

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer

SCHWINGUNGEN AKUSTISCHER GITARREN

SCHWINGUNGEN AKUSTISCHER GITARREN

von

Helmut Fleischer

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

Heft 1/98 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
D-85577 Neubiberg

Fleischer, Helmut:
Schwingungen akustischer Gitarren
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/98
Neubiberg 1997
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Helmut.Fleischer@UniBw.de

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

SCHWINGUNGEN AKUSTISCHER GITARREN

Zusammenfassung

Gegenstand der Studie sind die Schwingungen der Instrumentenkörper akustischer Gitarren mit Frequenzen bis 500 Hz. Es wird über mehrere Untersuchungen berichtet. Modalanalysen werden mit StarModal durchgeführt, um die Eigenmoden der Decke, der Decke plus Hals und des gesamten Gitarrenkörpers mit verschiedenen Lagerungen, Mess- und Anregungsverfahren zu erfassen. Die experimentellen Daten dienen als Grundlage für die Berechnung akustischer Kenngrößen mittels SYSNOISE. Da sich diese Experimente als sehr zeitaufwendig erweisen, wird ein weiteres Verfahren (unter Verwendung eines Laser-Doppler Scanning Vibrometers) angewandt, um Serienmessungen an einem Ensemble von fünfzehn Gitarren unterschiedlicher Bauart und Qualität durchzuführen. Operating Deflection Shapes (ODSs) der Decke plus Hals und des Bodens plus Hals werden für die charakteristischen Frequenzen ermittelt. Ein Gitarrenständer wird dazu genutzt, Randbedingungen zu schaffen, die den "natürlichen" der Spielhaltung nahekommen. Die Ergebnisdaten können in andere Berechnungssysteme mit dem Ziel exportiert werden, vollständige Modalanalysen oder Schallfeldberechnungen anzuschließen. Gemeinsamkeiten aller Gitarren ebenso wie Unterscheidungsmerkmale zwischen den verschiedenen Typen werden erkennbar und dargestellt. Auf die enge Beziehung zu den Admittanzdaten, über die derselbe Autor in einer Paralleluntersuchung berichtet, wird hingewiesen.

VIBRATIONS OF ACOUSTIC GUITARS

Summary

The topic of the study are the vibrations of the instrument bodies of acoustic guitars for frequencies up to 500 Hz. Several investigations are reported. Modal analyses using StarModal are performed to assess the eigenmodes of the top plate, the top plate plus neck and the entire guitar body by means of different supports, measuring and excitation techniques. The experimental data serve as a basis for calculating acoustic parameters by means of SYSNOISE. Since these experiments prove to be very time-consuming, an additional measuring approach (using a laser Doppler scanning vibrometer) is applied to perform series measurements on an ensemble of fifteen guitars of different design and quality. Operating deflection shapes (ODSs) of the top plate plus neck and the back plate plus neck are determined for the characteristic frequencies. A guitar stand is used in order to create boundary conditions which are close to the "natural" ones in playing position. The resulting data can be exported to other computation systems with the aim to add complete modal analyses or sound field calculations. Common features for all guitars as well as discrimination cues between the different types are found and presented. The close relation to admittance data as reported by the same author in a parallel investigation is pointed out.

INHALT

VORWORT

1.	EINLEITUNG.....	1
2.	DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE.....	4
2.1.	Übersicht.....	4
2.2.	Spanische Gitarren.....	5
2.3.	Barockgitarren.....	9
2.4.	Stahlsaitengitarren.....	11
2.5.	Zwölfsaitige Gitarren.....	13
3.	MODALANALYSE DES GITARRENKÖRPERS.....	17
3.1.	Untersuchungen zur Schwingung der Decke der Terzgitarre.....	18
3.2.	Untersuchungen an mehreren Gitarren zur Schwingung von Decke und Hals.....	24
3.3.	Untersuchungen zur Schwingung des gesamten Körpers.....	28
4.	BEWERTUNG DER MODALANALYSEN.....	32
4.1.	Bemerkungen zur experimentellen Modalanalyse.....	32
4.2.	Allgemeine Erkenntnisse aus den Experimenten.....	33
4.3.	Gemeinsame Schwingungsarten.....	34
4.4.	Vergleich gemessener Eigenfrequenzen der Terzgitarre.....	35
4.5.	Vergleich gemessener Eigenfrequenzen der Westerngitarre.....	36
4.6.	Eigenfrequenzen einer Konzertgitarre.....	37
5.	WEITERFÜHRENDE BERECHNUNGEN.....	38
5.1.	Berechnung von Richtcharakteristiken.....	38
5.2.	Berechnung der abgestrahlten Schallleistung.....	39
5.3.	Folgerungen für die Messung von Korpuschwingungen.....	44
6.	MESSUNG VON SCHWINGUNGEN DES GITARRENKÖRPERS MIT DEM SCANNING VIBROMETER.....	45
6.1.	Unterscheidung gegenüber der Modalanalyse.....	45
6.2.	Versuchsbedingungen.....	46
6.2.1.	In-situ-Messung.....	47
6.2.2.	Messung bei Lagerung im Gitarrenständer.....	48
6.3.	Messungen an der spanischen Gitarre Nr. 4.....	50
6.3.1.	Summen-Übertragungsfunktionen.....	50
6.3.2.	Operating Deflection Shapes in situ.....	51
6.3.3.	Vergleich der ODSs bei unterschiedlicher Lagerung.....	54
6.4.	Messungen an der spanischen Gitarre Nr. 6a.....	56
6.4.1.	In-situ-Messung.....	56
6.4.2.	Messung bei Lagerung im Gitarrenständer.....	60
6.5.	Bewertung der Ergebnisse.....	63
7.	SERIENMESSUNGEN AN FÜNFZEHN GITARREN.....	64
7.1.	Experimentelle Ergebnisse: Summen-Übertragungsfunktionen.....	65
7.2.	Experimentelle Ergebnisse: Operating Deflection Shapes.....	69
7.2.1.	Spanische Gitarren.....	70

7.2.2. Barockgitarren.....	76
7.2.3. Stahlsaitengitarren.....	78
7.2.4. Zwölfsaitige Gitarren	81
7.3. Zusammenfassende Bemerkung	85
8. AUSWERTUNG DER ODS-MESSUNGEN.....	86
8.1. Vergleich mit Chladni'schen Klangfiguren	86
8.2. Vergleich mit der Modalanalyse	89
8.2.1. Charakteristische Frequenzen der Terzgitare	89
8.2.2. Charakteristische Frequenzen der Westerngitarre	90
8.3. Gemeinsamkeiten in den Schwingungen der untersuchten Gitarren	90
8.3.1. Haupt-Schwingungsarten	91
8.3.2. Frequenzlagen der Schwingungsarten	91
8.4. Typische Schwingungsbilder	93
8.4.1. Schwingungen spanischer Gitarren.....	94
8.4.2. Schwingungen von Barockgitarren.....	95
8.4.3. Schwingungen sechssaitiger Stahlsaitengitarren	96
8.4.4. Schwingungen zwölfsaitiger Stahlsaitengitarren	97
8.5. Zusammenfassende Bemerkung	98
9. SCHWINGUNG UND ADMITTANZ.....	99
9.1. Experimentelle Ermittlung der Admittanz.....	99
9.2. Konduktanz an Hals und Steg.....	101
9.3. In-situ-Messung von Konduktanz und Schwingung.....	103
10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....	106
LITERATUR	116

VORWORT

In seiner Monographie "Schwingungen akustischer Gitarren" stellt Helmut Fleischer eine umfassende Studie über Schwingungen von Korpus und Hals akustischer Gitarren vor. Die Arbeit behandelt spanische Gitarren und Barockgitarren sowohl mit Kunststoff- als auch mit Stahlsaiten, Westerntgitarren und zwölfsaitige Gitarren. Modalanalysen werden für die Decke, die Decke plus Hals sowie für den gesamten Gitarrenkörper dargestellt. Für Theorie und Praxis bedeutsam ist die Beobachtung, dass die Schwingungen der Seitenwände bei der Berechnung der Schallabstrahlung von Gitarren vernachlässigt werden können, bei tiefen Frequenzen jedoch zusätzlich zu den Schwingungen der Decke die Schwingungen des Bodens berücksichtigt werden sollten.

Den Schwerpunkt der Monographie von Helmut Fleischer bilden Untersuchungen mit dem Laser Scanning Vibrometer an 15 Gitarren unterschiedlicher Bauart. In Vorversuchen wird nach einer geeigneten Lagerung der Instrumente gesucht, die Messungen nicht nur von vorne, sondern auch an der Rückseite ermöglicht. Abgesehen von einer geringeren Dämpfung des Halses entsprechen die Randbedingungen, die bei den Reihmessungen vorliegen, weitgehend denen, die beim Gitarrespielen in der Praxis auftreten. Die gemessenen Übertragungsfunktionen werden in ihrer Gesamtheit als Admittanz quantitativ dargestellt und die daraus ermittelten Schwingungsformen visualisiert. Fleischer zeigt hier eine wohl einmalige Fülle von Daten, die Anstöße für die Optimierung von bereits vorhandenen Instrumenten sowie Hilfestellungen für die Entwicklung neuartiger Instrumentenformen bieten.

Für Musiker mag es beruhigend erscheinen, dass die mit modernsten Messverfahren erfassten Schwingungsformen im Prinzip den klassischen Chladni'schen Klangfiguren entsprechen, darüber hinaus jedoch quantitative Maße zur Verfügung stellen. Insbesondere können mit modernen Messverfahren auch Schwingungen des Halses erfasst und dem Realteil der Admittanz an den einzelnen Bündeln zugeordnet werden, der die Übertragung von Wirkleistung vom oberen Ende der Saite auf den Instrumentenkörper kennzeichnet.

Die vorliegende Monographie stellt Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Schwingungsformen verschiedener Instrumentengruppen innerhalb der Gitarrenfamilie anschaulich dar. Diese Daten gewinnen zusätzlich an Bedeutung, da sie die Grundlage für Berechnungen der abgestrahlten Schallfelder bilden. Die Leser dieses Werkes können schon jetzt auf Fortsetzungsarbeiten gespannt sein.

München, im März 1998

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Die Gitarre gehört zur Familie der Zupfinstrumente. Sie ist ein relativ altes Instrument. Man vermutet, dass bereits Babylonier ein Chordophon mit der Form einer Acht benutzt haben. Instrumente mit sechs Einzelsaiten entstanden Ende des 18. Jahrhunderts. Die "spanische Gitarre", wie sie heute weit verbreitet ist, geht auf Antonio de Torres zurück und ist etwa 150 Jahre alt. Fig. 1 wurde in der Gitarren-Abteilung des Musikinstrumentenmuseums Markneukirchen im vogtländischen Musikwinkel aufgenommen und vermittelt einen gewissen Eindruck von der möglichen Vielfalt der Bauweisen.



Fig. 1. Vitrine mit Gitarren im Musikinstrumentenmuseum Markneukirchen.

Daneben gibt es eine Reihe von weiteren Spielarten der Gitarre, die vor allem in den Vereinigten Staaten entwickelt wurden. In diesem Zusammenhang sind der aus dem Vogtland eingewanderte Zupfinstrumentenbauer Christian Frederick Martin sowie Orville Gibson zu erwähnen, welche die Entwicklung der Stahlsaitengitarre wesentlich geprägt haben und deren Firmen heute noch existieren.

Das musikalische Signal einer Gitarre stammt von angezupften Saiten. Dass die Saiten bei realen Musikinstrumenten in mancher Hinsicht nicht den einfachen Gesetzmäßigkeiten folgen, wie sie die Theorie idealer biegeschlaffer Saiten mit unnachgiebigen Randbefestigungen erwarten lassen, haben zahlreiche Autoren untersucht. Man braucht nicht erst nichtlineare und chaotische Vorgänge zu betrachten (Molteni und Tuffilaro (1990), Gottlieb (1990) oder O'Reilly und Holmes (1992)), um auf komplizierte Zusammenhänge zu stoßen. Bereits die lineare Näherung unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit, der Dämpfung oder der Nachgiebigkeit der Auflager offenbart Gesetzmäßigkeiten, die von den einfachen Modellvorstellungen deutlich abweichen; siehe u.a. Fletcher (1964), Wolf und Müller (1968), Gough (1981), Karp (1986) sowie Cuesta und Valette (1990).

Im Gegensatz zu den Fellen von Membranophonen (siehe z.B. Fleischer (1988b)) sind Saiten kaum in der Lage, ihre Schwingung direkt in Schall umzuwandeln. "Da die Saite auf Grund ihrer geringen Querabmessungen (Durchmesser) einen denkbar schlechten Schallstrahler darstellt (da sich die Druckunterschiede zu beiden Seiten der Saite leicht ausgleichen können), ist die Ankopplung eines Resonators erforderlich" (Rieländer (1982)).

Dieser wird vom Korpus gebildet, der bei der Gitarre in aller Regel aus einer ebenen Bodenplatte, einer (zumindest äußerlich) ebenen Deckplatte und den Seitenwänden besteht. Bei konventionellen Gitarren sind diese Teile aus unterschiedlichen Hölzern, teilweise massiv, teilweise auch "gesperrt", gefertigt. Der Boden und die Decke werden oftmals "ausgearbeitet", d.h. in bestimmten Bereichen der inneren Oberfläche wird Material abgenommen (Krüger (1981)). Der Boden und - wie Fig. 2 erkennen lässt - die Decke sind durch innen angeleimte Leisten verstärkt. Dabei ist eine ganze Reihe von unterschiedlichen Bauweisen gebräuchlich; siehe hierzu z.B. Jansson (1983b) oder Fletcher und Rossing (1991). Erwartungsgemäß beeinflussen diese Versteifungen die Schwingungen der Platten (Boden und insbesondere Decke) in starkem Maße (Meyer (1974b, 1983b), Jovicic und Jovicic (1977a, 1977b) sowie Richardson (1983)).

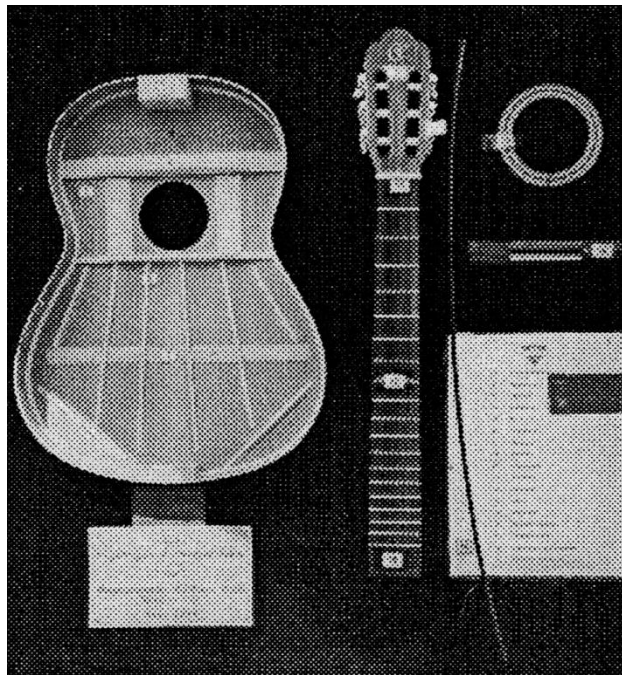


Fig. 2. Schautafel mit den Bauteilen einer Gitarre, aufgenommen vor einer Musikalienhandlung in Plauen im Vogtland.

Offenbar steht bei Untersuchungen von Korpuschwingungen die Violine wesentlich höher im Kurs als die Gitarre. So hat eine ganze Reihe von experimentellen Arbeiten die Geige zum Gegenstand; siehe hierzu beispielsweise Reinicke und Cremer (1970), Moral und Jansson (1982) oder Jaroszewski, Rakowski und Zera (1995). Obwohl das Untersuchungsobjekt von anderer Größe und unterschiedlich geformt ist, lassen sich vergleichbare Methoden auch bei der Gitarre anwenden. Schwingung des Gitarrenkorpus wurden beispielsweise von Jansson (1971, 1983b), Meyer (1974), Jovicic und Jovicic (1977a, 1977b) sowie Marty (1987a) untersucht. Weitere Untersuchungen bzw. Zusammenfassungen finden sich bei Meyer (1985), Schubert (1986), Fletcher und Rossing (1991) sowie Ziegenhals (1995). Strong et al. (1982) haben die Vorgehensweise der Fourier-Akustik (Fleischer (1988a)) dazu genutzt, aus dem Schallfeld auf die Schwingungen des Gitarrenkörpers rückzuschließen. Ebenso wie Strong et al. (1982) haben Jansson und Meinel (1992) sowie Fleischer (1995) sich nicht nur mit der Decke bzw. dem Boden, sondern auch mit dem Hals befasst. Schwin-

gungen des Halses können diejenigen des Korpus beeinflussen; darüber hinaus führen sie dazu, dass die Saiten der Gitarre am oberen Ende keine starren, sondern vielmehr bewegliche Auflager vorfinden (Fleischer (1997)).

Im vorliegenden Bericht werden Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zusammengestellt, die im Laufe mehrerer Jahre am Institut für Mechanik gewonnen worden sind. Größtenteils sind die Resultate der Öffentlichkeit bisher noch nicht zugänglich gemacht worden. Objekte der Untersuchungen sind vorwiegend Gitarren aus dem Bestand des Autors sowie seiner Söhne Martin und Tobias, denen an dieser Stelle herzlich für ihre Unterstützung und ihr Entgegenkommen gedankt sei.

2. DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE

Für den Hauptteil der Untersuchungen standen fünfzehn akustische Gitarren unterschiedlicher Bauart zur Verfügung. Sie werden im Folgenden nach Kategorien geordnet und charakterisiert. Zunächst wird eine Übersicht gegeben. Danach werden die Gitarren im Einzelnen beschrieben.

2.1. Übersicht

In der Tab. I sind in Anlehnung an Fleischer (1997) die untersuchten Gitarren zusammengestellt und anhand einiger Kennwerte typisiert.

Nr.	Bezeichnung	Bünde	Mensurlänge	Typ	Besaitung
1	Höfner I	19	65 cm	spanische G.	Kunststoffsaiten
2	Höfner II	18	61,5 cm	spanische G.	Kunststoffsaiten
3	Shiro	19	65,5 cm	spanische G.	Kunststoffsaiten
4	Hopf	18	64 cm	spanische G.	Kunststoffsaiten
5	Terzgitarre	18	54,5 cm	spanische G.	Kunststoffsaiten
6	Wandergitarre I	18	62 cm	spanische G.	Stahlsaiten
(6a	Wandergitarre II	18	62 cm	spanische G.	Stahlsaiten)
7	Gewa	18	62 cm	Barockgitarre	Kunststoffsaiten
8	Barock alt	18	60 cm	Barockgitarre	Stahlsaiten
9	Triumphator	21	61,5 cm	Schlaggitarre	Stahlsaiten
10	West. Ranger	20	64,5 cm	Westerngit.	Stahlsaiten
11	Applause	20	64,5 cm	Westerngit.	Stahlsaiten
12	Ibanez	20	65 cm	12-saitige G.	Stahlsaiten
13	Eko	20	63 cm	12-saitige G.	Stahlsaiten
14	Egmond	17	62 cm	12-saitige G.	Stahlsaiten
15	Klira	20	63 cm	12-saitige G.	Stahlsaiten

Tab. I. Kenndaten der untersuchten Gitarren.

Die "leer" gespielten Saiten sind zwischen 60 cm (alte Barockgitarre Nr. 8) und 65,5 cm (spanische Gitarre Nr. 4) lang. Die Terzgitarre fällt aus dem Rahmen, da deren Saiten naturgemäß kürzer sind. Der Hals trägt 18 bis 21 Bünde, an denen die Saiten gegriffen werden können. Dadurch wird die Länge der schwingenden Saite verringert und somit die Frequenz der Schwingung erhöht. Die Saiten der spanischen Gitarren und Barockgitarren sind im allgemeinen aus Kunststoff gefertigt. Die Schlag-, Western- und zwölfsaitigen Gitarren sind dagegen mit Saiten aus Metall bespannt. Wegen der höheren Zugkraft sind die Hälse dieser Gitarren mit Stahleinlagen verstärkt. Der stählerne Halsstab lässt sich bei den Gitarren Nr. 11 bis 15 nachspannen. Am Halsende liegen die Saiten, wenn sie nicht gegriffen werden, meist auf einem Sattel aus Kunststoff auf. Bei einige Gitarren ist das obere Ende der leeren Saiten jedoch durch einen Null-Bund gegeben; dies ist bei der Wandergitarre II Nr. 6a, der Barockgitarre Nr. 7, der Schlaggitarre Nr. 9 sowie den zwölfsaitigen Gitarren Nr. 13 bis 15 der Fall. Um das Saitensignal elektrisch abnehmen zu können, ist die Westerngitarre Nr. 12 mit piezoelektrischen Stegtonabnehmern ausgestattet. In das Schallloch der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 14 ist ein elektromagnetischer Tonabnehmer eingebaut.

In aller Regel sind die Gitarrenkörper vollständig aus Holz gebaut. Dies gilt nicht für die Westerngitarre Nr. 11. Diese Gitarre ist vom Typ der bekannten Ovation und hat einen gewölbten Korpusboden, der aus Kunststoff gefertigt ist. Nähere Angaben finden sich in Abschnitt 2.4.

2.2. Spanische Gitarren

Als Standardtyp der klassischen Gitarre kann heute die wesentlich von Antonio de Torres geprägte sogenannte spanische Gitarre betrachtet werden; siehe z.B. Jansson (1971) oder Meyer (1985). Fig. 3 zeigt das Instrument Höfner I, eine etwas ältere klassische Gitarre guter Qualität. Die in Fig. 4 abgebildete Höfner II ist ein etwas kleines Modell desselben inländischen Herstellers, das für Spieler mit kleineren Händen geeignet ist. Die Gitarre des fernöstlichen Produzenten Shiro (Fig. 5) ist eine gute Konzertgitarre. In Fig. 6 ist die Gitarre des deutschen Herstellers Hopf wiedergegeben. Die Decke dieses Instruments weist einige feine Risse auf, die den Klang aber offenbar nicht störend beeinflussen.

Fig. 3. Spanische Gitarre Nr. 1 (Höfner I).



Fig. 4. Spanische Gitarre Nr. 2 (Höfner II).



Fig. 5. Spanische Gitarre Nr. 3 (Shiro).



Fig. 6. Spanische Gitarre Nr. 4 (Hopf).

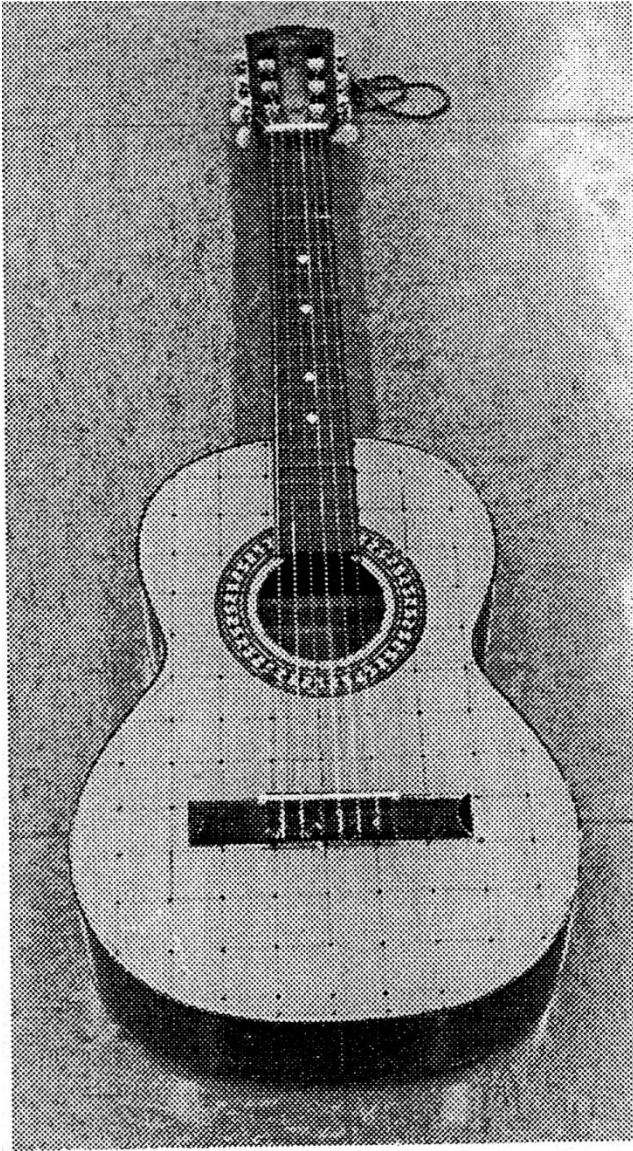


Fig. 7. Spanische Gitarre Nr. 5 (Terzgitarre).



Fig. 8. Spanische Gitarre Nr. 6 (Wandergitarre I); die Wandergitarre II Nr. 6a ist von verwandter Bauart und Größe.

Während die Saiten der Gitarren Nr. 1 bis 4 die Standardstimmung (E_2 , A_2 , D_3 , G_3 , H_3 und E_4) aufweisen, ist die in Fig. 7 abgebildete Terzgitarre höher gestimmt und hat deshalb entsprechend kürzere Saiten. Sie war bereits Gegenstand zahlreicher vibroakustischer Untersuchungen (z.B. Dillmann und Winter (1993), Kreuzig (1994) sowie Twork (1996, 1997)). Ihr Hersteller ist ebenso unbekannt wie derjenige der Wandergitarre I (Fig. 8). Diese ist von überaus schlichter und sehr kostensparender Bauart. Vom Äußeren her ähnlich, jedoch mit weitaus größerer Sorgfalt hergestellt, ist die Wandergitarre II (Nr. 6a) der Firma Höfner. Sie war nicht Gegenstand der Reihenuntersuchung, sondern wird nur punktuell behandelt. Im Gegensatz zu den Gitarren Nr. 1 bis 5, die mit Kunststoffsaiten bespannt sind, haben beide Wandergitarren Saiten, die aus Stahl gefertigt sind.

2.3. Barockgitarren

In früheren Zeiten war der Korpus der Gitarren allgemein schmaler als bei den heute am weitesten verbreiteten spanischen Gitarren. Demzufolge ist auch das Volumen der eingeschlossenen Luft

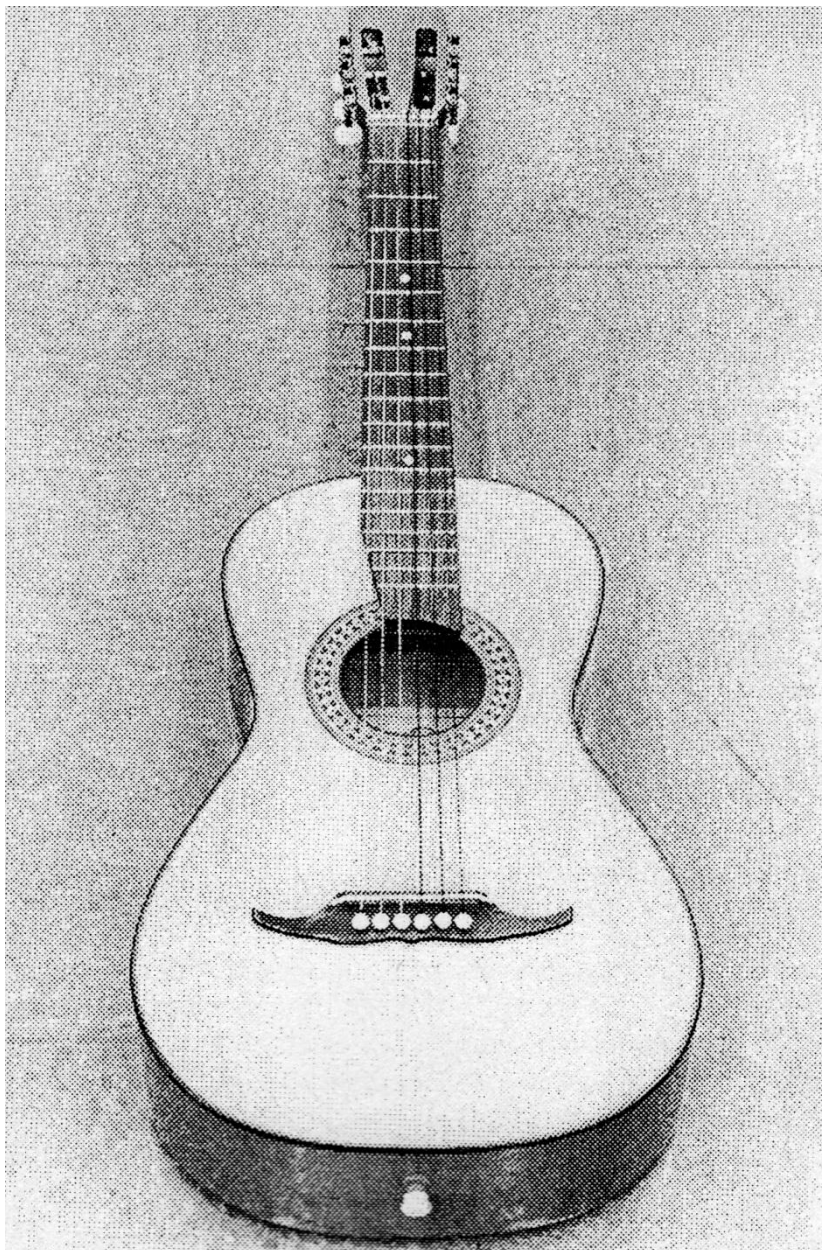


Fig. 9. Barockgitarre
Nr. 7 (Gewa).

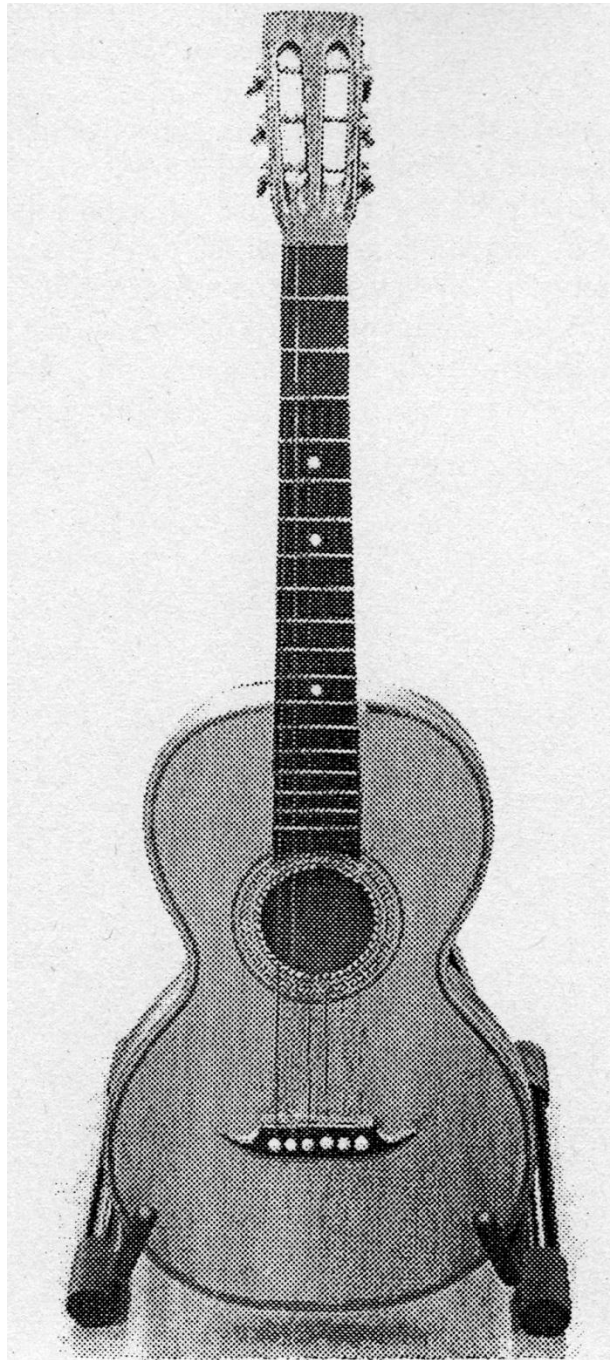


Fig. 10. Barockgitarre Nr. 8 (altes Instrument).

kleiner. Als Vertreter dieses frühen Typs sind die in den Fig. 9 und 10 dargestellten Instrumente anzusehen. Die Gitarre Nr. 7 stammt vom Mittenwalder Hersteller Gewa und ist eine Schülegitarre mit Kunststoffbesaitung. Am oberen Ende liegen die Saiten nicht am Sattel, sondern an einem metallenen Null-Bund auf. Die Gitarre Nr. 8 ist unbekannter Herkunft und höheren Alters. Der Korpus wurde an einigen Stellen repariert. Die Saiten sind aus Stahl; die Basssaiten sind farblich umspinnen.

2.4. Stahlsaitengitarren

Die weiteren Gitarren tragen grundsätzlich Stahlsaiten, die meist mit Kunststoffplättchen (Plektrum oder Fingerpicks) angeschlagen bzw. angerissen werden. Um die Decke von Beschädigungen durch das Plektrum zu schützen, ist auf der Seite der (hohen) E₄-Saite in aller Regel ein Schlagbrett aufgeklebt oder aufgeschraubt.

Unter dem Begriff "Stahlsaitengitarren" sind sechssaitige Instrumente zusammengefasst, die von unterschiedlicher Bauart sind. Fig. 11 zeigt eine Schlaggitarre, die einige Besonderheiten aufweist. So sind die unteren Enden der Saiten nicht am Steg, sondern an einem Saitenhalter aus Stahl befestigt. Die oberen Enden der leeren Saiten liegen an einem Null-Bund auf. Das Schlagbrett ist nicht direkt auf der Decke angebracht, sondern mittels Stegen in einem größeren Abstand befestigt. Der Korpus dieser Gitarre ähnelt dem einer sehr großen Geige. So hat er - anders als bei den anderen Instrumenten - kein kreisförmiges Schallloch, sondern zwei *f*-Löcher. Die Decke ist konvex gewölbt.



Fig. 11. Schlaggitarre Nr. 9 (Triumphator).

In Fig. 12 ist eine Westerngitarre abgebildet, die in anderen Arbeiten bereits ausführlich untersucht worden ist (Kreuzig (1994), Fleischer (1995), Götz (1996), Twork (1996, 1997) sowie Moosrainer und Fleischer (1997)). Ein Schlagbrett ist auf die Decke aufgeschraubt. In den Hals ist ein Stahlstab eingezogen, der jedoch nicht verstellt werden kann.



Fig. 12. Westerngitarre Nr. 10 (Western Ranger).

Fig. 13 zeigt das Modell Applause, das sich in mehrfacher Hinsicht von den anderen Instrumenten unterscheidet. Es wird von der Firma Kaman hergestellt und ist eine preiswerte Variante der bekannten Ovation. Die beiden Fotos zeigen Vorder- und Rückseite der Gitarre. Der Korpus weist eine konventionelle hölzerne Decke auf. Als wesentlichen Unterschied erkennt man, dass anstelle der üblichen Seitenwände und des Bodens eine Schale aus Kunststoff die Decke nach hinten abschließt. Bei der vorliegenden Gitarre ist eine "Shallow Bowl" verwendet, d.h. das eingeschlossene Luftvolumen ist relativ klein. Zur elektrischen Abnahme des Saitensignals sind in den Steg piezoelektrische Tonabnehmer eingebaut. Ebenso wie bei der Schlaggitarre Nr. 9 ist der Korpus unsymmetrisch geformt.

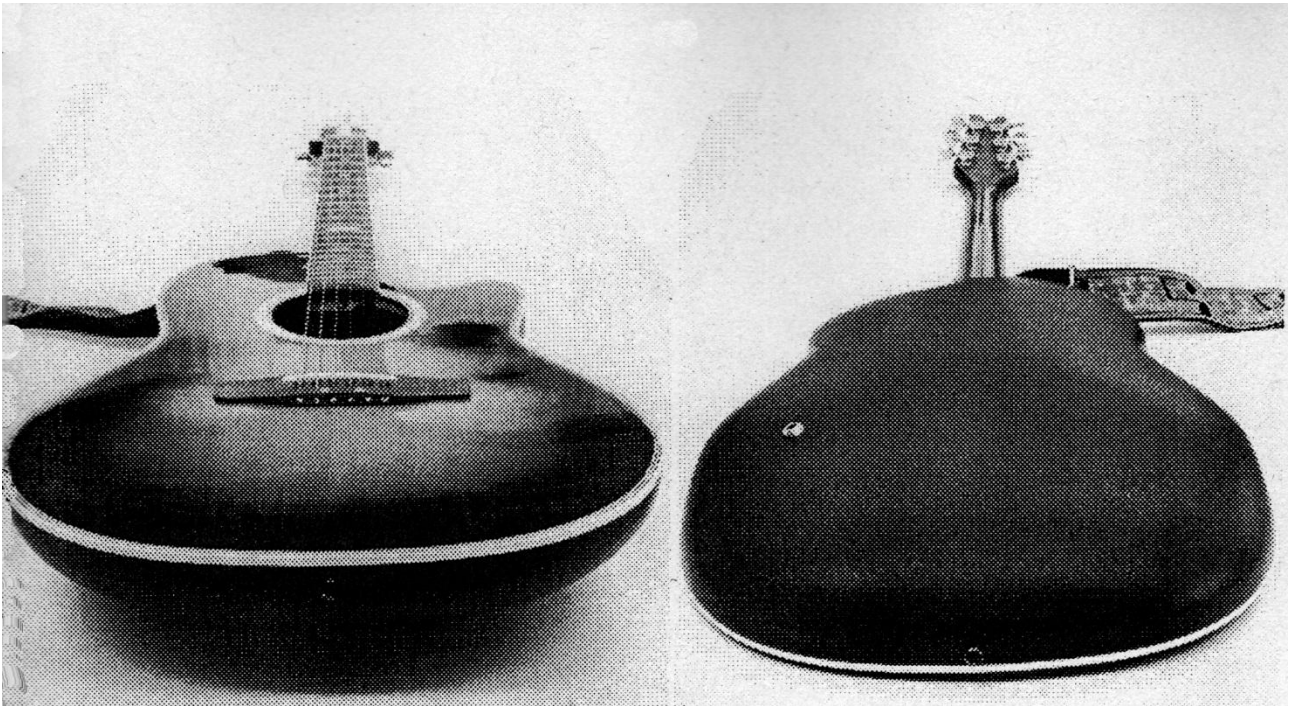


Fig. 13. Vorder- und Rückseite der Westerngitarre Applause (Nr. 11).

2.5. Zwölfsaitige Gitarren

Die Gitarren, die in den Abschnitten 2.2 bis 2.4 beschrieben wurden, sind mit sechs Saiten bespannt. Die folgenden vier Instrumente zeichnen sich gegenüber den bisher betrachteten Gitarren dadurch aus, dass sie doppelt so viele Saiten tragen. Neben den vier tieferen Saiten (E_2 , A_2 , D_3 und G_3) befinden sich die Oktavsaiten E_3 , A_3 , D_4 und G_4 . Die höheren Saiten (H_3 und E_4) sind doppelt vorhanden. Von ihrem Aufbau und der Art der Besaitung her sind die folgenden Instrumente Westerngitarren mit Stahlbesaitung. Mit Ausnahme der Gitarre Nr. 12 haben sie einen Null-Bund.

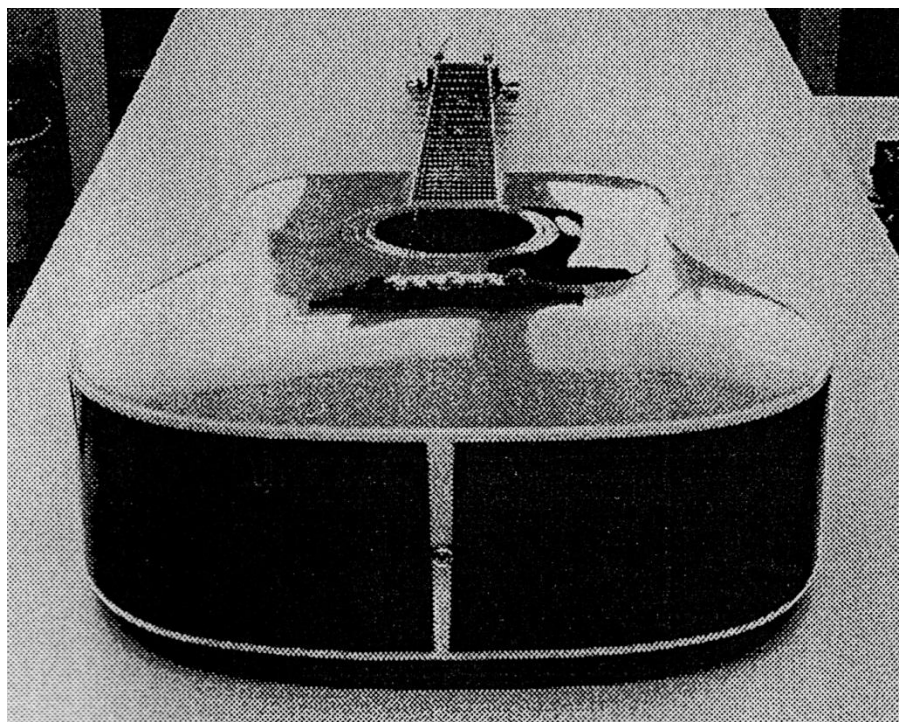


Fig. 14. Zwölfsaitige Gitarre
Nr. 12 (Ibanez).

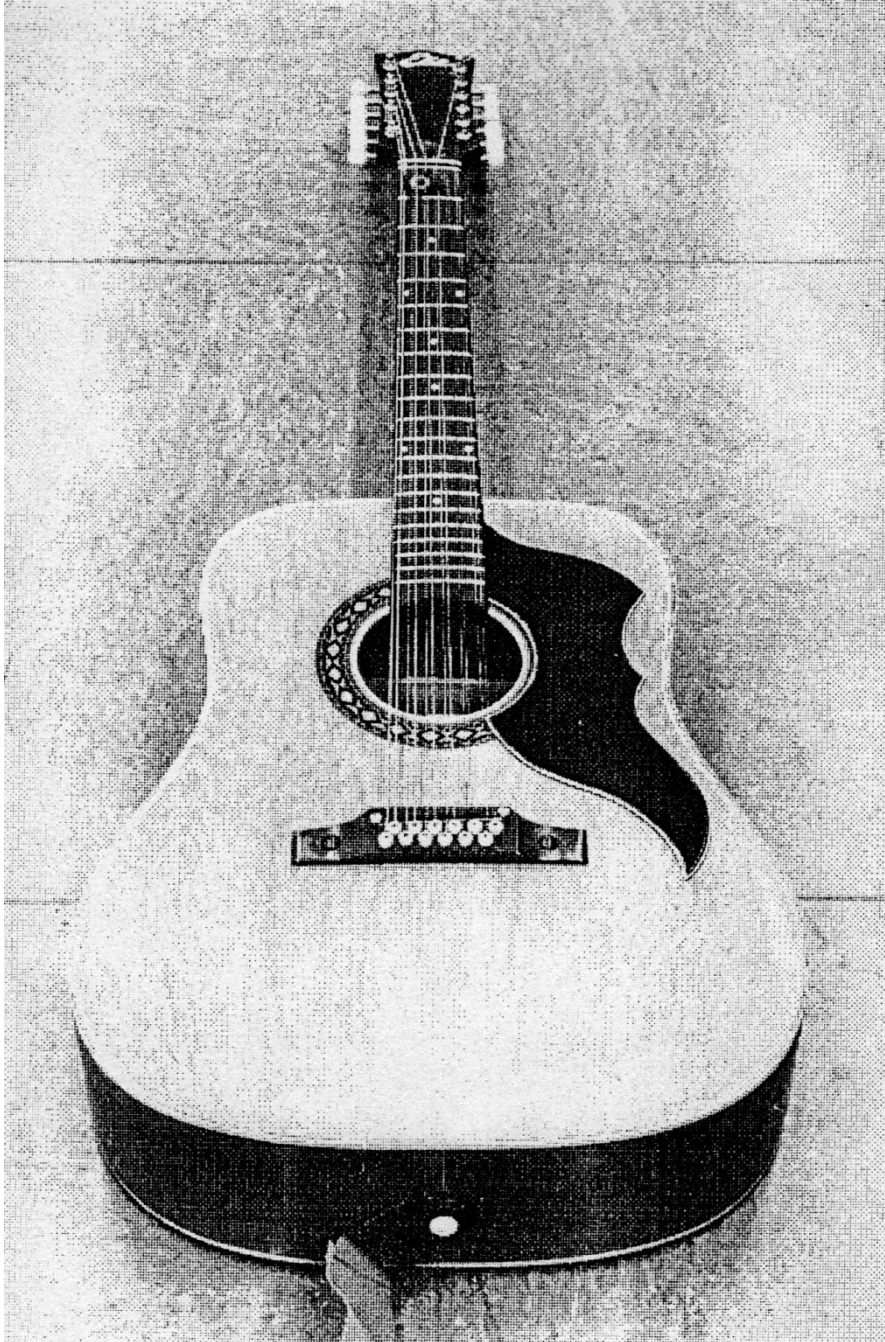


Fig. 15. Zwölfsaitige Gitarre Nr. 13 (Eko).

Hergestellt wurden die untersuchten Instrumente in Fernost bzw. in Europa. Äußerlich sind sie von ähnlicher Bauart; beispielsweise weisen sie alle einen relativ großen Korpus auf. Auf den Photographien erkennt man die zwölfwache Stimm-Mechanik. Während Nylon-Saiten nach Fletcher und Rossing (1991) eine Vorspannkraft von 50 N bis 80 N erfordern, benötigen solche aus Stahl sogar 100 N bis 180 N. Bei zwölf Stahlsaiten liegt die gesamte Vorspannkraft somit zwischen 1 kN und 2 kN. Diese Abschätzung macht klar, dass zwölfsaitige Gitarren an den Saitenenden besonders zug- und in der Struktur speziell biegefest ausgeführt werden müssen. Dies gilt in besonderem Maße für die Decke mit Steg und Saitenhalter sowie für den Hals, der bei allen vier Instrumenten durch einen Stahlstab verstärkt ist. Dieser Stab kann mittels eines Gewindes und einer Mutter nachgespannt

werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Krümmung des Halses auf das gewünschte Maß zu reduzieren.



Fig. 16. Zwölfsaitige Gitarre Nr 14 (Egmond).

Die beschriebenen fünfzehn Instrumente überstreichen einen weiten Bereich bezüglich der Herkunft, der Bauweise und der Qualität. Ihre Ladenpreise dürften innerhalb der Spanne von 100 DM bis 1000 DM liegen. Sie standen - und stehen zum Teil immer noch - dem Institut für Mechanik für Messungen zur Verfügung. Bei einigen Exemplaren war es möglich, im Laufe mehrerer Jahre unterschiedliche Messverfahren zu erproben und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Dies ist Gegenstand der folgenden Kapitel.

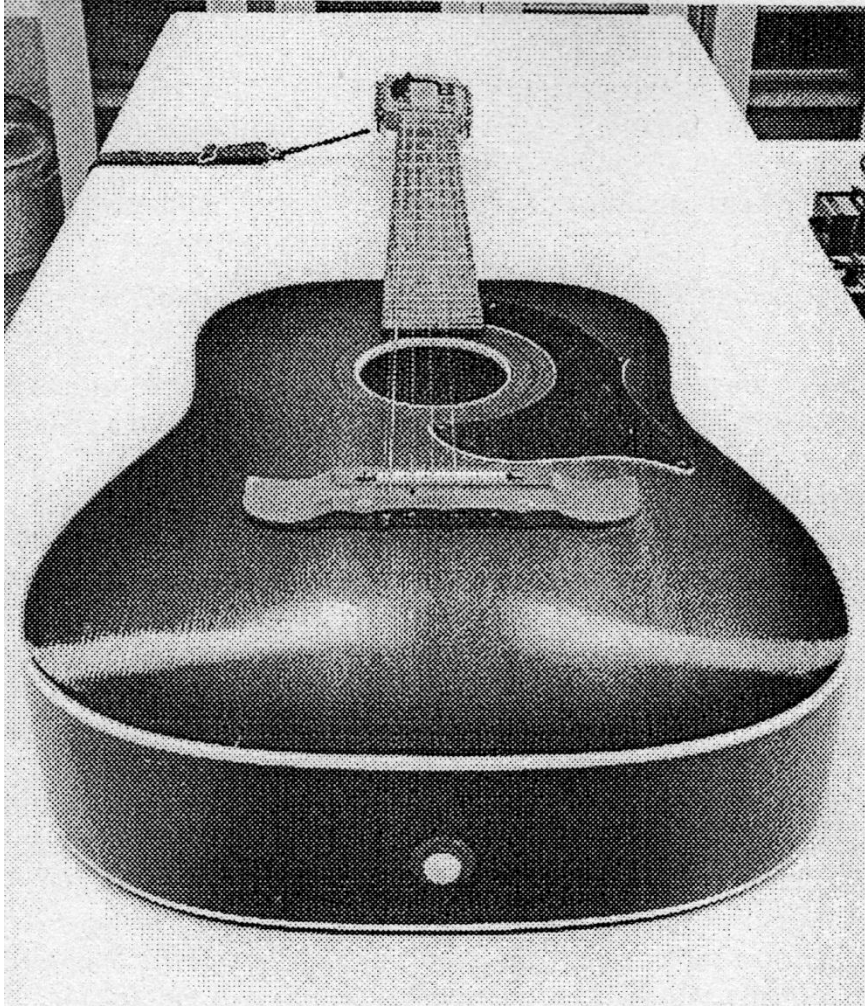


Fig. 17. Zwölfsaitige Gitarre Nr. 15 (Klira).

3. MODALANALYSE DES GITARRENKÖRPERS

Im Gegensatz zu einem elektrischen Instrument, wie etwa der E-Gitarre oder dem E-Bass (siehe z.B. Lemme (1982), Meinel (1987), Heise (1993), Fleischer und Zwicker (1996, 1997, 1998) sowie Fleischer (1998)), sind bei einer akustischen Gitarre die Schwingungen des Körpers von ursächlicher Bedeutung für die Funktion des Instruments. In diesem Zusammenhang sind zwei Themenkreise voneinander zu unterscheiden:

- * Schwingungen des Instrumentenkörpers dienen dazu, das Schwingungssignal der Saiten als Schallsignal abzustrahlen.
- * Schwingungen des Instrumentenkörpers wirken auf die Schwingungen der Saiten zurück und beeinflussen die Frequenzen sowie das Abklingen der einzelnen Teiltöne.

Ist eine Struktur schwingungsfähig, lassen sich ihre Bewegungen als (Eigen-)Moden bzw. deren Überlagerung darstellen; siehe hierzu beispielsweise Richardson (1997). Diese sind durch modale Formen beschreibbar, die bei modalen Frequenzen auftreten. Die modale Dämpfung kennzeichnet im Zeitbereich das Abklingen der Schwingung. Im Frequenzbereich beschreibt sie das "Übersprechen" einer Mode auf benachbarte Frequenzen, also in gewissem Sinne ihre "Breitenwirkung". Bei einer Analyse entsprechend den Eigenmoden spricht man von einer Darstellung in modalen Koordinaten.

Musikinstrumente sind in vielen Fällen so komplex geformt und aus so schwer beschreibbaren Materialien aufgebaut, dass eine mathematisch geschlossene Modalanalyse nicht möglich ist. Die numerische Modalanalyse mittels Finiter Elemente wird derzeit vereinzelt erprobt; siehe Schwab (1975), Schwab und Chen (1976) sowie die Mitteilung der Firma McNeal Schwendler (1996). Durchschlagende Erfolge sind bisher noch nicht vermeldet worden. Im Bereich der Musikinstrumentenakustik hat sich die experimentelle Analyse des Eigenschwingungsverhaltens als wirkungsvolles Hilfsmittel bewährt, um die mechanischen Ursachen der Schallerzeugung zu studieren (siehe z.B. Wogram (1994)). Sogar das Schallfeld selbst lässt sich mit diesem Werkzeug untersuchen (Bork (1991)).

Auf Feinheiten wie die Unterscheidung zwischen den Eigenfrequenzen des gedämpften und des ungedämpften Systems oder zwischen Eigenfrequenzen und Frequenzen maximalen Schwingweges usw. soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden; siehe hierzu z.B. Meyer und Guicking (1974). Angesichts der Messunsicherheiten und der relativ geringen Dämpfung sind sie in der Praxis ohne große Relevanz. Für eine detaillierte Behandlung des Einflusses der Schwingungsform, der Form und der Randbedingungen auf die Dämpfung sei auf McIntyre und Woodhouse (1978) verwiesen. Im betrachteten Zusammenhang interessieren vorrangig die (Eigen-)Frequenzen und (Eigen-)Schwingungsformen des Gitarrenkörpers. Verkürzt dargestellt geben diese an, bei welchen Frequenzen das Instrument auf stationäre Anregung mit maximaler Amplitude antwortet und wie es sich dabei bewegt. Neben diesen Frequenzen sind demnach die zugehörigen räumlichen Verteilungen der Bewegung zu erfassen. Die Bewegung kann als Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) oder Schwingweg gemessen werden. Für jede dieser Größen sind Messaufnehmer mit spezifischen Vor- und Nachteilen verfügbar.

In den weiteren Abschnitten sind Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, die am Institut für Mechanik durchgeführt worden sind. An einigen akustischen Gitarren wurden verschiedene expe-

rimentelle Techniken erprobt. Dabei waren die Instrumente zum Teil unterschiedlich gelagert. Die Modalanalyse wurde mit dem Programm StarModal der Firma SMS durchgeführt. Entsprechend den jeweiligen Aufgabenstellungen wurden entweder Teile des Instruments oder auch der gesamte Körper untersucht.

3.1. Untersuchungen zur Schwingung der Decke der Terzgitarre

Im vorliegenden Abschnitt sind Resultate nach Dillmann und Winter (1993) zusammengestellt. Objekt war die Terzgitarre Nr. 5, deren Decke untersucht wurde. Das Messraster kann Fig. 18 entnommen werden; es umfasst 270 Gitterpunkte. Für jeden Punkt wurden mittels eines FFT-Analysators Ono Sokki CF 6400 Übertragungsfunktionen ermittelt und zur weiteren Verarbeitung mit StarModal an einen Personal Computer übergeben. Der Boden der Gitarre lag auf einer festen Unterlage; der Hals war mit einer Schraubzwinde fixiert. In mehreren Versuchsreihen wurden am selben Objekt unterschiedliche Messaufnehmer und -verfahren erprobt.

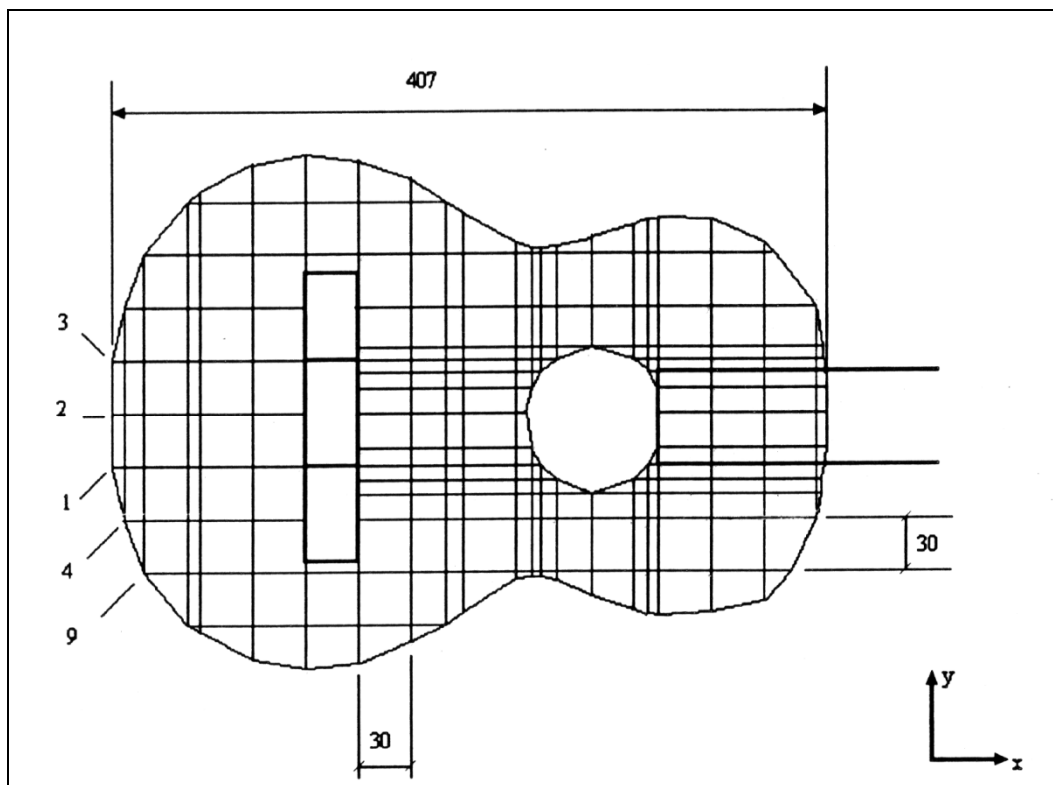


Fig. 18. Messgitter auf der Decke der Terzgitarre Nr. 5.

Fig. 19 bezieht sich auf ein Experiment, in dem die anregende Kraft mit einem Impulshammer PCB 208A03 aufgebracht wurde. Die Antwort der Gitarrendecke wurde senkrecht zur Oberfläche mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer Brüel & Kjaer 4374 gemessen, der in der Nähe des Schalloches am Gitterpunkt 201 angebracht war. Der Bewegungsaufnehmer blieb in Verlauf des gesamten Experiments am selben Ort, während die Anregung wanderte (Betriebsart "Fixed Response"). Für jeden Gitterpunkt wurde eine Übertragungsfunktion Beschleunigung/Kraft ermittelt.

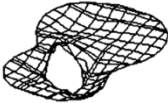

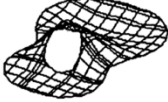
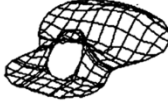


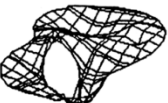

Frequenz [Hz]	Eigenschwingungsformen	Frequenz [Hz]	Eigenschwingungsformen
261,407		502,739	
305,136		604,302	
337,638		735,977	
448,028		872,085	

Fig. 19. Erste Versuchsreihe nach Dillmann und Winter (1993): Eigenschwingungsformen und -frequenzen der Decke der Terzgitare Nr. 5, gemessen mit Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer.

In Fig. 19 sind Eigenschwingungsformen mit den zugehörigen Frequenzen zusammengestellt. Die Auflistung umfasst acht Eigenformen. Deren Nummerierung ist auf spätere Versuchsreihen abgestimmt und umfasst sämtliche Moden, die von Dillmann und Winter (1993) insgesamt identifiziert werden konnten. Die Moden Nr. 1 und Nr. 7 wurden in diesem Durchgang nicht erfasst.

In der nächsten Versuchsreihe wurde derselbe Beschleunigungsaufnehmer Brüel & Kjaer 4374 verwendet, der nun von Messpunkt zu Messpunkt wanderte (Betriebsart "Fixed Excitation"). Die Gitarre wurde über einen elektrodynamischen Schwingerreger (Shaker) LDS V201 in der Nähe des Schallloches am Gitterpunkt 221 mit periodischem Rauschen angeregt. Die eingebrachte Kraft wurde mit einem Kraftaufnehmer Brüel & Kjaer 8200 erfasst. Fig. 20 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse. Dieses Messverfahren liefert eine größere Anzahl von Moden als das vorherige. Sonst stimmen die Resultate prinzipiell überein.





















262,763 		561,870 	
305,187 		629,417 	
338,748 		775,642 	
448,812 		850,309 	
496,816 		947,431 	

Fig. 20. Zweite Versuchsreihe nach Dillmann und Winter (1993): Eigenschwingungsformen und -frequenzen der Decke der Terzgitare Nr. 5, gemessen mit Shaker und Beschleunigungsaufnehmer.

Bei den folgenden beiden Messreihen wurde nicht mehr die wandnormale Beschleunigung, sondern die Schwinggeschwindigkeit gemessen. Dafür wurde ein Laser-Doppler-Schnelleaufnehmer Brüel & Kjaer 3544 verwendet. Dieser maß die Schwinggeschwindigkeit berührungsfrei in der Nähe des Steges am Gitterpunkt 94, an dem ein Stück retroreflektierender Folie angebracht war. Fig. 21 bezieht sich auf die dritte Messreihe, bei der mit dem Impulshammer PCB 208A03 ("Fixed Response") angeregt wurde. Nunmehr wurde auch die Eigenschwingungsform Nr. 1 erfasst.













145,353		636,109	
1		8	
276,669		739,418	
2		9	
305,266		862,521	
3		10	
337,381		907,409	
4		11	
456,705		943,027	
5		12	
507,966		980,241	
6		13	

Fig. 21. Dritte Versuchsreihe nach Dillmann und Winter (1993): Eigenschwingungsformen und -frequenzen der Decke der Terzgitare Nr. 5, gemessen mit Impulshammer und Laser-Schnelleaufnehmer.

Mit dem Schnelleaufnehmer Brüel & Kjaer 3544 in Verbindung mit einem Schwingerreger LDS V201 wurde die vierte Versuchsreihe ausgeführt, die nach Meinung der Autoren insgesamt die besten Ergebnisse liefert. Angeregt wurde wie in der zweiten Versuchsreihe am Gitterpunkt 221 in der Nähe des Schalloches ("Fixed Excitation"). Im Bereich bis 1 kHz konnten 13 Deckenmoden

sicher identifiziert werden, von denen zwölf in Fig. 22 zusammengestellt sind. Auf den Seiten 287 bis 290 vergleichen Dillmann und Winter (1993) ihre Ergebnisse und interpretieren sie ausgiebig.













145,292		556,470	
277,752		647,053	
305,197		769,292	
335,901		859,505	
462,605		907,714	
508,009		960,492	

Fig. 22. Vierte Versuchsreihe nach Dillmann und Winter (1993): Eigenschwingungsformen und -frequenzen der Decke der Terzgitarre Nr. 5, gemessen mit Shaker und Laser-Schnelleaufnehmer.

Prinzipiell liefern sowohl die Betriebsarten "Fixed Excitation" (die Anregung ist fest, der Bewegungsaufnehmer wandert) wie auch "Fixed Response" (der Bewegungsaufnehmer ist fest, die Anregung wandert) zuverlässige Ergebnisse. Die erforderliche breitbandige Anregung kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Erwartungsgemäß ist bei Impulsanregung mit einem Hammer der Störabstand geringer als bei Rauschanregung über Shaker. Wird als Anregungssignal wiederholtes Rauschen verwendet, kann bei entsprechender Triggerung im Zeitbereich gemittelt werden, was bereits nach wenigen Wiederholungen eine sehr wirkungsvolle Störfreiung gewährleistet. Nachteilig ist, dass der Shaker unter leichter Vorspannung an eine geeignete Stelle gedrückt werden muss. Zudem dauern sowohl die Mittelung sowie das Verschieben des Messobjektes oder des Messaufnehmers zum nächsten Messpunkt geraume Zeit, was im Allgemeinen eine stabile Lagerung der Gitarre voraussetzt.

Bei den Untersuchungen von Dillmann und Winter (1993) wurde keinerlei Wert darauf gelegt, die Gitarre wirklichkeitsnah zu lagern. Vielmehr wurde sie so fixiert, dass sich ihre Lage im Laufe der langwierigen Messungen nicht veränderte. Bei allen vier Versuchsreihen lag ein und dieselbe Randbedingung vor. Der Einfluss, den unterschiedliche Randbedingungen auf die Eigenmoden und -frequenzen der Decke haben können, lässt sich daher aus den vorliegenden Resultaten nicht entnehmen. Es zeigt sich jedoch im Vergleich der dritten mit der ersten Messreihe, dass eine Veränderung des festgehaltenen Messortes (ebenso wie die des Anregungsortes) sich darin äußern wird, dass Moden auftreten, die vorher nicht gemessen wurden. Im Beispiel ist dies insbesondere die erste Eigenschwingung. Hierin spiegelt sich die Tatsache wider, dass eine Mode in einem Knoten weder gemessen noch angeregt werden kann. Demzufolge ist bei der Auswahl der Stelle, an welcher der Shaker bzw. der Bewegungsaufnehmer fixiert wird, entsprechende Umsicht geboten. Wie jeder Experimentator weiß, kann eine Messung nur dann optimal gelingen, wenn eine gewisse Vorkenntnis über das Messergebnis vorhanden ist.

3.2. Untersuchungen an mehreren Gitarren zur Schwingung von Decke und Hals

Kreuzig (1994) hat neben einem Banjo die Terzgitarre Nr. 5, die Westerngitarre Nr. 10 sowie eine Konzertgitarre ähnlich der spanischen Gitarre Nr. 1 hinsichtlich ihrer Schwingungen untersucht. Die Instrumente wurden auf ihrem Boden elastisch gelagert und durch seitliche Begrenzungen am Rutschen gehindert. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Untersuchungen war der Hals frei beweglich.

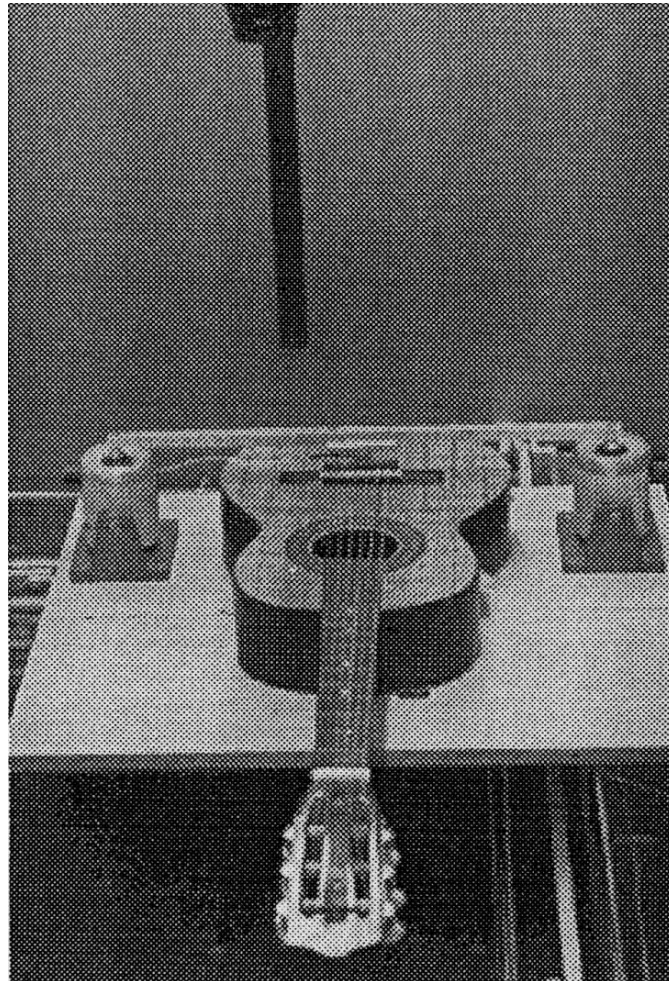


Fig. 23. Vorrichtung zur berührungsfreien Messung der Oberflächenschnelle auf Decke und Hals; gemessen wird an der Terzgitarre Nr. 5.

Mit Hilfe von zwei Schrittmotoren konnte die Gitarre in der Ebene der Decke so verschoben werden, dass der zu untersuchende Punkt unterhalb eines Laser-Vibrometers Polytec OFV 3000 lag. Damit wurde berührungsfrei die deckennormale Komponente der Schwinggeschwindigkeit gemessen. Die Streulichtempfindlichkeit dieses Vibrometers ist ausreichend groß, um auf eine optische Behandlung der Gitarrenoberfläche verzichten zu können. Die anregende Kraft wurde mit einem Schwingerregger und einem Hebelsystem leicht außermittig auf den Steg der Gitarre aufgebracht und dort mit einem Kraftaufnehmer Brüel & Kjaer 8200 gemessen ("Fixed Excitation"). Diese Art der Anregung wurde gewählt, um ähnliche Verhältnisse zu schaffen, wie wenn eine Saite über den Steg den Korpus zum Schwingen bringt. Der Versuchsaufbau ist in Fig. 23 wiedergegeben.

Als Anregungssignal wurde wiederholbares Rauschen gewählt. Für jeden Messpunkt wurde mit einem FFT-Analysator Ono Sokki CF 6400 eine Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/Kraft, d.h. eine Transfer-Admittanz, gebildet und an einen Personal Computer übergeben. Auf der Basis der Übertragungsfunktionen wurde mit dem Programmsystem StarModal die Modalanalyse durchgeführt. Neben der Decke der Gitarre wurde auch der Hals "abgescannt".

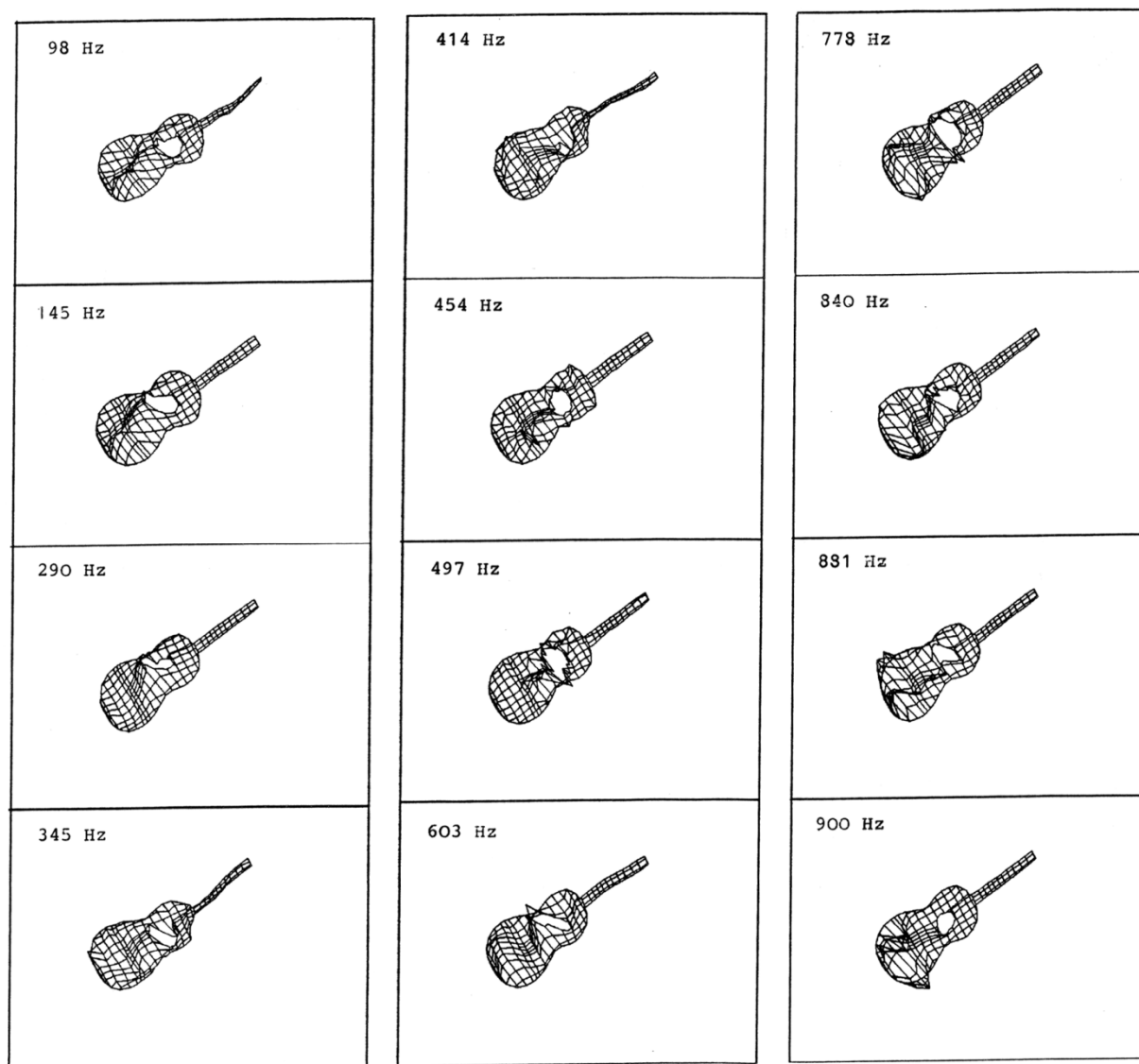


Fig. 24. Schwingungen von Decke und Hals der Terzgitare Nr. 5 nach Kreuzig (1994), gemessen mit Shaker und Laser-Schnelleaufnehmer.

Über Decke und Hals der Terzgitare waren 238 Messpunkte auf einem 3cm-Raster verteilt. Zwischen 98 Hz und 2713 Hz wurden 31 Moden identifiziert. Die ersten zwölf Eigenformen und -frequenzen sind in Fig. 24 zusammengestellt. Ein Vergleich mit Fig. 22 zeigt, dass einige dieser Moden (wie etwa die erste) weniger durch die Decke, als vielmehr durch ausgeprägte Schwingungen des Halses gekennzeichnet sind. In einigen Fällen ist eine Verwandtschaft zwischen den Moden in Fig. 22 bzw. 24 hinsichtlich der Form und der Frequenz zu erkennen. Dies zeigt sich auch in der Tabelle III in Abschnitt 4.4. Angesichts unterschiedlicher Randbedingungen (z.B. Hals festgehalten bzw. frei) kann jedoch keine sehr weitgehende Übereinstimmung erwartet werden.

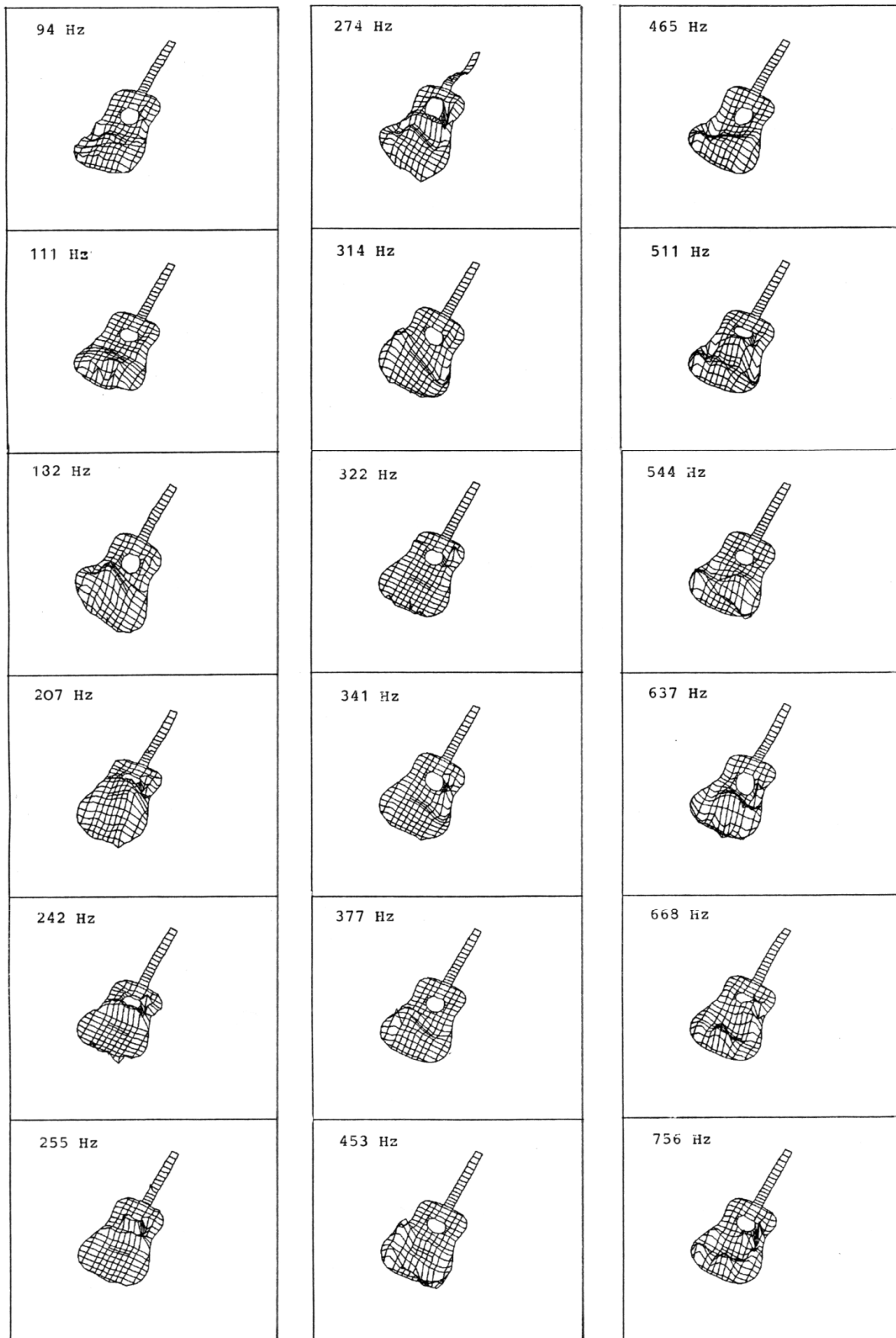


Fig. 25. Schwingungen von Decke und Hals der Westergitarre Nr. 10 nach Kreuzig (1994), gemessen mit Shaker und Laser-Schnelleufnehmer.

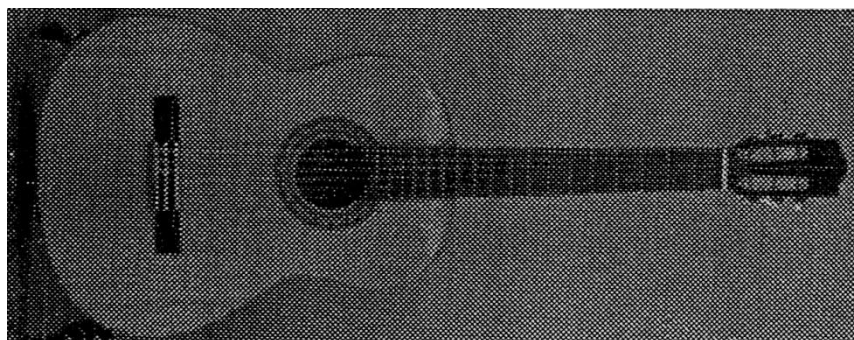
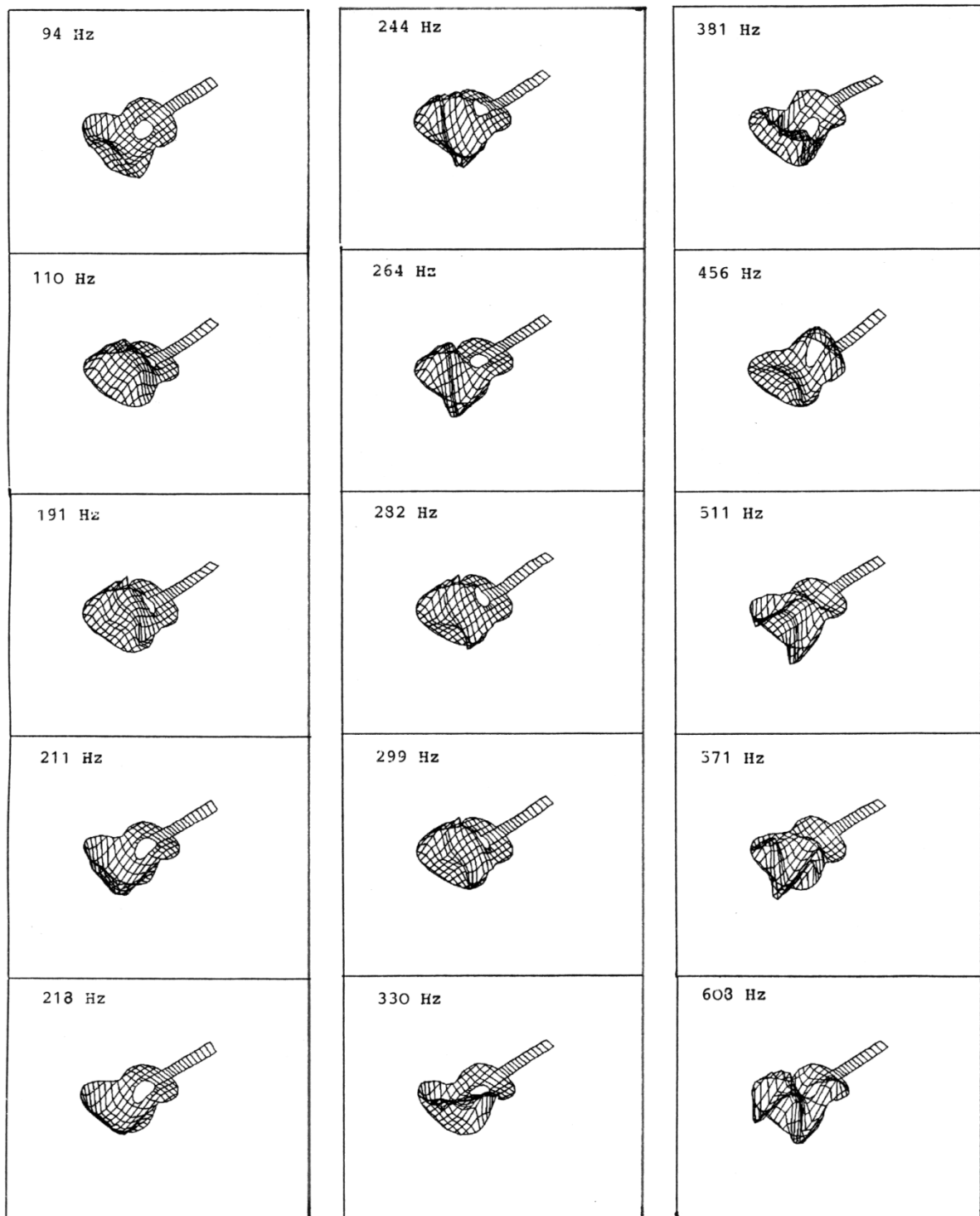


Fig. 26. Schwingungen von Decke und Hals der unten abgebildeten Konzertgitarre nach Kreuzig (1994), gemessen mit Shaker und Laser-Schnellaufnehmer.

Auf Decke und Hals der Westerngitarre wurden 338 Messpunkte verteilt. Die detaillierte Analyse ergab 64 Moden zwischen 94 Hz und 2735 Hz. Die ersten 18 sind in Fig. 25 zusammengestellt. Einige davon, wie etwa diejenigen mit der Frequenz 274 Hz, werden von Schwingungen des Halses dominiert, der sich mit ähnlich großen Auslenkungen wie die Decke bewegen kann. Gewisse Gemeinsamkeiten mit den Moden der Konzertgitarre zeigen sich nicht nur bezüglich der Formen, sondern auch im Hinblick auf die Frequenzen. Details können Tab. III in Abschnitt 4.5 entnommen werden.

Weitere Untersuchungen hat Kreuzig (1994) an einer Konzertgitarre durchgeführt, die aus seinem Privatbesitz war und deshalb nicht mehr verfügbar ist. Wie die Photographie in Fig. 26 unten zeigt, ähnelt sie den Gitarren Nr. 1 und Nr. 3. Es wurden 308 Messpunkte verwendet. 63 Moden, die sich teilweise nur unwesentlich voneinander unterscheiden, wurden im Bereich der Frequenzen zwischen 94 Hz und 2735 Hz identifiziert. Die ersten 15 sind in Fig. 26 zusammengestellt. Es zeigen sich die Grundformen, die auch bei den beiden anderen Gitarren erkennbar waren. Wegen der unterschiedlichen Stimmung und Größe der Instrumente sind die Frequenzen, die zu vergleichbaren Formen gehören, bei der Konzertgitarre (Fig. 26) immer tiefer als bei der Terzgitarre (Fig. 24). In Tab. IV (Abschnitt 4.6) findet sich eine Zusammenstellung.

3.3. Untersuchungen zur Schwingung des gesamten Körpers

Twork (1996) hat eine Modalanalyse des gesamten Instrumentenkörpers am Beispiel der Terzgitarre Nr. 5 und der Westerngitarre Nr. 10 durchgeführt. Zur Messung wurden die Gitarren an einer Schnur aufgehängt und mit dem Impulshammer PCB 208A03 an sämtlichen Gitterpunkten ange-regt. Die Bewegung wurde in der Nähe des Steges mit einem Beschleunigungsaufnehmer Brüel & Kjaer 4344 gemessen ("Fixed Response"). Als obere Frequenzgrenze wurde 500 Hz festgelegt. Die Übertragungsfunktionen wurden in einem FFT-Analysator Ono Sokki CF 930 gebildet. Bei der Auswertung wurden sämtliche Messwerte für Decke mit Hals, Boden und Seitenwände einer gemeinsamen Modalanalyse unterzogen.

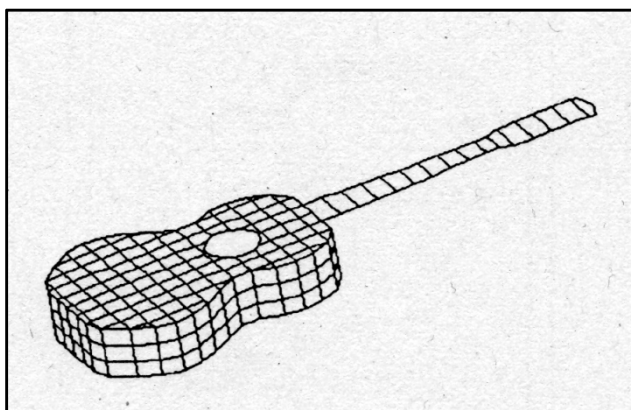


Fig. 27. Messgitter auf der Terzgitarre Nr. 5.

Das Gitternetz, mit dem die Oberfläche der Terzgitarre überzogen ist, kann Fig. 27 entnommen werden. Das Rastermaß ist 3 cm für 387 Messpunkte. Es wurden 14 Moden zwischen 95 Hz und 465 Hz ermittelt. Die prägnantesten zwölf Eigenformen sind samt den zugehörigen Frequenzen in Fig. 28 zusammengestellt.

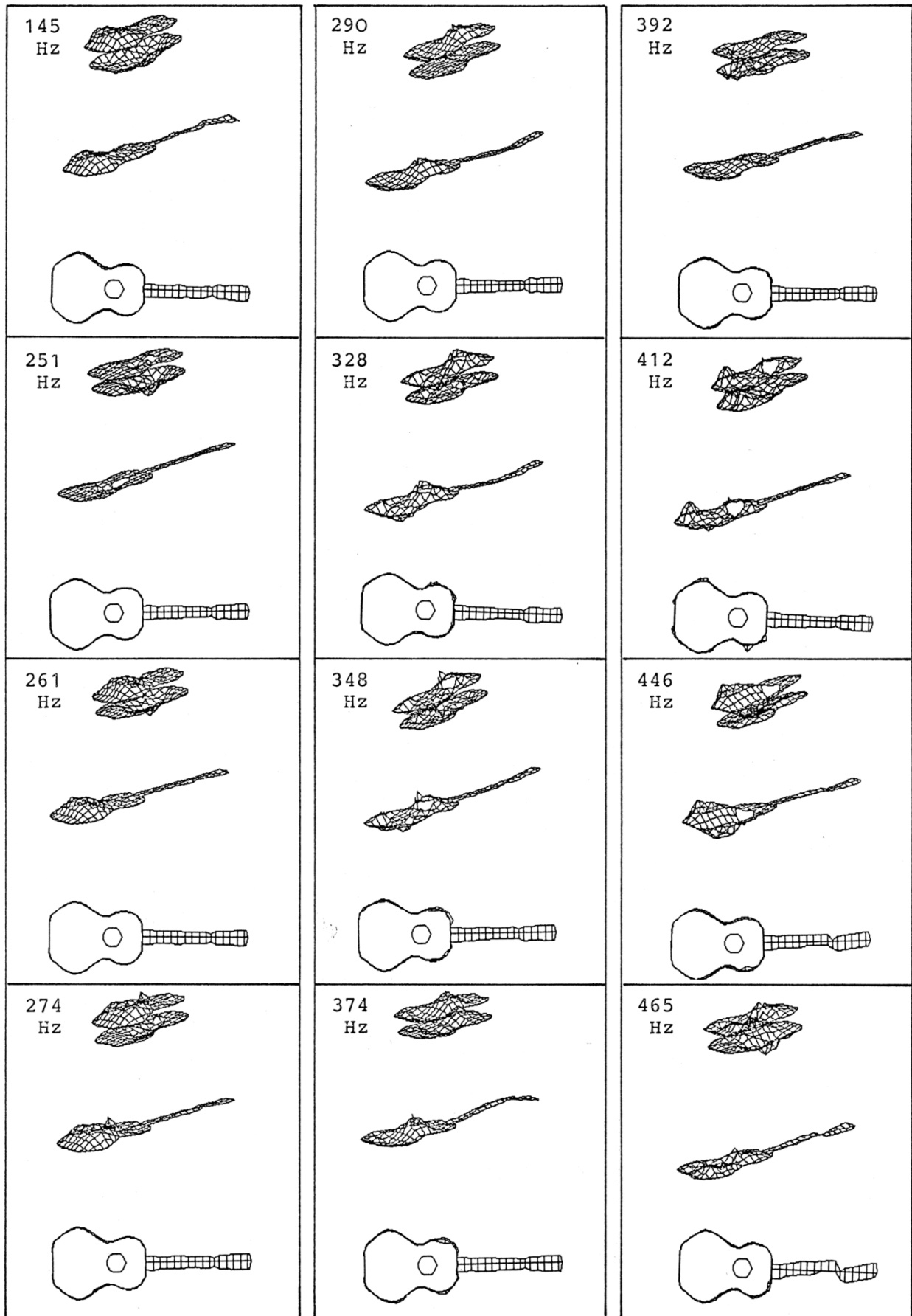


Fig. 28. Schwingungen der Terzgitare Nr. 5 nach Twork (1996),
gemessen mit Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer.

Die Schwingungsformen, welche die Modalanalyse liefert, müssen möglichst anschaulich dargestellt werden. Verschiedene Möglichkeiten wurden erprobt. In Fig. 28 sind die Schwingungen der Terzgitare für jede Mode in jeweils drei Teildiagrammen wiedergegeben. Oben sind Decke und Boden abgebildet, die den Luftraum im Korpus einschließen. Im Vergleich ist es möglich zu beurteilen, ob sich diese beiden Begrenzungsflächen gleich- oder gegenphasig bewegen. Das mittlere Teildiagramm macht das Zusammenspiel von Decke und Hals anschaulich. Das untere Teildiagramm zeigt die Gitarre in der Ansicht von oben; hierin wird die Bewegung der Seitenwände erkennbar. Da sämtliche Teildiagramme einer Mode im selben Maßstab gezeichnet sind, lassen sich die Beiträge der einzelnen Begrenzungsflächen des Korpus zum gesamten "Verschiebungsvolumen" abschätzen. Die Auswertung zeigt, dass sich in der Mehrzahl der Fälle die Decke am meisten und die Seitenwände am wenigsten bewegen. Tab. II in Abschnitt 4.4 enthält eine Gegenüberstellung der Frequenzen und einen Vergleich mit den übrigen Ergebnissen.

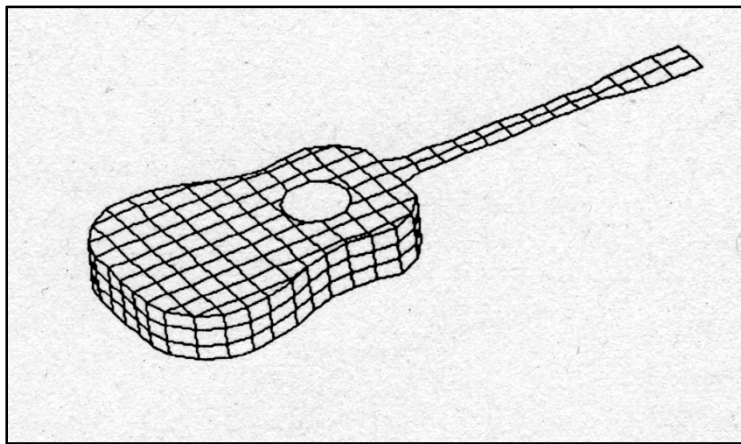


Fig. 29. Messgitter auf der Westerngitarre Nr. 10.

Fig. 29 kann das 4 cm-Gitternetz der Westerngitarre mit 351 Messpunkten entnommen werden. Die Ergebnisse der Modalanalyse sind in Fig. 30 zusammengestellt. Im Bereich zwischen 104 Hz und 468 Hz wurden 14 Moden des Instrumentenkörpers identifiziert. Zwölf charakteristische Beispiele sind dargestellt.

Zur Veranschaulichung wurde in Fig. 30 eine andere Art der Darstellung erprobt. Für jede Mode sind zwei Teildiagramme gezeichnet. Im oberen sind die Decke mit Hals sowie der Boden wiedergegeben. In der Draufsicht, die unmittelbar darunter angeordnet ist, erkennt man die im selben Maßstab dargestellte Schwingung der Seitenwände. Offensichtlich dominiert in aller Regel die Bewegung der Decke. Es existieren jedoch auch Moden, die durch eine besonders ausgeprägte Bewegung des Halses (z.B. bei 271 Hz), des Bodens (z.B. bei 218 Hz) oder der Seitenwände (z.B. 394 Hz) gekennzeichnet sind. Die Identifikation und Beschreibung derjenigen Moden, die für eine Gitarre tatsächlich von Bedeutung sind, findet sich in Tab. III im Abschnitt 4.5 des nächsten Kapitels, das die Gegenüberstellung der bisher vorliegenden Ergebnisse zum Gegenstand hat.

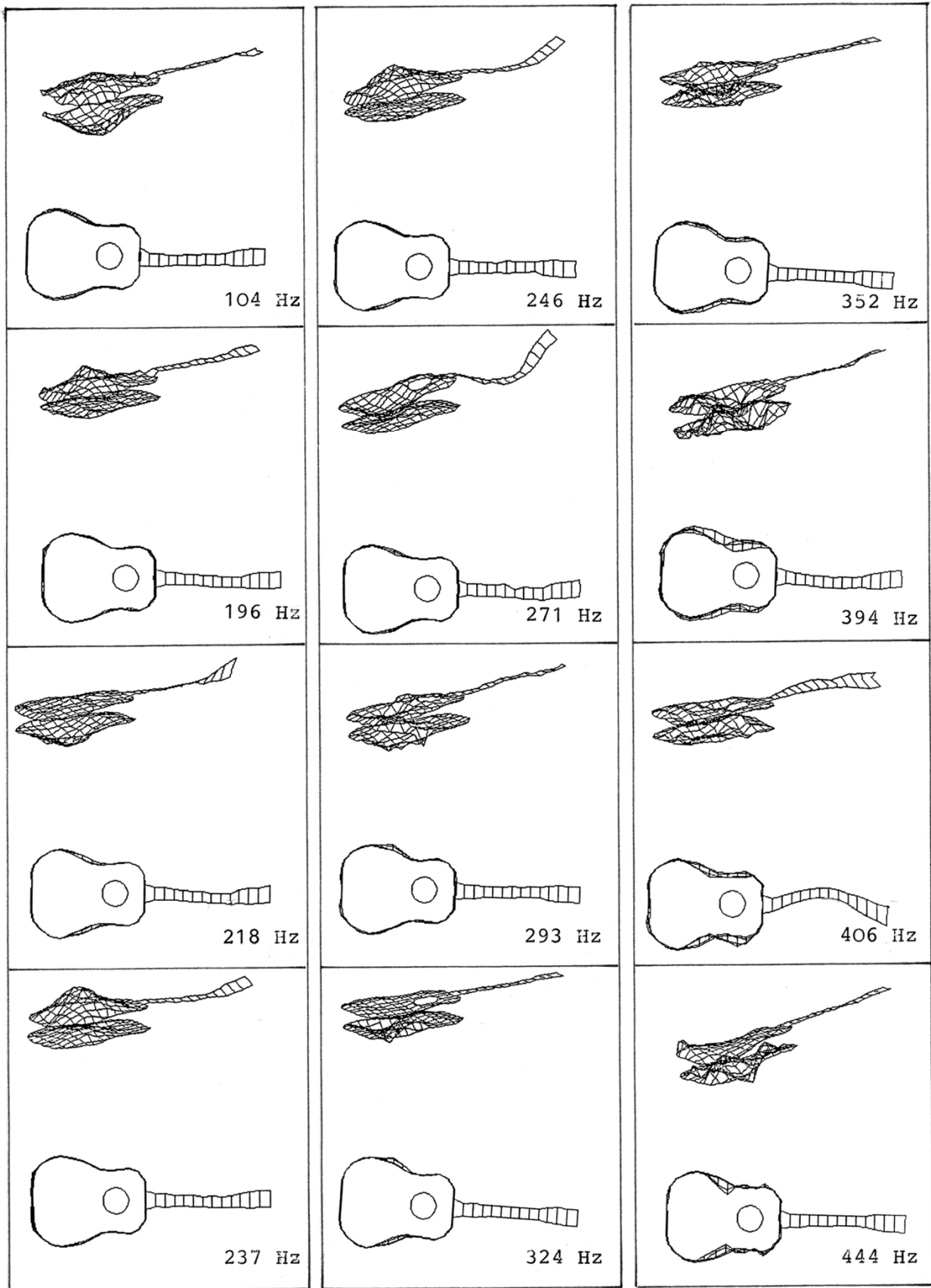


Fig. 30. Schwingungen der Westerngitarre Nr. 10 nach Twork (1996), gemessen mit Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer.

4. BEWERTUNG DER MODALANALYSEN

Im vorangegangenen Kapitel sind zahlreiche Einzelergebnisse zusammengestellt. Darauf aufbauend soll im vorliegenden Kapitel versucht werden, Vergleiche durchzuführen mit dem Ziel, die wesentlichen Gemeinsamkeiten zu extrahieren.

4.1. Bemerkungen zur experimentellen Modalanalyse

Die Modalanalyse gibt Aufschluss über Schwingungsmoden, die dem untersuchten Objekt zu Eigen sind. In der Theorie liefert sie eine unbegrenzte Anzahl von Eigenmoden. Deren Kenntnis erlaubt es, das Schwingungsverhalten der Struktur lückenlos zu charakterisieren. Wird die Analyse - wie im gegenwärtigen Fall - experimentell durchgeführt, so ergibt sie ein zwangsläufig unvollständiges Bild. Die Unvollständigkeit hat u.a. folgende Gründe:

- * Der Frequenzbereich sowie die Frequenzauflösung müssen begrenzt werden.
- * Die räumliche Auflösung muss durch Wahl einer endlichen Anzahl von Messpunkten und endlichen Maschenweite des Messgitters begrenzt werden.

In Anpassung an die Möglichkeiten der verfügbaren Messsysteme einerseits und an die "Betriebsbereiche" der untersuchten Objekte andererseits sind zweckmäßige Kompromisse zu treffen. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche erscheint es bei den hier betrachteten Gitarren sinnvoll, den Frequenzbereich der Messung beispielsweise an den Grundfrequenzen der Saiten zu orientieren. Dieser reicht bei normal gestimmten Gitarren von 82 Hz (E_2 , leere Saite) bis etwa 659 Hz (E_5 , d.h. E_4 -Saite am 12. Bund gegriffen). Die Maschenweite des geometrischen Gitters folgt aus der oberen Frequenzgrenze dadurch, dass genügend Abtastwerte vorgesehen werden müssen, um das Schwingungsmuster der höchstfrequenten Mode noch hinreichend abbilden zu können.

Interessiert weniger das mechanische Schwingungsmuster als vielmehr das Schallfeld, dann kann die erforderliche Maschenweite folgendermaßen abgeschätzt werden: Als theoretische Grenze sind mindestens zwei Stützstellen pro Wellenlänge bei der höchsten interessierenden Frequenz vorgegeben ("Abtasttheorem"). Dies setzt voraus, dass für die Beschreibung des Schallfeldes Sinusfunktionen verwendet werden. Im BE-Programm werden jedoch Geradenstücke zur Approximation des tatsächlichen Verlaufes verwendet. Für Berechnungen des Schallfeldes mittels eines BEM-Programmes (siehe Kapitel 6) sind deshalb pro Wellenlänge mindestens sechs Stützstellen erforderlich. Mit dem 3 cm-Raster, das beispielsweise bei der Terzgitarre verwendet wurde, wären danach Schallfeldberechnungen bis etwa 2,3 kHz möglich. Bei einem 4 cm-Raster läge diese Frequenzgrenze bei etwas mehr als 1,7 kHz.

Ein weiterer Grund für Einschränkungen der Mannigfaltigkeit der Messbaren Moden ist der folgende:

- * Im Experiment müssen bei "Fixed Excitation" eine Richtung und ein Ort der Anregung gewählt werden.

Schwingungen lassen sich grundsätzlich nicht im Knoten anregen. Das bedeutet, dass sich keine Moden ausprägen können, die am Anregungsort einen Knotenpunkt oder eine Knotenlinie hätten. Das Analoge gilt bei "Fixed Response" für diejenigen Moden, die am Messpunkt einen Knoten hätten. Die Anregung erfolgt in aller Regel nur in einer von drei möglichen Richtungen, woraus eine weitere Einschränkung der Vielfalt resultiert.

In Anpassung an die Funktion der Gitarre wurde für die weiteren eigenen Untersuchungen eine Anregung am Steg ähnlich derjenigen nach Kreuzig (1994) gewählt. Diese wirkt leicht außerhalb der Mittellinie dort, wo die G-Saite aufliegt. An diesem Punkt leitet ein Shaker eine Kraft senkrecht zur Decke ein. Damit soll die Schwingungsanregung des Korpus durch eine Wechselkraft nachgebildet werden, wie sie die Saiten auf den Steg ausüben. Abhängig von der Richtung, in der eine Saite angerissen wird, kann diese Kraft Komponenten senkrecht und parallel zur Decke haben (Jansson (1983a)). Im Hinblick auf die Schallerzeugung, die primär auf der transversalen Bewegung des Korpus beruht, ist der Normalkomponente dieser Kraft eine größere Bedeutung zuzumessen als der Tangentialkomponente (Jansson (1983b) sowie Fletcher und Rossing (1991)). Da der Angriffspunkt außermittig liegt, werden neben symmetrischen auch antimetrische Schwingungen des Instrumentenkörpers hervorgerufen.

Nicht nur mit der Anregung, sondern auch mit der Messung der Antwort des untersuchten Objektes sind Einschränkungen verknüpft:

- * Wird kein Triaxialaufnehmer verwendet, muss eine Richtung gewählt werden, in der die Bewegung gemessen wird. Von der räumlichen Schwingung wird demnach nur eine Komponente erkennbar.

Bei den hier beschriebenen Messungen interessiert hauptsächlich die Erzeugung von Schall durch den Gitarrenkörper. Die Wände des Korpus zwingen die Moleküle der umgebenden Luft zum Mitschwingen. Da für diesen Vorgang ausschließlich die wandnormale Komponente der Wandschwingung von Belang ist, wurde mit dem Beschleunigungsaufnehmer und mit dem Laser-Schnelleaufnehmer stets die Bewegung senkrecht zur Wand erfasst. Die Bewegungsmessung beschränkt sich somit auf die Transversalkomponenten von Biegeschwingungen.

4.2. Allgemeine Erkenntnisse aus den Experimenten

Ein Effekt, der infolge theoretischer Überlegungen zu erwarten war, hat sich in den Messergebnissen deutlich bestätigt:

- * Eigenformen und -frequenzen hängen in ausgeprägtem Maße von den Randbedingungen ab.

In den Arbeiten, die im vorherigen Kapitel zitiert sind, waren es immer dieselben Objekte, an denen gemessen wurde. Jedoch waren die Bereiche der Gitarren, die untersucht wurden, unterschiedlich groß. Es waren dies:

- Decke der Terzgitarre Nr. 5 (Dillmann und Winter (1993), Abschnitt 3.1.);
- Decke und Hals der Terzgitarre Nr. 5, einer Konzertgitarre und der Westerngitarre Nr. 10 (Kreuzig (1994), Abschnitt 3.2.) sowie
- der gesamte Körper einschließlich Hals der Terzgitarre Nr. 5 und der Westerngitarre Nr. 10 (Twork (1996), Abschnitt 3.3).

Der Vergleich der Resultate offenbart prinzipielle Unterschiede. Diese hängen wesentlich damit zusammen, dass nur in der letztgenannten Untersuchung das ganze Instrument untersucht worden ist. In den anderen Studien ist dagegen lediglich ein jeweils unterschiedlich großer Bestandteil des Instruments (Decke bzw. Decke mit Hals) analysiert worden. Wird ein Teil eines schwingungsfähigen Objektes isoliert untersucht (siehe z.B. Meyer (1974a)), so kann dies bekanntlich zu anderen Eigenformen und -frequenzen führen, als wenn derselbe Teil im Verbund mit weiteren Teilen oder innerhalb des Gesamtobjektes behandelt wird.

4.3. Gemeinsame Schwingungsarten

Bei den oben angeführten Messungen waren die Randbedingungen jeweils anders. Bereits aus diesem Grunde differieren die ermittelten Eigenfrequenzen. Relativ wenig unterscheiden sich die Schwingungsformen der Decke. Vergleicht man die Ergebnisse, so werden gemeinsame Schwingungsarten erkennbar. In dieser Hinsicht weisen Gitarren der unterschiedlichsten Bauart eine erstaunliche Verwandtschaft auf (Jansson (1971, 1983b), Fletcher und Rossing (1991)). Bevor die Frequenzen analysiert werden, wie sie die verschiedenen Experimente ergeben haben, sollen diese Schwingungsarten in Typen eingeteilt und charakterisiert werden. Dazu wird die Nomenklatur übernommen, wie sie Fleischer (1997) verwendet hat. Die angegebenen Frequenzen beziehen sich auf normal große spanische Gitarren.

- **Helmholtz-Schwingung:** Eine starke gleichphasige Auslenkung des unteren Teiles der Decke ist bei Frequenzen um 100 Hz zu beobachten. Wie andere Untersuchungen zeigen (Twork (1997), Fleischer (1997)), bewegt sich der Boden in Gegenphase zur Decke, d.h. der Korpus "pumpt". Da die Steifigkeit der eingeschlossenen sowie die Masse der mitbewegten Luft eine Rolle spielen, handelt es sich dabei um eine Hohlraumresonanz. Hierfür ist gemeinhin die Bezeichnung "Helmholtz-Schwingung" (z.B. Fletcher und Rossing (1991)) gebräuchlich.
- **00-Dipol-Schwingung und 00-Monopol-Schwingung:** In der Umgebung von 200 Hz treten zwei weitere Schwingungsarten auf. Ähnlich wie bei der ersten Schwingungsart bewegt sich die Decke konphas mit einem Maximum in der Gegend des Steges. Weitere Untersuchungen zeigen, dass der Boden sich in aller Regel bei der ersten dieser Schwingungen weitgehend gleichphasig, bei der zweiten dagegen im Wesentlichen gegenphasig mitbewegt. Hinsichtlich der Schallabstrahlung verhält sich der Korpus demnach wie ein Dipol bzw. Monopol. Die entsprechenden Schwingungsmuster werden zukünftig als "00-Dipol-Schwingung" bzw. "00-Monopol-Schwingung" bezeichnet.
- **10-Decke-Hals-Schwingung:** Das System Decke-Hals schwingt so, dass sich auf der Decke eine Knotenlinie unterhalb des Schallloches senkrecht zur Mittellinie ausbildet (auf der Decke 1 Querknoten-, 0 Längsknotenlinien). Auffällig sind die großen Auslenkungen, die der Hals ausführt. Der Hals bewegt sich in der Weise mit, dass ein Knoten im Bereich des 12. Bundes auftritt. Diese Schwingung wird in mehreren Spielarten üblicherweise bei Frequenzen zwischen 230 Hz und 300 Hz beobachtet.
- **01-Deckenschwingung:** Die Decke schwingt - vornehmlich unterhalb des Schallloches - antimetrisch in Bezug auf die Mittellinie von Decke und Hals. Zwei gleich große Bereiche der Decke bewegen sich in Gegenphase (0 Querknoten-, 1 Längsknotenlinie). Der Hals ist weitgehend in Ruhe. Dieses Schwingungsbild zeigt sich typischerweise zwischen 260 Hz und 330 Hz.
- **20-Decke-Hals-Schwingung:** Der obere und untere Teil der Decke bewegen sich in Gegenphase zum mittleren Teil (auf der Decke 2 Querknoten-, 0 Längsknotenlinien). Der Hals schwingt mit, wobei sich ein Knoten weiter zum Sattel verschiebt und ein weiterer auftaucht. Mehrere Spielarten sind zu unterscheiden. Die zugehörigen Frequenzen reichen etwa von 310 Hz bis 450 Hz.

Diese Schwingungsformen sind bei den meisten Gitarren zu beobachten. Weitere Grundformen werden nur bei einigen Instrumenten nachgewiesen:

- **02-Deckenschwingung:** Auf der Decke bilden sich zwei Knotenlinien parallel zur Mittellinie aus. Der innere Teil der Decke im Bereich der Mittellinie bewegt sich in Gegenphase zu den beiden äußeren Teilen; der Hals bleibt weitgehend in Ruhe. Dies ist etwa zwischen 400 Hz und 520 Hz zu beobachten.
- **30-Decke-Hals-Schwingung:** Die Decke schwingt mit drei Querknotenlinien. Der Hals schwingt mit und hat Knoten in der Nähe des 4. und des 13. Bundes. Diese Schwingungsform tritt um 500 Hz auf.

Im Bereich höherer Frequenzen treten mannigfaltige symmetrische und antimetrische Schwingungsarten in immer dichter Folge auf. Deren Aufeinanderfolge hängt offenbar stark von der Bauart der Gitarre ab; siehe hierzu beispielsweise Ziegenhals (1995). Diese Schwingungen sollen im Weiteren nicht gesondert besprochen werden.

Schwingungen der Decke beziehen vor allem dann den Hals mit ein, wenn das Schwingungsbild Querknoten aufweist, wenn also die Schwingungen bezüglich der Mittellinie spiegelsymmetrisch sind. Ausgeprägte Halsschwingungen sind demnach dann zu erwarten, wenn das gesamte Instrument unter Einbeziehung des Halses ähnlich einem Balken schwingt. Tritt ein Längsknoten entlang der Mittellinie der Decke auf, so dass sich eine überwiegend antimetrische Schwingung ausbildet, bleibt der Hals in aller Regel weitgehend in Ruhe.

4.4. Vergleich gemessener Eigenfrequenzen der Terzgitare

Die Terzgitare Nr. 5 ist in drei verschiedenen Messreihen untersucht worden. Ergebnisse sind den Fig. 22 (Decke), 24 (Decke und Hals) und 28 (gesamtes Instrument) zu entnehmen. Dabei kamen jeweils andere Messverfahren zum Einsatz. Da die Gitarre auch bei jeder Messreihe anders gelagert wurde, waren die Randbedingungen unterschiedlich. Beim Vergleich der Zahlenwerte ist zu beachten, dass die Terzgitare kleiner als die übrigen Instrumente ist; die gemessenen Frequenzen sind deshalb stets höher als bei Gitarren normaler Größe.

Schwingungsart	Untersuchung		
	der Decke (4. Reihe) Dillmann und Winter (1993)	von Decke-Hals Kreuzig (1994)	des ges. Körpers Twork (1996)
Helmholtz	145 Hz	145 Hz	145 Hz
-Dipol			261 Hz
00	277 Hz	290 Hz	
-Monopol			274 Hz
10-Decke-Hals	336 Hz	345 Hz	328 Hz
01-Decke	462 Hz	454 Hz	446 Hz
20-Decke-Hals		414 Hz (?)	392 Hz (?)
30-Decke-Hals	556 Hz (?)	603 Hz (?)	

Tab. II. Eigenfrequenzen der Terzgitare Nr. 5, ermittelt in drei verschiedenen Untersuchungen.

In Tab. II sind die Frequenzen zusammengestellt, bei denen die links angegebenen Schwingungsarten beobachtet werden. Die Helmholtz-Schwingung tritt in sämtlichen Experimenten bei 145 Hz auf. Eine Aufspaltung der 00-Deckenschwingung in ihre Monopol- und Dipol-Variante lässt sich nur dann nachweisen, wenn die Bewegung des Bodens mit erfasst wird. Die 10-Decke-Hals-Schwingung findet sich zwischen 328 Hz und 345 Hz. Für die antimetrische 01-Schwingung, bei der sich die linke Hälfte der Decke entgegengesetzt zur rechten bewegt, werden Frequenzen zwischen 446 Hz und 462 Hz gemessen. Die Zuordnung der weiteren Schwingungsformen zu den Frequenzen ist nicht so eindeutig, dass sie interpretiert werden sollte. Es ist jedoch der Trend zu erkennen, dass bei den höheren Moden die Eigenfrequenzen zunehmend differieren. Frequenzdifferenzen von bis zu 10%, deren Ursache unterschiedliche Randbedingungen sein dürften, sind keine Ausnahme.

4.5. Vergleich gemessener Eigenfrequenzen der Westerngitarre

Die Stahlsaitengitarre Nr. 10 (Western Ranger) ist in zwei Studien untersucht worden. Einige der Ergebnisse sind den Fig. 25 (Decke mit Hals) und 30 (gesamtes Instrument) entnommen und in Tab. III zusammengestellt. Eine recht deutliche Zuordnung ist bis hin zur 01-Schwingung erkennbar. Die Helmholtz-Schwingung tritt bei 104 Hz bzw. 111 Hz auf. Die 00-Schwingung wird im Bereich von 196 Hz bis 218 Hz beobachtet. Deren Dipol- bzw. - Monopol-Varianten können wiederum nur dann diskriminiert werden, wenn auch die Schwingung des Bodens erfasst wird. Die spiegelsymmetrische 10-Schwingung lässt sich bei 271 Hz bzw. 274 Hz, die antimetrische 01-Schwingung bei 314 Hz bzw. 352 Hz nachweisen.

Schwingungsart	Untersuchung	
	von Decke-Hals Kreuzig (1994)	des gesamten Körpers Twork (1996)
Helmholtz	111 Hz	104 Hz
00-Dipol	207 Hz (?)	196 Hz
00-Monopol	207 Hz (?)	218 Hz
10-Decke-Hals	274 Hz	271 Hz
01-Decke	314 Hz	352 Hz (?)
20-Decke-Hals		394 Hz (?)
30-Decke-Hals	511 Hz (?)	

Tab. III. Eigenfrequenzen der Westerngitarre Nr. 10, ermittelt in zwei verschiedenen Untersuchungen.

Die oben zusammengestellten Resultate zeigen in manchen Punkten Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Messungen an Decken, die bei Firth (1977) für eine Levin-Gitarre sowie bei Fletcher und Rossing (1991) für zwei Martin-Gitarren zusammengestellt sind. Hinsichtlich der Schwingungsarten ist eine enge Verwandtschaft zu erkennen. In Bezug auf die Frequenzen treten größere Diskrepanzen auf. Dies dürfte seinen Grund in den Unterschieden der Bauweisen und auch in unterschiedlichen Randbedingungen haben.

4.6. Eigenfrequenzen einer Konzertgitarre

Kreuzig (1994) hat die Schwingungen der Decke und des Halses einer Konzertgitarre untersucht; Ergebnisse finden sich in Fig. 26. Dieses Instrument hat große Ähnlichkeit mit den spanischen Gitarren Nr. 1 und Nr. 3. Im Bereich der Frequenzen bis etwa 500 Hz lassen sich acht Grundformen deutlich erkennen. Die Schwingungsarten mit den zugehörigen Frequenzen sind in Tab. IV zusammengestellt.

Untersuchung von Decke-Hals	
Schwingungsart	Kreuzig (1994)
Helmholtz	110 Hz
00-Dipol	191 Hz
00-Monopol	211 Hz
10-Decke-Hals	299 Hz
01-Decke	264 Hz
20-Decke-Hals	381 Hz
02-Decke	511 Hz
30-Decke-Hals	456 Hz

Tab. IV. Eigenfrequenzen einer Konzertgitarre.

Da es sich bei dem Instrument um eine typische spanische Gitarre handelt, stimmen die Eigenmoden im erwarteten Rahmen mit denjenigen überein, die für klassische Gitarren aus der Literatur bekannt sind. Frühere Untersuchungen zu diesem Thema finden sich u.a. bei Jansson (1971, 1983b), Jovicic und Jovicic (1977b), Caldersmith (1978), Meyer (1985), Fletcher und Rossing (1991), Wogram (1994), Ziegenhals (1995) sowie Moosrainer und Fleischer (1997).

Insgesamt lässt sich aussagen, dass im betrachteten Frequenzbereich bis etwa 500 Hz mehrere Grundtypen der Schwingungen von Decke und Hals bei jeder Gitarre nachweisbar sind. Wie zu erwarten war, zeigt sich ein Einfluss der Randbedingungen. Die beobachteten Grundformen sind jedoch ungeachtet der Geometrie, der Beleistung, der Randbedingungen usw. von erstaunlich großer Ähnlichkeit. Deutlichere Differenzen lassen sich bei den zugehörigen Frequenzen feststellen. Die gemessenen Diskrepanzen haben ihre natürliche Ursache in Unterschieden in der Bauart, insbesondere in der Geometrie, der Beleistung sowie im Material. Darüber hinaus beeinflussen die Randbedingungen erwartungsgemäß die Eigenfrequenzen. Wie die Messungen gezeigt haben, wirken sich diese Unterschiede bei den untersuchten Instrumenten in relativ geringem Maße auf die makroskopischen Formen der Schwingungen aus; in relativ hohem Maße beeinflussen sie dagegen deren Frequenzlagen.

5. WEITERFÜHRENDE BERECHNUNGEN

Die Schwingungen des Gitarrenkörpers, die bisher betrachtet wurden, stellen ein wichtiges Zwischenergebnis dar. So lassen sie gewisse Aussagen über die Beweglichkeit der Auflager zu, wie sie die Saiten bei den zugehörigen Frequenzen vorfinden. Im Hinblick auf die Funktion eines akustischen Musikinstruments ist die mechanische Schwingung aber nicht diejenige Größe, welche letztlich interessiert. Vielmehr sind die Bewegungen des Korpus lediglich Mittel zum Zweck, die mechanischen Saitensignale als Schall abzustrahlen.

In einem anschließenden Schritt soll deshalb die Richtung aufgezeigt werden, wie aus den Geometriedaten und aus den Ergebnissen der Modalanalyse aussagekräftige Kenngrößen berechnet werden können, die das akustische Feld kennzeichnen. Einige Arbeiten, die in diese Richtung zielen, stammen von Christensen (1983, 1984) sowie Le Pichon et al. (1998). Einen interessanten Weg zeigen auch Strong et al. (1982) auf; sie nutzen die im Schallfeld enthaltene Information, um mit Hilfe der Fourier-Akustik (Fleischer (1988a)) durch Rückprojektion Strahlererkennung (Fleischer (1986), (1987), (1988c) sowie Fleischer und Axelrad (1986)) zu betreiben. Im Gegensatz zu diesem "rückwärts" orientierten Verfahren wird im Folgenden ein "vorwärts" gerichtetes Vorgehen gewählt. Die vorliegenden Schwingungsdaten werden als Basis genutzt, um das Schallfeld zu berechnen. Dies geschieht mit Hilfe des Schallfeld-Berechnungsprogrammes SYSNOISE der Firma NIT, das mit der Methode der Randelemente (**B**oundary **E**lement **M**ethod, **BEM**) arbeitet.

5.1. Berechnung von Richtcharakteristiken

In den Arbeiten von Leuschner (1994) und Fleischer (1995) sind einige Berechnungen von Schallfeldgrößen beschrieben. Sie basieren auf Schwingungsmessungen nach Kreuzig (1994) an der Konzertgitarre (ähnlich der spanischen Gitarre Nr. 1), deren Ergebnisse in Fig. 26 wiedergegeben sind. Wie Fig. 31 zeigt, wurde ein geometrisches Modell dieser Gitarre erzeugt, bei dem der Hals weggelassen ist. Das Modell hat 584 Elemente und 564 Knoten. Auf

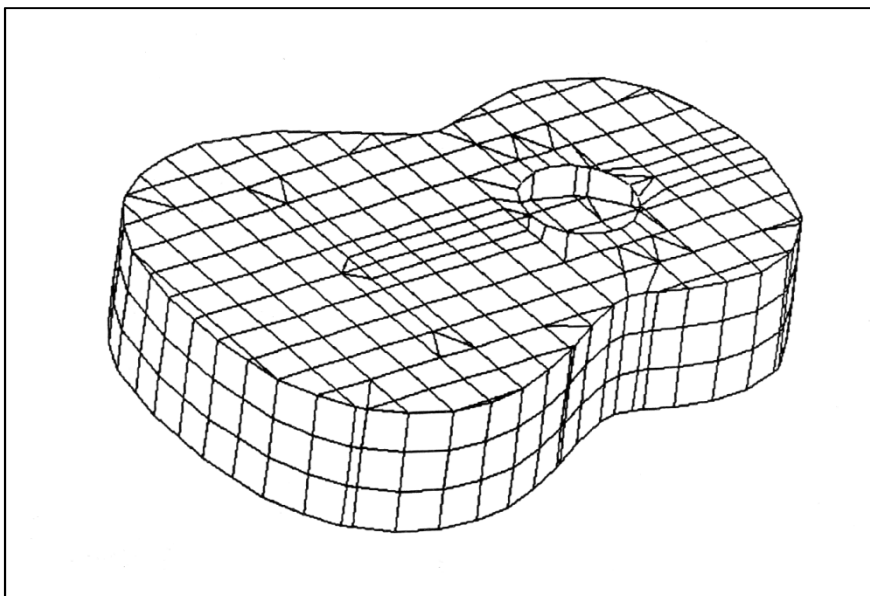


Fig. 31. Geometrisches Modell der Konzertgitarre für die BE-Rechnungen.

der Oberseite stimmt das BE-Netz mit dem bei der Modalanalyse verwendeten Messnetz überein. Als Randbedingungen können somit direkt die komplexen Schnellewerte der Decke eingegeben werden, die aus der Modalanalyse resultieren. Boden und Seitenwände wurden als starr angenommen (Randbedingung verschwindender Normalschnelle).

Als ein charakteristisches Ergebnis ist in Fig. 32 das räumliche Richtdiagramm dargestellt, das die BE-Rechnung für die antimetrische 01-Schwingungsmode ergibt. Der Schallpegel ist für unterschiedliche Raumschnitte berechnet und räumlich dargestellt. Das Schwingungsbild sowie die zugehörige Frequenz sind eingefügt. Zur besseren Orientierung enthält das Diagramm ein Abbild des Gitarrenmodelles. Wie man erkennt, bewirkt die Antimetrie der Schwingungsverteilung, dass zum dicken Ende der Gitarre hin wesentlich weniger Schall abgestrahlt wird als nach den anderen Richtungen. Quasi-dreidimensionale Darstellungen dieser Art lassen sich für jede Eigenmode berechnen und vermitteln ein Bild davon, in welche Raumrichtung bei welcher Frequenz eine Gitarre das Schallsignal abstrahlt.

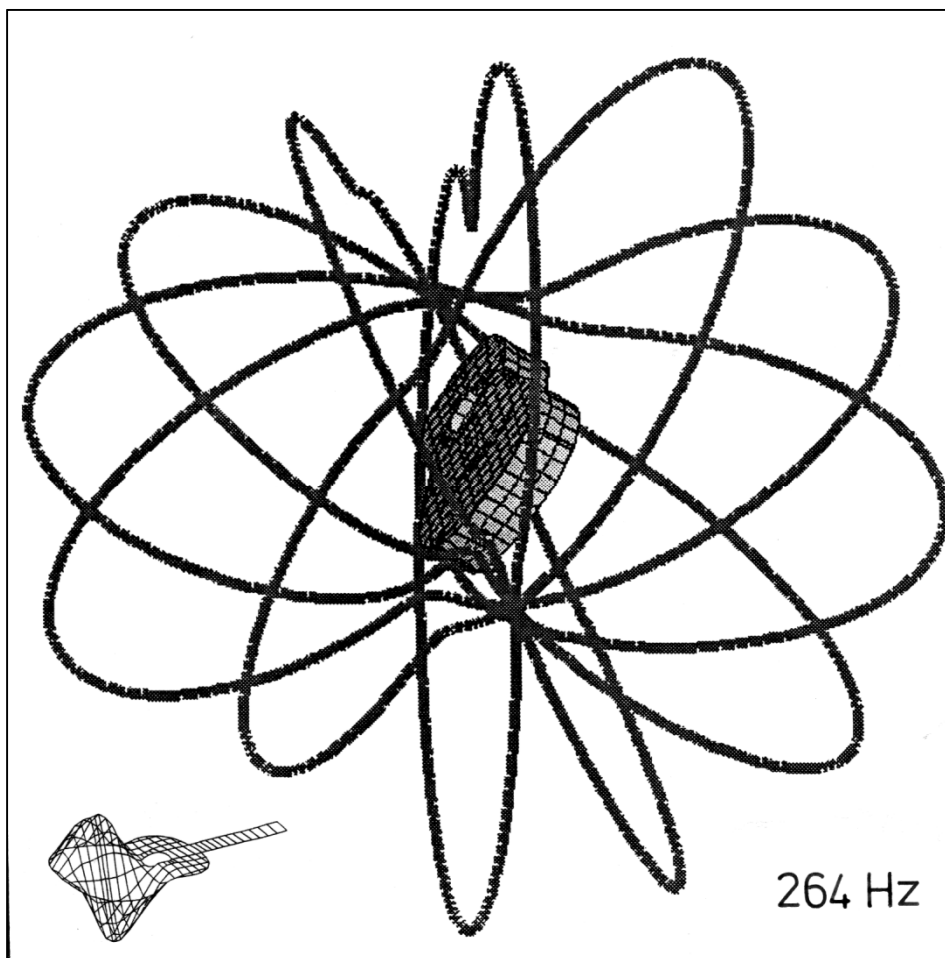


Fig. 32. Räumliche Richtcharakteristik der Konzertgitarre für die Frequenz 264 Hz, bei der die Decke weitgehend antimetrisch schwingt.

5.2. Berechnung der abgestrahlten Schalleistung

In manchen Fällen interessieren Details bezüglich der Abstrahlcharakteristik nicht. Vielmehr reicht die Kenntnis der akustischen Leistung aus, die eine Gitarre ungeachtet der Richtung in den Raum abgibt. Für jede Frequenz stellt die Leistung einen Ein-Zahl-Wert dar und erlaubt somit eine "kompakte" Kennzeichnung der Abstrahlung von Schall durch eine Gitarre. Mehrere Verfahren für die

experimentelle Bestimmung wurden bereits erprobt. Meyer (1974a, 1983a) schlägt die Mittelung über die Messsignale von sechs Mikrofonen vor, die im reflexionsarmen Raum um die Gitarre herum verteilt werden. Christensen (1983) führt Messungen des elektrischen Spektrums von Plattenaufnahmen durch und schließt darauf auf die akustische Leistung. In einer weiteren Arbeit schätzt er mit Hilfe eines Näherungsverfahrens die akustische Leistung im Bereich der Frequenzen zwischen 600 Hz und 800 Hz ab (Christensen (1984)).

Götz (1996) sowie Moosrainer und Fleischer (1997) wenden ein direktes numerisches Berechnungsverfahren an. Ausgehend von den Schwingungsmessungen von Twork (1996), die in Abschnitt 3.3. teilweise wiedergegeben sind, wird mittels der BEM die abgestrahlte akustische Leistung der Westerngitarre Nr. 10 berechnet. Es wird ungestörte Schallausbreitung angenommen und davon ausgegangen, dass die wesentlichen Anteile der Schalleistung bei den Eigenfrequenzen durch die Eigenschwingungsformen des Korpus ins akustische Feld abgestrahlt werden. Diese Anteile werden ermittelt.

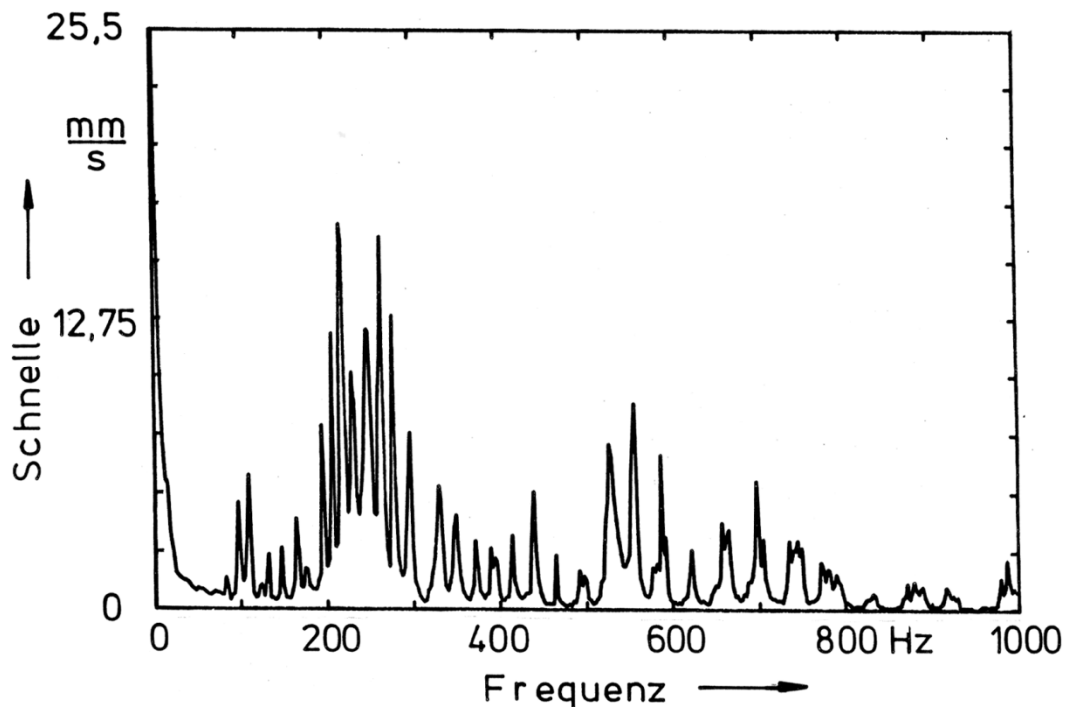


Fig. 33. Gemittelttes Schnelle-Frequenz-Spektrum an einem Punkt in der Nähe des Steges der Westerngitarre Nr. 10.

Eigenmoden sind grundsätzlich normiert. Um die Schalleistung quantifizieren zu können, müssen sie mit realen Werten skaliert werden. Dazu wurde eine entsprechende Messung durchgeführt. An einem der Messpunkte des Modalanalyse-Netzes wurde auf der Decke der Westerngitarre in der Nähe des Steges ein Beschleunigungsaufnehmer Brüel & Kjaer 4375 angebracht. In sitzender Spielhaltung wurden mit dem Plektrum 64 verschiedene Akkorde angeschlagen. In einem FFT-Analysator Ono Sokki CF 350 wurden in der Mittelungsart "SPECTRUM PEAK" ein gemittelttes Spektrum der Schwingbeschleunigung am Messpunkt aufgezeichnet. Nach Division mit dem Imaginären der Kreisfrequenz erhält man das in Fig. 33 wiedergegebene Spektrum des Effektivwerts der Schnelle am Messpunkt. Diesem Spektrum kann für jede Frequenz ein Schnellewert entnommen werden, der als Anhalt für eine realistische Anregung dient.

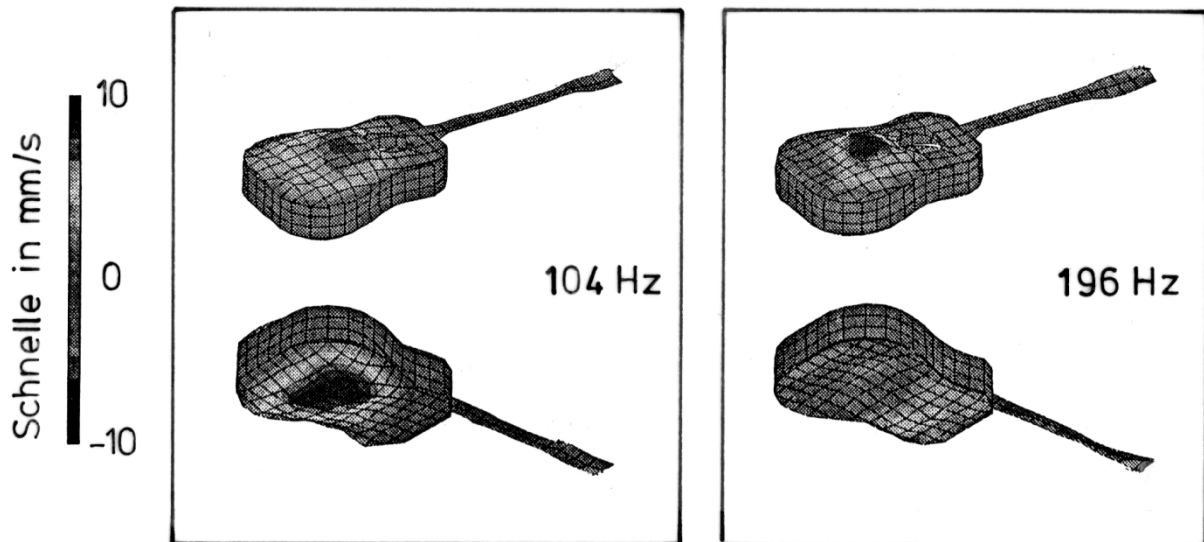


Fig. 34. Die beiden ersten Moden der Westerngitarre Nr. 10, skaliert für eine realistische Anregung.

Die beiden ersten Moden des Körpers der Westerngitarre, die auf diese Weise skaliert sind, können Fig. 34 entnommen werden; siehe hierzu auch Moosrainer und Fleischer (1997). Größe und Vorzeichen der Schnelle sind ursprünglich in Farben kodiert, was in der schwarz-weißen Darstellung bei Umsetzung in Grautöne naturgemäß nur höchst unvollständig zum Ausdruck kommen kann. Trotzdem erkennt man für etwa 100 Hz eine pumpende, weitgehend gegenphasige Bewegung von Decke und Boden (Helmholtz-Schwingung). Bei etwa 200 Hz schwingen Decke und Boden dagegen weitgehend in Gleichphase (00-Dipol-Schwingung).

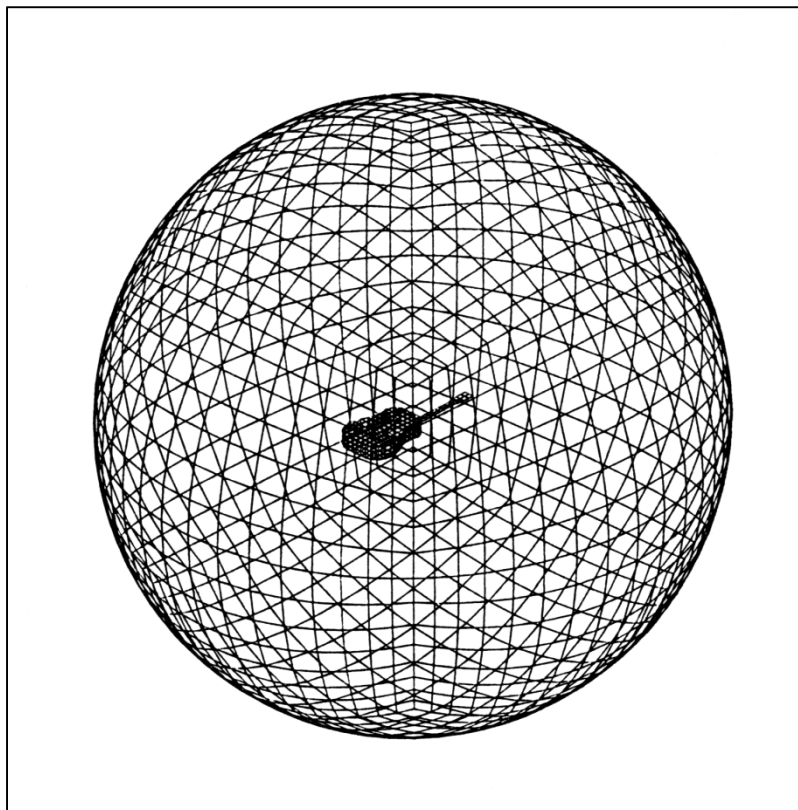


Fig. 35. Kugelförmiges Gitternetz zur Berechnung der Schalleistung.

Für die Berechnung der Schalleistung wurde eine Kugel von 2 m Radius mit 1500 Elementen um das Gitarrenmodell gelegt; vgl. Fig. 35. Aus der Integration des Realteils der komplexen Schallintensität ergibt sich die akustische Wirkleistung, welche die Kontrollkugel von innen nach außen durchdringt. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass dabei nicht nur die vom Äußeren des Gitarrenkörpers abgegebene Intensität erfasst wird. Vielmehr wird auch die Luft im Inneren berücksichtigt, die über das Schallloch ebenfalls einen Beitrag zur Schallabstrahlung leisten kann (Strong et al. (1982)).

Die Ergebnisse der BE-Rechnung für die ersten fünf Moden, die zwischen 100 Hz und 300 Hz liegen, sind in Fig. 36 dargestellt. Sie wurden durch eine Überschlagsmessung mit derselben Gitarre in einem relativ halligen Laborraum auf ihre Plausibilität hin überprüft. Dazu wurde der Schalldruck außerhalb des Hallradius an mehreren Messpunkten bestimmt. Die Schalleistung, welche die Gitarre im selben Spielbetrieb abstrahlt, wie er der BE-Rechnung zugrunde liegt, lässt sich daraus abschätzen. Kontrollmessung und Berechnung stimmen weitgehend überein. Sie ergeben für die fünf ersten Moden Schalleistungspegel zwischen etwa 80 dB und 90 dB. Der Bezugswert ist 10^{-12} W, so dass die Teilleistungen zwischen 0,1 mW und 1 mW liegen. Die beiden tieffrequenten Moden, die in Fig. 34 visualisiert sind, tragen weniger zur Gesamtleistung bei als diejenigen oberhalb von 200 Hz. Insgesamt ergibt sich im betrachteten Frequenzband eine - naturgemäß stark von der Spielweise abhängende - Gesamtleistung von einigen Milliwatt.

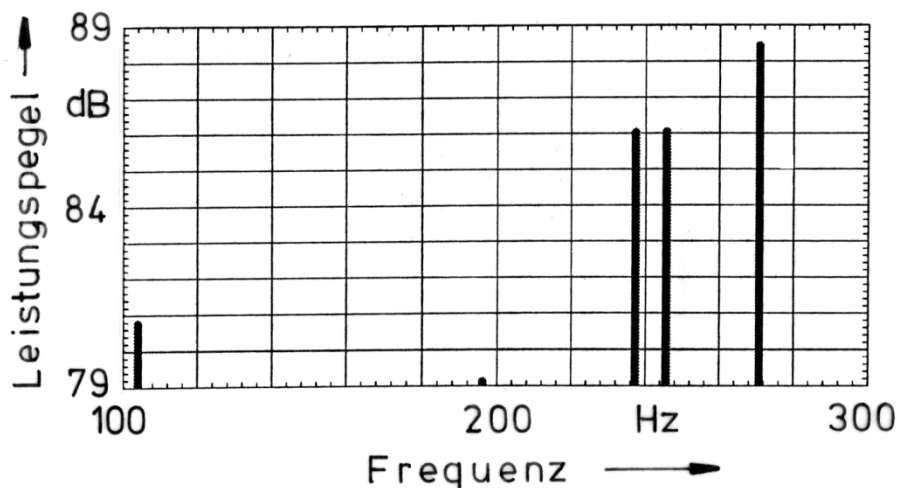


Fig. 36. Pegel der Schalleistung, die von der Westerngitarre Nr. 10 in den fünf ersten Moden abgestrahlt wird.

Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist es, dass sie nicht nur die integrale Schalleistung, sondern die Schallintensität an jedem beliebigen Punkt zu ermitteln gestattet. So lässt sich die Intensität nicht nur für das Fernfeld, sondern auch für die unmittelbare Umgebung des Strahlers berechnen. Beispielsweise kann das Berechnungsnetz direkt über die Oberfläche gelegt werden. Auf diesem Wege ist es möglich, die Beiträge der einzelnen Bauteile der Gitarre - Decke, Boden, Seitenwände und auch Schallloch - zur Gesamtleistung zu bestimmen, was Götz (1996) versucht hat. Ausgehend von den Schwingungsdaten können somit sämtliche relevanten Schallparameter ermittelt werden. Auch lässt sich die Bedeutung, die der Luft im Korpus/Schallloch bei der Schallabstrahlung zukommt, im Vergleich zur schwingenden Oberfläche des Korpus mit dieser Methode quantifizieren. Somit entfällt der Nachteil, den nach Strong et al. (1982) Schwingungsmessungen vermeintlich im Hinblick darauf haben sollen, dass der - ihrer Meinung nach entscheidende - Beitrag des Schallloches nicht erfasst wird.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass sich numerische Experimente durchführen lassen. So können Teile der Gitarre "stillgelegt" werden. Für den entsprechenden Teil wird dazu lediglich die aus der Modalanalyse übernommene Oberflächenschnelle zu Null gesetzt. Am Beispiel der Westerngitarre Nr. 10 und aufbauend auf den Ergebnissen der Modalanalyse nach Twork (1996) wurden BE-Rechnungen der Schalleistung durchgeführt, bei denen sukzessive Teile der Gitarre als starr angenommen wurden. Die Schalleistung wurde bestimmt und mit den Ergebnissen verglichen, die für die insgesamt schwingende Gitarre gelten.

Bei den Schalleistungen, die auf diese Weise für die Moden zwischen 100 Hz und 300 Hz ermittelt wurden, ergeben sich Unterschiede; siehe Moosrainer und Fleischer (1997). Nimmt man an, dass Decke und Boden schwingen und lediglich die Seitenwände sich starr verhalten, erhält man Differenzen im Leistungspegel, die im Wesentlichen innerhalb der Schwankungsbreite 2 dB liegen. Starre Seitenwände führen hinsichtlich der Schalleistung somit zu Abweichungen in einer Größenordnung, die angesichts der sonstigen Einflüsse toleriert werden kann. Aus diesem Resultat wird die Berechtigung abgeleitet, zukünftig auf die - relativ mühsame - Messung der Seitenwand-Schwingungen zu verzichten.

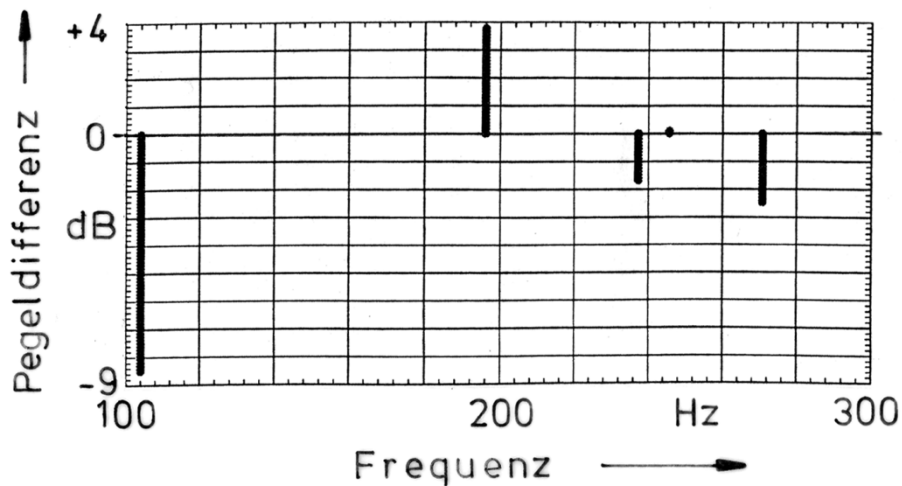


Fig. 37. Differenz zwischen den Schalleistungspegeln der Westerngitarre Nr. 10 für "Boden starr" und "Boden schwingend".

In einem weiteren Schritt wurde die Leistung für den Fall berechnet, dass der Boden keine Bewegungen ausführen kann ("Boden starr"). Die Differenz zwischen dem unter diesen Voraussetzungen ermittelten Leistungspegel und demjenigen von Fig. 36, der sich für "Boden beweglich" ergibt, ist in Fig. 37 dargestellt. Bei den höheren Moden ist der Unterschied relativ gering; er beträgt höchstens etwa 2 dB. Bei den tieferen Moden ist der Einfluss jedoch beträchtlich. Die zugehörigen Frequenzen (104 Hz bzw. 196 Hz) sind so tief, dass die Wellenlänge groß im Vergleich zu den Abmessungen des Strahlers ist. Bei der ersten Mode "pumpt" der Korpus und strahlt näherungsweise als Monopol. Somit stellt das Verschiebungsvolumen eine Zwischengröße dar, anhand derer die Schalleistung abgeschätzt werden kann. Legt man den Boden still, so verringert sich das Verschiebungsvolumen. Wie Fig. 37 zeigt, ergibt sich ein um nahezu 9 dB geringerer Leistungspegel. Schwingt die Gitarre in ihrer zweiten Mode, stellt sie näherungsweise einen Dipolstrahler dar. Hindert man den Boden am Schwingen, wird daraus ein Monopolstrahler mit der Folge, dass der Leistungspegel um 4 dB steigt.

5.3. Folgerungen für die Messung von Korpussschwingungen

Bei Experimenten stellt sich häufig die Frage, ob der Aufwand gerechtfertigt ist, neben der Decke auch die Seitenwände und den Boden hinsichtlich ihrer Schwingung zu untersuchen. Als Kriterium für die Bewertung der Unterschiede, die daraus resultieren, kann die akustische Leistung verwendet werden. Aufgrund der exemplarischen Betrachtung, deren Ergebnisse u.a. in Fig. 37 dargestellt sind, kann die Größe eines möglichen Fehlers abgeschätzt werden:

- * Werden die Seitenwände vereinfachend als starr angenommen, so resultieren daraus bei der Leistungsberechnung Unterschiede, die innerhalb einer Schwankungsbreite von 2 dB liegen.
- * Wird der Boden vereinfachend als starr angenommen, so sind größere Abweichungen zu erwarten. Insbesondere ergibt die Berechnung dann für die erste Mode deutlich zu kleine, für die zweite Mode zu große Leistungen.

Das Fazit für die eigenen Untersuchungen ist, dass in Zukunft darauf verzichtet wird, die Schwingung der Seitenwände experimentell zu bestimmen. Die Seitenwände sind einfach gekrümmt und sind somit Schalen, während Decke und Boden der gebräuchlichen Gitarren aus mechanischer Sicht Platten darstellen; lediglich die Stahlsaitengitarren Nr. 9 und 11 bilden Ausnahmen. Allgemein sind Schalen steifer als vergleichbare Platten. Ihr "Eigenleben" spielt sich demnach bei höheren Frequenzen ab. Im Bereich tieferer Frequenzen dominieren die Decke und der Boden die Schwingungen des Gitarrenkorpus. Auf deren Bewegung wird sich zukünftig das Hauptaugenmerk richten.

Gemeinhin wird der Decke der Gitarre die wichtigste Rolle bei der Umwandlung des Saitensignales in ein Schallsignal beigemessen. Gegenstand von Schwingungsuntersuchungen muss demnach immer die Decke sein. Die BE-Rechnungen zur Schalleistung haben gezeigt, dass vor allem bei der Helmholtz-Schwingung sowie der 00-Dipol-Schwingung und der 00-Monopol-Schwingung auch der Boden eine Rolle spielt. Ob dies auch unter realen Spielbedingungen, wenn der Spieler das Instrument eventuell sogar gegen seinen Körper drückt, im selben Ausmaß der Fall ist, bleibt dahingestellt. Es erscheint jedoch ratsam, der Leistungsberechnung nicht nur Deckenschwingungen zugrunde zu legen, wie dies in einer orientierenden Studie (Fleischer (1995)) versuchsweise praktiziert wurde. Zumindest im unteren Frequenzbereich der Gitarre sollten neben den Schwingungen der Decke auch diejenigen des Bodens der Gitarre bestimmt werden.

6. MESSUNG VON SCHWINGUNGEN DES GITARRENKÖRPERS MIT DEM SCANNING VIBROMETER

Sinn der Modalanalyse ist es, das Eigenverhalten einer schwingungsfähigen Struktur zu charakterisieren. Sind alle Moden identifiziert, ist der Schwinger vollständig beschrieben. Es kann nach Wegen gesucht werden, einzelne Moden zu beeinflussen. In diesem Sinne sind die Versuche zu verstehen, die Funktion des Gitarrenkorpus durch Ersatzsysteme zu beschreiben; siehe hierzu Firth (1977), Jansson (1977), Caldersmith (1978), Christensen und Vistisen (1980) oder Meyer (1985).

6.1. Unterscheidung gegenüber der Modalanalyse

Im vierten Kapitel ist begründet worden, warum von einer experimentellen Modalanalyse nicht erwartet werden kann, dass lückenlos sämtliche Schwingungsmoden zu identifizieren sind. Ort und Richtung der Anregung, ebenso wie Ort und Richtung der Bewegungsmessung, beschränken die Art und die Zahl der Moden, die tatsächlich erfasst werden. Dies ist bei jeder Messung dieser Art der Fall. Darüber hinaus liefert eine Modalanalyse die Information, die für die Lösung des vorliegenden Problems notwendig ist, häufig nicht in der für die Praxis am besten geeigneten Form. Folgende Gründe seien genannt:

- * Eine Mode anzufachen gelingt nur, wenn dafür neben der Frequenz auch die Richtung und vor allem der Ort der Anregung geeignet sind. Eine direkte Aussage, ob und in welchem Maße eine Schwingung im realen Betrieb überhaupt angeregt wird, ist oftmals nur begrenzt möglich.
- * Eigenmoden sind normiert und demzufolge mit keiner Dimension behaftet. Eine direkte Aussage, in welchem Maße sie sich tatsächlich ausbilden, ist nicht möglich.

Allein aus diesen Gründen besteht die Gefahr, dass Ergebnisse der Modalanalyse unzutreffend interpretiert werden könnten. Einige Studien gehen deshalb in die Richtung, das Gesamtsystem "Gitarre" unter möglichst wirklichkeitsnahen Bedingungen hinsichtlich der Anregung und der Lagerung zu studieren. So regen beispielsweise Strong et al. (1982) die Gitarre über die Saiten an. In dieser Arbeit werden keine Moden im engeren Sinne, sondern "Operating Deflection Shapes" (Richardson (1997)) bestimmt.

Dies geschieht auch in der Untersuchung, die im vorliegenden Kapitel beschrieben wird. Die Gitarre wird unter möglichst realistischen Randbedingungen mit einer möglichst realistischen Anregung zum Schwingen gebracht. Die schwingende Bewegung wird an ausreichend vielen Punkten gemessen. Nach geeigneter Behandlung mit dem Computer kann für eine festgehaltene Frequenz die örtliche Verteilung der Schwingung dargestellt werden. Eine weitergehende Bearbeitung, wie sie zur Extraktion der modalen Parameter nötig ist, wäre möglich, wird aber nicht durchgeführt.

Sind ebene Oberflächen zu untersuchen, so ist das Scanning Vibrometer der Firma Polytec ein sehr wirkungsvolles Hilfsmittel. Es besteht aus einem Laser-Doppler-Vibrometer, das die Schwingungsgeschwindigkeit auf der Oberfläche der Gitarre berührungsfrei ermittelt. Die Oberfläche bedarf dazu in aller Regel keiner gesonderten Behandlung. Für die Messung wird der Dopplereffekt genutzt. Dieser erhöht oder verringert die Frequenz eines Laserstrahles, der auf die Oberfläche eines schwingenden Gegenstandes trifft und dort reflektiert wird. Die Abweichung, welche die Frequenz des reflektierten Strahles gegenüber derjenigen des Originalstrahles aufweist, ist ein Maß für die Geschwindigkeit des Zielpunktes. Nach der Demodulation liegt als Messsignal die Komponente der

Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) in Richtung des Laserstrahles vor. Durch entsprechende Ablenkung des Strahles mittels zweier Galvo-Spiegel kann ein vorgegebener Bereich "abgescannt" werden, ohne dass der Schnelleaufnehmer oder das Messobjekt bewegt werden müssen.

Gleichzeitig mit der Oberflächenschnelle wird die anregende Kraft gemessen und auf dieselbe Weise behandelt. Anregungs- und Antwortsignal werden FFT-analysiert. Als Zwischenergebnis liegt für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion Schnelle/Kraft, d.h. eine Admittanz, vor. Stimmen Mess- und Anregungspunkt überein, ist dies eine Punkt-Admittanz. Sind Mess- und Anregungspunkt verschieden, handelt es sich um eine Transfer-Admittanz. Da bei Messungen auf der Vorderseite der Anregungspunkt durch den Shaker verdeckt war, wurden ausschließlich Transfer-Admittanzen ermittelt.

Die Übertragungsfunktionen H_1 werden im Computer gespeichert und weiterbearbeitet. Für ausgewählte Frequenzen wird die Bewegung der Oberfläche als Funktion des Ortes dargestellt. Die Ergebnisse können auf mehrere Arten visualisiert und gegebenenfalls auch weiterverarbeitet werden. Auf eine Weiterbearbeitung, wie sie bei der Modalanalyse notwendig ist, wird hier verzichtet. So wird beispielsweise kein Curve-Fitting durchgeführt und es werden keine modalen Parameter bestimmt. Es sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass ein Export der Messdaten des Scanning Vibrometers als Universal File in das Modalanalyseprogramm StarModal möglich ist und von Twork (1997) bereits erfolgreich erprobt wurde. Eine reguläre Modalanalyse auf der Basis der Vibrometer-Daten wäre damit möglich.

Von dieser Option wird im hier betrachteten Zusammenhang jedoch bewusst kein Gebrauch gemacht. Es wird lediglich die mit dem Scanning Vibrometer gelieferte Standard-Software dazu genutzt, die wesentlichen "Operating Deflection Shapes" zu bestimmen und darzustellen. Da dieser Begriff international eingeführt ist, wird er im Folgenden beibehalten und mit "ODSs" abgekürzt. Er könnte mit "aktuelle Schwingungsmuster" übersetzt werden. Eine ODS charakterisiert, wie die Gitarre sich bei der aktuellen Frequenz, den aktuellen Randbedingungen und der aktuellen Art der Anregung bewegt. Dargestellt wird dabei die Komponente der Bewegung in Richtung des Laserstrahls. Die Ergebnisse sind in (m/s) pro N bzw. m/(Ns) bzw. s/kg skaliert und lassen sich auf verschiedene Arten visualisieren.

6.2. Versuchsbedingungen

Im Weiteren soll derjenige Bereich von Frequenzen interessieren, den die Grundtöne der Gitarrenklänge umfassen. Die Gitarre ist eine Oktave tiefer gestimmt als sie notiert wird. Wie der Kommentar von Hanson zur Arbeit von de Dayans und Behar (1983) belegt, wird diese Tatsache manchmal übersehen. Der Grundton der leeren E_2 -Saite hat die Frequenz 82 Hz. Beschränkt man sich darauf, als höchste Frequenz 500 Hz zu betrachten, dann ist damit der Grundton des Klanges noch erfasst, der auf der E_4 -Saite am 7. Bund entsteht. Die folgenden Untersuchungen werden sich in aller Regel auf diesen Frequenzbereich beschränken. Bei 200 bzw. 400 Frequenzlinien folgt daraus eine Frequenzauflösung von 2,5 Hz bzw. 1,25 Hz. Es wurde über vier bzw. acht Messungen gemittelt. Abweichend von dieser Festlegung wurde für eine Zusatzmessung die Frequenzbandbreite 1000 Hz mit nur 200 Linien gewählt, was auf eine Frequenzauflösung von 5 Hz führt.

Die Möglichkeit des schnellen Scannens verkürzt die Messdauer ganz wesentlich, so dass prinzipiell auch in situ gemessen werden kann; siehe hierzu Fleischer und Zwicker (1997, 1998) sowie Fleischer (1998). Allerdings ist dies nur auf Decke samt Hals möglich und erfordert die Anwesenheit einer zweiten Person. Da darüber hinaus der Zeitaufwand für eine in-situ-Messung doch beträchtlich ist, wurde entschieden, die Instrumente für die Reihenmessung in einer geeigneten Halterung

zu lagern und neben der Vorder- auch die Rückseite zu untersuchen. Um abschätzen zu können, welche Abweichungen zum realen Betrieb daraus zu erwarten sind, wurden zunächst in Vorversuchen anhand zweier Beispiele vergleichende Messungen durchgeführt.

6.2.1. In-situ-Messung

Im vorliegenden Abschnitt werden Referenzmessungen geschildert, bei denen die Schwingungen der vorderen Oberfläche von Gitarren am Körper des Spielers bestimmt wurden. Danach wurden verschiedene Halterungen für dieselbe Gitarre erprobt, wiederum Schwingungsmessungen durchgeführt und mit der Referenz verglichen. Schließlich erwies sich ein handelsüblicher Gitarrenständer als am besten geeignet (Abschnitt 6.2.2). In den Abschnitten 6.3 und 6.4 sind die Resultate einander gegenübergestellt.

Fig. 38 zeigt, wie eine Versuchsperson - im Beispiel Herr Dipl.-Ing. M. Schlägel, dem für seine Geduld gedankt sei - den Spieler simuliert und das Instrument Nr. 6a (Wandergitarre II) hält. Die Gitarre ruht auf dem linken Oberschenkel; ihr Boden hat losen Kontakt mit dem Bauch des Spielers. Dessen linke Hand hält den Hals im Bereich der ersten Bünde so, dass das Griffbrett nicht verdeckt wird. Der rechte Unterarm samt Hand und Ellbogen ruht auf der Seitenwand der Gitarre. Die "natürlichen" Randbedingungen, die eine Gitarre am Körper des Spielers vorfindet, werden weitgehend angenähert (Marshall (1986b)).

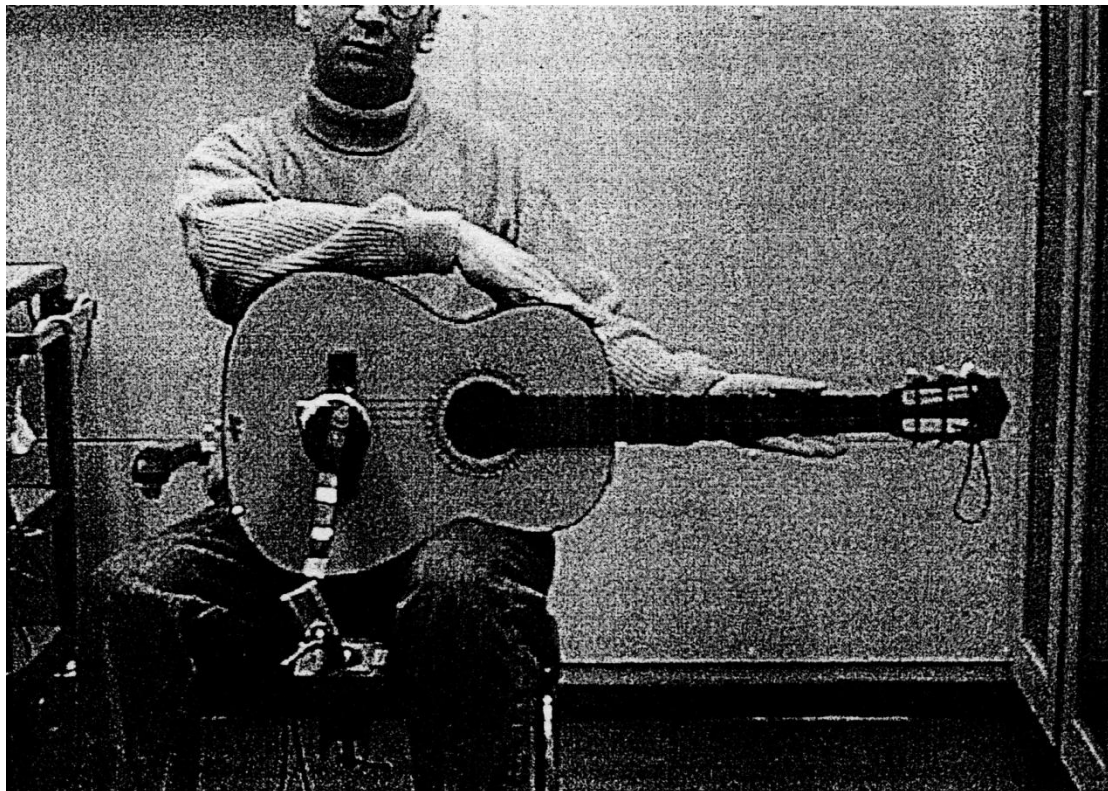


Fig. 38. Positionierung der Gitarre am Körper eines Spielers bei der in-situ-Messung der Schwingungen der Vorderseite.

Das Anregungssignal ist ein Pseudo-Rauschen, das ein Generator Hewlett Packard 331120A, über GPIB-Bus vom Computer gesteuert, erzeugt. Dieses Signal zeichnet sich dadurch aus, dass sein Spektrum Anteile nur bei denjenigen Frequenzen enthält, bei denen auch analysiert wird. Aufgrund

entsprechender Wahl der Phasen ist der Spitzenfaktor der Zeitfunktion sehr gering. Nach Verstärkung in einem Eigenbaugerät gelangt das Rauschsignal auf einen elektrodynamischen Schwingerreger Brüel & Kjaer 4810. Der Shaker drückt von vorne am Auflagepunkt der G-Saite unter einer ausreichend großen Vorlast auf den Steg. Ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer Brüel und Kjaer 8200 formt die eingeleitete Wechselkraft in ein Ladungssignal, ein Ladungsverstärker Brüel & Kjaer 2626 die Ladung in eine Spannung um. Dieses der Kraft proportionale elektrische Signal, überwacht mittels eines Oszilloskops Philips PM 3226, wird dem Computer zugeführt und FFT-analysiert. Es dient als Referenz für die Bildung der einzelnen Übertragungsfunktionen.

Wie in Fig. 38 zu erkennen ist, befindet sich der Shaker samt einem Teil der Haltevorrichtung vor dem Steg und der Decke der Gitarre. Ein Stück der Oberfläche wird dadurch abgeschattet und kann vom Laserstrahl nicht erfasst werden. Für diesen Teil des Gitarrenkörpers können keine Messdaten bestimmt werden. Einige der fehlenden Messwerte wurden in einer ergänzenden Messung nach einer minimalen Verschiebung des Schwingerregers bzw. der Gitarre nachgeholt. Der Rest wurde bei der Auswertung interpoliert.

6.2.2. Messung bei Lagerung im Gitarrenständer

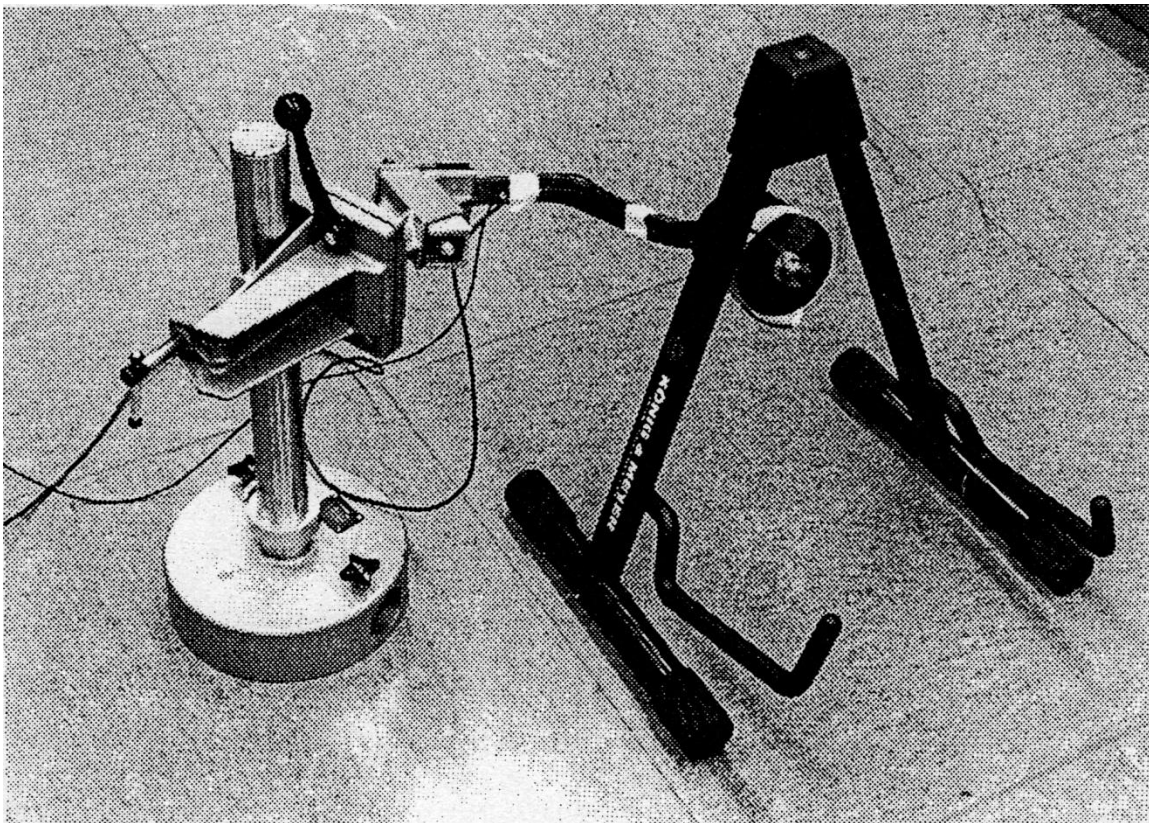


Fig. 39. Messung der ODSs; Gitarrenständer sowie Stativ mit Schwingerreger.

Die Betrachtungen des vorhergehenden Kapitels haben gezeigt, dass für die Abstrahlung von Schall die Schwingungen der Seitenwand (Zarge) nur eine untergeordnete Bedeutung haben. Es erscheint deshalb vertretbar, auf eine Untersuchung der Seitenwände zu verzichten. Den Boden der Gitarre nicht in die Berechnungen mit einzuziehen (siehe z.B. Fleischer (1995)), birgt dagegen die Gefahr, die abgegebene Schalleistung bei der Helmholtz-Schwingung zu unterschätzen bzw. sie bei der 00-Dipol-Schwingung zu überschätzen. So ist es im Hinblick auf weiterführenden Berechnungen anzustreben, nicht nur die Vorderseite, sondern auch die Rückseite der Gitarre zu untersuchen. Dazu

muss eine geeignete Haltevorrichtung gefunden werden. Diese ist so auszuwählen, dass sich die Ergebnisse der Messungen auf der Vorderseite möglichst wenig von denjenigen unterscheiden, die man in situ erhalten würde.

In Vorversuchen (Twork (1997)) wurde ein und dieselbe Gitarre auf verschiedene Arten gelagert - z.B. am Hals an einer Schnur aufgehängt, in einen Gitarrenständer gestellt oder mit einer Schraubzwinde gehalten - und erneut gemessen. Die Messprozedur wurde so lange wiederholt, bis eine ausreichende Übereinstimmung der Ergebnisse der Messungen in situ bzw. in einer geeigneten Halterung festgestellt wurde. Von den unterschiedlichen Halterungsarten, die erprobt wurden, hat sich die Verwendung eines Gitarrenständers des Herstellers König und Meyer am besten bewährt. Die Gitarre ist leicht schräg positioniert und ruht an drei Punkten. An zwei Stellen der Seitenwand liegt sie auf Kunststoffpolstern auf. Der Boden ist an einem Punkt unterstützt. Decke und Hals sind frei beweglich. In Fig. 39 ist der Gitarrenständer abgebildet. Man erkennt auch den Schwingerreger, der im Beispiel für die Messung auf der Rückseite der Gitarre positioniert ist.



Fig. 40. Positionierung der Gitarre im Gitarrenständer zur Messung der Schwingungen der Decke und des Halses.

Wie bei der in-situ-Messung drückt der Shaker mit ausreichender Andruckkraft am Auflagepunkt der G-Saite gegen den Steg. Dies ist aus dem unteren Teil von Fig. 40 für die Messung auf der Decke und dem Hals zu ersehen. Wenn auf der Rückseite gemessen werden soll, wird die Gitarre im Ständer um 180° gedreht. Mit ihr wird auch der Shaker so versetzt, dass er nach wie vor auf dieselbe Art gegen den Steg drückt (Fig. 39). Der Boden ist nun frei beweglich. Bei beiden Teilmessungen liefert die anregende Kraft die zeitliche Referenz. Somit besteht Grund zu der Annahme, dass die Phasenbeziehungen der Schwingungen, gemessen auf der Vorder- bzw. der Rückseite, festliegen.

6.3. Messungen an der spanischen Gitarre Nr. 4

Im vorliegenden Abschnitt sind Resultate zweier Messreihen nach Twork (1997) dargestellt, die an der Gitarre Nr. 4 (Hopf) unter vergleichbaren Bedingungen, jedoch unterschiedlichen Lagerungen entstanden sind. Es wurde ein Raster von etwa $3 * 3 \text{ cm}^2$ verwendet, was auf ungefähr 250 Punkte für jede Messung führt. Für den Vergleich wird zunächst die Summen-Übertragungsfunktion $H_{1\text{gem}}$, gemittelt über sämtliche Messpunkte auf der Vorderseite, herangezogen (Abschnitt 6.3.1). Die zugehörigen ODSs sind in Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3 zusammengestellt.

6.3.1. Summen-Übertragungsfunktionen

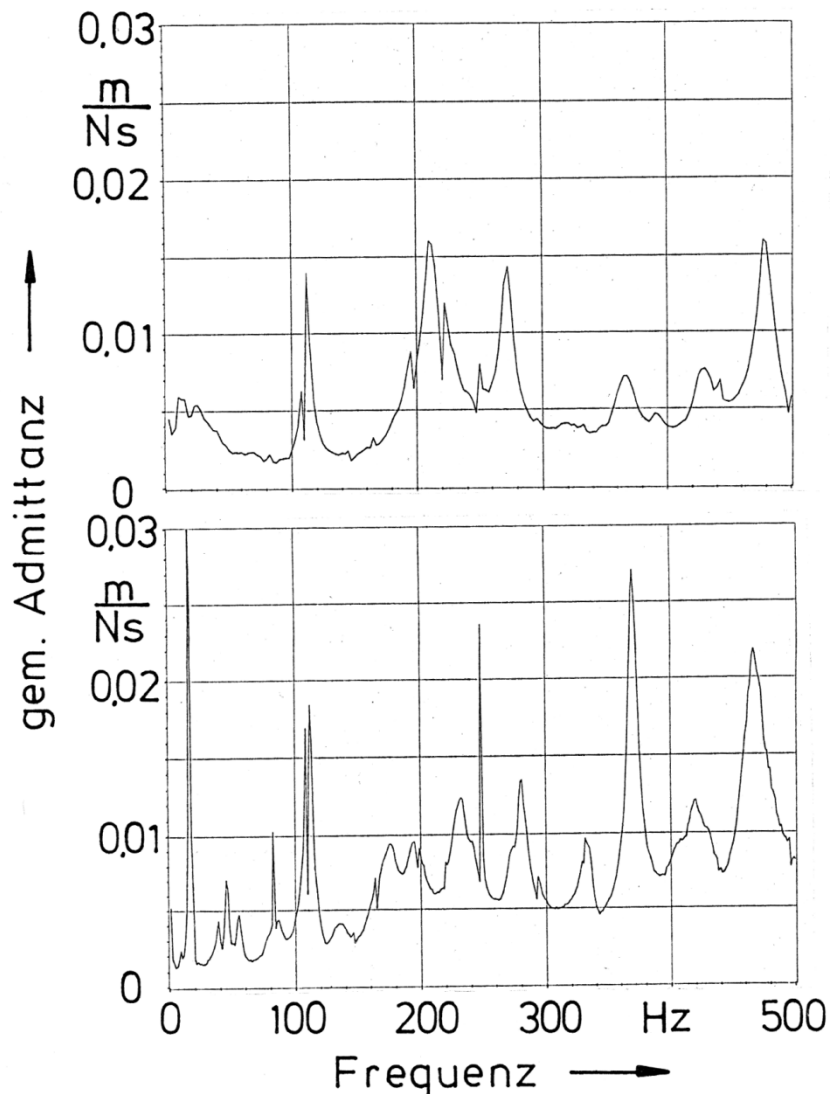


Fig. 41. Summen-Übertragungsfunktion der spanischen Gitarre Nr. 4 (Hopf), dargestellt als gemittelte Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

Oben: In-situ-Messung;
unten: Messung im Gitarrenständer.

Ein globaler Vergleich der Messwerte kann auf der Basis der Summen-Übertragungsfunktionen $H_{1\text{gem}}$ durchgeführt werden. Sie stellen das Mittel sämtlicher Einzel-Übertragungsfunktionen H_1 für einen Messdurchgang dar. Da es sich hierbei um Transfer-Admittanzen handelt, ist die Sum-

men-Übertragungsfunktion eine gemittelte Admittanz der Dimension $m/(Ns)$ (bzw. m/s pro N oder s/kg). Maxima deuten auf starke Bewegungen des Messobjektes hin. Für die Darstellung wurde hier ein linearer Maßstab der Ordinate verwendet.

In Fig. 41 sind die Summen-Übertragungsfunktionen für die Messung in situ (oben) bzw. im Gitarrenständer (unten) zusammengestellt. Ein Vergleich zeigt, dass die Spitzen sich im unteren Teil-diagramm schärfer ausbilden als im oberen Diagramm. Dies ist vor allem unterhalb von 100 Hz zu beobachten. Da der Bereich tiefer Frequenzen im vorliegenden Zusammenhang weniger interessiert, sollen diese Diskrepanzen toleriert werden. Offenbar prägen sich die ODSs klarer aus, wenn die Gitarre im Gitarrenständer gelagert wird. Insbesondere der Hals findet andersartige Randbedingungen vor. Hält der Spieler die Gitarre, so dämpft er die Schwingungen derjenigen Teile des Instruments, die Kontakt zum Körper haben; siehe hierzu Fleischer und Zwicker (1997). Der Vergleich der Maxima oberhalb von 100 Hz zeigt innerhalb gewisser Grenzen Übereinstimmung der Frequenzlagen, in denen Maxima beobachtet werden. Daraus ist zu schließen, dass für das Instrument die Randbedingungen bei Kontakt mit dem Körper nicht gänzlich andersartig sind als diejenigen, wie sie bei Lagerung im Gitarrenständer vorliegen.

Vereinfachend kann festgestellt werden, dass vor allem die Höhe der Maxima in den Summen-Übertragungsfunktionen verschieden ist. Deren Frequenzlagen zeigen jedoch eine gewisse Übereinstimmung. Danach dürften sich die Randbedingungen in situ und im Gitarrenständer vor allem in Hinsicht auf die Dämpfung unterscheiden. Bezüglich der Masse- oder Feder-Einflüsse differieren sie offenbar weniger ausgeprägt.

6.3.2. Operating Deflection Shapes in situ

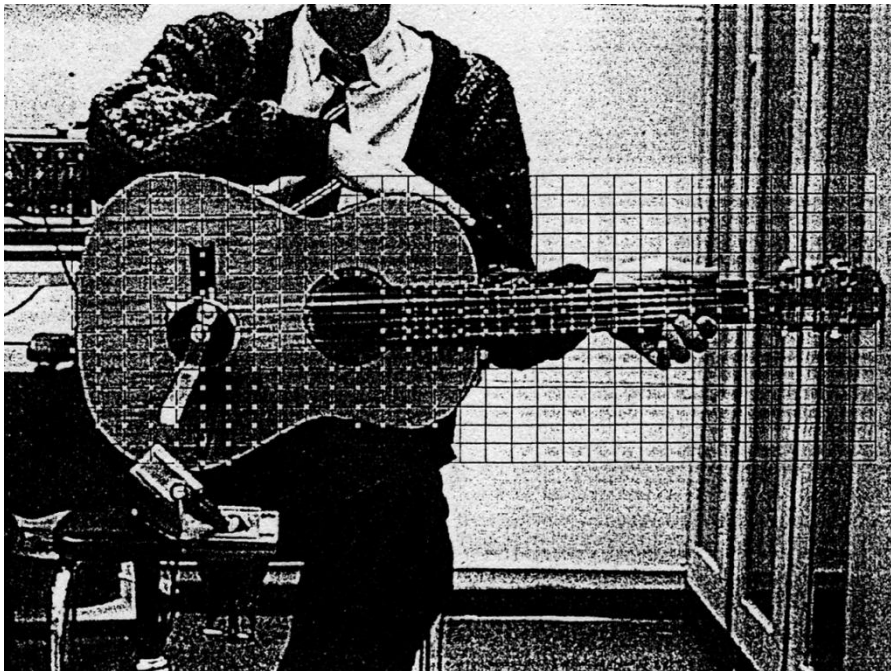


Fig. 42. In-situ-Messung der Schwingungen der Decke und des Halses der spanischen Gitarre Nr. 4 (Hopf).

Fig. 42 zeigt, wie die Hopf-Gitarre bei der in-situ-Messung gehalten wurde. Das Messgitter samt den abgetasteten Punkten (hell markiert) ist eingezeichnet. Anhand der Maxima der Summen-Übertragungsfunktion von Fig. 41 oben wurden diejenigen Frequenzen bestimmt, bei denen der Rechner die ODSs ermitteln soll.

Die Ergebnisse dieser Messung lassen sich auf unterschiedliche Arten darstellen. Im Folgenden wird eine Visualisierung gewählt, bei welcher der Betrag der Schwinggeschwindigkeit in Graustufen umgesetzt wird. Er ist auf die anregende Kraft bezogen, so dass ein Vergleich von Absolutwerten der Schwinggeschwindigkeit, bezogen auf eine am Steg angreifende Einheitskraft, möglich ist. Fig. 43 zeigt einen Original-Ausdruck. Die Helligkeit ist ein Maß für die Schwinggeschwindigkeit, die an der betreffenden Stelle bei der angegebenen Frequenz von der Kraft 1 Newton hervorgerufen wird. Der Maßstab links im Bild erlaubt die zahlenmäßige Zuordnung. Im gewählten Beispiel reicht die Skale bis $0,01 \text{ m/(Ns)}$ und ist so gewählt, dass auch die Schwingungen des Halses deutlich sichtbar werden. Unter dem transparenten Schwingungsbild erkennt man die Gitarre und wie sie gehalten wurde. Somit ist eine Zuordnung von Schwingungsbäuchen und -knoten zum betreffenden Ort auf dem Instrument unmittelbar möglich.

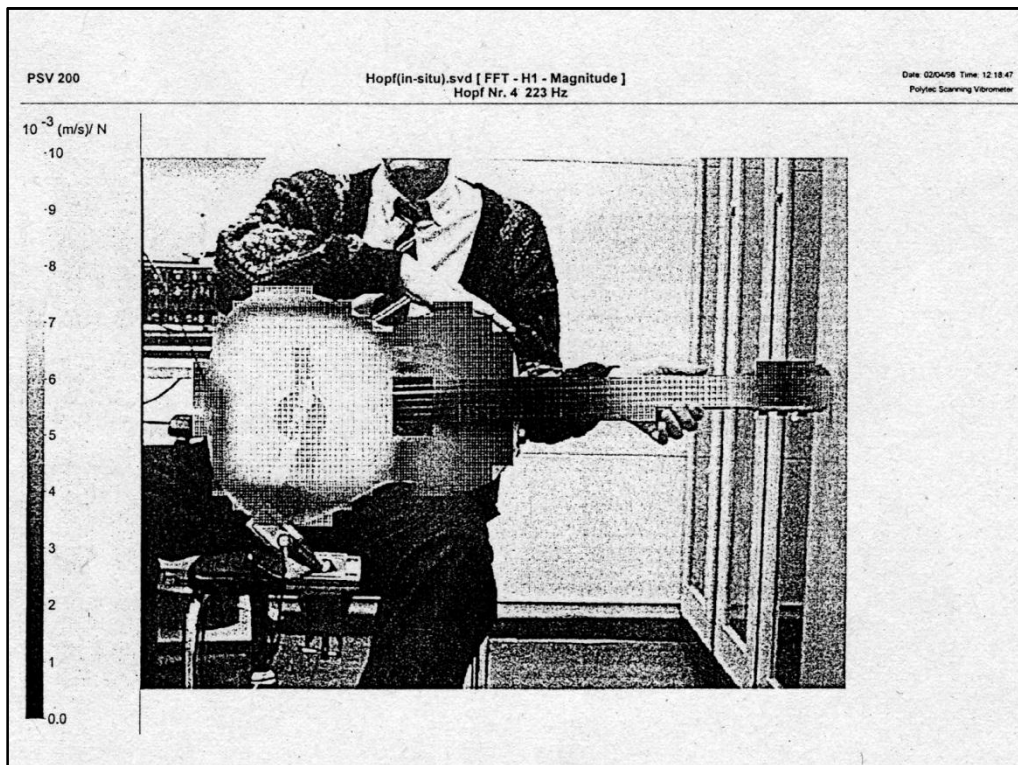


Fig. 43. Schwingungsform (ODS) der spanischen Gitarre Nr. 4 (Hopf) für die Frequenz 223 Hz.

Bei den sechs ODSs, die in Fig. 44 zusammengestellt sind, ist der Maßstab so gewählt, dass die Schwingungsmuster der Decke gut erkennbar werden. Die Darstellung ist dieselbe wie in Fig. 43 und ähnelt Chladni'schen Klangfiguren (Chladni (1787)), die mit schwarzem Sand auf einem hellen Instrument entstehen würden. Der Sand sammelt sich an denjenigen Stellen des Instruments, die sich in Ruhe befinden. Weiße Bereiche charakterisieren demnach Schwingungsbäuche, während schwarze Bereiche auf Schwingungsknoten schließen lassen.

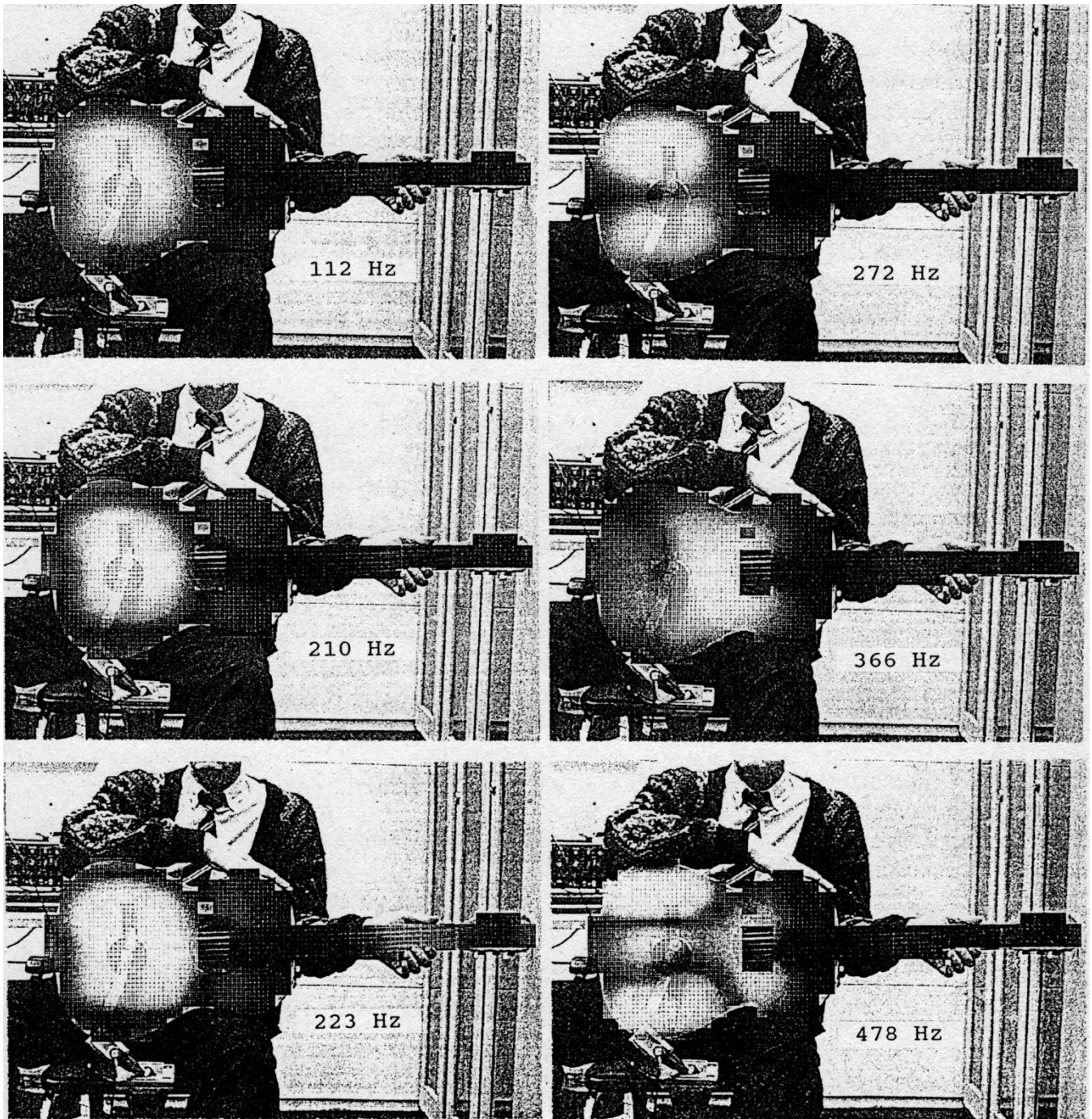


Fig. 44. Schwingungsformen und -frequenzen der spanischen Gitarre Nr. 4 (Hopf) bei Anregung am Steg.

In Fig. 44 sind unterschiedliche Schwingungsbilder dargestellt, wie man sie im Bereich von Frequenzen bis 500 Hz erhält. Die drei ersten unterscheiden sich nur unwesentlich; ihnen ist ein ausgeprägter Schwingungsbauch in der Nähe des Steges zu Eigen. Bei 272 Hz ist eine antimetrische Schwingungsform zu erkennen. Bei 366 Hz bilden sich Knotenlinien quer zu den Saiten aus, bei 478 Hz sind auch Knoten parallel zu den Saiten zu beobachten.

6.3.3. Vergleich der ODSs bei unterschiedlicher Lagerung

Die Resultate der Schwingungsmessung im Gitarrenständer sind ausführlich im folgenden Kapitel dargestellt. Für die vorliegende Aufgabenstellung sind Typ und Frequenzlage der Schwingungen von großer Bedeutung, die sich für die beiden unterschiedlichen Lagerungsarten ergeben. Fig. 45 zeigt eine Auswertung vergleichbarer experimenteller Ergebnisse für die Hopf-Gitarre. Wiederum ist eine Darstellung nach Art Chladnischer Klangfiguren so gewählt, dass sich Schwingungsbäuche weiß, Schwingungsknoten dagegen schwarz darstellen.

Die obere Reihe von Fig. 45 gilt für die Messung, bei der ein Spieler die Gitarre in sitzender Spielhaltung wie in Fig. 42 auf dem Oberschenkel hält; siehe hierzu auch Abschnitt 6.3.2. In vielen Fällen ergibt die Auswertung für dicht benachbarte Maxima Schwingungsmuster, die sich nur marginal unterscheiden. Beispielsweise differieren sie in der Bewegung des Kopfes oder in der gleich- bzw. gegenphasigen Bewegung des Bodens, die bei dieser Messung nicht erfasst wird. Unter den Schwingungsbildern sind deshalb häufig mehrere Frequenzen angegeben. Derjenige Wert, auf den sich die Schwingungsform tatsächlich bezieht, ist dann durch Fettdruck hervorgehoben. Man erkennt die Schwingungsarten, die nach Abschnitt 4.3 für spanische Gitarren zu erwarten sind. Als die drei ersten Arten findet man in aufsteigender Reihenfolge die Helmholtz-, die 00- und die 01-Schwingung. Oberhalb von 300 Hz reihen sich weitere Schwingungsformen immer dichter aneinander.

Darunter sind in Fig. 45 die Ergebnisse der Messung zusammengestellt, bei der das Instrument im Gitarrenständer ruht. Die Bilder sind so angeordnet, dass hinreichend übereinstimmende Formen und Frequenzen sich direkt übereinander befinden. Die Anzahl der unterscheidbaren Schwingungsarten ist größer als bei der in-situ-Messung. Zusätzlich erscheinen bei 232 Hz/249 Hz die 10-Schwingung, bei der sich der Hals stark mitbewegt, und bei 332 Hz die 20-Schwingung. Diese beiden Schwingungsarten sind durch Bewegungen des Halses mitgeprägt, die sich im Gitarrenständer wesentlich deutlicher ausbilden, als wenn der Spieler den Hals mit seiner Griffhand umfasst. Demzufolge stellt die Lagerung im Gitarrenständer den "worst case" dar, bei dem Schwingungen des Halses übertrieben deutlich zutage treten. Bei den übrigen Schwingungsarten stimmen sowohl die Frequenzen als auch die Formen bei beiden Messungen weitgehend überein.

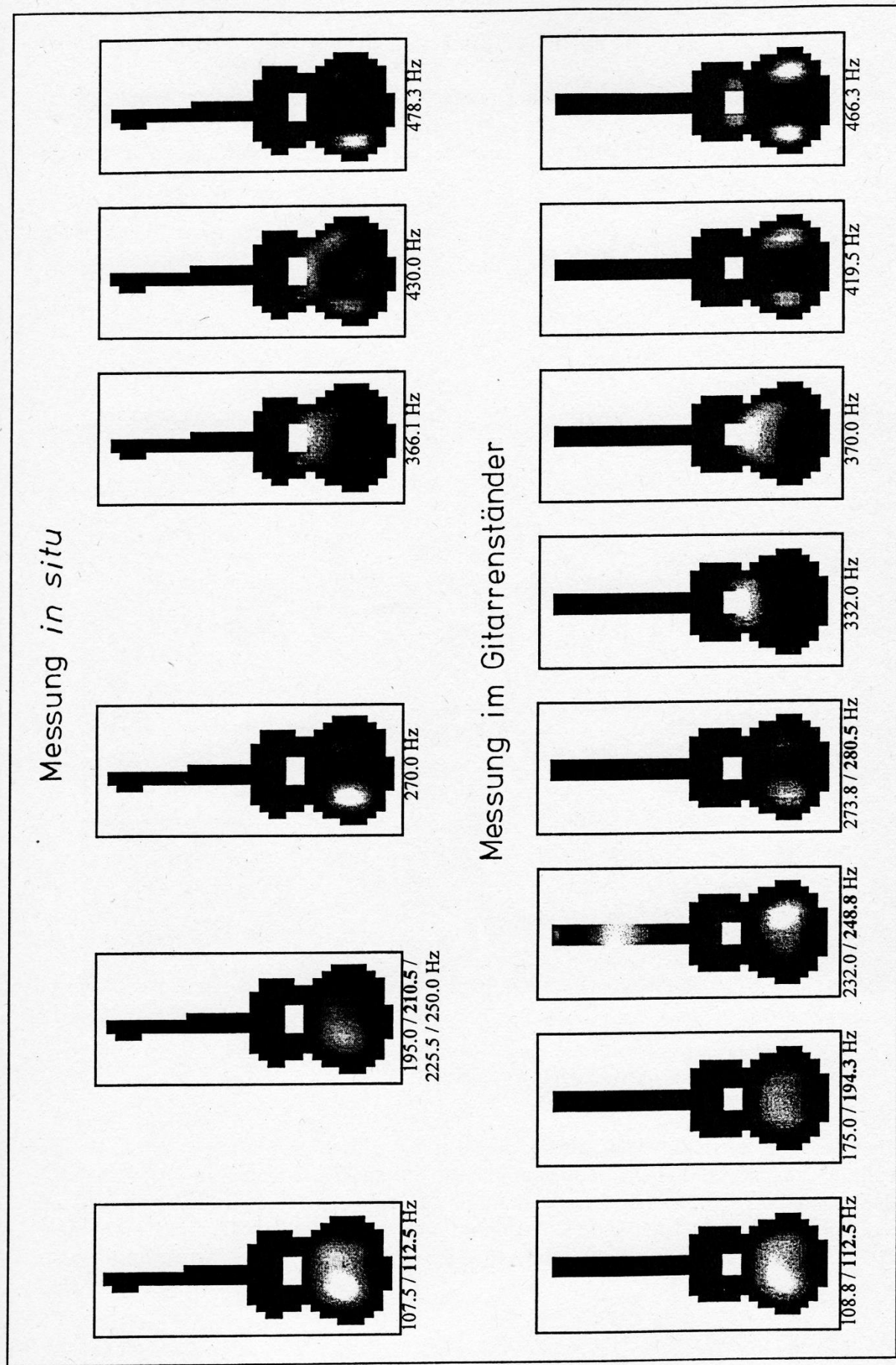


Fig. 45. Schwingungsformen und -frequenzen der spanischen Gitarre Nr. 4 (Hopf) bei Anregung am Steg.
 Oben: Messung am Körper (*in situ*); unten: Lagerung im Gitarrenständer.

6.4. Messungen an der spanischen Gitarre Nr. 6a

Im Folgenden werden die Resultate weiterer Messungen an der spanischen Gitarre Nr. 6a (Wandergitarre II von Höfner) verglichen, wie man sie für die Messung am Körper eines Spielers bzw. im Gitarrenständer erhält. Es wurde bis 1000 Hz gemessen.

6.4.1. In-situ-Messung

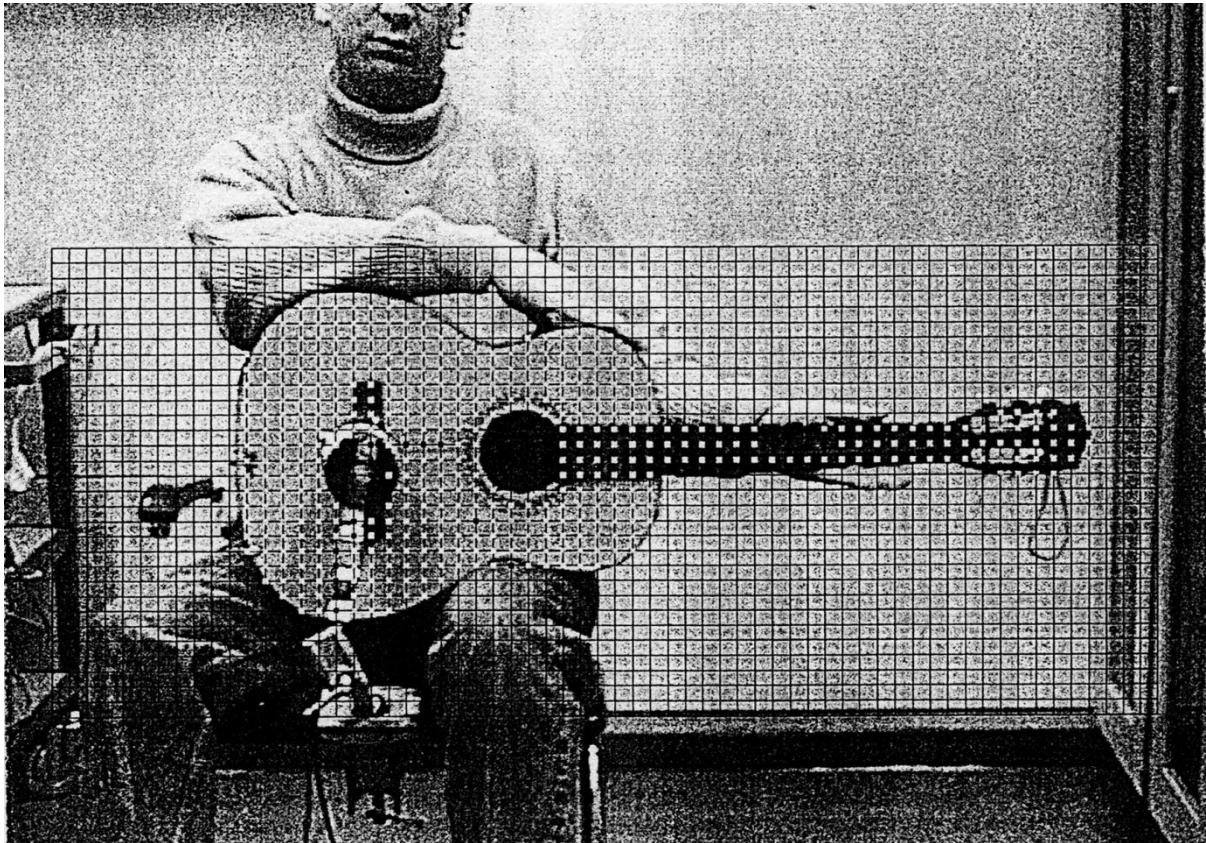


Fig. 46. In-situ-Messung der Schwingungen der Decke und des Halses der Wandergitarre II (Nr. 6a).

Fig. 46 ist zu entnehmen, wie die Gitarre während des Messvorganges gehalten wurde. Das Messgitter ist eingezeichnet. Wiederum erkennt man deutlich, dass der Shaker, der die Gitarre am Steg zum Schwingen bringt, einen Teil der Oberfläche abdeckt. Die fehlenden Messpunkte werden bei der späteren Auswertung interpoliert. Die Summen-Übertragungsfunktion $H_{1\text{gem}}$, die man durch Mittelung sämtlicher gemessener Admittanzen für Frequenzen bis 1000 Hz erhält, ist in Fig. 47 wiedergegeben.

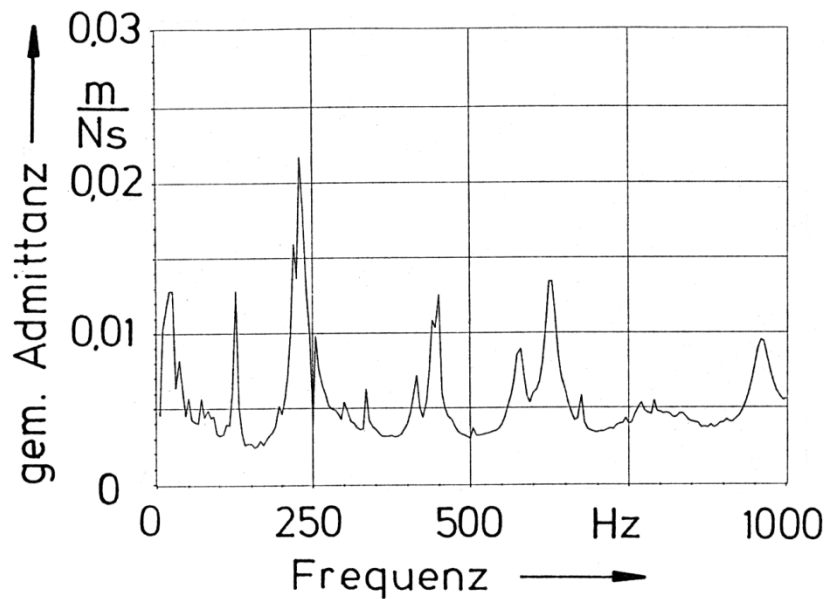


Fig. 47. Summen-Übertragungsfunktion der Wandergitarre II (Nr. 6a), gemessen in situ und dargestellt als gemittelte Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

Einige der Operating Deflection Shapes, die sich für die Maxima der Summen-Übertragungsfunktion nach Fig. 47 ergeben, sind in den zusammengehörigen Fig. 48 und 49 dargestellt. Das obere Bild in Fig. 48 zeigt einen Original-Ausdruck, auf dem man neben dem Schwingungsbild für die Frequenz 627 Hz auch den aktuellen Maßstab erkennt, mit dessen Hilfe eine Zuordnung der Helligkeitswerte zu derjenigen Schwinggeschwindigkeit möglich ist, die eine Kraft von 1 Newton hervorruft. In den übrigen Schwingungsbildern ist der Abbildungsmaßstab nicht einheitlich, sondern immer so gewählt, dass das jeweilige Schwingungsmuster der Decke möglichst anschaulich wiedergegeben wird.

Die vier Schwingungsbilder im unteren Teil von Fig. 48 ähneln sich stark; sie sind durch eine großflächige, konphase Bewegung der Decke in der Nähe des Steges geprägt. Eine feinere Unterteilung der Decke wird erst in den weiteren Schwingungsmustern erkennbar, die in Fig. 49 zusammengestellt sind. Sie bildet sich am deutlichsten bei der Frequenz 960 Hz (rechts unten) aus. Hier können acht helle Bereiche voneinander unterschieden werden, die durch dunkel dargestellte Knotenlinien voneinander getrennt sind. In diesen Bereichen bewegt sich die Decke vergleichsweise stark. Der Vergleich mit Fig. 44 lässt die Tendenz erkennen, dass vergleichbare Schwingungsmuster bei der (kleineren) Wandergitarre Nr. 6a für höhere Frequenzen auftreten, als dies bei der (größeren) spanischen Gitarre Nr. 4 der Fall ist.

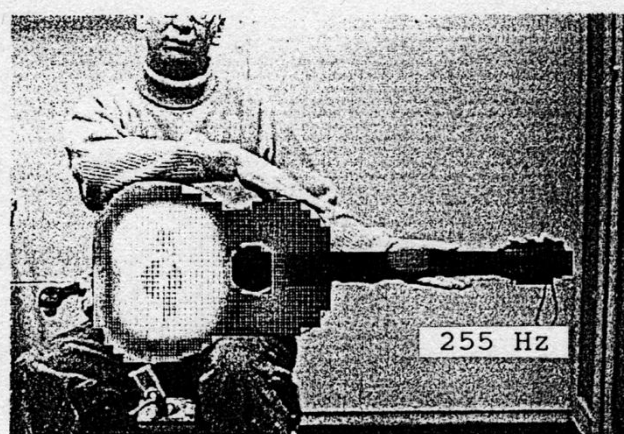
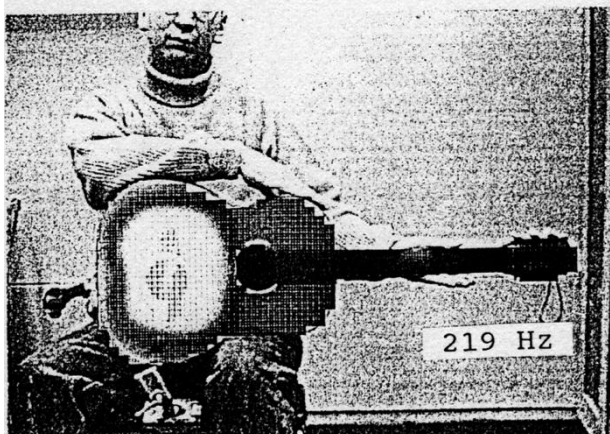
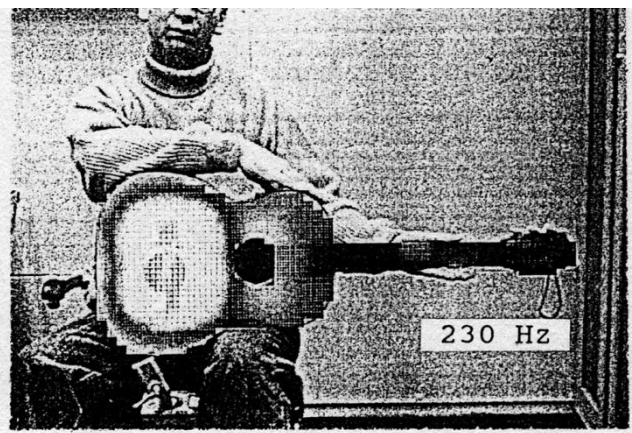
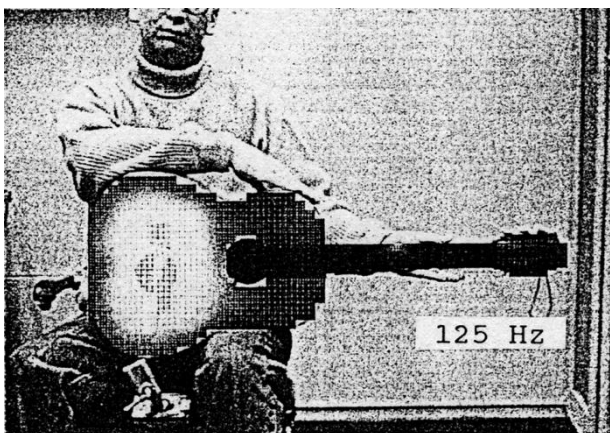
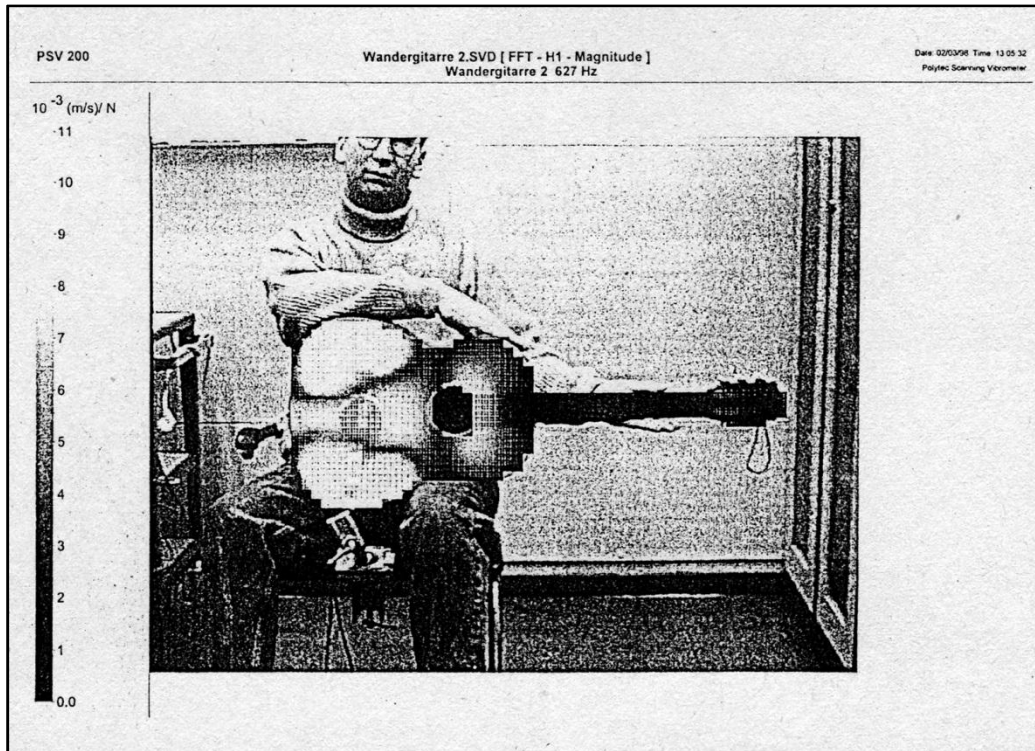


Fig. 48. Schwingungsformen und -frequenzen der Wandergitarre II (Nr. 6a) bei Messung in situ und Anregung am Steg; Fortsetzung in Fig. 49.
Im oberen Bild ist der Maßstab abgebildet, der sich auf die Schwingung bei der Frequenz 627 Hz bezieht.

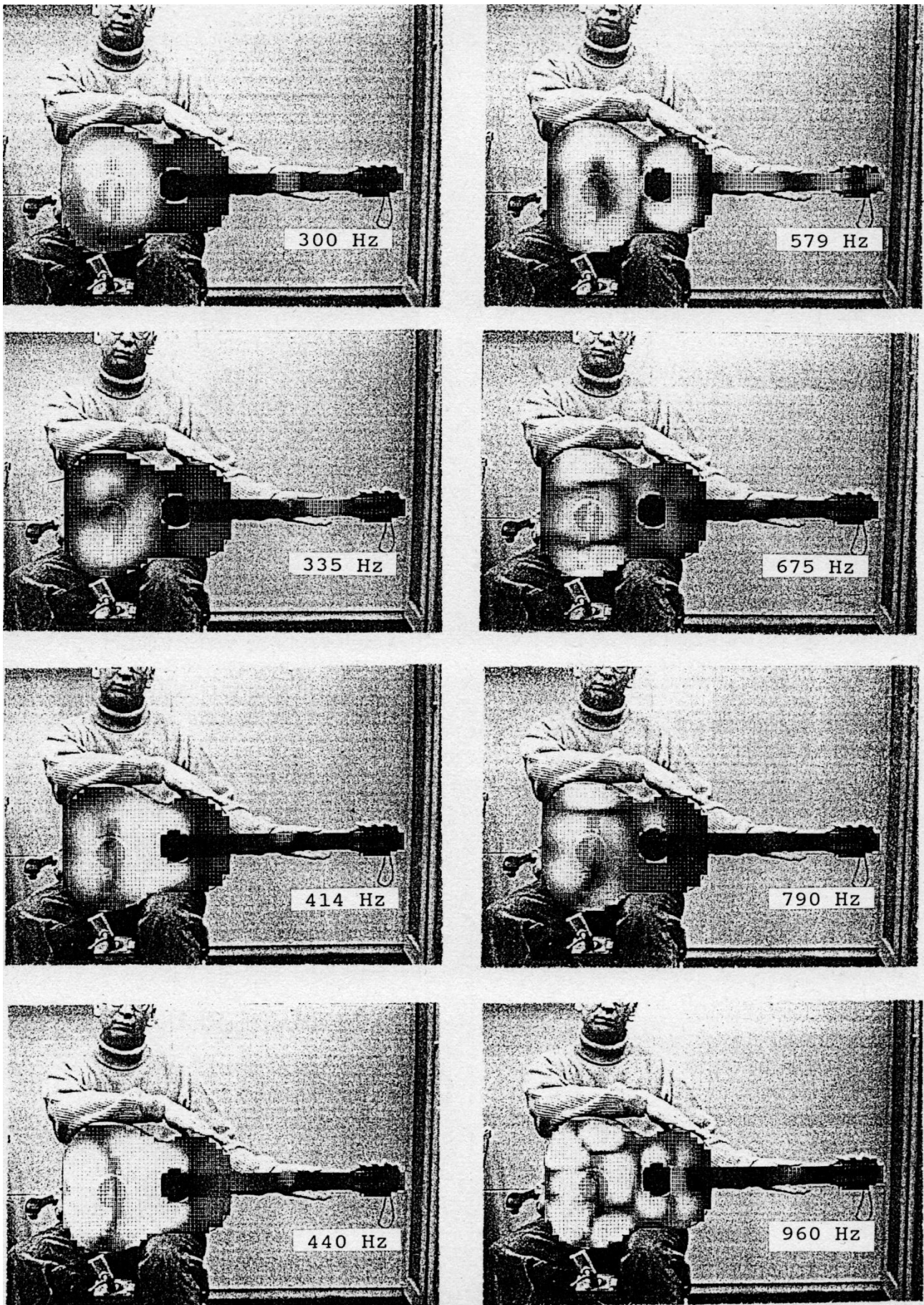


Fig. 49. Schwingungsformen und -frequenzen der Wandergitarre II (Nr. 6a) bei Messung in situ und Anregung am Steg; Fortsetzung von Fig. 48.

6.4.2. Messung bei Lagerung im Gitarrenständer

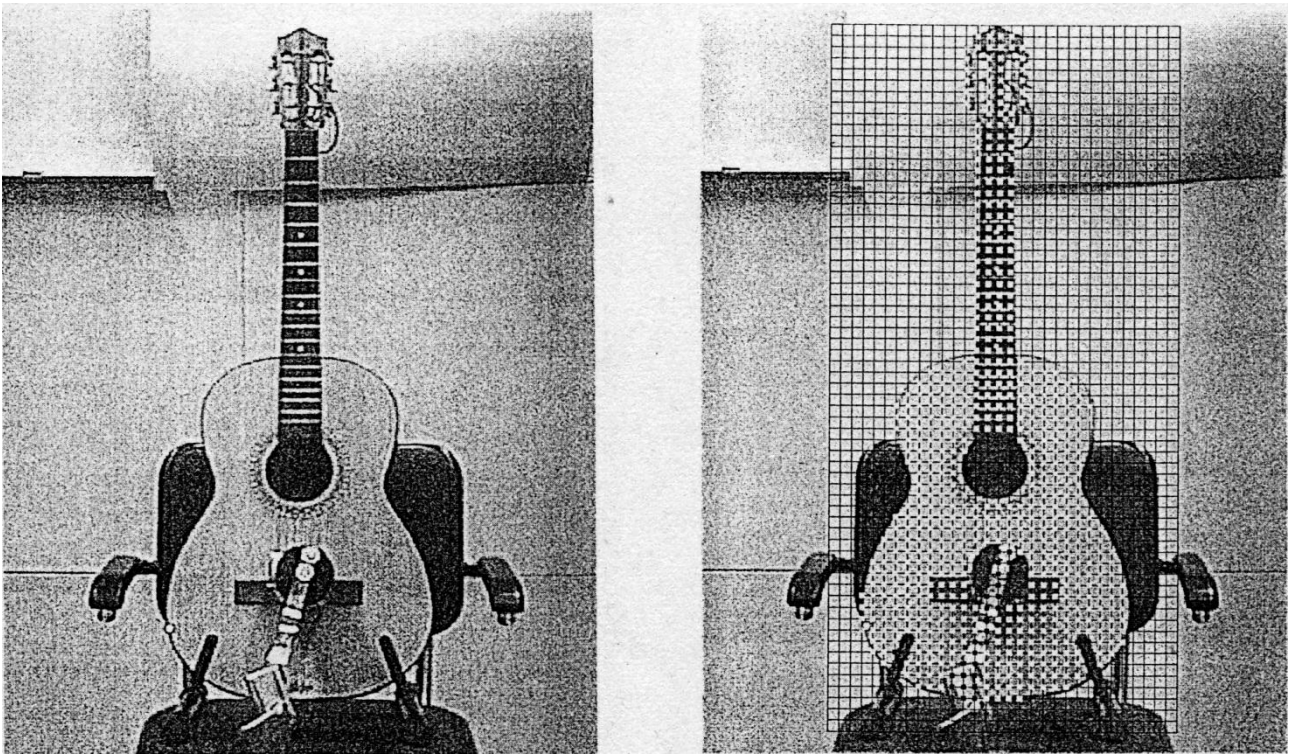


Fig. 50. Messung der Schwingungen der Decke und des Halses der Wandergitarre II (Nr. 6a) bei Lagerung im Gitarrenständer; rechts ist das Messgitter zu erkennen.

In Fig. 50 ist dieselbe Gitarre abgebildet, wie sie im Gitarrenständer gelagert ist. Um möglichst wenig Änderungen gegenüber der im vorhergehenden Abschnitt 6.4.1 beschriebenen in-situ-Messung vornehmen zu müssen, wurde der Shaker am Stuhl belassen, auf dem vorher eine Person die Gitarre gehalten hatte. In der rechten Abbildung ist dem Videobild das Messgitter überlagert. Wiederum wurde im Frequenzbereich bis 1000 Hz angeregt und analysiert.

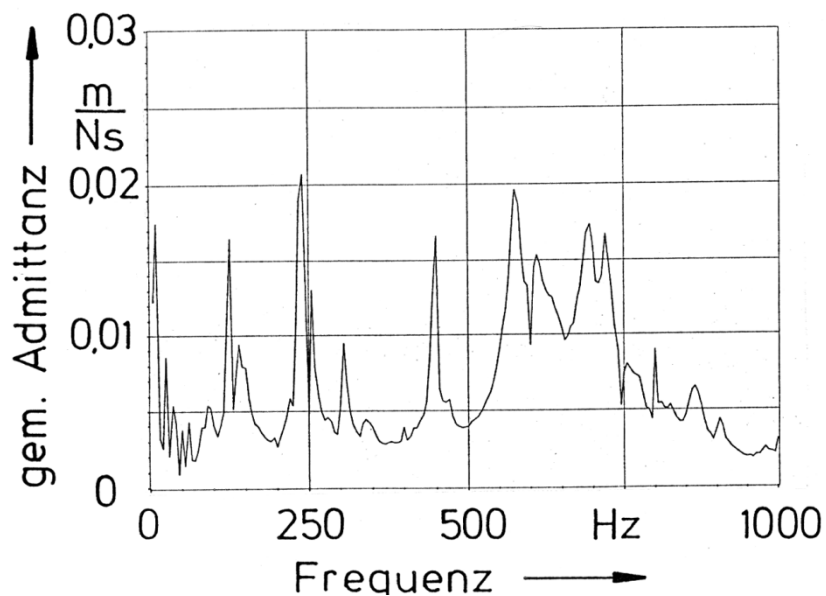


Fig. 51. Summen-Übertragungsfunktion der Wandergitarre II (Nr. 6a), gemessen bei Lagerung im Gitarrenständer und dargestellt als gemittelte Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

Die zugehörige Summen-Übertragungsfunktion $H_{1\text{gem}}$ ist in Fig. 51 dargestellt. Ein Vergleich mit Fig. 47 bestätigt die Erwartung: Überhöhungen im Admittanz-Frequenzgang bilden sich stärker aus, wenn die Gitarre im Gitarrenständer gelagert ist, als wenn sie am Körper gehalten wird. Ein Schwingungsbild, bei dem die Bewegung des Halses besonders deutlich wird, ist samt dem Maßstab in Fig. 52 wiedergegeben.

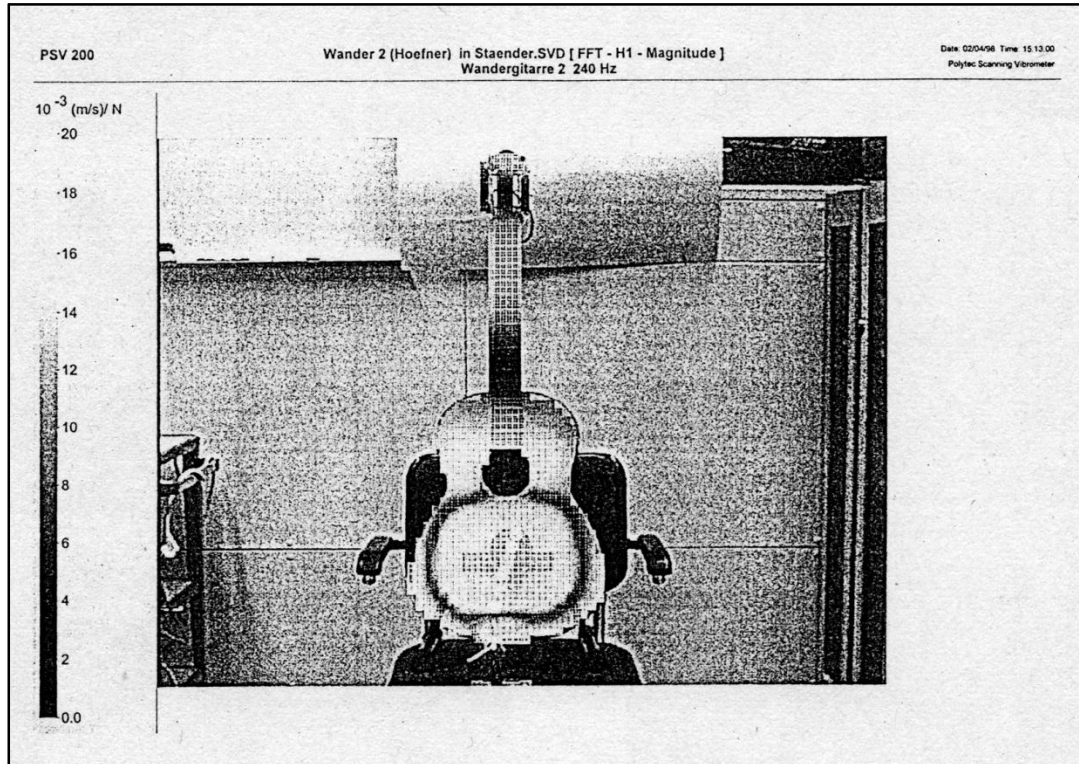


Fig. 52. Schwingungsform der Wandergitarre II (Nr. 6a) bei Lagerung im Gitarrenständer. Links im Bild ist der Maßstab abgebildet, der sich auf die Schwingung bei der Frequenz 240 Hz bezieht.

Fig. 53 zeigt eine Auswahl der Schwingungsformen, die an der Gitarre Nr. 6a bei Lagerung im Gitarrenständer gemessen werden konnten. Um besser mit den in-situ-Messungen (Fig. 48 und 49) vergleichen zu können, ist die Gitarre liegend abgebildet. Die Maßstäbe sind unterschiedlich und jeweils so gewählt, dass die Schwingungen der Decke gut zu erkennen sind. Schwingungen des Halses, wie sie sich in Fig. 52 deutlich abzeichnen, treten in Fig. 53 weniger klar hervor.

Ein direkter Vergleich mit den Schwingungen derselben Gitarre, gemessen am Körper eines Spielers, zeigt weitgehende Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Decke. Erwartungsgemäß prägen sich die Schwingungen des Halses dagegen stärker aus, wenn der Hals - wie bei Lagerung im Gitarrenständer - frei beweglich ist, als wenn der Spieler ihn mit der Griffhand umfasst hält. Eine direkte Gegenüberstellung der wesentlichen Schwingungsbilder für die beiden Arten der Lagerung findet sich in Tab. VIII im abschließenden Kapitel 9.

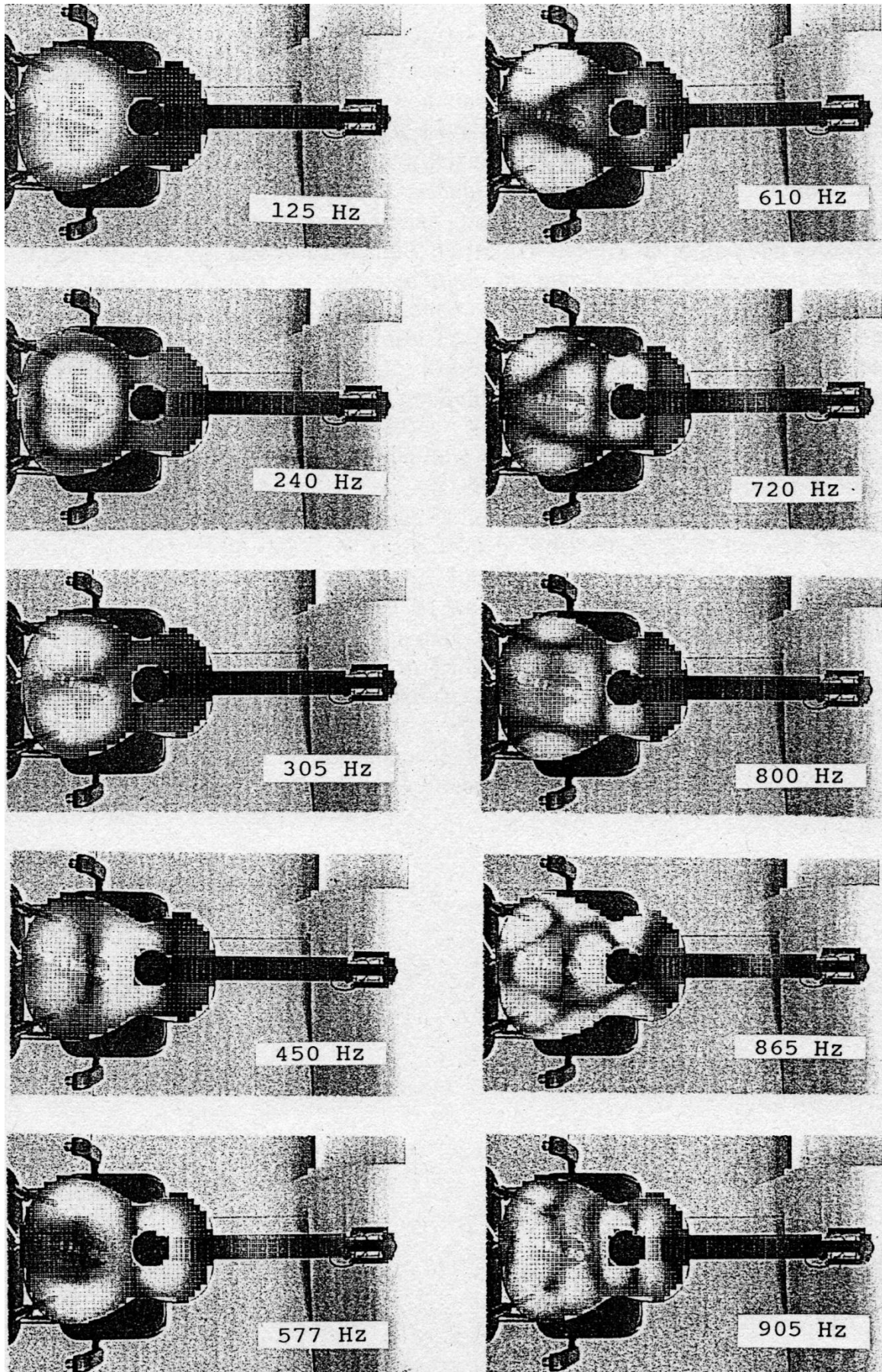


Fig. 53. Schwingungsformen und -frequenzen der Wandergitarre II (Nr. 6a) bei Lagerung im Gitarrenständer und Anregung am Steg.

6.5. Bewertung der Ergebnisse

Am Beispiel der beiden spanischen Gitarren Nr. 4 und Nr. 6a wurden die Auswirkungen untersucht, welche unterschiedliche Lagerungen der Gitarre auf die ODSs haben können. Dazu wurde das Instrument das eine Mal von einem Spieler am Körper gehalten, das andere Mal in einem Gitarrenständer gelagert. Die Ergebnisse von Messungen wurden miteinander verglichen, in denen Schwingungen der Vorderseite (Decke und Hals) erfasst wurden. Der Vergleich zeigt, dass im Allgemeinen die Schwingungen der Decke im Hinblick auf Form und Frequenz weitgehend übereinstimmen. Etwas größere Abweichungen ergeben sich bei den Schwingungen des Halses. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Gitarrenständer die Schwingungen offenbar weniger bedämpft, als dies der Körper des Spielers tut. Die Auslenkungen sind deshalb in aller Regel kleiner, wenn die Gitarre am Körper gehalten wird, als wenn sie im Gitarrenständer nur an drei Punkten aufgelagert ist. Diese Beobachtungen stimmen prinzipiell mit denen überein, die Marshall (1986a) an Violinen gemacht hat. Erwartungsgemäß prägt sich der Unterschied am deutlichsten bei den Halsschwingungen aus.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass bei Lagerung des Instruments im Gitarrenständer einige Schwingungsarten klarer erkennbar werden, als wenn der Spieler die Gitarre am Körper hält. Dies gilt insbesondere für Schwingungen, an denen der Hals stark beteiligt ist. Die Schwingungsformen, die eine in-situ-Messung ergibt, sind in aller Regel auch bei der Messung im Gitarrenständer nachweisbar. Im Bereich bis 500 Hz, der im Folgenden untersucht werden soll, stimmen die Schwingungsfrequenzen so weit überein, dass die Unterschiede toleriert werden können. Es wurde daher entschieden, bei Serienmessungen die Instrumente im Gitarrenständer zu untersuchen. Neben dem Zeitgewinn und der Schonung des menschlichen Dummys bietet sich dadurch der Vorteil, dass die Schwingung auch auf der (freien) Rückseite der Gitarre gemessen werden kann. Dadurch wird es unter anderem möglich, die 00-Dipol- von der 00-Monopol-Schwingung zu unterscheiden. Eine Messreihe dieser Art an fünfzehn Instrumenten wird im folgenden Kapitel besprochen.

7. SERIENMESSUNG AN FÜNFZEHN GITARREN

Entsprechend den Überlegungen des vorhergehenden Kapitels werden die Vorderseite (Decke samt Hals) sowie auch die Rückseite (Boden samt Hals) einer jeden Gitarre untersucht. Dies geschieht in zwei Schritten. Die Gitarre wird gemäß Fig. 54 im Gitarrenständer gelagert. Links ist die Messung der Vorderseite, rechts die der Rückseite dargestellt. Man erkennt das Messgitter. Diejenigen Punkte, an denen tatsächlich gemessen wurde, sind hell hervorgehoben. In der Summen-Übertragungsfunktion $H_{1\text{gem}}$ wurden für die Messungen auf der Vorder- bzw. Rückseite getrennt diejenigen Frequenzen bestimmt, bei denen das Verhältnis von gemittelter Oberflächenschnelle zu anregender Kraft besonders groß ist. Die Ergebnisse werden im Drahtmodell visualisiert; sie sind für jede Gitarre in einem Diagramm zusammengestellt.

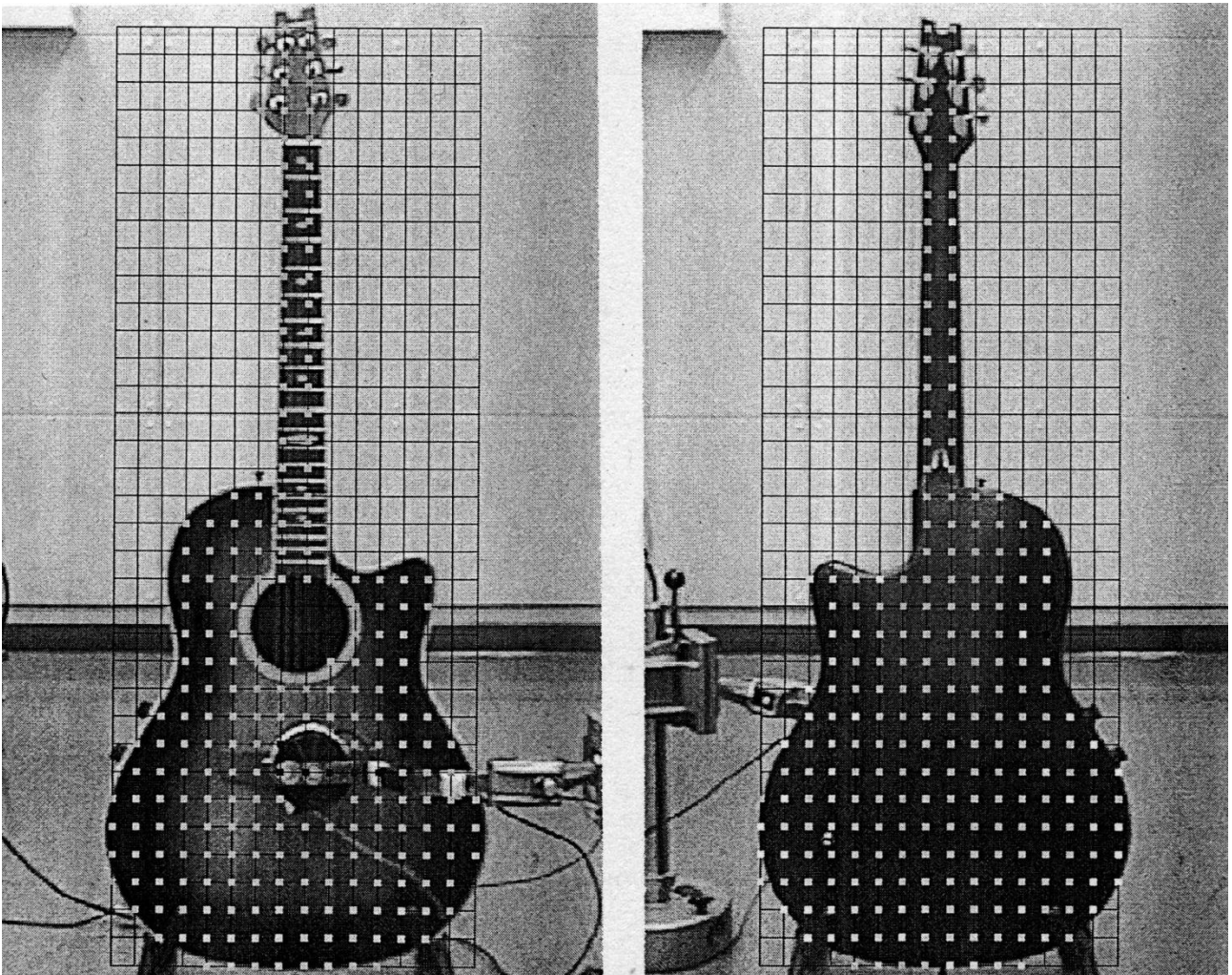


Fig. 54. Lagerung der Gitarre Nr. 11 (Applause) in einem Gitarrenständer bei den Serienmessungen der Schwingungen der Vorderseite (links) bzw. der Rückseite (rechts). Das Messgitter ist eingezeichnet, die Messpunkte sind hell markiert.

7.1. Experimentelle Ergebnisse: Summen-Übertragungsfunktionen

Es werden einige Gitarren ausgewählt, die als repräsentativ für ihre Gruppe gelten können. Es sind dies

- das Instrument Nr. 3 (Shiro) aus der Gruppe der spanischen Gitarren,
- das Instrument Nr. 7 (Gewa) aus der Gruppe der Barockgitarren,
- das Instrument Nr. 11 (Applause) aus der Gruppe der sechssaitigen Stahlsaitengitarren und
- das Instrument Nr. 12 (Ibanez) aus der Gruppe der zwölfsaitigen Gitarren.

Für diese Instrumente werden die über sämtliche Messpunkte der Vorder- bzw. der Rückseite gemittelten Übertragungsfunktionen $H_{1\text{gem}}$ präsentiert. Für die Ordinate ist ein logarithmischer Maßstab gewählt, wobei der Bezugswert stets 0,005 m/(Ns) ist. Ein Pegelbereich von insgesamt 50 dB ist dargestellt.

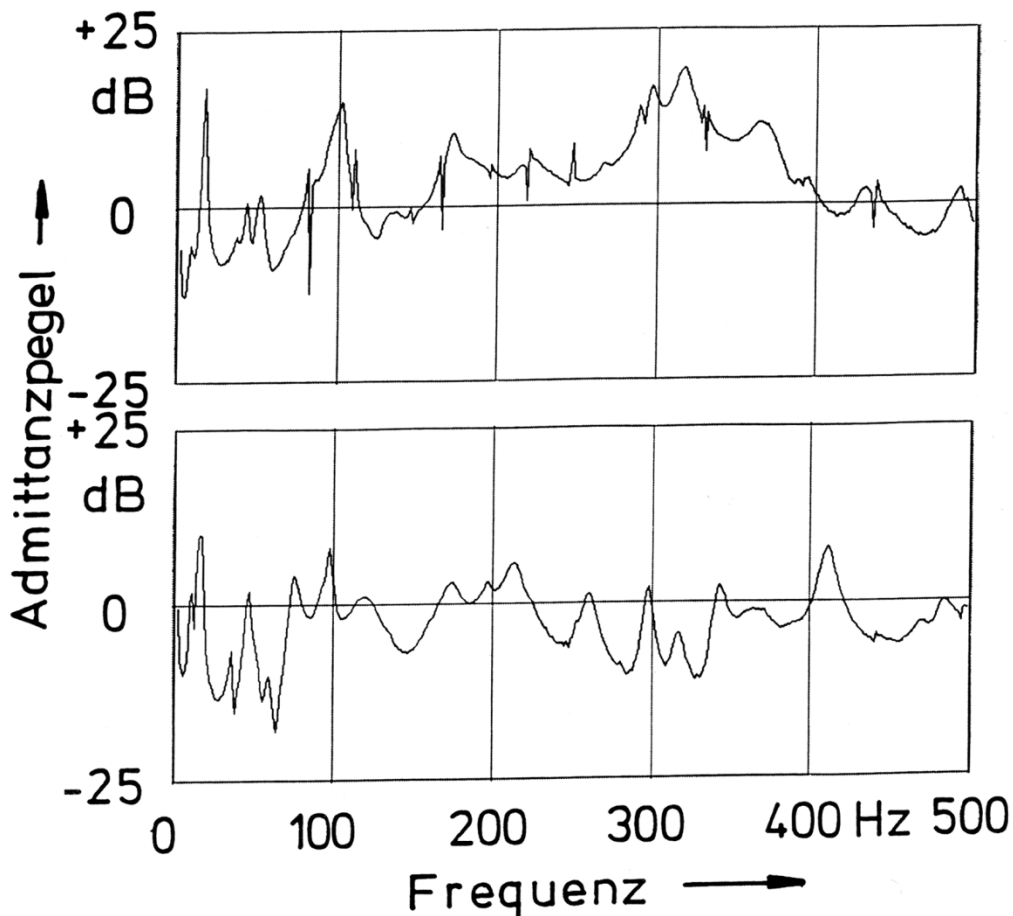


Fig. 55. Summen-Übertragungsfunktion der spanischen Gitarre Nr. 3 (Shiro), dargestellt als Pegel der gemittelten Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

Oben: Messung auf der Vorderseite;
unten: Messung auf der Rückseite.

Von der Frequenzachse interessiert der Bereich oberhalb von 82 Hz, dem Grundton der (tiefen) E₂-Saite. Wie auch bei den weiteren Messkurven ist in Fig. 55 auf der Ordinate die gemittelte Admittanz im Pegelmaß aufgetragen. Da der Bezugswert stets derselbe ist, sind direkte Vergleiche möglich. Das allgemeine Niveau der Admittanz ist auf der Vorderseite (oberes Teildiagramm) höher als auf der Rückseite (unteres Teildiagramm). Maxima, die auf besonders ausgeprägte Operating Deflection Shapes hindeuten, sind auf der Vorderseite höher als auf der Rückseite. So ist zu erse-

hen, dass die mittlere Bewegungsamplitude auf Decke und Hals Werte um 50 mm/(Ns) (entsprechend +20 dB) annehmen kann. Auf Boden und Hals werden dagegen nur selten Werte oberhalb von 0 dB erreicht. Vereinfachend lässt sich aussagen, dass bei der betrachteten Gitarre die mittlere Bewegungsamplitude auf der Vorderseite um etwa eine Zehnerpotenz größer als auf der Rückseite ist.

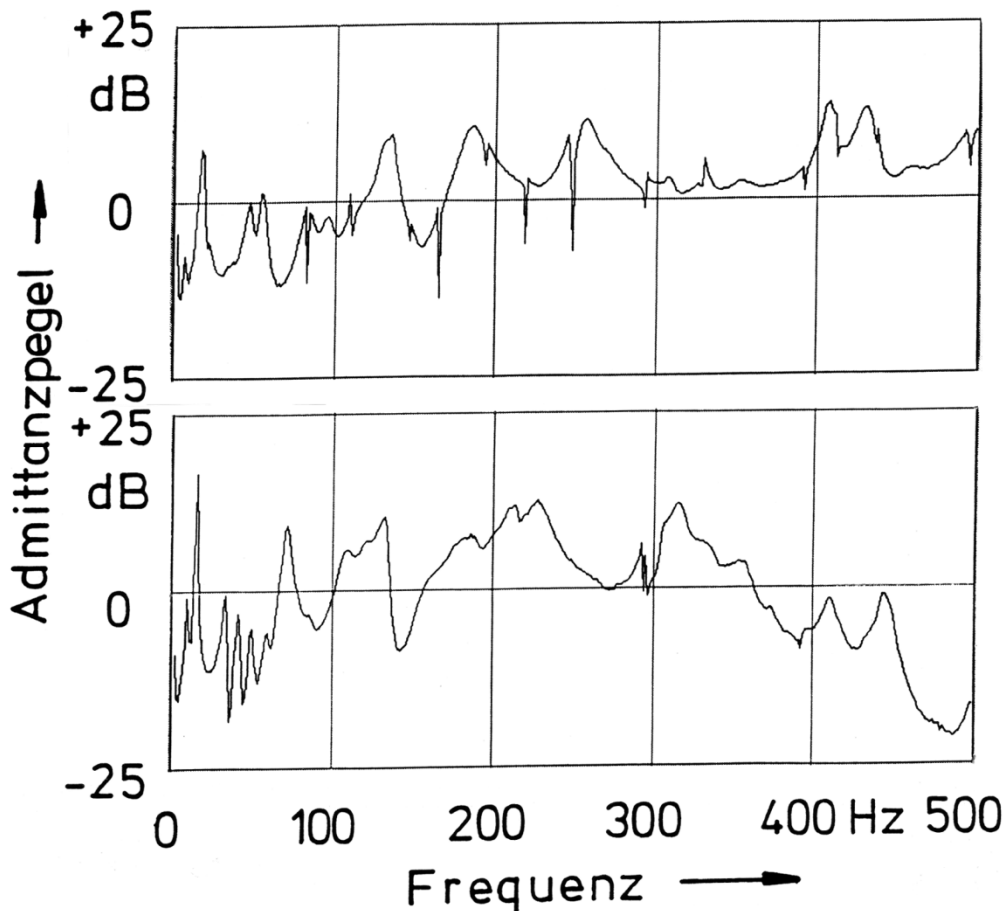


Fig. 56. Summen-Übertragungsfunktion der Barockgitarre Nr. 7 (Gewa), dargestellt als Pegel der gemittelten Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.
Oben: Messung auf der Vorderseite;
unten: Messung auf der Rückseite.

Fig. 56 bezieht sich auf eine Barockgitarre. Bei diesem Instrument liegt der Pegel der gemittelten Admittanz auf der Vorderseite etwa zwischen 0 dB und +10 dB. Die Admittanz hängt in geringem Maße von der Frequenz ab, als dies bei der spanischen Gitarre (Fig. 55) der Fall ist. Die Rückseite dieses Instrumentes ist bei tiefen Frequenzen im Mittel ebenso "schwingfreudig" wie die Vorderseite. Bei Frequenzen oberhalb von 350 Hz ist die mittlere Bewegung der Rückseite dagegen um etwa eine Zehnerpotenz (entsprechend 20 dB) kleiner als die der Vorderseite.

Für die Schwingungsanalyse sind die Maxima der gemittelten Admittanz von Bedeutung, da sie die Frequenzen festlegen, für die üblicherweise Operating Deflection Shapes bestimmt werden. Bei der detaillierten Auswertung erkennt man, dass die Maxima auf Vorder- und Rückseite oftmals eng beieinander liegen. In aller Regel kommen sie jedoch nicht bei exakt denselben Frequenzen vor. Das bedeutet, dass eine Modalanalyse des Gesamtsystems mit großer Wahrscheinlichkeit modale Frequenzen ergeben würde, die sich etwas von denjenigen unterscheiden, die eine getrennte Untersuchung von Vorder- und Rückseite liefert.

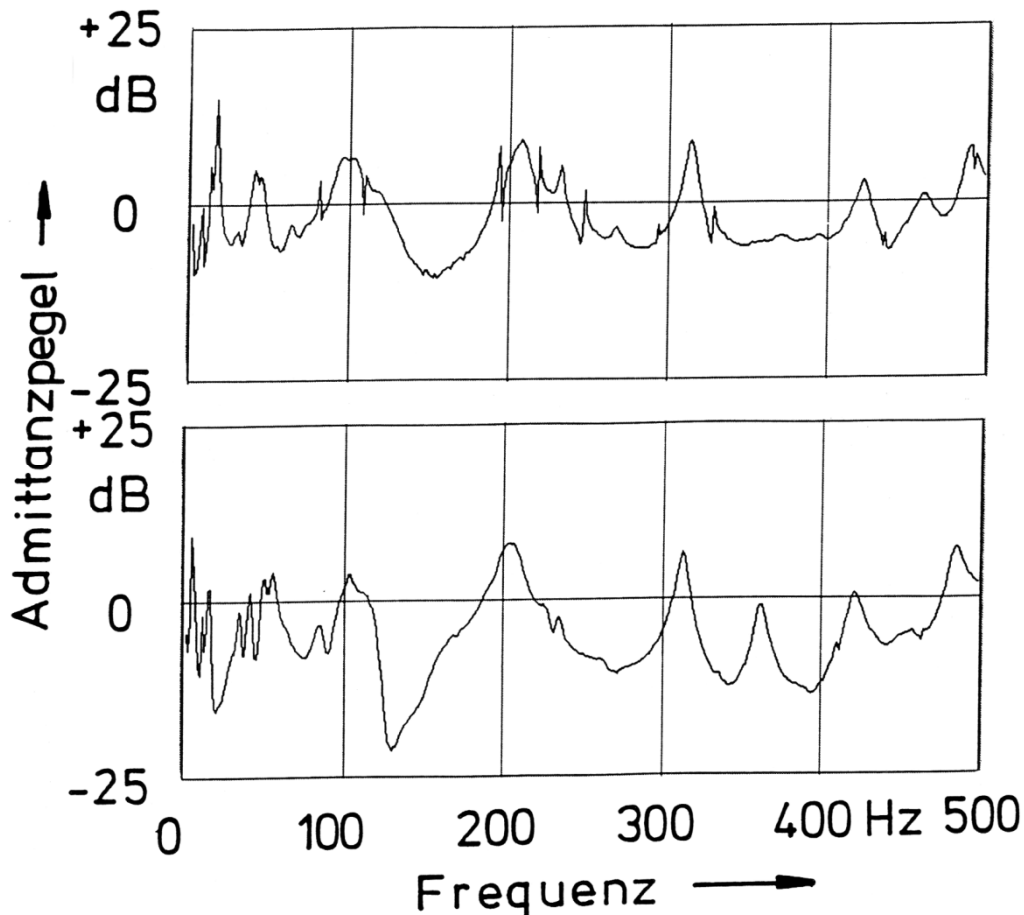


Fig. 57. Summen-Übertragungsfunktion der Stahlsaitengitarre Nr. 11 (Applause), dargestellt als Pegel der gemittelten Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.
Oben: Messung auf der Vorderseite;
unten: Messung auf der Rückseite.

Einzelne Maxima treten nur auf der Vorder- oder der Rückseite in Erscheinung. Sie deuten auf Schwingungen hin, die auf einen Teil des Instruments beschränkt sind. Bei der Applause (Fig. 57) schwingt bei 362 Hz im Wesentlichen der Boden und bei 194 Hz vor allem die Decke. Interessant ist, dass der Boden der Applause, der aus einer Kunststoffschale besteht, sich durchaus nicht starr verhält. Er zeigt sich im Mittel nicht weniger schwingfreudig als die Decke.

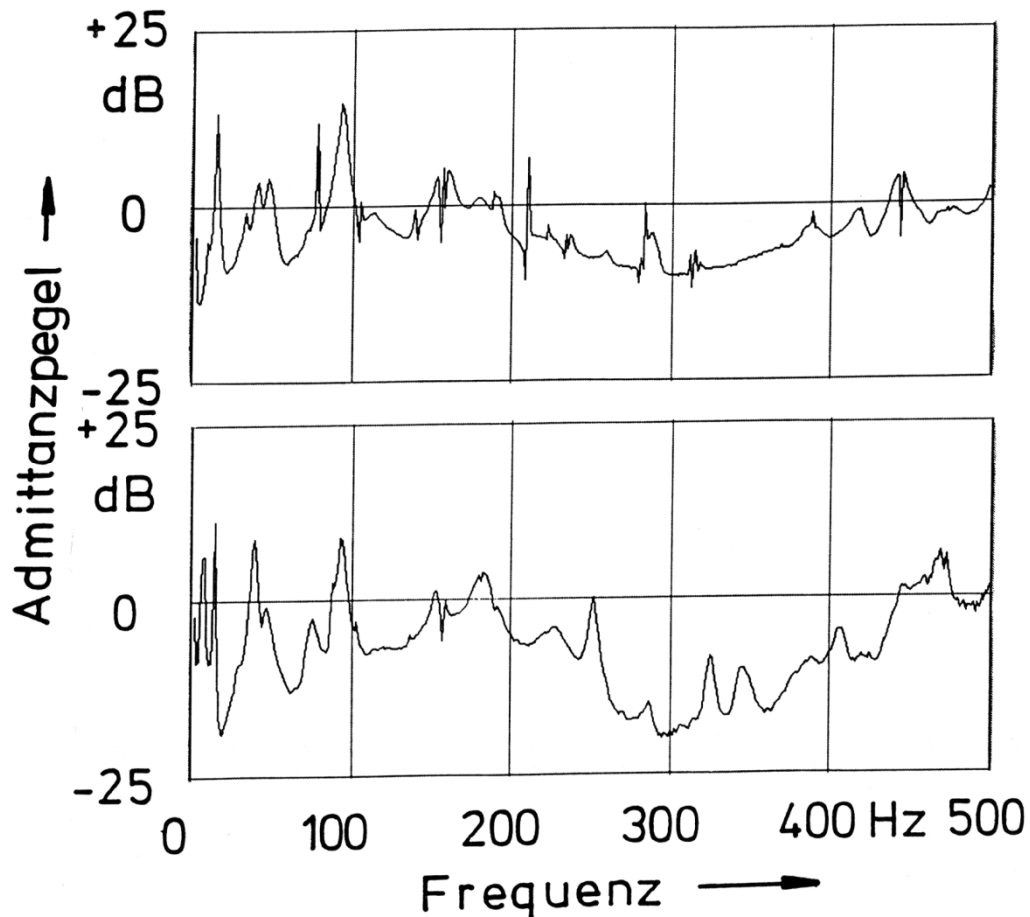


Fig. 58. Summen-Übertragungsfunktion der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 12 (Ibanez), dargestellt als Pegel der gemittelten Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz.

Oben: Messung auf der Vorderseite;
unten: Messung auf der Rückseite.

Aus statischen Gründen muss die Decke einer Stahlsaitengitarre steifer ausgeführt werden als die Decke einer klassischen, mit Kunststoffsaiten bespannten Gitarre. Demzufolge erweist sie sich auch als steifer in Bezug auf Schwingungen. Was bereits in Fig. 57 zu beobachten war, tritt in Fig. 58 noch deutlicher hervor: Die Decke ist wenig schwingfreudig. Dies zeigt insbesondere ein Vergleich der zwölfsaitigen Stahlsaitengitarre Nr. 12 (Fig. 58) mit der sechssaitigen Kunststoffsaitengitarre Nr. 3 (Fig. 55). Auf eine Anregung mit derselben Kraft antwortet die zwölfsaitige Gitarre mit einer Schwinggeschwindigkeit der Decke, die im Mittel um etwa eine Zehnerpotenz (entsprechend 20 dB) kleiner ist als bei der spanischen Gitarre. Jeder Gitarrist kennt die Unterschiede in der Ansprache, die daraus resultieren.

7.2. Experimentelle Ergebnisse: Operating Deflection Shapes

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Scanning Vibrometer nach Twork (1997) sind im Folgenden zusammengestellt und knapp kommentiert. Die Gitarren werden gemäß Tab. I in Gruppen unterteilt, denen jeweils ein Abschnitt zugeordnet ist.

Wie bereits ausgeführt, wurden in den Summen-Übertragungsfunktionen für die Messung der Vorderseite bzw. der Rückseite diejenigen Frequenzen gesucht, bei denen sich ein lokales Maximum ergibt. Die zugehörige Schwingungsform (Operating Deflection Shape) ist als Drahtmodell visualisiert. Ergebnisse sind samt den entsprechenden Frequenzen zusammengestellt, wobei die Frequenz nach unten größer wird. Jeweils in der linken Spalte finden sich die Resultate der Messung der Vorderseite (Decke), in der rechten diejenigen der Messung der Rückseite (Boden). ODSs der Vorder- bzw. Rückseite, deren Frequenzen so eng benachbart sind, dass eine Schwingung des gesamten Korpus vermutet werden kann, sind nebeneinander angeordnet.

Bei der Interpretation ist der unterschiedliche Blickwinkel zu beachten: In der linken Spalte wird die Gitarre von oben, in der rechten Spalte dagegen von unten betrachtet. Es empfiehlt sich, die Bewegung des Halses als Orientierungshilfe zu verwenden. Zum Zwecke der Sichtbarmachung sind die Auslenkungen übertrieben. Die Vergrößerungsmaßstäbe sind für unterschiedliche Frequenzen im Allgemeinen nicht dieselben. Sie wurden jeweils so gewählt, dass die Form der Schwingung klar zu erkennen ist. Sofern Bilder direkt nebeneinander angeordnet sind, sind Vorder- und Rückseiten-schwingung im selben Maßstab dargestellt.

7.2.1. Spanische Gitarren

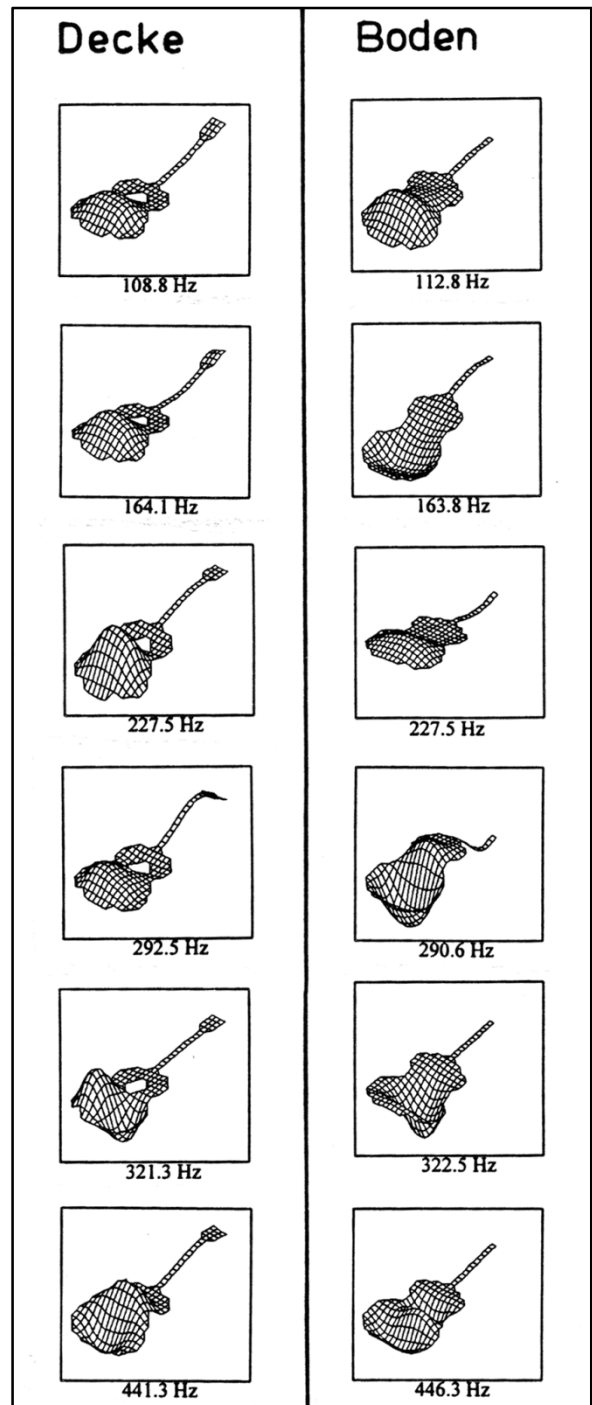


Fig. 59. ODSs der Gitarre Nr. 1 (Höfner I) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Für die spanische Gitarre Nr. 1 (Fig. 59) wurden sechs ODSs identifiziert, die - sieht man von den geringen Diskrepanzen in den Frequenzen ab - den gesamten Korpus umfassen. Beispielhaft sei die Helmholtz-Schwingung (109 Hz bzw. 113 Hz) herausgegriffen. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen (Decke: von oben; Boden: von unten), so wird deutlich, dass Decke und Boden sich gleichzeitig nach außen bewegen. In der ersten Schwingungsform, die innerhalb ihres Betriebs-Frequenzbereiches liegt, "pumpt" die Gitarre.

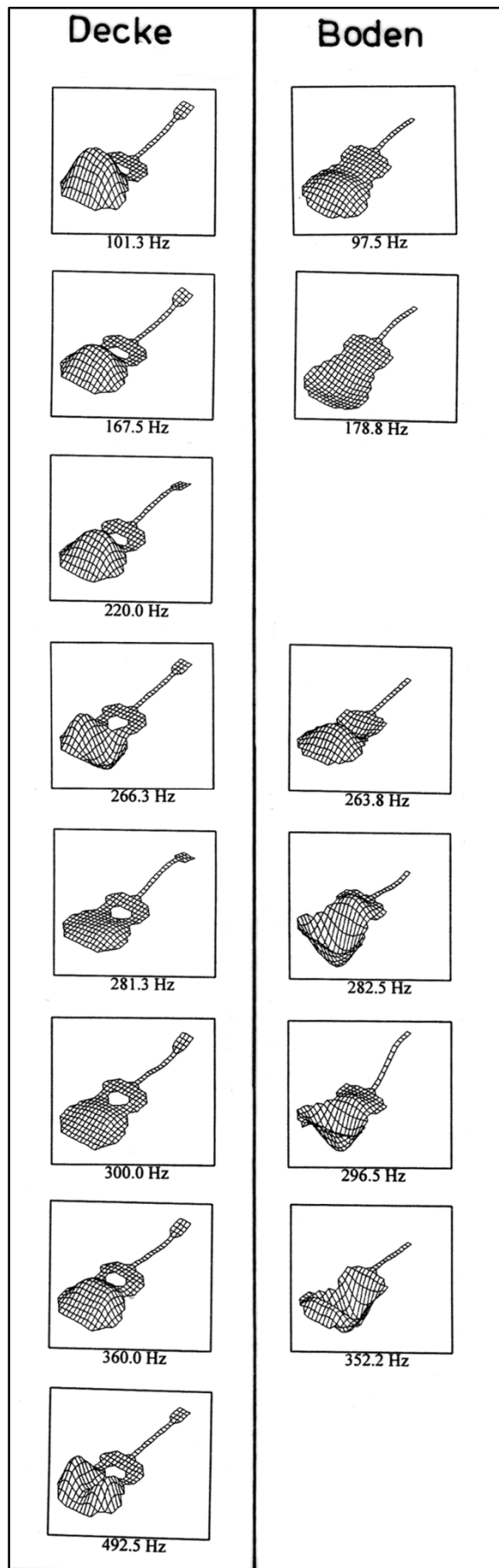


Fig. 60. ODSs der Gitarre Nr. 2 (Höfner II) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

In Fig. 60 sind ebenfalls sechs ODSs dargestellt, die den gesamten Korpus umfassen. Zwei Schwingungsformen (220 Hz und 492 Hz) sind nur auf der Decke nachzuweisen. Der Boden bleibt bei diesen Frequenzen weitgehend in Ruhe.

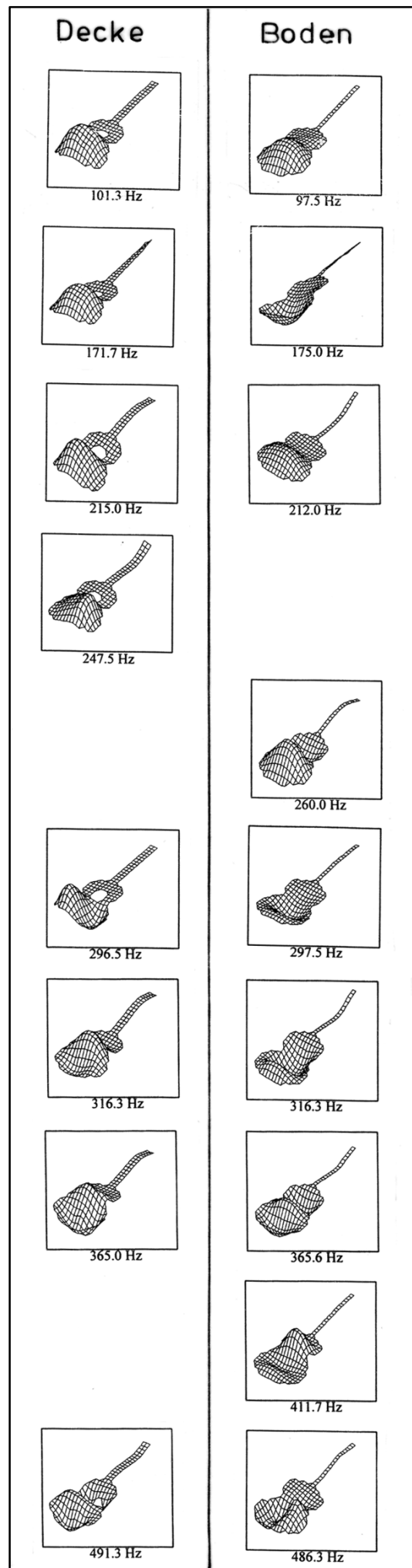


Fig. 61. ODSs der Gitarre Nr. 3 (Shiro) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

In Fig. 61 sind insgesamt sieben ODSs zu erkennen, die den gesamten Körper des Instruments miteinbeziehen. Daneben prägen sich jedoch auch Schwingungen aus, bei denen lediglich die Decke und der Hals (247 Hz), nur der Boden und der Hals (260 Hz) oder auch der Boden allein (412 Hz) schwingen. Die antimetrische 01-Dekken-Schwingung prägt sich bei 296 Hz sehr deutlich aus. Dicht benachbart tritt bei 297 Hz eine 20-Boden-Schwingung auf.

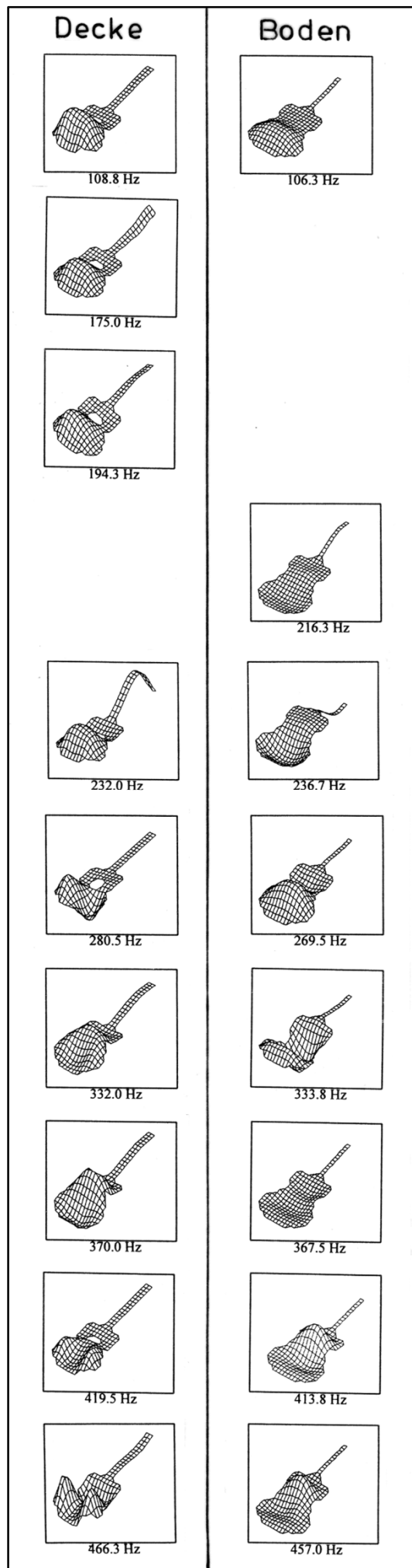


Fig. 62. ODSs der Gitarre Nr. 4 (Hopf) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Auch Fig. 62 zeigt sieben ODSs, die den gesamten Körper des Instruments betreffen. Zwei Schwingungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Decke (175 Hz und 195 Hz) bzw. auf den Boden und den Hals (216 Hz).

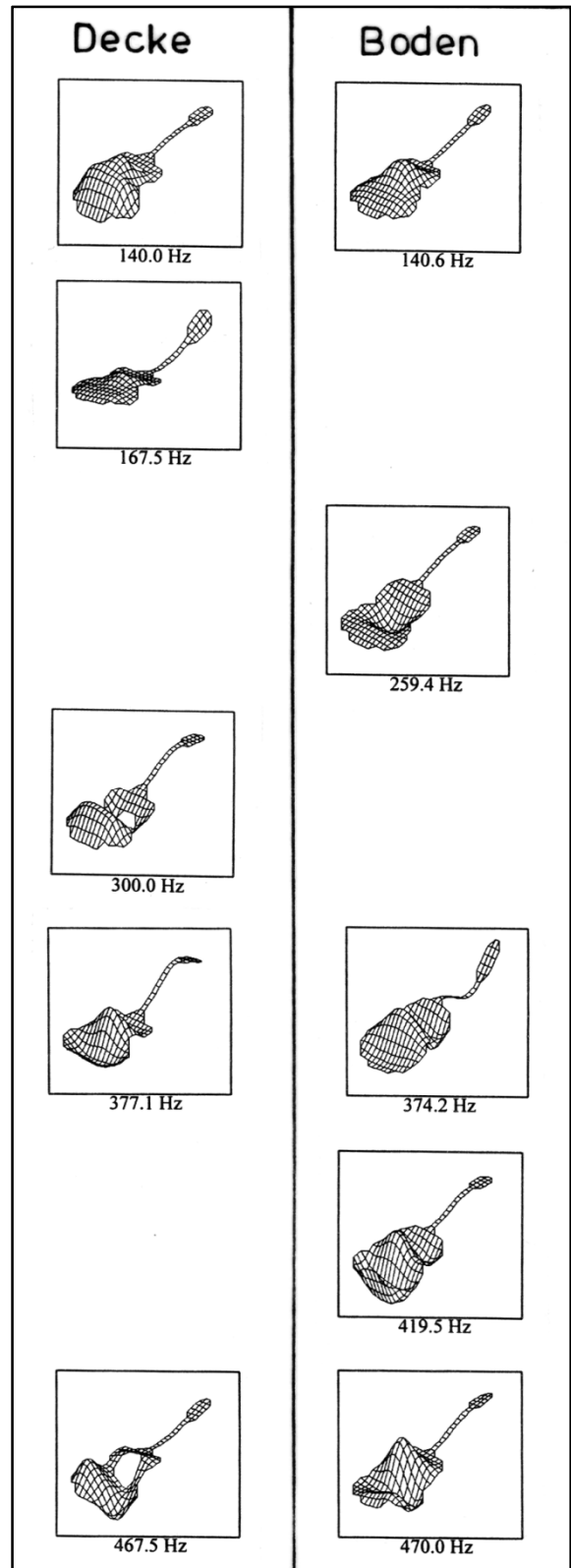
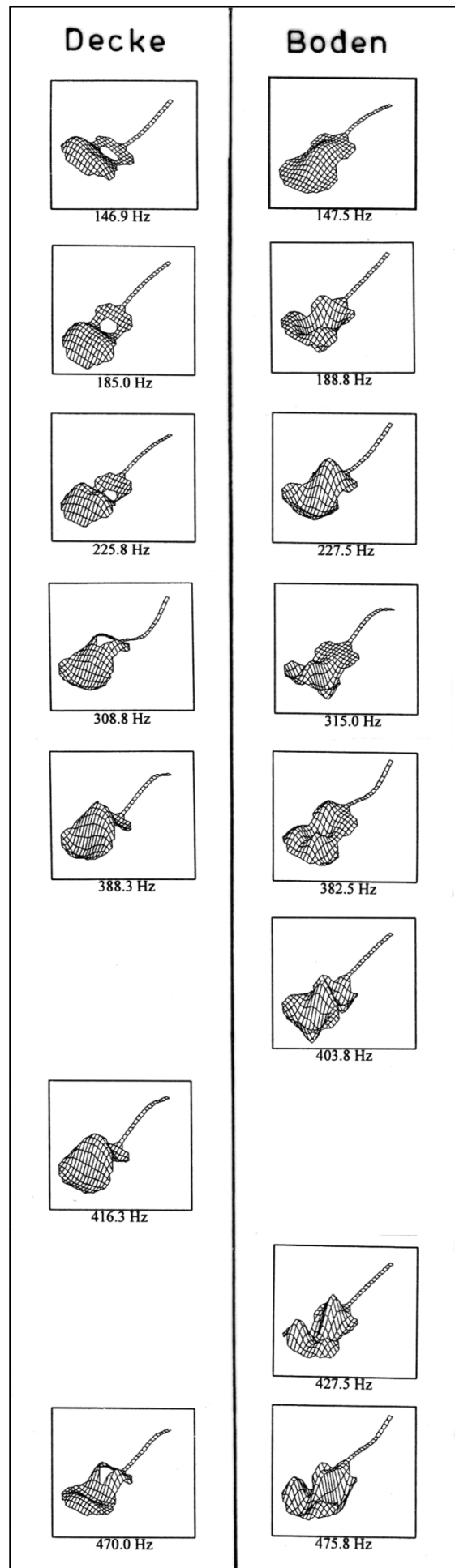


Fig. 63. ODSs der Gitarre Nr. 5 (Terzgitarre) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Die Terzgitarre Nr. 5 (Fig. 63) ist eine verkleinerte spanische Gitarre. Als Folge der geringeren Abmessungen liegen die charakteristischen Frequenzen des Körpers höher als bei einer Gitarre üblicher Größe. Es wurden drei ODSs identifiziert, bei denen das gesamte Instrument schwingt. Als Beispiel kann die 10-Decke-Hals-Schwingung (377 Hz bzw. 374 Hz) dienen, bei der sich praktisch sämtliche Teile in Bewegung befinden. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass bei der Interpretation die unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen zu berücksichtigen sind. Daneben werden zwei Schwingungsformen beobachtet, bei denen sich vor allem Decke und Hals (167 Hz und 300 Hz) bzw. vor allem der Boden (259 Hz und 419 Hz) bewegen.

Fig. 64. ODSs der Gitarre Nr. 6 (Wandergitarre I) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).



Für die Wandergitarre I Nr. 6 (Fig. 64) werden sechs ODSs gemessen, bei denen sich der gesamte Körper bewegt. Eine Schwingung beschränkt sich auf die Decke und den Hals (416 Hz), zwei wirken sich lediglich auf den Boden aus (404 Hz und 427 Hz).

7.2.2. Barockgitarren

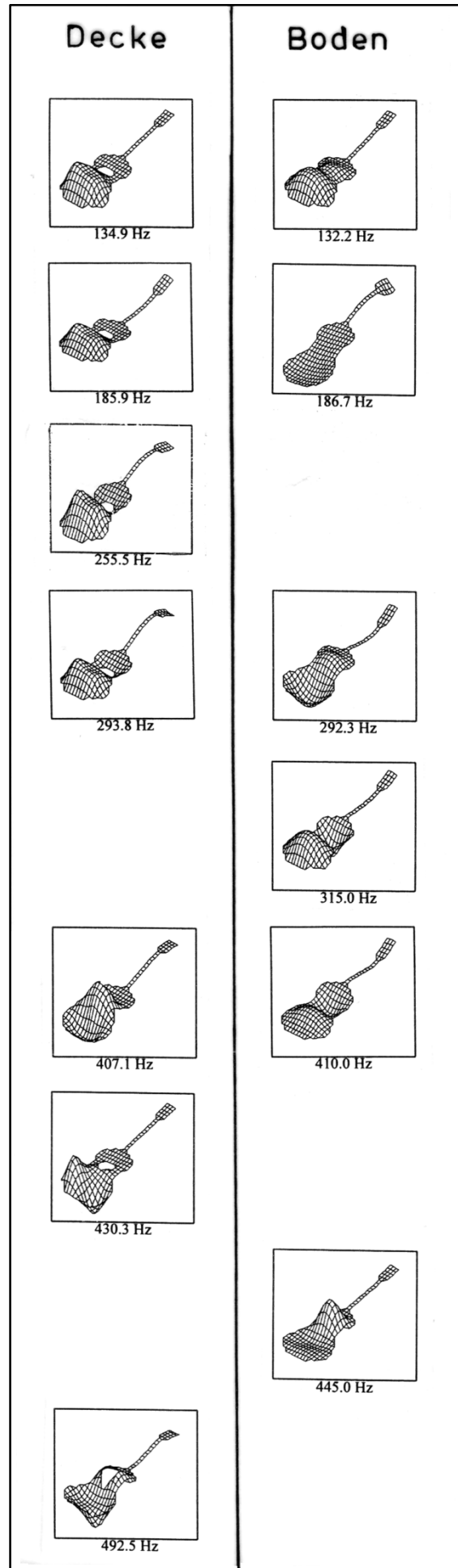


Fig. 65. ODSs der Barockgitarre Nr. 7 (Gewa) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Fig. 65 kann man lediglich vier ODSs entnehmen, bei denen sich der gesamte Körper des Instrumentes in Bewegung befindet. Ob es sich bei der zweiten und dritten Form um Monopol- oder Dipol-Schwingungen handelt, kann demnach nicht eindeutig beurteilt werden. Sehr deutlich prägt sich dagegen z.B. die 20-Decke-Hals-Schwingung aus, die bei 407 Hz bzw. 410 Hz zu beobachten ist. Daneben findet man mehrere Formen, bei denen lediglich die Decke und der Hals (255 Hz, 430 Hz und 492 Hz) bzw. im Wesentlichen nur der Boden (315 Hz und 445 Hz) schwingen.

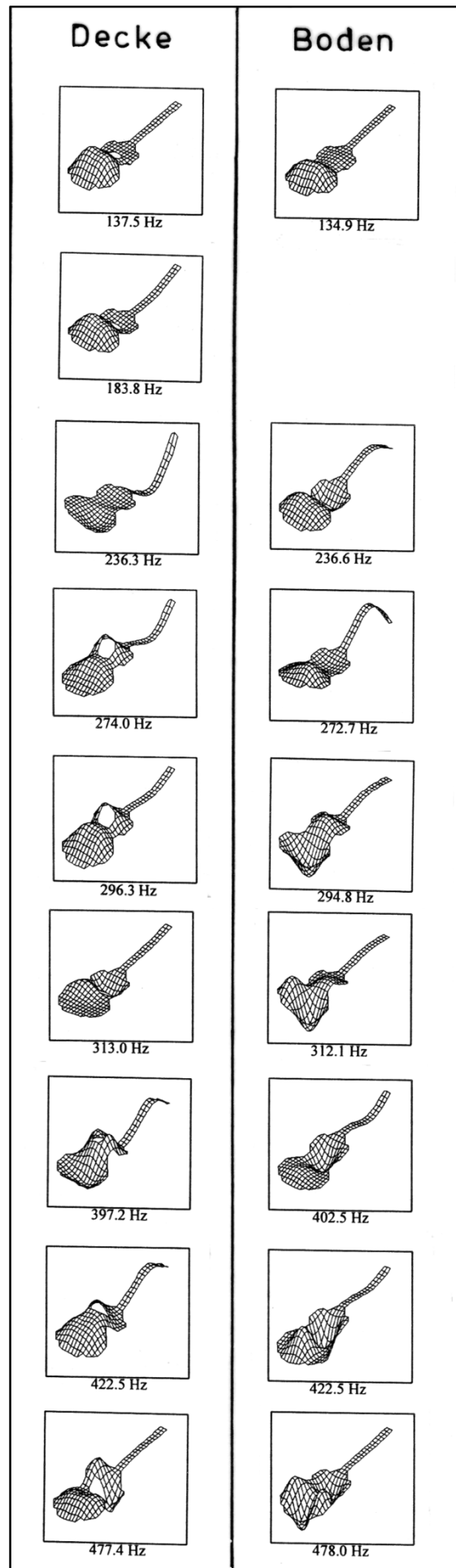
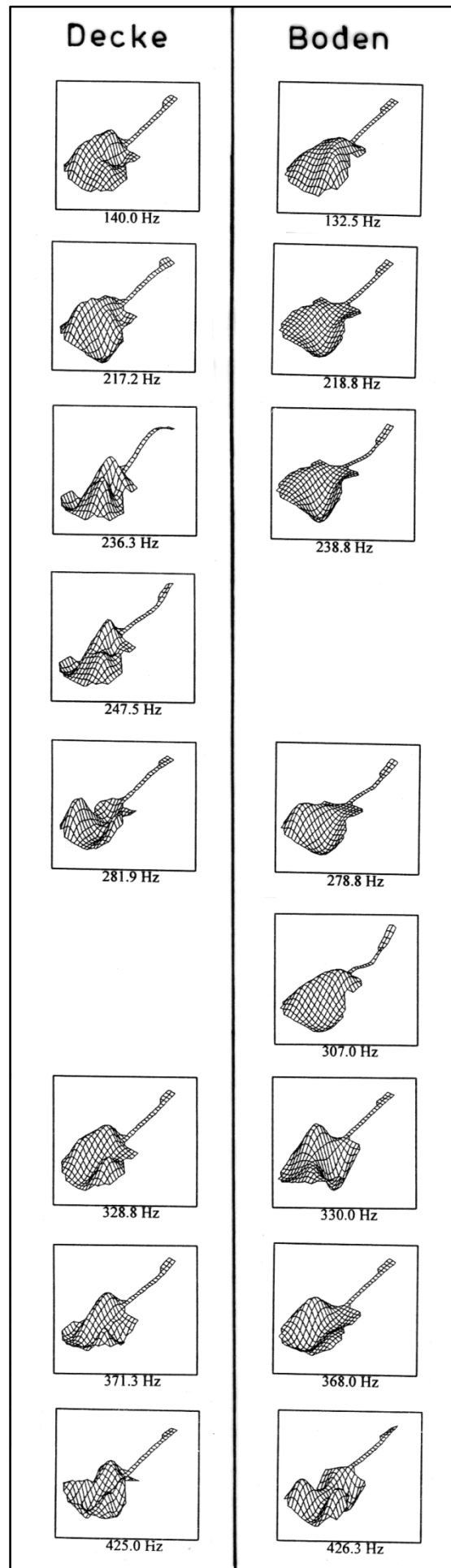


Fig. 66. ODSs der Barockgitarre Nr. 8 (altes Instrument) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Für die alte Barockgitarre Nr. 8 zeigt Fig. 66 eine einzige Schwingung, die sich im Wesentlichen auf die Decke beschränkt (184 Hz). Ob es sich bei dieser und der nächsten Form um eine Monopol- oder Dipol-Schwingung handelt, lässt sich nicht eindeutig unterscheiden. Die übrigen acht ODSs beziehen das gesamte Instrument mit ein.

7.2.3. Stahlsaitengitarren

Fig. 67. ODSs der Schlaggitarre Nr. 9 (Triumphator) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).



Der Korpus der Schlaggitarre Nr. 9 unterscheidet sich von dem der anderen Gitarren. Decke und Boden sind gekrümmt; die Decke hat kein rundes Schallloch, sondern zwei *f*-förmige Aussparungen. Verglichen mit den übrigen Instrumenten treten andersartige Schwingungsbilder auf. In Fig. 67 erkennt man eine Schwingung, die sich im Wesentlichen auf die Decke beschränkt (247 Hz) sowie eine, die den Boden betrifft (307 Hz). Die übrigen sieben ODSs umfassen den gesamten Instrumentenkörper.

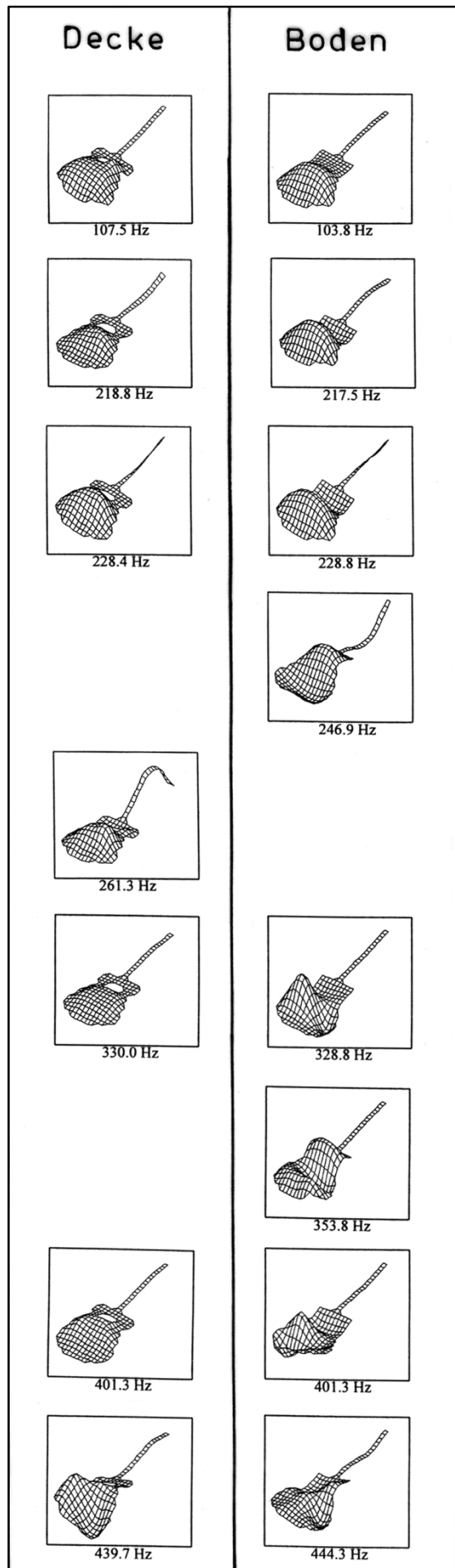


Fig. 68. ODSs der Westerngitarre Nr. 10 (Western Ranger) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Die Westerngitarre Nr. 10 hat einen relativ großen Korpus, ist aber sonst weitgehend konventionell gebaut. Fig. 68 zeigt sechs Schwingungsformen, bei denen sich praktisch alle Teile des Instrumentes bewegen. An einer Schwingung (261 Hz) sind im Wesentlichen nur die Decke und der Hals beteiligt. Zwei Schwingungsmuster (247 Hz und 354 Hz) betreffen den Boden und den Hals. Eine 00-Dipol-Schwingung, wie sie bei etwas mehr als 200 Hz zu erwarten wäre, konnte nicht nachgewiesen werden.

Boden und Seitenwände der Gitarre Nr. 11 bestehen nicht aus Holz, sondern werden von einer Kunststoffschale gebildet, die einer halbierten Birne ähnelt. Obwohl der Kunststoff schwarz ist, reflektiert die Oberfläche das Laserlicht so weit, dass die Messung mit dem Scanning Vibrometer keine Schwierigkeit bereitet. Bei der Interpretation der Schwingungsbilder der gekrümmten Rückseite (Fig. 69 rechts) ist zu beachten, dass nur die Komponente der Schnelle in Richtung des Laserstrahles erfasst wird.

Die Bodenschale erweist sich als durchaus schwingungsfähig. Erwartungsgemäß unterscheiden sich ihre Schwingungsbilder jedoch von denen eines hölzernen Bodens. Besonders deutlich prägen sich Schwingungen mit einem Längsknoten (362 Hz) bzw. zwei Längsknoten (421 Hz und 486 Hz) aus. Die Decke (Fig. 69 links) führt offenbar zunächst die Helmholtz-Schwingung (102 Hz bzw. 103 Hz) sowie die 00-Decke-Hals-Schwingungen (194 Hz und 208 Hz) aus. Daran schließen sich Schwingungen mit einem Längsknoten (314 Hz bzw. 312 Hz) oder mit zwei Längsknoten (422 Hz bis 490 Hz) an. Schwingungsmuster mit Querknoten wurden nicht beobachtet. Die betrachtete Gitarre ist demnach ärmer an Schwingungsformen, als es die konventionellen Modelle sind. Dies gilt für die Decke und auch für den Hals, bei dem erwähnenswerte Bewegungen nur bei etwa 200 Hz und 500 Hz nachzuweisen waren.

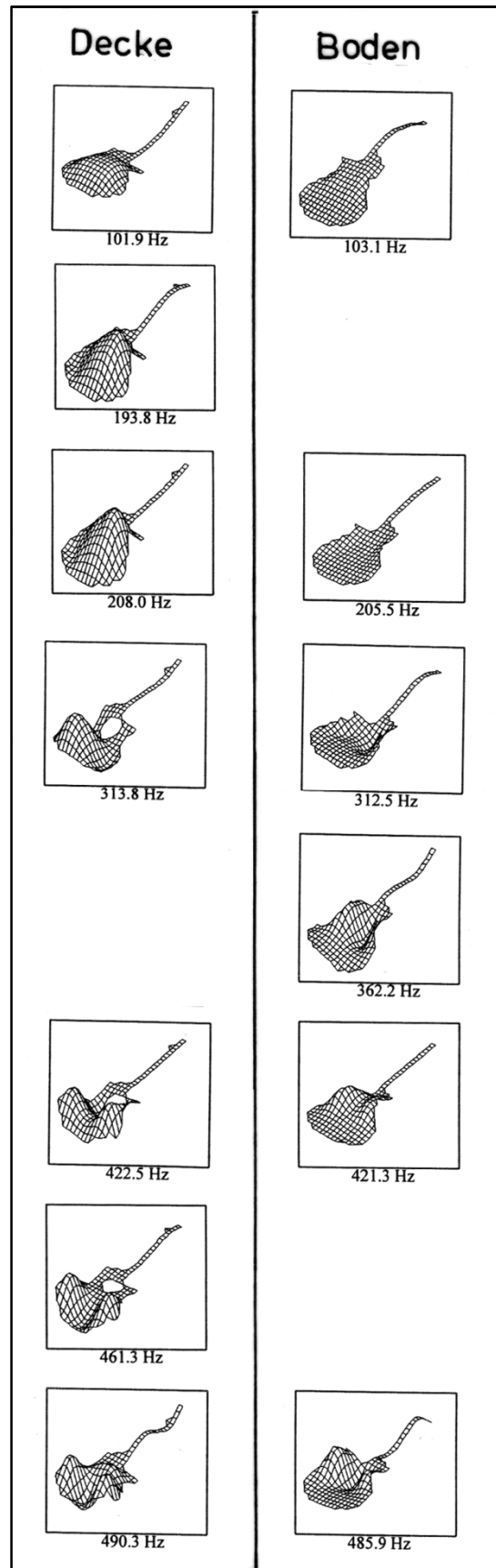


Fig. 69. ODSs der Stahlsaitengitarre Nr. 11 (Applause) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

7.2.4. Zwölfsaitige Gitarren

Fig. 70. ODSs der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 12 (Ibanez) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

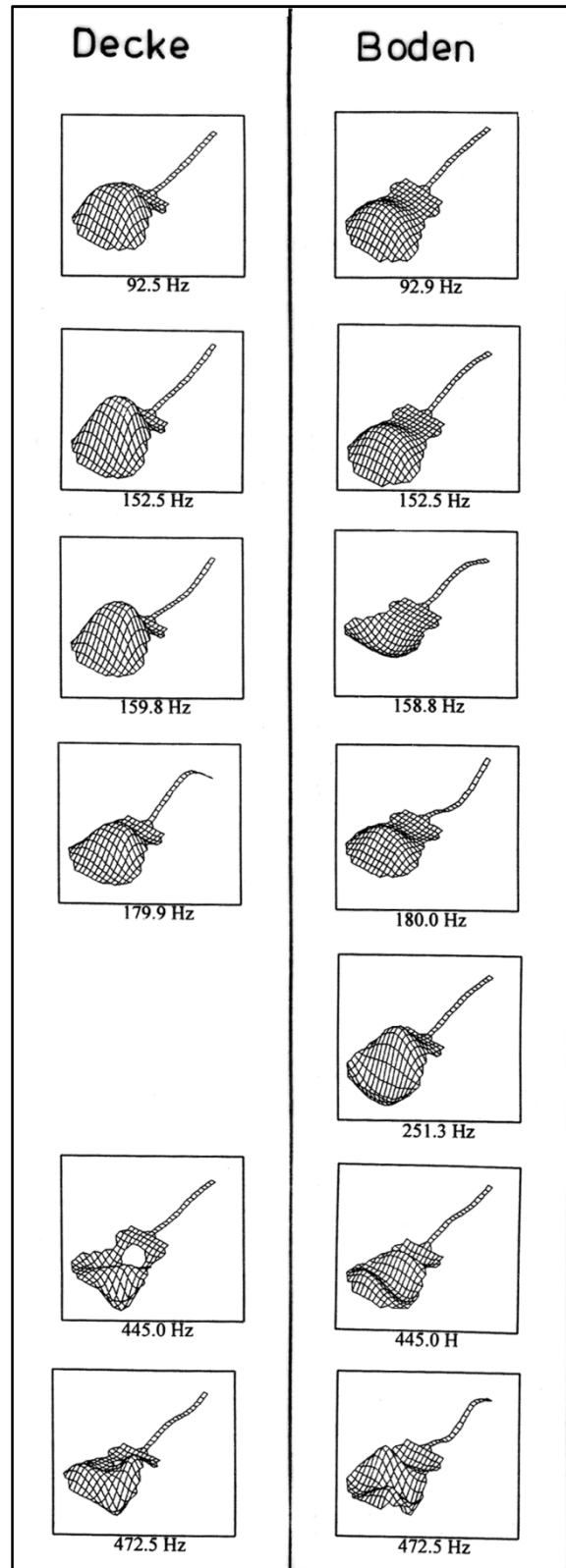
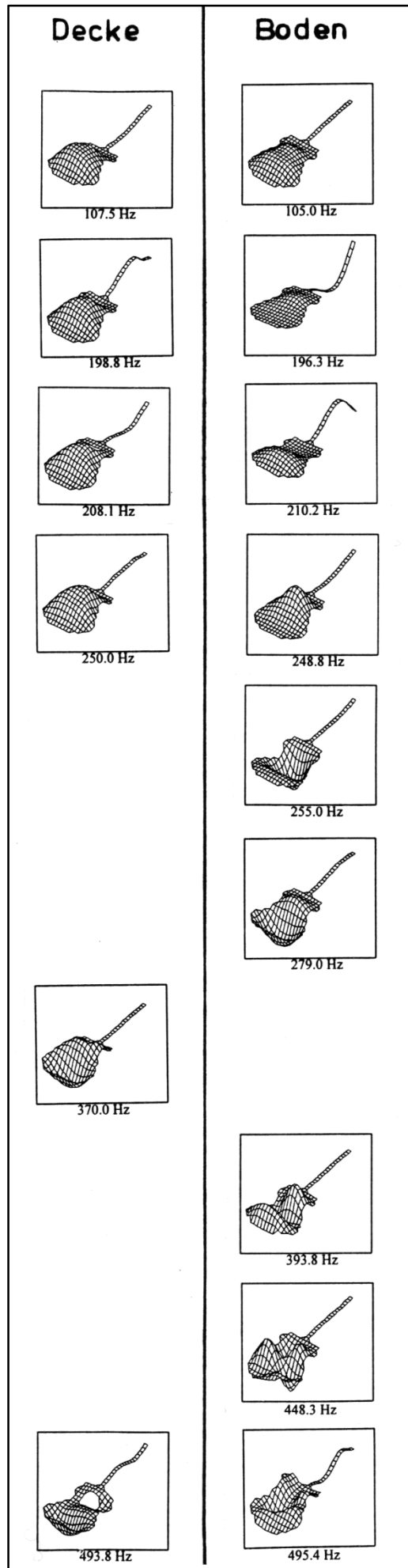


Fig. 70 zeigt für die zwölfsaitige Gitarre Nr. 12 eine Schwingung, die sich auf den Boden beschränkt (251 Hz). Alle übrigen sechs ODSs umfassen den gesamten Instrumentenkörper. Da der Korpus zwölfsaitiger Gitarren in aller Regel ein vergleichsweise großes Volumen hat, treten die ersten Schwingungsmuster bei relativ tiefen Frequenzen auf. So ist bei 152 Hz eine 00-Monopol-Schwingung zu beobachten, während bei 160 Hz bzw. 159 Hz eine 00-Dipol-Schwingung auftritt. Offenbar ist bei dieser Gitarre die Reihenfolge Monopol-Dipol umgekehrt wie bei spanischen Gitarren. Die darauffolgende 10-Schwingung bei 190 Hz ähnelt der 00-Monopol-Schwingung, zeichnet sich jedoch dadurch aus, dass der Hals in starkem Maße mitschwingt.

Fig. 71. ODSs der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 13 (Eko) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).



Bei der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 13 (Fig. 71) werden fünf Schwingungsformen beobachtet, bei denen sich praktisch alle Teile des Instrumentenkörpers bewegen. An einer Schwingung (370 Hz) ist lediglich die Decke beteiligt. Vier Schwingungsformen zwischen 255 Hz und 448 Hz beschränken sich im Wesentlichen auf den Boden.

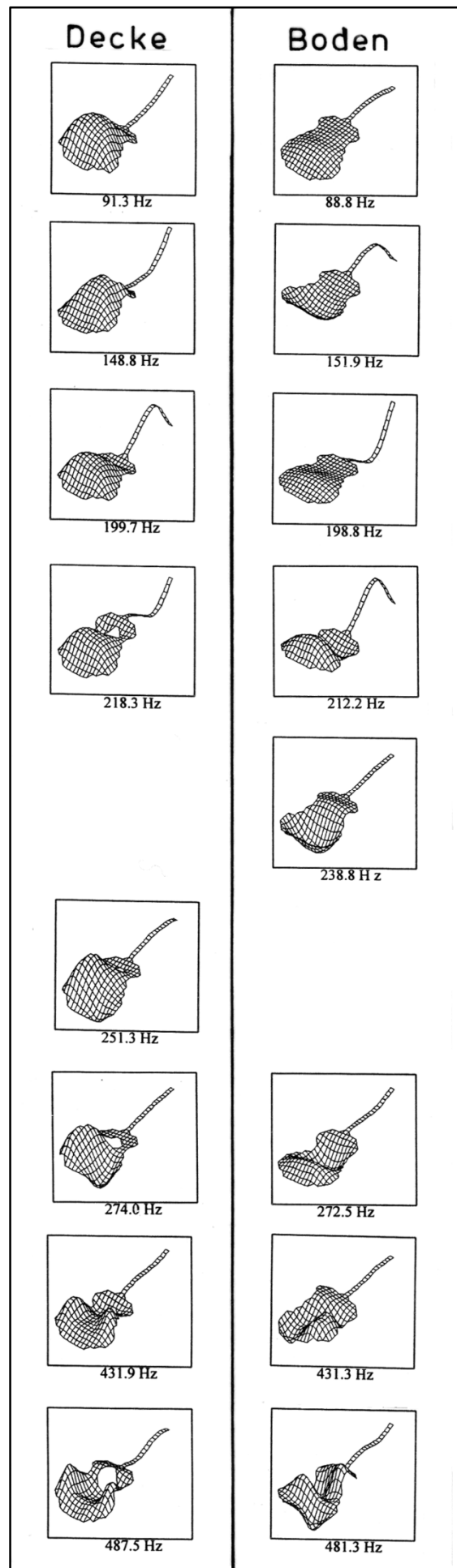


Fig. 72. ODSs der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 14 (Egmond) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Fig. 72 zeigt für die zwölfsaitige Gitarre Nr. 14 sieben Schwingungsformen des gesamten Instrumentenkörpers, eine Bodenschwingung (239 Hz) sowie eine reine Deckenschwingung (251 Hz). Bei 432 Hz prägt sich besonders deutlich die 02-Decken-schwingung aus. Auf der Vorderseite bilden sich parallel zu den Saiten zwei Knotenlinien derart aus, dass der mittlere Teil der Decke in Gegenphase zu den beiden äußeren Teilen schwingt.

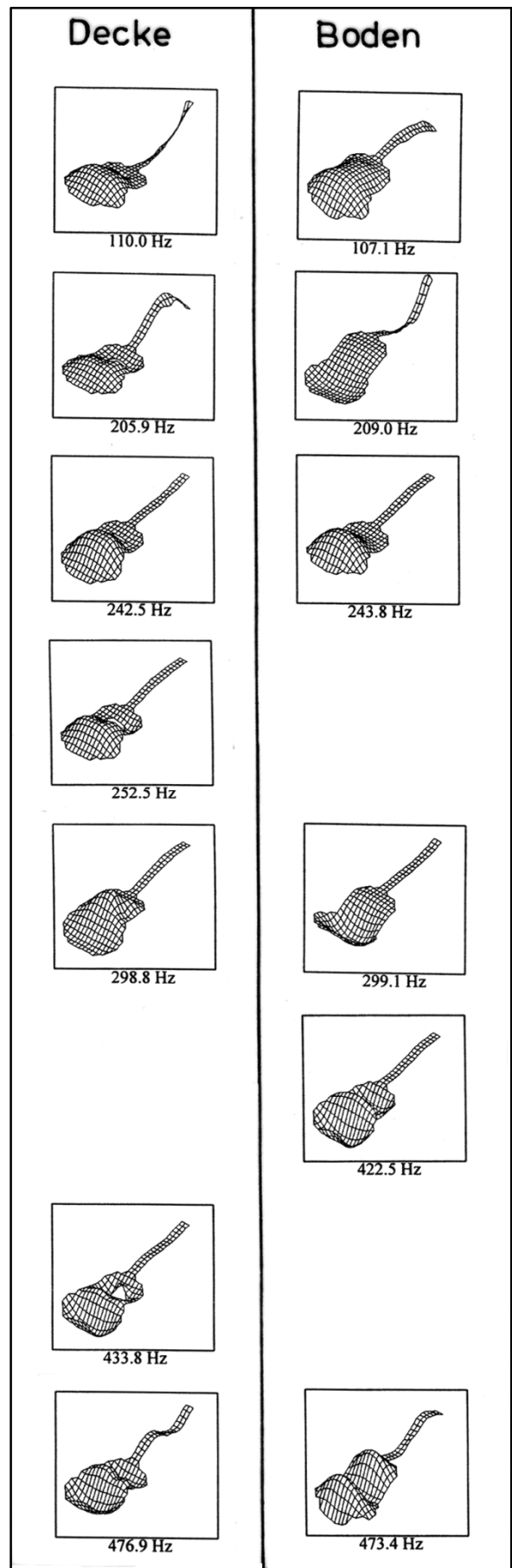


Fig. 73. ODSs der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 15 (Klira) für die angegebenen Frequenzen, gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

In Fig. 73 sind für die zwölfsaitige Gitarre Nr. 15 fünf Schwingungsformen zusammengestellt, die alle Teile des Instrumentenkörpers beaufschlagen. Bei zwei Schwingungen (252 Hz und 434 Hz) ist der Boden weitgehend in Ruhe. Bei 422 Hz bewegt sich dagegen ausschließlich der Boden; Decke und Hals verhalten sich weitgehend starr. Die 30-Schwingung bei 477 Hz prägt sich besonders deutlich aus. Man erkennt, wie sich die Bewegung der Decke in den Hals hinein fortsetzt und zudem den Boden mit einbezieht.

7.3. Zusammenfassende Bemerkung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es die Laser-Vibrometrie ermöglicht, schnell und ohne Berührung der Oberfläche die Schwingungen der Vorder- und der Rückseite einer Gitarre zu erfassen. Die Ergebnisse sind Operating Deflection Shapes. Deren Auswahl ist naturgemäß mit einer gewissen Willkür behaftet. Die ODSs werden dann die größte Ähnlichkeit mit den Eigenformen haben, wenn sie bei denjenigen Frequenzen bestimmt werden, die Eigenfrequenzen des Instruments sind. Hat der Experimentator das entsprechende Geschick und Vorwissen, dann wird ihm dies weitgehend gelingen. Ist die genaue Kenntnis der modalen Parameter tatsächlich erforderlich, dann besteht die Möglichkeit, die Messwerte vom Scanning Vibrometer über das Datennetz in den Rechner zu übertragen, der die Modalanalyse (beispielsweise mit StarModal) durchführt. Transfers der Übertragungsfunktionen für die einzelnen Messpunkte vom Vibrometer-Rechner in den Modalanalyse-Rechner samt anschließender Auswertung wurden an einem Beispiel bereits erfolgreich erprobt.

Fünfzehn Gitarren wurden untersucht. Für 400 Frequenzwerte zwischen 0 Hz und 500 Hz sind nun die Schwingungen von Decke und Boden eines jeden dieser Instrumente bekannt. Diese Daten lassen sich über das Datennetz in einen Rechner übertragen, auf dem das BE-Schallfeld-Berechnungsprogramm SYSNOISE installiert ist. Ausgehend von diesem Material ist es möglich, das Schallfeld quantitativ zu errechnen. So kann beispielsweise der Frequenzgang der Leistung berechnet werden, die bei Anregung am Steg mit einer konstant gehaltenen Kraft von der Gitarre ins Schallfeld abgegeben wird. Anders als in der Studie von Moosrainer und Fleischer (1997) muss die Berechnung nicht auf die Eigenfrequenzen beschränkt bleiben, sondern lässt sich für jeden der 400 Frequenzwerte durchführen. Leuschner (1994) sowie Fleischer (1995) haben gezeigt, wie das Schallfeld in Ebenen, z.B. parallel zur Decke, berechnet werden kann. Wählt man hierfür die unmittelbare Nähe der Oberfläche, lassen sich die Beiträge der einzelnen Teile des Instruments (Decke, Boden und Hals) oder auch der Luft im Inneren, die am Schallloch Kontakt mit der Außenluft hat, quantifizieren. Wie in Kapitel 5 dargestellt wurde, können auch Fernfeldparameter wie etwa die Richtcharakteristik berechnet werden.

Diese Anwendungsbeispiele sollen zeigen, dass die mechanische Schwingung, wie sie in diesem Kapitel präsentiert wurde, nicht die einzige Information ist, die den vorliegenden Daten entnommen werden kann. Die Operating Deflection Shapes stellen eine kleine Auswahl dar. Die Schwingungsmessdaten in ihrer Gesamtheit bilden jedoch die Grundlage für anschließende Berechnungen. Durch entsprechende Weiterverarbeitung lassen sich beispielsweise die Eigenformen und -frequenzen ermitteln. Darüber hinaus gelingt es, aus den vorliegenden Schwingungsdaten für jede Gitarre nicht nur mechanische, sondern insbesondere auch sämtliche akustischen Kenngrößen zu berechnen, die für ein Musikinstrument von Interesse sein können.

8. AUSWERTUNG DER ODS-MESSUNGEN

In diesem Kapitel sollen die Resultate, welche die verschiedenen Methoden zur Messung der Oberflächenschnelle ergeben haben, miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der

- konventionellen Experimente nach der Chladni-Methode und
- Modalanalyse

werden denjenigen gegenüber gestellt, die

- Lasermessungen mit dem Scanning Vibrometer

liefern. Danach sollen einige der Gemeinsamkeiten, die in den Messergebnissen erkennbar werden, extrahiert und besprochen werden.

8.1. Vergleich mit Chladni'schen Klangfiguren

In diesem Abschnitt wird ein Vergleich der Ergebnisse von Untersuchungen durchgeführt, die am selben Objekt mit unterschiedlichen Methoden ermittelt worden sind. Die Messungen zielen auf die Schwingungen des Bodens. Ähnliche Untersuchungen sind beispielsweise bei Firth (1977) beschrieben.

Fleischer (1995) hat Schwingungsmuster der Rückseite einer Gitarre präsentiert, die nach der traditionellen Methode von Chladni (1787) ermittelt wurden. Im Beispiel lag die Gitarre mit der Decke nach unten auf einem PVC-Fußboden. Der Boden der Gitarre wurde gleichmäßig mit Sand bestreut und mit einem elektrodynamischen Erreger in monofrequente Schwingungen versetzt. Stimmt die Frequenz der Anregung gut genug mit einer Eigenfrequenz überein, gerät der Boden samt darauf liegendem Sand in starke Bewegung. Sobald die Schwingbeschleunigung größer als die Erdbeschleunigung ist, beginnen die Sandkörner zu hüpfen und wandern. Sie verlassen die Stellen, an denen das Objekt sich stark bewegt, und sammeln sich an denjenigen, an denen es in Ruhe ist. Auf diese Weise werden die Knotenlinien sichtbar.

Fig. 74 zeigt in der oberen Reihe Ergebnisse eines solchen Experiments an der Terzgitarre Nr. 5. Die Frequenz, mit welcher der Shaker betrieben wurde, ist darüber angegeben. In den Photographien zeichnen sich Knoten als helle Bereiche (Seesand) auf dem dunklen Untergrund des Bodens der Terzgitarre ab. In der unteren Reihe sind die Operating Deflection Shapes mit den zugehörigen Frequenzen angeordnet, wie sie Fig. 63 entnommen werden können.

Ein Vergleich der Resultate von Fig. 74 zeigt für die Terzgitarre eine weitgehende Verwandtschaft der Schwingungsbilder. Die Frequenzen differieren teilweise geringfügig. Sie weichen im Bereich von $-7,7\%$ bis $+2,6\%$, bezogen auf die Frequenzen der Vibrometer-Messung, voneinander ab. Angesichts der unterschiedlichen Randbedingungen (Lagerung auf dem Boden versus Lagerung im Gitarrenständer) und der unterschiedlichen Anregungen (Shaker greift am Boden bzw. am Steg an), die bei den beiden Messungen vorlagen, halten sich diese Diskrepanzen in akzeptablen Grenzen. Eine Übereinstimmung im Grundsatz kann festgestellt werden.

Die Zusammenstellung in Fig. 75 bezieht sich auf den Boden der Westerngitarre Nr. 10. Bei den ersten vier Schwingungsbildern ist die Übereinstimmung offenkundig; beim fünften Bild erscheint sie zumindest wahrscheinlich. Die Frequenzen differieren innerhalb der Spanne von $-8,5\%$ bis $+9,6\%$. Wiederum zeigt sich, dass die verschiedenen Messverfahren Frequenzwerte liefern, die in

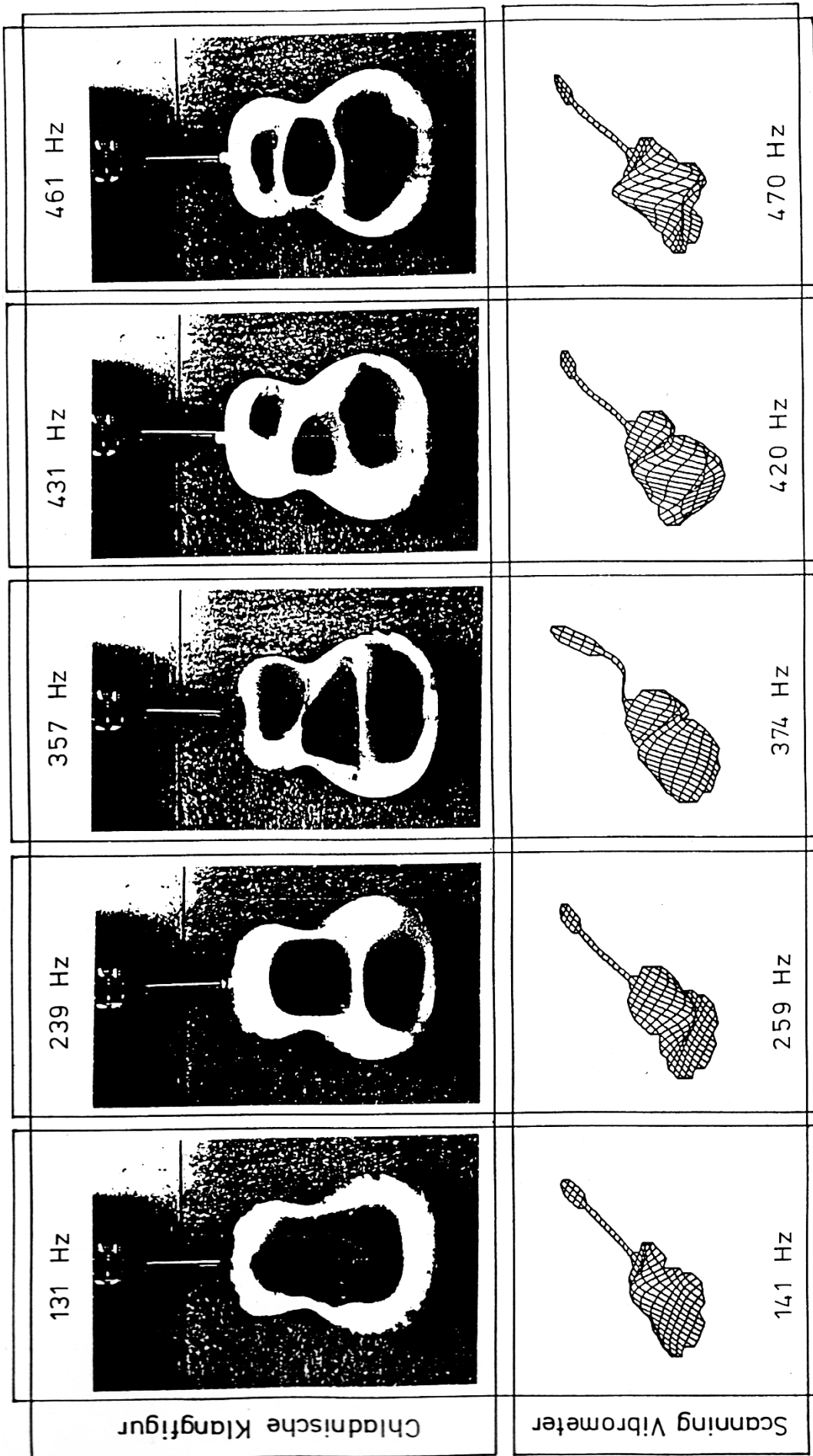


Fig. 74. Schwingungen des Bodens der Terzgitarr Nr. 5.
 Ober: Chladnische Klangfiguren; unten: ODS nach Twork (1997), jeweils mit den zugehörigen Frequenzen.

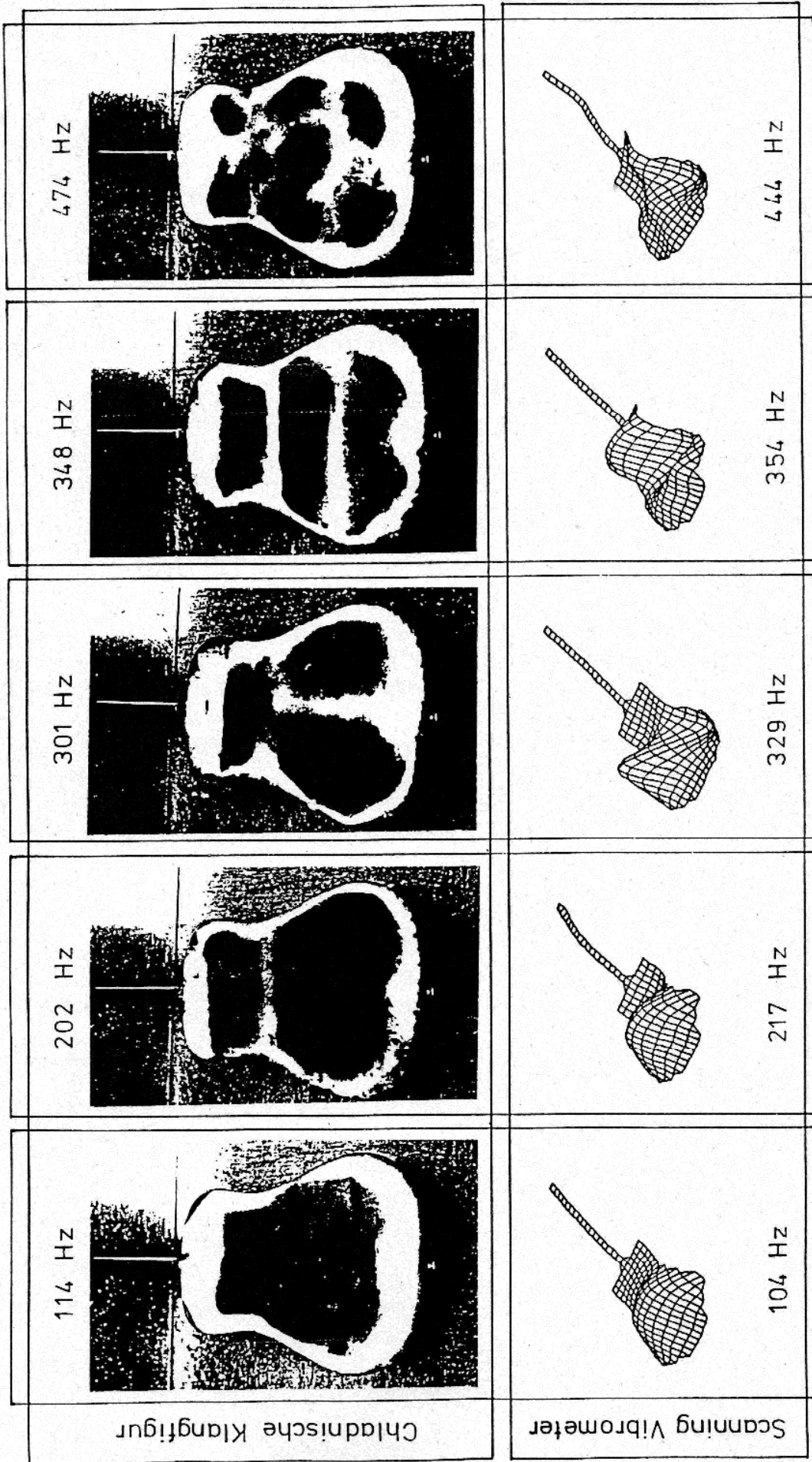


Fig. 75. Schwingungen des Bodens der Westerngitarre Nr. 10 (Western Ranger).
 Oben: Chladnische Klangfiguren; unten: ODS nach Twork (1997), jeweils mit den zugehörigen Frequenzen.

aller Regel weitgehend, aber nicht vollständig übereinstimmen. Die Gründe für mögliche Abweichungen sind vielfältig. Wie bereits oben erwähnt, reichen sie von der Belastung des Messobjektes durch den anregenden Shaker bis zu unterschiedlichen Randbedingungen. Die Schwingungsarten erweisen sich dagegen als vergleichsweise robust. Ungeachtet der Messbedingungen und des Messverfahrens ergeben sich stets weitgehend identische Grundtypen von Schwingungen. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass zur Identifikation von Schwingungsarten die einfache Chladni-Methode oftmals ausreicht. Selbstverständliche Voraussetzung dafür ist, dass das Objekt keine gekrümmte Oberfläche hat sowie eben und waagrecht zu lagern ist. Wenn quantitative Ergebnisse, insbesondere auch bezüglich der Phasen, benötigt werden, empfiehlt sich jedoch die Anwendung der Laser-Vibrometrie.

8.2. Vergleich mit der Modalanalyse

Um die Qualität der Resultate abschätzen zu können, werden die Frequenzen verglichen, wie sie sich bei Anwendung unterschiedlicher Methoden für dieselben Objekte ergeben. Als Bezug wird die Modalanalyse herangezogen, die Twork (1996) an zwei Gitarren durchgeführt hat, die auch im Rahmen der ODS-Serienmessung untersucht wurden.

8.2.1. Charakteristische Frequenzen der Terzgitarre

Nicht sämtliche Schwingungsarten sind eindeutig zu erkennen und zuzuordnen. Für den Vergleich sind nur solche, die bei beiden Untersuchungen eindeutig zu identifizieren waren, in Tab. V aufgelistet. Daneben sind die zugehörigen Frequenzen angegeben. Unter der charakteristischen Frequenz ist bei der Modalanalyse die Eigenfrequenz zu verstehen. Bei der Messung mit dem Scanning Vibrometer ist damit diejenige Frequenz gemeint, bei der die Summen-Übertragungsfunktion ein Maximum aufweist; für diese Frequenz wurden die ODS bestimmt. Ergeben sich bei der Bestimmung der ODSs für Vorder- und Rückseite unterschiedliche Frequenzen, sind beide Zahlenwerte vermerkt.

Schwingungsart	Untersuchung	
	Modalanalyse Twork (1996); Fig. 28	Operating Deflection Shape Twork (1997); Fig. 63
Helmholtz	145 Hz	140/141 Hz
10-Decke-Hals	328 Hz	300 Hz
20-Decke-Hals	392 Hz	377 Hz
01-Decke	446 Hz	467 Hz

Tab. V. Charakteristische Frequenzen der Terzgitarre Nr. 5, ermittelt in zwei verschiedenen Untersuchungen.

Vergleicht man in Tab. V die Frequenzen, welche die vier Schwingungsarten charakterisieren, so erkennt man in gewissem Maße Übereinstimmung. Die rechts angegebenen Frequenzen weichen von den Eigenfrequenzen im Bereich zwischen -8,5% und +4,7% ab. Diese Diskrepanzen dürften vornehmlich mit den unterschiedlichen Randbedingungen zusammenhängen: Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen (Twork (1996)) war die Gitarre weitgehend frei beweglich, bei der Laser-Untersuchung (Twork (1997)) dagegen im Gitarrenständer gelagert. Allein aus diesem Grunde kann keine vollständige Kongruenz der Zahlenwerte erwartet werden. Wesentliche Gemeinsamkeiten sind jedoch trotzdem erkennbar.

8.2.2. Charakteristische Frequenzen der Westerngitarre

Tab. VI umfasst diejenigen Haupt-Schwingungsarten der Westerngitarre, die bei beiden Untersuchungen gleichermaßen eindeutig zu identifizieren waren. Bezogen auf die Ergebnisse der Modalanalyse weichen die Frequenzen der ODSs innerhalb einer Spanne von -3,7% bis +2,9% ab. Diskrepanzen dieser Größe sind angesichts der unterschiedlichen Lagerungsarten der Gitarre, die bei den beiden Experimenten vorlagen, mindestens zu erwarten. Es erstaunt geradezu, dass die Abweichungen nicht größer sind.

Schwingungsart	Untersuchung	
	Modalanalyse Twork (1996); Fig. 30	Operating Deflection Shape Twork (1997); Fig. 68
Helmholtz	104 Hz	104/107 Hz
00-Monopol	218 Hz	217/219 Hz
10-Decke-Hals	271 Hz	261 Hz
20-Decke-Hals	394 Hz	401/401 Hz

Tab. VI. Charakteristische Frequenzen der Westerngitarre Nr. 10, ermittelt in zwei verschiedenen Untersuchungen.

8.3. Gemeinsamkeiten in den Schwingungen der untersuchten Gitarren

Um die Ergebnisse der Vibrometer-Untersuchungen zu strukturieren, wird nach Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Schwingungsarten und -frequenzen gesucht. Zunächst werden all diejenigen Gitarren gemeinsam betrachtet, die sich Klassen zuordnen lassen. Danach werden die einzelnen Bauformen anhand repräsentativer Beispiele getrennt behandelt.

8.3.1. Haupt-Schwingungsarten

Die Schwingungen werden in erster Linie nach Maßgabe der Bewegung der Decke typisiert. Von den in Abschnitt 4.3 zusammengestellten und ausführlich beschriebenen Schwingungsarten werden sechs Haupt-Typen betrachtet. Diese können wie folgt charakterisiert werden:

- o **Helmholtz-Schwingung:** Die Decke schwingt - abgesehen von den Rändern - ohne Knotenlinie. Der Boden bewegt sich gegenphasig zur Decke, so dass der Korpus "pumpt".
- o **00-Dipol-Schwingung:** Ähnlich wie bei der ersten Schwingungsart bewegt sich die Decke ohne zusätzliche Knoten mit einem Maximum in der Gegend des Steges. Der Boden schwingt weitgehend in Phase mit der Decke.
- o **00-Monopol-Schwingung:** Die Decke bewegt sich ohne Knotenlinien. Der Boden schwingt jedoch im Wesentlichen in Gegenphase zur Decke. Ähnlich wie bei der Helmholtz-Schwingung "pumpt" der Korpus.
- o **10-Decke-Hals-Schwingung:** Die Decke schwingt so, dass sich eine Knotenlinie unterhalb des Schalloches senkrecht zur Mittellinie ausbildet (1 Querknoten-, 0 Längsknotenlinie). Der Hals bewegt sich in aller Regel erkennbar mit.
- o **01-Deckenschwingung:** Die Decke schwingt - vornehmlich unterhalb des Schalloches - antimetrisch im bezug auf die Mittellinie von Decke und Hals. Zwei nahezu gleich große Bereiche der Decke bewegen sich in Gegenphase (0 Querknoten-, 1 Längsknotenlinie).
- o **20-Decke-Hals-Schwingung:** Der obere und untere Teil der Decke schwingen in Gegenphase zum mittleren Teil (2 Querknotenlinien, 0 Längsknotenlinie). Der Hals bewegt sich mit.

8.3.2. Frequenzlagen der Schwingungsarten

In die Auswertung werden solche Instrumente einbezogen, die insofern als repräsentativ gelten können, als sie sich allgemein gebräuchlichen Bauformen von Gitarren zuordnen lassen. Einige Exemplare, wie etwa die spanischen Gitarren Nr. 5 und 6, werden weggelassen. Die Terzgitarre Nr. 5 ist höher gestimmt als die übrigen Gitarren. Ihr Korpus ist entsprechend kleiner und schwingt deshalb a priori in anderen Frequenzlagen, als dies bei normal gestimmten Instrumenten der Fall ist. Die Wandergitarre I Nr. 6 fällt deshalb aus dem Rahmen, weil ihr Korpus besonders klein ist und weil sie auf die - für spanische Gitarren ungewöhnliche - Bespannung mit Stahlsaiten ausgelegt ist. Decke und Boden bei der Schlaggitarre Nr. 9 (Triumphator) sind außergewöhnlich steif ausgeführt, was schon an der Wölbung erkennbar ist. Zudem hat dieses Instrument nicht das übliche kreisförmige Schalloch, sondern ähnelt vielmehr einer Violine. Die Frequenzen der Korpus-schwingungen liegen deshalb ungewöhnlich hoch. Die Westerngitarren Nr. 10 (Western Ranger mit Holzboden) und Nr. 11 (Applause mit Bodenschale aus Kunststoff) sind zwar sehr verschieden in Aufbau und Schwingung; mangels weiterer Vertreter des sechssaitigen Stahlsaiten-Typs werden sie trotzdem gemeinsam behandelt.

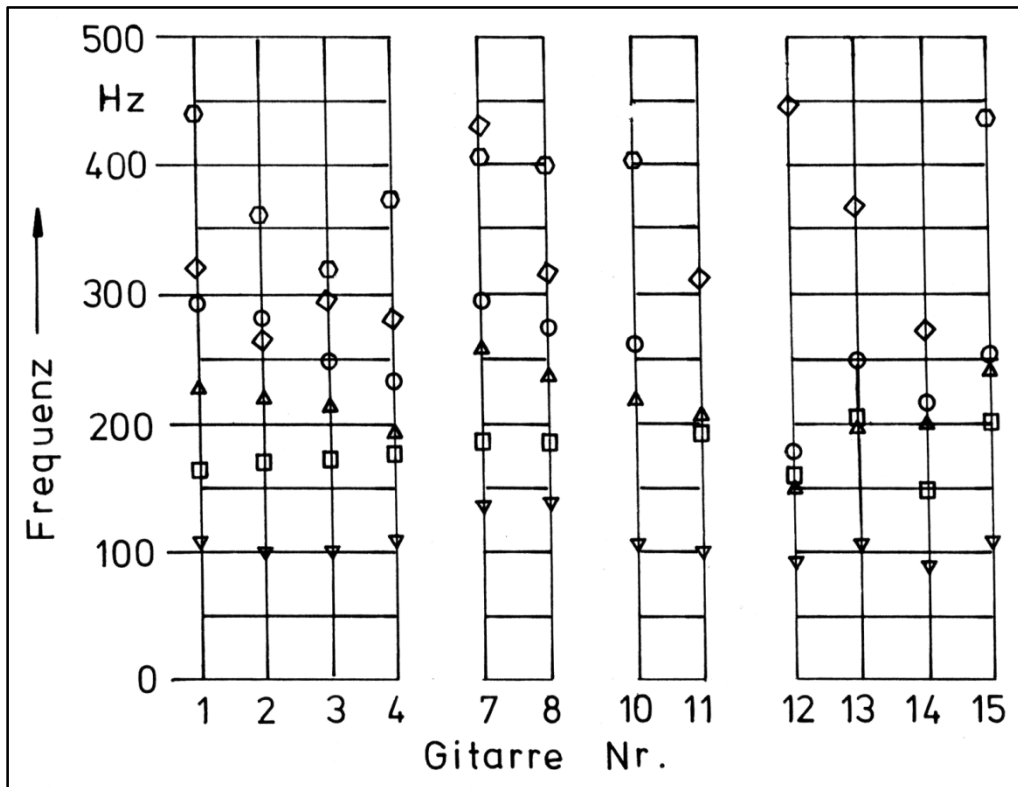


Fig. 76. Frequenzen der einzelnen Schwingungsarten für verschiedene Gitarren.

Dreieck mit Spitze nach unten: Helmholtz-Schwingung;

Quadrat: 00-Dipol-Schwingung;

Dreieck mit Spitze nach oben: 00-Monopol-Schwingung;

Kreis: 10-Schwingung;

Raute: 01-Schwingung;

Sechseck: 20-Schwingung.

Fig. 76 gibt einen Überblick über die Frequenzlagen der Haupt-Schwingungsarten im Bereich bis 500 Hz. Unterscheiden sich die charakteristischen Frequenzen der Decken- und Bodenschwingung, wird immer die Frequenz der Deckenschwingung als repräsentativ betrachtet. Die Gemeinsamkeiten, die dabei erkennbar werden, sollen im Weiteren tabellarisch gefasst werden. Die Frequenzbereiche der einzelnen Schwingungsarten werden für jede Klasse von Gitarren eingegrenzt. In die Zusammenstellung gehen diejenigen Instrumente ein, die in Fig. 76 aufgeführt sind.

Die Typklassen umfassen folgende Instrumente:

* Die spanischen Gitarren Nr. 1 bis 4,

* die Barockgitarren Nr. 7 und 8,

* die sechssaitigen Stahlsaitengitarren Nr. 10 und Nr. 11 sowie

* die zwölfsaitigen Stahlsaitengitarren Nr. 12 bis 15.

	Kunststoffsaitengitarren		Stahlsaitengitarren	
	Spanische Git.	Barockgit.	mit 6 Saiten	mit 12 Saiten
Schwingungsart				
Helmholtz-Schw.	101 - 109 Hz	135 - 138 Hz	102 - 107 Hz	91 - 110 Hz
Dipol	164 - 175 Hz			
00-Schwingung		183 - 255 Hz	194 - 219 Hz	152 - 242 Hz
Monopol	194 - 227 Hz			
10-Schwingung	232 - 292 Hz	274 - 294 Hz	261 - 314 Hz	180 - 252 Hz
01-Schwingung	266 - 321 Hz	313 - 430 Hz	440 Hz	274 - 445 Hz
20-Schwingung	316 - 441 Hz	397 - 407 Hz	401 - 422 Hz	370 - 434 Hz

Tab. VII. Frequenzlagen der Schwingungsarten bei den einzelnen Gitarrentypen.

Ungeachtet einiger Unterschiede im Detail sind die betrachteten spanischen Gitarren - zumindest äußerlich - sehr ähnlich gebaut. Bei sämtlichen vier Vertretern dieses Typs zeigt sich in Tab. VII erwartungsgemäß weitgehende Übereinstimmung. Die Haupt-Schwingungsarten treten innerhalb von relativ eng begrenzten Frequenzbändern auf.

Anders als bei den spanischen Gitarren erscheint es bei den übrigen Instrumenten nicht mehr ohne weiteres möglich, die 00-Deckenschwingung nach Maßgabe der Bewegung des Bodens in eine Dipol- und eine Monopol-Schwingung zu unterteilen. Beispielsweise bei den Barockgitarren sind die Messergebnisse (Fig. 65 und 66) nicht so eindeutig, dass eine Unterscheidung zweifelsfrei möglich wäre. Bei der Westerngitarre Nr. 10 konnte die Dipol-Schwingung nicht nachgewiesen werden. Bei einigen der zwölfsaitigen Gitarren (z.B. Nr. 12 in Fig. 70) tritt zuerst die Monopol- und dann erst die Dipol-Schwingung auf. Aus diesem Grunde wird für sämtliche 00-Deckenschwingungen eine Spanne angegeben, ohne auf die Bewegung des Bodens näher einzugehen. Diese Frequenzspanne reicht von 152 Hz bis 255 Hz.

Die übrigen Schwingungsarten, die in Tab. VII zusammengestellt sind, lassen sich ohne Probleme identifizieren und einordnen. Teilweise ergeben sich dabei sehr große Frequenzspannen. Insbesondere bei den Stahlsaitengitarren scheint die Vielfalt der Bauweisen sehr groß zu sein. Sie wirkt sich dergestalt aus, dass die Abfolge der Schwingungsarten unterschiedlich ist und von derjenigen abweichen kann, wie sie bei spanischen Gitarren vorliegt.

8.4. Typische Schwingungsbilder

Aus jeder der vier Gruppen von Gitarren wird ein Exemplar herausgegriffen, das als repräsentativ gelten kann. Die identifizierbaren Schwingungsarten (siehe Abschnitt 4.3 bzw. Abschnitt 8.3.1. sowie gegebenenfalls weitere Schwingungen) werden tabellarisch zusammengestellt. Die Schwingungsbilder sind so übereinander angeordnet, dass die Frequenz von oben nach unten wächst.

8.4.1. Schwingungen spanischer Gitarren

Als Vertreter der spanischen Gitarren wird das Instrument Nr. 3 (Shiro) gewählt. Den Ergebnissen der Vibrometer-Messungen (Fig. 61) sind diejenigen entnommen, die sich eindeutig identifizieren und zuordnen lassen. Die Zusammenstellung wird durch die 02-Schwingungsform ergänzt, die an der Gitarre Nr. 4 (Hopf) gemessen wurde. Um zu verdeutlichen, dass dieses Bild von einer anderen Gitarre stammt, ist die Umrahmung gestrichelt.

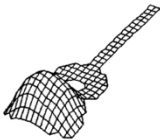

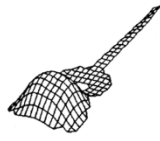

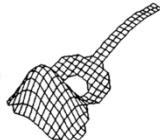
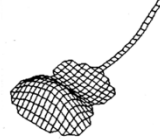
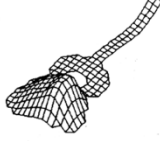


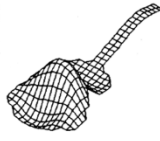
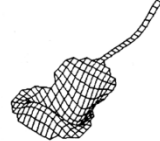

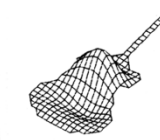
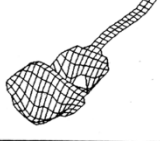

	Decke	Boden
Helm- holtz		
00 - Dipol		
00 - Monopol		
10		
01		
20		
02		
30		

Fig. 77. Haupt-Schwingungsarten der spanischen Gitarre Nr. 3 (Shiro), gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Meist lassen sich im Bereich bis 500 Hz bei spanischen Gitarren acht Haupt-Schwingungsformen nachweisen. Sie folgen mit wachsender Frequenz in aller Regel so aufeinander, wie sie in Fig. 77 untereinander angeordnet sind. Bei manchen Instrumenten stimmt die Aufeinanderfolge der einzelnen Schwingungsarten allerdings nicht vollständig mit derjenigen von Fig. 77 überein. Darüber hinaus sind bei den einzelnen Instrumenten gewisse Diskrepanzen bezüglich der Bewegung des Bodens zu beobachten. Insgesamt stellen die spanischen Gitarren jedoch die homogenste Gruppe aller untersuchten Instrumente dar.

8.4.2. Schwingungen von Barockgitarren

Von den zwei untersuchten Barockgitarren wurde das Instrument Nr. 7 (Gewa) als repräsentativ ausgewählt. Ergänzend ist in Fig. 78 die 30-Schwingungsform hinzugefügt, die für das alte Instrument Nr. 8 ermittelt wurde.

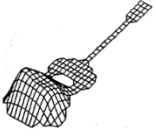
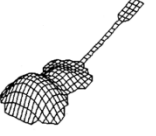
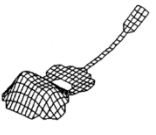
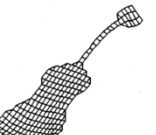

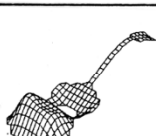
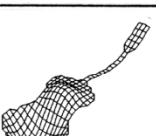
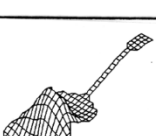
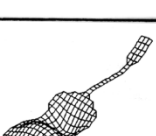
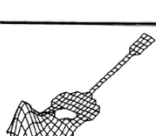
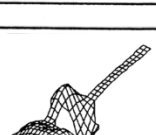
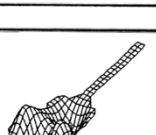
	Decke	Boden
Helm- holtz		
00- Monopol		
00- Dipol		
10		
20		
01		
30		

Fig. 78. Haupt-Schwingungsarten der Barockgitarre Nr. 7 (Gewa), gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Anders als bei den spanischen Gitarren konnte innerhalb des untersuchten Frequenzbereiches die 02-Form nicht nachgewiesen werden. Die Reihenfolge, mit der die Schwingungsarten auftreten, weicht teilweise von derjenigen der spanischen Gitarren ab. Vor allem fällt auf, dass die 00-Monopol-Schwingung bei einer tieferen Frequenz als die 00-Dipol-Schwingung auftritt.

8.4.3. Schwingungen sechssaitiger Stahlsaitengitarren

Die untersuchten Instrumente sind von äußerst unterschiedlicher Bauart. Für die Zusammenstellung in Fig. 79 wird die Gitarre Nr. 11 herausgegriffen, deren Besonderheit die Kunststoffschale ist, die den Boden und die Seitenwände ersetzt.

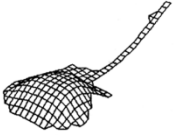
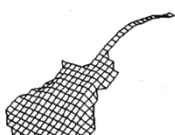


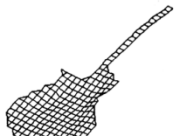



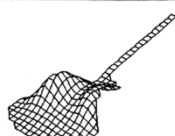
	Decke	Boden
Helm- holtz		
00 - Monopol		
00 - Dipol		
01		
02		

Fig. 79. Haupt-Schwingungsarten der Gitarre Nr. 11 (Applause), gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Die Schwingungsarten, die bei der Applause bis 500 Hz nachzuweisen waren, sind nicht so vielfältig wie bei den anderen Gitarren. Insbesondere wurden die spiegelsymmetrischen 10-, 20- und 30-Formen nicht beobachtet. Dagegen treten Formen mit Knotenlinien parallel zu den Saiten auf. Die 02-Form prägt sich in mehreren Spielarten aus. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das Instrument wegen seiner speziellen Bodenkonstruktion keineswegs als repräsentativ für jede sechssaitige Stahlsaitengitarre betrachtet werden sollte.

8.4.4. Schwingungen zwölfsaitiger Stahlsaitengitarren

Die Gruppe der zwölfsaitigen Gitarren wird durch das Instrument Nr. 12 (Ibanez) repräsentiert. Ergänzend sind die 02-Schwingung der Gitarre Nr. 14 sowie die 20- und 30-Schwingungen der Gitarre Nr. 15 in der Zusammenstellung von Fig. 80 enthalten.

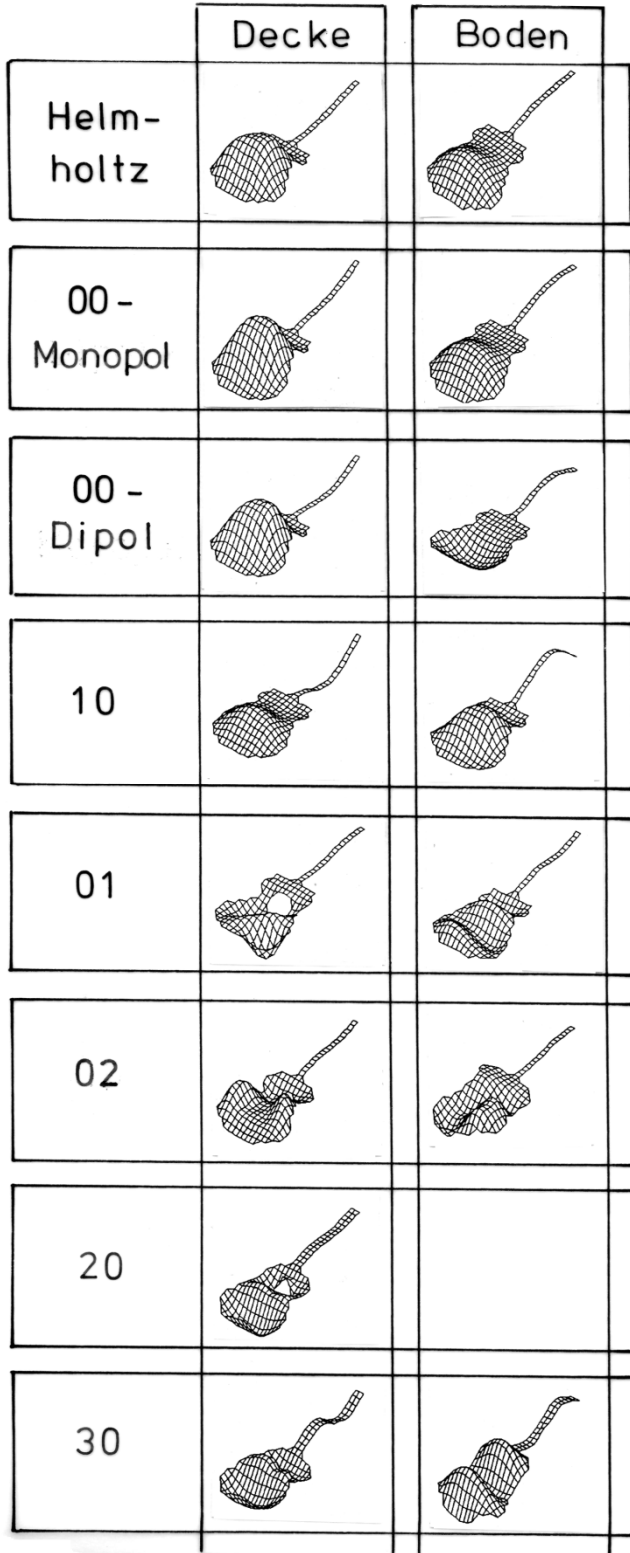


Fig. 80. Haupt-Schwingungsarten der zwölfsaitigen Gitarre Nr. 12 (Ibanez), gemessen mit dem Scanning Vibrometer auf der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts).

Die Aufeinanderfolge der 00-Dipol- und 00-Monopol-Schwingung ist uneinheitlich. Bei der einen Hälfte der vier untersuchten Instrumente ist sie umgekehrt wie bei der anderen. Über das Auftreten

und die Reihenfolge von Schwingungen mit mehreren Knotenlinien (02-, 20- und 30-Schwingung) lassen sich keine allgemeinen Aussagen machen. Sie hängen offenbar stark von der Bauweise des jeweiligen Instrumentes ab, für die es bei zwölfsaitigen Gitarren zahlreiche Spielarten gibt.

8.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Die Serien-Messungen mit dem Scanning Vibrometer wurden auf den unteren Teil des Betriebsfrequenzbereiches der Gitarre (82 Hz bis 500 Hz) beschränkt. In ihrer Gesamtheit sind die Ergebnisse im vorhergehenden Kapitel 7 (Fig. 59 bis 73) präsentiert. Um wesentliche Gemeinsamkeiten hervorzuheben, wurden im vorangegangenen Abschnitt 8.4 typische Resultate dargestellt. Dies geschieht zusammenfassend anhand von Beispielen, welche die vier untersuchten Klassen von Gitarren repräsentieren.

Sämtlichen Gitarren ist gemeinsam, dass die Helmholtz-Schwingung als erste Schwingungsart auftritt. Danach wird die 00-Schwingung beobachtet. Der Boden kann sich in Gleichphase (Dipol) oder in Gegenphase (Monopol) zur Decke bewegen. Welche der beiden Schwingungsarten zuerst in Erscheinung tritt, hängt von der Bauweise der Gitarre ab. Bei Instrumenten mit konventionellem Holzboden bildet sich als vierte Hauptschwingung die 10-Form aus. Damit sind die Gemeinsamkeiten erschöpft. Die Reihung der weiteren Schwingungsarten ist für die unterschiedlichen Gattungen von Gitarren nicht mehr einheitlich. Ab etwa 300 Hz lassen sich deshalb globale Aussagen hinsichtlich der Aufeinanderfolge der Schwingungsarten nicht mehr machen.

9. SCHWINGUNG UND ADMITTANZ

Für die Schallabstrahlung ist bestimmend, wie sich der Korpus einer Gitarre bewegt. Aus der "Sicht" der Saite ist dagegen lediglich von Bedeutung, wie sich der Instrumentenkörper an den Kontaktpunkten verhält. Von der Reaktion dieser beiden Punkte hängt ab, ob eine Saite feste Auflager oder davon abweichende Randbedingungen vorfindet. Dies lässt sich durch die mechanische Punkt-Admittanz kennzeichnen, die das Verhältnis von Schnelle und Kraft am selben Punkt in derselben Richtung darstellt. Sie ist ein komplexes Maß für die Beweglichkeit des jeweiligen Messpunktes.

9.1. Experimentelle Ermittlung der Admittanz

Wie die Punkt-Admittanz gemessen werden kann, ist an anderer Stelle (beispielsweise Fleischer (1997)) bereits ausführlich besprochen worden. Sinnvollerweise wird dazu ein Impedanz-Messkopf (hier: Brüel & Kjaer 8001) mit einer Massenkompensationseinheit verwendet, der in ein und derselben Richtung und an ein und derselben Stelle gleichzeitig eine dynamische Größe (Kraft) und eine kinematische Größe (Beschleunigung) erfasst. Durch FFT-Analyse und Nachbearbeitung in einem Zweikanal-Analysator (hier Ono Sokki CF 350) erhält man den Frequenzgang der komplexen Admittanz. Achtung: Gegenüber der ersten Auflage sind die Zahlenwerte korrigiert.

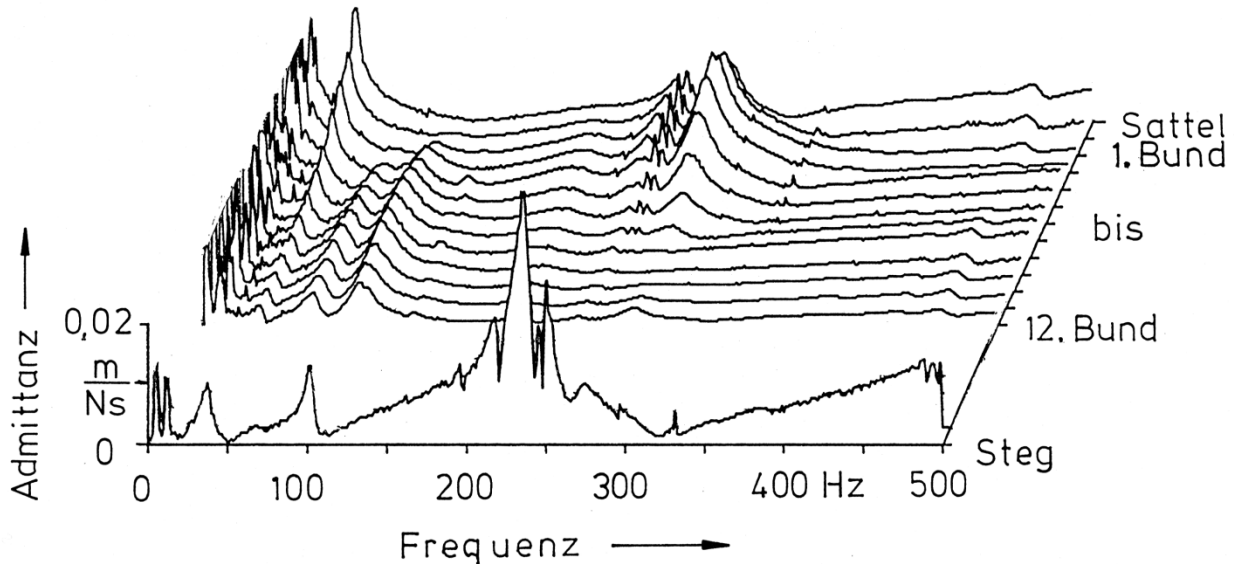


Fig. 81. Betrag der Admittanz am Sattel, den ersten zwölf Bünden und dem Steg der Westerngitarre Nr. 10 als Funktion der Frequenz.

Fig. 81 zeigt für die Gitarre Nr. 10 (Western Ranger) den Betrag der komplexen Punkt-Admittanz (nach oben) in dreidimensionaler Darstellung. An einer Achse ist der Messort (Sattel, Bünden bzw. Steg), auf der anderen die Frequenz zwischen 0 Hz und 500 Hz aufgetragen. Diese Darstellungsweise vermittelt den Eindruck einer Landschaft, in der sich deutliche Höhenzüge abzeichnen. Während diejenigen bei sehr tiefen Frequenzen unterhalb des Betriebs-Frequenzbereiches einer normal

gestimmten Gitarre liegen und daher ohne musikalische Bedeutung sind, befinden sich die Höhenzüge bei etwa 100 Hz und etwas mehr als 200 Hz im Betriebsbereich der Gitarre. Ein Vergleich mit Fig. 68 belegt, dass sich hierin die Schwingungsmuster der Vorderseite, also von Decke und Hals, widerspiegeln.

Die Admittanz drückt aus, mit welcher Schnelle die Auflager der Saiten auf eine Wechselkraft der betreffenden Frequenz reagieren. In allen Fällen bildet der Steg das untere Auflager. Wo das obere Auflager liegt, hängt davon ab, ob die Saiten leer gespielt oder gegriffen werden; es befindet sich entweder am Sattel oder an einem der Bündel. Innerhalb eng begrenzter Frequenzbänder kann die Admittanz sehr groß werden; die Endpunkte der Saite erweisen sich dann als besonders beweglich. Wie Fig. 81 zeigt, erreicht bei der Westerngitarre die Punkt-Admittanz am Steg höhere Werte als auf dem Griffbrett.

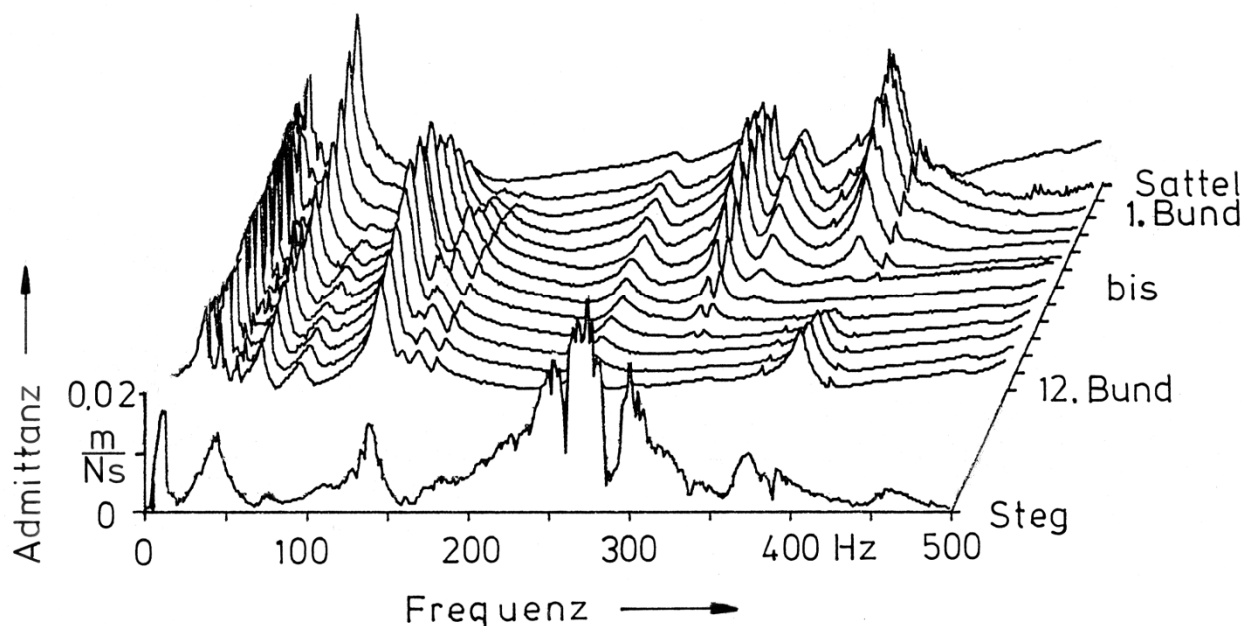


Fig. 82. Betrag der Admittanz am Sattel, den ersten zwölf Bündel und dem Steg der Terzgitarre Nr. 5.

Ein weiteres Beispiel findet sich in Fig. 82. Bei der Terzgitarre Nr. 5 sind die Spitzenwerte der Admittanz auf dem Griffbrett und am Steg von vergleichbarer Größe. Wie auch bei der vorher betrachteten Gitarre erweist sich somit der Hals - entgegen einer manchmal geäußerten Erwartung - als durchaus nicht starr. Vielmehr zeigt er sich beim hier betrachteten Instrument als ähnlich nachgiebig wie die Decke. Man erkennt markante Höhenzüge bei etwa 150 Hz, 260 Hz und 300 Hz sowie etwa 380 Hz.

In den Fig. 81 und 82 ist der Betrag der Admittanz aufgetragen. Dieser gibt Aufschluss darüber, wie beweglich sich der Instrumentenkörper an den Auflagern der Saite überhaupt verhält. Ob er als Feder, Masse oder als Dämpfer wirkt, hängt von der Phasenbeziehung der Kraft und der Schnelle ab, die sich aus dem Betrag naturgemäß nicht ersehen lässt. Insbesondere ist keine direkte Aussage darüber möglich, welche Wirkleistung von der Saite in das Instrument abfließt. Bereits an anderer Stelle (Fleischer (1997)) wurde deshalb vorgeschlagen, den Realteil der komplexen Admittanz, die Konduktanz, zu messen und zu interpretieren.

9.2. Konduktanz an Hals und Steg

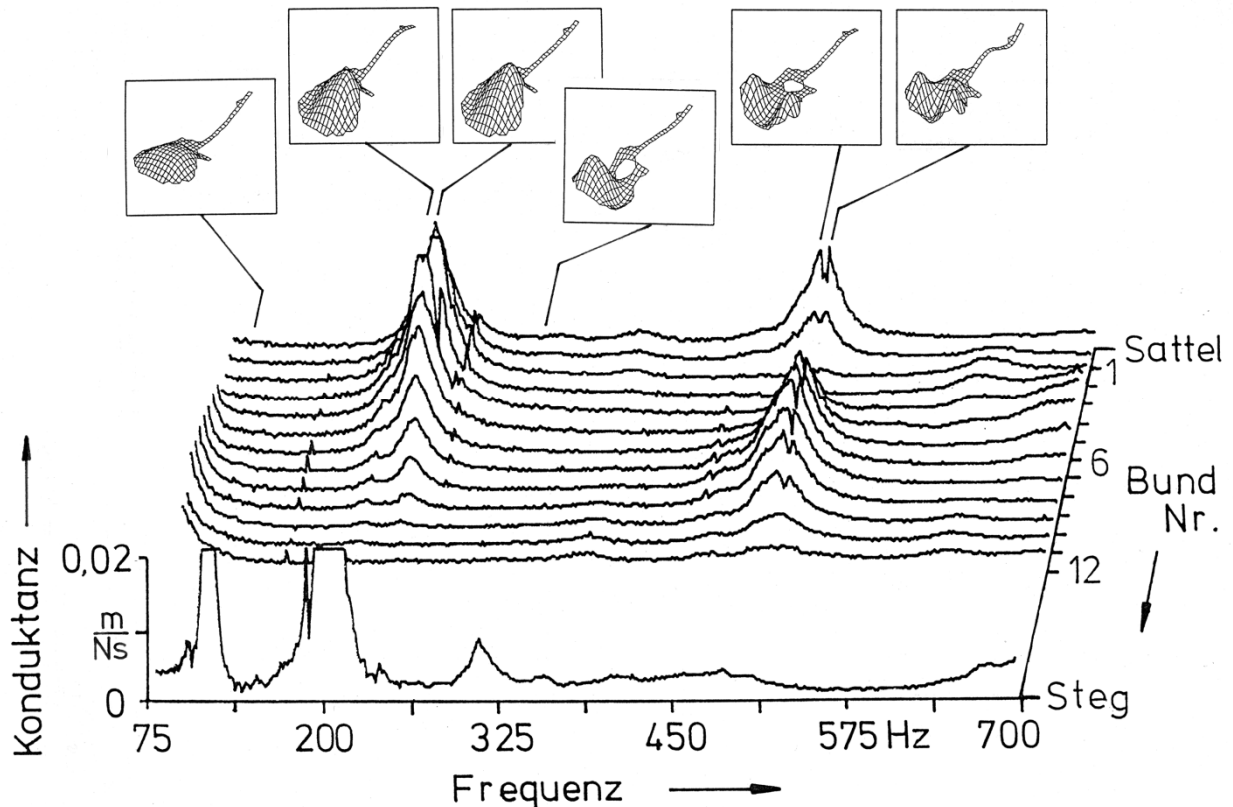


Fig. 83. Realteil der Admittanz am Sattel, den ersten zwölf Bünden und dem Steg der Stahlsaitengitarre Nr. 11 (Applause) als Funktion der Frequenz. Die eingefügten Schwingungsbilder stammen von einer Messung im Gitarrenständer.

Das Beispiel in Fig. 83 bezieht sich auf die Stahlsaitengitarre Nr. 11. Die Art der Präsentation ist prinzipiell dieselbe wie bei den beiden vorigen Figuren. Die Frequenzachse umfasst nun den Bereich von 75 Hz bis 700 Hz. Nach oben ist die Punkt-Konduktanz aufgetragen, die das Verhältnis der gleichphasigen Komponenten von Schnelle und Kraft darstellt. Somit ist sie ein direktes Maß für die Wirkleistung, die eine Saite am betreffenden Auflager in den Hals bzw. die Decke einspeisen kann. Aus darstellungstechnischen Gründen sind die Haupt-maxima der am Steg aufgenommenen Messkurve gekappt.

Wiederum erkennt man Höhenzüge. Diese prägen sich im Realteil der Admittanz noch schärfer aus als im Betrag, der in den Fig. 81 und 82 dargestellt ist. Dass sich auch im "Gebirge" der Konduktanz die Schwingungen des Instruments wiederfinden, wird deutlich, wenn man entlang der Höhenzüge bei konstant gehaltener Frequenz schneidet. Dabei ergeben sich Schnitte, die mit den Schwingungsbildern verwandt sind, wie sie in den Kapiteln 3 sowie 6 bis 8 zusammengestellt sind. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei diesen Schwingungsmessungen - abgesehen vom Anregungspunkt selbst - an einem anderen Punkt gemessen als angeregt wird. Die ODSs basieren demnach auf Transfer-Admittanzen. Im Gegensatz dazu entsteht ein Konduktanz-Gebirge dadurch, dass Kraft und Schnelle an ein und demselben Punkt gemessen werden, was auf Punkt-Admittanzen führt. Eine vollständige Übereinstimmung der Resultate ist allein aus diesem Grunde nicht zu erwarten. In Fig. 83 kommt als weiterer Unterschied hinzu, dass die Konduktanz der Gitarre am Körper, deren Schwingung bei den Reihenmessungen dagegen im Gitarrenständer gemessen wurde. Die Konsequenz ist in Kapitel 6 beschrieben worden: Da der dämpfende Einfluss

der Griffhand fehlt, prägt sich bei der Lagerung des Instruments im Gitarrenständer die Bewegung des Halses stärker aus, als dies bei einer in-situ-Messung der Fall wäre.

Trotzdem ist die Verwandtschaft deutlich erkennbar. In Fig. 83 sind Schwingungsbilder eingefügt, wie sie die Reihenmessung mit dem Polytec Scanning Vibrometer geliefert hat; siehe hierzu Fig. 69. Oftmals treten ähnliche Schwingungsformen eng benachbart auf; es ist dann immer nur ein besonders aussagekräftiges Bild ausgewählt. Die Schwingungsbilder sind in zwei "Etagen" angeordnet. In der höheren Etage finden sich die Bilder derjenigen Schwingungen, bei denen sich der Hals stark bewegt. Darunter sind diejenigen eingefügt, bei denen vorwiegend die Decke schwingt, der Hals dagegen weitgehend in Ruhe bleibt.

So sind Schwingungen (bei etwa 100 Hz und 300 Hz) zu erkennen, die sich vorwiegend auf die Decke konzentrieren und demnach vor allem in der Stegkonduktanz widerspiegeln. Der Vergleich mit den eingefügten Bildern zeigt, dass das erste Maximum der Stegkonduktanz von der Helmholtz-Schwingung herrührt, bei der sich der Hals nur unwesentlich bewegt. Ähnliches gilt für die 01-Schwingung bei etwa 300 Hz; die Decke schwingt antimetrisch mit einer Längsknotenlinie nahe der Mitte, ohne dass sich der Hals bewegt. Die zweite Ansammlung von Maxima der Stegkonduktanz (bei etwa 200 Hz) ist mit den dicht benachbarten 00-Schwingungen verknüpft. Bei einer dieser Schwingungen bewegt sich der Hals in ausgeprägtem Maße mit. Etwas unterhalb von 500 Hz treten sehr komplexe Deckenschwingungen mit zwei Längsknotenlinien auf, die sich auf dem Hals wesentlich stärker als auf der Decke ausbilden. Die Schwingungen oberhalb von 500 Hz wurden von Twork (1997) nicht untersucht.

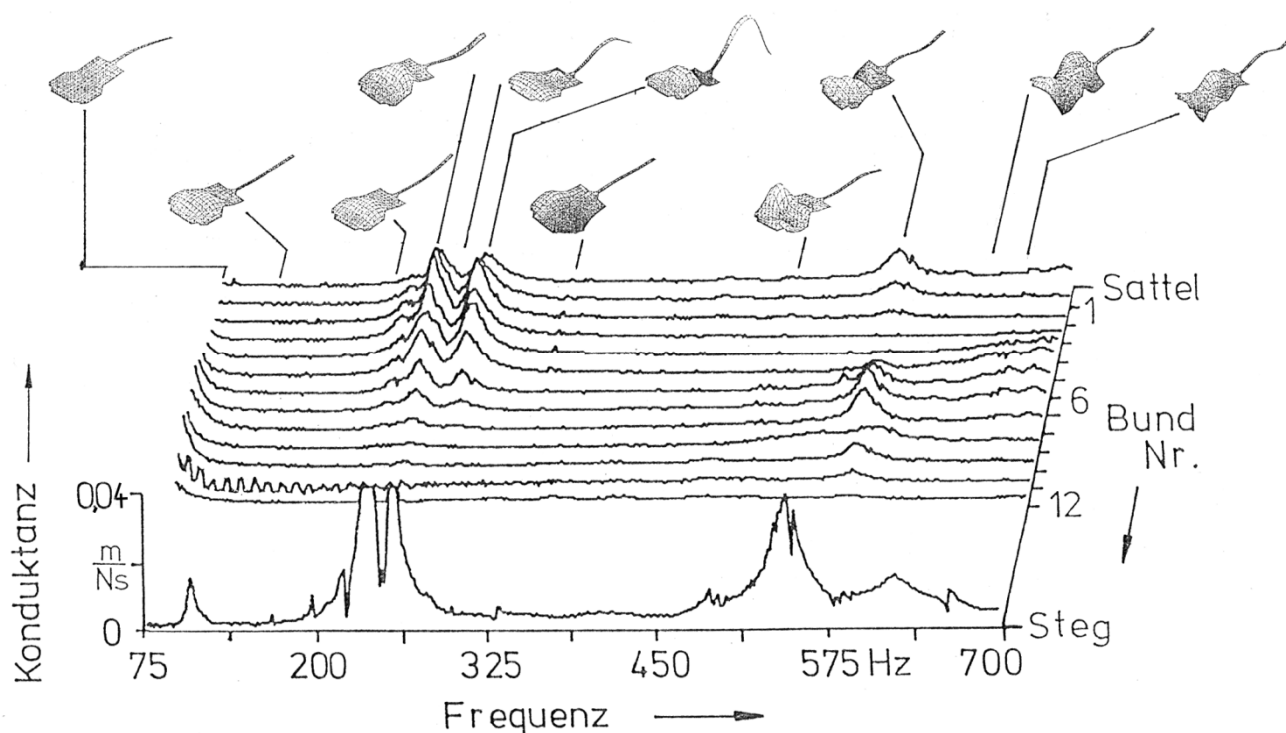


Fig. 84. Realteil der Admittanz am Sattel, den ersten zwölf Bünden und dem Steg der Westerngitarre Nr. 10. Die eingefügten Schwingungsbilder stammen von einer Messung im Gitarrenständer.

Um den gesamten Frequenzbereich abzudecken, der bei der Konduktanzmessung erfasst wird, wurden in einer neueren Messreihe ODSs bis 1000 Hz bestimmt. Dazu wurde die Westerngitarre Nr. 10 (Western Ranger) - wie in Kapitel 7 beschrieben - im Gitarrenständer gelagert. Ausgewählte Ergebnisse sind Fig. 84 zu entnehmen. Hals- sowie Stegkonduktanz der Gitarre sind mit den zugehörigen Schwingungsbildern aus der neuen Messreihe kombiniert. Um die Stegkonduktanz deutlicher sichtbar zu machen, ist auf der Ordinate ein anderer Maßstab als in den vorigen Diagrammen gewählt.

Ganz am unteren Ende der Frequenzachse zeichnen sich in der Konduktanz noch die Ausläufer einer Halsschwingung ab. Die Helmholtz-Schwingung bei etwa 100 Hz beschränkt sich im Wesentlichen auf die Decke. Die ersten Hauptmaxima der Stegkonduktanz oberhalb von 200 Hz rühren von 00-Schwingungen her, bei denen sich im Fall der Westerngitarre der Hals mitbewegt. In noch stärkerem Maße trifft dies für die 10-Schwingung zu, die bei einer etwas höheren Frequenz angeregt wird. Deutlich erkennt man zwei Höhenzüge der Konduktanz, die sich vom Hals in den Steg fortsetzen. Einige der weiteren Schwingungsformen bilden sich lediglich als kleine Maxima der Stegkonduktanz ab. Oberhalb von 500 Hz beobachtet man Schwingungen, die neben der Decke vor allem auch den Hals umfassen. Im Bereich der ersten zwölf Bünde sind jeweils zwei Maxima (Schwingungsbäuche) sowie zwei Nullstellen (Schwingungsknoten) der Halskonduktanz zu erkennen. Insbesondere zwischen 200 Hz und 250 Hz und um etwa 500 Hz ist die Konduktanz am Steg sehr groß, d.h. relativ viel Energie kann von den Saiten direkt in die Decke fließen.

9.3. In-situ-Messung von Konduktanz und Schwingung

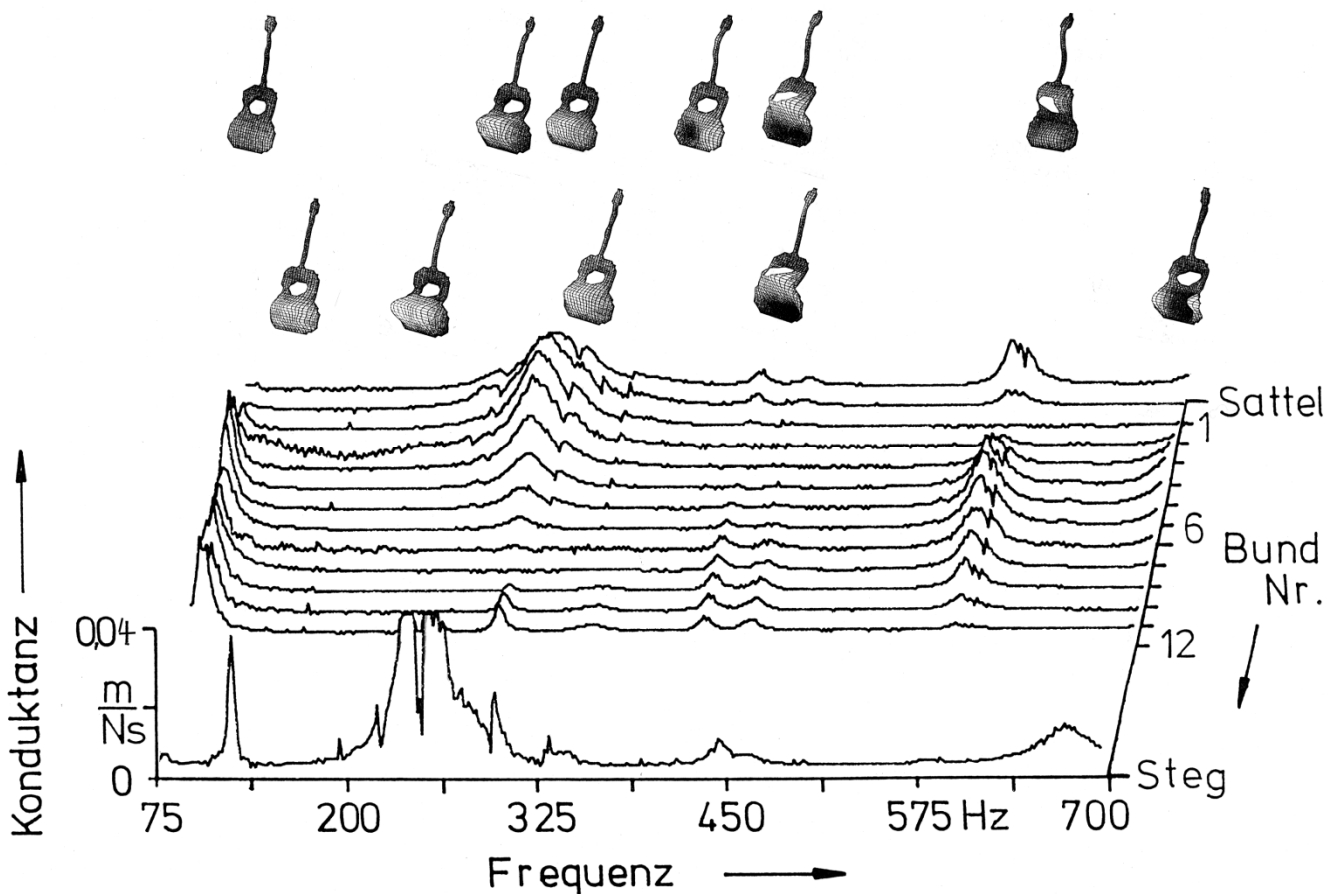


Fig. 85. Realteil der Admittanz am Sattel, den ersten zwölf Bünden und dem Steg der Wandergitarre II (Nr. 6a). Die eingefügten Schwingungsbilder stammen von einer in-situ-Messung.

In einigen weiteren Messungen sollen Unterschiede, die aus verschiedenartigen Lagerungen resultieren können, ausgeschlossen werden. Es wurden sowohl die Konduktanz als auch die Schwingungen in situ, also in sitzender Spielhaltung am Körper, gemessen.

Fig. 85 zeigt ein Ergebnis für die Wandergitarre II (Nr. 6a). Einige der Schwingungsbilder, wie sie in anderer Darstellung in Fig. 49 zusammengefasst sind, sind über dem Konduktanzgebirge so eingefügt, dass eine Zuordnung erkennbar wird. Nachdem bei beiden Arten der Messung vergleichbare Randbedingungen vorlagen, wird die Verknüpfung sehr deutlich. Maxima der Stegkonduktanz treten bei Frequenzen auf, bei denen ausgeprägte Schwingungen der Decke im Bereich des Steges gemessen werden. Die Höhenzüge der Halskonduktanz sind bei Frequenzen zu beobachten, für welche die Schwingungsmessung ausgeprägte Bewegungen des Halses ergibt.

Fig. 86 bezieht sich auf die Wandergitarre Nr. 6. Im Konduktanzdiagramm sind lediglich die Ergebnisse für den Hals dargestellt. Zur Illustration sind die Schwingungen des Halses, wie sie eine in-situ-Messung ergibt, zusammengestellt. Je heller die Messfelder dargestellt sind, desto größer ist die Schwingungsgeschwindigkeit am betreffenden Punkt. Deutlich bilden sich die Knoten (dunkel) und Bäuche (hell) auf dem Hals ab. Ein Vergleich macht die Zusammenhänge erkennbar, die zwischen dem Admittanzgebirge und den Schwingungsmustern des Halses bestehen.

In diesem Zusammenhang sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Gitarre bei den beiden Messungen zwar auf ähnliche Weise gehalten, jedoch auf unterschiedliche Art angeregt wird. Der Schwingungsmessung liegt die Anregung des Instrumentenkörpers über das untere Ende der Saiten am Steg zugrunde. Deshalb wird die Kraft am Steg eingeleitet. Bei der Admittanzmessung soll dagegen die Anregung nicht nur am Steg, sondern auch über den Hals am anderen Saitenende simuliert werden. Aus diesem Grunde greift bei der Messung der Stegimpedanz die Kraft am Steg an. Bei der Messung der Halsimpedanz wirkt sie am Sattel oder an den verschiedenen Bündeln. Aufgrund dieses prinzipiellen Unterschiedes kann und soll die Admittanzmessung nicht dasselbe Ergebnis wie die Schwingungsmessung liefern. Gleichwohl liegt sowohl den ODSs wie auch der örtlichen Verteilung der Admittanz dasselbe Phänomen, nämlich das orts- und frequenzabhängige Eigenschwingungsverhalten des Instruments, zugrunde. Demnach ist zu erwarten, dass Parallelen ersichtlich sind. Wie die angeführten Beispiele gezeigt haben, erfüllt sich diese Erwartung.

Die in diesem Kapitel zusammengestellten Vergleiche illustrieren, dass die beschriebenen Schwingungsmessungen nicht nur die Basis für weiterführende Berechnungen darstellen, sondern auch Erklärungen für Messergebnisse liefern können, die bei anderen Untersuchungen (z.B. Fleischer (1997)) anfallen. Wie die Erprobung unterschiedlicher Verfahren gezeigt, hat sich insbesondere die Laser-Doppler-Vibrometrie mittels Scanning Vibrometers bewährt. Mit dieser Methode lassen sich ohne Berührung der Gitarre - und damit frei von möglicherweise störender Beeinflussung des Messobjektes - die Informationen gewinnen, die im Hinblick auf die Funktion eines Musikinstrumentes wesentlich sind. Die Messungen laufen so zügig ab, dass sie in situ durchgeführt werden können. Diese Möglichkeit erweist sich als ganz wesentlicher Vorteil. Da viele Instrumente sich äußerst sensitiv gegenüber Änderungen der Randbedingungen zeigen, ist es in manchen Fällen geradezu unabdingbar, die Schwingungen in normaler Spielhaltung zu untersuchen. Beide Verfahren, die in diesem Kapitel behandelt wurden, bieten diese Option. Sowohl die Punkt-Admittanzen als auch die ODSs lassen sich so messen, dass das Instrument keinen anderen als seinen natürlichen Platz, nämlich den am Körper des Spielers, einzunehmen braucht.

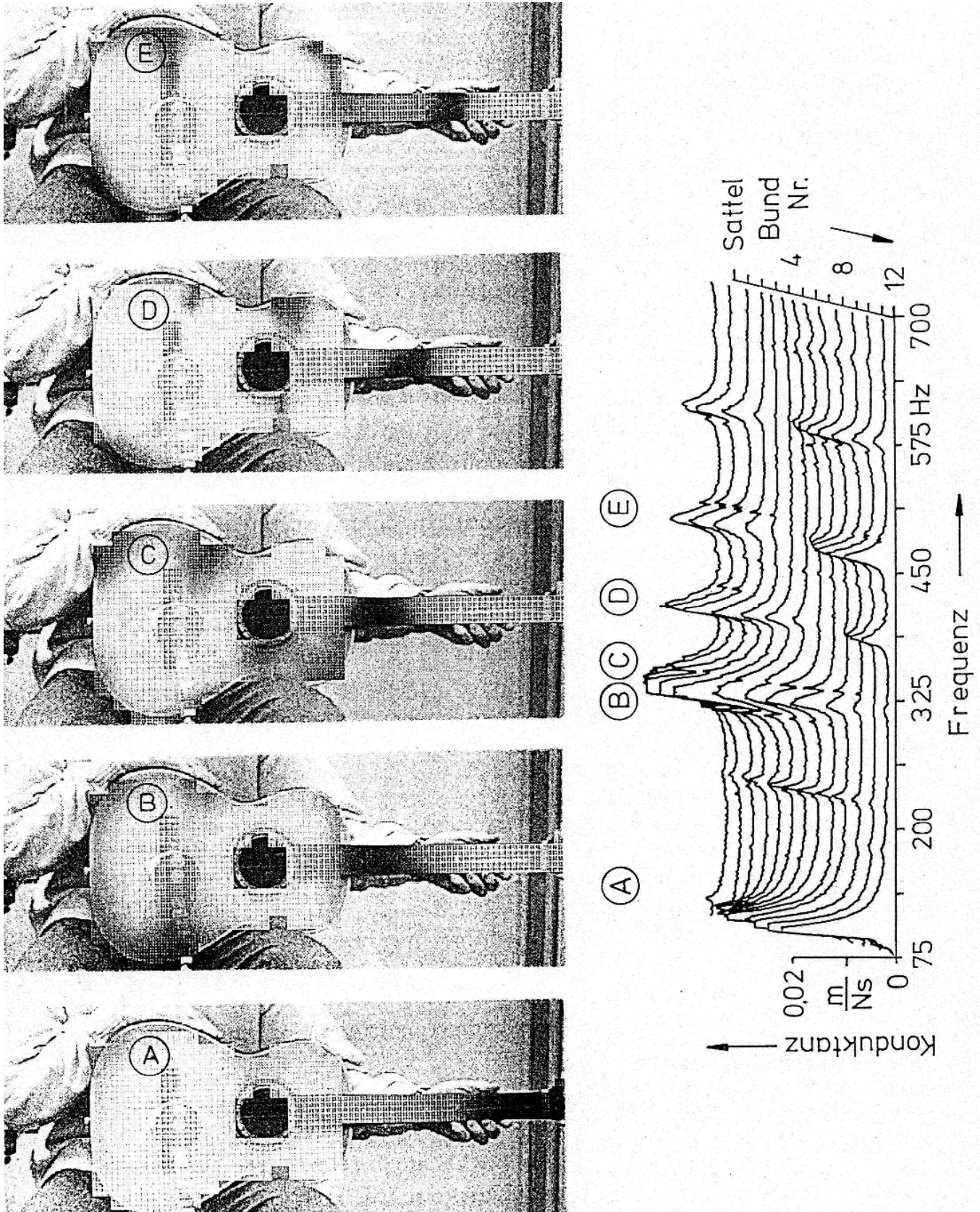


Fig. 86. Realteil der Admittanz am Sattel und an den ersten zwölf Bünden der Wandergitarre Nr. 6. Die Schwingungsbilder stammen von einer in-situ-Messung.

10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK

Das Objekt der vorliegenden Studie ist die akustische Gitarre. Dieser Begriff ist im Gegensatz zur elektrischen Gitarre zu verstehen, bei der dem Instrument lediglich die Aufgabe zukommt, das Saitensignal zu erzeugen (Lemme (1982), May (1984), Meinel (1987), Fleischer und Zwicker (1998) sowie Fleischer (1998)). Während bei einer E-Gitarre elektroakustische Mittel zu Hilfe genommen werden, um das Saitensignal in Schall umzusetzen, wird bei einer akustischen Gitarre der Korpus als Abstrahlkörper genutzt.

Das Signal jeder Art von Chordophonen stammt - wie die Bezeichnung es beschreibt - von Saiten. Schwingungen von Saiten werden bereits seit langer Zeit wissenschaftlich untersucht. Einen Überblick über die Anfänge der Versuche, das mechanische Modell der idealen Saite mit den Mitteln der Mathematik zu behandeln, gibt das Kapitel "Geschichte der Theorie der schwingenden Saite" in Szabó (1987). Neuere Arbeiten erweitern dieses Modell; siehe z.B. Fletcher (1964), Wolf und Müller (1968), Gough (1981), Karp (1986) oder Cuesta und Valette (1990). Sie beziehen die Biegesteifigkeit der Saite ("Balkeneigenschaften"), die Dämpfung sowie nachgiebige Lager in die Berechnung mit ein und berücksichtigen damit die Verhältnisse, die bei einem realen Musikinstrument anzutreffen sind. Während für die oben angeführten Berechnungen geometrische Linearität vorausgesetzt wird, gehen Molteno und Tuffilaro (1990), Gottlieb (1990) sowie O'Reilly und Holmes (1992) noch einen Schritt weiter und lassen nichtlineare Schwingungen zu.

Sehr nahe an der Praxis befassen sich de Dayans und Behar (1979) sowie Chaigne (1991) messtechnisch und Chaigne (1986) psychoakustisch mit den Saiten von Gitarren. Neben der Beschaffenheit der Saiten ist für einen musikalischen Klang naturgemäß auch die Spielweise von großer Bedeutung; dieses Thema wird beispielsweise von Jovicic (1967/68) und Meyer (1987) behandelt.

Die akustische Gitarre hat die Schwingung der Saiten in Schall umzuwandeln. Diese Aufgabe übernimmt der Korpus, auf den die Saiten über ihre Auflager die Schwingung übertragen. Der Korpus wird frequenzselektiv zum Mitschwingen gebracht. Dadurch setzt er die (mechanische) Saitenschwingung mehr oder weniger effizient in eine (akustische) Luftschwingung um. Aus diesem Grunde fällt dem Korpus der Gitarre eine wesentliche Rolle zu. Einige der Einflüsse auf das Abstrahlverhalten, die von der Bauweise des Korpus herrühren, sind in den Arbeiten von Jovicic (1967a, 1967b), Jovicic (1972; unter besonderer Berücksichtigung des Bodens), Jovicic und Jovicic (1975; unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Dicken der Decke), Jovicic, Pravica und Jovicic (1975; unter besonderer Berücksichtigung der Qualität des Holzes der Decke) oder Rosen und Chaigne (1996; unter besonderer Berücksichtigung der Beleistung) untersucht worden.

Den Molekülen der umgebenden Luft wird die Schwinggeschwindigkeit aufgeprägt, mit der sich die Teile des Instrumentenkörpers senkrecht zu ihrer Oberfläche bewegen. Somit kommt den Transversalschwingungen eine zentrale Bedeutung zu. Im Hinblick auf die Abstrahlung von Schall ist demzufolge die wandnormale Komponente der Bewegung des Gitarrenkörpers zu messen. Diese zu ermitteln war Gegenstand der beschriebenen Untersuchungen. Zwei unterschiedliche Wege wurden beschritten:

- * Zum einen wurde das Eigenschwingungsverhalten von Teilen (Decke, Decke mit Hals) oder des gesamten Instrumentenkörpers analysiert. Dies führt auf Eigenfrequenzen und Eigenformen.
- * Zum anderen wurden Operating Deflection Shapes der Vorder- und der Rückseite bestimmt. Das Ergebnis ist ein Schwingungsmuster-Frequenzgang. Die Schwingungsmuster, die sich mit den im Mittel größten Amplituden ausprägen, wurden sichtbar gemacht.

Die Standardmethode zur experimentellen Bestimmung des Eigenschwingungsverhaltens ist die Modalanalyse, die hier mit dem Programm StarModal durchgeführt wurde. Unterschiedliche Aufnehmer und Anregungen lassen sich verwenden. Sehr gebräuchlich ist es, die Bewegung mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer zu erfassen, der meist mit Bienenwachs an einen festen Messpunkt geklebt wird. Die Gitarre wird an unterschiedlichen Punkten mit einem Impulshammer angeschlagen, der einen piezoelektrischen Kraftaufnehmer enthält; siehe Dillmann und Winter (1993), Wogram (1994), Ziegenhals (1995) oder Twork (1996). Diese Art der Messung liefert in relativ kurzer Zeit relativ verlässliche Daten.

Bei Besitzern wertvoller Gitarren ist jedoch immer wieder eine mentale Sperre zu beobachten, die von der Schreckensvision getragen wird, das Instrument könnte die Anregung durch einen etwas zu kräftigen Hammerschlag nicht ohne Schaden überstehen. Um dem entgegenzutreten, wurden auch Verfahren erprobt, bei denen das Instrument an einem festgehaltenen Punkt mit einem elektrodynamischen Shaker zum Schwingen gebracht wird. Gemessen wird mit einem Laser-Schnellaufnehmer, der die Oberfläche abtastet. Dieses Verfahren hat den Vorteil, berührungslos und damit garantiert zerstörungsfrei zu arbeiten. Experimente solcher Art haben z.B. Dillmann und Winter (1993), Kreuzig (1994) sowie Fleischer (1995) durchgeführt.

Vor allem wenn der Gitarrenkörper gezielt modifiziert werden soll, bietet die Modalanalyse Vorteile (Ziegenhals (1995), Schleske (1996)). Dies umso mehr, als Programme verfügbar sind, mit denen sich - ausgehend von Messdaten - mögliche Änderungen der mechanischen Struktur am Rechner simulieren lassen. Modifikationen können auf diese Weise sehr rasch optimiert werden, ohne dass für jeden Schritt ein Versuchsinstrument tatsächlich hergestellt werden muss. Eine solche Erweiterung wird auch zum hier verwendeten Modalanalyse-Programm StarModal angeboten.

Wirklichkeitsnahe Resultate in Bezug auf das Schwingungsverhalten von Gitarren sind dann zu erwarten, wenn bei der Messung die "natürlichen" Bedingungen vorliegen oder zumindest hinreichend nachgebildet werden. Darunter ist zu verstehen, dass das Instrument bei der Messung möglichst so gehalten und angeregt werden sollte, wie dies im Spielbetrieb der Fall ist. Diese Forderungen lassen sich am einfachsten erfüllen, wenn in situ gemessen wird, wenn also ein Spieler das Instrument in normaler Spielhaltung am Körper hält.

Die Ergebnisse solcher Messungen haben nur dann Aussagekraft, wenn sie reproduzierbar sind. Voraussetzung dafür ist, dass der Messvorgang nur so lange dauert, wie eine Person eine Gitarre halten kann, ohne die Position wesentlich zu verändern. In sitzender Spielhaltung ist dies einige Minuten bis zu etwa einer Viertelstunde lang möglich. Diese Zeit reicht aus, um einen Abtastvorgang mit dem Scanning Vibrometer vorzubereiten und durchzuführen. Die Schwinggeschwindigkeit wird an ausreichend vielen Punkten der Oberfläche in rascher Folge berührungsfrei mit einem Laserstrahl abgetastet, der über zwei bewegliche Spiegel gelenkt wird. Der Dopplereffekt bewirkt eine Verschiebung der Frequenz des reflektierten Strahles, aus der das Geschwindigkeitssignal gewonnen wird. Die Geschwindigkeits- und Kraftsignale werden in einem Rechner gespeichert und auf vielfältige Weise verarbeitet. Als Resultate erhält man den Frequenzgang der Operating Deflection Shapes, d.h. die Schwingungsformen des Instrumentes bei den aktuellen Randbedingungen und der aktuellen Anregung. Extrahiert man diejenigen ODSs, bei denen die Summenübertragungsfunktion Maxima ausbildet, so ergeben sich Schwingungsbilder, die den Ergebnissen einer Modalanalyse ähneln und in vielen Fällen praktisch gleichen.

Für zwei Instrumente wurden Ergebnisse von in-situ-Messungen ausführlich präsentiert. Eine Person hielt dabei das Instrument in sitzender Spielposition so, dass Seitenwand, Boden und Hals wie beim Spielen Kontakt mit dem Körper des Spielers haben. Die Schwingungen von Decke und Hals

werden mit dem Scanning Vibrometer abgetastet. Aussagekräftige in-situ-Messungen haben sich somit als praktikabel erwiesen. Zur Illustration sind einige typische Ergebnisse in der linken Spalte von Tab. VIII zusammengestellt.

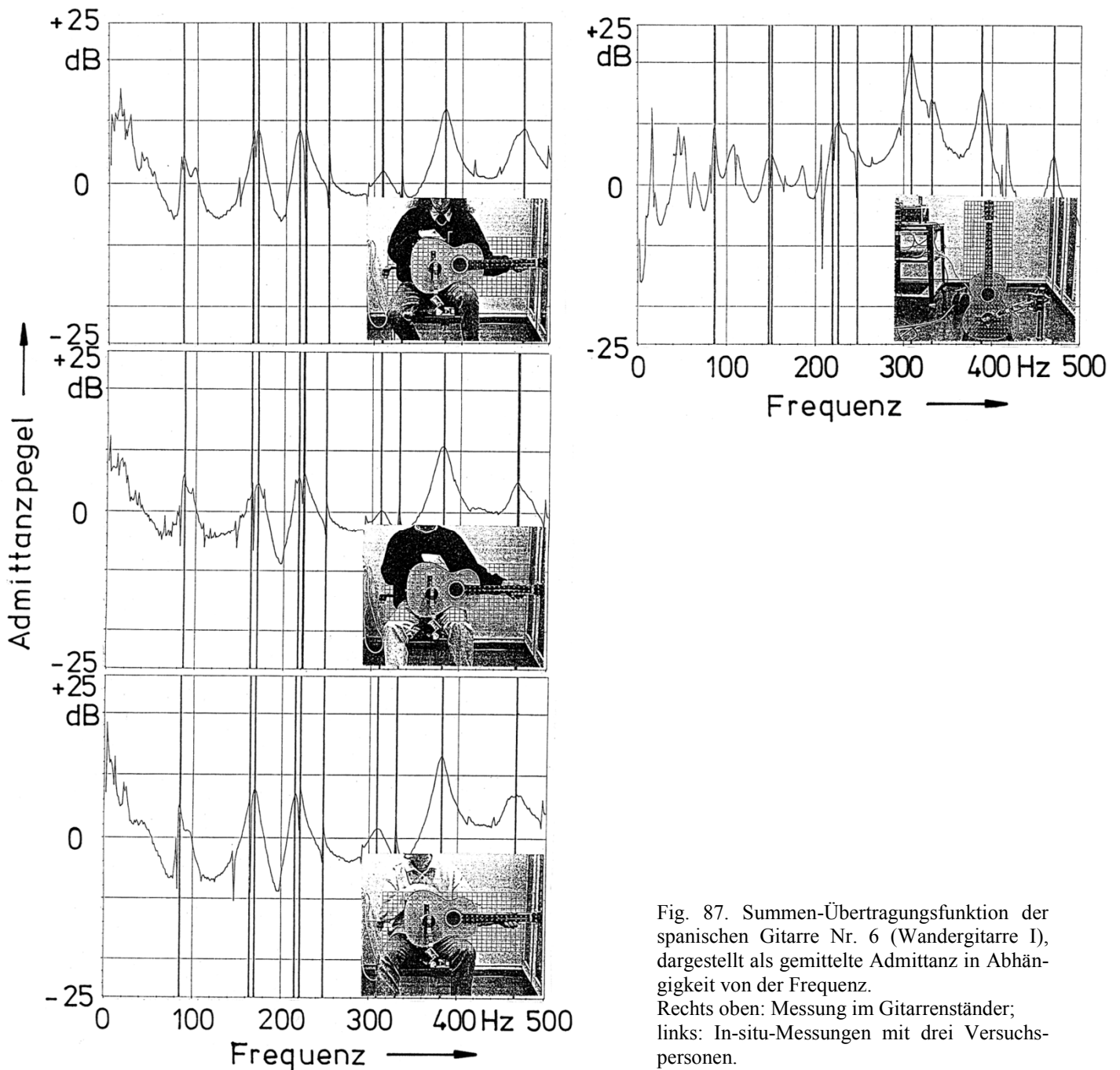


Fig. 87. Summen-Übertragungsfunktion der spanischen Gitarre Nr. 6 (Wandergitarre I), dargestellt als gemittelte Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz. Rechts oben: Messung im Gitarrenständer; links: In-situ-Messungen mit drei Versuchspersonen.

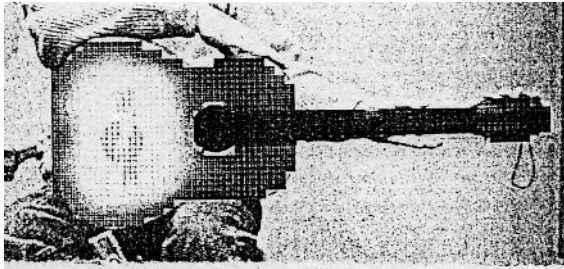
Fleischer und Zwicker (1998) haben anhand von Vergleichen gezeigt, dass bei elektrischen Gitarren die Ergebnisse hinreichend reproduzierbar sind. Ob dies auch für akustische Gitarren zutrifft, kann anhand von Fig. 87 beurteilt werden. Dort sind Summen-Übertragungsfunktionen, die das Mittel aller gemessenen Transfer-Admittanzen darstellen, für ein und dieselbe Gitarre zusammengestellt. Die eingefügten Bilder zeigen die jeweilige Messsituation. Das Diagramm rechts oben gilt für die Lagerung im Gitarrenständer. Die drei Diagramme in der linken Spalte beziehen sich auf in-situ-Messungen an derselben Gitarre, wenn Personen sie halten.

Der Vergleich von Diagrammen in verschiedenen Spalten von Fig. 87 erlaubt es, die Unterschiede abzuschätzen, die zwischen der Messung in situ und derjenigen im Gitarrenständer zu erwarten sind. Er bestätigt, was bereits in Kapitel 6 erkennbar war: Wird das Instrument im Gitarrenständer gelagert, differieren die Frequenzen, bei denen die einzelnen Schwingungsmuster auftreten, im Vergleich zur in-situ-Messung in gewissem Maße. Darüber hinaus fällt auf, dass das rechte Diagramm einige besonders hohe und scharfe Maxima aufweist; manche Schwingungsmuster bilden sich im Gitarrenständer deutlicher als am Körper aus. Erwartungsgemäß ist der Unterschied am größten, wenn die Griffhand den Hals nahe einem Schwingungsbauch umfasst. In vollem Umfang trifft dies für die 02-Decke-Hals-Schwingung etwas oberhalb von 300 Hz zu. Bei der in-situ-Messung dämpfen Arm und Hand des Spielers die Halsschwingung auf etwa ein Zehntel der Amplitude, die beim frei beweglichen Hals (wie im Gitarrenständer) gemessen wird. In Fig. 87 ist zu erkennen, dass das zugehörige Maximum in der linken Spalte um mehr als 20 dB unter dem liegt, das der rechten Spalte zu entnehmen ist. Demnach wirkt sich die in-situ-Messung im Sinne einer Informationsreduktion aus: Da die Dämpfung durch die linke Hand mit Arm im natürlichen Ausmaß ein-geht, reduziert sie mögliche "Übertreibungen", die bei einer Messung in der Ersatz-Lagerung insbesondere bei Schwingungen des Halses auftreten können.

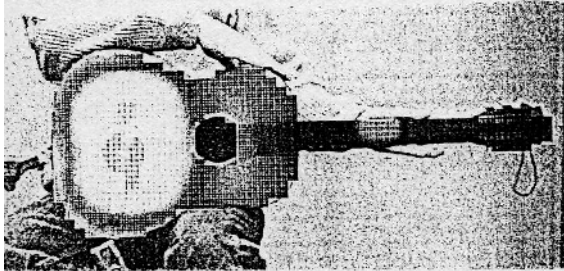
Anhand der linken Spalte von Fig. 87 ist eine Abschätzung der Abweichungen möglich, die daher rühren, dass verschiedene Personen (von oben nach unten: Dipl.-Ing. Miriam Valenzuela, Dipl.-Ing. Matthias Schlägel und Dipl.-Ing. Peter Middendorf) die Gitarre halten. Die Haupt-Schwingungsarten sind durch Bänder hervorgehoben. Die drei in-situ-Admittanzkurven stimmen weitgehend überein. Ihre Maxima differieren leicht in der Höhe; die Frequenzen sind jedoch weitgehend identisch. Die Abweichung ist praktisch nie größer als 1,25 Hz, was bei der gewählten Frequenzauflösung dem Abstand zwischen zwei benachbarten Frequenzpunkten entspricht. Auf die prozentuale Abweichung wirkt sich dies naturgemäß am stärksten im Bereich tiefer Frequenzen aus. Diese entspricht bei der ersten Schwingung nicht ganz zwei Prozent und beträgt bei der 20-Schwingung nur mehr etwa drei Promille. Die gute Übereinstimmung belegt, dass der Einfluss der Versuchspersonen auf die Schwingungsfrequenzen erstaunlich gering ist. Bei gleicher Haltung beeinflussen unterschiedliche Personen das Messergebnis offenbar weit weniger, als es die unterschiedlichen "künstlichen" Lagerungen tun, die erprobt worden sind.

Bei der hier beschriebenen Serienuntersuchung wurde auf die - eigentlich wünschenswerte - in-situ-Messung verzichtet. Stattdessen sollten die Gitarren in einer Halterung gelagert werden. Dies bringt zum einen eine Zeitersparnis und erlaubt zum anderen, auch die Schwingung der Rückseite zu erfassen. Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Lagerungen wurden durchgeführt, bei denen Schwingungsformen und -frequenzen mit in-situ-Ergebnissen als Referenz verglichen wurden. Als tragbarer Kompromiss ergab sich, die Gitarre zur einigermaßen wirklichkeitsnahen Messung in einen handelsüblichen Gitarrenständer zu stellen. Die untere Seitenwand des Instruments liegt dann an zwei Stellen auf. Die Rückseite des Korpus wird an seiner Mittellinie an einem Punkt unterstützt. Hals und Kopf sind frei beweglich. Möglicherweise übertriebene Auslenkungen des Halses, die daraus resultieren, werden in Kauf genommen. Für die auf diese Weise gelagerten Gitarren wurden ODSs mit einer Frequenzauflösung von 1,25 Hz im Bereich bis 500 Hz bestimmt.

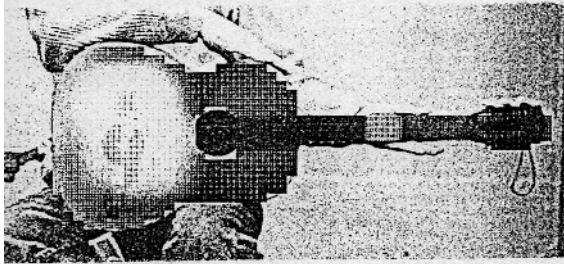
in-situ-Messung

**Helmholtz-Schwingung**

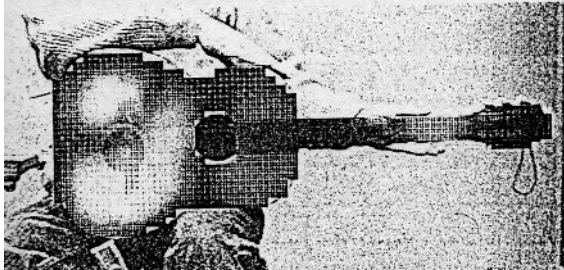
125 Hz 125 Hz

**00-Schwingung**

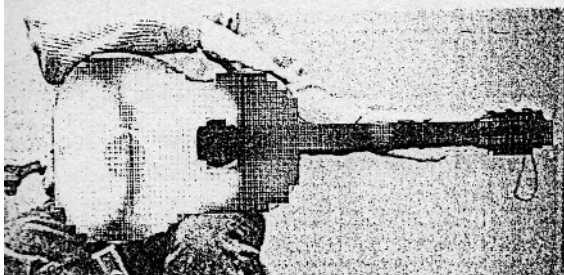
255 Hz 255 Hz

**10-Schwingung**

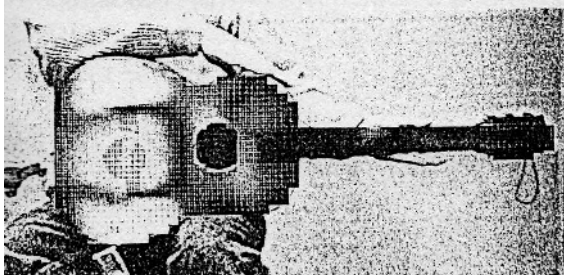
300 Hz 280 Hz

**01-Schwingung**

335 Hz 305 Hz

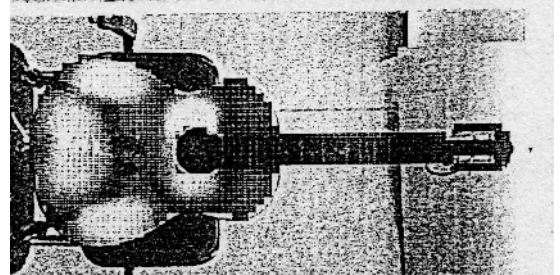
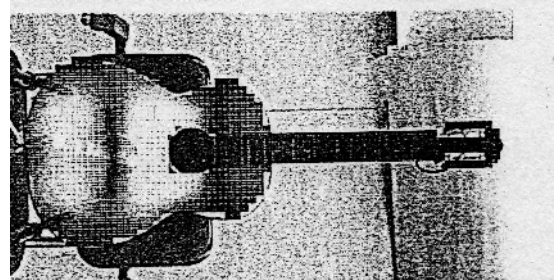
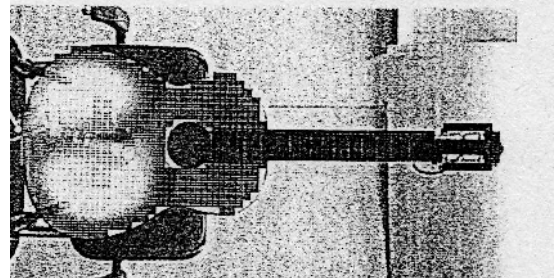
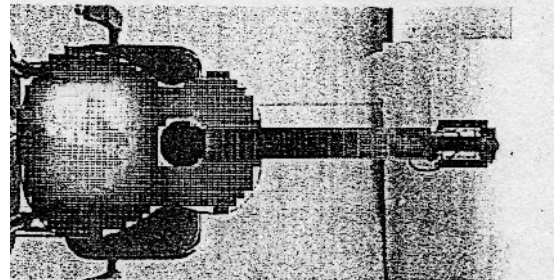
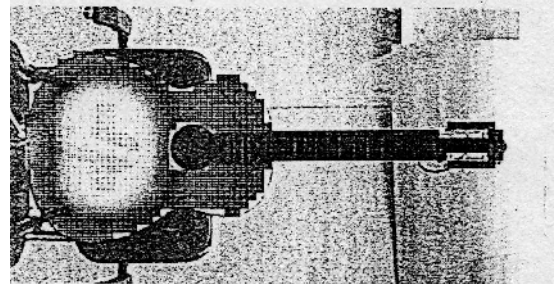
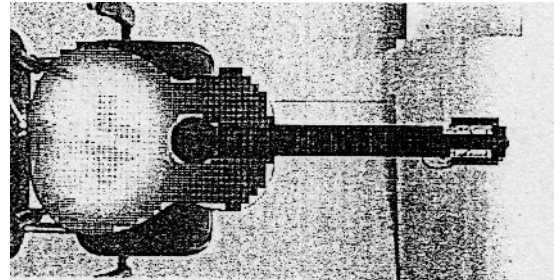
**20-Schwingung**

440 Hz 450 Hz

**02-Schwingung**

675 Hz 695 Hz

Messung im Gitarrenständer



Tab. VIII. ODSs der spanischen Gitarre Nr. 6a (Wandergitarre II), gemessen in situ (links) bzw. bei Lagerung im Gitarrenständer (rechts).

Jansson (1983b) hat mittels Laser-Interferometrie die statische Auslenkung der Gitarrendecke bei unterschiedlichen Belastungen quantitativ erfasst. Seinen Erkenntnissen zufolge dominiert die Kraftanregung senkrecht zur Decke. Folglich ist die Wechselkraft, welche die Saiten am Steg senkrecht zur Decke in den Korpus einbringt, ein bestimmendes Eingangssignal. In der vorliegenden Untersuchung wurde deshalb als realistische Anregung eine Kraft am Steg gewählt. Damit neben den spiegelsymmetrischen auch antimetrische Schwingungsformen angeregt werden, greift die Kraft außerhalb der Mittellinie von Hals und Decke an. Dies wurde mit einem elektrodynamischen Schwingerreger realisiert, der am Auflagepunkt der G₃-Saite senkrecht auf die Decke wirkt.

Als primäre Ergebnisse der Messung mit dem Scanning Vibrometer liegen mit der oben genannten Frequenzauflösung im Bereich bis 500 Hz für jedes Instrument 400 Schwingungsmuster vor. Auf eine Nachbearbeitung im Sinne einer Modalanalyse unter Einbeziehung mechanischer Modelle mit Curve Fitting usw. wurde verzichtet. Vielmehr wurde es hier als ausreichend erachtet, die gemessenen Schwingungsformen direkt darzustellen. Dies geschieht für diejenigen Frequenzen, bei denen die Summen-Übertragungsfunktionen ihre lokalen Maxima aufweisen. Die präsentierten Operating Deflection Shapes kennzeichnen demnach maximale Bewegung des Korpus bei konstant gehaltener Anregungskraft. Vergleichbare Operating Deflection Shapes der Gitarrendecke haben mittels Laser-Interferometrie Jansson (1971, 1983b), Jovicic und Jovicic (1977b), Firth (1977), Caldersmith (1978) und Marty (1987a und 1987b) bestimmt. In diesen Arbeiten unterbleibt eine Modalanalyse ebenso wie in der eigenen Untersuchung. Auf der Basis der vorliegenden Messdaten wäre sie jedoch prinzipiell möglich, wie Twork (1997) am Beispiel eines anderen Objektes gezeigt hat. Sie kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn verschiedene Teile eines Instrumentes (wie z.B. Vorder- und Rückseite einer Gitarre) getrennt gemessen werden, jedoch das Eigenschwingungsverhalten des gesamten Instrumentes interessiert.

In Tab. VIII sind einige charakteristische Resultate einander gegenüber gestellt, die den Vergleich zwischen der Messung in situ bzw. im Gitarrenständer ermöglichen. Gegenstand ist die Wander-gitarre II (Nr. 6a). Die linke Spalte bezieht sich auf die in-situ-Messung. In der rechten Spalte sind Ergebnisse von Messungen zusammengestellt, bei denen die Gitarre im Gitarrenständer gelagert war. Zum besseren Vergleich mit der zugehörigen in-situ-Messung sind die Bilder um 90⁰ gedreht. Man erkennt weitgehende Übereinstimmung der Schwingungsmuster und -frequenzen. Dies belegt, dass der Gitarrenständer die Lagerung am Körper hinsichtlich der Schwingungen der Decke brauchbar nachbildet. Global ist festzustellen, dass sich die Schwingungen im Gitarrenständer mit größeren Amplituden als bei Kontakt mit dem Körper eines Spielers ausbilden. Besonders stark wirkt sich in dieser Hinsicht die Tatsache aus, dass der Hals frei beweglich ist. Wie bereits erwähnt, führt dies in aller Regel dazu, dass sich die Schwingungen des Halses stärker ausprägen, als wenn die Griffhand des Spieles den Hals umfasst. Die Übertreibung der Bewegungen des Halses ist als negativ zu vermerken. Diesem Nachteil steht der Vorteil gegenüber, dass bei Lagerung im Gitarrenständer auch die Rückseite des Instruments vollständig vermessen werden kann, was bei normaler Spielhaltung nicht möglich ist.

Schwingungen der Seitenwände wurden bei den Serienmessungen nicht erfasst. Die Berechtigung dafür wird aus Berechnungen der Schalleistung (Moosrainer und Fleischer (1997)) abgeleitet. Danach tragen die Seitenwandschwingungen zur Gesamtleistung so wenig bei, dass es gerechtfertigt erscheint, auf ihre Ermittlung zu verzichten. Offenbar sind die Seitenwände wesentlich steifer als die Decke und der Boden und spielen im betrachteten Frequenzbereich hinsichtlich der Schallabstrahlung keine aktive, sondern eine vorwiegend passive Rolle.

Für die Reihenmessungen standen fünfzehn Gitarren aus dem Besitz des Autors und von Mitgliedern seiner Familie zur Verfügung. Bei jeder dieser Gitarren wurden auf die beschriebene Weise

Operating Deflection Shapes ermittelt. Die charakteristischen Bewegungsmuster wurden für jedes Instrument visualisiert und im vorliegenden Bericht so dargestellt, dass Vorder- und Rückseite der Gitarre sichtbar sind und damit eine Vorstellung vermitteln, in welchen Phasenbeziehungen Decke und Boden schwingen. Ein Vergleich zeigt, dass trotz unterschiedlicher Bauweisen bei allen Gitarren einige wesentliche Grundtypen zu beobachten sind. Diese sind in Abschnitt 4.3 bzw. in den Fig. 77 bis 80 von Abschnitt 8.4 zusammengestellt. Zwar sind die Frequenzen verschieden; die Bewegungsmuster haben aber stets gemeinsame Merkmale. Innerhalb des betrachteten Bereiches von Frequenzen bis 500 Hz handelt es sich bei diesen Haupt-Schwingungsarten insbesondere um

- o die Helmholtz-Schwingung, bei welcher der Korpus pumpt,
- o die 00-Schwingung, die sich häufig in eine Dipol- und eine Monopol-Variante aufspaltet,
- o spiegelsymmetrische m_0 -Schwingungen, die den Hals stark mit einbeziehen, mit m Querknotenlinien sowie
- o antimetrische $0n$ -Schwingungen mit n Längsknotenlinien.

Diese Grundtypen lassen sich auch Tab. VIII entnehmen.

Bei der weiteren Interpretation der Ergebnisse der Schwingungsmessungen sind zwei Themenkreise von Bedeutung. Der eine betrifft die vordergründige Aufgabe des Korpus, nämlich der Abstrahlung von Schall. Letztlich interessiert in diesem Zusammenhang weniger die Schwingung, als vielmehr das Schallsignal, das diese Schwingung hervorruft. Die vorliegenden Messdaten des Scanning Vibrometers (insbesondere für Decke und Boden) eignen sich gut als Grundlage für die Berechnung des Schallfeldes. Dazu sind sie zweckmäßigerweise in ein Universal File zusammenzufassen. Auf einem geeigneten Datenträger oder über ein Datennetz können sie an einen Rechner übergeben werden, auf dem ein einschlägiges Schallfeld-Berechnungsprogramm installiert ist. Am Institut für Mechanik ist dies das Randlelemente-Programm SYSNOISE auf einer Workstation von Silicon Graphics. Wie in Kapitel 5 exemplarisch beschrieben ist, lassen sich auf diesem Wege sämtliche Kennwerte des Schallfeldes berechnen. Diese sind zunächst auf eine Einheitskraft am Steg der G-Saite normiert. Bestimmt man in einem ergänzenden Versuch ein realistisches Kraftspektrum, sind auch quantitative Angaben möglich. So lässt sich beispielsweise das Schallleistungs-Frequenzspektrum ermitteln, das zu einem bestimmten Akkord gehört. Ebenso könnte das zugehörige Schalldruck-Signal an einem vorgegebenen Punkt berechnet werden, dessen gehörbezogene Parameter sich dann mittels anschließender Analyse (Terhardt (1998)) extrahieren lassen.

Berechnungen dieser Art sind vom Standpunkt des Hörers von Interesse. Aus der "Sicht" der Saite ist dagegen von Bedeutung, wie sich der Instrumentenkörper an den Kontaktpunkten verhält. Damit ist der zweite große Themenkreis verknüpft. Die Reaktion der Auflagepunkte bewirkt, dass eine Saite Auflager vorfindet, die nicht fest, sondern mehr oder weniger nachgiebig sind. Bekanntlich hängt es von den Randbedingungen ab, an welcher Stelle (Steg oder Hals) und in welchem Ausmaß die Saite Energie in den Instrumentenkörper einspeisen kann. Die Übertragung von Energie aus der Saite in den Instrumentenkörper beeinflusst zum einen den spektralen Gehalt des Schallsignals der Gitarre. Da die Saite freie Schwingungen ausführt, wirkt sich das Abfließen von Energie zum anderen auch auf das Abklingen der Saitensignale aus. Die Nachgiebigkeit der Auflager erweist sich als stark frequenzabhängig, was unter anderem auch die Binnen-Harmonizität der Saitensignale beeinflussen kann.

Das Verhalten der Auflager lässt sich durch die mechanische Punkt-Admittanz kennzeichnen, die das Verhältnis von Schnelle und Kraft am selben Punkt in derselben Richtung darstellt. Sie ist ein komplexes Maß für die Beweglichkeit des jeweiligen Messpunktes und kennzeichnet Energieabfluss sowie Masse- bzw. Federverhalten an den Endpunkten der Saiten; siehe hierzu Fleischer (1997). Wie in Kapitel 9 gezeigt worden ist, hängen Admittanz und Schwingungsmuster des Sys-

tems Decke/Hals eng zusammen. Aus der Sicht der Saite stellt die Admittanz das direktere Maß dar. Sie ist ohne großen Aufwand und gut reproduzierbar in situ zu bestimmen, wobei die dämpfende Wirkung der Griffhand richtig erfasst wird.

Vereinfachend lässt sich feststellen:

- o Interessiert das Verhalten der Endpunkte der Saiten, reicht es aus, die Decke und den Hals zu untersuchen. In-situ-Messungen der Schwingung sind mit dem Scanning Vibrometer prinzipiell möglich und wurden bereits erprobt. Sie erfordern einen höheren Aufwand und setzen eine gewisse Leidensfähigkeit der Person voraus, die während des Experiments die Gitarre halten muss. Als Ergänzung und teilweise als Ersatz der Schwingungsmessung ist die Admittanzmessung anzusehen. Mit der experimentellen Bestimmung der Admittanz steht eine einfache objektorientierte Messmethode zur Verfügung, die sich in situ anwenden lässt. Für die vorliegende Aufgabenstellung ist der wechselseitige Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden äußerst hilfreich; er erleichtert die Absicherung und Interpretation der Messresultate.
- o Um die Umsetzung der Saitenschwingung in ein Schallsignal verstehen und berechnen zu können, ist zunächst die Schwingung des gesamten Korpus von Interesse. Hinsichtlich der Schallabstrahlung erweist sich die Bewegung der Seitenwände als zweitrangig. In der vorliegenden Studie ist deshalb vornehmlich die Vorder- und daneben auch die Rückseite untersucht worden. Der Preis für die Messung der Rückseite war, dass die Instrumente nicht am Körper, sondern allseitig frei zugänglich gelagert werden mussten. Als Kompromiss hat sich die Positionierung in einem Gitarrenständer erwiesen. Es gibt Hinweise darauf, dass die Bewegung des Bodens bei der Schallabstrahlung eine Rolle spielen kann, im allgemeinen jedoch weniger wichtig als diejenige der Decke ist. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche sind demnach vornehmlich die Schwingungen der Decke zu untersuchen. Nach Möglichkeit sollten aber auch diejenigen des Bodens gemessen werden. In Bezug auf die Schallabstrahlung besteht jedoch keine zwingende Notwendigkeit zu bestimmen, wie Seitenwände und Hals schwingen.
- o Für die Abtastung der Schnelle der vorderen und hinteren Oberfläche von Gitarren hat sich das Scanning Vibrometer insgesamt bewährt. Als Ergebnis erhält man ohne großen Zeitaufwand und ohne Berührung des Instruments den Frequenzgang der Operating Deflection Shapes. Um die charakteristischen Schwingungsarten identifizieren zu können, reicht es in den meisten Fällen aus, die ODSs bei denjenigen Frequenzen zu betrachten, bei denen die Summen-Übertragungsfunktion maximal wird. Sollte die Identifikation modaler Parameter von Interesse sein, lässt sich auf der Basis der vorliegenden Messdaten im Nachgang eine ergänzende Modalanalyse durchführen.

Nach allen bisher vorliegenden Erfahrungen über den Einfluss von Randbedingungen auf die Schwingungsformen und insbesondere die Schwingungsfrequenzen sollte angestrebt werden, zukünftige Studien gänzlich in situ durchzuführen. Untersuchungen an elektrischen Gitarren (Fleischer und Zwicker (1998)) und die orientierenden Messungen, die in diesem Bericht beschrieben sind, haben erwiesen, dass in-situ-Messungen mit dem Scanning Vibrometer möglich sind. Da die Rückseite der Messung weitgehend unzugänglich ist, wurden sie bisher auf die Vorderseite beschränkt. Um zumindest die Phasenlage der Bodenschwingung zu erfassen, könnte es nützlich sein, von vorne durch das Schalloch hindurch die Bewegung des Bodens zu messen. Fig. 88 zeigt einen ersten Versuch in diese Richtung.

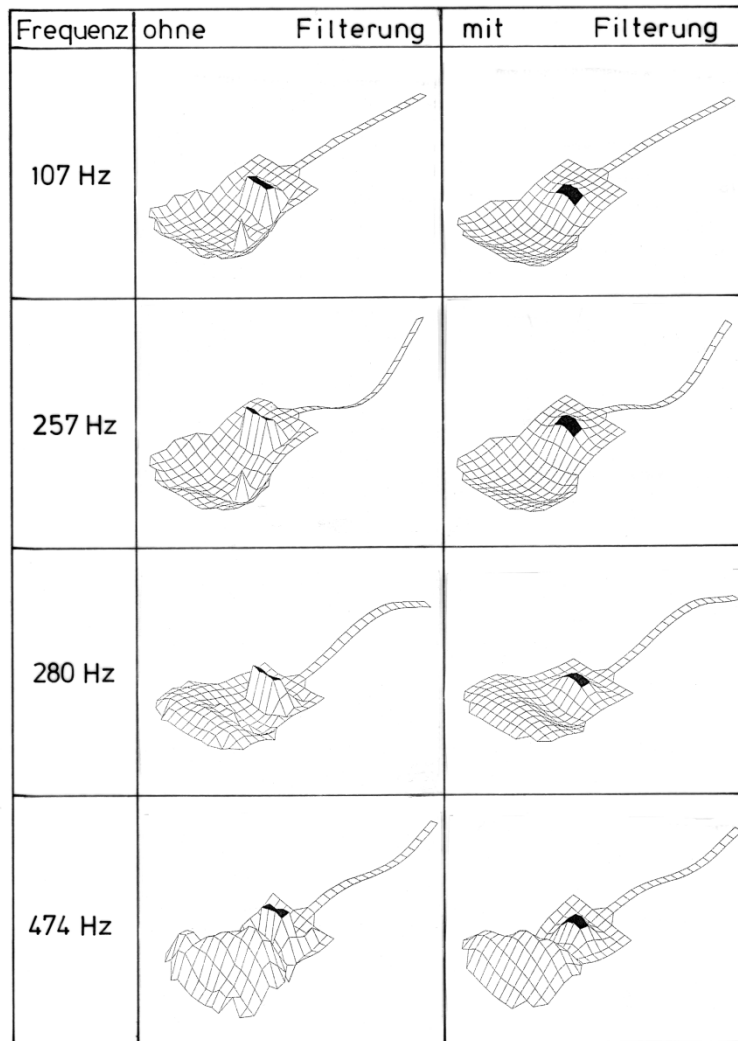


Fig. 88. ODSs der Westerngitarre Nr. 10. Neben der Vorderseite ist durch das Schallloch (schwarz markiert) auch die Rückseite vermessen worden.
Darstellung ohne Filterung (links) bzw. mit vorangegangener räumlicher Filterung (rechts).

Neben der gesamten Vorderseite ist durch das Schallloch hindurch auch derjenige Teil des Gitarrenbodens abgetastet worden, der für den Laserstrahl von vorne "sichtbar" ist. Acht Messpunkte entfallen auf diesen Teil. Die zugehörigen Messfelder sind in Fig. 88 schwarz hervorgehoben. Es sind Beispiele ausgewählt, in denen am Schallloch die Rückwand in Gegenphase zur Decke schwingt. Dies ist in der linken Spalte deutlich zu erkennen. Vorsicht ist geboten, wenn zur Glättung der experimentellen Ergebnisse eine räumliche Filterung eingesetzt wird. Wie die rechte Spalte von Fig. 88 erkennen lässt, bewirkt die Filterung erwartungsgemäß eine Nivellierung, die sich am stärksten auf den gegenphasig schwingenden Bereich auswirkt. Vor einer Filterung, wie sie üblicherweise bei der Visualisierung der mit dem Scanning Vibrometer ermittelten Resultate angewandt wurde, muss daher geprüft werden, ob nicht eventuell wichtige Information unkenntlich gemacht wird. Gegebenenfalls muss auf sie verzichtet werden.

Mit den Schwingungsbildern, wie sie in diesem Bericht für fünfzehn Gitarren zusammengestellt sind, liegt eine Fülle von experimentellem Material vor. Die untersuchten Instrumente unterscheiden sich teilweise stark voneinander und umfassen damit eine weite Spanne in Hinsicht auf Einsatzgebiet, Bauweise und Qualität. Die Versuchsergebnisse sind bisher nur überschlägig ausgewertet und strukturiert worden; sie harren einer weiteren Bearbeitung. Ergänzende Messdaten lassen sich - bevorzugt in situ - mit der beschriebenen Vorgehensweise ohne großen Zeitaufwand ermitteln.

Bevor der Ton einer Gitarre erklingen und den Spieler - sowie manchmal auch den Zuhörer - erfreuen kann, muss er entstehen. Ausgehend von der vorliegenden Datenbasis kann das Verständnis der Mechanismen vertieft werden, die dabei wirken. Aus der Beschäftigung mit diesen Vorgängen können sich langfristig Zielvorstellungen entwickeln, auf welchem Wege und in welche Richtung der Instrumentenkörper zu modifizieren wäre. Wissenschaftlich begründet und physikalisch überprüfbar können dann dem Instrumentenbauer Hinweise gegeben werden, wie Gitarren im Hinblick auf klangliche Vorgaben verändert werden können. Dieses Vorgehen ist als Ergänzung der Handwerkskunst des Zupfinstrumentenmachers zu sehen. Es könnte ihm eine wirkungsvolle Hilfe bieten, seinen Gitarren zielgerichtet genau die Eigenschaften zu verleihen, die sie im jeweiligen Fall haben sollen.

Dank gilt Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif für die Unterstützung bei Literatursuche und Korrekturlesen. Herr Dr.-Ing. Tilmann Zwicker hat wertvolle Hinweise aufgrund seiner langjährigen Erfahrung gegeben, die auf seine Doppelfunktion als Gitarrensammler und -spieler zurückgeht. Der Autor dankt auch Frau Hiltrud Fleischer für das Durchlesen der Endfassung sowie den Herren Martin und Tobias Fleischer dafür, dass sie einige ihrer Instrumente zur Verfügung gestellt haben.

LITERATUR

- Bork, I., Modalanalyse von Schallfeldern. *Acustica* **75** (1991), 154 - 167.
- Caldersmith, G., Guitar as a reflex enclosure. *J. Acoust. Soc. Amer.* **63** (1978), 1566 - 1775.
- Chaigne, A., Évaluation subjective des qualités sonores des cordes de guitare. *Acustica* **62** (1986), 16 - 29.
- Chaigne, A., Viscoelastic properties of nylon guitar strings. *J. Catgut Acoustical Society Vol. 1* (1991), No. 7, Series II, 21 - 27.
- Chladni, E.F.F., Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.
- Christensen, O. und Vistisen, B.B., Simple model for low-frequency guitar function. *J. Acoust. Soc. Amer.* **68** (1980), 758 - 766.
- Christensen, O., The response of played guitars at middle frequencies. *Acustica* **53** (1983), 45 - 48.
- Christensen, O., An oscillator model for analysis of guitar sound pressure response. *Acustica* **54** (1984), 289 - 295.
- Cuesta, C. und Valette, C., Théorie de la corde pincée en approximation linéaire. *Acustica* **71** (1990), 28 - 40.
- de Dayans, H.G. und Behar, A., The quality of strings for guitars: An experimental study. *J. Sound and Vibr.* **64** (1979), Heft 3, 421 - 431 mit Comments von Hanson, R.J., *J. Sound and Vibr.* **64** (1983), Heft 2, 283 - 285.
- Dillmann, T. und Winter, H., Messung der Partialschwingungen ebener Strukturen unter besonderer Berücksichtigung optimierter Messwerterfassung. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1993.
- Firth, I.M., Physics of the guitar at the Helmholtz and first top-plate resonances. *J. Acoust. Soc. Amer.* **61** (1977), 588 - 593.
- Fleischer, H., Über die Rekonstruktion mechanischer Schwingungsformen aus Schalldruckdaten. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '86), DPG-GmbH, Bad Honnef 1986, 629 - 632.
- Fleischer, H., Erkennung ebener Strahler. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '87), DPG-GmbH, Bad Honnef 1987, 497 - 500.
- Fleischer, H., FOURIER-AKUSTIK. Beschreibung der Schallstrahlung von ebenen Schwingern mit Hilfe der räumlichen Fourier-Methode. Fortschrittsberichte VDI Reihe 11 Heft 101. VDI-Verlag, Düsseldorf 1988a.
- Fleischer, H., Die Pauke. Mechanischer Schwinger und akustischer Strahler. Forschungsbericht 01/88 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1988b.
- Fleischer, H., Erkennung ebener Schallstrahler mit Hilfe der Fourier-Akustik. *Acustica* **65** (1988c), 219 - 231.
- Gitarren. Forschungsbericht **02/95** aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1995.

- Fleischer, H., *Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 01/97*. Herausgeber F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1997.
- Fleischer, H., *In-situ-Messung der Schwingungen von E-Gitarren*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '98)*, DEGA, Oldenburg. Erscheint Mitte 1998.
- Fleischer, H. und Axelrad, V., *Restoring an acoustic source from pressure data using Wiener filtering*. *Acustica* **60** (1986), 172 - 175.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Dead Spots. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/96*. Herausgeber H. Fleischer und H. Fastl. UniBw München, Neubiberg 1996.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Admittanzmessungen an Elektrobässen*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '97)*. DEGA, Oldenburg 1997, 301 - 302.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Mechanical vibrations of electric guitars*. *Acustica - acta acustica; angenommen zur Veröffentlichung in 1998*.
- Fletcher, H., *Normal vibration frequencies of a stiff piano string*. *J. Acoust. Soc. Amer.* **36** (1964), 203 - 209.
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments. Insbes.: Kapitel 9: Guitars and lutes*. Springer, New York 1991.
- Götz, M., *Berechnung der Schalleistung von Gitarren mit SYSNOISE. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1996*.
- Gottlieb, H.P.W., *Non-linear vibration of a constant-tension string*. *J. Sound and Vibration* **143** (1990), 455 - 460.
- Gough, C.E., *The theory of string resonances on musical instruments*. *Acustica* **49** (1981), 124 - 141.
- Heise, U., *Untersuchungen zur Ursache von Dead Spots an Baßgitarren*. *Das Musikinstrument* **42** (1993), Heft 6/7, 112 - 115.
- Jansson, E.V., *A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar*. *Acustica* **25** (1971), 95 - 100.
- Jansson, E.V., *Acoustical properties of complex cavities. Prediction and measurements of resonance properties of violin-shaped and guitar-shaped cavities*. *Acustica* **37** (1977), 211 - 221.
- Jansson, E.V., *Acoustics for the guitar player*. In: *Function, construction and quality of the guitar*. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983a), 7 - 26.
- Jansson, E.V., *Acoustics for the guitar maker*. In: *Function, construction and quality of the guitar*. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983b), 27 - 50.
- t* **41** (1992), Heft 8, 48 - 52.
- Jaroszewski, A., Rakowski, A. und Zera, J., *Vibration characteristics of free violin plates and their relation to tap tones data*. *Archives of Acoustics* **20**(1) (1995), 13 - 26.
- Jovicic, J., *Spectres sonores de la guitare de concert*. *Acustica* **18** (1967a), 113 - 118.
- Jovicic, J., *Influence de différents modelages de la table de résonance supérieure sur la qualité du ton de l'instrument*. *Acustica* **18** (1967b), 356 - 360.

- Jovicic, J., *Analyse harmonique des tons produits de différentes manières d'excitation de la corde de la guitare. Acustica* **19** (1967/68), 103 - 107. Jovicic, J., *Influence de différents matériaux de la table inférieure et du bord sur la qualité du ton de la guitare. Acustica* **26** (1972), 349 - 352.
- Jovicic, J. und Jovicic, O., *L'analyse des tons par l'analyseur à audio-fréquences pour différentes épaisseurs de la table de résonance de la guitare. Acustica* **33** (1975), 10 - 16.
- Jovicic, J. und Jovicic, O., *Le rôle des barres de raidissement sur la table de résonance de la guitare: I. Leur effet sur les oscillations propres du corps de l'instrument. Acustica* **38** (1977a), 175 - 179.
- Jovicic, J. und Jovicic, O., *Le rôle des barres de raidissement sur la table de résonance de la guitare: II. Leur effet sur les nodales de la table (étude holographique). Acustica* **38** (1977b), 180 - 185.
- Jovicic, J. Pravica, P. und Jovicic, O., *Le changement du spectre et du timbre de la guitare dû à la qualité différente du bois de la table de résonance. Acustica* **33** (1975), 25 - 31.
- Karp, C., *The inharmonicity of strung keyboard instruments. Acustica* **60** (1986), 295 - 299.
- Kreuzig, S., *Modalanalyse der Schwingungsformen von Gitarrenoberflächen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1994.*
- Krüger, W., *Erfahrungen bei der Bearbeitung von Gitarrendecken. Das Musikinstrument XXX* (1981), 1220 - 1222.
- Le Pichon, A., Berge, S. und Chaigne, A., *Comparison between experimental and predicted radiation of a guitar. Acustica- acta acustica* **84** (1998), 136 - 145.
- Lemme, H., *Elektrogitarren, 4. Auflage. Frech-Verlag, Stuttgart 1982.*
- Leuschner, T., *Berechnungen mit SYSNOISE. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1994.*
- May, U., *Elektrische Saiteninstrumente in der populären Musik. Dissertation Universität Münster, Münster 1984.*
- Marshall, K.D., *The musician and the vibrational behavior of a violin. J. Catgut Acoustical Society No. 45* (1986a), 28 - 33.
- Marshall, K.D., *Modal analysis. A primer on theory and practice. J. Catgut Acoustical Society No. 46* (1986b), 7 - 17.
- Marty, S.M., *Assessment of innovations in the construction of the classical guitar. Part I. Analysis of top-plate resonances using FFT techniques and holographic interferometry. J. Catgut Acoustical Society No. 47* (1987a), 26 - 29.
- Marty, S.M., *Assessment of innovations in the construction of the classical guitar. Part II. New developments in guitar construction. J. Catgut Acoustical Society No. 47* (1987b), 30 - 33.
- McIntyre M.E. und Woodhouse, J., *The influence of geometry on linear damping. Acustica* **39** (1978), 209 - 224.
- McNeal Schwendler: *Fender Musical Instruments fine tunes guitar design. Artikel in MSC World VI* (1996), Heft 1.
- Meinel, E., *Elektrogitarren. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1987.*

- Meinel, E., *Betrachtung zur Klangerzeugung historischer und moderner Saiten. Beiheft 11 zu den Studien zur Aufführungspraxis und Interpretation der Musik des 18. Jahrhunderts, Michaelstein 1991*, 7 - 15.
- Meyer, J., *Die Abstimmung der Grundresonanzen von Gitarren. Das Musikinstrument XIII (1974a)*, 179 - 186.
- Meyer, J., *Das Resonanzverhalten der Gitarre bei mittleren Frequenzen. Das Musikinstrument XIII (1974b)*, 1095 - 1102.
- Meyer, J., *Quality aspects of the guitar tone. In: Function, construction and quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983a)*, 51 - 76.
- Meyer, J., *The function of the guitar body and its dependence upon constructional details. In: Function, construction and quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983b)*, 77 - 100.
- Meyer, J., *Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1985.*
- Meyer, E. und Guicking, D., *Schwingungslehre. Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1974.*
- Molteno, T.C. und Tuffilaro, N.B., *Torus doubling and chaotic string vibrations: Experimental results. J. Sound and Vibration 137 (1990)*, 327 - 330.
- Moosrainer, M. und Fleischer, H., *Berechnung der Schalleistung von Gitarren. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '97). DEGA, Oldenburg 1997*, 317 - 318.
- Moral, J.A. und Jansson, E.V., *Eigenmodes, input admittance, and the function of the violin. Acustica 50 (1982)*, 329 - 337.
- O'Reilly, O. und Holmes, P.J., *Non-linear, non-planar and non-periodic vibrations of a string. J. Sound and Vibration 153 (1992)*, 413 - 435.
- Reinecke, W. und Cremer, L., *Application of holographic interferometry to vibrations of bodies of string instruments. J. Acoust. Soc. Amer. 48 (1970)*, 988 - 992.
- Richardson, B.E., *The influence of strutting on the top-plate modes of a guitar. J. Catgut Acoustical Society No. 40 (1983)*, 13 - 17.
- Richardson, M.H., *Is it a mode shape, or an operating deflection shape? Sound and Vibration 31 (1997)*, 54 - 61.
- Rieländer, M.M. (Herausgeber), *Reallexikon der Akustik. Bochinsky, Frankfurt 1982.*
- Rosen, M. und Chaigne, A., *Analyse de sons de guitare pour différentes configurations structurelles de l'instrument. Acustica 82 (1996)*, 793 - 797.
- Schleske, M., *On making "tonal copies" of a violin. J. Catgut Acoustical Society Vol. 3 (1996), No. 2, Series II*, 18 - 28.
- Schubert, P., *Zum Schwingungs- und Abstrahlverhalten von Zupfinstrumenten. In: Beiheft 7 zu den Studien zur Aufführungspraxis und Interpretation der Musik des 18. Jahrhunderts, Michaelstein 1987*, 8 - 23.
- Schwab, H.L., *Finite element analysis of a guitar soundboard. Catgut Acoustical Society Newsletter No. 24 (1975)*, 13 - 15.
- Schwab, H.L. und Chen, K.C., *Finite element analysis of a guitar soundboard - Part II. Catgut Acoustical Society Newsletter No. 25 (1976)*, 13 - 15.

- Strong W.Y., Beyer, T.B., Bowen, D.J., Williams, E.G. und Maynard, J.D., Studying a guitar's radiation properties with nearfield holography. J. Guitar Acoustics 6 (1982), 50 - 59.*
- Szabó, István, Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen. 3. Auflage. Birkhäuser, Basel 1987.*
- Terhardt, E., Akustische Kommunikation. Springer, Berlin 1998.*
- Twork, Th., Schwingungsformen von akustischen Gitarren. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1996.*
- Twork, Th., Laser-Vibrometrie - Berührungsloses Messen von Oberflächenschwingungen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1997.*
- Wogram, K., Schwingungsuntersuchungen an Musikinstrumenten. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '94), DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 53 - 64.*
- Wolf, D. und Müller, H., Normal vibration modes of stiff strings. J. Acoust. Soc. Amer. 44 (1968), 1093 - 1097.*
- Ziegenhals, G., Optimierung von Gitarren mittels Modalanalyse. Bericht aus dem Institut für Musikinstrumentenbau Zwota, November 95, Zwota 1995.*

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.

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik