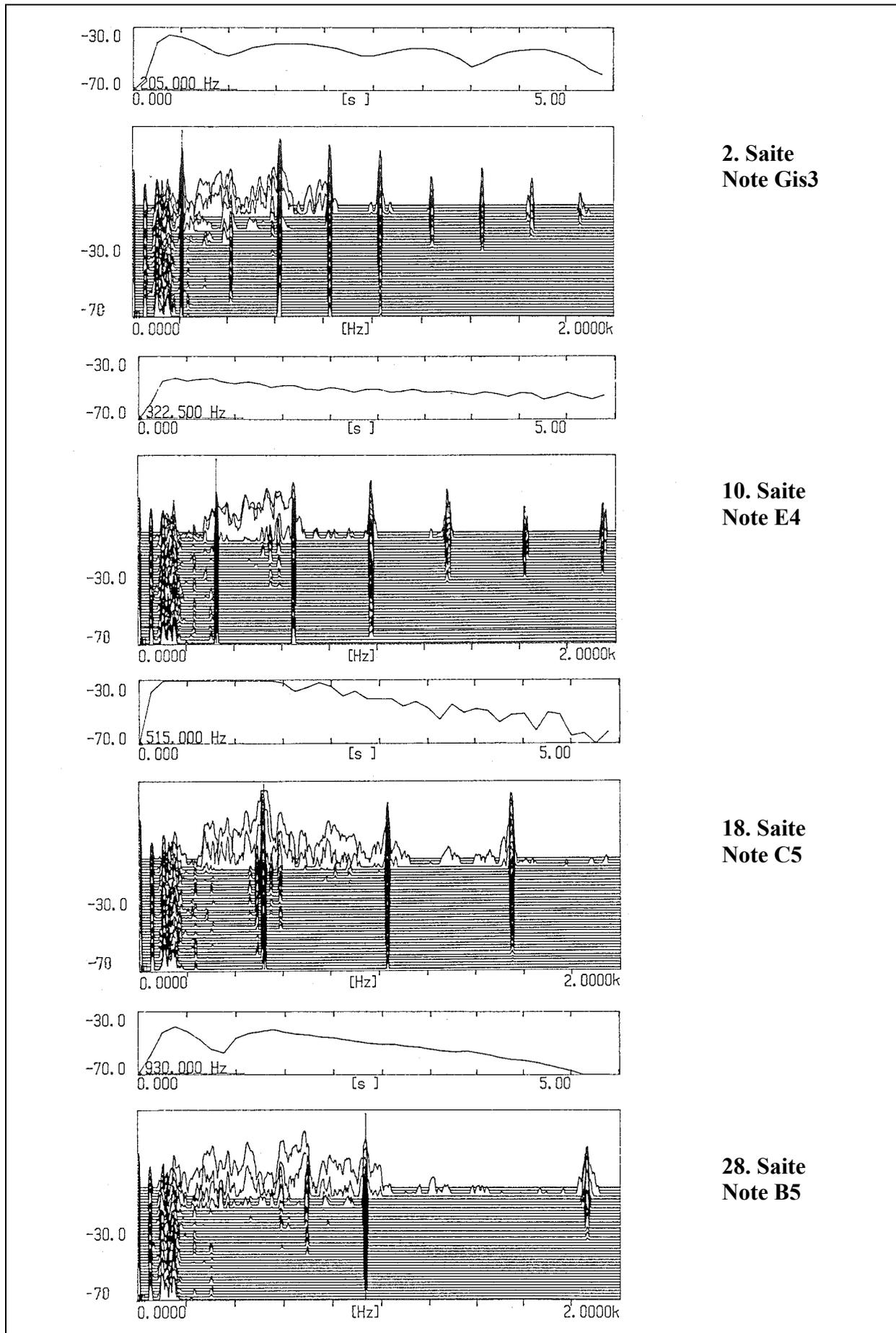


Abb. 66: Schallpegel-Frequenz-Spektren (Bandbreite 2 kHz) mit Abklingen des Grundtons (Zeitfenster 5 s) von vier Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

In Hinsicht auf die Abstrahleigenschaften des Instruments sind die oberen Teildiagramme von Bedeutung. Auch hier treten die bereits mehrfach erwähnten Schwebungen störend in Erscheinung. Die Abb. 67 illustriert an einigen Beispielen, wie an Hand von Geraden die jeweilige Differenz abgelesen wurde, um die der Pegel des Grundtons in der betrachteten Zeitspanne abfällt. Dieser Wert wurde dann in die Nachhallzeit  $T_{60}$  umgerechnet, die über den Abfall des Schallpegels um 60 dB definiert ist.

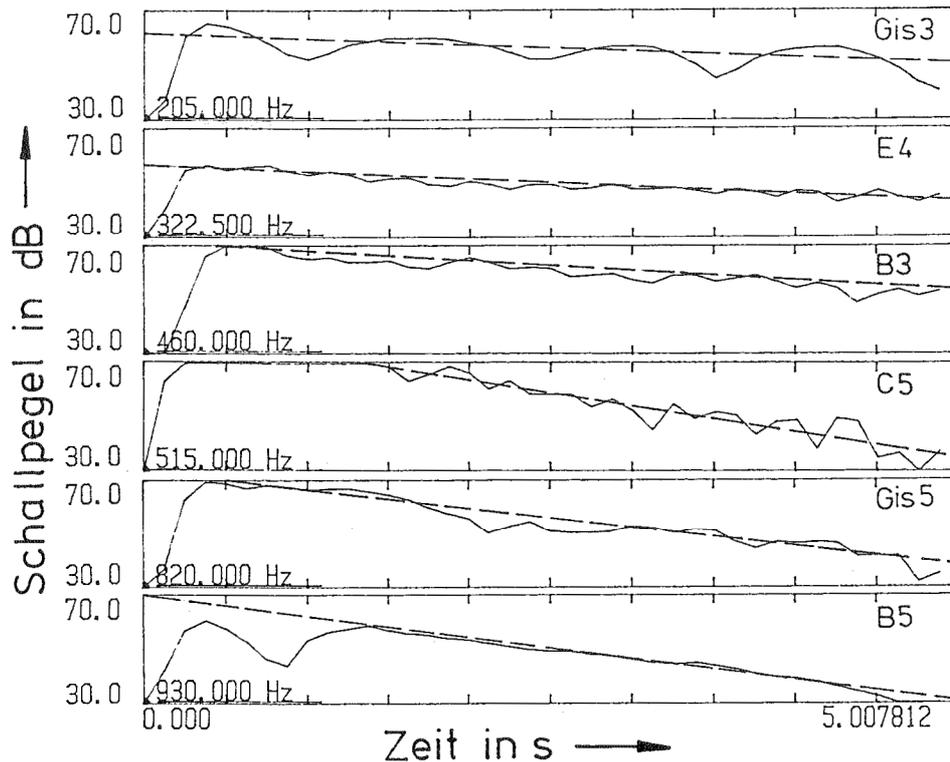


Abb. 67: Abklingen des Grundtons (Schallpegel über der Zeit) von Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen. Gestrichelt sind die Geraden, mittels derer die Nachhallzeit  $T_{60}$  errechnet wurde.

Abb. 68 zeigt die Resultate. Sie liegen zwischen etwa 7 s und 28 s und sind wegen der Schwebungen der schlecht gestimmten Saitenchöre mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Wie auch in Abb. 65 zeigt sich die dominierende Tendenz, dass die Nachhallzeit kürzer wird, wenn die Saiten höher gestimmt sind. Jedoch sind markante Abweichungen von einer stetigen Abnahme zu erkennen. So nimmt die Nachhallzeit  $T_{60}$  des Grundtons einen besonders niedrigen Wert bei der Note B3 an. Bei der zugehörigen Frequenz 230 Hz (vgl. Tab. II) war allerdings keine ausgeprägte Korpussschwingung beobachtet worden. Dies lässt vermuten, dass sich Schwingungsenergie möglicherweise an einer Fügestelle durch Reibung in Wärme umwandelt, ohne dass Nutzschall erzeugt wird. Dagegen können die kurzen Nachhallzeiten bei Fis4 (362 Hz) und ganz besonders bei C5 (515 Hz) mit Schwingungen der Decke in Verbindung gebracht werden. Die entsprechenden Korpussschwingungen sind in den Abb. 24 und 36 sowie 37 von Kapitel 5 dargestellt. Da sie sich ebenso in der Admittanz ausprägen (vgl. Abb. 51), soll abschließend geprüft werden, ob eine Korrelation nachzuweisen ist.

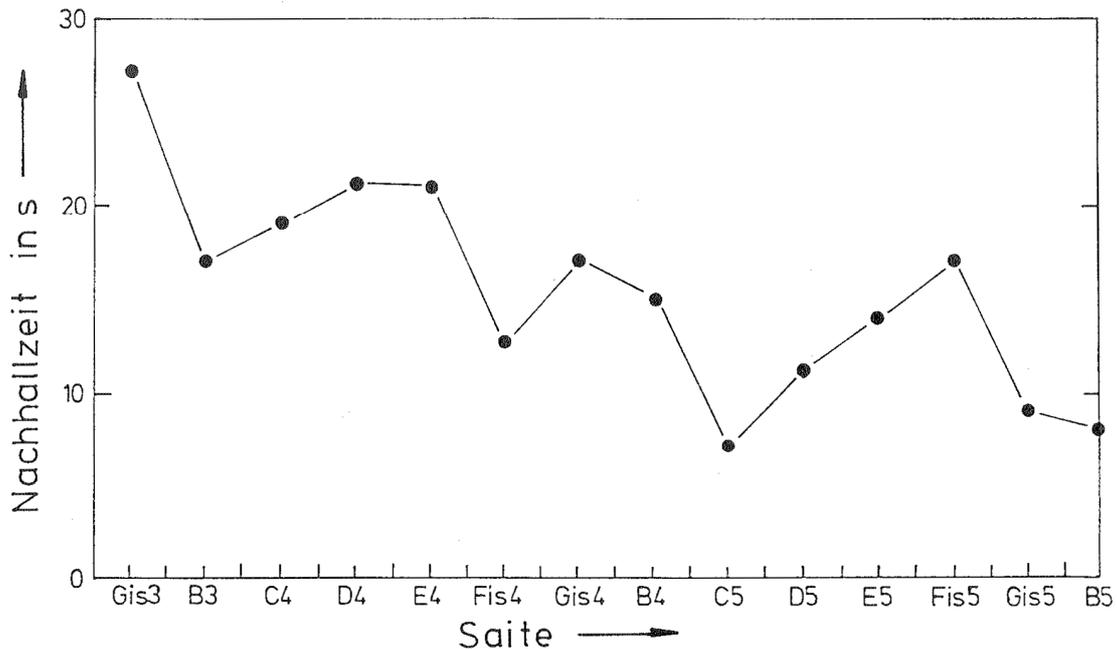


Abb. 68: Nachhallzeit  $T_{60}$  des Grundtons der Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

## 8.4. Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und Admittanz

Wie die Untersuchungen von Fletcher und Rossing (1998) und Fleischer (2000, 2001) gezeigt haben, sind für das Abfließen der Schwingungsenergie aus der frei schwingenden Saite drei Einflüsse von Bedeutung. Die Saite verliert ihre Energie in Folge von

- innerer Reibung im Material der Saite,
- möglicherweise durch viskose Reibung der Saite mit der umgebenden Luft sowie
- durch Abfließen von Energie über die Kontaktpunkte der Saite zum Korpus.

Die beiden ersten Mechanismen sind dadurch gekennzeichnet, dass Schwingungsenergie ohne erkennbaren Nutzen dissipiert, d.h. in Wärme umgesetzt wird. Lediglich derjenige Anteil, welcher in den Korpus fließt, kann zumindest teilweise als Schall abgestrahlt werden. Voraussetzung dafür ist, dass das oder die Auflager der Saite nicht unbeweglich sind. Vielmehr muss mindestens ein Auflager schwingfreudig sein und seine Bewegung an den Korpus weitergeben, der dann seinerseits die umgebende Luft in Bewegung versetzen kann. Die Information über den eigentlichen Nutzanteil ist somit in der Stegadmittanz enthalten.

Der Betrag der Admittanz bei der Frequenz des Grundtons ist in den oberen Teildiagrammen der Abb. 69 und 70 wiedergegeben. Darunter findet sich die Nachhallzeit  $T_{60}$  der Grundtöne gemäß den Abb. 65 und 68. Die folgende Abb. 69 illustriert die Verhältnisse für den linken hohen Steg. Vereinfachend wird angenommen, das andere Auflager am Außensteg sei so wenig beweglich, dass dort keine Energie übertragen werden kann. Somit fließt die Energie vor allem über den hohen Steg in den Korpus. Die Admittanz am hohen Steg dominiert den Energieabfluss. Mit Ausnahme der tiefen Lagen, bei denen die Verhältnisse sich umkehren und der Außensteg beweglicher ist als der hohe Steg, ist diese Vereinfachung mit den experimentellen Beobachtungen von Kapitel 6 in Einklang.

Die Admittanz wurde senkrecht zu Steg und Decke gemessen. Damit stimmt die Messrichtung mit derjenigen Orientierung der Saitenschwingung überein, welche nach Weinreich (1979) den anfänglichen Abfall des Schallpegels bestimmt. Dieser *initial short-lived rapid decay* ist hier ausgewertet und durch die Nachhallzeit gekennzeichnet worden.

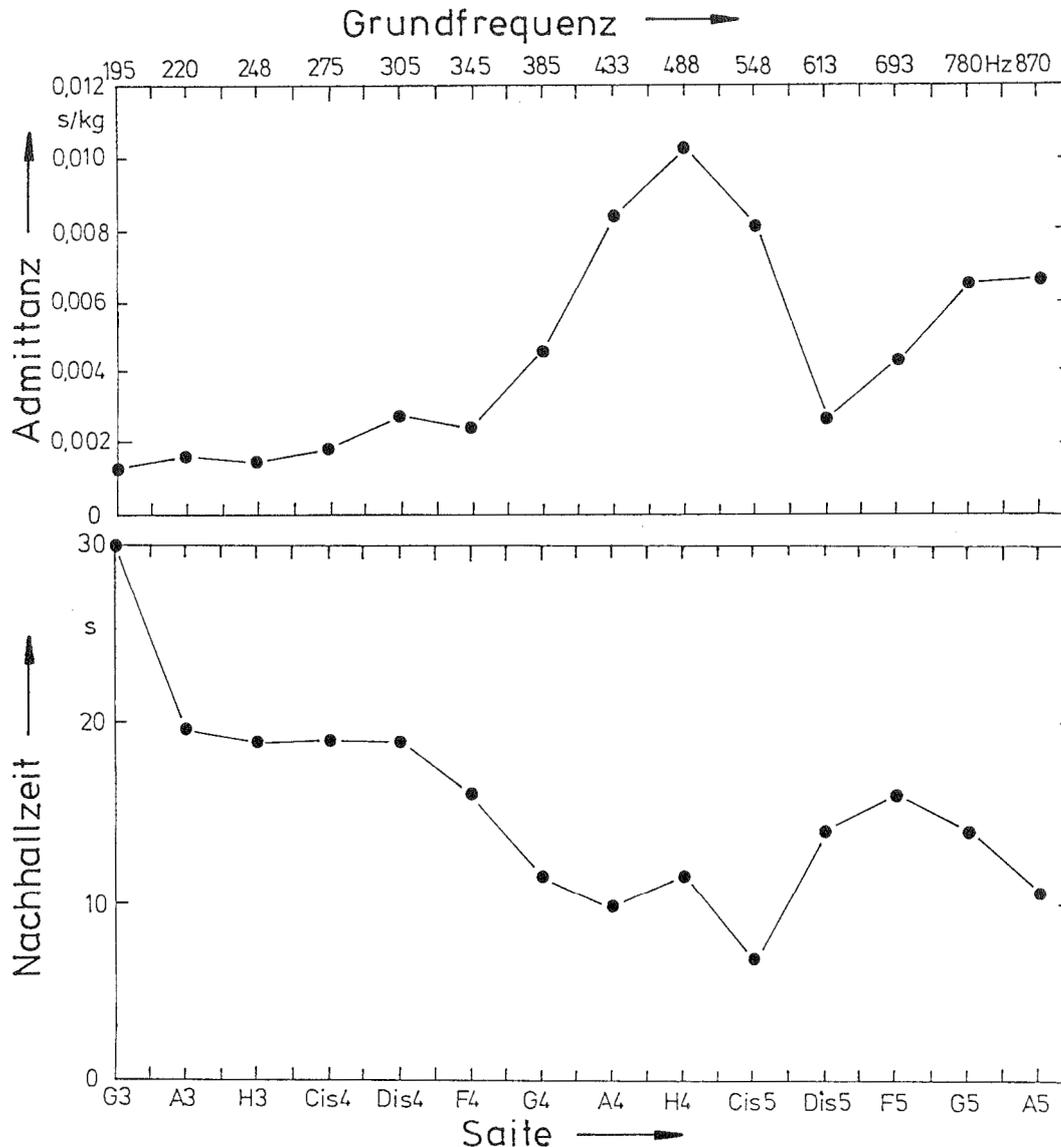


Abb. 69: Oben: Betrag der Admittanz;  
Unten: Nachhallzeit  $T_{60}$  des Grundtons  
der Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.

Bekanntlich ist der Realteil der Admittanz, die Konduktanz, das adäquate Maß für die Fähigkeit eines Saiten-Auflagers, Energie aufzunehmen (Fleischer 2000, 2001). Dies hat auch Weinreich (1979, S. 100) sehr anschaulich dargestellt. Eine Zusammenstellung der drei Möglichkeiten (Dämpfer-, Masse- bzw. Federverhalten des Auflagers) findet sich im Anhang 1. Da die gerätetechnischen Voraussetzungen nicht vorlagen, konnte hier jedoch nicht der Realteil, sondern lediglich der Betrag der Admittanz gemessen werden. Bei der vereinfachten Verknüpfung der Admittanz mit der Nachhallzeit kann deshalb eine vollständige Übereinstimmung nicht erwartet werden.

Die saitenimmanenten Mechanismen der Dämpfung (innere Reibung sowie Luftreibung) führen zu der Tendenz, dass die Nachhallzeit mit wachsender Frequenz abnimmt. Abb. 69 illustriert die realen Verhältnisse für den linken hohen Steg. Im unteren Teildiagramm ist die globale Abnahme der Nachhallzeit bei Zunahme der Frequenz zu beobachten. Jedoch überlagern sich der abfallenden Charakteristik deutliche Abweichungen. Vor allem in den mittleren Lagen (G4 bis Cis5 entsprechend 385 Hz bis 548 Hz) sind die Nachhallzeiten besonders kurz. In diesem Bereich weist auch die im oberen Diagramm wiedergegebene Admittanz besonders hohe Werte auf. Es bleibt festzuhalten, dass besonders kurze Nachhallzeiten mit einer hohen Admittanz an einem Steg einher gehen.

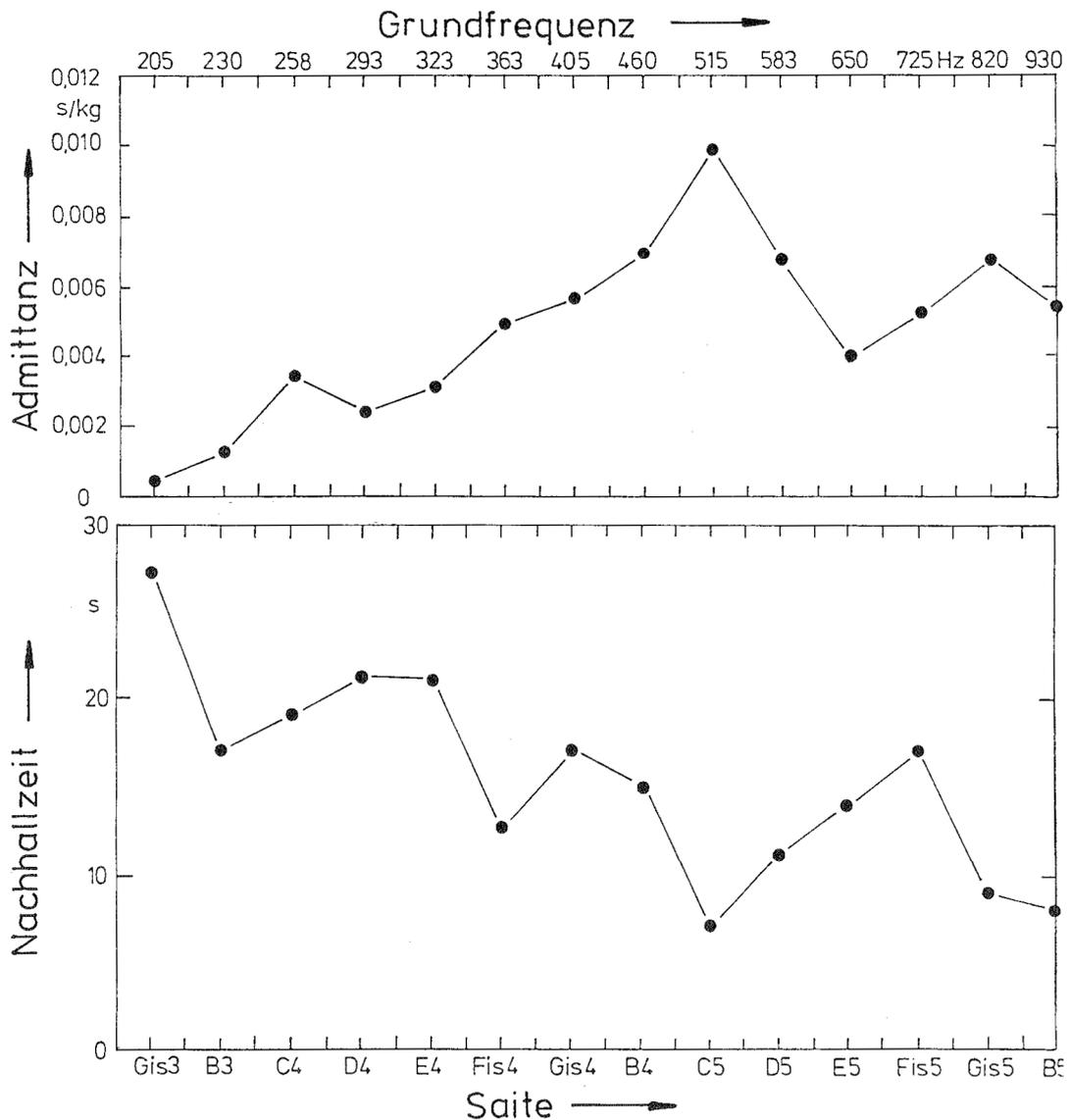


Abb. 70: Oben: Betrag der Admittanz;  
Unten: Nachhallzeit  $T_{60}$  des Grundtons  
der Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

Abb. 70 zeigt den analogen Sachverhalt für die Saiten, die über den rechten hohen Steg gespannt sind. In den tiefen Lagen nimmt die Nachhallzeit (unteres Teildiagramm) einen besonders niedrigen Wert für die Note B3 an. Bei der zugehörigen Frequenz 230 Hz (vgl. Tab. II)

zeigt die Admittanz am hohen Steg (oberes Teildiagramm) keinen auffällig großen Wert an. Das beweglichere der beiden Saiten-Auflager dürfte in diesem Fall am linken Außensteg zu suchen sein. Da bei dieser Frequenz auch keine ausgeprägte Korpussschwingung zu beobachten war, steht zu vermuten, dass hier Energie verloren geht, ohne dass Schall abgestrahlt wird. Möglicherweise bewirkt eine schlechte Leimverbindung oder eine sonstige mangelbehaftete Fügestelle, dass Schwingungsenergie als Wärme verloren geht. In den mittleren Lagen wird der Zusammenhang zwischen dem Abklingen und der Admittanz am hohen Steg allerdings deutlich. Ganz besonders für den Grundton der Note C5 weist nicht nur die Nachhallzeit mit 7 s ein absolutes Minimum, sondern ebenso die Admittanz am hohen Steg mit etwa 10 s/kg ein absolutes Maximum auf. Unübersehbar geht hier eine kurze Nachhallzeit mit einer hohen Admittanz einher.

## 8.5. Zusammenfassende Bemerkung

Die spektrale Verteilung der Energie im Anfangsteil des zeitabhängigen Schallsignals wird nur zu einem Teil von den Eigenschaften des Instruments, d.h. dem „System“, bestimmt. Zum anderen Teil hängt sie von der Art des Anschlags, d.h. den „Anfangsbedingungen“, ab. Das Anfangsspektrum ist demnach nur bedingt geeignet, Aussagen über das zu untersuchende Instrument zu machen. Um das System unbeeinflusst von den Anfangsbedingungen zu untersuchen, bietet sich der Weg an, die Abnahme der Amplitude zu untersuchen. Das frequenzselektive Verhalten des Instruments manifestiert sich unter anderem darin, wie schnell die einzelnen Teiltöne abklingen.

Die Nachhallzeiten der Grundtöne der 28 Saitenchöre wurden gemessen und mit der mechanischen Admittanz, welche die „Schwingfreudigkeit“ der Auflager kennzeichnet, in Beziehung gebracht. Da als Messgröße nicht der Realteil zur Verfügung stand, wurde ersatzweise der Betrag der Admittanz am hohen Steg für den Vergleich herangezogen. Eine erste überschlägige Auswertung deutet darauf hin, dass Minima der Nachhallzeit mit Maxima der Admittanz verknüpft sind. Den Diagrammen in den Abb. 69 und 70 ist zu entnehmen, dass bei den mittleren Lagen nicht nur die Nachhallzeit besonders kurz, sondern auch die Admittanz besonders groß ist. Somit zeichnet sich im betrachteten Beispiel eine zumindest qualitative Korrelation zwischen der Admittanz und der Nachhallzeit ab. Sowohl für den hohen linken Steg (Abb. 69) als auch für den hohen rechten Steg (Abb. 70) ist eine besonders hohe Admittanz ein Indikator für ein besonders rasches Abklingen des entsprechenden Teiltons. „*Dead Spots*“, wie sie bei elektrischen Gitarren und Bässen auftreten, lassen sich höchstwahrscheinlich auch bei akustischen Chordophonen durch die Messung der Schwingfreudigkeit am Auflager instrumentell aufspüren. Anzuraten wäre allerdings, es nicht bei der Messung des Betrages zu belassen, sondern vielmehr zukünftig stets den Realteil, die mechanische Konduktanz, zu ermitteln.

## 9. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE

Die Schallsignale, die in den beiden vorhergehenden Kapiteln einer objektiven, physikalisch motivierten Analyse unterzogen worden sind, sollen auf eine weitere Art untersucht werden. Die bisher angewandte Untersuchungsmethode arbeitet ausschließlich auf der Ebene physikalischer Größen, d.h. in der „Welt der Physik“. Naturgemäß hat sie keinen unmittelbaren Bezug zu der Verarbeitung, wie sie im menschlichen Ohr stattfindet. Seine Wirkung entfaltet ein musikalischer Klang jedoch in der „Welt der Hörempfindungen“, so dass es nahe liegt, die Eigenschaften des Gehörs bei der Analyse zu berücksichtigen.

Die Welt der Physik ist mit der Welt der Hörempfindungen auf sehr komplexe Weise verknüpft. Die Wissenschaft, die diese Verknüpfungen untersucht, heißt Psychoakustik. Grundlegende Erkenntnisse der Psychoakustik sind in Standard-Lehrbüchern wie Zwicker und Feldtkeller (1967) oder Zwicker und Fastl (1999) aufbereitet und zusammen gestellt. Um ein Schallsignal „gehörbezogen“ darzustellen, müssen möglichst viele der dort geschilderten psychoakustischen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt werden. In Hinsicht auf musikalische Signale gibt Terhardt (1998) die zielführenden Hinweise. Wesentliche Beiträge im Hinblick auf die Beurteilung der Klänge von Musikinstrumenten stammen von Valenzuela (1999). Ein geraffter Überblick über einige Grundlagen, die für die vorliegende Aufgabenstellung von Bedeutung sind, findet sich bei Fleischer (2002).

### 9.1. Verarbeitung und Auswertung

Aufnahme und Speicherung der Klänge sind in Abschnitt 7.1 beschrieben. Die auf DAT gespeicherten Schallsignale wurden in *wav.-Files* konvertiert und mit Hilfe eines kommerziellen Programmsystems analysiert. Dieses beruht auf dem Gedankengut, das Terhardt (1998) zusammenfassend dargestellt hat. Die Firma Cortex Instruments GmbH, Regensburg, hat die Software unter dem Namen VIPER (*V*isual *P*ERception of Audio Signals) entwickelt und in den Handel gebracht. Die Abläufe der Verarbeitung stimmen weitgehend mit denjenigen überein, die Valenzuela (1999) beschrieben hat.

#### 9.1.1. Auditorisches Spektrogramm

Unter Beachtung des spektralen Auflösungsvermögens, wie es dem menschlichen Gehör zu eigen ist, wird in der ersten Stufe das so genannte Auditorische Spektrogramm (ASP, *Auditory S*pectrogram) ermittelt. Abb. 71 zeigt ein Beispiel. Der Pegel in einer Spanne von 40 dB ist in Farben kodiert, was in der Schwarz-Weiß-Darstellung bedauerlicherweise nicht zu erkennen ist. Der dunkle Hintergrund entspricht Pegeln von weniger als 30 dB. Die Zeit (insgesamt 15 s) läuft nach rechts, die Tonheit ist in Frequenzgruppenbreiten (insgesamt 22 Bark) nach oben angetragen. Zusätzlich ist eine Frequenzskale (bis 10 kHz) angegeben.

Vergleicht man Abb. 71 mit einem der Wasserfalldiagramme in den Abb. 59 bis 62, so werden mehrere Unterschiede erkennbar. Während bei der FFT eine lineare Frequenzskale vorgegeben ist, wird im ASP eine gehörangepasste Bark-Skala (linke Abszisse) verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Frequenz (rechte Abszisse) zu hohen Werten hin „gestaucht“ ist. Ein Vergleich der beiden Skalen an der Ordinate von Abb. 71 illustriert dies. Damit geht einher, dass Analysebandbreite und -zeitfenster beim ASP sich am Auflösungsvermögen des Gehörs orientieren, während sie bei der FFT im gesamten dargestellten Bereich konstant sind.

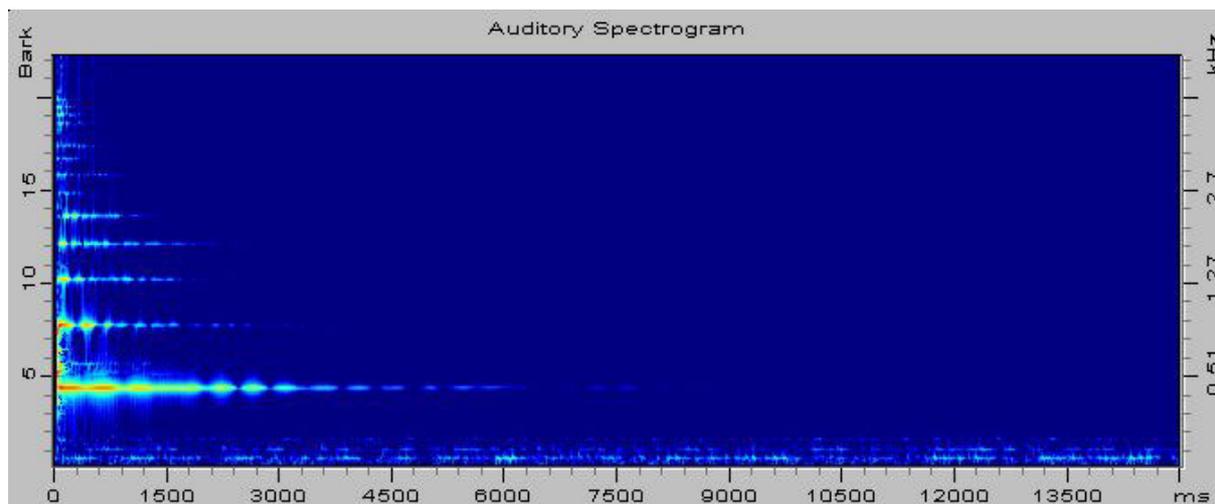


Abb.71: Auditorisches Spektrogramm (ASP) der Note A4 (15. Saite), ermittelt mit VIPER. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

### 9.1.2. Frequenzkonturen und Frequenzspuren

Der gehörangepassten Frequenzanalyse schließt sich die Extraktion der so genannten Frequenzkonturen (*Frequency Contours*) an, die der von Valenzuela (1999) beschriebenen Konturierung entspricht. Dieser Bearbeitungsschritt macht es einfacher, tonale Komponenten zu erkennen und zu identifizieren.

Insbesondere bei Schallsignalen mit starken tonalen Anteilen kann eine weitere Reduktion von Information mittels der Bearbeitungsstufe Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) erreicht werden. Teiltöne, die über eine vorzugebende Zeitlänge nicht allzu sehr im Pegel abfallen, werden als Frequenzspuren erkannt und dargestellt. Diese Repräsentation dürfte dem Teilton-Zeit-Muster (Terhardt 1998) nahe kommen. Damit steht ein Hilfsmittel zur Verfügung, das die tonalen gegenüber den geräuschhaften Schallanteilen hervorhebt.

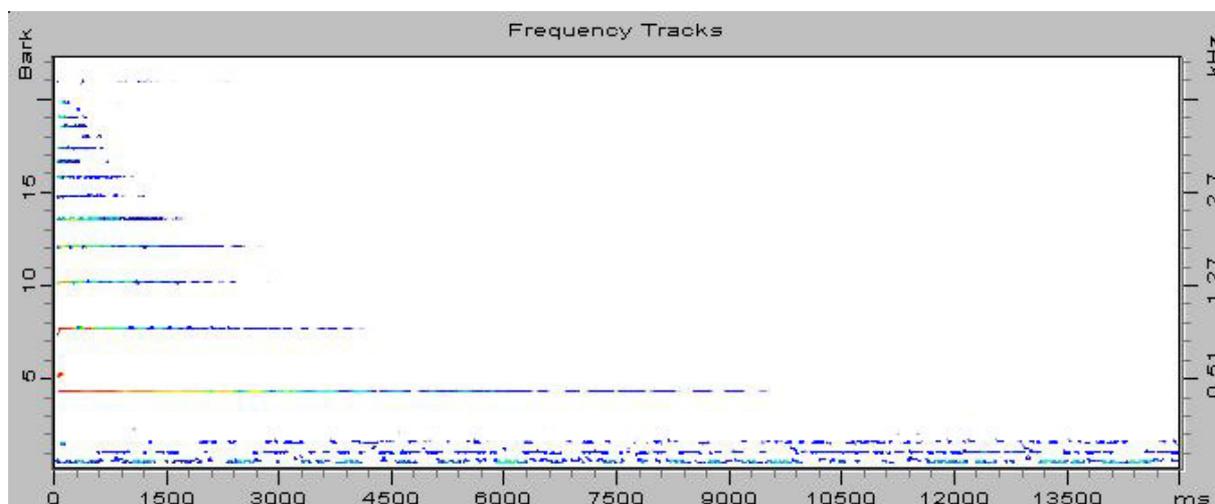


Abb. 72: Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Note A4 (15. Saite) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER. Die Schwärzung ist ein Maß für den Pegel.

Eine Informationsreduktion, die prinzipiell sehr weit gehen kann, lässt sich erreichen, indem die spektrale Maskierung berücksichtigt wird. In VIPER wird dieser Verarbeitungsschritt als *Nonlinear Masking* bezeichnet. Vermutlich sind in dieser Software nicht die für Sinustöne relevanten Verdeckungskurven, sondern diejenigen implementiert, welche für Schmalbandrauschen gelten (Valenzuela 1999, Abschnitt 2.3, Abb. 2.19). Darüber hinaus scheint auch die ausgeprägte Abhängigkeit der Verdeckungswirkung vom Pegel nicht nachgebildet zu sein. In der Folge wirkt sich die spektrale Maskierung nicht in dem Maße aus, wie dies im betrachteten Fall möglich wäre. Immerhin kann sie jedoch in manchen Fällen eine Verringerung der Anzahl der dargestellten Teiltöne bewirken.

Somit lässt sich in VIPER die Information auf ihren gehörrelevanten Gehalt am deutlichsten reduzieren, wenn die Bearbeitungsstufe *Frequency Tracks* unter Einbeziehung von *Nonlinear Masking* angewandt wird. Abb. 72 gibt hierzu ein Beispiel. Diese höchste Stufe der gehörbezogenen Bearbeitung bildet im Folgenden die Grundlage für die Diskussion der Hackbrettklänge.

Zur Ergänzung sei erwähnt, dass VIPER in jedem beliebigen Stadium eine Resynthese der Schalle vorsieht. Obwohl diese Funktion im Detail noch verbesserungsfähig ist, bietet sie doch die wesentliche Option einer Kontrolle mit dem Gehör. Damit erlaubt sie in jeder Stufe der Bearbeitung zu beurteilen, ob die vorgenommene Reduktion noch akzeptabel ist oder bereits zu einer unzulässigen Veränderung in der Hörwahrnehmung geführt hat.

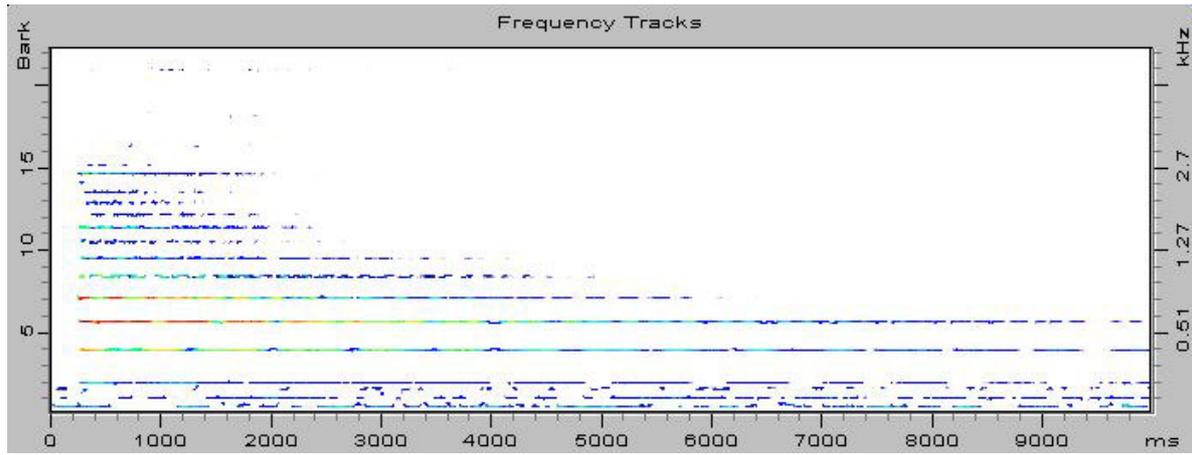
## 9.2. Anwendung auf die Hackbrettklänge

Abb. 73 gibt drei Beispiele für Frequenzspuren. Die Zeit läuft nach rechts; die dargestellte Dauer beträgt nun 10 s. Die linke Ordinate zeigt die Tonheit, an der rechten ist die Frequenz aufgetragen. Der Pegel ist (allerdings unzureichend) in Grauwerten kodiert. Die Analyse bezieht sich hier auf Klänge von Saiten, die auf dem linken hohen Steg aufliegen. Es sind dies im Oktavabstand die Noten G3 bis G5. Die farbigen Versionen dieser Repräsentation finden sich im Anhang 11 Teil 1 bis 3.

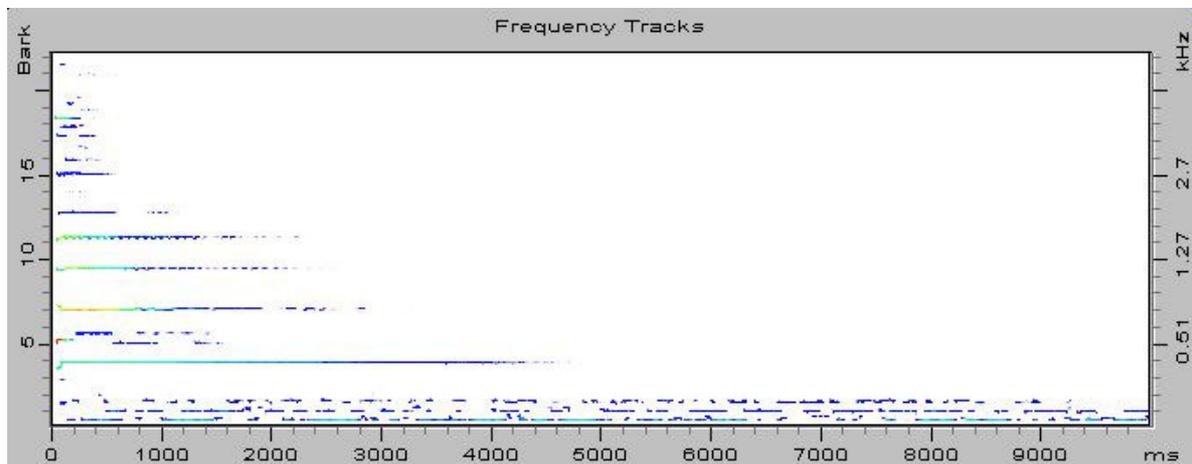
Um unwesentliche Schallanteile zu unterdrücken, wurde der Pegelbereich den jeweiligen Gegebenheiten angepasst. Er ist teilweise geringfügig verschoben, umfasst aber stets 40 dB. Eine Zuordnung des Pegels zu den Farben kann Anhang 11 Teil 4 entnommen werden.

Die Diagramme von Abb. 73 geben denselben Sachverhalt wie die drei Wasserfall-Diagramme von Abb. 60 wieder. Die Frequenzspuren-Darstellung ist insofern umfassender, als sie den gesamten hörrelevanten Frequenzbereich umfasst. Eine vorgeschaltete Untersuchung hatte ergeben, dass die verbleibenden beiden Frequenzgruppen (23 und 24 Bark) keine nennenswerten Schallanteile enthalten. In diesem Sinne entfällt hier die Willkür, die bei der Fourier-Transformation zwangsläufig in Hinsicht auf die analysierte Frequenzbandbreite walten muss.

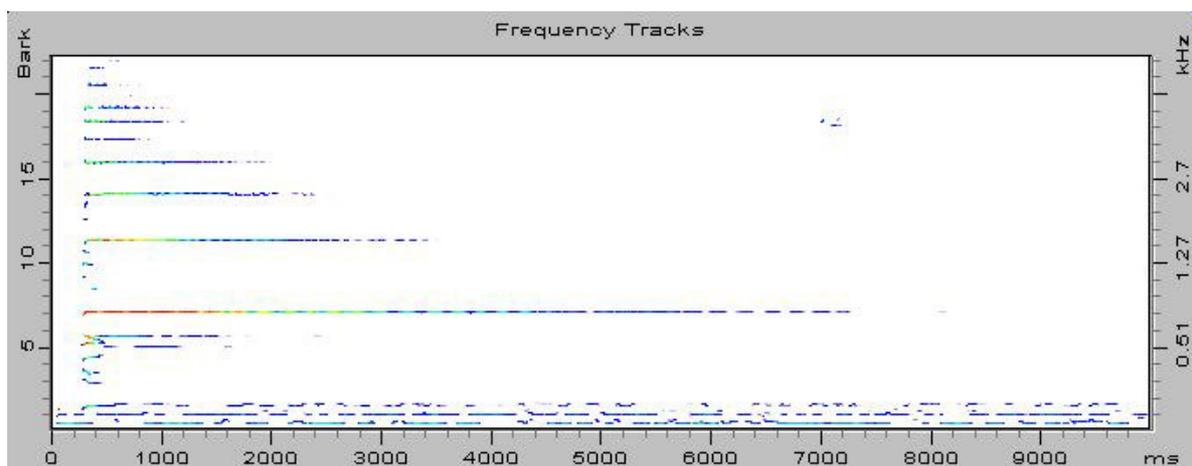
Vereinfacht ausgedrückt lässt sich den drei Frequenzspur-Diagrammen entnehmen, dass unabhängig von der Frequenzlage neben dem Grundton maximal etwa vier weitere Teiltöne für die Hörwahrnehmung von Bedeutung sein dürften. Gegebenenfalls ließe sich diese Beobachtung dadurch überprüfen, dass die übrigen Teiltöne entfernt werden. Das reduzierte Signal könnte dann resynthetisiert werden. Der Hörvergleich mit dem Original auf dem DAT würde die Konzentration auf das Wesentliche bestätigen.



**1. Saite (Note G3)**

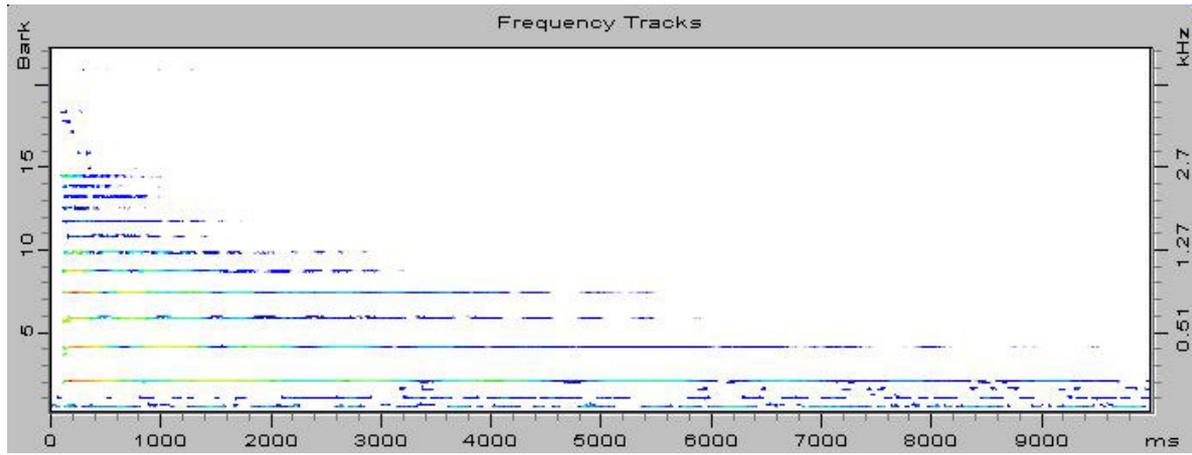


**13. Saite (Note G4)**

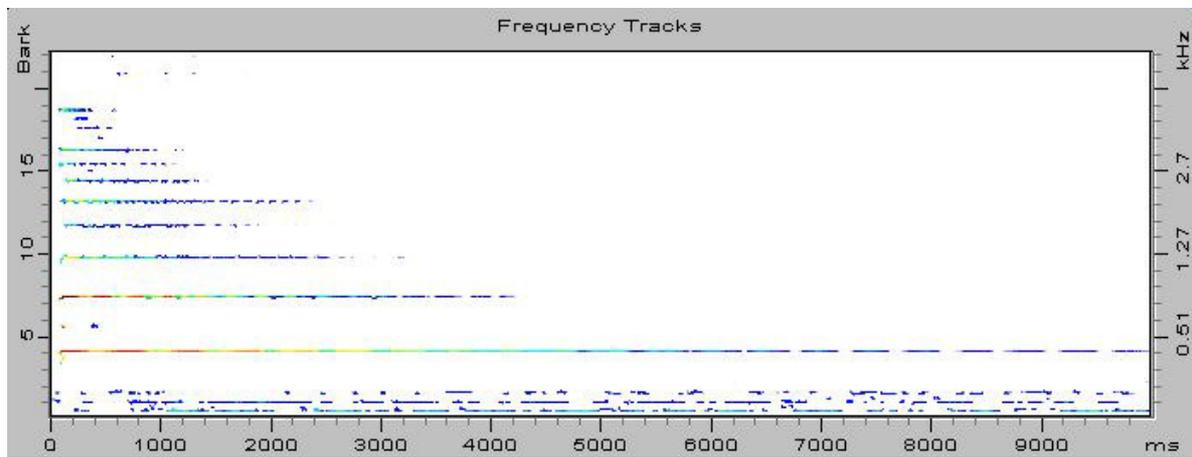


**25. Saite (Note G5)**

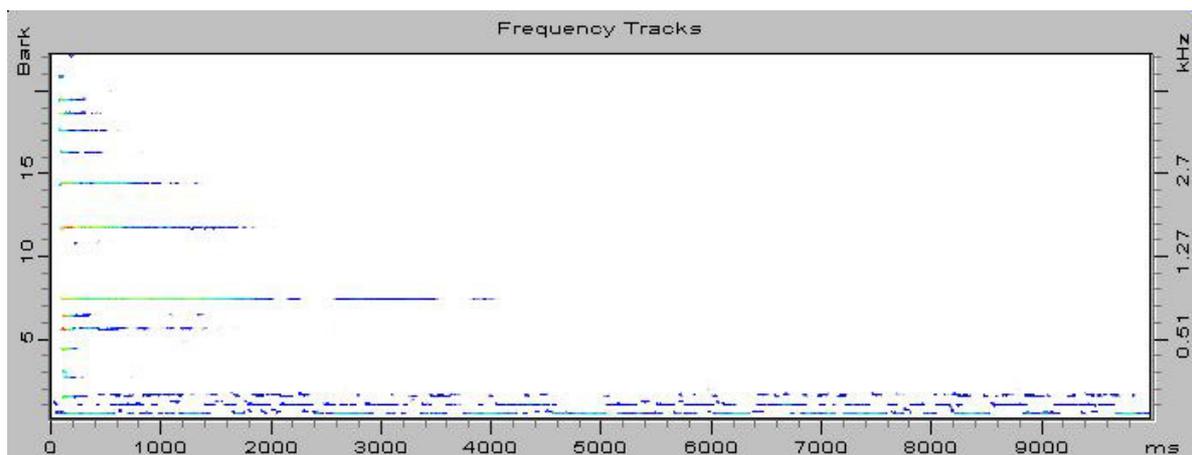
Abb. 73: Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für drei angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.



**2. Saite (Note Gis3)**



**14. Saite (Note Gis4)**



**26. Saite (Note Gis5)**

Abb. 74: Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für drei angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

Abb. 74 zeigt drei Beispiele für Frequenzspuren der Klänge von Saiten, die über den rechten hohen Steg gespannt sind. Es handelt sich um die Noten Gis3 bis Gis5 im Oktavabstand. Die farbigen Versionen sind dem Anhang 12 Teil 1 bis 3 zu entnehmen. Der Teil 4 von Anhang 12 zeigt, wie der Pegel in Farben kodiert ist.

Die Diagramme von Abb. 74 entsprechen den Wasserfall-Diagrammen, wie sie in ähnlicher Weise beispielsweise in Abb. 62 zusammen gestellt sind. Der Pegelbereich ist teilweise geringfügig verschoben, umfasst aber stets 40 dB. Wechseln die Frequenzspuren ihre Farbe oder sind sie unterbrochen, was auch in der Schwarz-Weiß-Darstellung von Abb. 74 zu erkennen ist, schwankt der Pegel des zugehörigen Teiltöns. Diese Schwebung resultiert bekanntlich daraus, dass die Saitenchöre „in sich“ verstimmt sind. Aus den Unterbrechungen der Linie kann auf die jeweilige Schwebungsfrequenz geschlossen werden. Diese Erscheinung zeigt sich in den Frequenzspuren prägnanter als im Wasserfall-Diagramm. Man erkennt, dass die einzelnen Teiltöne häufig mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen, d.h. unterschiedlich schnell, schweben. Bei sehr langsamen Schwebungen mag dies den Hackbrettklang mit Leben erfüllen. Im hier beobachteten Ausmaß werden die damit verbundenen Pegelschwankungen jedoch als unangenehm empfunden.

Die Frequenzspur-Diagramme von Abb. 74 bestätigen den Befund von Abb. 73: Insgesamt sind etwa fünf Teiltöne für den Höreindruck maßgebend. In den tiefen Lagen können es etwas mehr, in den hohen Lagen entsprechend weniger sein. Auch bei diesen drei Beispielen lässt sich feststellen, dass die gehörbezogene Analyse die Willkür bei der Wahl der Analyseparameter reduzieren kann. Das „Herumprobieren“ mit unterschiedlichen Analysebandbreiten und Frequenzauflösungen, wie es in Kapitel 7 aufscheint, ist hierbei hinfällig. Die für das Hören wesentliche Information wird auf einfache Weise dargestellt. In Anhang 11 und 12 wird dies ganz besonders deutlich, wenn die Farbe als weitere „Dimension“ hinzukommt. Obwohl mit *Nonlinear Masking* in den vorliegenden Beispielen keine gravierenden Vereinfachungen zu erzielen waren, stellt doch die schnelle und übersichtliche Repräsentation der Teiltöne als Frequenzspuren einen ganz wesentlichen Vorteil dar.

### 9.3. Zusammenfassende Bemerkung

Die Schallsignale von Musikinstrumenten gehörbezogen zu analysieren, ist grundsätzlich das richtige Vorgehen. Mit der adäquaten Frequenzauflösung werden die hörbaren Teiltöne extrahiert. Dicht beieinander liegende Komponenten, die das Gehör nicht getrennt auflöst, werden gemeinsam verarbeitet. Dadurch werden Schwebungen erkennbar, die den Höreindruck beeinflussen. Ist die spektrale Maskierung hinreichend berücksichtigt, werden die unhörbaren Teiltöne unterdrückt. So wird auf die richtige Art ausschließlich derjenige Kern der physikalischen Information dargestellt, welcher für das Hören letztendlich relevant ist.

Einige Hörmerkmale sind bereits in den Wasserfall-Diagrammen der Abschnitte 7.4 und 7.5 erkennbar geworden. Auch wenn die Parameter geeignet gewählt worden sind, enthält das physikalische Spektrum aber in aller Regel mehr Information, als für das Hören relevant ist. Bedauerlicherweise ist in VIPER die spektrale Maskierung nicht in dem Maße berücksichtigt, wie es zu wünschen wäre. Dass die unbestreitbaren Vorteile der gehörbezogenen Analyse sich bei nicht in vollem Umfang ausprägen können, liegt an der unzureichenden Nachbildung dieses eminent wichtigen Höreffekts. Obwohl sie in den präsentierten Beispielen nicht unmittelbar zwingend erscheint, stellt die gehörbezogene Analyse zweifelsfrei den sicheren Weg dar, musikalische Klänge zu untersuchen und mit den Eigenschaften des Instruments zu verknüpfen. Nicht zuletzt bietet sie den Vorteil der Kontrolle mit dem Gehör: Jede Stufe der Verarbeitung kann dadurch validiert werden, dass das konturierte bzw. reduzierte Signal resynthetisiert wird. Ob das reduzierte Schallsignal noch die wesentliche Information enthält, lässt sich jederzeit durch Hörvergleich mit dem Original überprüfen.

## 10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Das Hackbrett ist ein sehr altes Musikinstrument. Obwohl es sehr übersichtlich aufgebaut ist, stellt es aus der Sicht von Schwingungslehre und Akustik kein einfaches Untersuchungsobjekt dar. Wie jedes Chordophon muss es als eine Kombination von mechanischem Schwingungsgenerator (den Saiten) und nachgeschaltetem Filter (dem Abstrahlkörper) aufgefasst werden, das die Bewegungen der Saitenenden in ein dreidimensionales Schallfeld überführt. Alle Bestandteile des Systems beeinflussen sich wechselseitig.

Am vorliegenden Instrument wurden die Saiten und deren Anregung durch den Klöppel nicht gesondert betrachtet. Vielmehr wurden

- die Schwingungen des Korpus und
- die mechanische Admittanz an der Kontaktstelle zwischen Korpus und Saiten

gemessen. Einige Zusammenhänge, die bei diesen Messungen deutlich wurden, sind in Abb. 75 illustriert.

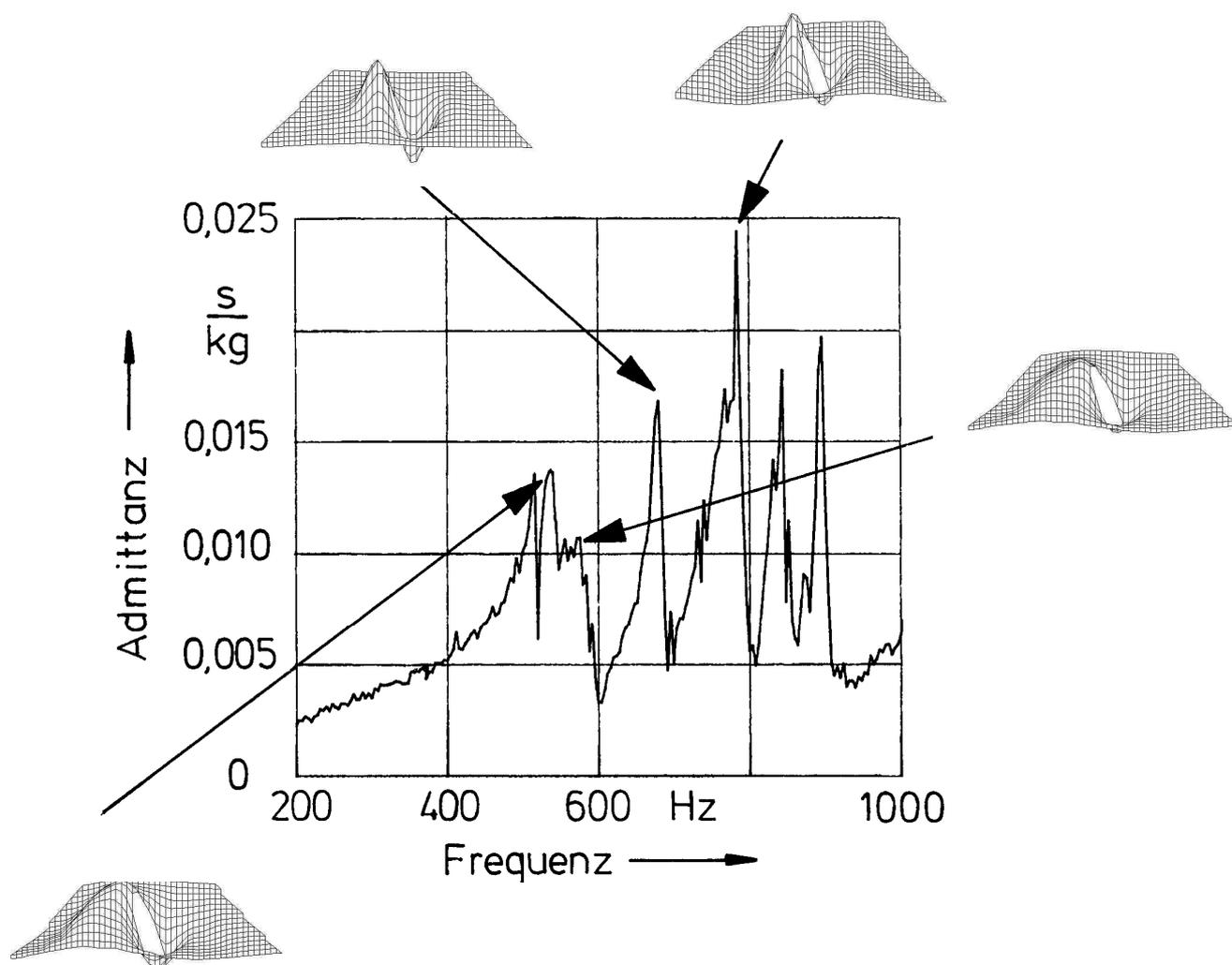


Abb. 75: Admittanz am rechten hohen Steg am Auflagepunkt der 12. Saite (Note Fis4) in Abhängigkeit von der Frequenz. Eingefügt sind einige Schwingungsformen der Decke.

Die Saite mit der musikalischen Note Fis4 liegt auf dem rechten hohen Steg unweit der Mitte auf („mittlere Lage“). Die Admittanz am dortigen Auflagepunkt der Saite ist in Abb. 75 als Funktion der Frequenz dargestellt. Einige Schwingungsformen der Decke, die sich in der Admittanz widerspiegeln, sind den entsprechenden Spitzen der Messkurve zugeordnet. Zwischen 522 Hz und 557 Hz bildet sich die Schwingungsform De5 in mehreren Varianten aus. In Abb. 75 sind zwei sehr ähnliche Bilder, die sich für 545 Hz bzw. 557 Hz ergeben, eingefügt. Die Deckenform De6 tritt bei Frequenzen von 720 Hz bis 740 Hz auf. Das absolute Maximum der Admittanz rührt von der Deckenform De7 her. Diese wurde bei der Vibrometer-Messung zwischen 770 Hz und 790 Hz beobachtet. Die beiden weiteren Nebenmaxima der Admittanz oberhalb von 800 Hz dürften von den Deckenformen De8 und De9 herrühren; siehe hierzu beispielsweise Abb. 24.

In den mittleren Lagen ist der Abstand von der versteifenden oberen und unteren Seitenwand sehr groß. Es ist zu erkennen, dass dort die Decke samt dem aufgeleimten Steg sich sehr schwingfreudig verhält. Die Admittanz am Auflagepunkt der Fis4-Saite spiegelt all diejenigen der gemessenen Schwingungsformen wider, welche am Auflagepunkt der Saite keinen Knoten aufweisen und demzufolge prinzipiell angeregt werden können. Offensichtlich gehören dazu nicht die Deckenformen De1 bis De3, deren Frequenzen unterhalb von 400 Hz liegen. Im vorliegenden Fall schwingt die Saite mit der Grundfrequenz 363 Hz, also unterhalb des „schwingfreudigen“ Frequenzbereichs. Die Grundschwingung der Saite wird demzufolge auch keine Deckenschwingung übermäßig anregen.

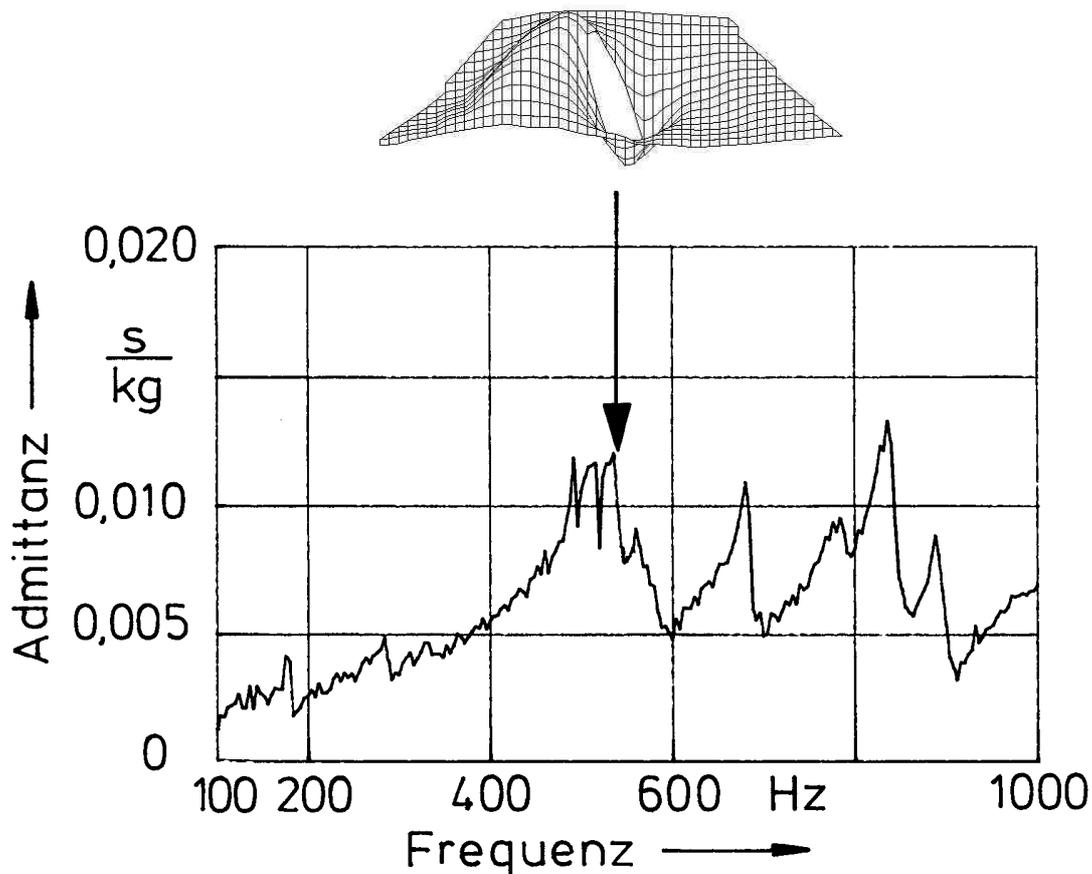


Abb. 76: Admittanz am linken hohen Steg am Auflagepunkt der 19. Saite (Note Cis5) als Funktion der Frequenz. Der Pfeil markiert die Frequenz der Grundschwingung der Saite, die weitgehend mit der darüber abgebildeten Deckenschwingung übereinstimmt.

Abb. 76 nimmt Bezug auf den Fall, dass die Frequenz einer Saitenschwingung mit einer Schwingungsfrequenz der Decke übereinstimmt. Da zudem die Saite an einem geeigneten Punkt aufliegt, vermag sie die Decke in Resonanz zu versetzen. Die Cis-5-Saite ist über den linken hohen Steg gespannt und schwingt mit der Grundfrequenz 548 Hz. Sie liegt an einer Stelle am Steg auf, die sich in der Nähe eines Schwingungsbauches der Decke befindet. Somit ist die Saite in der Lage, mit ihrer Grundschiwingung die Decke in hohem Maße zum Mitschwingen zu bringen. Sie regt die Deckenschwingung De5 an, die sich bei der Vibrometer-Messung für 545 Hz ergeben hatte und die im oberen Teil von Abb. 76 dargestellt ist. Dass neben der Anregungsfrequenz auch der Anregungsort „passt“, zeigt die hohe Admittanz in Abb. 76, wie sie durch den Pfeil markiert ist. Dies hat zur Folge, dass die Energie aus der Saite ab- und in das Instrument einfließt. Sie kann (was hier zumindest teilweise der Fall ist) als Schall abgestrahlt werden.

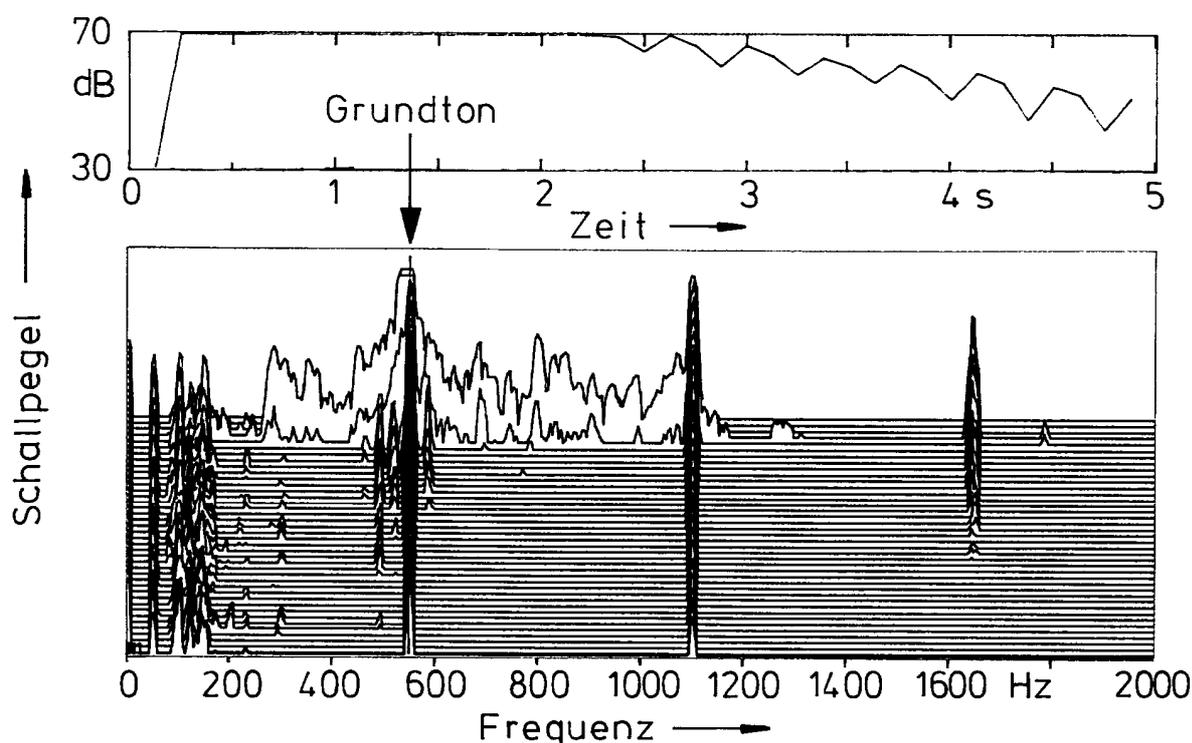


Abb. 77: Saitenklang der 19. Saite (Note Cis5) als Funktion der Frequenz. Der Pfeil markiert diejenige Frequenz, bei welcher ein Schnitt durch das Schallpegel-Frequenz-Spektrum (unten) gelegt wurde. Dadurch wird die Schallpegel-Zeitfunktion des Grundtons sichtbar, die oben abgebildet ist.

Abb. 77 zeigt die Auswirkungen auf das Schallsignal, insbesondere auf den Grundton. Dessen Schallpegel ist im oberen Teil als Funktion der Zeit dargestellt. Zwei Effekte sind erkennbar:

- Der Anfangspegel des Grundtons ist so groß, dass er den dargestellten Maximalpegel von 70 dB übersteigt und im Messdiagramm zunächst „Clipping“ auftritt.
- Der Pegel nimmt sehr schnell ab.

Beide Beobachtungen belegen, dass die Energie nicht lange in der schwingenden Saite verbleibt, sondern in hohem Maße und sehr schnell an den Korpus und von dort in das Schallfeld abgegeben wird. Dies äußert sich sowohl im hohen Anfangspegel des Grundtons als auch in seinem kurzen Nachhall. Hohe Lautstärke wird demnach mit knappem „Sustain“ erkaufte – ein Zusammenhang, wie er allen Musikinstrumenten zu eigen ist, die freie Schwingungen für die Klangerzeugung nutzen.

Abschließend sei noch einmal auf eine vielversprechende Alternative zur objektiven Analyse des Schallsignals mittels Schneller Fourier-Transformation (FFT) hingewiesen. Es ist dies die gehörbezogene Schallanalyse, wie sie beispielsweise das Programm VIPER bietet. In Abb. 78 ist am Exempel des Klanges Cis5 illustriert, wie die für das Hören relevanten Teiltöne extrahiert und als Funktion der Zeit und der gehörgerecht skalierten Frequenz – der Tonheit – dargestellt sind. Um aussagekräftige Untersuchungen durchzuführen, ist hierbei weit weniger Vorwissen notwendig, als es Voraussetzung für die zielführende Anwendung der FFT ist. Es steht auch die Möglichkeit offen, die Pegel-Zeitverläufe der einzelnen Teiltöne zu studieren. Dazu lassen sich Schnitte bei konstanten, vom Experimentator vorzugebenden Frequenzen durch das Frequenzspuren-Zeit-Diagramm legen. In Ergänzung einer Repräsentation wie in Abb. 78 lassen sich demnach ähnliche Zusatz-Diagramme erzeugen, wie eines in Abb. 77 oben wiedergegeben ist. Gut bewährt hat es sich, die Ergebnisse der gehörbezogenen Analyse in der farbigen Repräsentation wie in Anhang 11 oder 12 für die Interpretation heranzuziehen. Abb. 78 macht den Nachteil deutlich, den diese Darstellung hat, wenn lediglich Schwarz-Weiß-Druck für die Visualisierung zur Verfügung steht: Fehlt die Farbe als weitere „Dimension“, bleibt die Veranschaulichung doch äußerst lückenhaft.

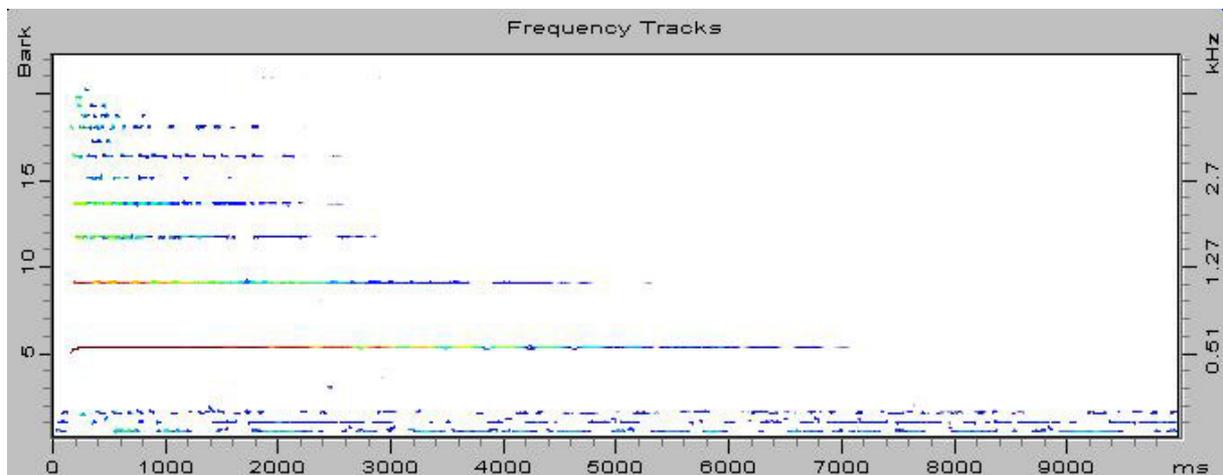


Abb. 78: Saitenklang der 19. Saite (Note Cis5) in gehörbezogener Darstellung als Funktion der Zeit (nach rechts) sowie der Tonheit bzw. der Frequenz (nach oben). Das farbige Original findet sich in Anhang 11 Teil 2, die zugehörige Farbskala in Anhang 11 Teil 4.

Die Frequenzen der hörbaren Teiltöne sind die mit Abstand wichtigsten Merkmale eines musikalischen Klanges. Sie bestimmen die musikalische Tonhöhe. Daneben kommt deren Anfangspegeln große Bedeutung zu, da sie die Klangfarbe beeinflussen. Darüber hinaus spielt eine Rolle, in welchem Maße die Pegel, speziell der des Grundtons, abnehmen. Das Abklingen der Teiltöne bestimmt nicht nur, wie lang ein musikalischer Klang „steht“, sondern erlaubt auch Einblicke in das mechanisch-akustische Verhalten des Instruments.

Die Admittanz besagt, in welchem Maße das betrachtete Auflager der Saite beweglich („*vibration willing*“) ist. Einige Erläuterungen dazu finden sich im Anhang 1. Ob der Kontaktpunkt zum Korpus sich im Sinne einer Feder, einer Masse oder eines Dämpfers verhält, ist dem Betrag der Admittanz nicht zu entnehmen. Die Konsequenzen können jedoch sehr unterschiedlich ausfallen. Sowohl in der Feder als auch in der Masse kann Energie zwar kurzzeitig gespeichert werden, wird jedoch bereits nach kurzer Zeit in vollem Umfang wieder zurück gegeben. Federnde oder massebehaftete Auflager können die Frequenzen der Saitenschwingungen verändern, beeinflussen jedoch nicht deren Abklingen. Nur wenn die Saite an einem Auflager einen Dämpfer „sieht“ bzw. „fühlt“, gibt sie Energie irreversibel an das Auflager ab.

Die Folge ist zusätzliche Dämpfung, die bewirkt, dass die Amplituden der Saiten-, Korpus- und Luftschwingung besonders schnell kleiner werden.

Damit die Saite Energie an den Korpus abgeben kann, muss die Admittanz an einem Ende einen Realteil aufweisen. Der reelle Anteil kennzeichnet einen Dämpfer. Diese Voraussetzung ist nicht hinreichend, da sie möglicherweise besagt, dass Wärme im Inneren des Instruments erzeugt wird, ohne dass Schall abgestrahlt wird. Sie ist jedoch notwendig für das Funktionieren eines akustischen Saiteninstruments. Schall kann lediglich aus derjenigen Energie entstehen, welche aus der schwingenden Saite über das Auflager in den Abstrahlkörper fließt. Für zukünftige Untersuchungen folgt daraus die Empfehlung, nicht den Betrag, sondern als direkteres Maß den Realteil der Admittanz, die mechanische Konduktanz, an den Auflagepunkten der Saiten zu messen. Diese Erkenntnis wird in zukünftige Untersuchungen an Musikinstrumenten einfließen.

*Der Autor dankt Herrn Johannes Maria Guckel für die großzügige Überlassung seines Hackbretts sowie Frau Dipl.-Ing. Birgit Hänel dafür, dass sie den Zugriff auf das Instrument ermöglicht und selbst Untersuchungen daran durchgeführt hat. Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg hat dankenswerterweise die Saitenklänge mit VIPER analysiert und sich in die Geheimnisse der Modalanalyse eingearbeitet. Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif gebührt Dank für Hinweise und Korrekturen am Manuskript, die sie in einer für sie besonders schweren Zeit durchgeführt hat.*

## LITERATUR

- Boullosa, R.R., *A note on the sound radiation from the classical guitar: Influence of energy input via the string termination at the fret. Acustica - acta acustica* **89** (2003), 718 - 721.
- Buchner, A., *Handbuch der Musikinstrumente. 3. Aufl. Dausien, Hanau* 1995.
- Burns, C.M., *Out of obscurity: Discovering the dulcimer in Ireland. Thesis, Department of Music, University College Cork, Cork* 2002.
- Canfield, G. und Rossing, T.D., *Modes of vibration in hammered dulcimers. Proc. Int. Symp. Musical Acoustics. Dourdan, ISMA, Paris* 1995, 512 – 517.
- Fleischer, H., *Zur Messung mechanischer Schwingungsgrößen einer Kreisplatte mittels Sondenmikrofon. Forschungsbericht 01/81 aus dem Institut für Mechanik, Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik, HSBw München, Neubiberg* 1981.
- Fleischer, H., *Über die Eignung von Sondenmikrofonen für die Messung mechanischer Schwingungsformen. Acustica* **51** (1982), 235 – 241.
- Fleischer, H., *Dead spots of electric basses. 2. Diagnosis. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/00. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg* 2000.
- Fleischer, H., *Abklingen der Saitenschwingungen von Solid-Body-Gitarren. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2001). DEGA, Oldenburg* 2001, 432 - 433.
- Fleischer, H., *Gehörbezogene Analyse von Gongklängen. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/02. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, Universität der Bundeswehr und Technische Universität München, Neubiberg* 2002.
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments. 2. Auflage. Springer, New York* 1998.
- Gough, C.E., *The theory of string resonances on musical instruments. Acustica* **49** (1981), 124 - 141.
- Hänel, B., *Voruntersuchungen zur Modalanalyse an einem chromatischen Hackbrett. Interner Bericht des Instituts für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg* 2004.
- Hornbostel, E.M. und Sachs, C., *Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie* **46** (1914).
- 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.
- Peterson, D.R., *Hammer/string interaction and string modes in the hammered dulcimer. Proc. Int. Symp. Musical Acoustics. Dourdan, IRCAM, Paris* 1995, 533 – 538.
- Richardson, M.H., *Is it a mode shape, or an operation deflection shape? Sound and Vibration. Jan* 1997, 54-61.
- Roewer, H., *Modalanalyse – Vergleich von Operating Deflection Shapes und Eigenformen und ihrer Analyseprogramme. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg* 2004.

*Terhardt, E., Akustische Kommunikation. Springer, Berlin 1998.*

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

*Weinreich, G., Coupled piano strings. J. Acoust. Soc. Amer. 62 (1977), 1474 – 1485.*

*Weinreich, G., The coupled motions of piano strings. Scientific American 240 (1), Januar 1979, 94 - 102.*

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

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

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/musik/musik2.htm>

Deutsches Museum (2003)

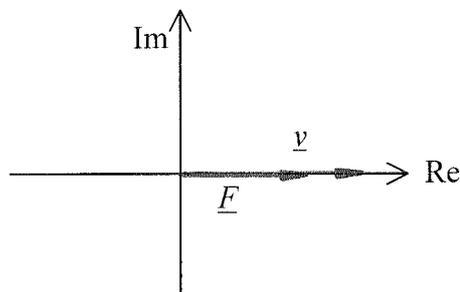
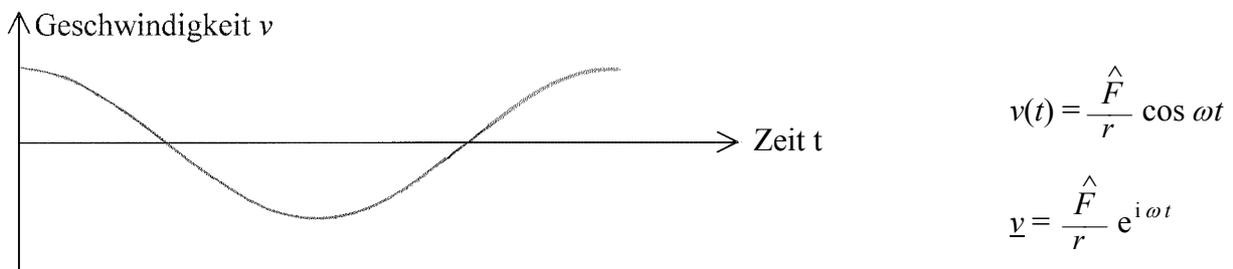
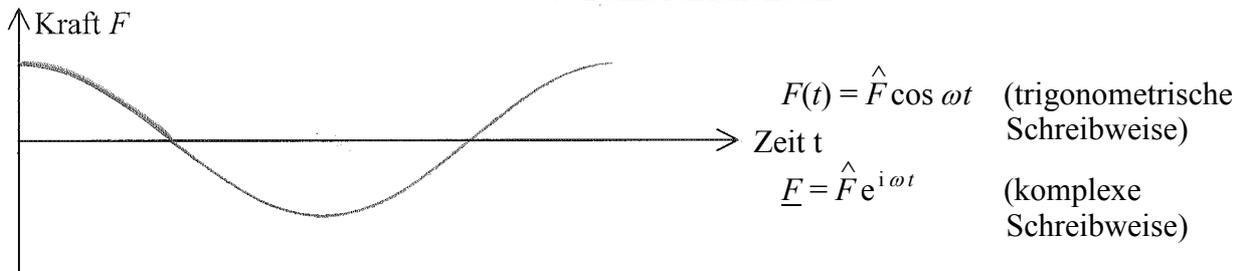
<http://www.New-Renaissance.eenet.ee/dulcimer>

Dissertation von Kettlewell, D., mit Ergänzungen (1976)

## Anhang 1: Betrachtungen zur mechanischen Admittanz

### Teil 1: Viskoser Dämpfer

Es gilt das Gesetz der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung  $F = r v$   
 mit  $F$  Kraft  
 $v$  Geschwindigkeit  
 $r$  Dämpfungskonstante



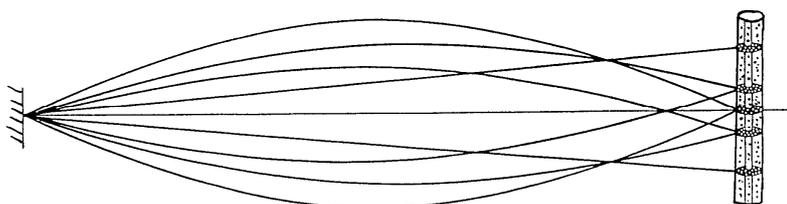
$$\text{Admittanz } \underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} = \frac{1}{r}$$

Die Admittanz eines Dämpfers ist reell; ihr Betrag ist

$$|\underline{Y}| = Y = 1/r \quad ;$$

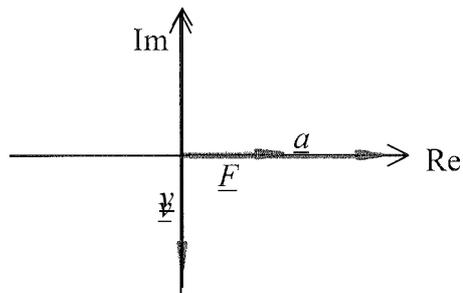
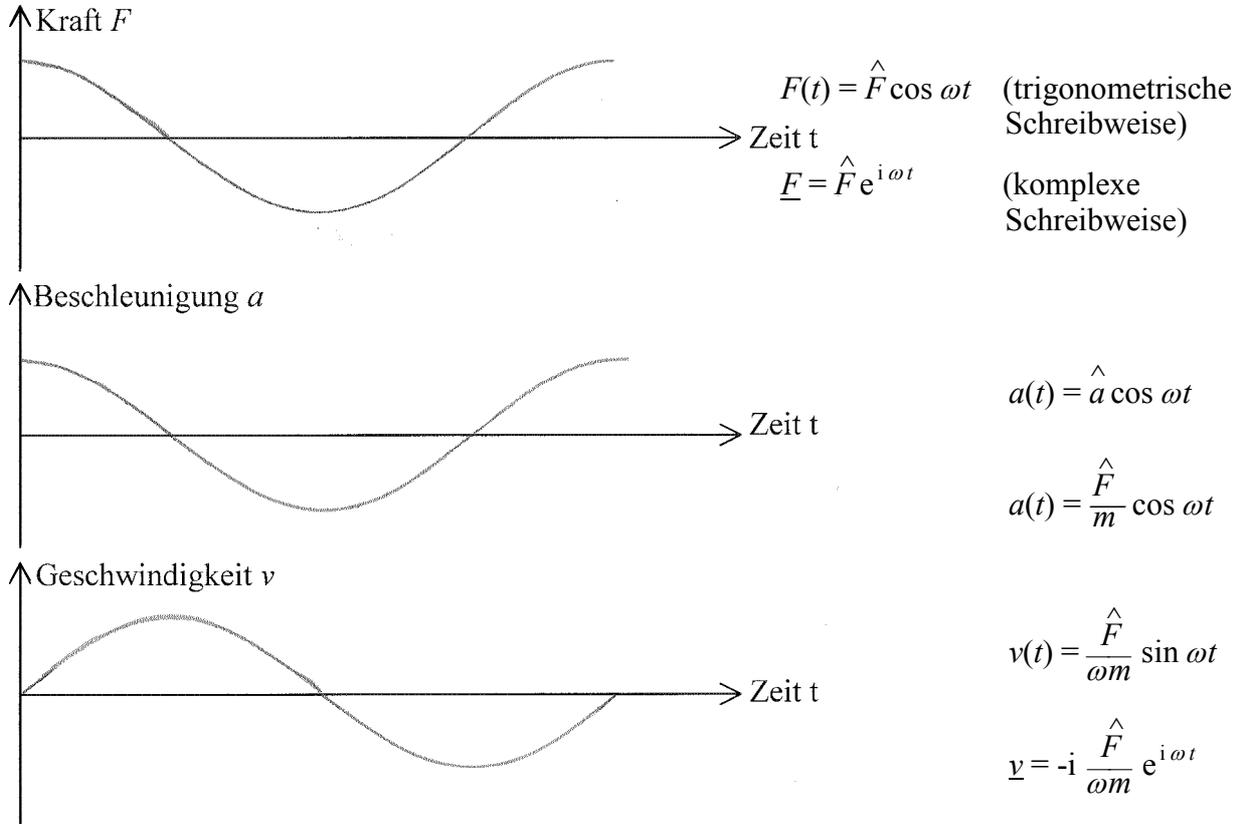
bei konstanter Dämpfungskonstante hängt er nicht von der Frequenz ab. Ein Dämpfer am Auflager einer Saite beeinflusst deren Schwingungsfrequenz nicht; vgl. Weinreich (1979). In Folge von Energieverzehr verringert er jedoch deren Schwingungsamplitude.

Das Ende der Saite ist beweglich mit einem Dämpfer (Dämpfungskonstante  $r$ ) verbunden. Dieser besteht aus einer masselosen perforierten Scheibe, die mit viskoser Reibung in einem Dämpfungsfluid auf- und abgeführt wird.



## Teil 2: Masse

Es gilt das Newton'sche Gesetz  $F = m a$   
 mit  $F$  Kraft  
 $a$  Beschleunigung  
 $m$  Masse



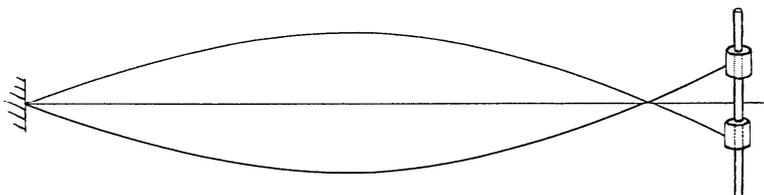
$$\text{Admittanz } \underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} = -i \frac{1}{\omega} \frac{1}{m}$$

Die Admittanz einer Masse ist negativ imaginär; ihr Betrag ist

$$|\underline{Y}| = Y = \frac{1}{2\pi m f} \quad ;$$

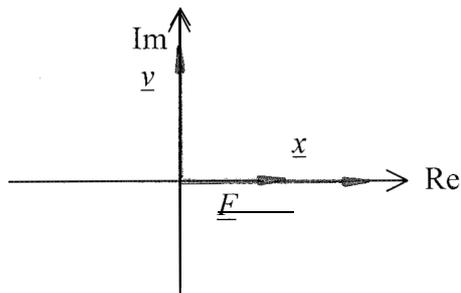
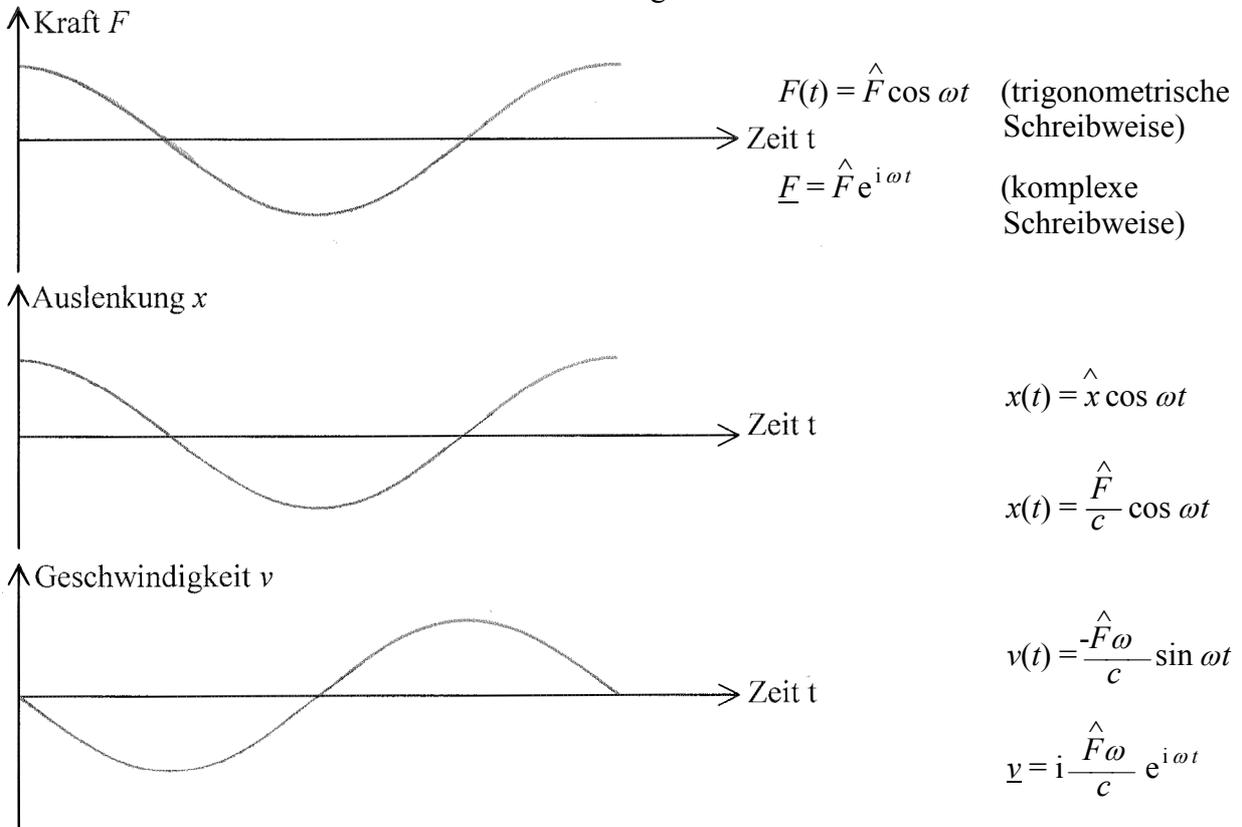
er nimmt umgekehrt proportional zur Frequenz ab, d.h. mit  $-20$  dB pro Dekade. Eine Masse am Auflager dämpft die Schwingung nicht, erhöht aber deren Frequenz; vgl. Weinreich (1979).

Die Saite ist an einem Ende beweglich mit einer Masse  $m$  verbunden, die reibungsfrei auf- und abgeführt wird.



### Teil 3: Feder

Es gilt das Hooke'sche Gesetz  $F = c x$   
 mit  $F$  Kraft  
 $x$  Auslenkung  
 $c$  Steifigkeit



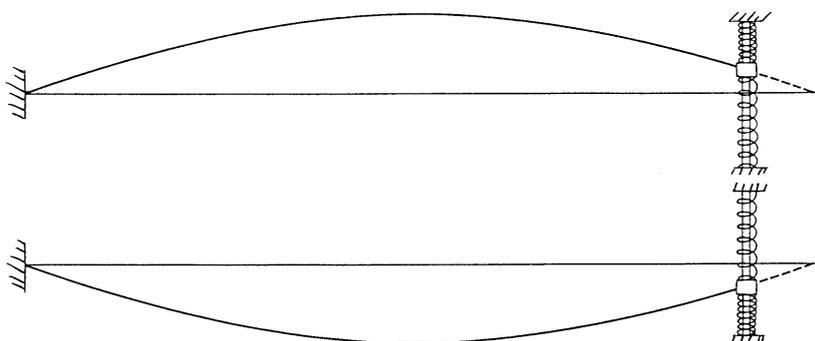
Admittanz  $\underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} = i \omega \frac{1}{c}$

Die Admittanz einer Feder ist positiv imaginär; ihr Betrag ist

$$|\underline{Y}| = Y = \frac{2\pi}{c} f \quad ;$$

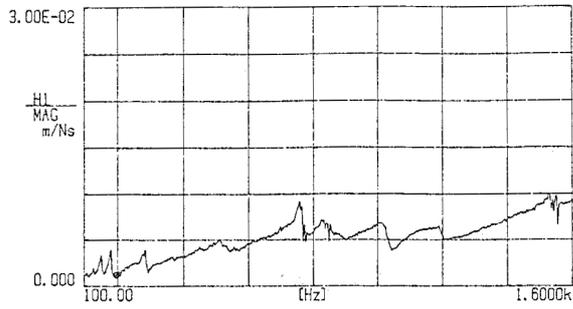
er steigt proportional zur Frequenz an, d.h. mit +20 dB pro Dekade. Eine Feder am Auflager dämpft die Schwingung nicht, setzt aber deren Frequenz herab; vgl. Weinreich (1979).

Die Saite ist an einem Ende beweglich mit zwei Federn (Gesamtsteifigkeit  $c$ ) verbunden, die reibungsfrei auf- und abgeführt werden.

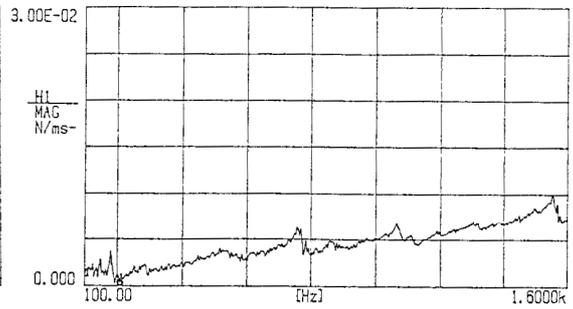


## Linker hoher Steg

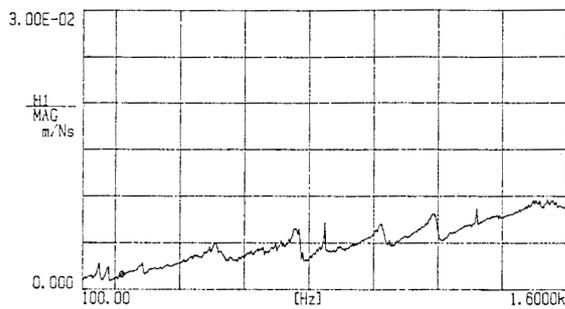
## Rechter hoher Steg



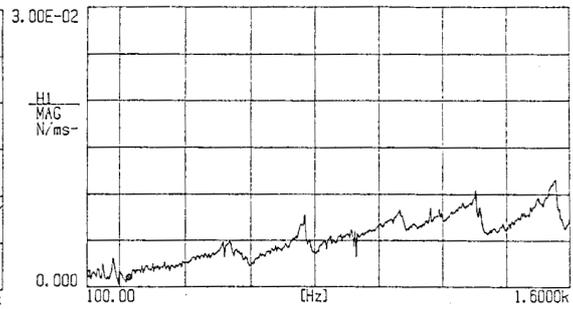
1. Saite: Note G3



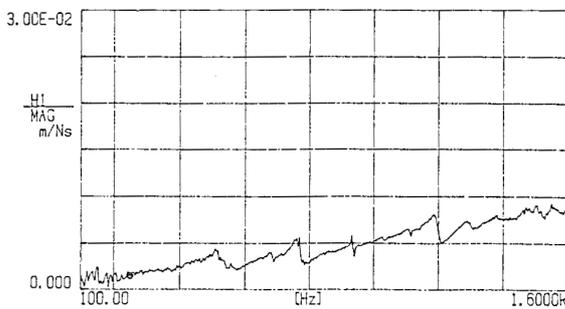
2. Saite: Note Gis3



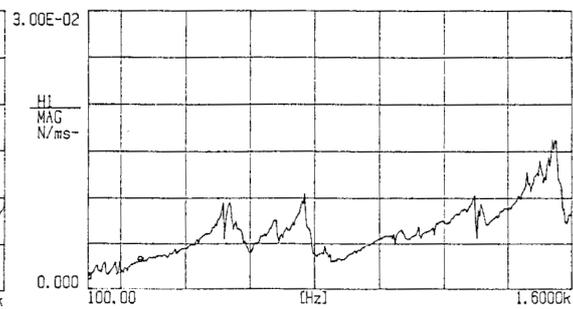
3. Saite: Note A3



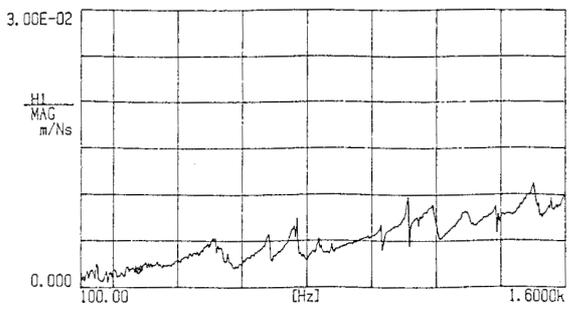
4. Saite: Note B3



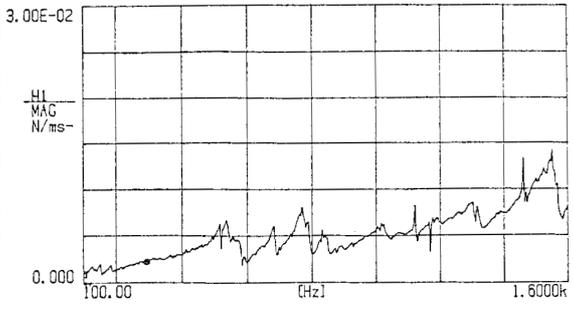
5. Saite: Note H3



6. Saite: Note C4



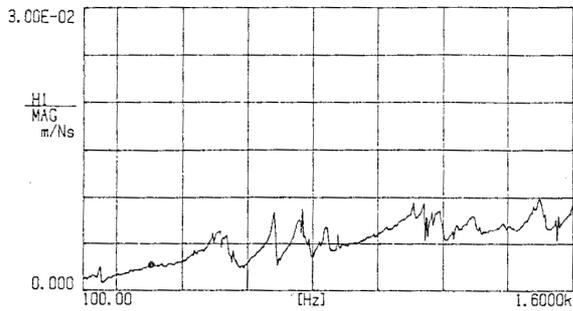
7. Saite: Note Cis4



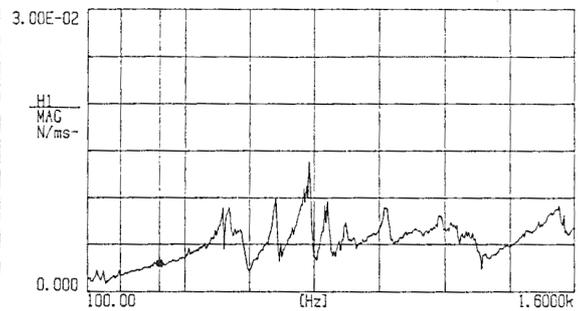
8. Saite: Note D4

### Linker hoher Steg

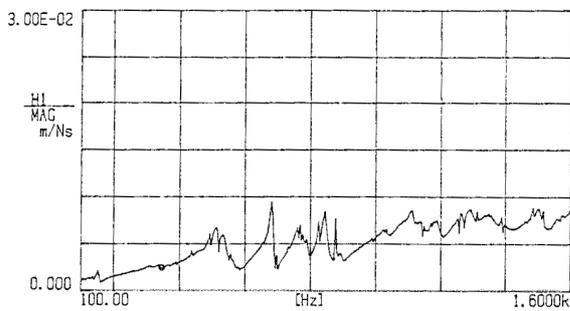
### Rechter hoher Steg



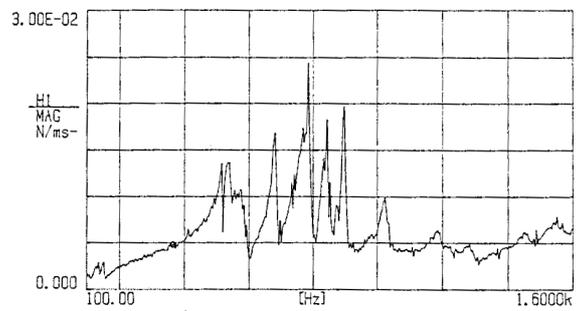
**9. Saite: Note Dis4**



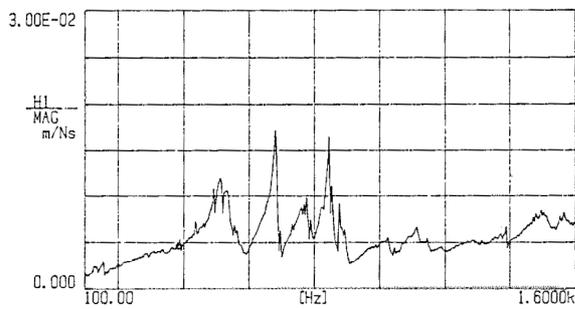
**10. Saite: Note E4**



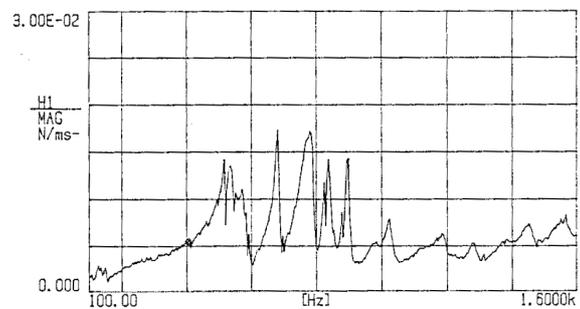
**11. Saite: Note F4**



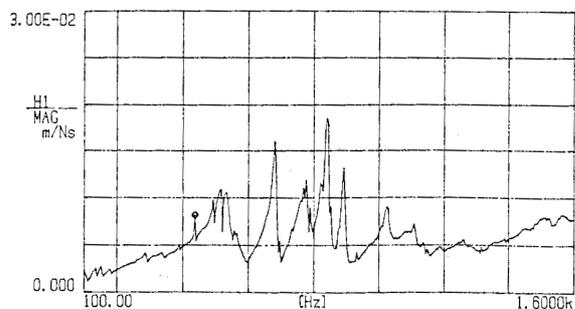
**12. Saite: Note Fis4**



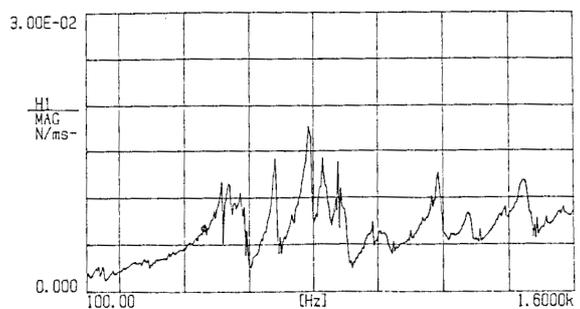
**13. Saite: Note G4**



**14. Saite: Note Gis4**



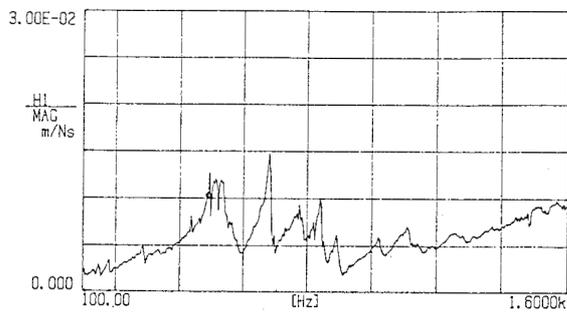
**15. Saite: Note A4**



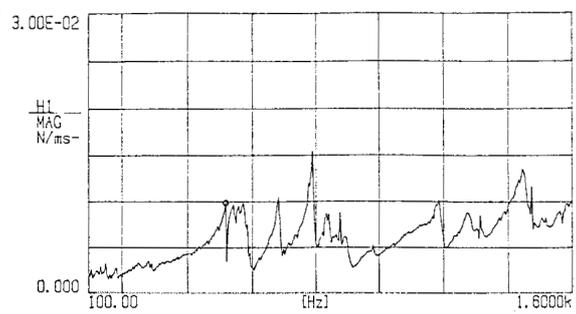
**16. Saite: Note B4**

### Linker hoher Steg

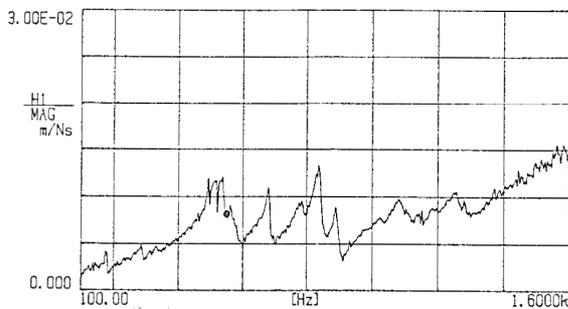
### Rechter hoher Steg



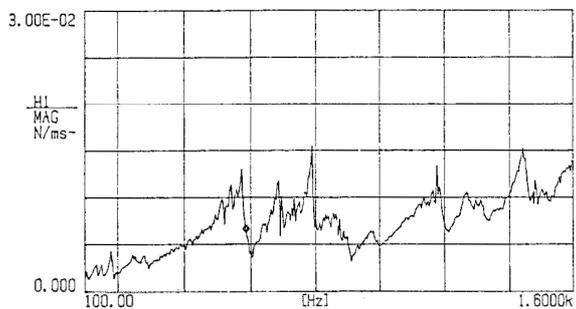
17. Saite: Note H4



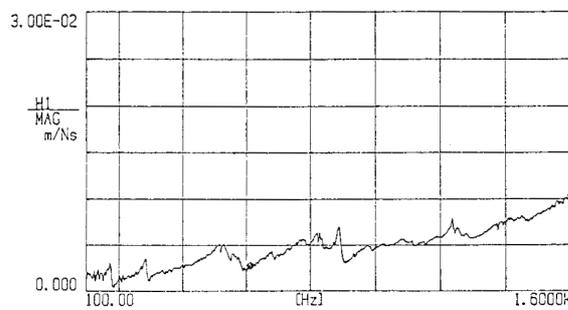
18. Saite: Note C5



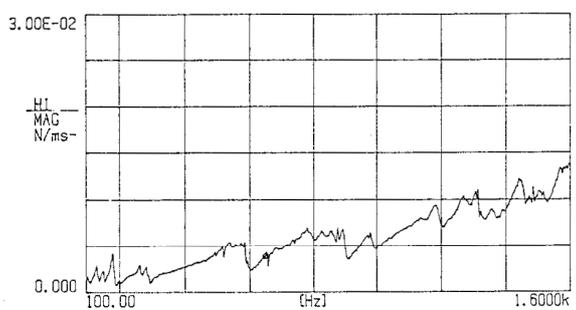
19. Saite: Note Cis5



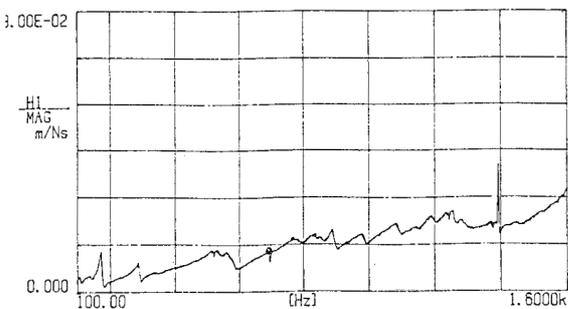
20. Saite: Note D5



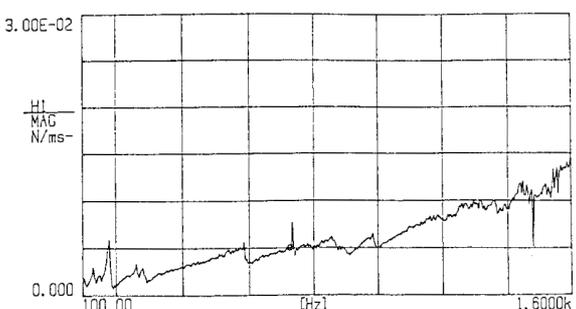
21. Saite Note: Dis5



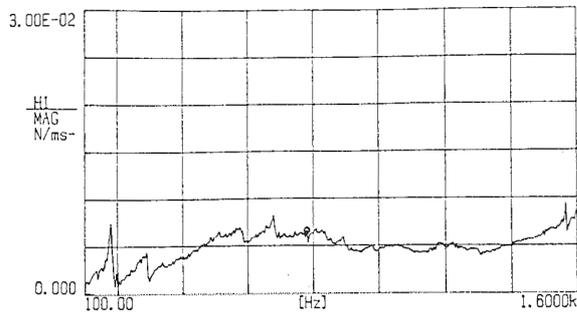
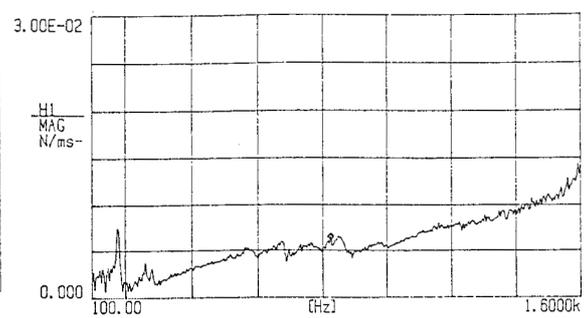
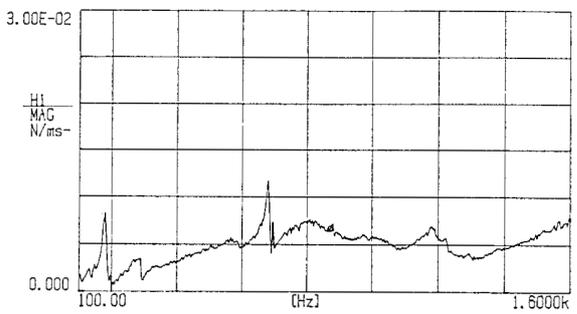
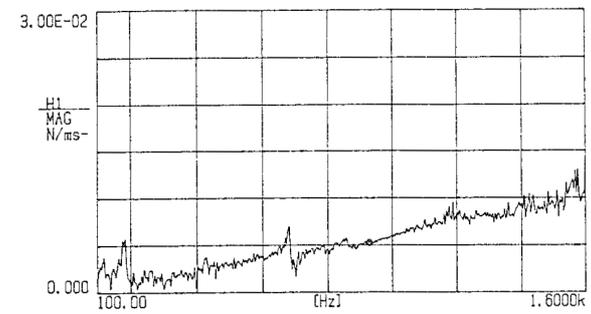
22. Saite: Note E5



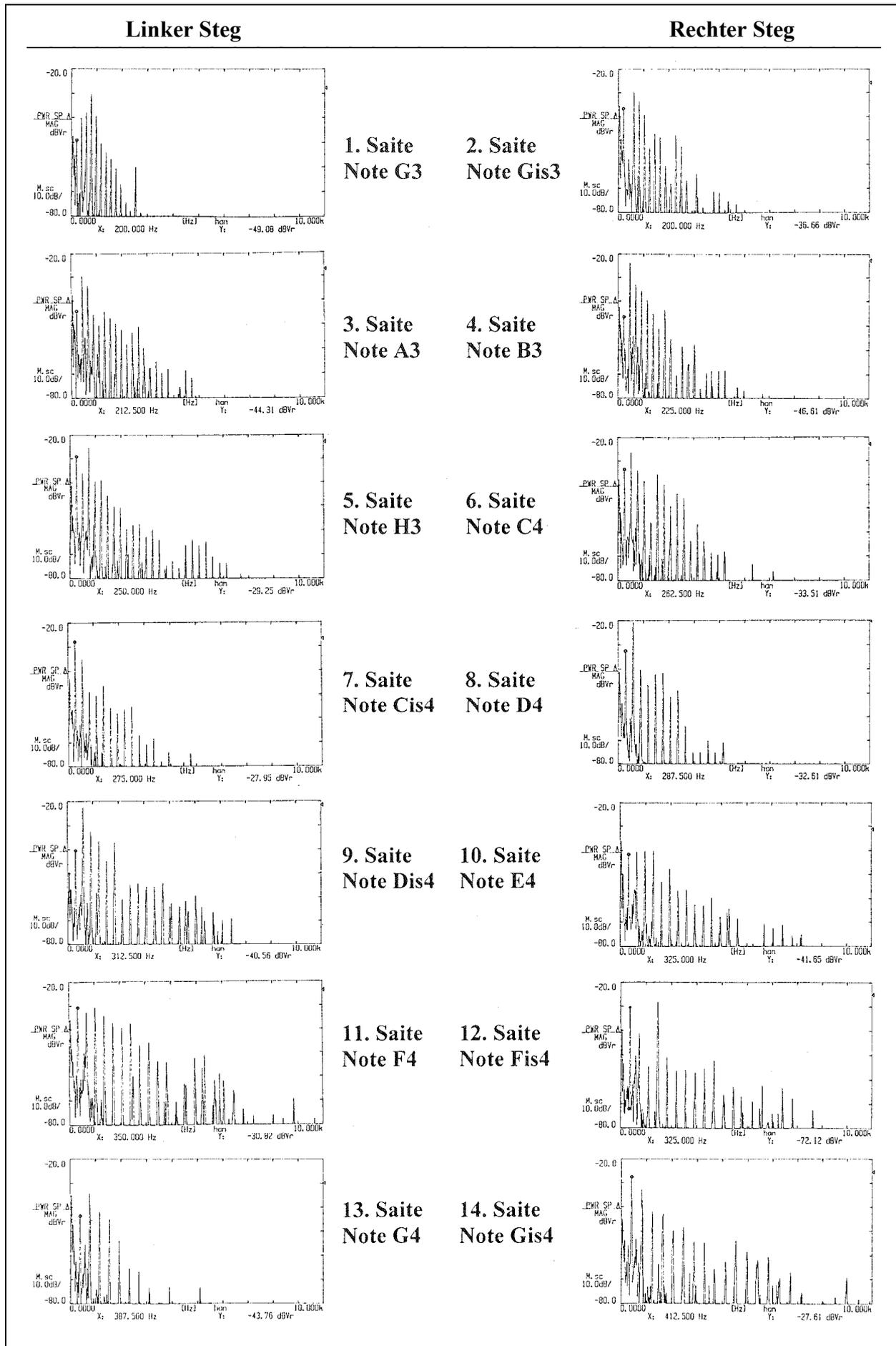
23. Saite: Note F5



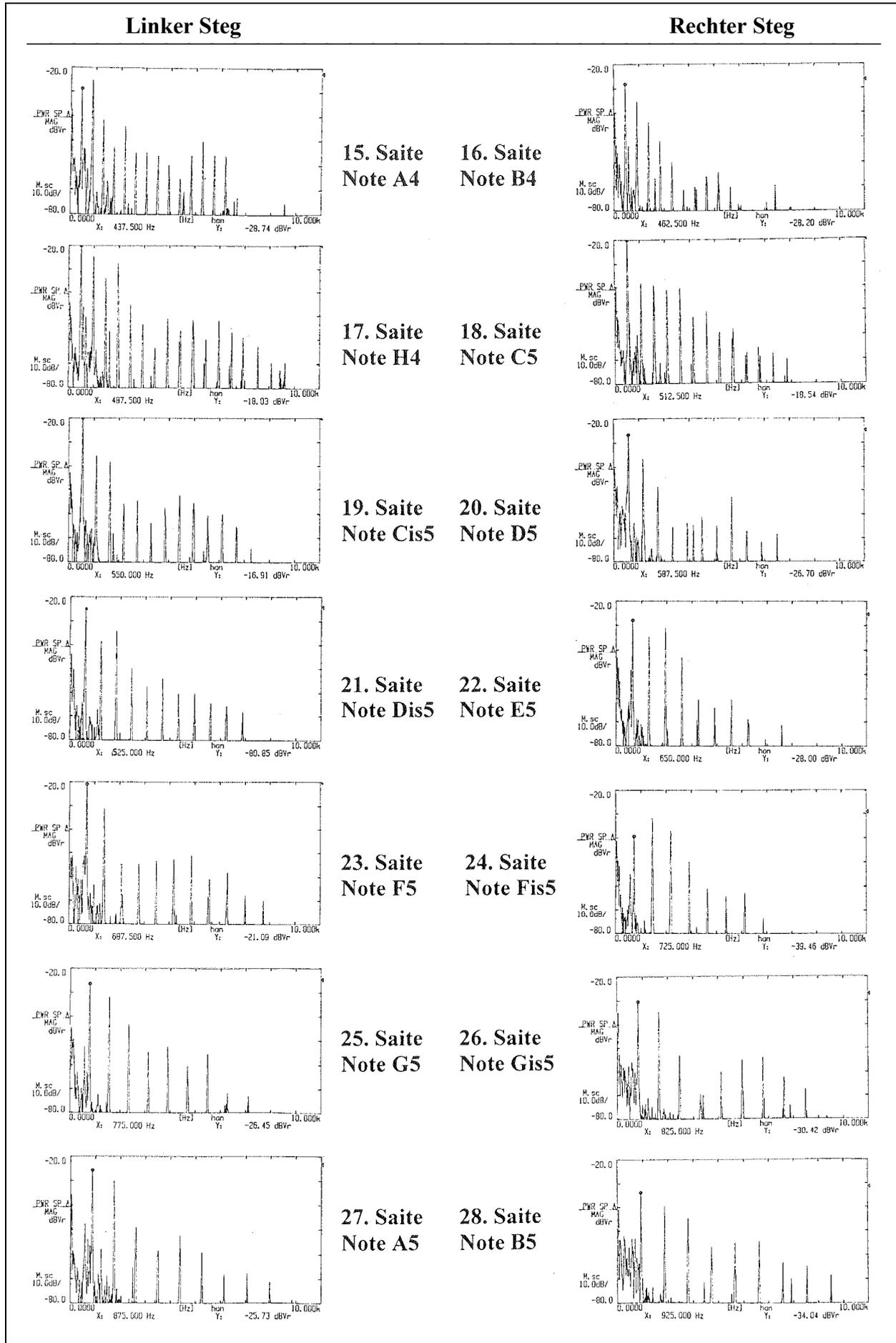
24. Saite: Note Fis5

**Linker hoher Steg****Rechter hoher Steg****25. Saite: Note G5****26. Saite: Note Gis5****27. Saite: Note A5****28. Saite: Note B5**

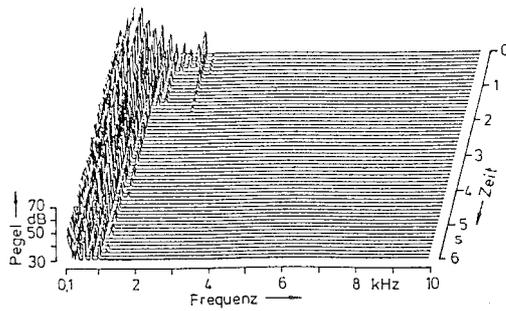
**Anhang 2 Teil 4:** Mechanische Admittanz an einem Auflager der vier hoch gestimmten Saitenchöre des Hackbretts.



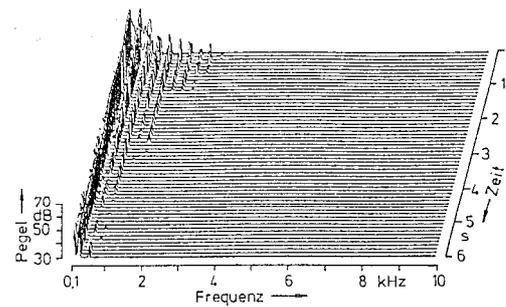
Anhang 3 Teil 1: Pegel-Frequenz-Spektren (Bandbreite 10 kHz) der vierzehn tiefen Noten des Hackbretts.



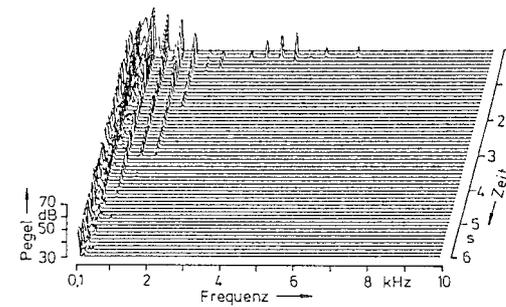
Anhang 3 Teil 2: Pegel-Frequenz-Spektren (Bandbreite 10 kHz) der vierzehn hohen Noten des Hackbretts.



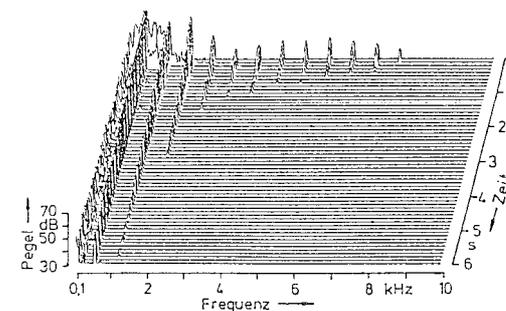
**1. Saite  
Note G3**



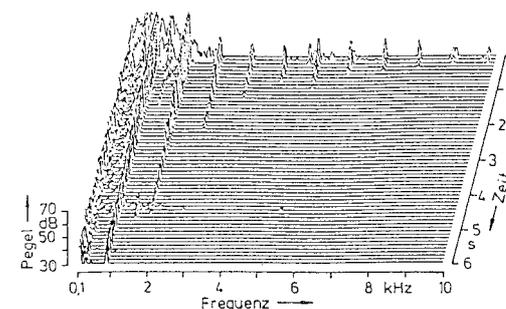
**7. Saite  
Note Cis4**



**13. Saite  
Note G4**

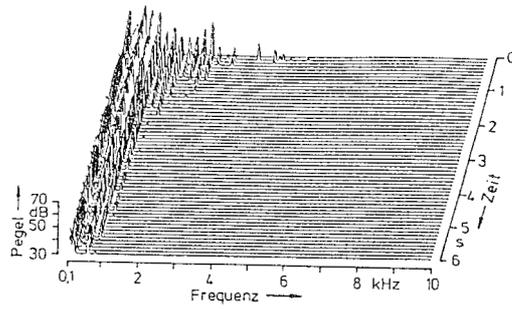


**21. Saite  
Note Dis5**

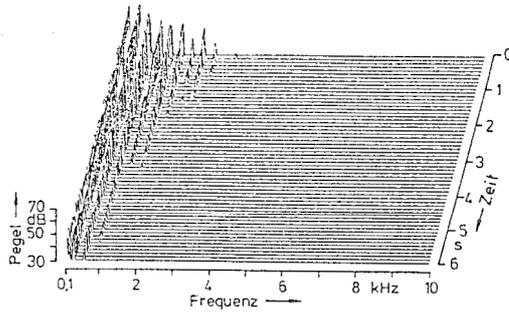


**27. Saite  
Note A5**

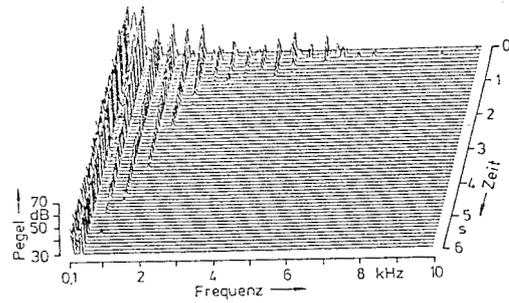
**Anhang 4:** Schallpegel über der Frequenz (10 kHz) und der Zeit (6 s)  
für fünf angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.



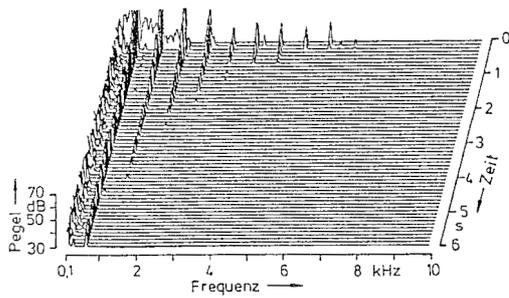
**2. Saite  
Note Gis3**



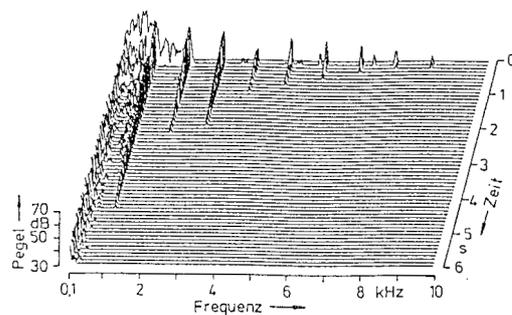
**8. Saite  
Note D4**



**14. Saite  
Note Gis4**



**22. Saite  
Note E5**

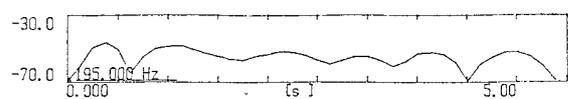


**28. Saite  
Note B5**

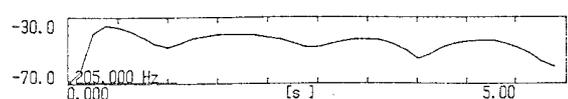
**Anhang 5:** Schallpegel über der Frequenz (10 kHz) und der Zeit (6 s)  
für fünf angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.

### Linker Steg

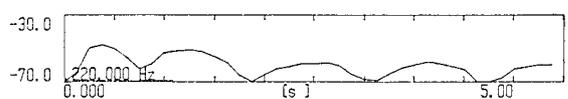
### Rechter Steg



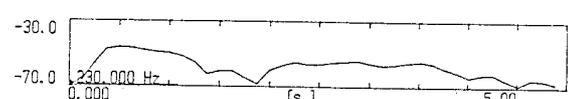
**1. Saite: Note G3**



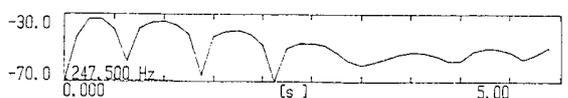
**2. Saite: Note Gis3**



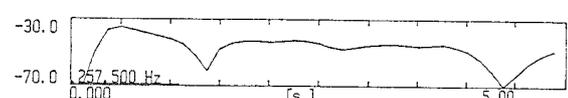
**3. Saite: Note A3**



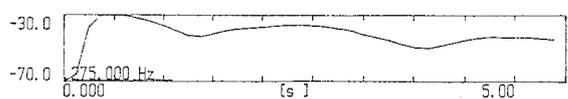
**4. Saite: Note B3**



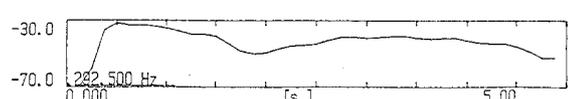
**5. Saite: Note H3**



**6. Saite: Note C4**



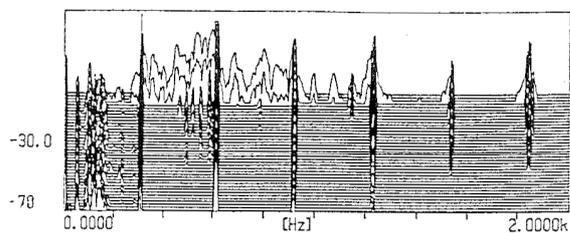
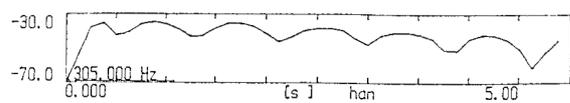
**7. Saite: Note Cis4**



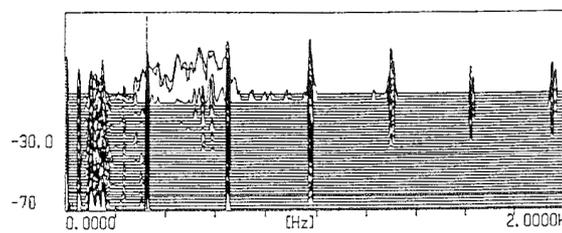
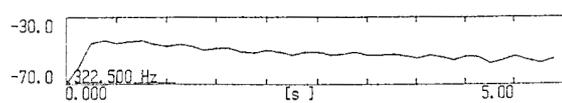
**8. Saite: Note D4**

### Linker Steg

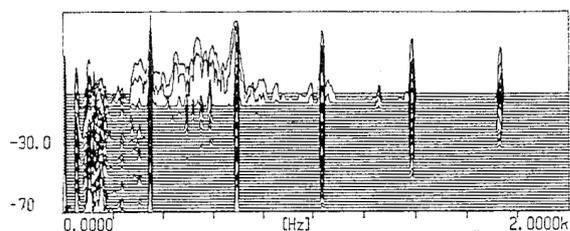
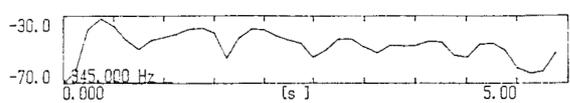
### Rechter Steg



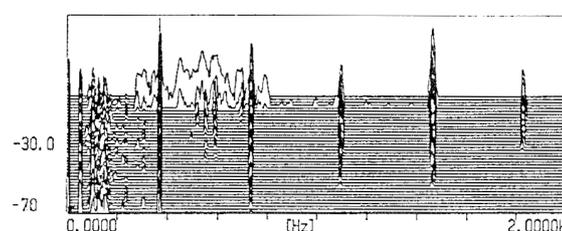
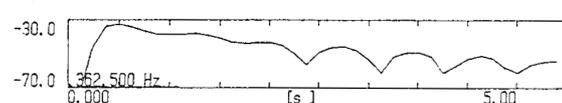
**9. Saite: Note Dis4**



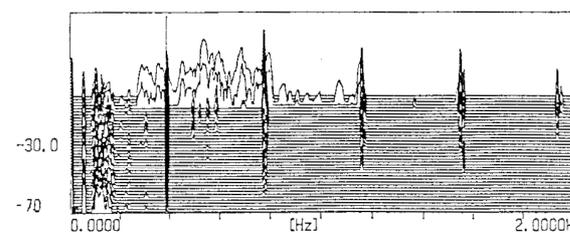
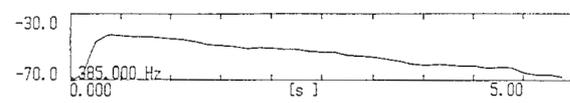
**10. Saite: Note E4**



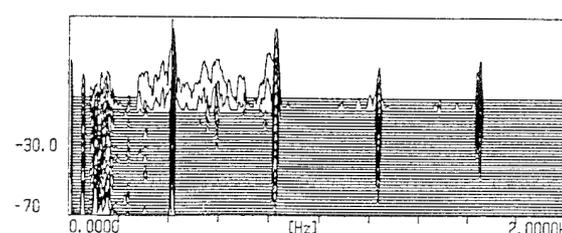
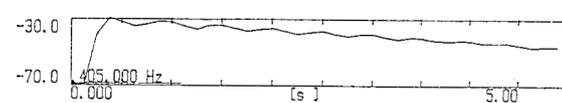
**11. Saite: Note F4**



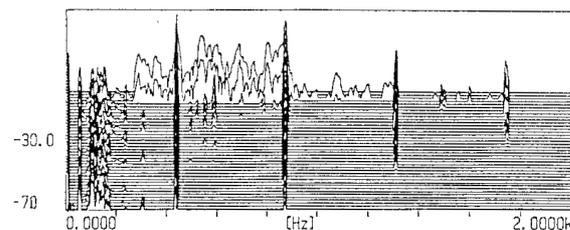
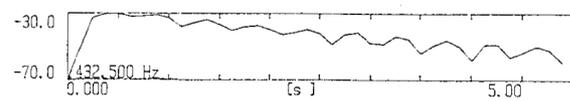
**12. Saite: Note Fis4**



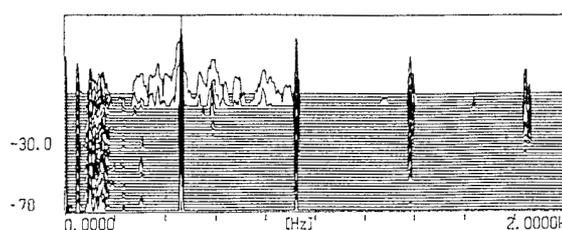
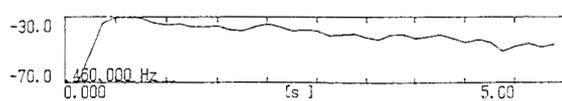
**13. Saite: Note G4**



**14. Saite: Note Gis4**



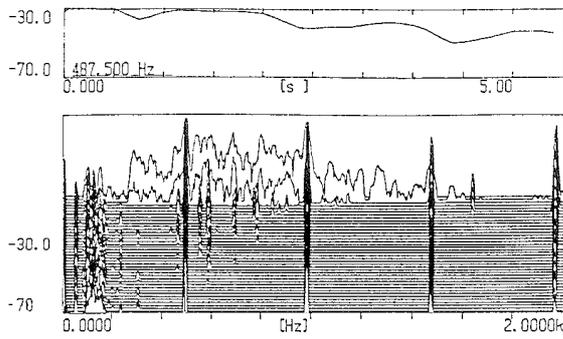
**15. Saite: Note A4**



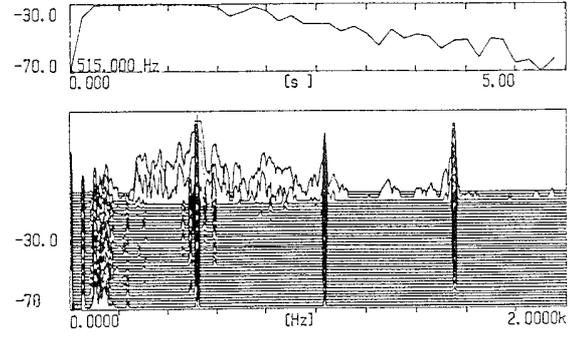
**16. Saite: Note B4**

### Linker Steg

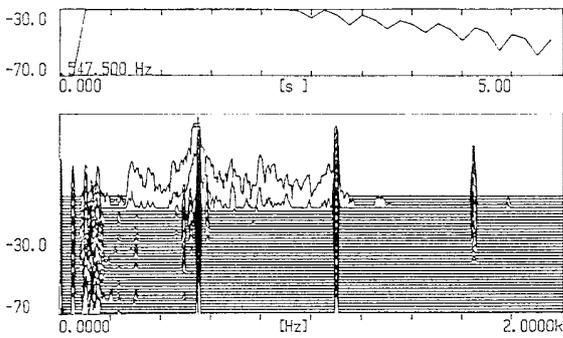
### Rechter Steg



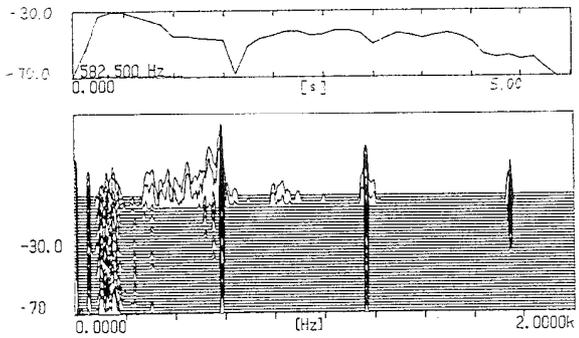
**17. Saite: Note H4**



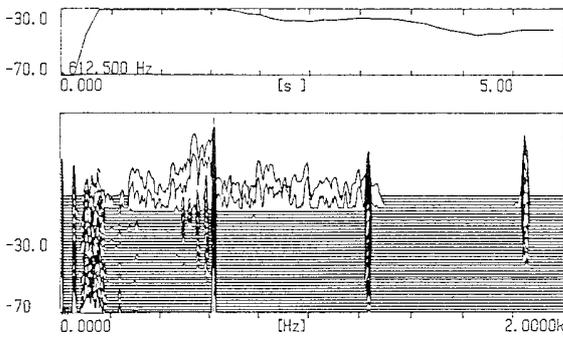
**18. Saite: Note C5**



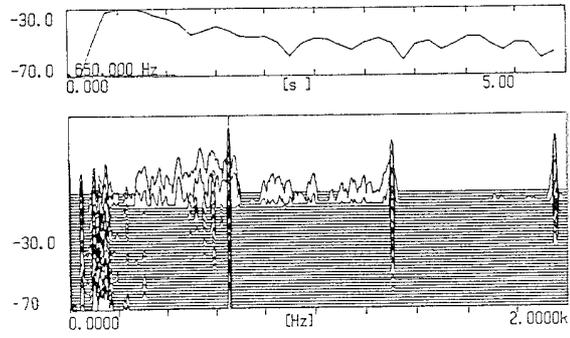
**19. Saite: Note Cis5**



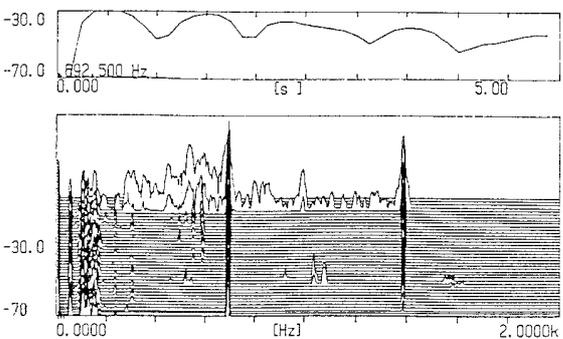
**20. Saite: Note D5**



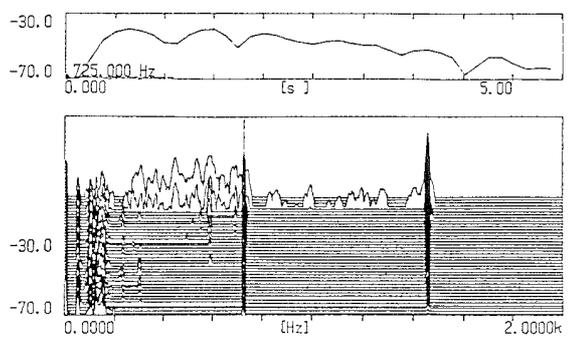
**21. Saite Note: Dis5**



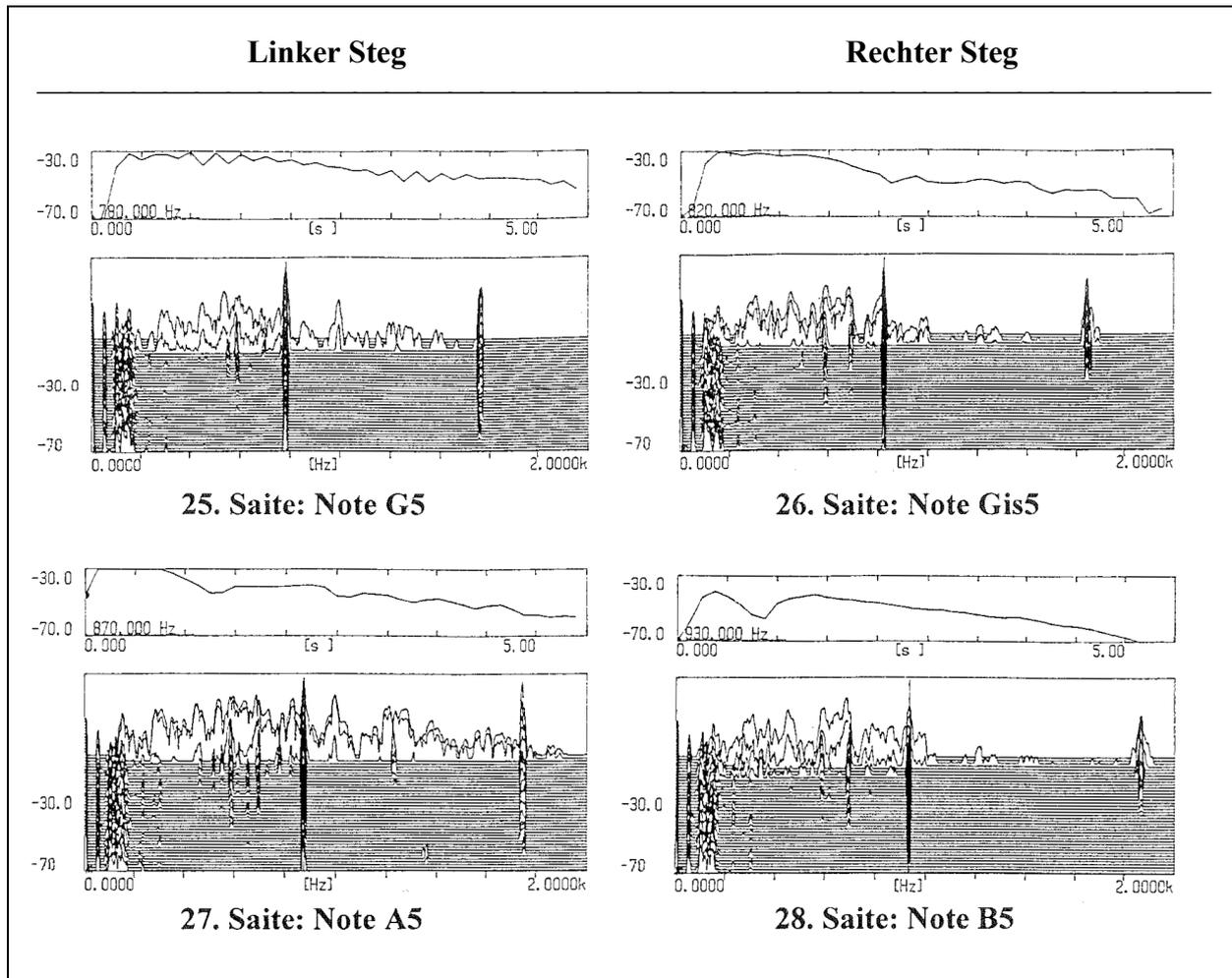
**22. Saite: Note E5**



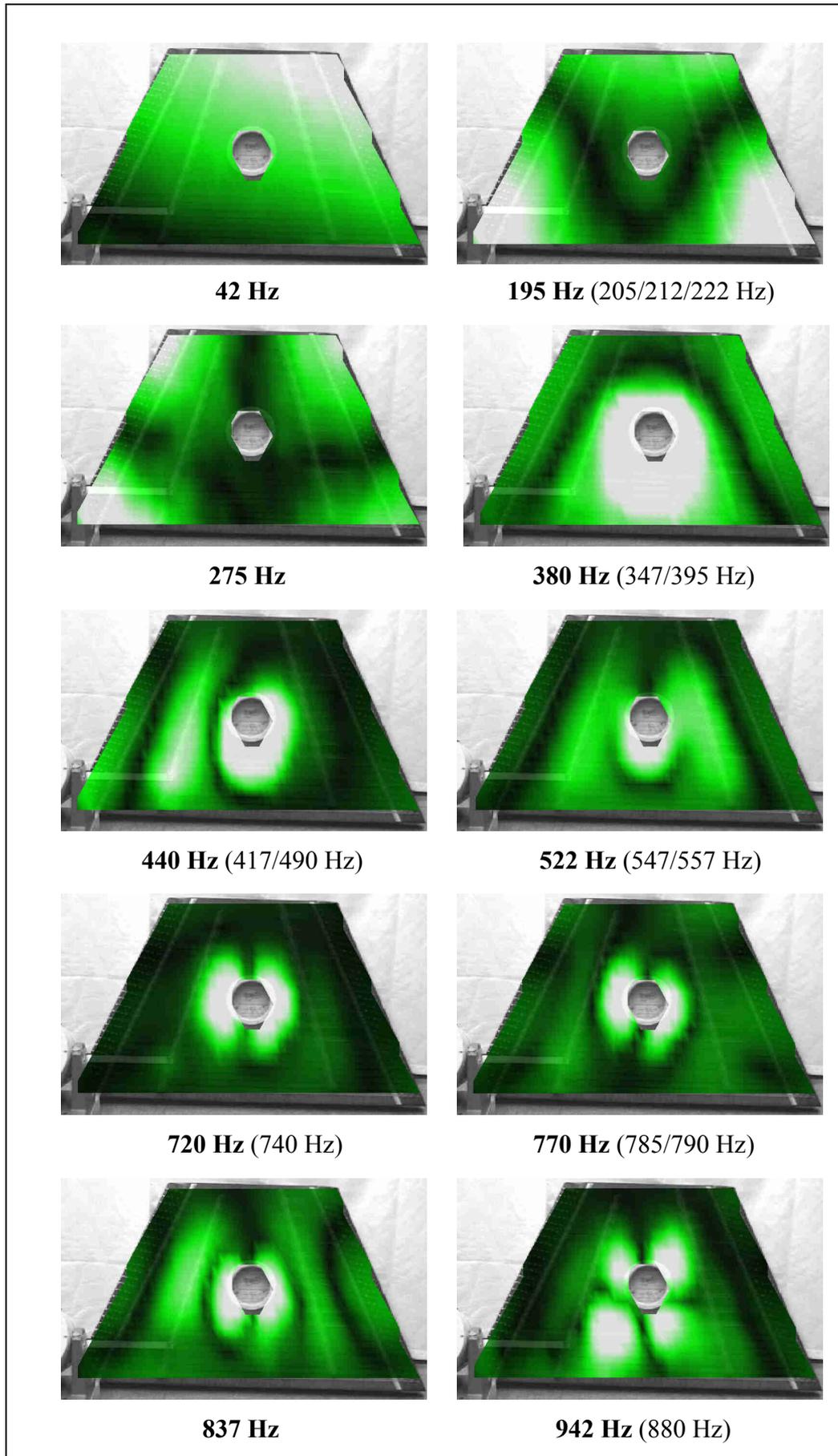
**23. Saite: Note F5**



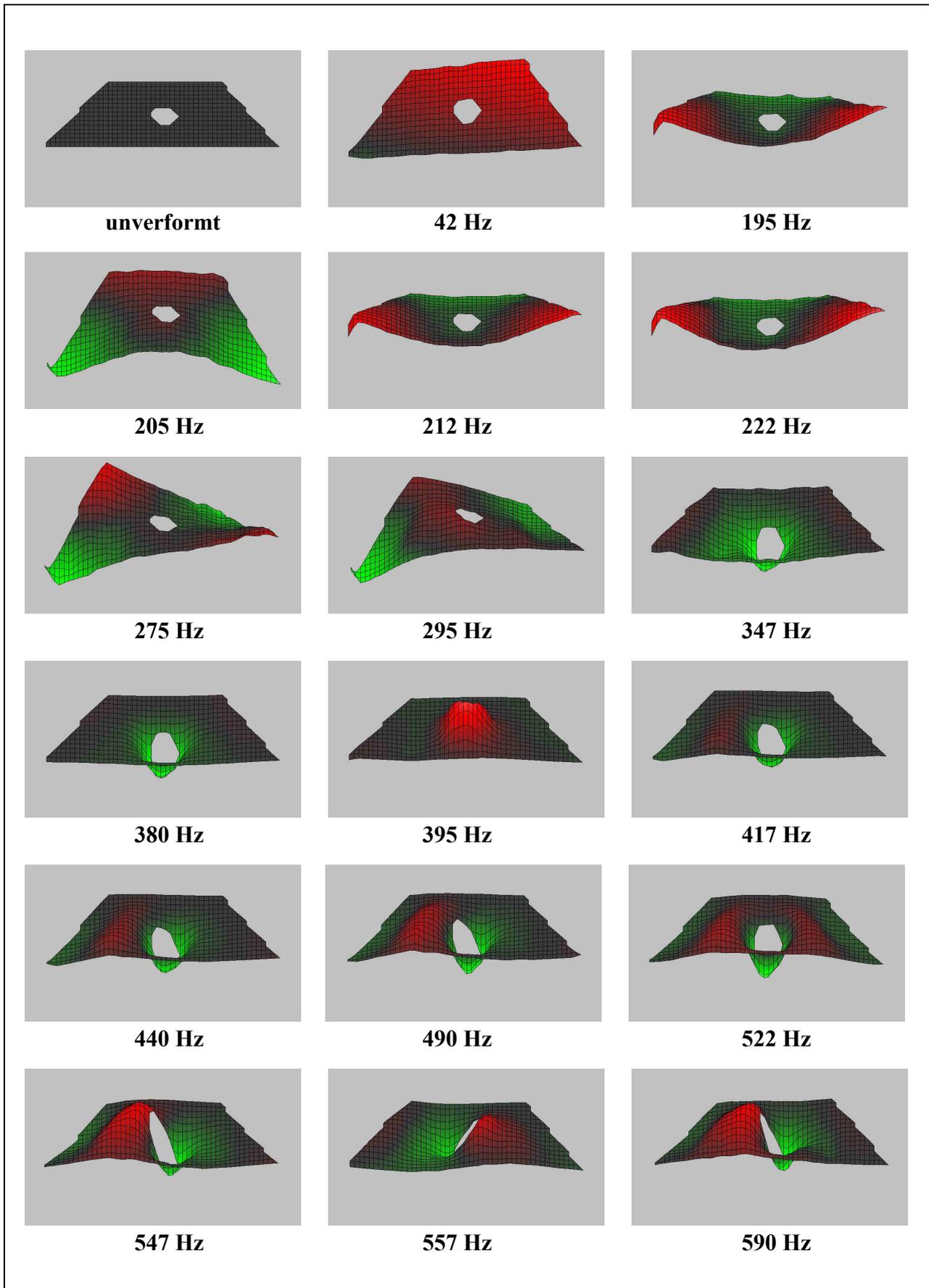
**24. Saite: Note Fis5**



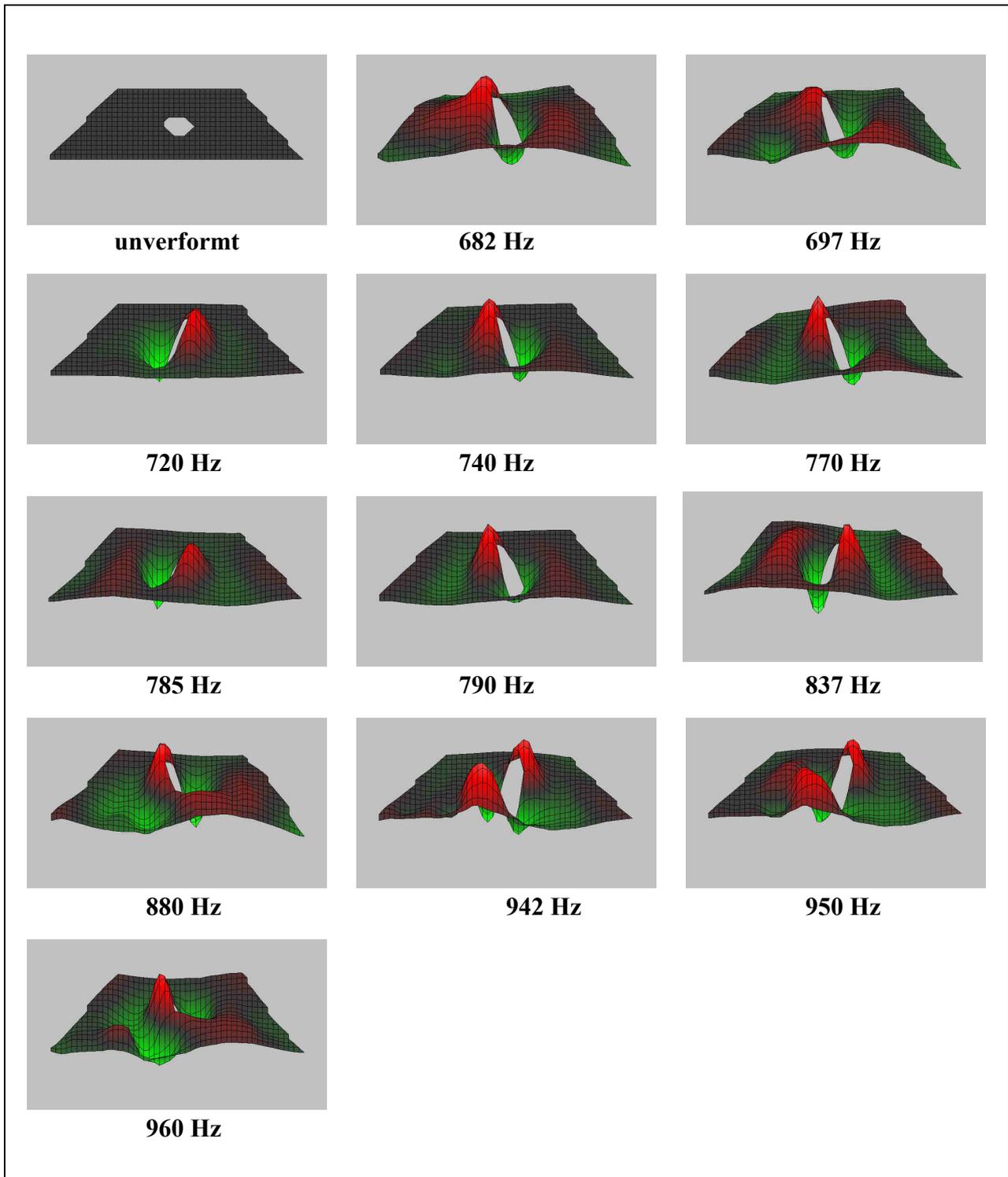
**Anhang 6 Teil 4:** Pegel-Frequenz-Spektren (Bandbreite 2 kHz) mit Abklingen des Grundtons (Zeitfenster 5 s) der vier hohen Noten des Hackbretts.



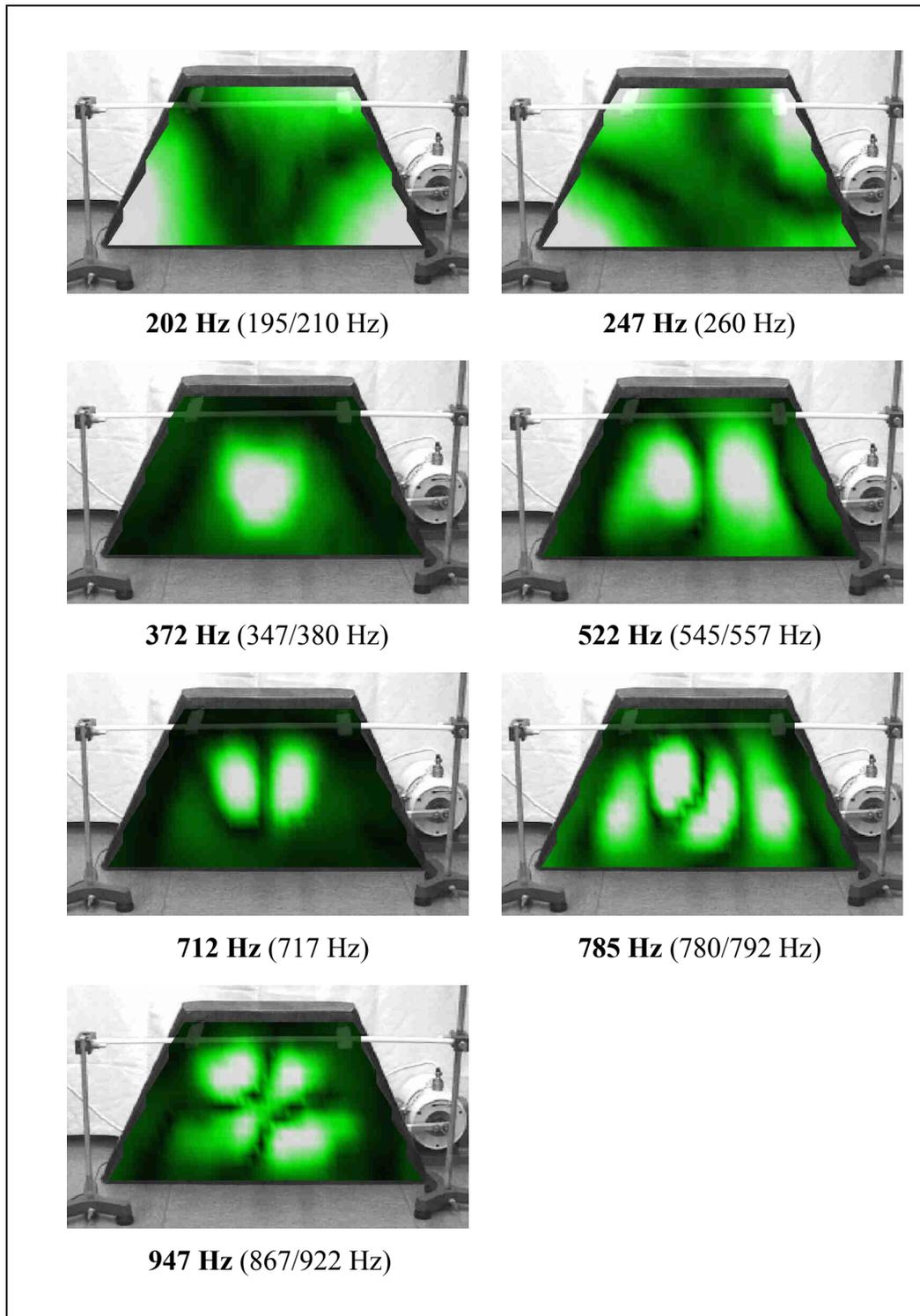
Anhang 7: Einige Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf der Decke des Hackbretts.



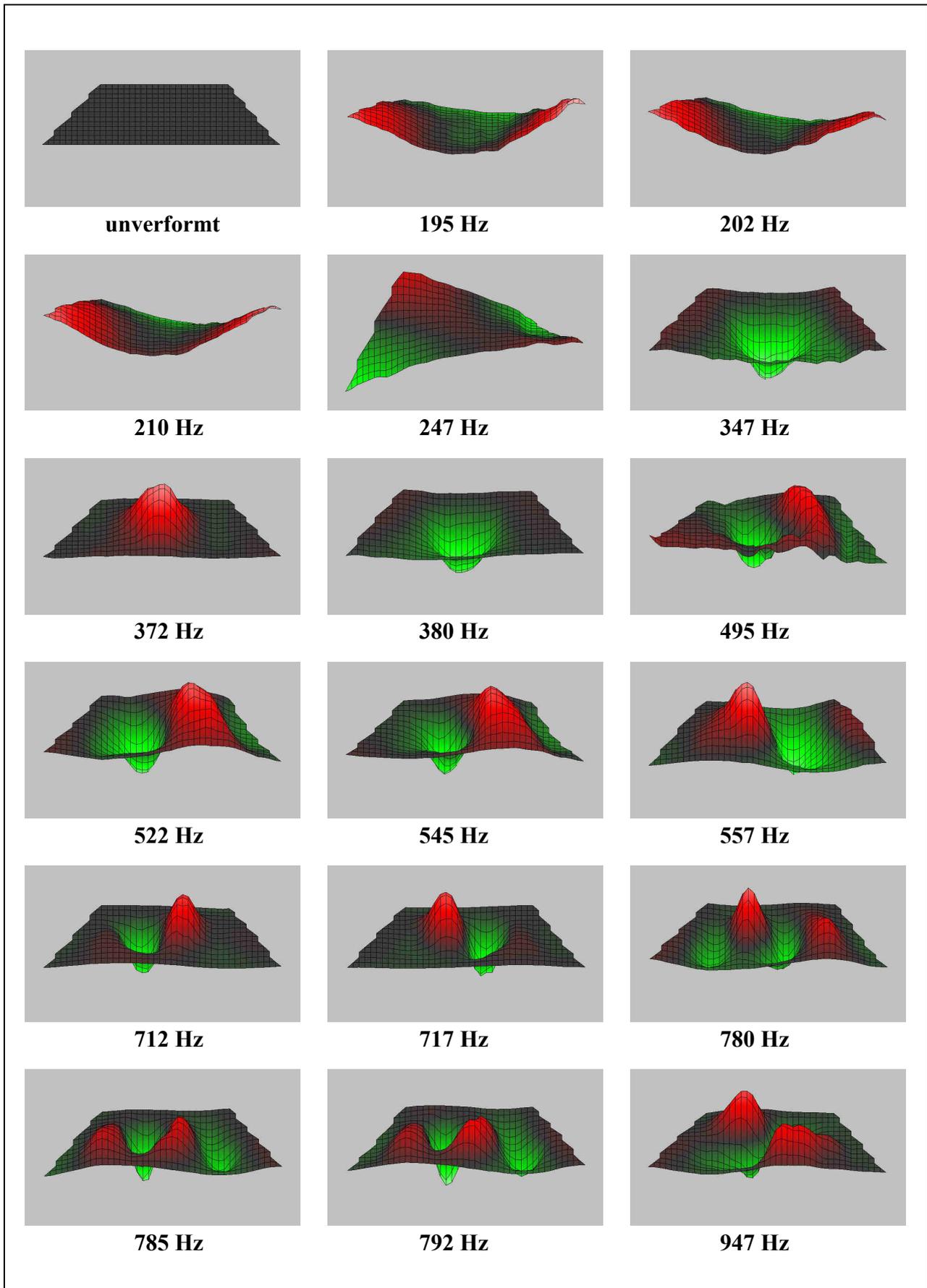
**Anhang 8 Teil 1:** Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf der Decke des Hackbretts.



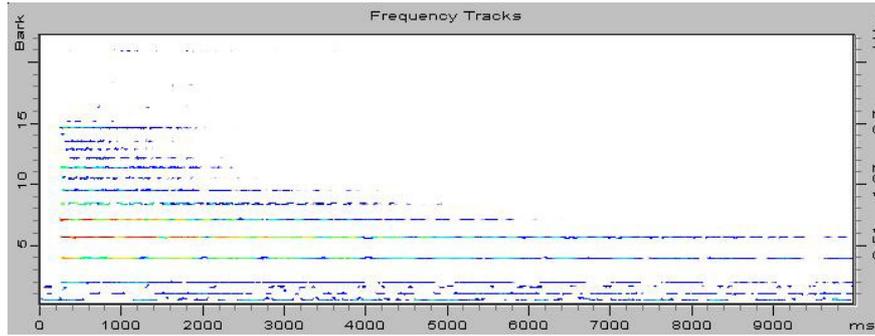
Anhang 8 Teil 2: Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf der Decke des Hackbretts.



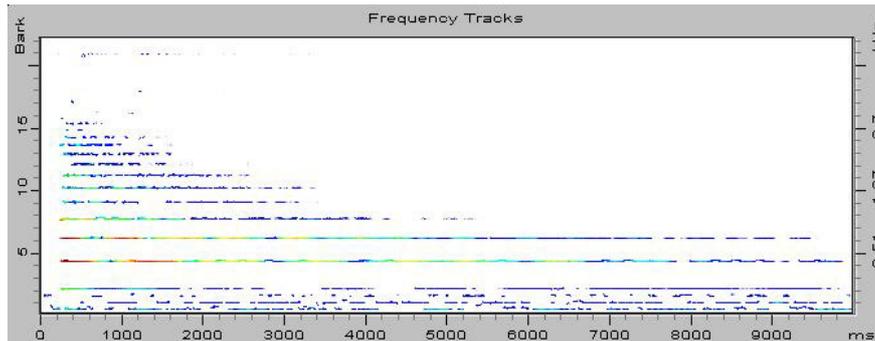
**Anhang 9:** Einige Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf dem Boden des Hackbretts.



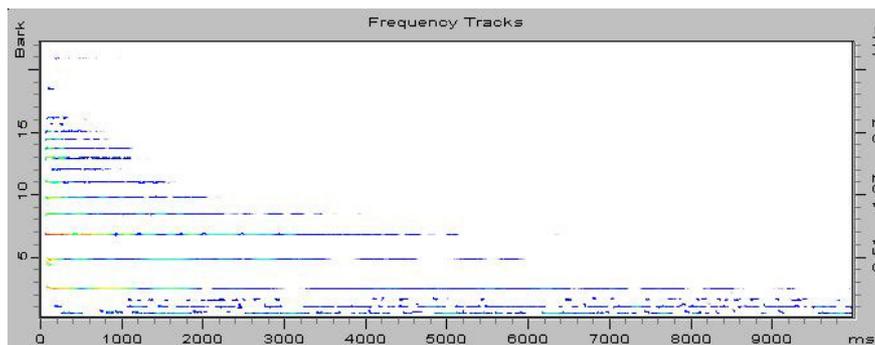
Anhang 10: Betriebsschwingungsformen als Ergebnis der Vibrometer-Messung auf dem Boden des Hackbretts.



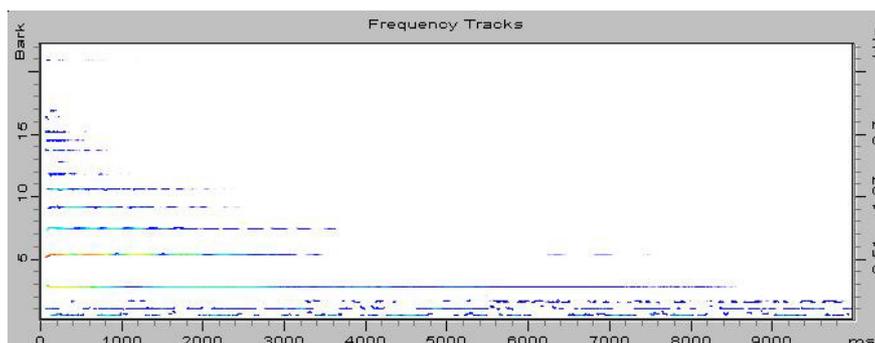
**1. Saite  
Note G3**



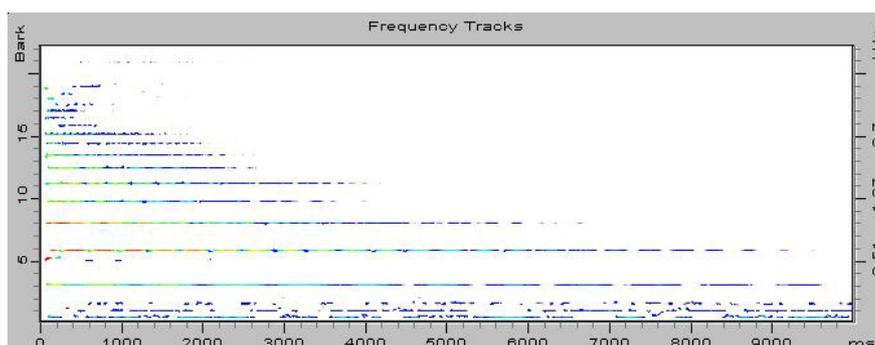
**3. Saite  
Note A4**



**5. Saite  
Note H3**

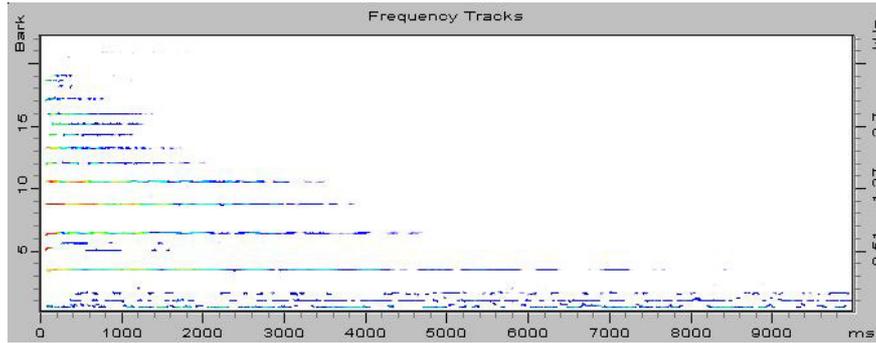


**7. Saite  
Note Cis3**

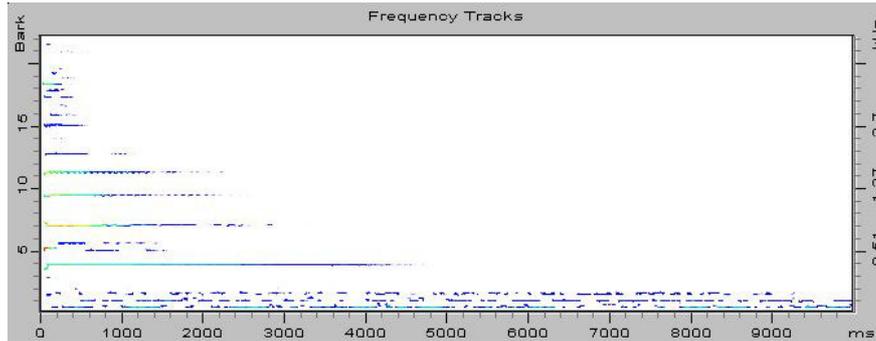


**9. Saite  
Note Dis4**

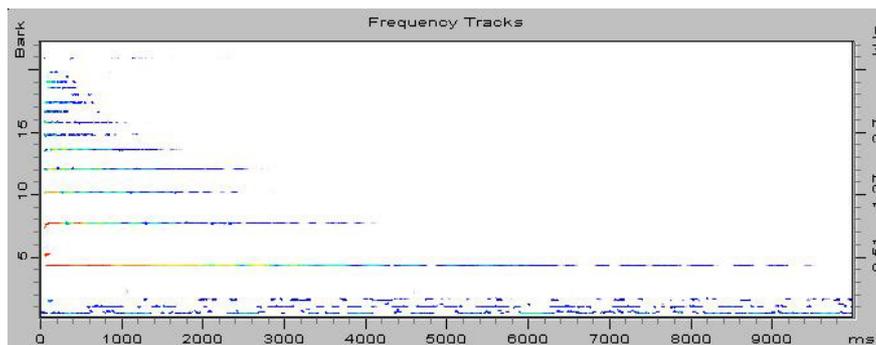
**Anhang 11 Teil 1:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.



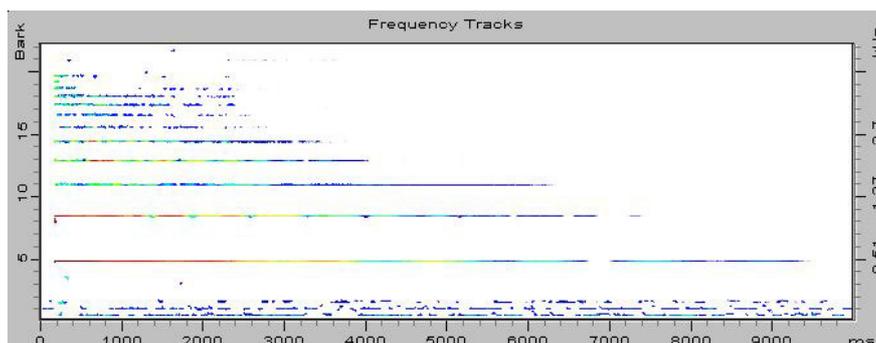
**11. Saite  
Note F4**



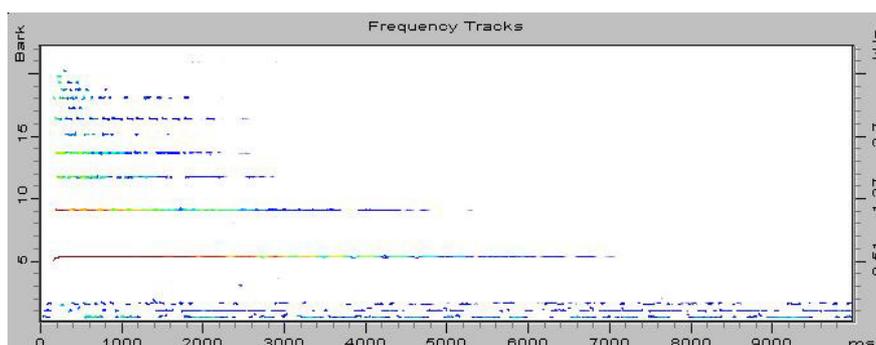
**13. Saite  
Note G4**



**15. Saite  
Note A4**

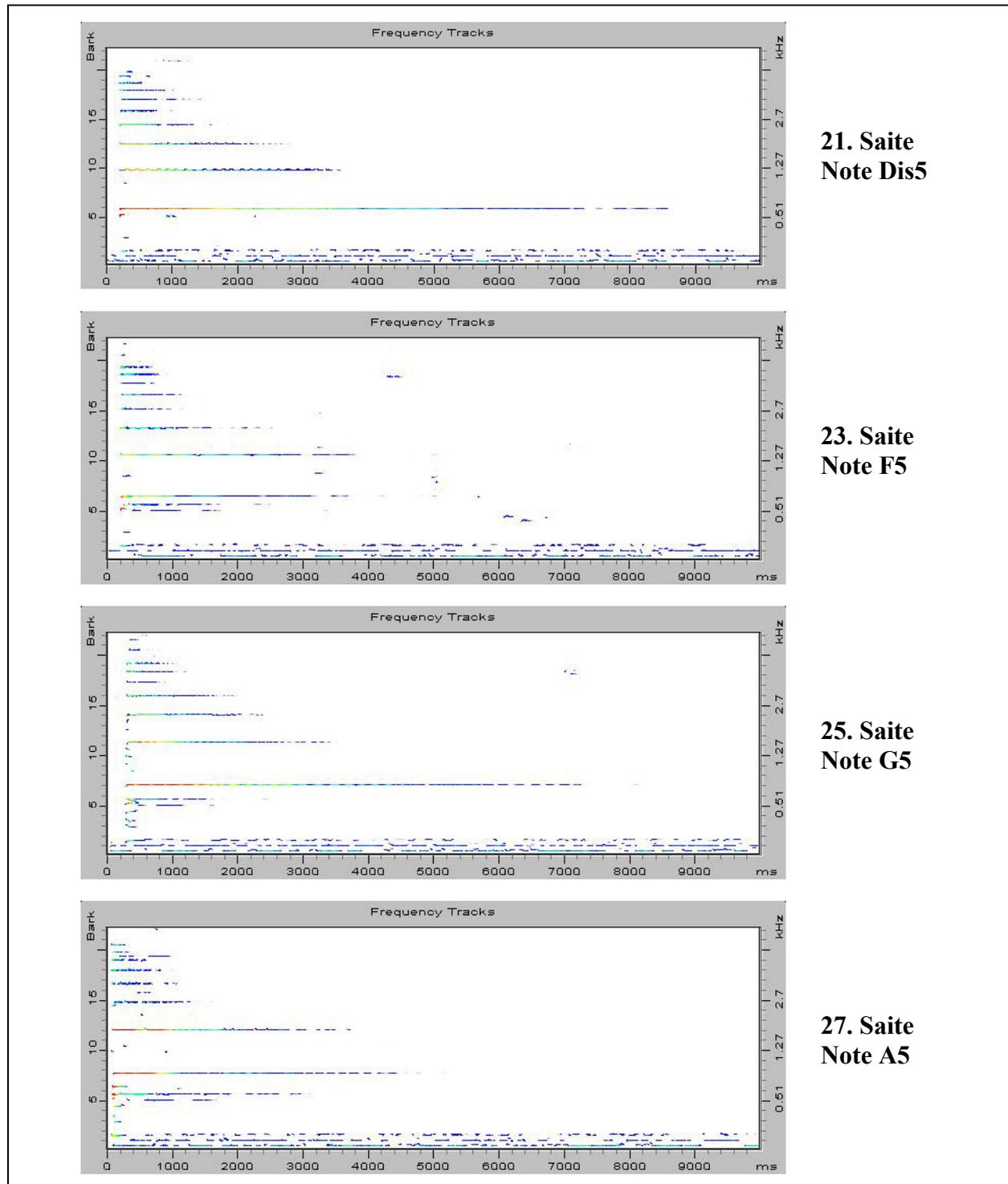


**17. Saite  
Note H4**

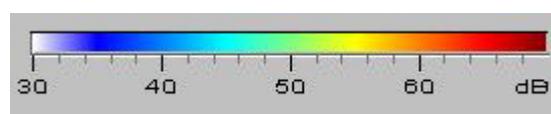


**19. Saite  
Note Cis5**

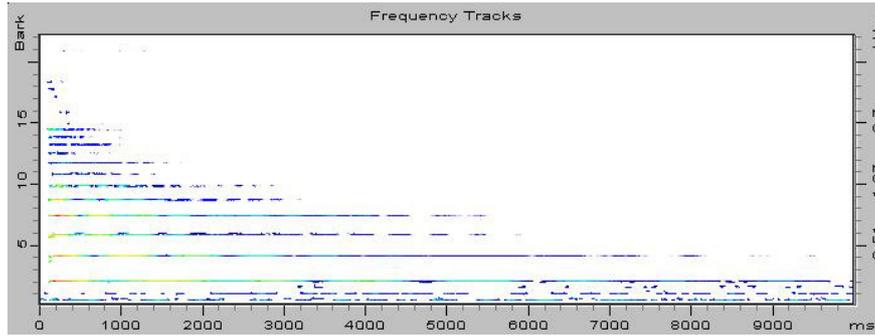
**Anhang 11 Teil 2:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.



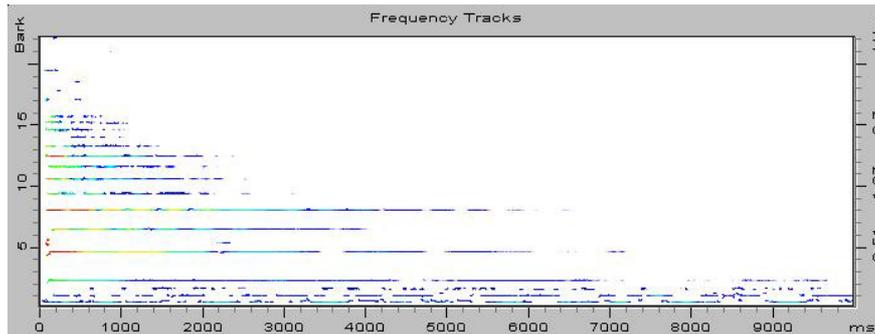
**Anhang 11 Teil 3:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem linken hohen Steg aufliegen.



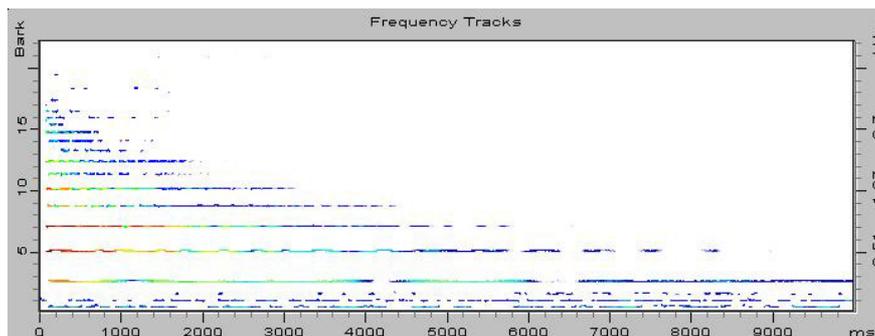
**Anhang 11 Teil 4:** Zuordnung der Farben zu den Pegelwerten.



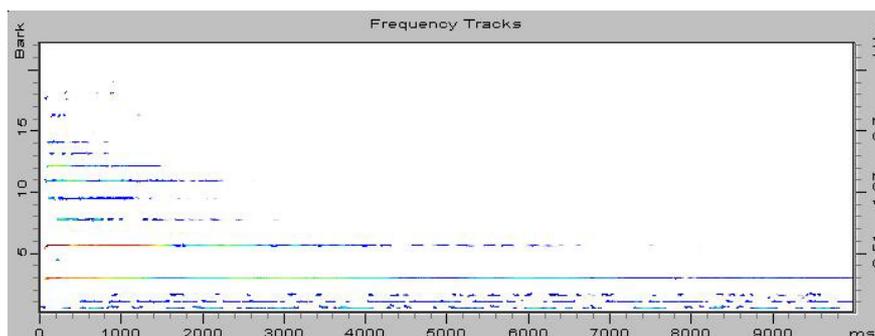
**2. Saite  
Note Gis3**



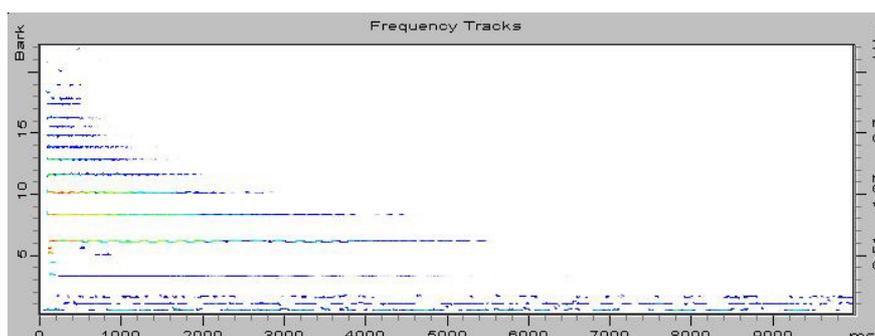
**4. Saite  
Note B3**



**6. Saite  
Note C4**

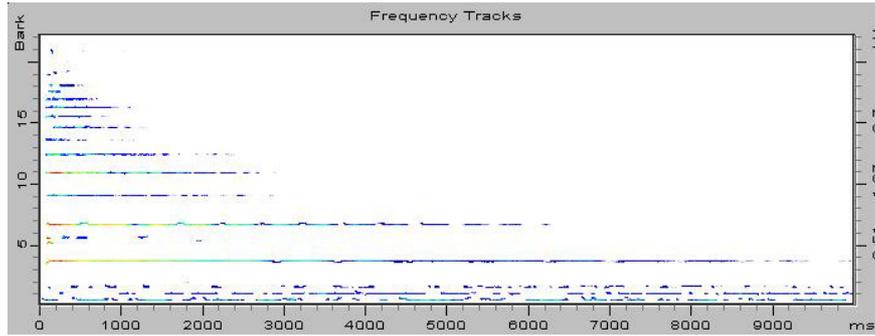


**8. Saite  
Note D4**

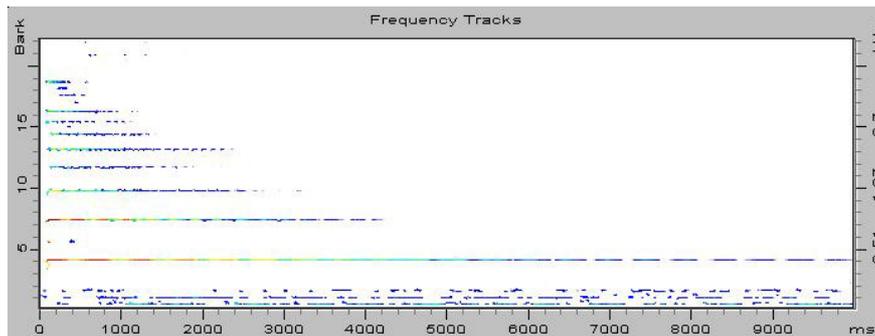


**10. Saite  
Note E4**

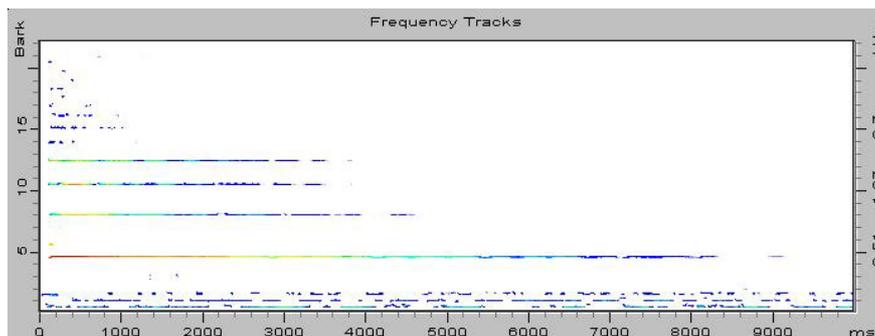
**Anhang 12 Teil 1:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.



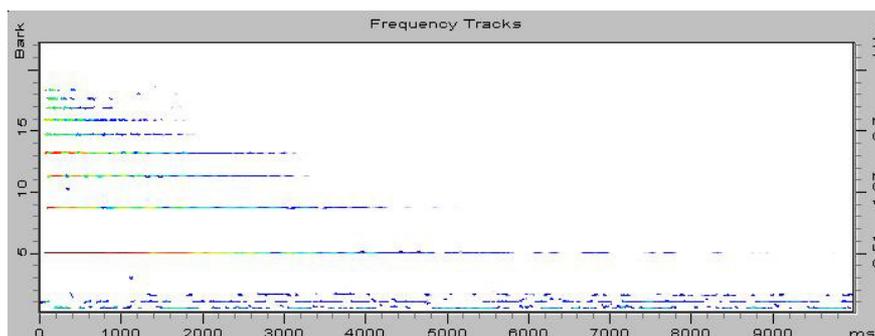
**12. Saite  
Note Fis4**



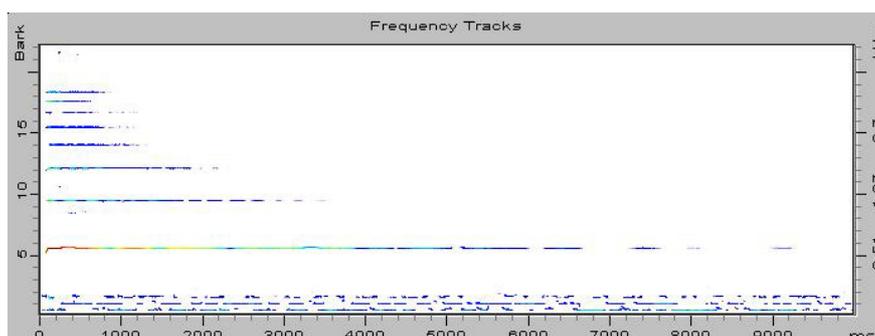
**14. Saite  
Note Gis4**



**16. Saite  
Note B4**

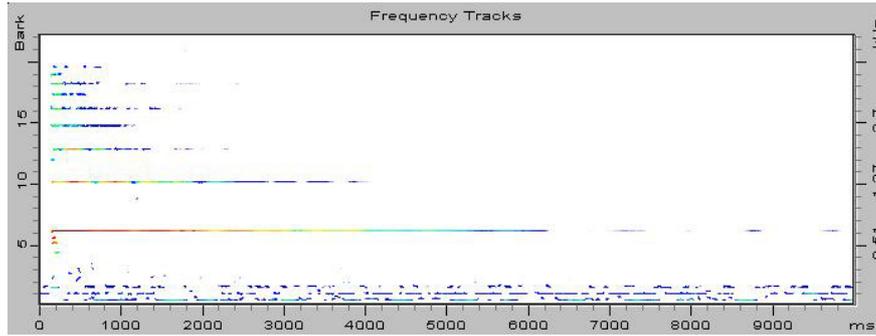


**18. Saite  
Note C5**

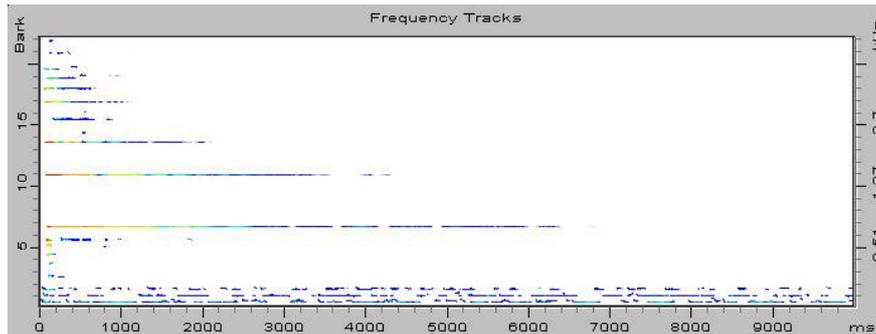


**20. Saite  
Note D5**

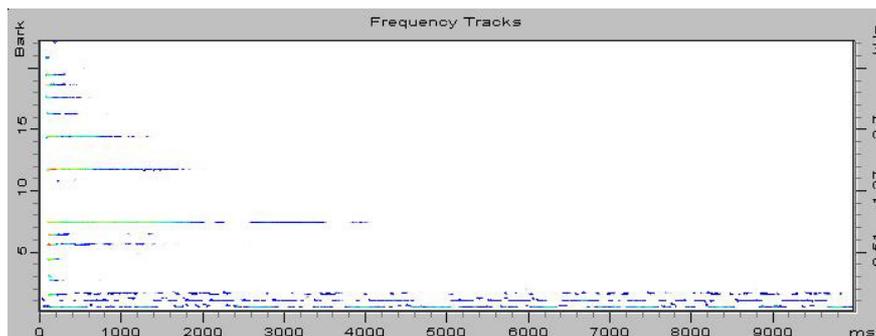
**Anhang 12 Teil 2:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.



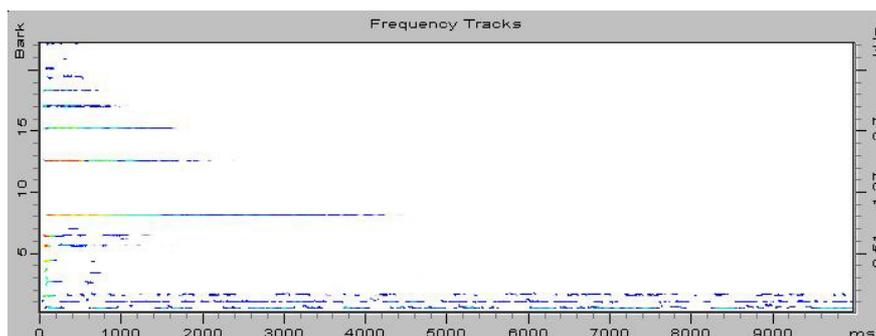
**22. Saite  
Note E5**



**24. Saite  
Note Fis5**

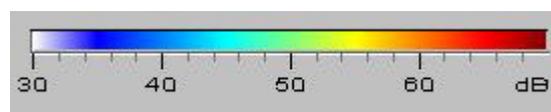


**26. Saite  
Note Gis5**



**28. Saite  
Note B5**

**Anhang 12 Teil 3:** Frequenzspuren (*Frequency Tracks*) unter Einschluss der Maskierung, ermittelt mit VIPER für angeschlagene Saiten des Hackbretts, die auf dem rechten hohen Steg aufliegen.



**Anhang 12 Teil 4:** Zuordnung der Farben zu den Pegelwerten.



**Anhang 13:** Gesamtansicht des untersuchten Hackbretts. Auf den Saiten liegen die beiden Klöppel.

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.

---

**ISSN 1430-936X**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**