

**BEITRÄGE  
ZUR  
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

---

**Helmut Fleischer**

**KORPUSSCHWINGUNGEN  
EINER ELEKTROGITARRE**

**KORPUSSCHWINGUNGEN  
EINER ELEKTROGITARRE**

von

**Helmut Fleischer**

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

**Heft 1/06 der Reihe**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

**ISSN 1430-936X**

**Herausgeber:**

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

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

**Postanschrift:**

LRT 4 UniBwM  
85577 Neubiberg  
Deutschland

---

Fleischer, Helmut:  
Korpusschwingungen einer Elektrogitarre  
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/06  
Neubiberg 2006  
**ISSN 1430-936X**

**Postanschrift des Verfassers:**

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

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

## KORPUSSCHWINGUNGEN EINER ELEKTROGITARRE

### **Zusammenfassung**

*Umfangreiches Material von Experimenten zum Schwingungsverhalten der Elektrogitarre mit massivem Korpus ist zusammengestellt. Ergebnisse verschiedenartiger Messungen werden am Beispiel eines typischen hölzernen Instruments vom Stratocaster-Typ, einer Squier Bullet, vorgestellt. Die mechanischen Schwingungen dieses Instruments werden in mehreren Experimenten bei unterschiedlichen Randbedingungen untersucht. Die experimentellen Befunde der flächenhaften Laser-Vibrometrie, „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ und „charakteristische Frequenzen“, werden mit Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen verglichen, die durch Modalanalyse ermittelt wurden. Zusätzlich werden sie dadurch überprüft, dass der Korpus mit Finiten Elementen modelliert wird. Experimente und Computersimulation offenbaren, dass der Hals zum Schwingen neigt.*

*Beim Spielen kann eine Saite eine Resonanz des Halses anregen, was zu einem nachgiebigen Abschluss führt. Zahlenmäßig wird diese Erscheinung durch die mechanische Punktadmittanz beschrieben, die sowohl an der Brücke wie auch auf dem Hals gemessen wurde. Ihr Realteil, als Konduktanz bezeichnet, stellt ein Maß für den Energiefluss von der Saite zum Griffbrett dar und hängt von Frequenz und Messort ab. Selektiver Energieverlust verursacht zusätzliche Dämpfung von Teilschwingungen der gezupften Saite. Dies führt zum rascheren Abklingen, d.h. kürzeren Sustain, als beim unbeweglichen Abschluss. Die Bündel, an denen die Konduktanz groß für die erste (oder die erste und die zweite) Teilschwingung einer Saite ist, fallen mit den so genannten „Dead Spots“ zusammen, die von Spielern nicht sehr geschätzt werden. Auf diese Weise beeinflussen die Schwingungen des Korpus die musikalische Leistung des Instruments.*

## BODY VIBRATIONS OF AN ELECTRIC GUITAR

### **Summary**

*Comprehensive experimental material on the vibration behaviour of the solid-body electric guitar is compiled. Results of various measurements are presented using the example of one typical wooden instrument of the Stratocaster type, a Squier Bullet. The mechanical vibrations of this instrument are investigated in several experiments under various boundary conditions. The experimental findings of area Laser vibrometry, “characteristic operating deflection shapes” and “characteristic frequencies”, are compared to eigenmodes and eigenfrequencies obtained by Modal Analysis. In addition, they are validated by modelling the body by Finite Elements. Experiment and computer simulation reveal the neck’s tendency to vibrate.*

*In a playing situation, a string can excite a resonance of the neck which results in a mobile termination. This effect is quantified by the mechanical point admittance which is measured as well at the bridge as on the neck. Its real part, denoted conductance, represents a measure for the flow of energy from the string to the neck and depends on frequency and position. Selective energy loss causes additional damping of partial vibrations of the plucked string. This results in faster decay. i.e. shorter sustain, compared to the immobile termination. The frets, at which the conductance is high for the first (or the first and the second) partial vibrations of a string, coincide with the so-called “dead spots”, which are not appreciated by players. This way, the vibrations of the body influence the musical performance of the instrument.*

# INHALT

VORWORT.....	7
1. EINLEITUNG.....	8
2. PUNKTUELLE SCHWINGUNGSMESSUNG.....	13
2.1. Definition und physikalische Bedeutung der Admittanz.....	13
2.2. Messmethode und -aufbau.....	14
2.3. Konduktanz an den Auflagern der leeren Saiten.....	16
2.3.1. Konduktanz am Steg.....	16
2.3.2. Konduktanz am Sattel.....	19
2.4. Konduktanz am Hals in unterschiedlichen Richtungen.....	21
2.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	22
3. KONDUKTANZ-„GEBIRGE“.....	23
3.1. Konduktanz auf dem Griffbrett.....	23
3.1.1. Konduktanz auf der Mittellinie.....	23
3.1.2. Konduktanz, gemessen längs des Griffbretts.....	24
3.2. Konduktanz auf dem Griffbrett und am Steg.....	26
3.3. Ältere Ergebnisse zur Konduktanz auf dem Griffbrett.....	28
3.3.1. Konduktanz für Bass-, Mitten- und Diskantsaiten.....	28
3.3.2. Konduktanz und Auswertung.....	30
3.4. Konduktanz bei verschiedenen Lagerungen des Instruments.....	32
3.4.1. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen in sitzender Spielhaltung.....	32
3.4.2. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen in stehender Spielhaltung.....	32
3.4.3. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen im Gitarrenständer.....	33
3.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	34
4. MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN RANDBEDINGUNGEN.....	36
4.1. Versuchsmethode und -aufbau.....	36
4.2. Feste Lagerung des Korpus.....	37
4.3. Aufhängung am Kopfende.....	39
4.4. Lagerung im Gitarrenständer.....	42
4.4.1. Lagerung an drei Punkten, Anregung an der Brücke.....	42
4.4.2. Lagerung an drei Punkten, Anregung am Hals.....	46
4.4.3. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, erste Messung.....	49
4.4.4. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, zweite Messung.....	52
4.4.5. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, dritte Messung.....	54
4.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	57
5. MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN <i>IN SITU</i> IN SITZENDER SPIEL- HALTUNG.....	59
5.1. Versuchsmethode und -aufbau.....	59
5.2. Messungen von S. Gerics am Gesamtinstrument.....	60
5.3. Reihenmessungen von T. Stechel am Gesamtinstrument.....	63
5.4. Reihenmessungen von Chr. Franz am Gesamtinstrument.....	65
5.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	69

6.	MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN <i>IN SITU</i> IN STEHENDER SPIEL- HALTUNG.....	73
6.1.	Versuchsmethode und -aufbau .....	73
6.2.	Messung mit der Versuchsperson HE .....	74
6.3.	Messung mit der Versuchsperson PU .....	77
6.4.	Messung mit der Versuchsperson TS.....	77
6.5.	Messung mit der Versuchsperson FL.....	78
6.6.	Zusammenfassende Bemerkung.....	80
7.	MESSUNG DER HALS-KOPF-SCHWINGUNGEN IN SITZENDER SPIEL- HALTUNG.....	84
7.1.	Versuchsmethode und -aufbau .....	84
7.2.	Messung mit der Versuchsperson FL.....	85
7.3.	Messungen mit den Versuchspersonen HA, JU und KI.....	87
7.4.	Messungen mit der Versuchsperson SC.....	90
7.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	92
8.	MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN .....	95
8.1.	Versuchsmethode und -aufbau .....	95
8.2.	Charakteristische Betriebsschwingungsformen .....	96
8.3.	Experimentelle Modalanalyse .....	96
8.3.1.	Grobanalyse.....	96
8.3.2.	Feinanalyse.....	100
8.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	100
9.	RECHNERSIMULATION DER KORPUSSCHWINGUNGEN MIT DER METHODE DER FINITEN ELEMENTE .....	103
9.1.	Allgemeines zur Methode und Diskretisierung der Gitarre .....	103
9.2.	Randbedingungen und Materialkennwerte.....	104
9.3.	Ergebnisse der FE-Modalanalyse.....	105
9.3.1.	Vorliegende experimentelle Resultate .....	105
9.3.2.	Numerische Resultate.....	106
9.3.3.	Vergleich zwischen Experiment und Rechnung .....	109
9.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	110
10.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION .....	113
	LITERATUR.....	123
	ANHANG.....	126

## VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik behandelt Helmut Fleischer die Strukturschwingungen einer elektrischen Gitarre. Entgegen der allgemeinen Erwartung führen bei Elektrogitarren trotz der englischen Bezeichnung "*solid body*" der Korpus und insbesondere der Hals Schwingungen aus. Bei klassischen Gitarren ist eine Übertragung der Schwingungsenergie der Saiten über den Steg auf den Korpus notwendig. Der Korpus wird in Resonanz versetzt und strahlt das musikalische Signal ab. Das musikalische Signal elektrischer Gitarren wird dagegen wesentlich von elektroakustischen Abnehmern bestimmt. Die Klangqualität dieser Instrumente hängt von den verwendeten Tonabnehmern und vom mechanischen Verhalten des Instrumentenkörpers ab. Schwingungen des Halses, wie sie Helmut Fleischer beobachtet, sind bei diesen Instrumenten sogar unerwünscht, da sie in aller Regel zu einer Reduktion des Nachklings führen.

Da die Randbedingungen das Schwingungsverhalten von Gitarren wesentlich beeinflussen können, plädiert Helmut Fleischer für Messungen mit Randbedingungen, wie sie in der Praxis auftreten ("*in situ*"). Ob dabei der Musiker steht oder sitzt, ist von untergeordneter Bedeutung; wichtig ist jedoch auch bei den physikalischen Messungen der "Körperkontakt" zum Instrument.

Wie schon in früheren Veröffentlichungen weist Helmut Fleischer auch in dieser Arbeit darauf hin, dass die Analyse von Betriebsschwingungen (Operating Deflection Shapes; ODS) im Hinblick auf die Klangqualität einer Elektrogitarre völlig ausreicht. Die aufwendigere Bestimmung von Eigenmoden bringt für die Praxis keine wesentlichen neuen Erkenntnisse, so dass in vielen Fällen eine explizite Modalanalyse nicht zwingend geboten erscheint.

Erstmals beschreibt Helmut Fleischer numerische Berechnungen anhand der Methode der Finiten Elemente (FEM). Es ist zu erwarten, dass sich mittels "*computational mechanics*" und "*computational acoustics*" in Zukunft Prognosen hinsichtlich des Einflusses von Form oder Materialien auf das Schwingungsverhalten von Musikinstrumenten wesentlich vereinfachen werden.

Für den Musiker von besonderer Bedeutung ist die didaktisch vorbildliche Darstellung der Entstehung von "*dead spots*": Ist die Konduktanz groß, so bedeutet dies ein rasches Ausschwingen des entsprechenden Teiltons. In der Folge klingt die betreffende Saite am gegriffenen Bund besonders kurz nach. Es muss also (von einem Fachmann) lediglich die Konduktanz punktweise auf dem Griffbrett vermessen werden und der Musiker bekommt zuverlässige Hinweise darauf, bei welcher Kombination von Saite und Bund sein Instrument eine Schwachstelle hat.

Die besonders gut gelungene Kombination der Darstellungen von Schwingungen des Halses, der Konduktanz sowie des Ausschwingens der Saiten anhand von Wasserfalldiagrammen sind auch für den Praktiker nachvollziehbar. Deshalb ist zu erwarten, dass der vorliegende Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik sowohl bei Wissenschaftlern als auch bei Musikern auf großes Interesse stößt.

München, im August 2006

Hugo Fastl

## 1. EINLEITUNG

Kein anderes Instrument hat die Popmusik so sehr geprägt wie die elektrische Gitarre, auch als Elektrogitarre oder kurz E-Gitarre bezeichnet. Folglich existieren inzwischen auch einige Untersuchungen, die diesen Typ von Gitarre, dessen Signale elektrisch abgegriffen und verstärkt werden, aus musikwissenschaftlicher Sicht beleuchten (Mai 1984, Einbrod 1997). Ebenso sind einige Bücher (Lemme 1982, 1994, 1995 und 2003 sowie Meinel 1987) verfügbar, in denen die Gitarre, deren Tonabnehmer und die zugehörige Elektronik einem breiteren Publikum nahe gebracht werden.

Im Standardwerk von Fletcher und Rossing (1998) wird dieses Instrument auf weniger als einer Seite abgehandelt, was darauf hindeutet, dass Forschungsbedarf besteht. Hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens ist die elektrische Gitarre bereits seit geraumer Zeit Gegenstand vielfältiger Untersuchungen am Institut für Mechanik. Diese Tatsache ist in der Familie und im Freundeskreis des Autors nicht unbemerkt geblieben, was zur Folge hat, dass für Versuchszwecke kurzzeitig immer wieder Instrumente zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere Dr. Tilmann Zwicker hat häufig hochkarätige Exemplare aus seiner umfangreichen Gitarrensammlung untersuchen lassen, so dass im Laufe der Jahre ein voluminöser Fundus an Messergebnissen zustande gekommen ist. Einige davon sind in den Bänden 1/96 (Fleischer und Zwicker 1996) und 2/01 (Fleischer 2001b) der vorliegenden Reihe zusammen- und einander gegenüber gestellt.

*Abb. 1.  
Elektrogitarre  
Squier Bullet.*



Ein gewisser Nachteil dieser Art von Datengewinnung ist, dass inzwischen zwar viele Einzelergebnisse vorliegen, aber selten ein und dasselbe Instrument diesen Untersuchungen in ihrer Gesamtheit unterzogen wurde. So ist es häufig nicht möglich, die verschiedenen Erkenntnisse in Beziehung zueinander zu setzen. Ein Ausnahmefall liegt bei der Gitarre Squier Bullet vor, mit der sich dieser Bericht befasst. Dieses Instrument ist seit mehreren Jahren im Besitz des Autors. Da es sich ständig im Institut für Mechanik befindet, kann es jederzeit für die unterschiedlichsten Studien herangezogen werden.



*Abb. 2. Schriftzug der Herstellerfirma auf dem Wirbelbrett der Gitarre Squier Bullet.*

Immer wenn ein neues Gerät oder Verfahren verfügbar war, mit dem mechanische Schwingungen gemessen oder berechnet werden können, wurde es an diesem Objekt erprobt. Eigene Messungen sind dabei fortlaufend durch experimentelle und numerische Untersuchungen im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten ergänzt worden. So haben Studierende der Luft- und Raumfahrttechnik wie z.B. Twork (1997), Meiershofer und Pieper (2002), Stechel (2003), Franz (2004) oder Blau (2006) dazu beigetragen, den Kenntnisstand zu festigen und zu erweitern. Ein umfangreicher Datenbestand hat sich angehäuft, der von vielen verschiedenen Autoren stammt und über die Jahre hinweg mit unterschiedlichen Vorgehensweisen erarbeitet worden ist. Gemeinsam ist all diesen Ergebnissen, dass sie sich auf ein und dasselbe Objekt - nämlich die in den Abb. 1 als Ganzes dargestellte Gitarre - beziehen.



*Abb. 3. Detail auf der Rückseite der Gitarre Squier Bullet: Platte, hinter der sich die Verschraubung des Halses befindet.*

Bei der untersuchten Gitarre Bullet mit der Nummer E 727605 handelt es sich um ein Modell vom weit verbreiteten Stratocaster-Typ (siehe Lemme 2003). Es ist ein Einsteigerinstrument der Marke Squier, die zur Firma Fender gehört, und stammt aus Korea; vgl. Abb. 2. Die Mensurlänge beträgt etwa 65 cm. Der Korpus ist massiv und vermutlich aus Schichtholz gefertigt. Da er schwarz lackiert ist, lässt sich die Holzart nicht bestimmen. Der Hals besteht aus Ahorn. Wie bei den Stratocaster-Modellen von Fender ist er mit der Rückseite des Korpus verschraubt; vgl. Abb. 3. Das Griffbrett ist aus Palisander hergestellt und trägt 21 Bünde. Das Instrument ist mit sechs Stahlsaiten bespannt. In Standard-Stimmung sind die Grundfrequenzen der leeren, d.h. nicht durch Greifen verkürzten Saiten

E <sub>2</sub> (früher E)	82 Hz
A <sub>2</sub> (früher A)	110 Hz
D <sub>3</sub> (früher d)	147 Hz
G <sub>3</sub> (früher g)	196 Hz
H <sub>3</sub> (früher h)	247 Hz
E <sub>4</sub> (früher e')	330 Hz

Im angelsächsischen Sprachraum wird die musikalische Note H mit dem Buchstaben B bezeichnet. Wird die hohe E<sub>4</sub>-Saite am 21. Bund gegriffen, so entsteht ein Saitenklang mit der Grundfrequenz 1112 Hz. Der Tonumfang einer Gitarre umfasst somit annähernd vier Oktaven.

Abb. 4 zeigt die Vorderseite des Korpus. Die Brücke verfügt über einen Vibrato-Mechanismus, auch Tremolo genannt. Mit einem Hebel, der in Abb. 1 abgeschraubt ist, aber in Abb. 4 zu erkennen ist, kann die gesamte Brücke gegen Federkraft gekippt werden. Dadurch lässt sich die Saitenspannung und somit die Tonhöhe der Saitenklänge variieren. Es sind drei Reihen von elektromagnetischen Tonabnehmern vorhanden, deren Signale mit einem Kippschalter angewählt bzw. gemischt und auf die Ausgangsbuchse geleitet werden. Auf dem weißen Schlagbrett sind zwei Drehköpfe angebracht. Mit den darunter befindlichen Potentiometer lassen sich die Lautstärke (*Volume*) und die Klangfarbe (*Tone*) beeinflussen.



Abb. 4. Korpus der Gitarre Squier Bullet.

Die Gitarre zeigt alle typischen Merkmale des Stratocaster-Typs. Wie z.B. Abb. 5 erkennen lässt, sind wesentliche Teile asymmetrisch geformt. Dies gilt sowohl für den Korpus wie auch für das Wirbelbrett. Um das Greifen der Saiten in den hohen Lagen zu erleichtern, weist der Korpus zwei unterschiedliche *Cutaways* auf. Zudem ist er auf der Oberseite zu einem Ende hin abgeschrägt, was in Abb. 5 am rechten unteren Ende durch die Spiegelung erkennbar wird.



*Abb. 5. Squier Bullet aus der Sicht des Spielers, vor dem Spieler am Boden liegend.*

Das Wirbelbrett (Abb. 6), das die Schneckentriebe trägt, mit denen die Saiten gespannt werden, ist ebenfalls asymmetrisch ausgeführt. Die Mechaniken mit den Spannschrauben befinden sich nicht links und rechts vom Wirbelbrett, sondern sind in einer Reihe schräg zur Zugrichtung der Saiten angeordnet. Die andere Seite des Wirbelbretts ist gekrümmt. Rechts in Abb. 6 ist die Bohrung am oberen Ende des Stahlstabes zu sehen, mit dem sich die Krümmung des Halses einstellen lässt.



*Abb.6. Wirbelbrett der Squier Bullet mit den Schnecken zum Spannen der Saiten.*

Verschiedenartige Messungen und Berechnungen, die sich auf diese Gitarre beziehen, werden im Folgenden dargestellt. Dabei interessieren vor allem solche Bewegungen des Instruments, die möglicherweise die Schwingungen der Saiten beeinflussen und sich auf das elektrische Ausgangssignal auswirken. Hierbei gilt das Hauptinteresse den Transversalschwingungen. Die Saiten können sich in mehreren Raumrichtungen bewegen, nämlich senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett, in dieser Ebene oder auch in dazwischen liegenden Richtungen. Dass die Bewegung parallel zu dieser Ebene von geringerer Bedeutung ist, wird bereits klar, wenn man die Wirkungsweise der elektromagnetischen Tonabnehmer betrachtet (Zollner 2005). Deren elektrisches Ausgangssignal ist der Änderung des magnetischen Flusses proportional; es wird

primär von der Relativbewegung der Saite vom Tonabnehmer weg bzw. zum Tonabnehmer hin bestimmt.

Aufgrund der Funktionsweise der E-Gitarre erweist sich somit als wesentlich, wie sich die Saite relativ zum Instrument bzw. wie sich das Instrument relativ zur Saite aus der Ebene Korpus-Griffbrett heraus bewegt. Eine Bewegung in der Ebene Korpus-Griffbrett, die den Abstand zwischen Saite und Tonabnehmer im Wesentlichen gleich lässt, ruft so gut wie kein elektrisches Signal hervor und ist für die Funktion des Instruments ohne Belang. Die Vorzugsrichtung bei den folgenden Betrachtungen ist demnach die Senkrechte auf der Ebene Korpus-Griffbrett.

Die zusammengestellten Daten sollen einen Vergleich unterschiedlicher Mess- und Berechnungsverfahren ermöglichen, mit denen das Schwingungsverhalten des Gitarrenkörpers charakterisiert werden kann. In ihrer Gesamtheit werden sie ein Bild von der Beweglichkeit des Instruments liefern. In mancher Hinsicht wird dieses nicht der direkten Erwartung entsprechen, die sich beim ersten Blick auf eine *Solid Body*-Gitarre einstellt.

## 2. PUNKTUELLE SCHWINGUNGSMESSUNG

Als erstes werden die Auflagepunkte der Saiten betrachtet. In der einfachen Theorie der Saitenschwingungen ist es üblich, die Auflager als unbeweglich zu idealisieren. Die Messungen werden zeigen, dass diese vereinfachende Annahme in vielen Fällen nicht zutrifft, sondern die Endpunkte der Saiten sich als beweglich erweisen können. Eine „objektorientierte“ Messgröße, mit der sich die Beweglichkeit quantifizieren lässt, findet man in der Punktadmittanz, die deshalb sehr anschaulich als „Schwingfreudigkeit“ bezeichnet wird. Ihr Wert an den Auflagepunkten der Saiten gibt nicht nur Aufschluss darüber, ob der Gitarrenkörper überhaupt beweglich ist, sondern auch, in welcher Weise er reagiert.

### 2.1. Definition und physikalische Bedeutung der Admittanz

Die mechanische Admittanz ist definiert als

$$\underline{Y} = \hat{v} / \hat{F} \quad , \quad (1)$$

d.h. als das Verhältnis der komplexen Amplituden der Schwinggeschwindigkeit  $v$  und der Kraft  $F$ . Werden beide Größen am selben Punkt gemessen, spricht man von einer Punktadmittanz. Von beiden Vektoren werden hier Komponenten in ein und derselben Richtung betrachtet, wenn nicht anders angegeben in Normalenrichtung, also senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett. Sofern die Messung für die Admittanz einen von Null verschiedenen Betrag ergibt, so ist der Instrumentenkörper am betreffenden Punkt in der betrachteten Richtung schwingungsfähig. Eine Saite findet dort kein festes, sondern ein bewegliches Auflager vor.

Misst man nicht nur den Betrag, sondern den Real- und Imaginärteil der komplexen Admittanz, dann lässt sich darüber hinaus quantifizieren, auf welche Art der Instrumentenkörper reagiert; vgl. Anhang 1 in Fleischer (2004). Ist der Imaginärteil positiv, verhält er sich an der betreffenden Stelle wie eine Feder. Dagegen signalisiert ein negativer Imaginärteil, dass das Instrument punktuell wie eine Masse reagiert. Der Realteil kennzeichnet das Verhalten als Dämpfer. Schwingt der Instrumentenkörper mit einer Eigenfrequenz, heben sich die hemmenden Einflüsse der Feder und der Masse gegenseitig auf. Die Beweglichkeit des Auflagers wird dann allein von der Dämpfung bestimmt.

Somit erlaubt es die komplexe Admittanz, das frequenzabhängige Verhalten der Auflager an den Saitenenden zu erfassen und danach zu unterscheiden, ob die Saite dort eine Masse, eine Feder oder einen Dämpfer „sieht“. Im vorliegenden Fall interessiert allerdings weniger, ob möglicherweise eine Eigenfrequenz der Saite in Folge eines massebehafteten oder nachgiebigen Auflagers verschoben wird. Von wesentlich größerer Bedeutung ist hier, ob ein Auflagepunkt beweglich im Sinne eines Dämpfers ist.

Die kinematische Größe Schwinggeschwindigkeit  $v$  und die dynamische Größe Kraft  $F$  sind leistungsbildende Kenngrößen. Die Admittanz ist somit ein Maß dafür, bei welcher Frequenz das Instrument wie viel Schwingungsenergie aufzunehmen in der Lage ist. Naturgemäß gibt die Kenntnis des Betrages  $Y$  der Admittanz allein noch keine Hinweise darauf, ob diese Energie in den Auflagern als kinetische oder potentielle Energie lediglich zwischengespeichert oder in eine andere Form, beispielsweise Wärme, umgewandelt wird. Aussagen darüber sind erst möglich, wenn die komplexe Admittanz in Real- und Imaginärteil aufgespalten wird. Der Realteil

$$G = \text{Re}\{\underline{Y}\} \quad , \quad (2)$$

der sich aus den In-Phase-Komponenten von Schwinggeschwindigkeit und Kraft berechnet, wird als Konduktanz bezeichnet. Die Konduktanz ist ein direktes Maß für die Verlustleistung

$$P = G \tilde{F}^2 \quad , \quad (3)$$

die am Auflager bei Anregung mit einer Kraft des Effektivwertes  $\tilde{F}$  von der Saite in den Instrumentenkörper abfließt. Je größer sie ist, desto aufnahmefähiger ist das Instrument an der betreffenden Stelle für Energie, die der Saitenschwingung irreversibel entzogen wird. Da ein zusätzlicher Energieverlust am Auflager das Abklingen der Saitenschwingungen beeinflussen kann, steht die Konduktanz im Blickpunkt der weiteren Betrachtungen.

## 2.2. Messmethode und -aufbau

Nach (1) ist die Admittanz der Quotient aus der Schwinggeschwindigkeit, gemessen senkrecht zur Korpus-Griffbrett-Ebene, und der Kraft, gemessen in derselben Richtung. Experimentell wurde sie mittels einer Vorrichtung bestimmt, wie sie in Abb. 7 zu sehen ist. Diese besteht aus einem elektrodynamischen Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) mit aufgesetztem Impedanzmesskopf (*Impedance Head* B&K 8001), der einen piezoelektrischen Aufnehmer für die Kraft und einen für die Beschleunigung enthält. Bei der Messung wurde in das oben sichtbare Gewindeloch ein Verlängerungsstück eingeschraubt. Schwingerreger samt Messkopf mit Verlängerungsstück wurden in einen Platinenschraubstock gespannt, an einer Tischkante befestigt und waagrecht ausgerichtet.

Wenn nicht anders angegeben, hielt der Experimentator die Gitarre in sitzender Spielhaltung und presste sie mit leichtem Druck gegen den Impedanzmesskopf. Gemessen wurde auf dem Steg sowie auf dem Hals, am Sattel und den Bündlen bis hin zum 19. Bund. Meist wurde der Schwingerreger durch ein Pseudo-Rauschsignal aus einem Ono Sokki *Multi-Purpose FFT Analyzer* CF-5210 angetrieben, das durch einen *Power Amplifier* B&K 2706 verstärkt und über das untere der drei Kabel zugeführt wurde.



Abb. 7. Schwingerreger mit aufgesetztem Impedanz-Messkopf.

Über die beiden oberen Kabel, die in Abb. 7 zu erkennen sind, wurden die Messsignale für Kraft und Bewegung zu Ladungsverstärkern (*Charge Amplifier* B&K 2635) geführt. Zur FFT-Analyse und weiteren Bearbeitung wurden sie in den Fourier-Analysator geleitet. Um die Übertragungsfunktion zu berechnen, die der Admittanz entspricht, musste die gemessene Schwingbeschleunigung zur Schwinggeschwindigkeit integriert werden. Dazu wurde sie im Frequenzbereich durch  $i\omega$  geteilt, was einer Integration im Zeitbereich entspricht. Das Ergebnis hat die Dimension Geschwindigkeit/Kraft mit den SI-Einheiten m/s pro N bzw. s/kg. Nach zehnmaliger Mittelung wurde über einer linearen Frequenzskale der Realteil, d.h. die mechanische Konduktanz, dargestellt. Der Bildschirminhalt wurde über GPIB (*General Purpose Interface Bus*) in einen Plotter hp 7470A übernommen und ausgedruckt.

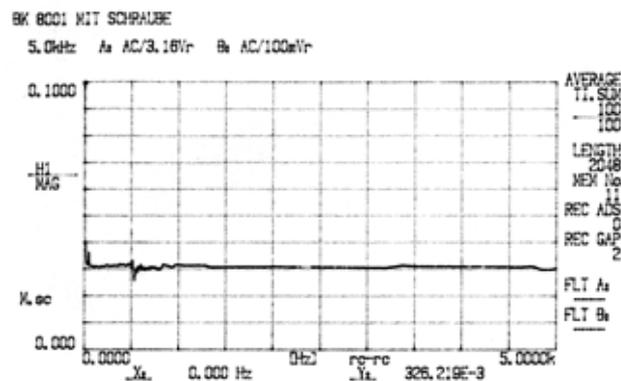


Abb. 8. Übertragungsfunktion Kraft/Beschleunigung, gemessen mit dem Impedanzmesskopf B&K 8001 mit eingeschraubtem Verlängerungsstück.

Die bewegte Masse des verwendeten Aufnehmers beträgt etwa 3 g. Dies kann Abb. 8 entnommen werden. Dort ist der Quotient Kraft/Beschleunigung über der Frequenz aufgetragen. Der Zahlenwert an der Ordinate ist durch 10 zu teilen und ergibt die Masse in kg. Obwohl diese Zusatzmasse prinzipiell das Messobjekt verändern und damit die Ergebnisse verfälschen konnte, wurde auf eine Kompensation der Masse mit Hilfe der *Mass Compensation Unit* B&K 5565 verzichtet, die bei früheren Messungen verwendet worden war. Bei einer Kalibrierung am 18.03.2004 wurde festgestellt, dass sämtliche Admittanzen, bei deren Bestimmung dieses Gerät bis dahin Verwendung gefunden hatte, um den Faktor 3,16 zu groß angegeben sind. Die Ursache ist eine durch die Kompensationseinheit bewirkte Abschwächung des Kraftsignals um 10 dB, die ursprünglich nicht berücksichtigt worden war. Dies ändert nichts an den Frequenzverläufen der Admittanzen oder Konduktanzen, jedoch sind in einigen Fällen die absoluten Werte etwa dreimal kleiner als angegeben und müssen entsprechend korrigiert werden.

Im Einzelnen haben sich dadurch folgende Fehler eingeschlichen: Bei Fleischer und Zwicker (1998) ist die Bildunterschrift unter Fig. 3 unrichtig; der Normierungsfaktor beträgt 0,015 s/kg. Ebenso ist bei Fleischer und Zwicker (1999) unter 4.1 am Ende des zweiten Absatzes ein falscher Normierungsfaktor angegeben und muss durch den richtigen Wert 0,015 s/kg ersetzt werden. Bei Fleischer (1998b) sind die angegebenen Werte der Konduktanz ebenfalls um etwa den Faktor drei zu groß, so dass der Skalenendwert in Fig. 2 und Fig. 5 richtig 0,015 s/kg beträgt. Im Artikel Fleischer (1999a) ist im ersten Absatz im Abschnitt „*The Diagnosis*“ ein falscher Normierungsfaktor angegeben, der durch 0,03 s/kg zu ersetzen ist. Auch in Arbeiten über die akustische Gitarre (Fleischer 1997) und über den Elektrobass (Fleischer 1999b und 2000) sind die falschen Zahlenangaben enthalten und müssen um etwas mehr als das Dreifache reduziert werden.

Die Messergebnisse dieses Kapitels wurden ohne Massenkompensation ermittelt. Dass die Resultate prinzipiell als Folge der Masse des Aufnehmers (ca. 3 g gemäß Abb. 8) verfälscht werden, wird angesichts der großen Masse der Gitarre (ca. 3 kg) als nicht erheblich eingeschätzt und in Kauf genommen. Wesentlich schwerer wiegt, dass die gemessenen Zahlenwerte für die Konduktanz im Wesentlichen korrekt sind.

## 2.3. Konduktanz an den Auflagern der leeren Saiten

Die sechs Saiten der Gitarre liegen am korpusseitigen Ende in allen Fällen am Steg auf. Wird eine Saite leer gespielt, d.h. nicht durch Greifen verkürzt, ruht sie am anderen Ende auf dem Sattel. Welche Konduktanz die Saite in diesem Fall sieht, wird in den beiden folgenden Abschnitten behandelt.

### 2.3.1. Konduktanz am Steg

Abb. 9 gibt die korpusseitigen Auflager der Saiten wieder. Dieses Bauteil wird insgesamt allgemein als Brücke bezeichnet. Es ist nicht starr, sondern umfasst mehrere verstellbare Bestandteile wie z.B. den Tremolo-Mechanismus, die Saitenhalter und insbesondere sechs Teilstege. Durch Drehen einer Schraube (links im Bild zu erkennen) gegen die Kraft einer kleinen Spiralfeder kann der Teilsteg in Längsrichtung verschoben werden, so dass für jede Saite individuell die Länge justierbar ist. Damit lassen sich kleine Störeinflüsse, die beispielsweise von der unterschiedlichen Biegesteifigkeit der Saiten herrühren, kompensieren. Meinel (2006) und weitere Autoren gehen auf die Auslegung und Funktion solcher Justiermöglichkeiten ein. Darüber hinaus kann mittels Imbusschrauben jeder Teilsteg in der Höhe eingestellt werden. Auf diese Weise ist es möglich, den Abstand einer jeden Saite zum Griffbrett so einzustellen, dass die Saite einerseits nicht gegen das Griffbrett schlägt und „scheppert“, andererseits sich



*Abb. 9. Brücke der Elektrogitarre Squier Bullet mit den Einzelstegen, von den Diskantsaiten her gesehen.*

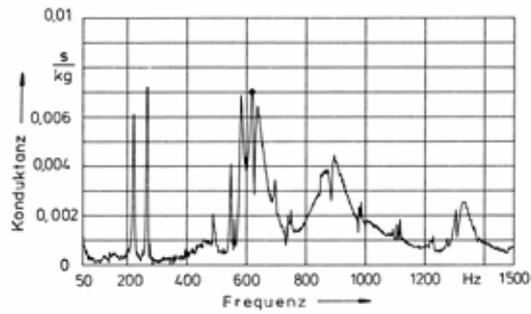
ohne großen Kraftaufwand greifen, d.h. gegen einen Bund drücken lässt. Insgesamt kann die gesamte Brückenkonstruktion mittels des Hebels, der vorne zu sehen ist, um die rechts erkennbaren schwarzen Kreuzschlitz-Schrauben gekippt werden (Tremolo bzw. Vibrato-Mechanismus).

Abb. 10 zeigt die Ergebnisse im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1500 Hz, was etwa den musikalischen Noten  $G_1$  bis etwa  $G_6$  entspricht. Dies Spanne umfasst annähernd fünf Oktaven und somit mehr als den gesamten Bereich von Grundfrequenzen der Gitarre. Nach oben ist die Konduktanz bis 0,01 m/s pro N bzw. s/kg aufgetragen. Beide Skalen sind linear geteilt.

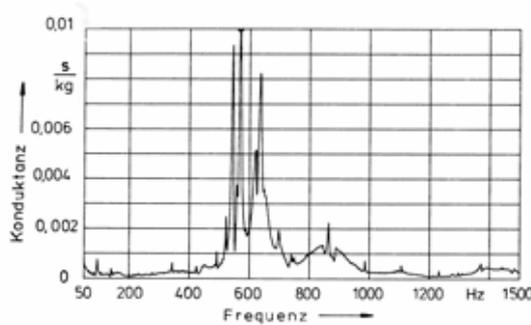
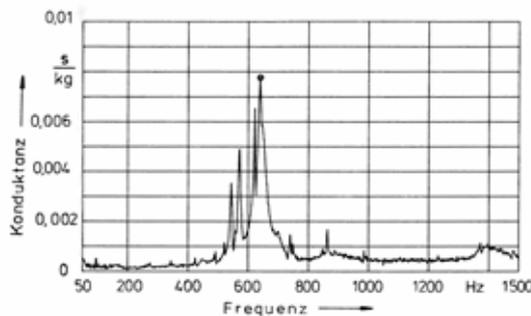
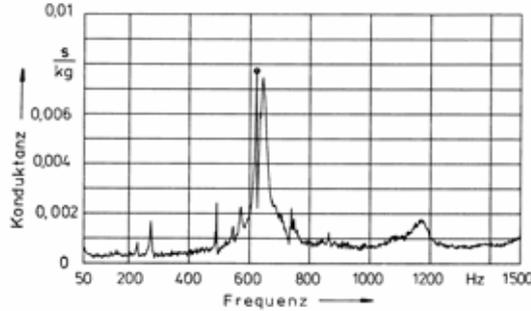
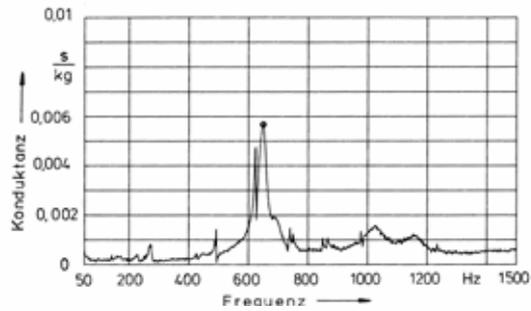
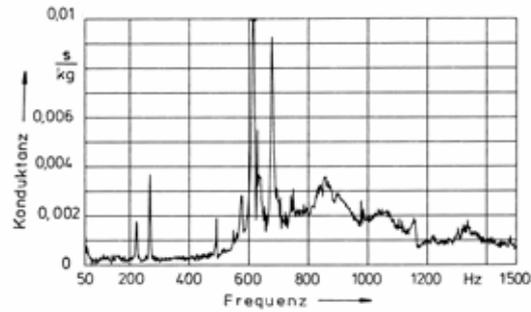
In aller Regel ist die Konduktanz kleiner als 0,002 s/kg. Eine markante Ausnahme mit deutlich höheren Werten ist im Bereich um etwa 600 Hz zu erkennen. Zwischen 568 Hz und 650 Hz (entsprechend  $C_5$  bis  $D_5$ ) bilden sich meist mehrere steile Spitzen aus. Es ist zu vermuten, dass sich hierin Resonanzen der metallischen Teilstege, die in Abb. 9 abgebildet sind, widerspiegeln. Die Unterschiede in der Frequenzlage könnten daher rühren, dass jeder dieser Teilstege in der Höhe und in seiner Position längs der Saitenachse anders eingestellt ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit führt auch die zwangsläufig weiche Lagerung der Teilsteg-Reihe auf dem kippbaren Vibrato-Mechanismus dazu, dass die Konduktanz bei bestimmten Frequenzen relativ hohe Werte annimmt.

Um den Beitrag zu veranschaulichen, der vom Instrumentenkörper herrührt, wurde die Konduktanz auch direkt auf der Oberfläche des Korpus unmittelbar neben der Brücke am Ende der hohen  $E_4$ -Saite gemessen. Die Konduktanz gemäß Abb. 11 ist ausschließlich durch die Struktur des hölzernen Instruments, nicht jedoch durch die aufgesetzten Beschläge bestimmt. Es prägt sich ein schwaches lokales Maximum bei etwa 900 Hz aus, von dem sich später herausstellen wird, dass es höchstwahrscheinlich von einer Biegeschwingung herrührt; vgl. Tab. XII oder Abschnitt 5.5. In weiten Bereichen wurden aber Werte unterhalb von 0,002 s/kg gemessen.

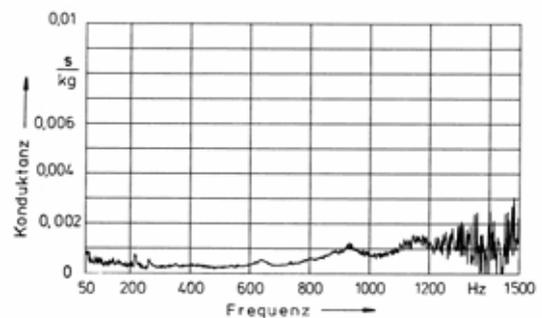
Ein Vergleich mit dem links daneben platzierten Diagramm, das sich auf die Messung an der Brücke bezieht, macht die Unterschiede deutlich. Die ausgeprägten Maxima der Konduktanz, lokalisiert um 600 Hz, sind direkt auf dem *Solid Body* des Instruments nicht zu beobachten. Sie stellen offenbar eine Folge der Brückenkonstruktion dar, die mitschwingen kann und der Saite damit bei bestimmten Frequenzen nicht das feste Auflager bietet, das bei direkter Verbindung der Saiten mit dem Korpus möglich wäre. Die Möglichkeit, jede Saite einzeln zu justieren und mit dem Vibrato-Hebel die Tonhöhe zu modulieren, wird demnach mit einem Auflager erkauft, das sich im Bereich um 600 Hz beweglich verhält und auch Energie schlucken kann. Bei vergleichenden Untersuchungen (Fleischer 2001b) hat sich diese Erscheinung bei keiner der anderen betrachteten Gitarren derart ausgeprägt, wie bei der hier behandelten Gitarre Squier Bullet.



← Abb. 10. Konduktanz an den Teilstegen, gemessen an den Auflagepunkten der einzelnen Saiten vom tiefen  $E_2$  (oben) bis zum hohen  $E_4$  (unten).



↓ Abb. 11. Konduktanz bei der Brücke, gemessen direkt am Korpus neben dem Teilsteg der hohen  $E_4$ -Saite.



### 2.3.2. Konduktanz am Sattel

Eine akustische Gitarre ist so konstruiert, dass die Brücke in weiten Bereichen nachgiebiger als der Hals ist (Fleischer 1997, 1998a). Demnach fließt Energie aus der schwingenden Saite zwar nicht ausschließlich, aber überwiegend in die Decke. Sie bringt Decke und Boden zum Mitschwingen und verwandelt sich in Schall. Im Gegensatz dazu stellt bei einer elektrischen Gitarre in aller Regel der Hals für eine Saite das „weichere“ Auflager dar. Der Frequenzbereich um 600 Hz, in dem sich die brückenseitigen Auflager der hier untersuchten Gitarre als nachgiebig und „energieaufnahmebereit“ erwiesen haben, stellt die Ausnahme dar, die diese Regel betätigt.

Dies wird aus der Gegenüberstellung von Abb. 12 ersichtlich. Nebeneinander angeordnet sind die Konduktanzen der beiden Auflager, die eine leer gespielte Saite sieht. Die rechte Spalte (Steg) bezieht sich auf das korpusseitige Ende und entspricht den Resultaten der Abb. 10, dargestellt in einem anderen Maßstab. In der linken Spalte (Sattel) sind Messergebnisse für das kopfseitige Ende der ungegriffenen Saiten zusammengestellt. Die jeweilige Saite ist durch die musikalische Note gekennzeichnet.

In den Diagrammen der linken Spalte von Abb. 12 zeigen sich lokale Maxima im gesamten untersuchten Frequenzbereich. Die höchsten Werte mit bis zu 0,026 s/kg wurden für das erste Maximum gemessen. Dieses findet sich für die Basssaiten  $E_2$  und  $A_2$  bei 170 Hz, für die Diskantsaiten  $H_3$  und  $E_4$  bei 210 Hz. Wie sich im Zuge der späteren Schwingungsuntersuchungen zeigen wird, handelt es sich dabei um eine Biegebewegung des Halses, die einer Torsionsschwingung dicht benachbart ist. Ein weiteres lokales Maximum tritt bei 440 Hz (Basssaiten) bzw. 442 Hz (Diskantsaiten) auf. Am kopfseitigen Auflager der hohen  $E_4$ -Saite erreicht die Konduktanz 0,022 s/kg. Weitere, allerdings weniger ausgeprägte Maxima finden sich bei 854 Hz, 954 Hz, 1224 Hz und 1362 Hz. Es existieren somit mehrere Frequenzbereiche, an denen die Saiten am kopfseitigen Ende alles andere als unbeweglich festgehalten sind. Vielmehr finden sie eine Lagerung vor, die frequenzselektive Dämpfungseigenschaften aufweist und demnach Energie aufzunehmen in der Lage ist.

## Sattel

## Steg

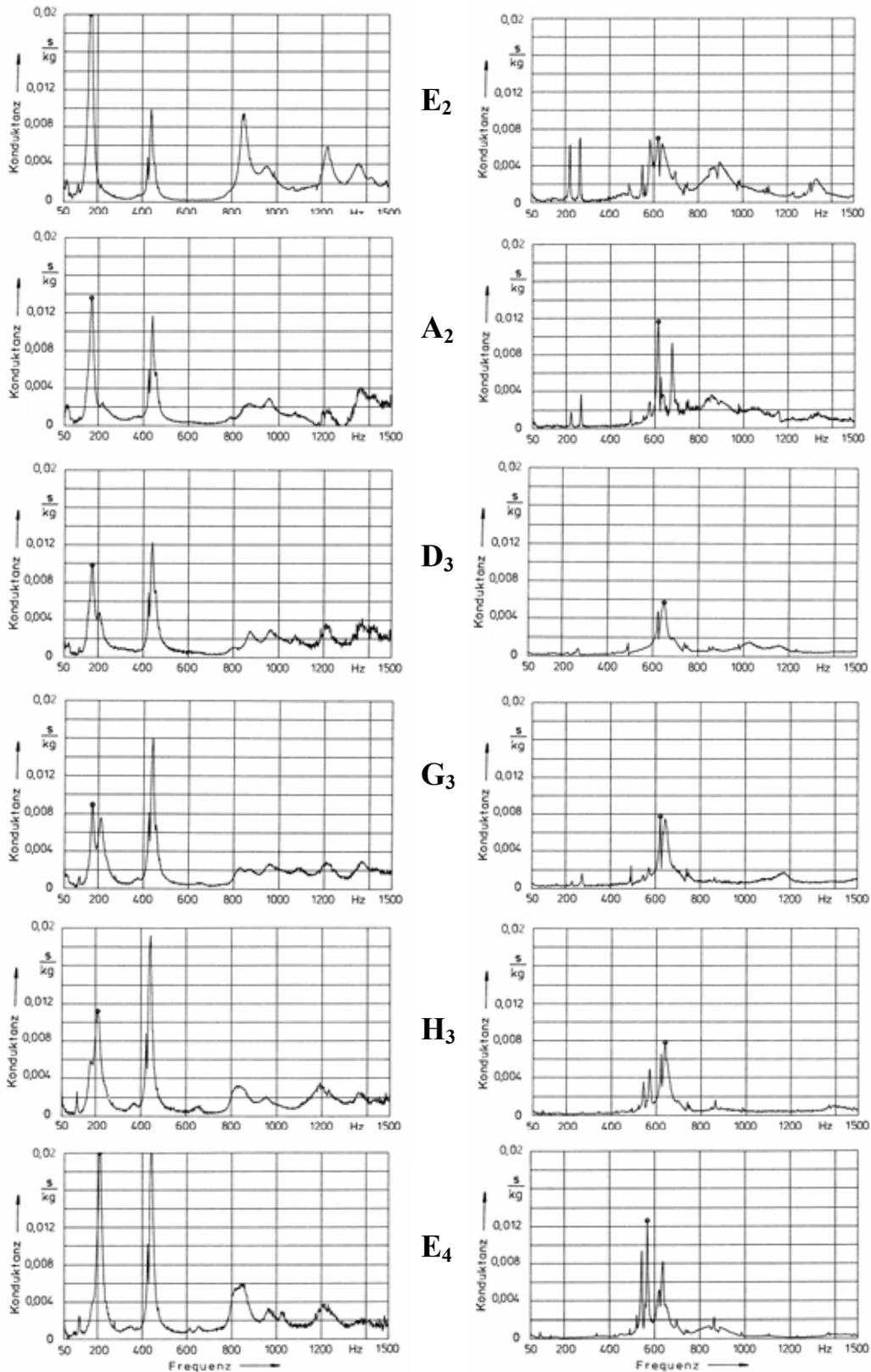
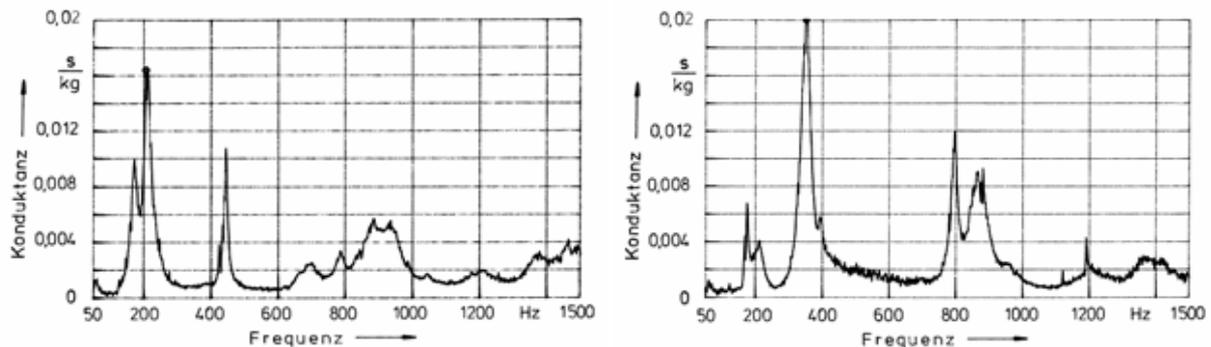


Abb. 12. Konduktanz am Sattel und am Steg an den Auflagepunkten der leeren Saiten.

## 2.4. Konduktanz am Hals in unterschiedlichen Richtungen

Wie bereits erwähnt, können die Saiten in mehreren Raumrichtungen schwingen. Transversal können sie sich unter anderem senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett, in dieser Ebene oder auch in jeder dazwischen liegenden Richtung bewegen. Grundsätzlich könnte man nun die Konduktanz nicht nur in Normalenrichtung, sondern beispielsweise auch in der Ebene des Griffbretts bestimmen.



*Abb. 13. Konduktanz am 1. Bund  
links: senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett und  
rechts: in der Ebene Korpus-Griffbrett.*

Als Ergebnis solcher Experimente zeigt Abb. 13 die Beweglichkeit des Halses in unterschiedlichen Raumrichtungen. Das linke Diagramm bezieht sich auf die Messung senkrecht zum Griffbrett. Steile Maxima treten bei 172 Hz und 206 Hz sowie 432 Hz auf. Das rechte Diagramm entsteht dann, wenn der Impedanzmesskopf seitlich am Hals angreift und in der Ebene des Griffbretts liegt. Die ersten beiden Spitzen entsprechen denjenigen im nebenstehenden Diagramm, sind jedoch weit weniger ausgeprägt. Weitere Maxima treten bei 350 Hz sowie 796 Hz und 864 Hz auf.

Frühere Untersuchungen (z.B. Fleischer 2001b) haben ergeben, wie sich die beiden Frequenzreihen an Hand der Halsschwingungen, die sich in der Konduktanz widerspiegeln, miteinander verknüpfen lassen. Die Schwingungen um 200 Hz entstehen durch kombinierte Biegung und Torsion. Sie lassen sich, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß, in beiden Richtungen anregen. Wesentlicher Bestandteil dieser Koppelschwingung ist eine Biegeschwingung in Normalenrichtung mit zwei Knoten bei etwa 172 Hz. In der Ebene tritt eine gleichartige Schwingung bei 350 Hz, d.h. bei der 2,03-fachen Frequenz auf. Analog dazu hat die Biegeschwingung mit drei Knoten die Frequenz 432 Hz in Normalenrichtung und 796 Hz bzw. 864 Hz in der Griffbrettebene. Zwischen den Frequenzen liegt hier der Faktor 1,84 bzw. 2,06.

Aus der Theorie der Balkenschwingungen ist bekannt, dass bei rechteckigem Querschnitt die Eigenfrequenzen von der Breite nicht abhängen. Dagegen sind sie mit der Dicke direkt verknüpft; vgl. z.B. Gl. (3) in Fleischer (2001b). Modelliert man den Gitarrenhals als Rechteckbalken, so verhalten sich die Frequenzen gleichartiger Biegeschwingungen senkrecht zum Griffbrett bzw. in der Ebene des Griffbretts wie die entsprechenden Abmessungen des Griffbretts. Bei der betrachteten Gitarre ist das Griffbrett am Sattel 42 mm und 52 mm am 12. Bund, im Mittel also 47 mm breit. Die größte Abmessung in Dickenrichtung ist 23 mm. Gleichartige Schwingungen treten in der Ebene demzufolge bei Frequenzen auf, die etwa um den Faktor  $47/23 = 2,04$  größer als bei den Schwingungen aus der Ebene heraus sind. Diese Abschätzung stimmt mit den Beobachtungen, die im vorhergehenden Absatz geschildert sind, überein.

Naturgemäß interessieren primär solche Bewegungen des Instruments, welche die relevanten Schwingungen der Saiten beeinflussen können. Als relevant für die Funktion einer Elektrogitarre ist anzusehen, was sich auf das elektrische Ausgangssignal auswirkt. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, hängt das Ausgangssignal elektromagnetischer Tonabnehmer von der Relativgeschwindigkeit zwischen Saite und Tonabnehmer ab, welche zu einer Änderung der magnetischen Flusses führt. Aus diesem Grund stellt bei den folgenden Betrachtungen die Normale auf der Ebene Korpus-Griffbrett diejenige Richtung dar, in der bevorzugt gemessen wird. Diese Richtung wird im Folgenden als „Haupttrichtung“ bezeichnet. Die dazu senkrechte Orientierung, d.h. in der Ebene des Korpus und des Griffbretts, wird „Nebenrichtung“ genannt.

## 2.5. Zusammenfassende Bemerkung

Unter Konduktanz wird in diesem Bericht der Realteil der mechanischen Punktadmittanz verstanden. Er ist ein Maß dafür, wie aufnahmefähig das Auflager einer Saite für irreversibel abfließende Energie ist. Diese Größe wird als Funktion der Frequenz in der Haupttrichtung, d.h. senkrecht auf der Ebene Korpus-Griffbrett bestimmt.

Erste Messungen an den Auflagern der leer gespielten Saiten haben ergeben, dass die Brücke in aller Regel wenig aufnahmefähig ist. Eine markante Ausnahme mit hohen Konduktanzwerten stellt bei der betrachteten Gitarre der Frequenzbereich um 600 Hz dar. Es steht zu vermuten, dass deren Ursache die spezielle Konstruktion der Brücke mit den veränderlichen Stegauflagen und insbesondere dem Vibrato-Mechanismus ist. Um die Saitenspannung und damit die Tonhöhe der Gitarrenklänge variieren zu können, ist die Brücke nicht fest mit dem Korpus verbunden, sondern beweglich gelagert. Dies hat die negative Folge, dass der Steg, auf dem die Saite liegt, sich mitbewegen und bei bestimmten Frequenzen Energie aufnehmen kann. In aller Regel finden die Saiten jedoch an ihrem kopfseitigen Ende das „weichere“ Auflager vor, über das frequenzselektiv Energie abfließen kann.

Die Messungen haben gezeigt, dass die Konduktanz beim betrachteten Instrument unter Umständen von der lateralen Position abhängt. Wenn im Folgenden die Konduktanz auf dem Griffbrett gemessen wird, muss in erster Linie berücksichtigt werden, an welchem Bund die Saite aufliegt. In zweiter Linie könnte es aber auch eine Rolle spielen, ob es sich um eine der Basssaiten oder eine der Diskantsaiten handelt.

### 3. KONDUKTANZ-, „GEBIRGE“

Die Messungen des vorangegangenen Kapitels haben gezeigt, dass das Instrument an den Punkten, an denen die Saiten aufliegen, sich beweglich verhalten kann. Mit der Admittanz lässt sich die Beweglichkeit allgemein quantifizieren. Von besonderer Aussagekraft ist deren Realteil, die Konduktanz, da sie Aufschluss darüber gibt, in welchem Ausmaß an der betreffenden Stelle Energie in den Instrumentenkörper einfließen kann. Nachdem die Auflagepunkte der leer gespielten Saiten bereits untersucht worden sind, werden im vorliegenden Kapitel auch die Auflagepunkte der gegriffenen Saiten betrachtet. Gemessen wurde stets in Hauptrichtung. Wenn nicht anders angegeben, wurde die Gitarre dabei in sitzender Spielhaltung am Körper gehalten. Die linke Hand umfasste den Hals nahe der jeweiligen Messstelle.

#### 3.1. Konduktanz auf dem Griffbrett

Den Beobachtungen von Fleischer (2001b) zufolge stellt die hier behandelte Gitarre in zweierlei Hinsicht einen *Worst Case* dar. Zum einen wurden bei keinem der übrigen fünf Instrumente, die in dieser vergleichenden Studie untersucht worden sind, am Steg so hohe Konduktanzwerte gemessen wie bei der Gitarre Squier Bullet; vgl. Abb. 10. Wie oben beschrieben, dürfte der Grund vorwiegend darin liegen, dass der Steg unterteilt und nicht fest mit dem Korpus verschraubt ist. Vielmehr ist er beweglich gelagert, damit der Spieler ihn mit dem Vibrato-Hebel kippen kann. Zum anderen haben sich bei keinem anderen Instrument so große laterale Abweichungen in der Konduktanz ergeben; vgl. Abb.12. Das bedeutet, dass es bei der betrachteten Gitarre sehr wohl einen Unterschied machen kann, ob die Konduktanz an einem Bund in der Mitte oder mehr am Rande bei den Basssaiten bzw. bei den Diskantsaiten gemessen wird.

##### 3.1.1. Konduktanz auf der Mittellinie

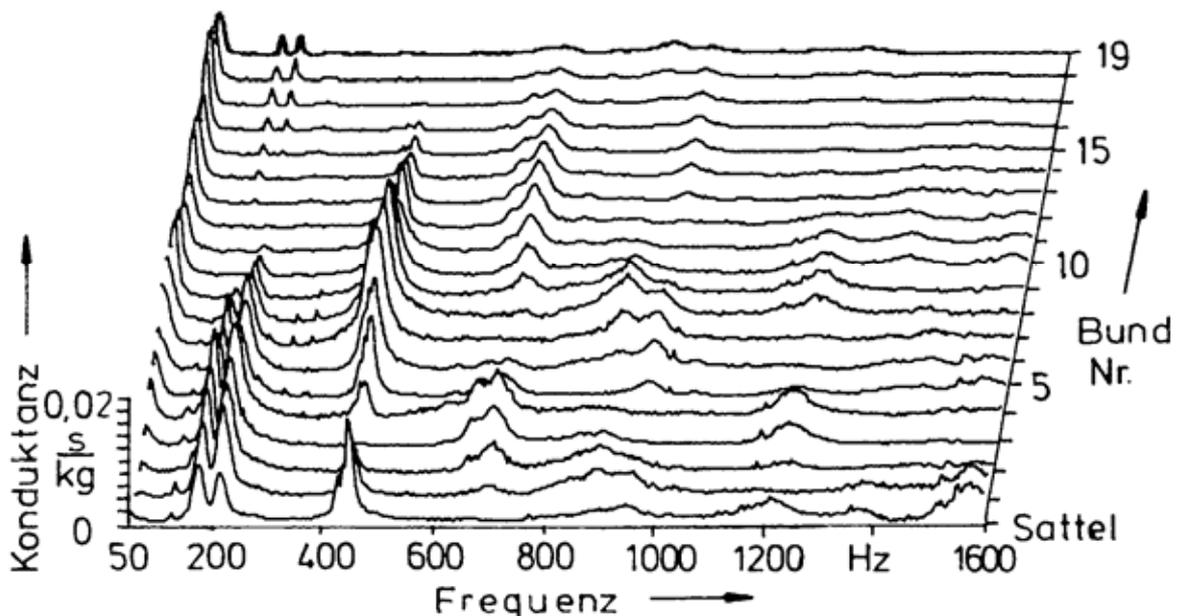


Abb. 14. Halskonduktanz zwischen 50 Hz und 1600 Hz, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

An ihrem korpusseitigen Ende ist eine Saite stets am Steg gelagert. Das andere Ende liegt nur dann, wenn die Saite leer gespielt wird, am Sattel auf. Zum Spielen wird die Saite jedoch meist gegriffen. Das bedeutet, dass sie gegen einen Bund gedrückt und dadurch ihre aktive Länge verkürzt wird. Welche Konduktanz eine mittlere Saite ( $D_3$  oder  $G_3$ ) entlang dem Griffbrett an einem Bund vorfindet, wird im Folgenden behandelt. Zunächst wird ein sehr weiter Frequenzbereich zwischen 50 Hz (entsprechend der Note  $G_1$ ) und 1600 Hz (etwa Note  $G_6$ ) betrachtet.

Abb. 14 zeigt das Ergebnis dieser Übersichtsmessung entlang dem Hals. Zwanzig Messkurven sind so zusammengesetzt, dass eine dreidimensionale Darstellung nach Art eines Gebirges entsteht, auf das man vom kopfseitigen Ende her blickt. Die Frequenz verläuft nach rechts, der Messort in die Zeichenebene hinein. Im Beispiel ist demnach der Sattel ganz vorne (im Bild unten) und der 19. Bund ganz hinten (im Bild oben) angeordnet. An der Ordinate ist die Konduktanz mit dem Maximalwert 0,02 s/kg angetragen. Es entsteht eine „Gebirgslandschaft“ mit mehreren „Höhenzügen“. Deren erster liegt bei etwa 50 Hz. Ein weiterer bei etwa 200 Hz besteht aus zwei eng benachbarte „Bergketten“. Ein anderer Höhenzug prägt sich bei etwas mehr als 400 Hz aus. Noch einige weitere Höhenzüge sind auszumachen. Dabei ist zu beobachten, dass die Zahl der „Gipfel“ mit steigender Frequenz immer größer wird. Gleichzeitig werden die Höhenzüge immer breiter und flacher. Besonders große Konduktanzwerte sind in der linken Hälfte von Abb. 14 zu beobachten. Je größer die Frequenz wird, desto weniger hoch werden die Gipfel.

### 3.1.2. Konduktanz, gemessen längs des Griffbretts

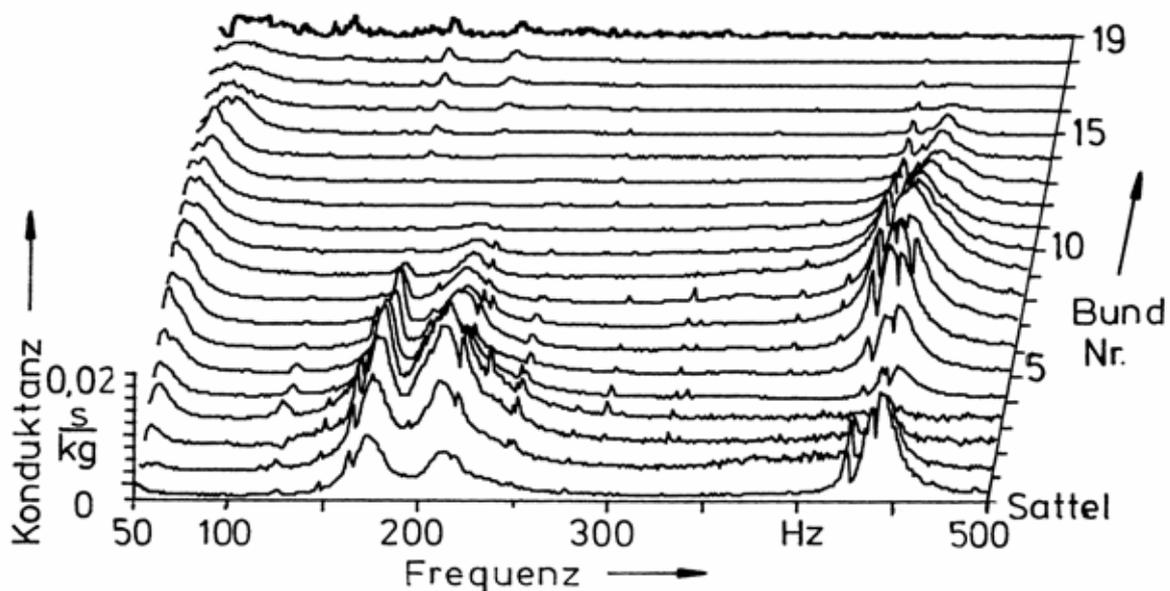


Abb. 15. Halskonduktanz zwischen 50 Hz und 500 Hz, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

Im nächsten Schritt wird der Bereich von der oberen Frequenzgrenze 1600 Hz auf 500 Hz eingengt. Das Ergebnis für die Mittellinie des Griffbretts, gemessen zwischen den Saiten  $D_3$  und  $G_3$ , ist Abb. 15 zu entnehmen. In Folge der erhöhten Frequenzauflösung sind nun zahlreiche lokale Maxima zu erkennen, die mehr oder weniger dicht beieinander liegen. So zerfällt die Gebirgskette bei etwa 200 Hz in zwei Bergzüge, die in Abb. 15 von vergleichbarer Höhe sind. Ein Höhenzug liegt etwas unterhalb, der andere etwas oberhalb von 200 Hz. Eine ähnliche Aufspaltung zeigt sich oberhalb von 400 Hz.

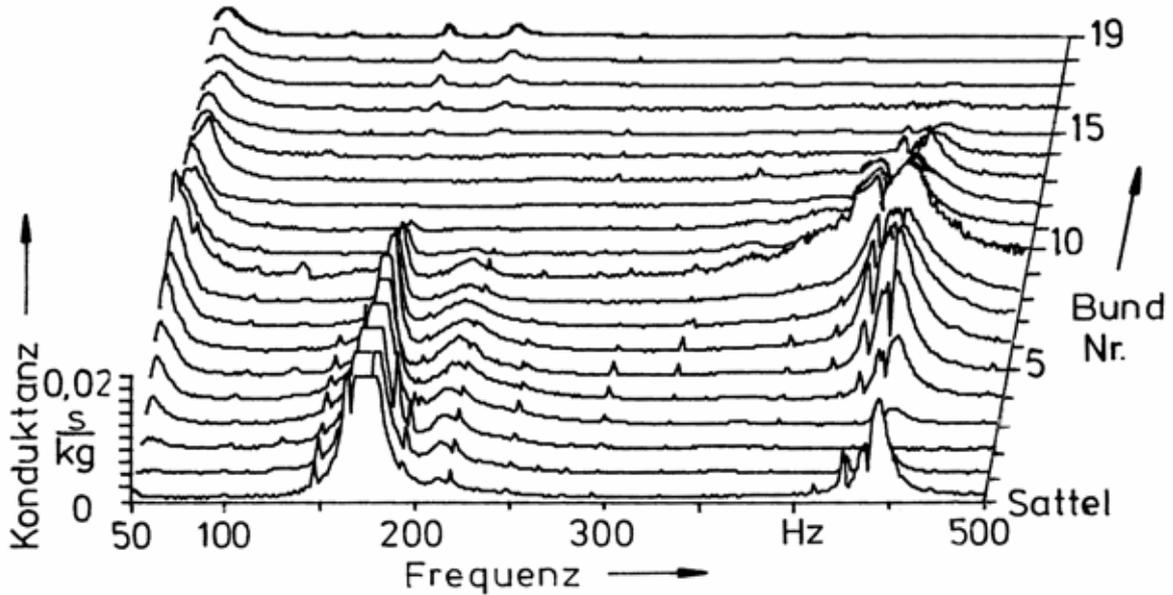


Abb. 16. Halskonduktanz zwischen 50 Hz und 500 Hz, gemessen zwischen den Basssaiten ( $E_2$ - und  $A_2$ -Saite).

Die Konduktanz-, „Gebirge“ in den Abb. 16 und 17 ergeben sich, wenn außermittig gemessen wird. Abb. 16 bezieht sich auf eine Messung zwischen den beiden tiefsten Basssaiten  $E_2$  und  $A_2$ , d.h. entlang dem Griffbrett nahe demjenigen Rand, der sich in Abb. 5 unten befindet. Der Vergleich mit Abb. 15 zeigt weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich des Höhenzuges etwas oberhalb von 400 Hz. Eine deutliche Diskrepanz ist jedoch um 200 Hz zu erkennen. Von der doppelten Gebirgskette, die sich in der Mitte des Griffbretts ausbildet, ist nur noch ein Bergzug unterhalb von 200 Hz übrig geblieben. Hier wird die Konduktanz in den tieferen Lagen so groß, dass sie den eingestellten Bereich von 0,02 s/kg überschreitet und die Spitzen abgeschnitten werden. Im Interesse eines einheitlichen Maßstabes zur besseren Vergleichbarkeit wurde dieses *Clipping* in Kauf genommen.

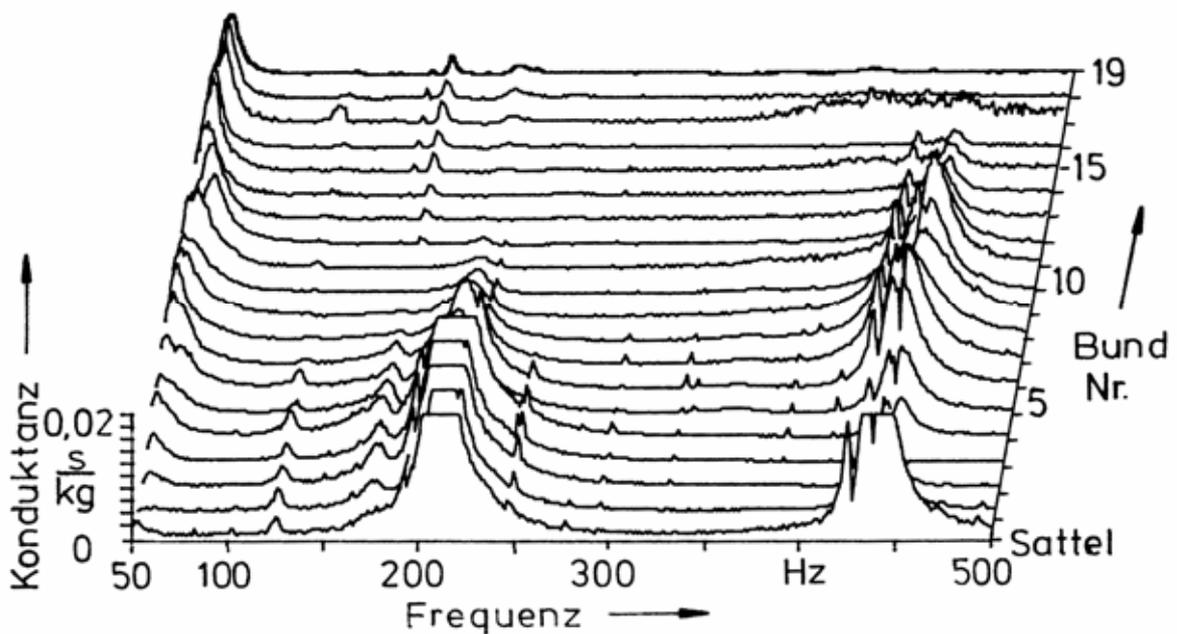


Abb. 17. Halskonduktanz zwischen 50 Hz und 500 Hz, gemessen zwischen den Diskantsaiten ( $H_3$ - und  $E_4$ -Saite).

Ein vergleichbarer Effekt ist in Abb. 17 zu erkennen. Er betrifft den Höhenzug, der nun oberhalb von 200 Hz liegt. Dieser prägt sich so stark aus, dass er 0,02 s/kg übersteigt und am Sattel sowie an den ersten vier Bünden das Maximum abgeschnitten wird. Die beiden extremen Zustände an den Rändern des Griffbretts werden im Vergleich zwischen den Abb. 16 und 17 deutlich: Für die Basssaiten  $E_2$  und  $A_2$  wird die Konduktanz zwischen 170 Hz und 180 Hz so groß, dass sie 0,02 s/kg überschreiten kann. Für die Diskantsaiten  $H_3$  und  $E_4$  zeigen sich solche Konduktanzwerte dagegen zwischen 200 Hz und 210 Hz. Wie Abb. 15 zeigt, werden auf der Mittellinie in beiden Frequenzgebieten etwa gleich hohe Werte erreicht, die aber in jedem Fall unterhalb von 0,02 s/kg bleiben. Daraus folgt, dass eine Messung pro Bund bei diesem Instrument kein vollständiges Bild liefern würde. Auf Grund der starken lateralen Unterschiede empfiehlt es sich, bei der Gitarre Squier Bullet nicht nur in der Mitte, sondern gegebenenfalls auch bei den Bass- und den Diskantsaiten zu messen.

### 3.2. Konduktanz auf dem Griffbrett und am Steg

In diesem Abschnitt sollen die Relationen der Konduktanzen anschaulich gemacht werden, die eine gegriffene Saite an ihren beiden Randlagern, d.h. am kopf- sowie am korpusseitigen Ende vorfindet. Dazu sind Konduktanz-Gebirge zusammen mit den Stegkonduktanzen dargestellt. Die Messungen wurden mit der Versuchsanordnung durchgeführt, die z.B. bei Fleischer (2001b) beschrieben ist. Wesentliche Merkmale sind, dass als Anregungssignal Weißes Rauschen verwendet und ein anderer Analysator (Ono Sokki CF 350) eingesetzt wurde. Aus den oben genannten Gründen wurde auf eine Massenkompensation verzichtet. Um das Maximum der Konduktanz am Steg mit einzubeziehen, das bei etwa 600 Hz liegt, wurde die Bandbreite 50 Hz bis 1000 Hz gewählt. Die Betrachtungsrichtung für das Konduktanz-Gebirge ist nun geändert. Im Gegensatz zu den Abb. 14 bis 17 blickt man vom Korpus her auf den Steg, das Griffbrett und den Sattel, der nun hinten (im Bild oben) ist.

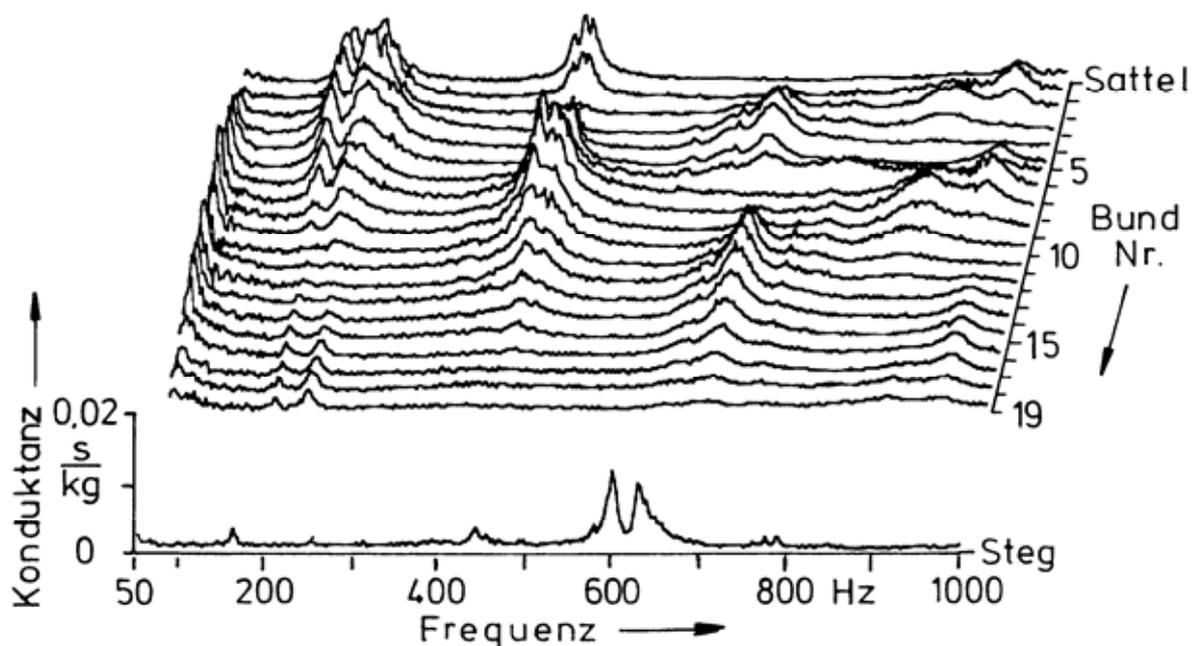


Abb. 18. Konduktanz zwischen 50 Hz und 1000 Hz, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite sowie am Steg der  $G_3$ -Saite.

Abb. 18 bezieht sich auf die mittleren Saiten, insbesondere auf die  $G_3$ -Saite. Hier wie in den beiden weiteren Abbildungen zeigt sich, dass die Konduktanz stark von der Frequenz und vom

Ort abhängt. Neben Maxima, die nahezu  $0,02 \text{ s/kg}$  erreichen können, zeichnen sich auch Minima ab, an denen die Konduktanz äußerst geringe Werte annimmt. Ihre Höchstwerte erreicht sie nur innerhalb enger Frequenzgrenzen und nur an bestimmten Stellen des Griffbretts. Im Konduktanz-Gebirge spiegeln sich Transversal- und Torsionsschwingungen des Halses wider. Diese lassen sich bekanntlich zum einen nur mit einer „passenden“ Frequenz anregen. Zum anderen kann bekanntlich eine Strukturschwingung nicht im Knoten angeregt werden. Um eine Schwingung hervorzurufen, muss neben der Frequenz auch der Ort „passen“.

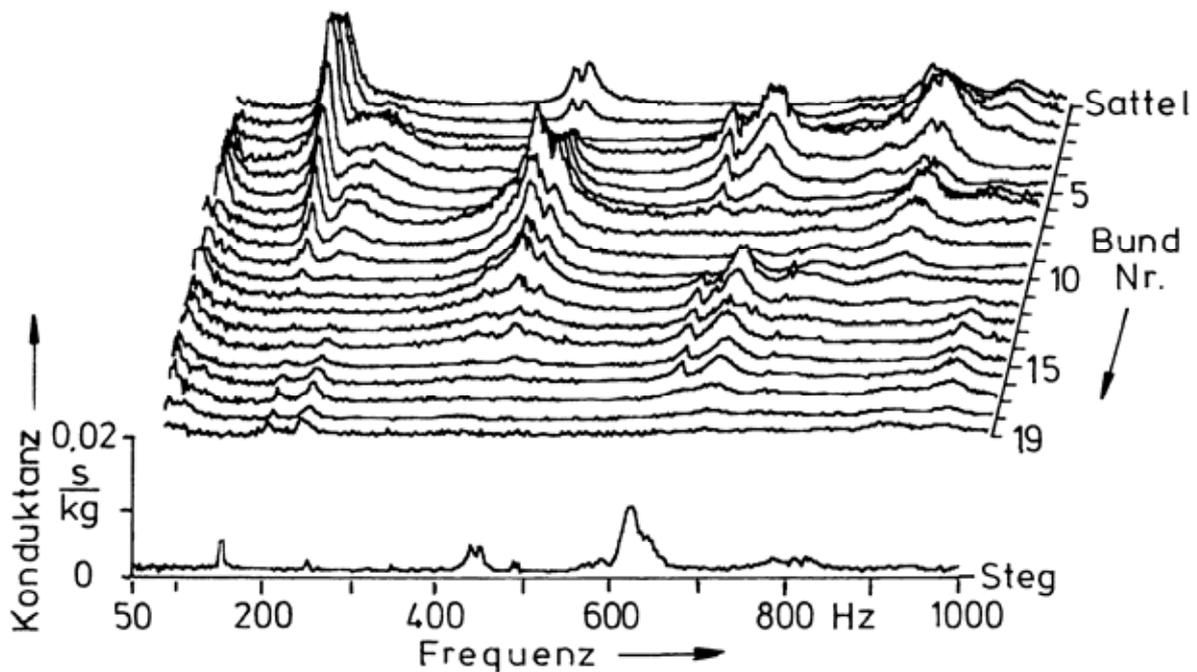


Abb. 19. Konduktanz zwischen 50 Hz und 1000 Hz, gemessen zwischen den Basssaiten  $E_2$  und  $A_2$  sowie am Steg der  $E_2$ -Saite.

Das Gebirge von Abb. 19 entsteht, wenn entlang dem Hals zwischen den Basssaiten, d.h. außermittig, gemessen wird. Es gibt Aufschluss über die Konduktanz, wie sie die  $E_2$ - oder  $A_2$ -Saite an ihren Auflagepunkten vorfindet. Analoges gilt für Abb. 20, jedoch mit dem Unterschied, dass diese Diagramme sich auf die Diskantsaiten  $H_3$  und  $E_4$  beziehen.

Am Steg sehen die Saiten in aller Regel eine Konduktanz von weniger als  $0,002 \text{ s/kg}$ . Die für das untersuchte Instrument typische Ausnahme stellt in den Abb. 18 bis 20 der Frequenzbereich um 600 Hz dar. Schon in den Untersuchungen von Kapitel 2 wurden hierfür große Konduktanzwerte bis etwa  $0,01 \text{ s/kg}$  festgestellt. Dort war bereits darauf hingewiesen worden, dass deren Ursache nicht der schwingungsfähige Korpus, sondern mit großer Wahrscheinlichkeit die Brückenkonstruktion mit dem Vibrato-Mechanismus ist. Ein weiteres lokales Maximum kann oberhalb von 400 Hz auftreten. Bei dieser Frequenz bildet der Instrumentenkörper eine Biegeschwingung aus, die sich auch in der Halskonduktanz als Höhenzug mit zwei Gipfeln widerspiegelt. Dass sich dieses Maximum bei den Untersuchungen von Kapitel 2 nicht gezeigt hat, könnte damit zusammenhängen, dass der Experimentator die Gitarre bei diesen Messungen möglicherweise stärker festgehalten und gegen seinen Körper gepresst hat.

Auch für die Bass- und Diskantsaiten bestätigt sich, was Abb. 18 bereits für die mittleren Saiten gezeigt hat. Innerhalb bestimmter, relativ eng begrenzter Frequenzbereiche kann die Konduktanz sehr hohe Werte annehmen. Wie groß sie im Einzelfall wird, ist für jeden Bund und möglicherweise dort auch für die verschiedenen Saiten unterschiedlich. Allgemeine Aussagen

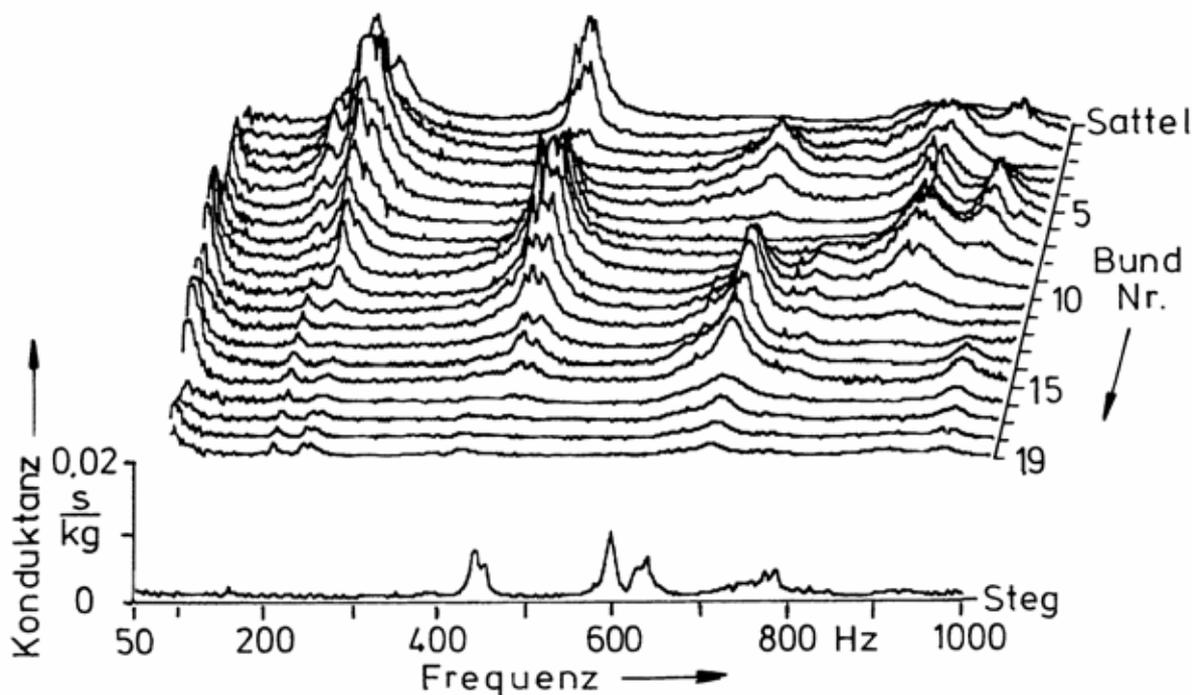


Abb. 20. Konduktanz zwischen 50 Hz und 1000 Hz, gemessen zwischen den Diskantsaiten  $H_3$  und  $E_4$  sowie am Steg der  $E_4$ -Saite.

über die Randbedingung, die eine Saite auf dem Griffbrett vorfinden wird, lassen sich demnach nicht machen. Für jeden Einzelfall liefern jedoch die Konduktanz-Gebirge Aussagen hinsichtlich der Energieverluste am halsseitigen Randlager zu. Wie von Fleischer (2000) am Beispiel des Elektrobasses und (2001a) für die Elektrogitarre gezeigt, kann daraus ein irregulär rasches Abklingen der Saitenschwingungen resultieren.

### 3.3. Ältere Ergebnisse zur Griffbrettkonduktanz

Die bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass es bei der betrachteten Gitarre einen großen Unterschied bedeuten kann, ob die Konduktanz am selben Bund bei den Basssaiten, in der Mitte oder bei den Diskantsaiten gemessen wird. Um das Ausmaß der Unterschiede direkt ersichtlich zu machen, sind drei zusammen gehörende Diagramme gemeinsam dargestellt. Die in diesem Abschnitt präsentierten Messungen wurden mit der Apparatur durchgeführt, die bei Fleischer (2001b) beschrieben ist. Wesentliche Merkmale sind auch hier, dass als Anregungssignal Weißes Rauschen verwendet und ein Analysator Ono Sokki CF 350 eingesetzt wurde. Die fehlerhafte Ordinatenenteilung der ursprünglichen Messung, die mit der Massenkompensation zusammenhängt, wurde an Hand einer Nachmessung korrigiert. Als Messbandbreite wurde 75 Hz bis 700 Hz gewählt. Damit sind die Grundtöne der Saitenklänge bis zum Bund Nr. 13 der hohen  $E_4$ -Saite erfasst.

#### 3.3.1. Konduktanz für Bass-, Mitten- und Diskantsaiten

Da sich die eklatantesten Unterschiede bereits in den tiefen Lagen zeigen, wurde diese Messung auf den Sattel und die ersten zwölf Bünde beschränkt. Die Zusammenstellung von Abb. 21 zeigt die drei Konduktanz-Gebirge, die man längs des Halses beim Messen zwischen den beiden Basssaiten (oben), auf der Mittellinie des Griffbretts (Mitte) sowie zwischen den Diskantsaiten (unten) erhält.

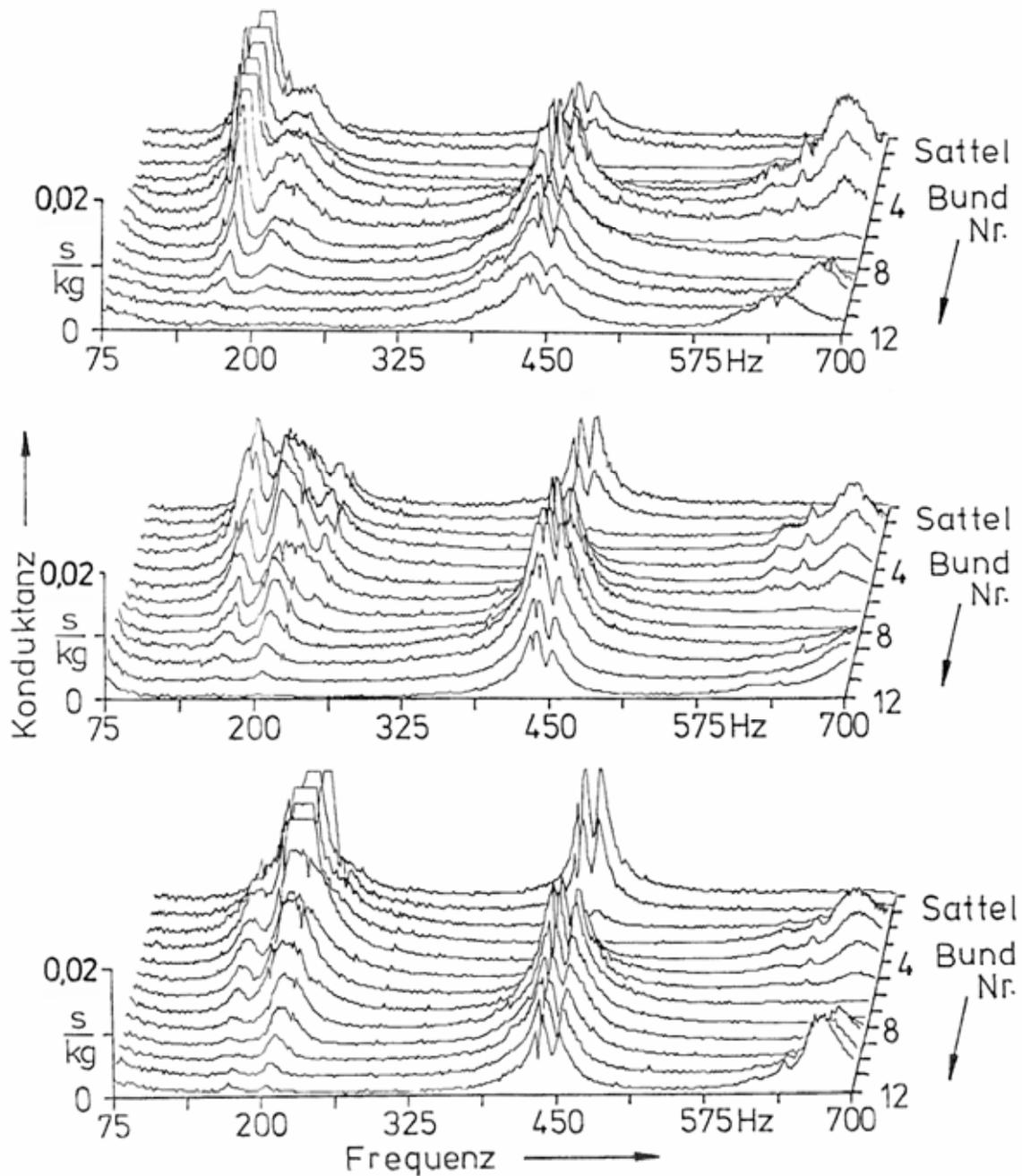


Abb. 21. Konduktanz längs des Halses gemäß Fleischer (2001b Fig. 63) mit der nunmehr korrekten Ordinatenenteilung, gemessen zwischen der  $E_2$ - und der  $A_2$ -Saite (oben), zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite (Mitte) bzw. zwischen der  $H_3$ - und der  $E_4$ -Saite (unten).

Während die beiden dicht benachbarten Höhenzüge zwischen 400 Hz und 450 Hz sich in allen drei Diagrammen von Abb. 21 ähneln, bildet sich der doppelte Höhenzug um 200 Hz mit deutlichen Unterschieden aus. Bei den Basssaiten (oberes Diagramm) prägt sich das Maximum unterhalb von 200 Hz sehr deutlich aus und überschreitet an den unteren Bündeln 0,02 s/kg; vgl. auch die Abb. 16 und 19. Dagegen erreicht die Konduktanz bei den Diskantsaiten (unteres Diagramm) ihre höchsten Werte oberhalb von 200 Hz; vgl. hierzu die Abb. 17 und 20. Mitten auf dem Griffbrett (mittleres Diagramm) sind beide lokale Maxima erkennbar, weisen aber Konduktanzwerte von weniger als 0,02 s/kg auf. Im Frequenzgebiet um 200 Hz wird somit besonders deutlich, in welchem starkem Maße bei dieser Gitarre die Konduktanz

davon abhängen kann, ob an ein und demselben Bund am einen Rand bei den Basssaiten, mittig oder am anderen Rand bei den Diskantsaiten gemessen wird. Dies bestätigt die Ergebnisse der vorhergehenden Abschnitte.

### 3.3.2. Konduktanz und Auswertung

Derselben Arbeit (Fleischer 2001b) sind die folgenden Diagramme entnommen. Um beurteilen zu können, welche Konduktanz die gegriffene Saite am betreffenden Bund vorfindet, sind die zugehörigen Grundfrequenzen in einem Diagramm markiert, das dieselbe Teilung wie die folgenden Konduktanz-Gebirge aufweist. Standard-Stimmung für alle sechs Saiten mit  $A_2$  entsprechend 110 Hz ist vorausgesetzt. Für eine erste Auswertung der Messdiagramme empfiehlt es sich, Abb. 22 auf einen transparenten Träger zu kopieren. Man legt die Schablone auf das Konduktanz-Gebirge und liest den Wert ab, den die Konduktanz am Sattel (sofern sie leer gespielt wird) bzw. am betreffenden Bund (sofern sie gegriffen wird) hat.

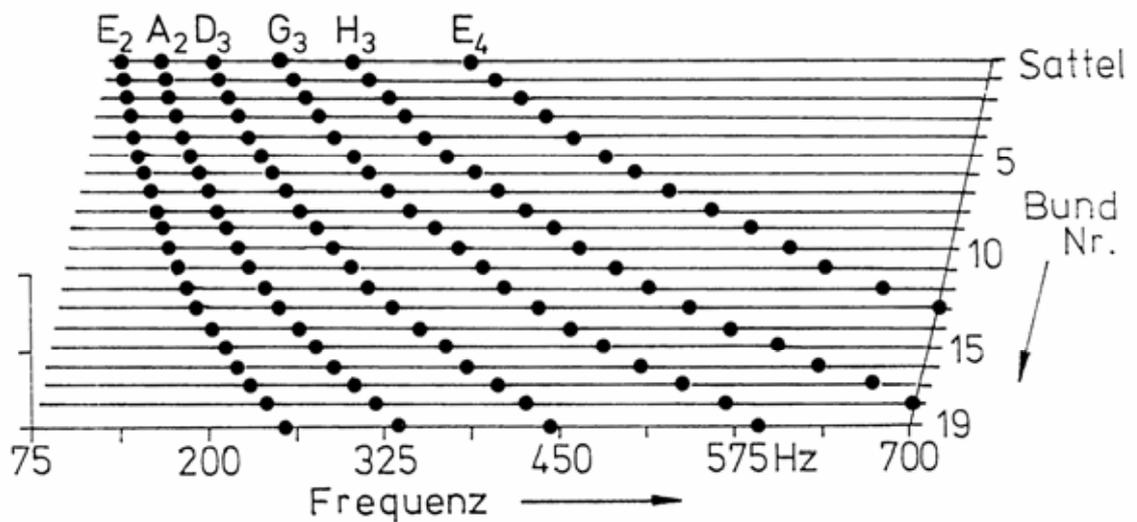


Abb. 22. Auswerteschablone für die Griffbrettkonduktanz.

Die Punkte markieren die Frequenzen der Grundtöne der angegebenen Saiten an der betreffenden Griffposition.

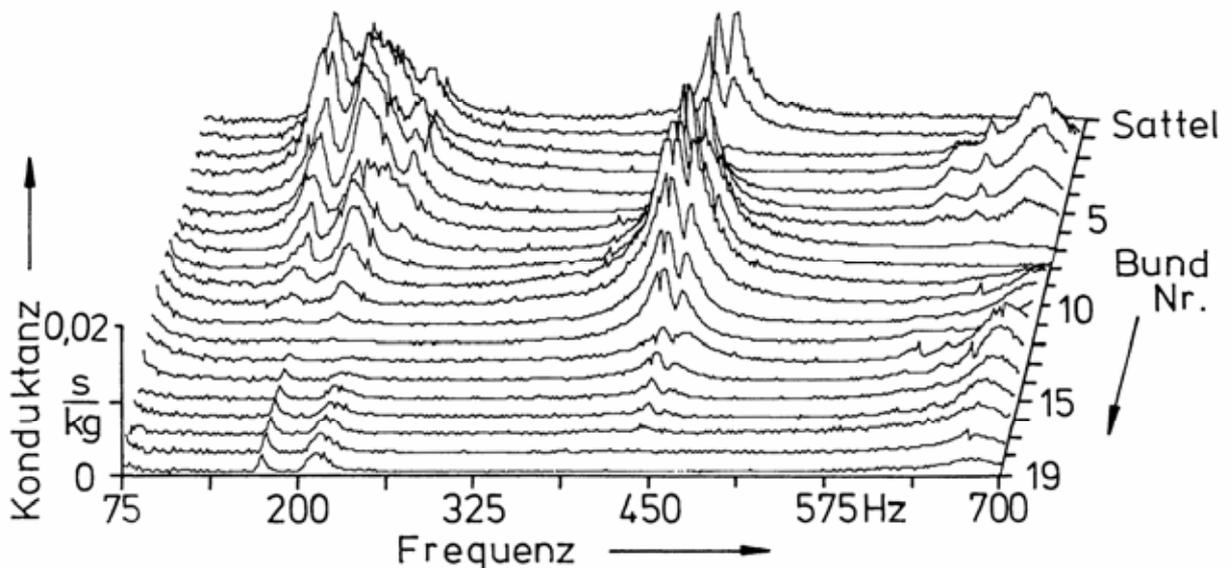


Abb. 23. Halskonduktanz der Gitarre Squier Bullet zwischen 75 Hz und 700 Hz gemäß Fleischer (2001b) mit der nunmehr korrekten Ordinatenenteilung, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

Abb. 23 bezieht sich auf die E-Gitarre Squier Bullet und gilt für die  $D_3$ - bzw. die  $G_3$ -Saite. Die Skale an der Ordinate ist gegenüber Fleischer (2001b) berichtigt worden. Das Konduktanz-Gebirge erweist sich insgesamt als „verschmiert“. Wie bereits mehrfach beobachtet, zerfallen die Höhenzüge in mehrere eng benachbarte Gipfel. So ergeben sich hohe Konduktanzwerte in einem relativ weiten Bereich von Griffpositionen. Für die Grundschwingung wird die Konduktanz sehr groß, wenn die  $D_3$ -Saite zwischen den Bündeln Nr. 1 und 7 gespielt wird. Hohe Werte sind auch für die  $G_3$ -Saite im Bereich der tiefen Lagen sowie bei den hohen Lagen um den 13. Bund zu erwarten. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Gitarre auch das Auflager am korpusseitigen Ende hohe Konduktanzwerte aufweisen kann. Für die  $G_3$ -Saite wäre dies in den sehr hohen Lagen etwa ab dem Bund. Nr. 19 der Fall.

Zum Vergleich ist in Abb. 24 die Griffbrettkonduktanz eines anderen Instruments eingefügt. Diese Gitarre ist vom Typ Les Paul K.M. der Firma Gibson aus der Sammlung von Dr. Tilmann Zwicker. Sie verkörpert neben dem im vorliegenden Bericht untersuchten Startocaster-Typ den anderen wesentlichen Grundtyp von Elektrogitarren. Korpus und Hals bestehen aus Mahagoni. Das Griffbrett ist mit Palisander, der Korpus mit Ahornholz belegt. Der Kopf mit den Stimm-Mechaniken ist symmetrisch ausgelegt. Dies gilt mit Ausnahme eines *Cutaways* auch für den Korpus. Ähnlich wie ein Geigenkörper ist der Vollholz-Korpus gekrümmt. Der Hals ist in den Korpus eingeleimt.

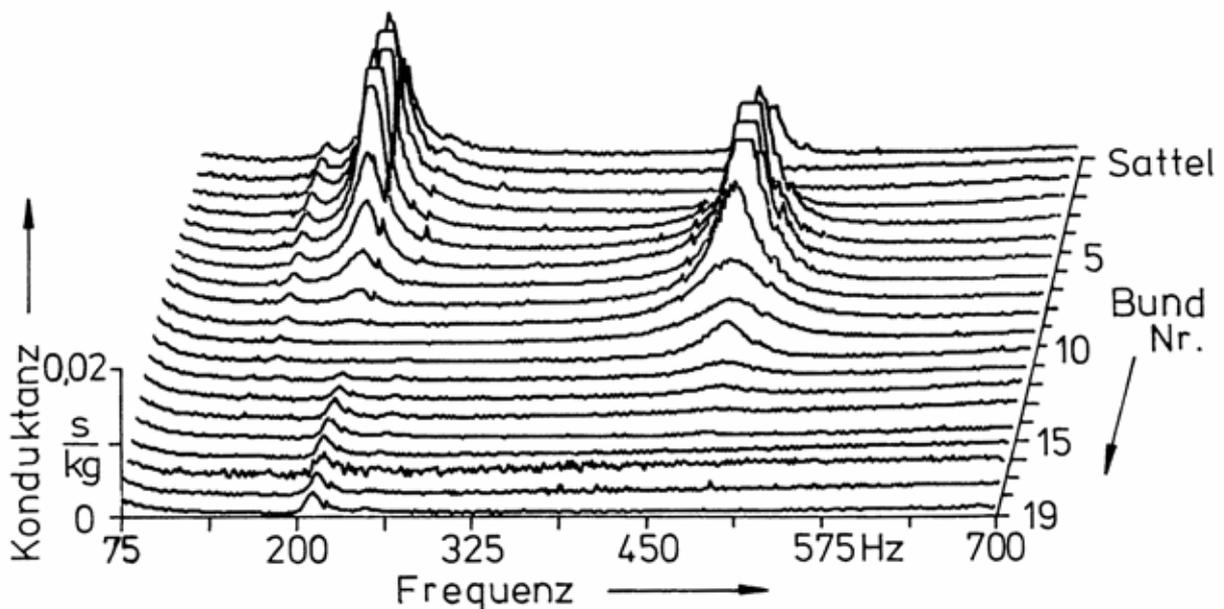


Abb. 24. Halskonduktanz der Gitarre Gibson Les Paul zwischen 75 Hz und 700 Hz gemäß Fleischer (2001b) mit der nunmehr korrekten Ordinatenteilung, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

Bei der Gitarre Gibson Les Paul hat sich eine äußerst geringe Abhängigkeit der Konduktanz von der lateralen Messposition ergeben. Während Abb. 23 lediglich für die  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite gilt, ist das Konduktanz-Gebirge von Abb. 24 in ähnlicher Weise auch für die Bass- und Diskantsaiten repräsentativ. Das Gebirge ist gekennzeichnet durch nur zwei Höhenzüge, die sehr schmal sind und jeweils nur einfach auftreten. Legt man die Auswerteschablone auf, zeigt sich, dass die Konduktanz auf der  $D_3$ -Saite zwischen den Bündeln Nr. 5 und 7 hohe Werte annehmen kann. Für die  $G_3$ -Saite tritt dies mit Werten von bis zu 0,02 s/kg dann ein, wenn sie nicht gegriffen bzw. an den Bündeln Nr. 1 bis Nr. 4 gespielt wird. Für die hohen Lagen dieser beiden Saiten ist die Konduktanz durchweg klein.

### 3.4. Konduktanz bei verschiedenen Lagerungen des Instruments

Bei den Untersuchungen zur Schwingung des Korpus, die in den weiteren Kapiteln präsentiert werden, wird sich zeigen, dass die Art der Randlagerung einen merklichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten ausübt. Abschließend werden deshalb in einer vergleichenden Studie Konduktanz-Gebirge einander gegenüber gestellt, die mit drei unterschiedlichen Lagerungen bestimmt wurden. Auch die in diesem Abschnitt dargestellten Messungen wurden mit der Apparatur durchgeführt, die bei Fleischer (2001b) beschrieben ist. Als Anregungssignal wurde Weißes Rauschen verwendet und der Analysator Ono Sokki CF 350 eingesetzt. Die Ordinatenteilung wurde an Hand einer Nachmessung kalibriert. Wie in den früheren Untersuchungen wurde als Messbandbreite 75 Hz bis 700 Hz gewählt.

#### 3.4.1. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen in sitzender Spielhaltung

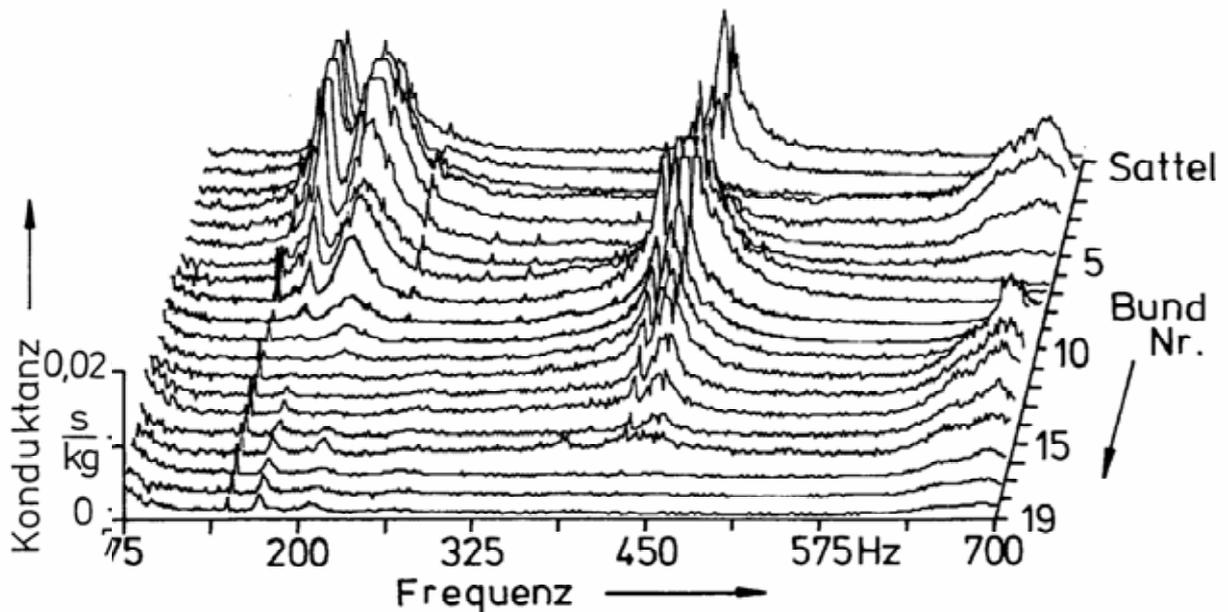


Abb. 25. Halskonduktanz der Gitarre Squier Bullet zwischen 75 Hz und 700 Hz, gemessen in sitzender Spielhaltung entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

Im ersten Abschnitt der Versuchsreihe hielt der Experimentator wie bei den bisher beschriebenen Messungen das Instrument in sitzender Spielhaltung am Körper und drückte das Griffbrett gegen den Impedanzmesskopf. Die Messung fand zu einem anderen Zeitpunkt als diejenige statt, deren Ergebnis in Abb. 23 niedergelegt ist, so dass zwischen den beiden Experimenten mehrere Jahre liegen. Zwar sind die absoluten Werte der Konduktanz leicht unterschiedlich. Ansonsten finden sich die wesentlichen Merkmale wie Lage und Form der Höhenzüge in beiden Diagrammen wieder.

#### 3.4.2. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen in stehender Spielhaltung

Da eine E-Gitarre nicht immer im Sitzen, sondern sehr häufig auch im Stehen gespielt wird, wurde auch diese Situation untersucht. Bei sonst unveränderten Versuchsbedingungen wurde der Schwingerreger mit dem Impedanzmesskopf so hoch angebracht, dass der Experimentator aufrecht stehen und die Gitarre, die er mit einem Umhängeband vor dem Körper trug, gegen den Messkopf drücken konnte. Unterschiede zwischen den Landschaften der Abb. 25 und 26 sind demnach den unterschiedlichen Randlagerungen geschuldet, die das Instrument bei den beiden Messungen vorfand.

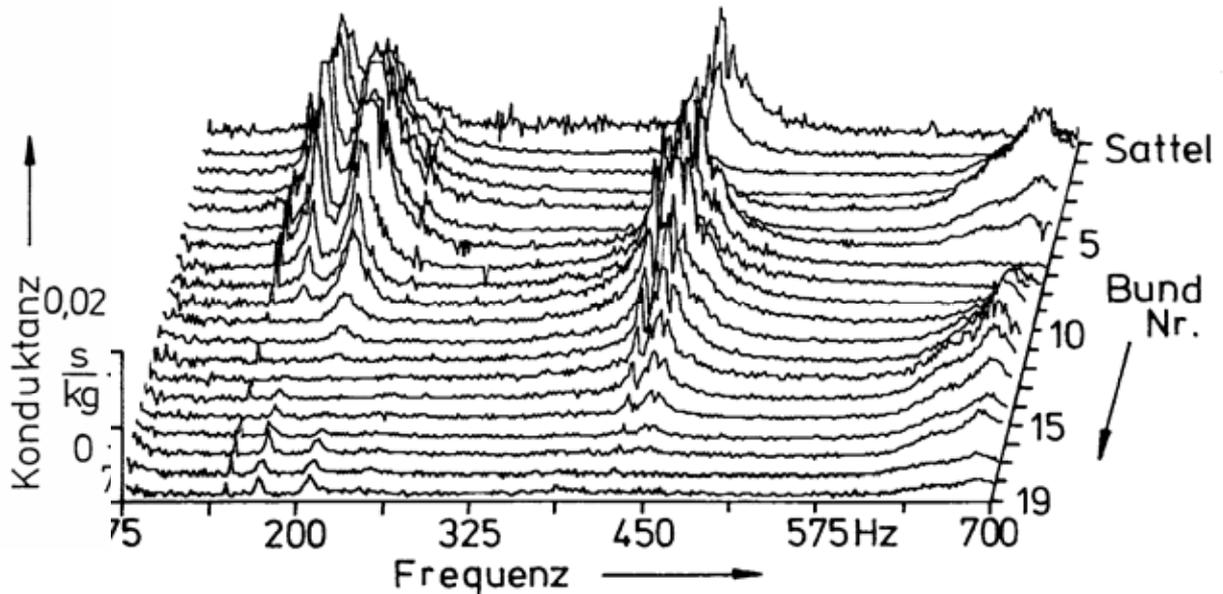


Abb. 26. Halskonduktanz der Gitarre Squier Bullet zwischen 75 Hz und 700 Hz, gemessen in stehender Spielhaltung entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der  $D_3$ - und der  $G_3$ -Saite.

Die Messkurven sind etwas „zitriger“. Dies hängt damit zusammen, dass es im Stehen nicht ganz so leicht wie im Sitzen fällt, das Griffbrett über die ganze Messzeit hinweg unverändert gegen den Messkopf zu pressen. In Abb. 26 weist die Konduktanz etwas größere absolute Werte auf als in Abb. 25. Wenn die Gitarre lose vor dem Bauch gehalten wird, ist die Dämpfung offenbar etwas geringer, als wenn sie im Sitzen auch noch Kontakt mit dem Schoß des Spielers hat. Dies könnte damit zusammenhängen, dass das Auflegen auf den Oberschenkel, wie es bei sitzender Spielhaltung praktiziert wird, die Beweglichkeit des Instruments weiter einschränkt. Insgesamt zeigen sich jedoch auch hier dieselben wesentlichen Merkmale wie in der Konduktanz-Landschaft von Abb. 25. Es sind keine eklatanten Diskrepanzen zu erkennen.

### 3.4.3. Konduktanz auf der Mittellinie, gemessen im Gitarrenständer

Offenbar wird das Konduktanz-Gebirge nicht wesentlich davon beeinflusst, ob der Experimentator bei der Messung sitzt oder steht. Die Messung im Stehen erweist sich jedoch als mühevoller und strengt die VP mehr an. Die Messkurven, die sie liefert, sind nicht so glatt wie bei der Messung im Sitzen. Nun wäre denkbar, dass sich einfach, bequem und schnell Ergebnisse von hoher Qualität erzeugen lassen, wenn das Instrument nicht am Körper, sondern in einer „künstlichen“ Halterung gemessen wird. Um dies zu erproben, wird bei den Schwingungsuntersuchungen des nächsten Kapitels unter Anderem ein handelsüblicher Gitarrenständer verwendet. Die Gitarre ruht an zwei Stellen auf den gummiummantelten Querträgern und an einem weiteren Punkt auf der Rückseite des Korpus, der nahe der Verbindungsstelle mit dem Hals liegt. Im Interesse der Vergleichbarkeit ist in allen Diagrammen der gleiche Ordinatenmaßstab verwendet.

Abb. 27 gibt für diese Lagerungsart das Ergebnis der Konduktanzmessung wieder. Da die Dämpfung geringer sein wird, entspricht es der Erwartung, dass im Gitarrenständer höhere Konduktanzwerte als am Körper gemessen werden. Etwas oberhalb von 200 Hz überschreiten die Messwerte 0,02 s/kg und sind deshalb abgeschnitten. Bei der Messung im Gitarrenständer sind die Höhenzüge jedoch nicht nur höher, sondern auch in der Frequenz verschoben. Dies prägt sich umso mehr aus, je kleiner die Frequenz wird. Bei sehr kleinen Frequenzwerten macht sich im Gitarrenständer (Abb. 27) ein Höhenzug bemerkbar, der bei den Messungen

am Körper nicht beobachtet wurde. Bei etwa 80 Hz kann er in den tiefen Lagen Werte von etwa 0,01 s/kg erreichen. Damit würde er die Schwingung der ungegriffenen tiefen E<sub>2</sub>-Saite beeinflussen können, deren Frequenz 82 Hz beträgt.

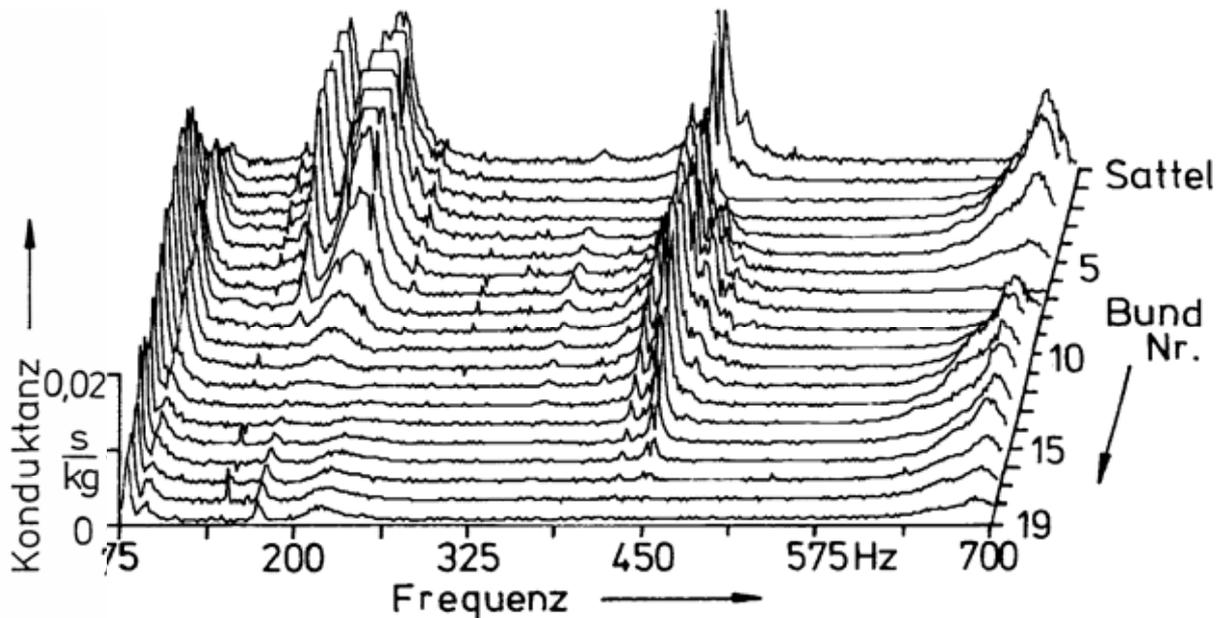


Abb. 27. Halskonduktanz der Gitarre Squier Bullet zwischen 75 Hz und 700 Hz, gemessen bei Lagerung im Gitarrenständer entlang der Mittellinie des Griffbretts zwischen der D<sub>3</sub>- und der G<sub>3</sub>-Saite.

Da dies in anderen Messungen nicht beobachtet wurde, handelt es sich hierbei offensichtlich um einen Artefakt dieses speziellen Auflagers. Das bedeutet, dass die Lagerung im Gitarrenständer die Verhältnisse, wie sie beim Tragen des Instruments am Körper vorliegen, nur unzureichend nachbildet. Dies gilt im stärksten Maße für die kleinen Frequenzen am unteren Ende des betrachteten Frequenzbereichs. Bei größer werdender Frequenz nehmen die Diskrepanzen immer weiter ab. Bei großen Frequenzen am oberen Ende des untersuchten Bereichs führen sie letztlich nur noch dazu, dass die Höhenzüge etwas höher sind als bei Messung am Körper. Frequenzlage und Verlauf längs des Griffbretts stimmen dann überein. Auf Grund der Diskrepanzen bei tiefen Frequenzen bietet die Lagerung im Gitarrenständer trotz schnellerer, bequemerer Datenerfassung und klarerer Resultate keine vollständige Alternative zur Messung am Körper einer Person.

### 3.5. Zusammenfassende Bemerkung

Die hier beschriebenen Messungen an der E-Gitarre Squier Bullet haben gezeigt, dass es einen prinzipiellen Unterschied zwischen der elektrischen Gitarre mit massivem Korpus und ihrer akustischen Schwester gibt, deren Korpus aus dünnen Platten oder Schalen gefertigt ist. In aller Regel finden die Saiten einer sorgfältig gefertigten *Solid-Body*-Gitarre am Steg eine wesentlich geringere Konduktanz vor als am kopfseitigen Auflager. Eine Ausnahme ist die hohe Stegkonduktanz um 600 Hz. Da sie bei anderen E-Gitarren nicht beobachtet wurde, scheint sie typisch für das hier betrachtete Instrument zu sein.

Im Spielbetrieb werden die Saiten üblicherweise nicht leer - d.h. in voller Länge zwischen Steg und Sattel schwingend - gespielt, sondern gegriffen. Das bedeutet, ihre aktive Länge wird dadurch verkürzt, dass der Spieler sie gegen die Bünde drückt. Um diesen Zustand zu erfassen, wurde die Konduktanz nicht nur am Sattel, sondern auch auf dem Griffbrett gemessen.

sen. Bei diesem Experiment befand sich das Instrument in spielbereitem Zustand, d.h. die Saiten waren aufgespannt. Deshalb konnte jeweils nur in der Lücke zwischen zwei Saiten gemessen werden.

Die Konduktanz in Hauptrichtung wurde längs des Griffbretts bestimmt, naheliegenderweise zunächst zwischen den mittleren Saiten  $D_3$  und  $G_3$ . Darüber hinaus wurden gleichartige Untersuchungen entlang paralleler Linien auch zwischen den tiefen Bass- und zwischen den hohen Diskantsaiten durchgeführt. Solche Messungen mit lateralem Versatz haben bei der untersuchten Gitarre systematisch unterschiedliche Resultate erbracht. Alle bisherigen Ergebnisse (Fleischer 2001b) deuten darauf hin, dass die Konduktanz dann besonders stark von der lateralen Messposition abhängt, wenn das Instrument ein asymmetrisches Wirbelbrett hat. Bei der Gitarre Squier Bullet, die vom Stratocaster-Typ ist, trifft dies zu. Im Laufe der späteren Messungen wird erkennbar werden, dass sich den Biegeschwingungen des Halses ausgeprägte Torsionsschwingungen überlagern können. Die lateralen Unterschiede prägen sich weit weniger aus bei Instrumenten vom Les-Paul-Typ, deren Wirbelbrett spiegelsymmetrisch ausgebildet ist. Bei Instrumenten dieser Bauart schwingt der Hals im Wesentlichen wie ein Balken. An einem vorgegebenen Bund finden demzufolge alle sechs Saiten weitgehend die gleiche Randbedingung vor.

In Hinsicht auf die Messbedingungen haben die Experimente gezeigt, dass bei einer Lagerung in einem Gitarrenständer prinzipiell nicht die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind, als wenn das Instrument am Körper gehalten wird. Die Diskrepanzen sind groß im Bereich tiefer Frequenzen und nehmen immer mehr ab, wenn die Frequenz zunimmt. Im Interesse einer wirklichkeitsnahen Untersuchung ist anzuraten, die Gitarre bei der Messung am Körper zu halten. Dagegen sind die Unterschiede, die sich zwischen stehender und sitzender Haltung ergeben haben, nicht sehr erheblich. Unter Abwägung der Vor- und Nachteile empfiehlt sich somit, zukünftige Messungen in sitzender Spielhaltung durchzuführen.

Von der Randbedingung an den Enden der Saiten interessiert im hier betrachteten Zusammenhang vor allem der Realteil der Admittanz, die Konduktanz. Diese wurde bevorzugt entlang der Mittellinie des Halses gemessen und als eine Art Gebirge dargestellt. Es sind mehrere Beispiele gegeben. Eine Auswerteschablone macht es möglich, kritische Stellen auf dem Griffbrett aufzufinden. Damit sind diejenigen Stellen gemeint, an denen das Instrument der Grundschwingung der Saite eine besonders hohe Konduktanz bietet und diese Schwingung demnach irregulär bedämpfen kann. Dem Gebirge lässt sich darüber hinaus entnehmen, welchen Zahlenwert dort die Konduktanz hat. Was die physikalische Ursache für dieses frequenz- und ortsabhängige Verhalten des Halses ist, soll in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden.

## 4. MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN RANDBEDINGUNGEN

Die Messungen des vorangegangenen Kapitels haben gezeigt, dass der Instrumentenkörper an den Punkten, an denen die Saiten aufliegen, sich beweglich verhalten kann. Die Ursache hierfür sind Schwingungen der Instrumentenstruktur. Diese Schwingungen werden in den weiteren Kapiteln experimentell untersucht. Dabei spielen die Randbedingungen, welche die Lagerung des Instrumentenkörpers beschreiben, eine wichtige Rolle. Im Folgenden werden zunächst „künstliche“ Randbedingungen gewählt und einzeln behandelt. Dabei steht im Vordergrund, die Randlagerung leicht realisieren und möglichst einfach formulieren zu können.

### 4.1. Versuchsmethode und –aufbau

Es kam ein *Laser Scanning Vibrometer* der Firma Polytec zur Anwendung. Eine Messung läuft folgendermaßen ab: An Hand eines Videobildes wird ein Messgitter auf der Oberfläche der Gitarre definiert. Der Instrumentenkörper wird in Vibration versetzt. Seine Schwingungen werden mit Hilfe des *Optical Scanning Head* OFV 055 bestimmt. Dazu sendet ein im Messkopf untergebrachter Laser einen Messstrahl aus, den zwei Galvo-Spiegel auf den vorher festgelegten Punkt der schwingenden Oberfläche lenken. Ein Teil des Laserlichts wird dort reflektiert und gelangt zum Messkopf zurück. In Folge des Dopplereffekts ist die Frequenz dieses reflektierten Laserlichts gegenüber derjenigen des Originalstrahls verändert. Aus der Frequenzverschiebung kann die Schwinggeschwindigkeit der reflektierenden Oberfläche am Messpunkt ermittelt werden. Diese Methode hat den Vorteil, berührungslos zu arbeiten, so dass kein Messaufnehmer das schwingende Objekt verändert.



*Abb. 28. Gitarre korpuseitig eingespannt und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger LDS V 406 angeregt.*

Anregungssignal war ein Pseudo-Rauschen aus einem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A. Dieses wurde in Anpassung an die Analysedaten synthetisiert und über einen Leis-

tungsverstärker B&K 2706 einem Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) zugeführt. Alternativ wurde in manchen Fällen ein Schwingerreger LDS V 406 in Kombination mit einem Leistungsverstärker LDS PA 25 verwendet; vgl. z.B. Abb. 28. Der Schwingerreger bzw. ein Ausleger trug einen Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200), der senkrecht von hinten unter leichter Vorlast gegen den Hals gedrückt wurde. Anregungsort war üblicherweise der Bund Nr. 7. Das Signal des Kraftaufnehmers wurde in einem *Conditioning Amplifier* B&K 2626 verstärkt und diente als Eingangsgröße bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen. Die Ausgangsgröße war die Schwinggeschwindigkeit am jeweiligen Messpunkt. Die Messsignale wurden im Steuer- und Auswerterechner des Polytec-Systems gemittelt und für jeden Messpunkt auf der Oberfläche eine Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/Anregungskraft bestimmt.

Der Anregungspunkt blieb während des gesamten Messablaufs derselbe. Die Mess-Situation, die hierbei vorlag, wird als „*Fixed Excitation*“ bezeichnet. Die Signale wurden mittels Schneller Fourier-Transformation (FFT) analysiert. Als Messbandbreite wurden Frequenzen von 0 Hz bis 2 kHz gewählt. Beispielsweise mit 400 FFT-Linien ergab sich aus der Bandbreite 1 kHz eine Frequenzauflösung von 2,5 Hz.

Es wurde darauf verzichtet, die Vibrometer-Daten an dieser Stelle einer Modalanalyse zu unterziehen. Vielmehr wurden sie mittels der Systemsoftware ausgewertet. Grundlage dafür lieferte die über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion. An Hand von Maxima dieser Funktion wählte der Experimentator diejenigen „charakteristischen Frequenzen“ aus, für welche die Betriebsschwingungsformen, englisch *Operating Deflection Shapes* (abgekürzt ODS; siehe Richardson 1997) dargestellt werden sollten. Die Schwingungsmuster, die sich für die charakteristischen Frequenzen ergeben, werden als „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ bezeichnet und können auf unterschiedliche Weise visualisiert werden.

## 4.2. Feste Lagerung des Korpus

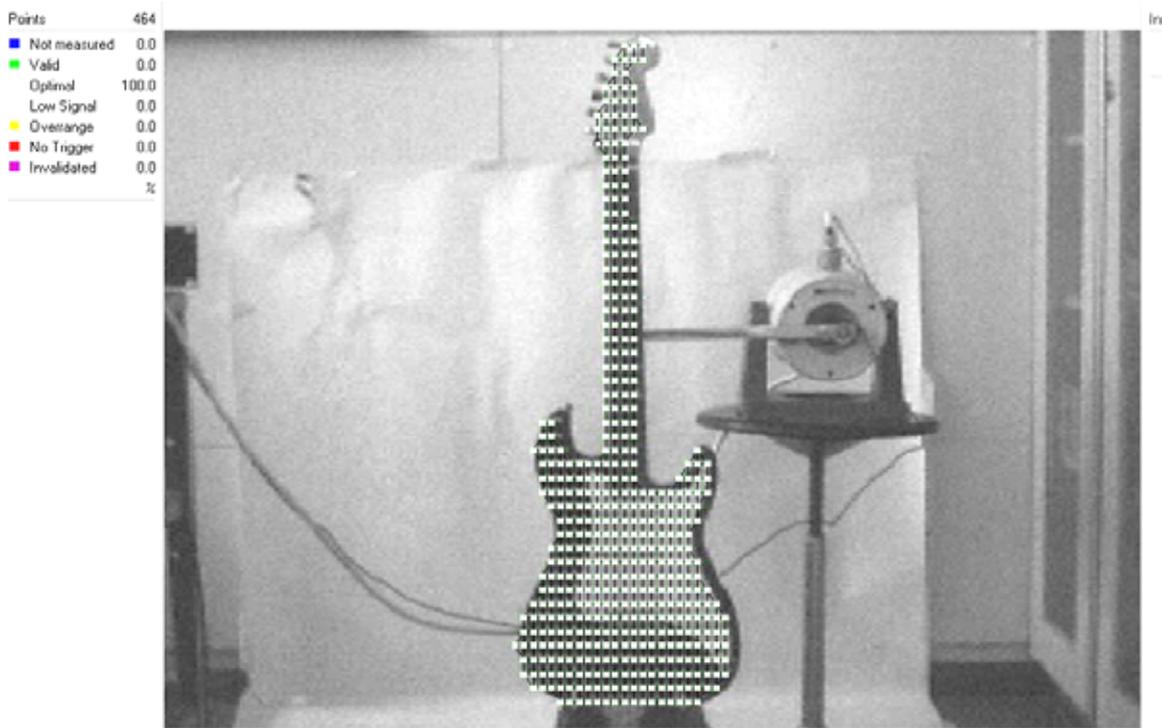
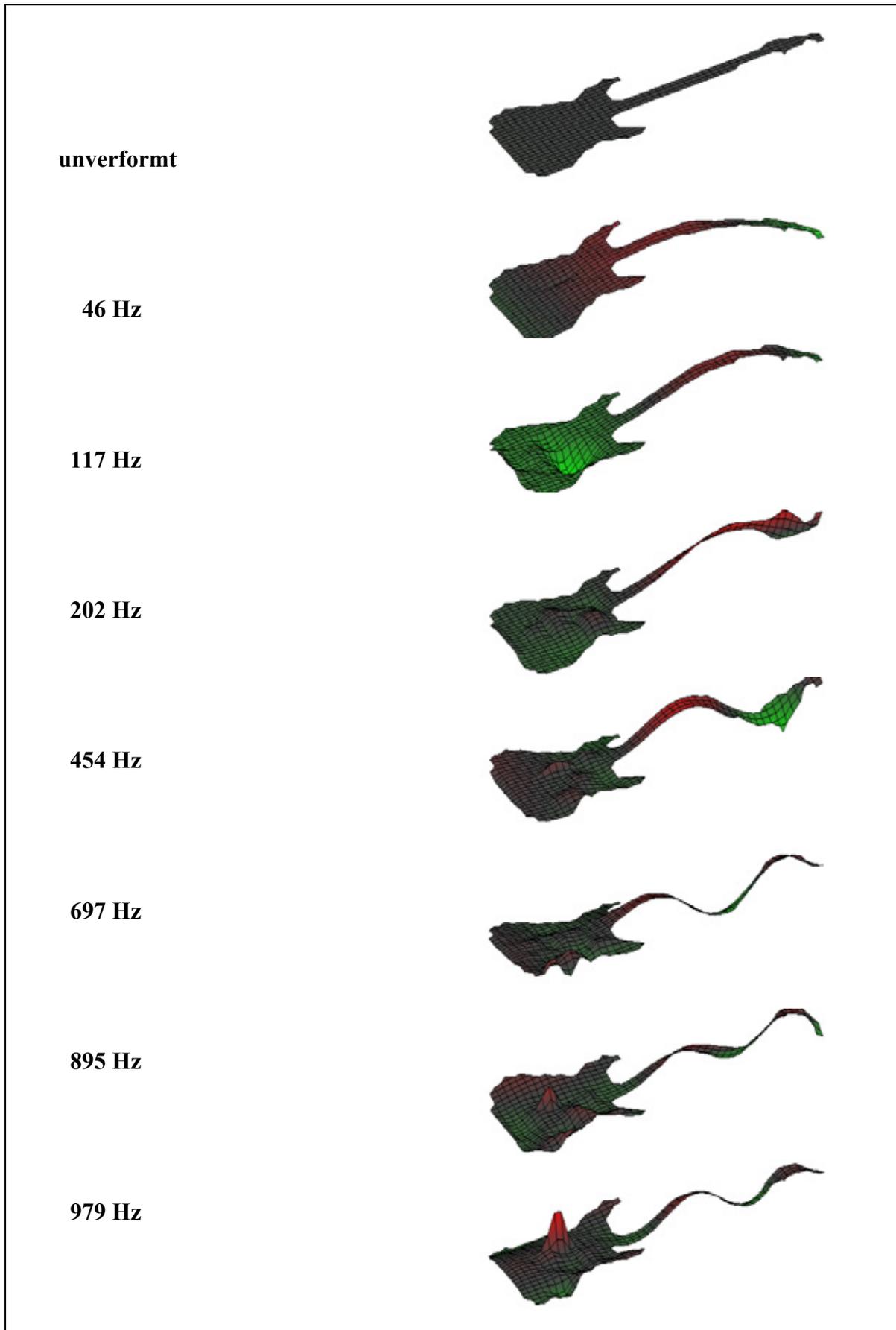


Abb. 29. Messgitter; die Gitarre ist unten eingespannt und wird am Bund Nr. 7 angeregt.

*Tab. I. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der Gitarre im Schraubstock*

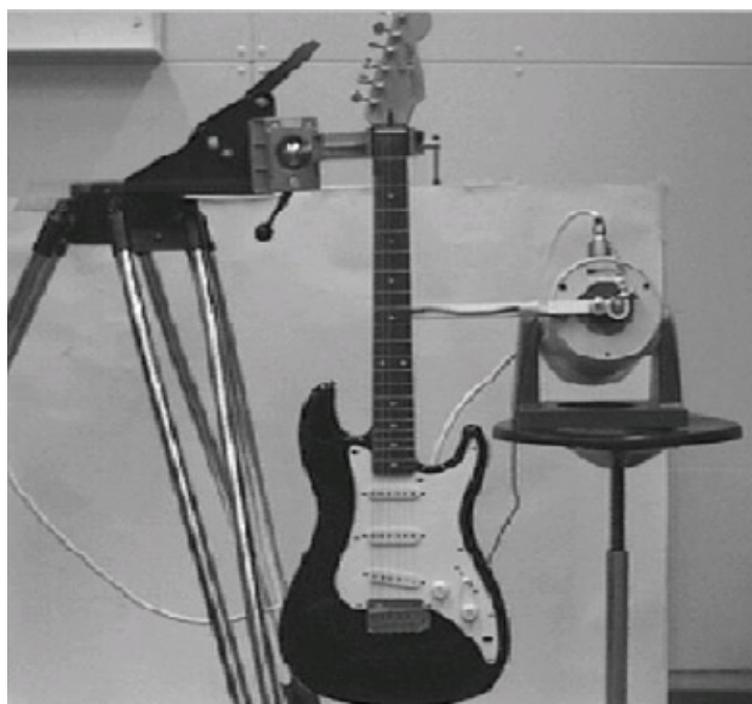
Im Jahre 2002 haben Meiershofer und Pieper eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Bei der Messung, die im Folgenden exemplarisch besprochen wird, war die Gitarre am unteren Ende in einen Schraubstock eingespannt. Abb. 28 zeigt diese Situation. Auf einem Hocker stand der Erreger, der den Hals am Bund Nr. 7 zum Schwingen brachte. Der Kraftaufnehmer B&K 8200 war an dem waagerechten Ausleger angebracht und drückte von hinten gegen den Hals. Um die Reflexion des Laserlichts zu verbessern, war der schwarz lackierte Korpus mit retro-reflektierenden Punkten beklebt.

Das Messgitter kann Abb. 29 entnommen werden. Wie links oben angegeben, umfasste es 464 Punkte, für welche die Ergebnisse allesamt als optimal eingestuft wurden. Der Messfrequenzbereich war 1 kHz, die Frequenzauflösung 1,25 Hz. Die Messungen wurden zehnmal komplex gemittelt. Vor der Visualisierung wurden die Messwerte räumlich gefiltert und die Schwingungsformen dadurch geglättet. Die Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion dienten als Indikatoren für charakteristische Frequenzen und die zugehörigen Betriebsschwingungsformen. Eine genauere Betrachtung ergibt, dass darin auch zahlreiche Resonanzen von Beschlägen - beispielsweise des Schlagbretts oder der Tonabnehmer - enthalten sind. Hinsichtlich der Schwingungen des Gitarrenkörpers, die hier von primärem Interesse sind, zeigt Tab. I eine Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse. Starkkörperschwingungen, wie sie bei tiefen Frequenzen vorkommen, sind weggelassen.

Es ist eine 3D-Darstellung verwendet, bei der im Original das positive Vorzeichen durch die Farbe Rot, das negative durch Grün gekennzeichnet ist. Erwartungsgemäß bewirkt die Einspannung, dass das Instrument sich am unteren Ende des Korpus nicht oder höchstens sehr wenig bewegen kann. Nahe dieser Stelle tritt demzufolge stets ein Schwingungsknoten auf. Ganz oben in der Tab. I ist das Instrument im unverformten Zustand abgebildet. Die erste Biege-Eigenform tritt bei 46 Hz, die zweite bei 117 Hz auf. Bei 202 Hz überlagert sich der Biegung starke Torsion. Die Formen bei 454 Hz, 697 Hz und 979 Hz zeichnen sich durch eine immer größer werdende Anzahl von Schwingungsknoten und -bäuchen aus. Von Fall zu Fall, beispielsweise bei 895 Hz, ist Torsion überlagert.

### 4.3. Aufhängung am Kopfbende

*Abb. 30. Gitarre hängend und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger LDS V 406 angeregt.*



Eine andere Art der Lagerung hat Bürger (2002) erprobt. Abb. 30 zeigt, wie er die Gitarre fixiert hat. Auf ein massives Dreibein-Stativ war ein Platinen-Schraubstock montiert. In diesen Schraubstock wurde die Gitarre mit dem Hals eingespannt und hing sonst frei. Die Backen des Schraubstocks umfassten seitlich den Hals zwischen dem Sattel und dem Bund Nr. 1. Auf einem höhenverstellbaren Hocker befand sich in einem Schwenkgestell ein elektrodynamischer Erreger LDS V 406, der über einen Ausleger das Instrument am Bund Nr. 7 zum Schwingen brachte. Dazu drückte er den Kraftaufnehmer von hinten gegen den Hals.

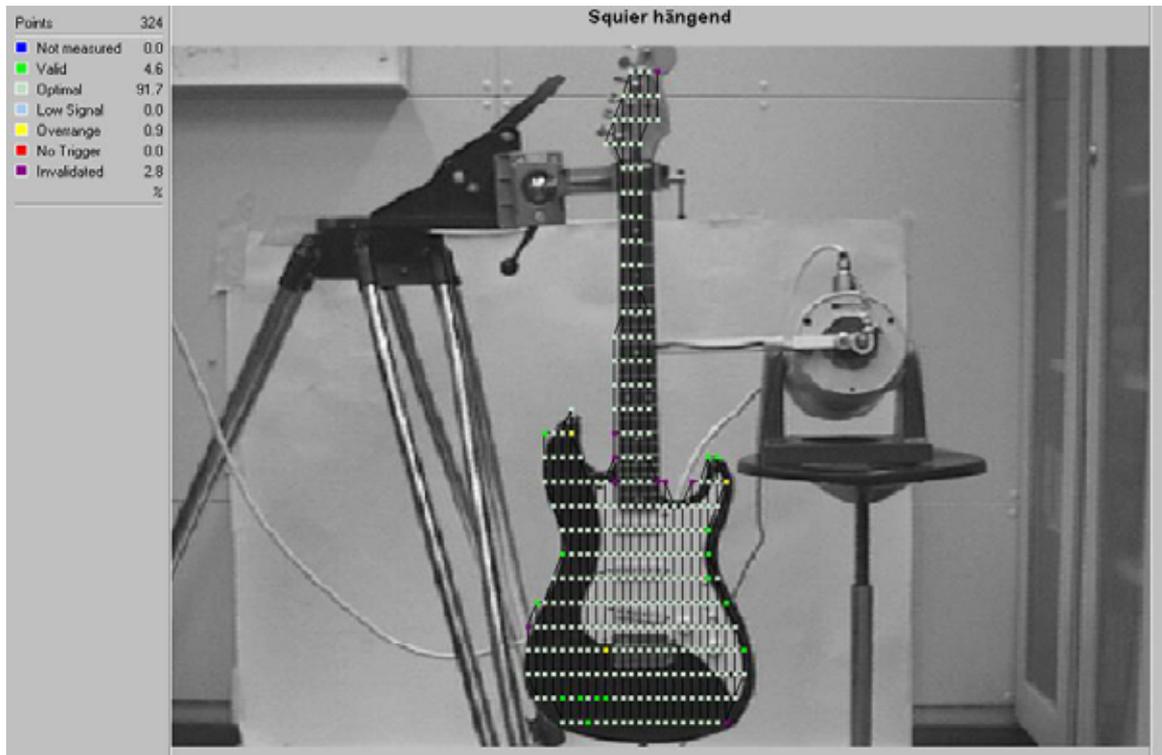
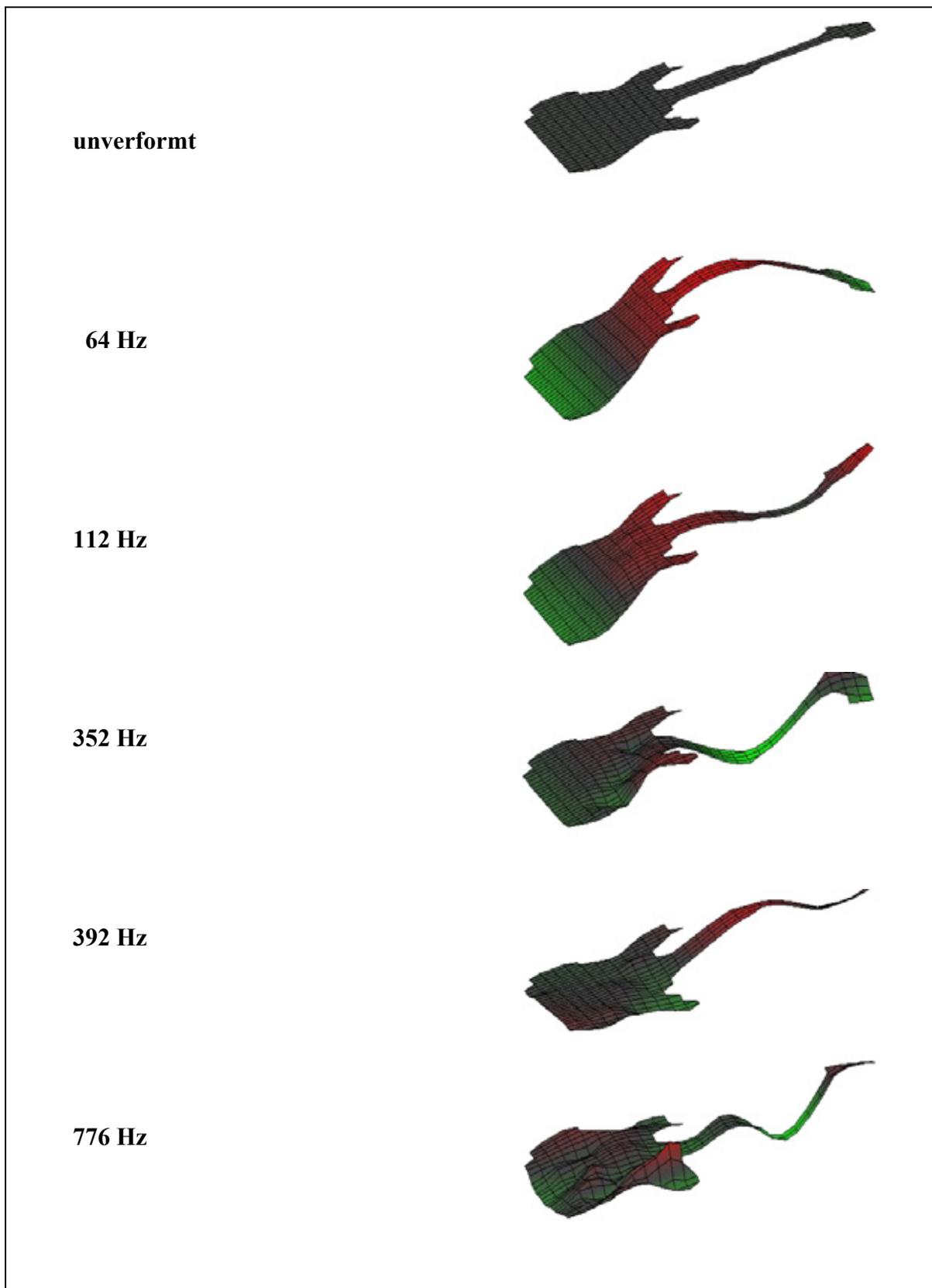


Abb. 31. Messgitter; die Gitarre ist nahe dem Kopf gelagert und wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Abb. 31 zeigt das Messgitter mit den 324 Messpunkten. An etwa 92% der Punkte waren die Messergebnisse optimal. Als Messbandbreite wurde 800 Hz gewählt, die Frequenzauflösung betrug 8 Hz. Einige charakteristische Betriebsschwingungsformen sind mit den entsprechenden Frequenzen in Tab. II zusammengestellt.

Neben der unverformten Struktur (oben) sind einige charakteristische Schwingungsformen wiedergegeben. Die Starrkörperbewegungen sind weggelassen. Die Aufhängung im Schraubstock am Stativ erweist sich als so „weich“, dass sie keine absolut feste Einspannung realisiert. Sie bewirkt jedoch, dass die Gitarre sich am Aufhängepunkt senkrecht zur Messebene, d.h. in Normalenrichtung, nur wenig bewegen kann und sich ein Schwingungsknoten im oberen Bereich des Halses, ausbildet. Dies ist in den „eingefrorenen“ Bildern von Tab. II nicht leicht zu erkennen, drückt sich aber in der Animation ganz deutlich aus. Ähnlichkeiten mit den Formen von Tab. I sind meist nur scheinbar. Auch stimmen die Frequenzen, bei denen sich das aufgehängte Instrument besonders stark bewegt, nicht mit denen der eingespannten Gitarre überein. So prägt sich die erste Biegeschwingung mit zwei Knoten nun bei 64 Hz aus. Erwartungsgemäß lassen die Schwingungsformen in Tab. II eine steigende Anzahl von Bäuchen und Knoten erkennen, je höher die Frequenz wird. Im Allgemeinen dominiert die Biegebewegung. In einigen Fällen wird jedoch auch zusätzliche Torsion beobachtet. Besonders prägt sich diese um 400 Hz aus. Die zugehörige Schwingung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der Hals in starkem Maße verwindet.

*Tab. II. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der hängenden Gitarre*

## 4.4. Lagerung im Gitarrenständer

Ein Schritt in Richtung der Randlagerung, ähnlich wie sie die Gitarre im Spielbetrieb am Körper des Spielers vorfindet, ist die Aufstellung in einem handelsüblichen Gitarrenständer. Der Korpus liegt stets auf zwei gepolsterten Stahlrohren und bei manchen Untersuchungen auch noch an einem dritten Punkt auf, der Hals ist frei beweglich. Das Instrument wird durch einen Shaker zum Schwingen gebracht. Zahlreiche Experimentatoren haben Versuche mit dieser Lagerung in unterschiedlichen Varianten durchgeführt. Einige Versuchsaufbauten samt Ergebnissen sind im vorliegenden Abschnitt zusammengefasst.

### 4.4.1. Lagerung an drei Punkten, Anregung an der Brücke

*Abb. 32. Gitarre im Gitarrenständer und an der Brücke über einen Schwingerreger LDS V 406 angeregt.*



Im Jahre 2003 wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt, bei denen die Anregung durch die Kraft nachgebildet werden sollte, die an der Brücke auf den Instrumentenkörper wirkt. Abb. 32 zeigt diese Mess-Situation. Die Gitarre ruhte im Gitarrenständer. Der Korpus hatte an zwei Fußpunkten und an einem weiteren Punkt auf der Rückseite Kontakt. Durch Drehung und Verschiebung eines Schwenkgestells konnte der Schwingerreger LDS V 406 so positioniert werden, dass er von vorne gegen den Steg der D<sub>3</sub>-Saite drückte. Die Kraft, die er an diesem Punkt in den Instrumentenkörper einleitete, wurde mit einem Kraftaufnehmer B&K 8200 gemessen.

Abb. 33 ist zu entnehmen, dass 176 Messpunkte auf der Oberfläche der Gitarre verteilt wurden. Ihre Lage und ihr Abstand waren so gewählt, dass sie nicht auf den Ausleger zu liegen kamen. Nahezu 96% der Messergebnisse wurden als optimal eingestuft. Die Messbandbreite war 1 kHz, die Frequenzauflösung 2,5 Hz. Einige typische Ergebnisse sind in Tab. III gesammelt.

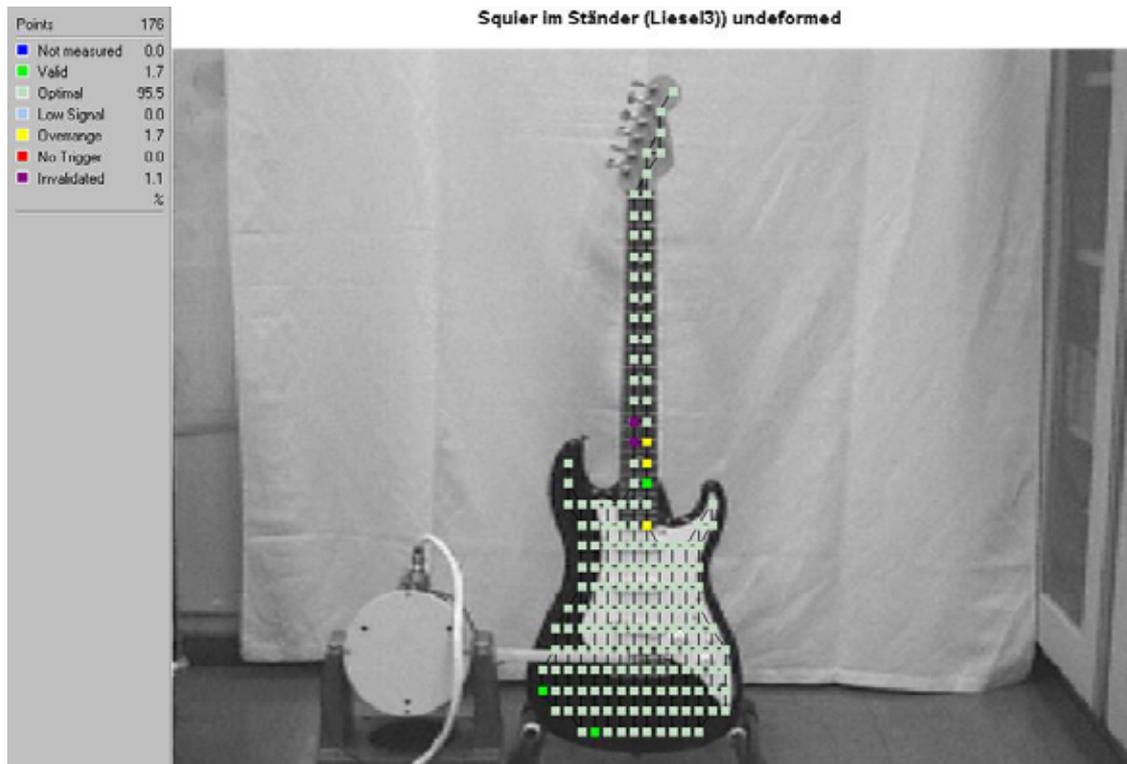
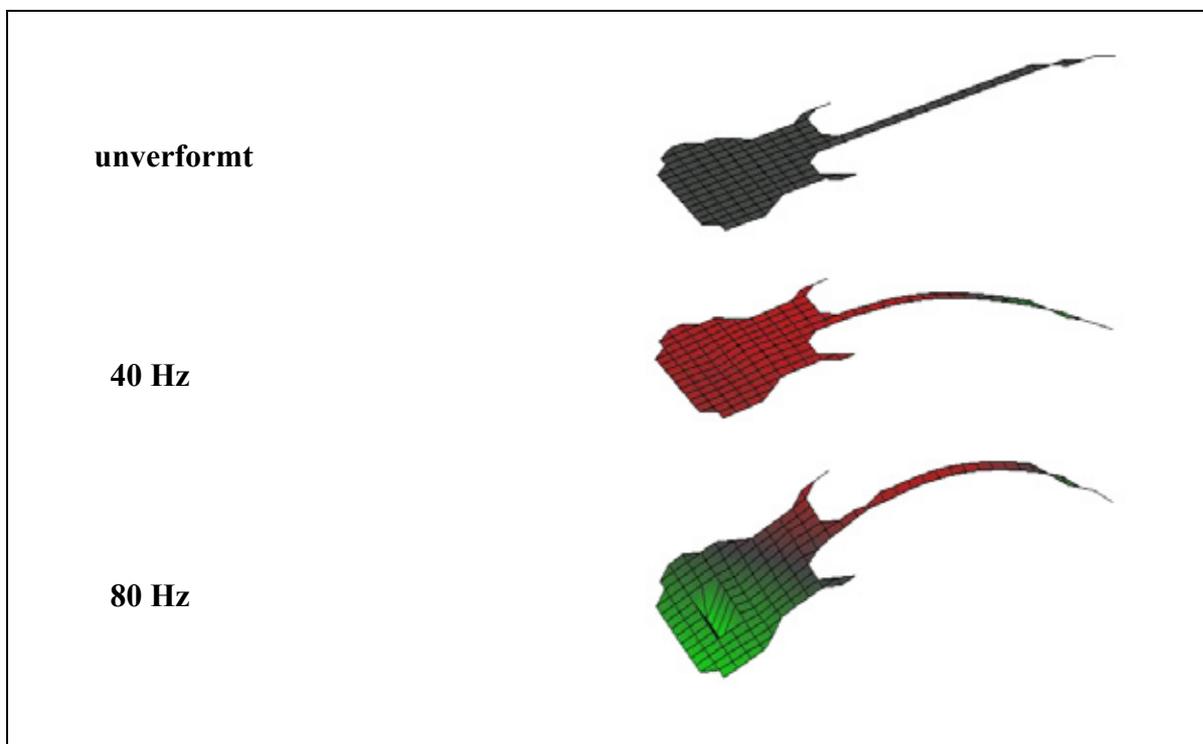
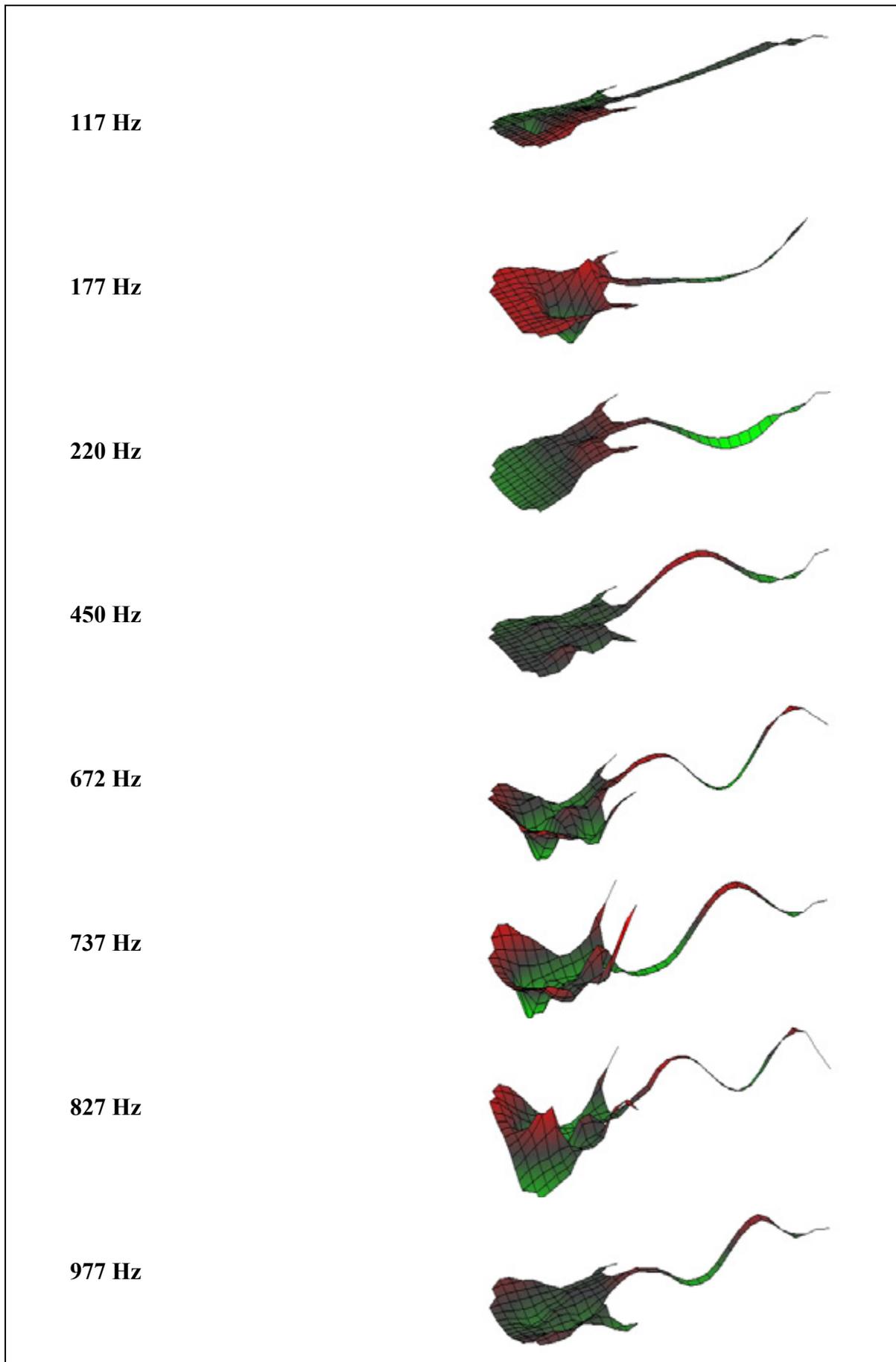


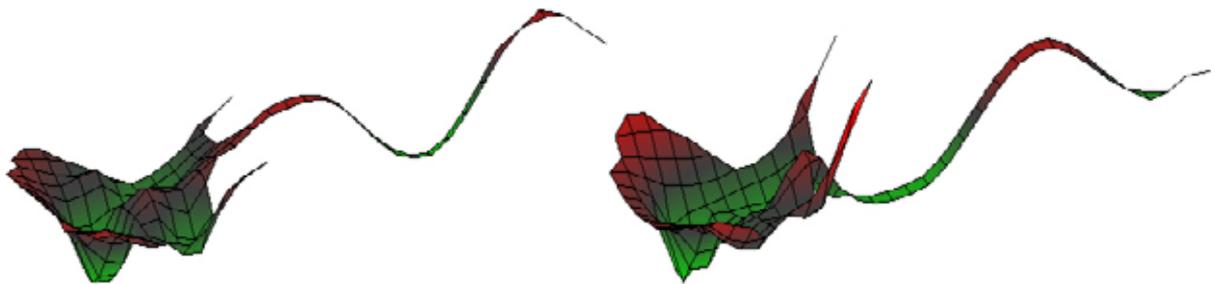
Abb. 33. Messgitter; die Gitarre liegt auf einem Gitarrenständer und wird an der Brücke angeregt.

Tab. III. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil I



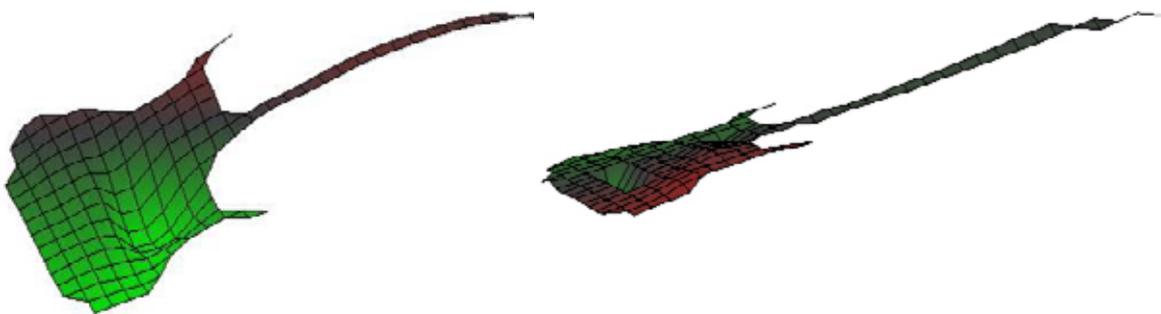
*Tab. III. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil 2*

An Hand von Abb. 34 soll auf Erscheinungen hingewiesen werden, wie sie immer wieder in verschiedenen Spielarten auftreten. Insbesondere wird hier die Relativbewegung der beiden Hörner des Korpus, die durch die *Cutaways* entstehen, in Bezug auf den Hals betrachtet. Die Hörner bewegen sich im vorliegenden Fall konphas. Die Schwingungen sind so „eingefroren“, dass sie beide nach oben weisen und somit als Bezug dienen können. Auf dem Hals sind diese Schwingungsformen durch Biegung mit drei Bäuchen gekennzeichnet. Der Hals bewegt sich bei 672 Hz (linkes Diagramm) in Gegenphase zu der Situation, wie sie bei 737 Hz (rechtes Diagramm) auftritt. Umgekehrt betrachtet: Bei nahezu gleicher Verformung des Halses schwingen die Hörner einmal in Phase zum kopfseitigen Ende des Halses (rechtes Diagramm), einmal bewegen sich Hörner und Kopf in Gegenphase (linkes Diagramm).



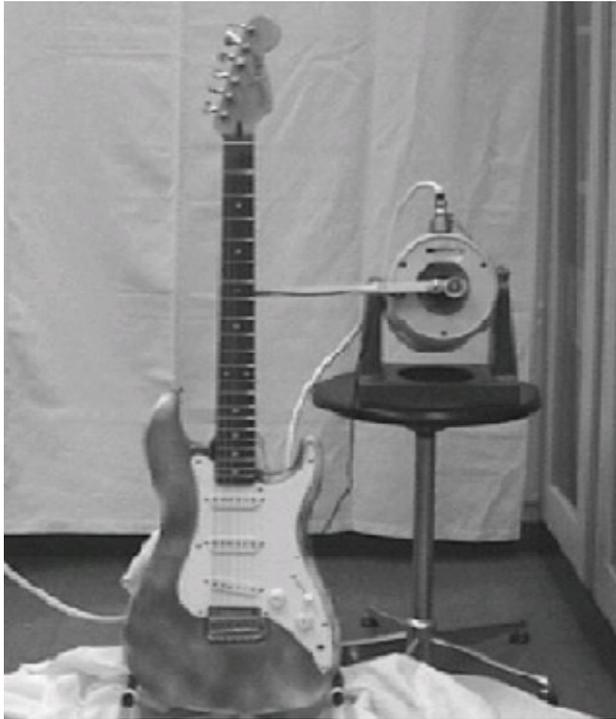
*Abb. 34. Zwei charakteristische Betriebschwingungsformen der Gitarre, wenn sie an drei Stellen auf einem Gitarrenständer ruht und an der Brücke angeregt wird.  
Links: 672 Hz; rechts: 737 Hz.*

Neben der Biegebewegung, die dieses Beispiel dominiert, wurde auch starke Torsion beobachtet. Abb. 35 gibt ein Beispiel für die Frequenz 117 Hz wieder. Es sind zwei Zustände der Bewegung festgehalten, wie sie die Gitarre bei dieser Frequenz ausführt. Der Hals hat sich in beiden Fällen nahezu gleichermaßen verformt. Dagegen sieht man den Korpus im linken Diagramm fast von oben, während er im rechten Diagramm weitgehend von der Seite zu sehen ist. Dies illustriert, in welchem starkem Maße sich Korpus und Hals gegeneinander verwinden können.



*Abb. 35. Zwei „Blitzlichtaufnahmen“ der charakteristischen Betriebschwingungsform bei 117 Hz der Gitarre, die an drei Stellen auf einem Gitarrenständer ruht und an der Brücke angeregt wird.*

#### 4.4.2. Lagerung an drei Punkten, Anregung am Hals



*Abb. 36. Gitarre im Gitarrenständer und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger LDS V 406 angeregt.*

Stechel (2003) hat mit der Versuchseinrichtung gearbeitet, die Abb. 36 zeigt. Die Lagerung ähnelt derjenigen, die im vorhergehenden Abschnitt behandelt wurde. Unten lag die Gitarre nach wie vor an zwei Punkten auf. Zusätzlich hatte der Korpus an einem dritten Punkt Kontakt mit dem Gitarrenständer. Mit seiner Rückseite ruhte er auf einem dort angebrachten Gummipuffer. Der Erreger LDS V 406, der auch hier zusammen mit einem Leistungsverstärker LDS PA 25 betrieben wurde, griff nunmehr von hinten am Bund Nr. 7 an. Auf diese Weise sollte die Anregung des Instrumentenkörpers durch das gegriffene Ende einer Saite nachgebildet werden.

Abb. 37 bezieht sich zwar auf ein anderes Experiment (siehe 4.4.5), zeigt aber ein gleichartiges Messgitter. Stechel hat die extrem hohe Zahl von 1845 Messpunkten verwendet. An etwa 98% der Punkte waren die Messungen als optimal eingestuft. Es wurde die Messbandbreite 800 Hz mit der Frequenzauflösung 2 Hz gewählt und über jeweils drei Messungen komplex gemittelt.

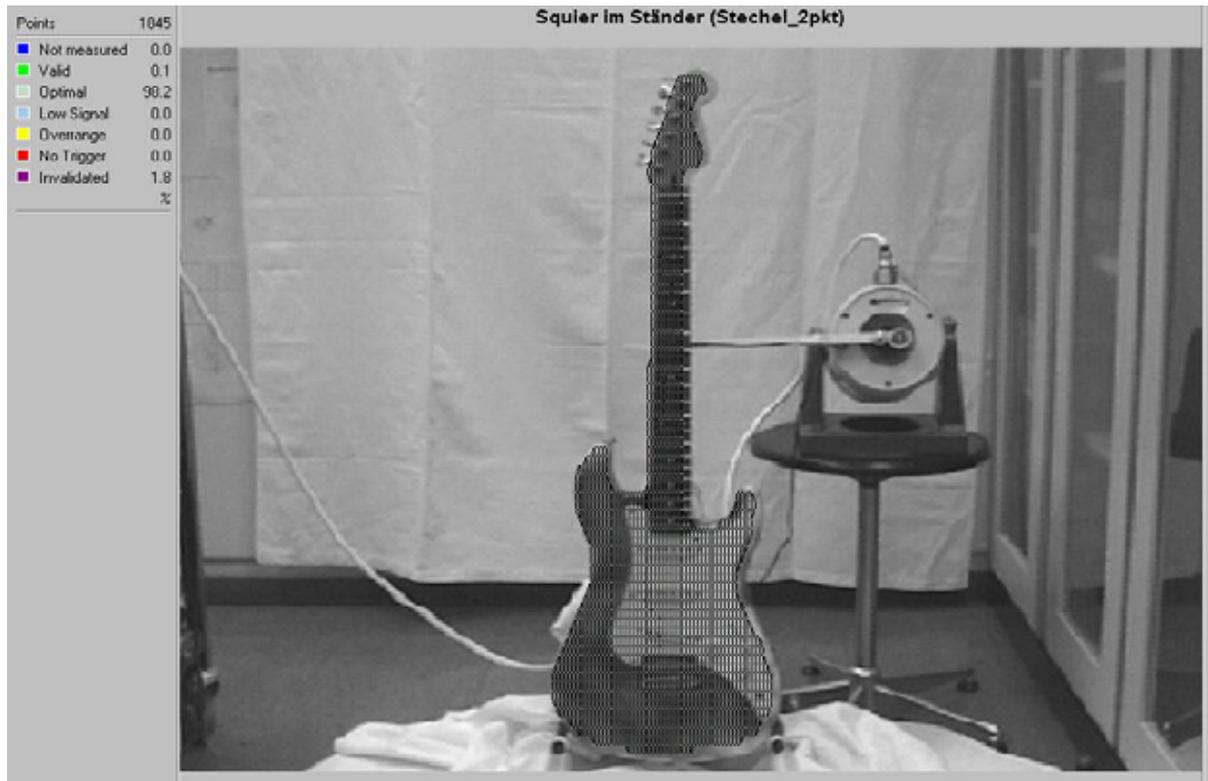
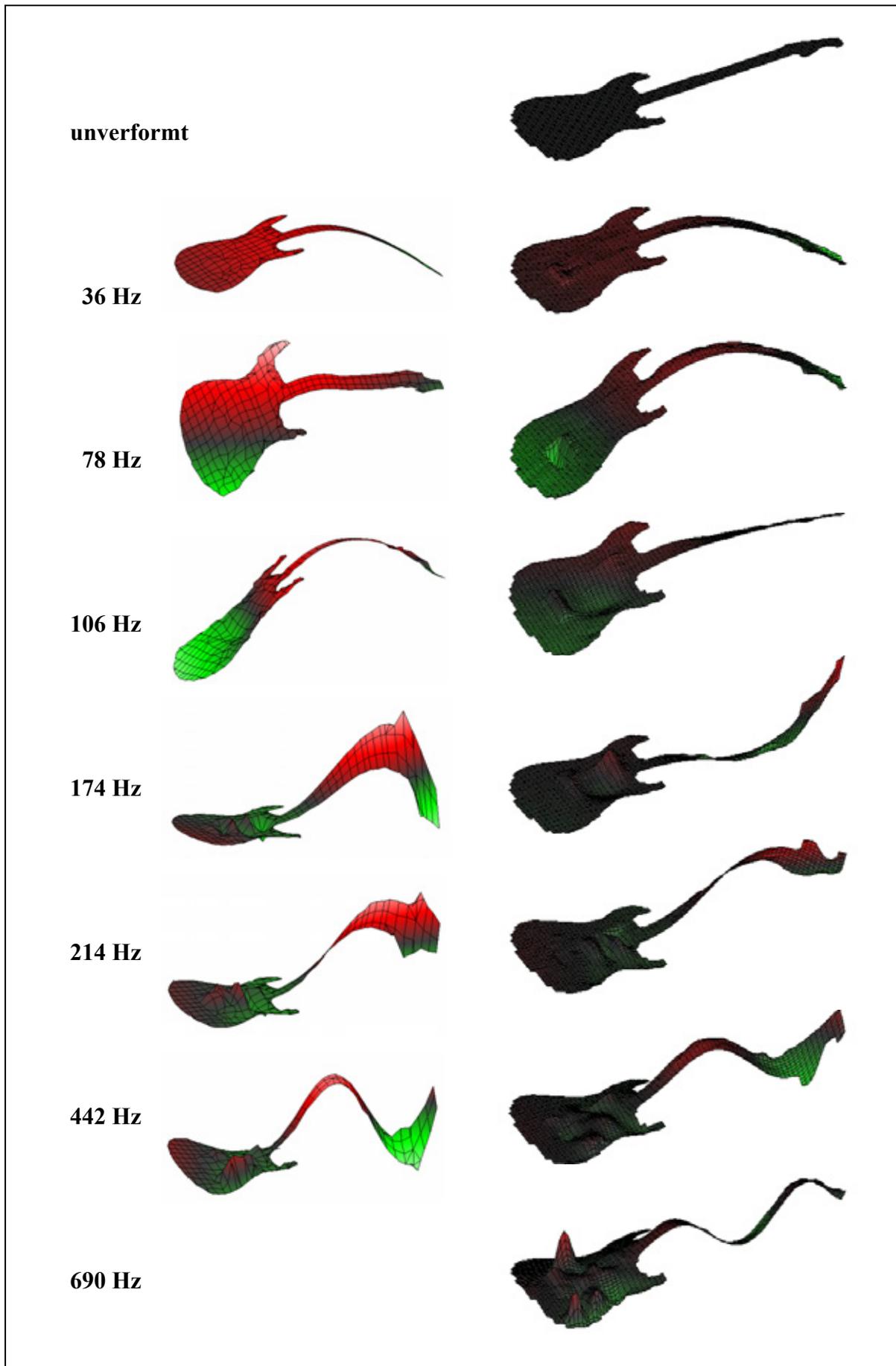


Abb. 37. Messgitter; die Gitarre ruht in einem Gitarrenständer und wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die wesentlichen charakteristischen Betriebsschwingungsformen mit den zugehörigen Frequenzen sind in der Tab. IV zusammengestellt. Wie bereits in Tab. III zu beobachten war, erweist sich auch hier die Dreipunkt-Lagerung als nicht so starr, dass der Korpus an seinem unteren Ende sich nicht bewegen könnte. Die Ergebnisse ähneln denen von Tab. III, gleichen ihnen jedoch nicht vollständig. Während die Schwingungsbilder eng verwandt sind, differieren die Frequenzen teilweise. Dies kann unter anderem mit unterschiedlichen Versuchsparametern erklärt werden. So hat Stechel (2003) für seine Untersuchung eine andere Frequenzauflösung gewählt. Der wesentliche Grund dürfte jedoch in der unterschiedlichen Art der Anregung liegen. Erwartungsgemäß wirkt eine Kraft an der Brücke nicht auf genau die gleiche Weise wie am Hals.

In beiden Ergebnistabellen herrschen Biegebewegungen des Instrumentenkörpers vor. In manchen Fällen überlagert sich Torsion, die möglicherweise durch eine nicht ganz mittige Anregung des Halses verstärkt hervorgerufen wird. Beispiele für eine deutliche Verwindung des Halses gegenüber dem Korpus sind zwischen 106 Hz und 214 Hz zu beobachten. Auch hierin wird die Verwandtschaft mit den Schwingungsbildern von Tab. III deutlich; ähnliche Bewegungsformen sind dort für die Frequenz 117 Hz sowie 220 Hz vermerkt.

Tab. IV. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre



#### 4.4.3. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, erste Messung

Mehrere Experimentatoren haben die Gitarre so gelagert, dass sie an lediglich zwei Punkten Kontakt mit dem Gitarrenständer hatte. Bürger (2002) hat mit einer ähnlichen Versuchssituation wie Stechel (2003) gearbeitet. Er hat den Messaufbau verwendet, der Abb. 38 zu entnehmen ist. Das Instrument ruhte im Gitarrenständer. Der Erreger LDS V 406 wurde in Verbindung mit einem Leistungsverstärker LDS PA 25 betrieben. Er drückte über den Ausleger mit so großer Gleichkraft von hinten gegen den Hals, dass die Gitarre von ihrem rückwärtigen Kontaktpunkt abhob und nunmehr nur noch am unteren Ende des Korpus auflag. Der Ort der Krafteinbringung war derselbe wie beim vorher beschriebenen Versuch. Er sollte die Anregung durch das kopfseitige Ende der Saite nachbilden. Ein piezoelektrischer Aufnehmer maß die Wechselkraft, die am Bund Nr. 7 wirkte.



*Abb. 38. Gitarre im Gitarrenständer und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger LDS V 406 angeregt.*

Das Messgitter umfasste gemäß Abb. 39 nunmehr 319 Punkte. 92% der Einzelmessungen wurden als optimal eingestuft. Die Messbandbreite betrug 800 Hz, die Frequenzauflösung war 8 Hz. Ergebnisse sind in Tab. V zusammengestellt.

Wie bereits in Tab. III und IV zu beobachten war, erweist sich auch hier die Auflagerung als nicht so starr, dass der Korpus an seinem unteren Ende absolut unbeweglich wäre. Dies gilt umso mehr, wenn der dritte Lagerungspunkt entfällt und die Gitarre nur an der unteren Schmalseite aufliegt. Die Ergebnisse von Tab. V sind denen von Tab. IV sehr ähnlich, was sowohl für die Schwingungsbilder wie auch für die Frequenzen gilt. Offenbar ist der Einfluss des dritten Auflagepunktes nicht sehr groß. In beiden Tabellen dominieren Biegebewegungen des Instrumentenkörpers. In manchen Fällen überlagert sich Torsion. Ein Beispiel für eine deutliche Verwindung des Halses gegenüber dem Korpus ist bei etwa 100 Hz zu beobachten. Im Vergleich mit den Ergebnissen des vorher beschriebenen Experiments überwiegen die Gemeinsamkeiten.

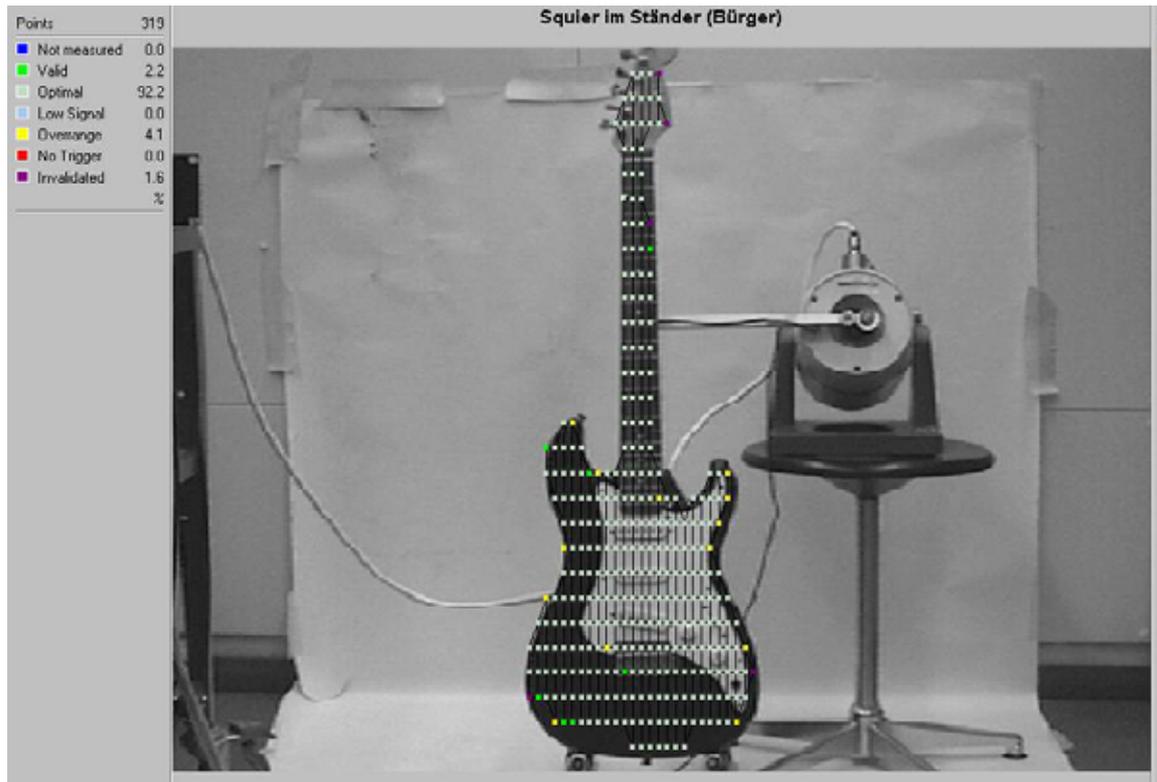
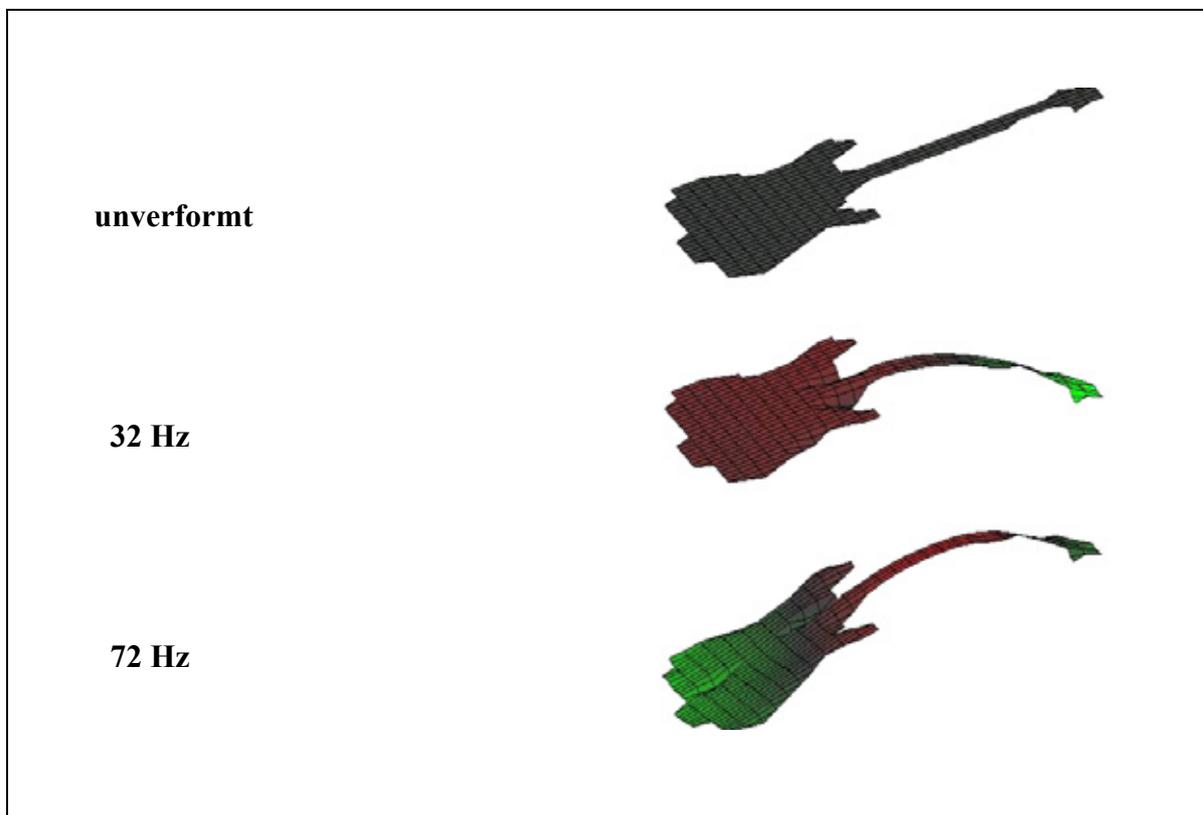
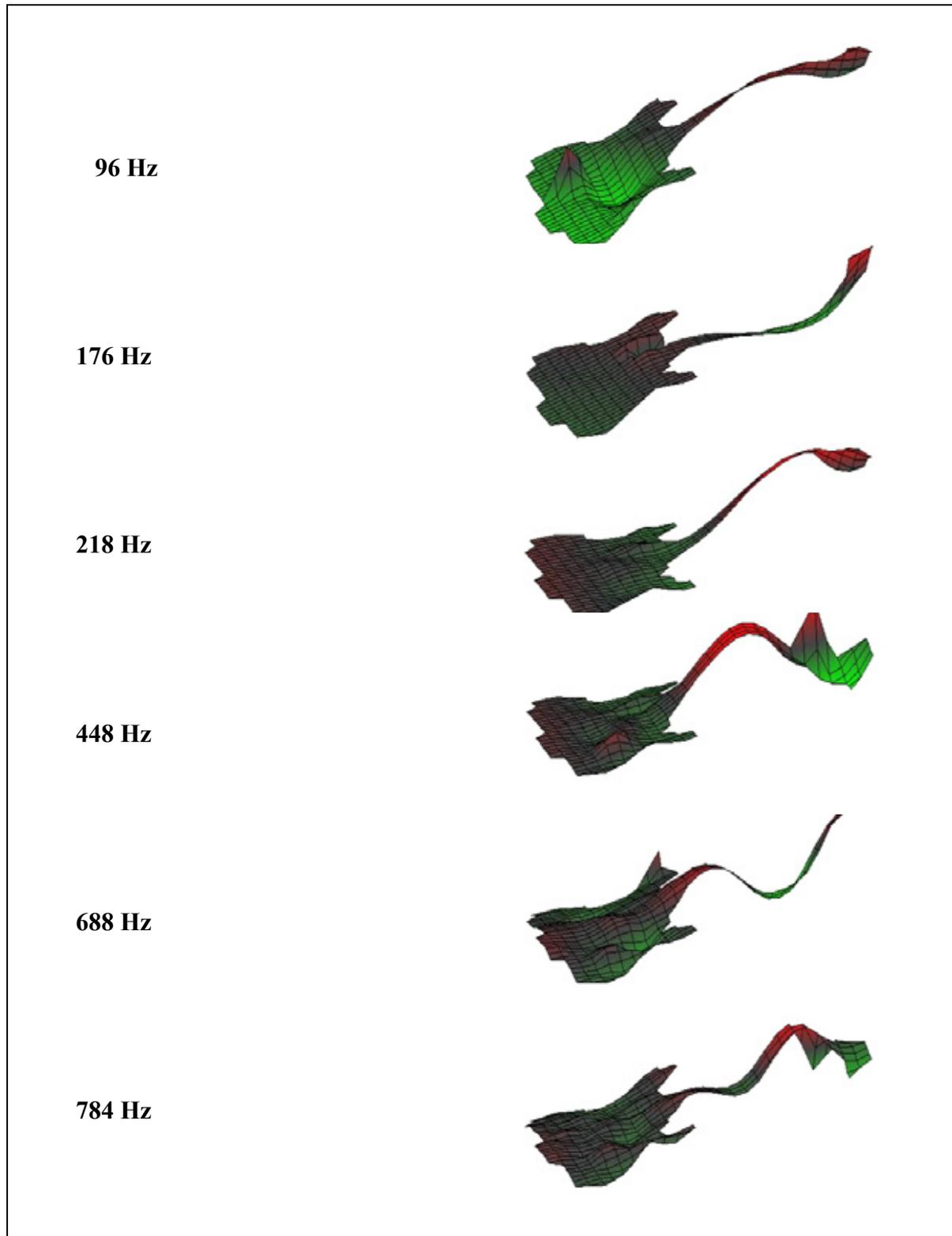


Abb. 39. Messgitter; die Gitarre liegt auf einem Gitarrenständer und wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Tab. V. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil I.



Tab. V. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil 2



#### 4.4.4. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, zweite Messung

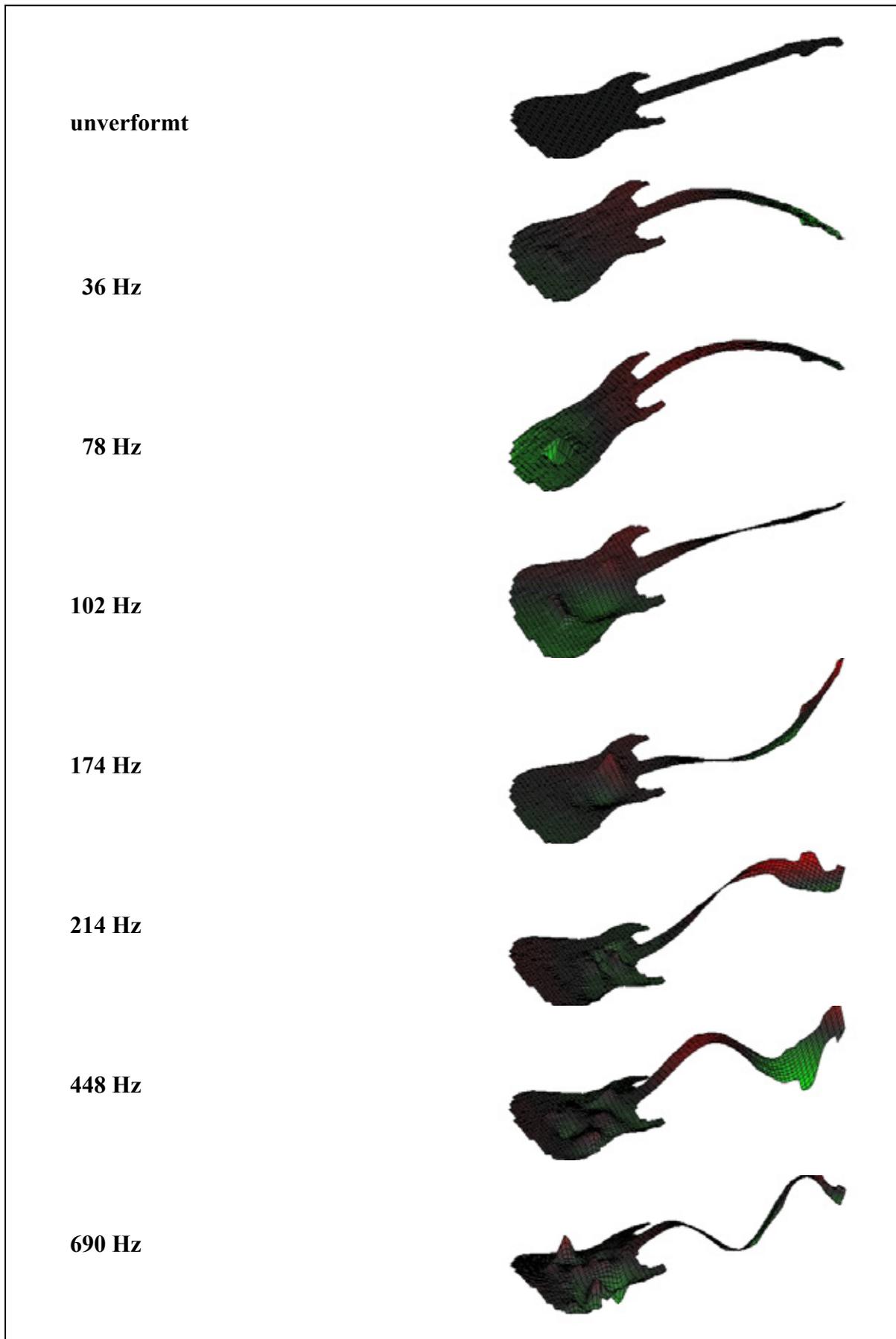
In einer weiteren Untersuchung aus dem Jahr 2003 hat Stechel die Versuchsanordnung, die in den Abb. 36 und 37 von Abschnitt 4.4.2 dargestellt ist, im Wesentlichen beibehalten. Er hat sie dadurch modifiziert, dass er den Schwingerreger nach vorne rückte und stärker gegen den Hals drücken ließ. Dadurch lag die Gitarre nur noch am unteren Korpusende auf. Wie in der Untersuchung von Bürger (2002; vgl. Abschnitt 4.4.3) hatte der Korpus an nunmehr zwei Stellen Kontakt mit dem Gitarrenständer.

Im Übrigen waren Versuchsanordnung und –parameter dieselben, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben und aus Abb. 37 ersichtlich. Der Erreger LDS V 406 griff über einen Ausleger von hinten am Bund Nr. 7 an, um auf diese Weise die Anregung des Instrumentenkörpers über das gegriffene Ende einer Saite nachzubilden. Die hohe Zahl von 1845 Messpunkten wurde beibehalten. Etwa 98% der Punkte wurden als optimal eingestuft. Auch die Messbandbreite 800 Hz und die Frequenzauflösung 2 Hz hat Stechel (2003) unverändert belassen.

Die wesentlichen charakteristischen Betriebsschwingungsformen mit den zugehörigen Frequenzen sind in der Tab. VI einander gesammelt. Wie schon bei den anderen Messungen im Gitarrenständer zu beobachten war, erweist sich auch hier die Auflagerung als nicht so starr, dass der Korpus an seinem unteren Ende sich nicht bewegen könnte.

Erwartungsgemäß ähneln sowohl die charakteristischen Betriebsschwingungsformen wie auch die zugehörigen Frequenzen in der Tab. VI weitgehend denen von Bürger (Tab. V). Dies gilt insbesondere für die Schwingungsbilder. Lediglich die Frequenzen differieren teilweise geringfügig. Dies kann damit erklärt werden, dass Stechel (2003) für seine Untersuchung die Frequenzauflösung 2 Hz gewählt hat, während sich Bürger (2002) sich mit 8 Hz begnügt hatte. Beide Tabellen zeigen vor allem Biegebewegungen des Instrumentenkörpers. In manchen Fällen überlagert sich Torsion. Ein Beispiel für eine deutliche Verwindung des Halses gegenüber dem Korpus ist bei 102 Hz zu beobachten. Auch hierin wird die Verwandtschaft mit den Schwingungsbildern von Tab. V deutlich; eine ganz ähnliche Schwingung ist dort für die Frequenz 96 Hz vermerkt.

Auch im Vergleich mit den Ergebnissen desselben Experimentators bei Dreipunkt-Auflagerung (Abschnitt 4.4.2) mit denselben Versuchsparametern ergibt sich weitgehende Übereinstimmung. Die Ergebnisse von Tab. VI sind denen von Tab. IV sehr ähnlich. Somit stimmen die Ergebnisse von Tab. VI in weiten Teilen mit denen der vorherigen beiden Abschnitte überein, die sich ebenfalls auf Anregung am Hals und Lagerung im Gitarrenständer beziehen. Es erweist sich als nicht sonderlich wichtig, ob der Korpus dabei an zwei Punkten am Ständer aufliegt oder an einem zusätzlichen Punkt rückseitig gestützt wird.

*Tab. VI. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre*

#### 4.4.5. Lagerung an zwei Punkten, Anregung am Hals, dritte Messung

Im Jahre 2004 hat Franz eine weitere Untersuchung mit Zweipunkt-Lagerung im Gitarrenständer durchgeführt. Seine Versuchsanordnung ist in Abb. 40 wiedergegeben. Auch er hat einen Schwingerreger, allerdings anderen Typs, am Bund Nr. 7 angreifen lassen.



*Abb. 40. Gitarre im Gitarrenständer und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger B&K 4818 angeregt.*

Abb. 40 zeigt das Instrument im Gitarrenständer. Die Oberfläche ist mit einem Spray diffus reflektierend gemacht worden. Der Schwingerreger *Mini Shaker* B&K 4810 wurde aus einem Leistungsverstärker B&K 2706 gespeist. Er wurde mit einem schweren Stativ von hinten so stark gegen den Hals gedrückt, dass die Gitarre vom rückseitigen Auflagepunkt abhob und nur noch an den beiden Füßen des Gitarrenständers auflag.

Franz (2004) hat 220 Messpunkte verwendet, die nicht äquidistant verteilt waren. Vielmehr hat er sie dort enger gelegt, wo der Instrumentenkörper sich den bisherigen Erfahrungen zufolge besonders stark verformt. Etwa 96% der Messungen waren optimal. Die Messbandbreite war 1 kHz, die Frequenzauflösung 2,5 Hz.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in Tab. VII. Bereits in den Schwingungsbildern von Tab. III bis VI hatten sich deutliche Gemeinsamkeiten gezeigt. So hatte sich die Auflagerung im Gitarrenständer als nicht starr erwiesen. Auch hier dominiert Biegung die charakteristischen Schwingungsformen, die sich in einigen Fällen mit Torsion mischt. Sehr stark prägt sich die Torsion wiederum bei 100 Hz aus. In Hinsicht auf die Schwingungsbilder bestätigt Tab. VII die Befunde der bisherigen Messungen bei Zweipunktlagerung (Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4).

Auch der Vergleich mit der Auflagerung an drei Punkten mit sonst gleichen Versuchsparametern (Abschnitt 4.4.2) zeigt weitgehende Übereinstimmung. Nicht nur die charakteristischen Schwingungsformen, sondern auch die charakteristischen Frequenzen der Tab. IV und VII sind nahezu identisch. Die bisherigen Beobachtungen bestätigen sich: Es macht keinen erwähnenswerten Unterschied, ob der Korpus in der Nähe des Übergangs zum Hals Kontakt mit dem Ständer hat, oder ob er an dieser Stelle frei schwebt.

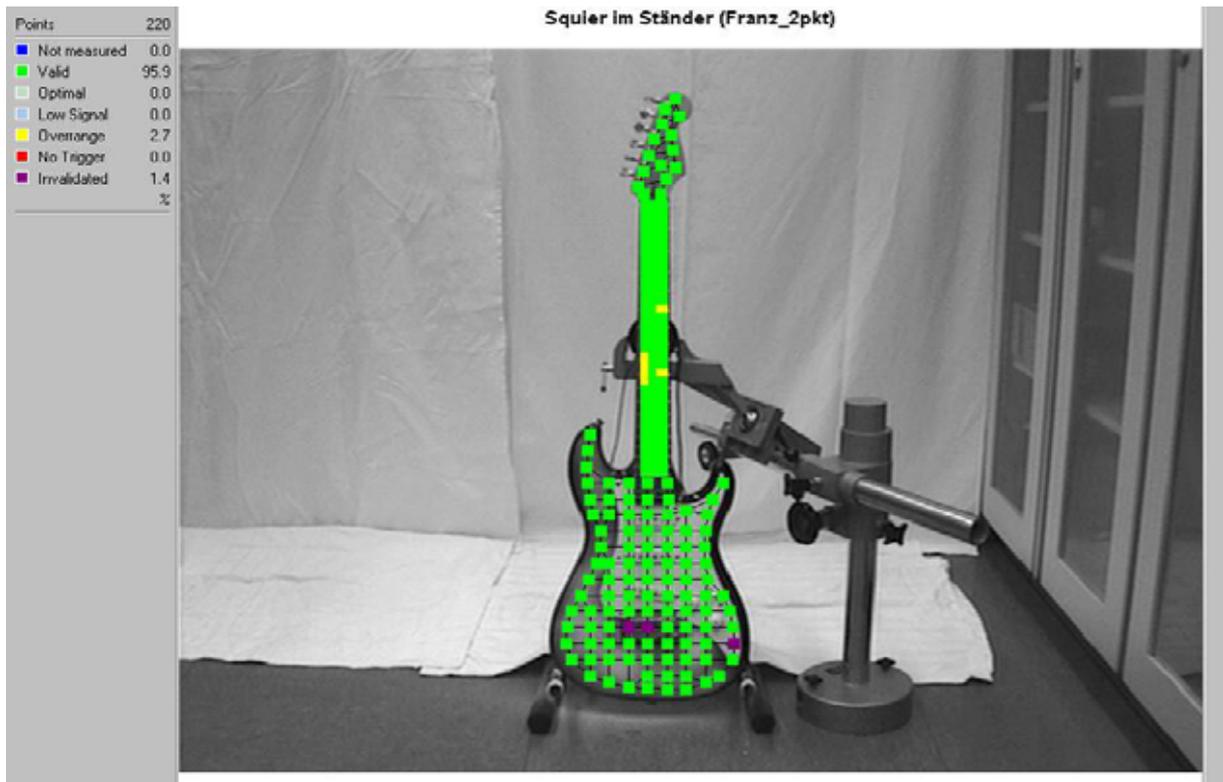
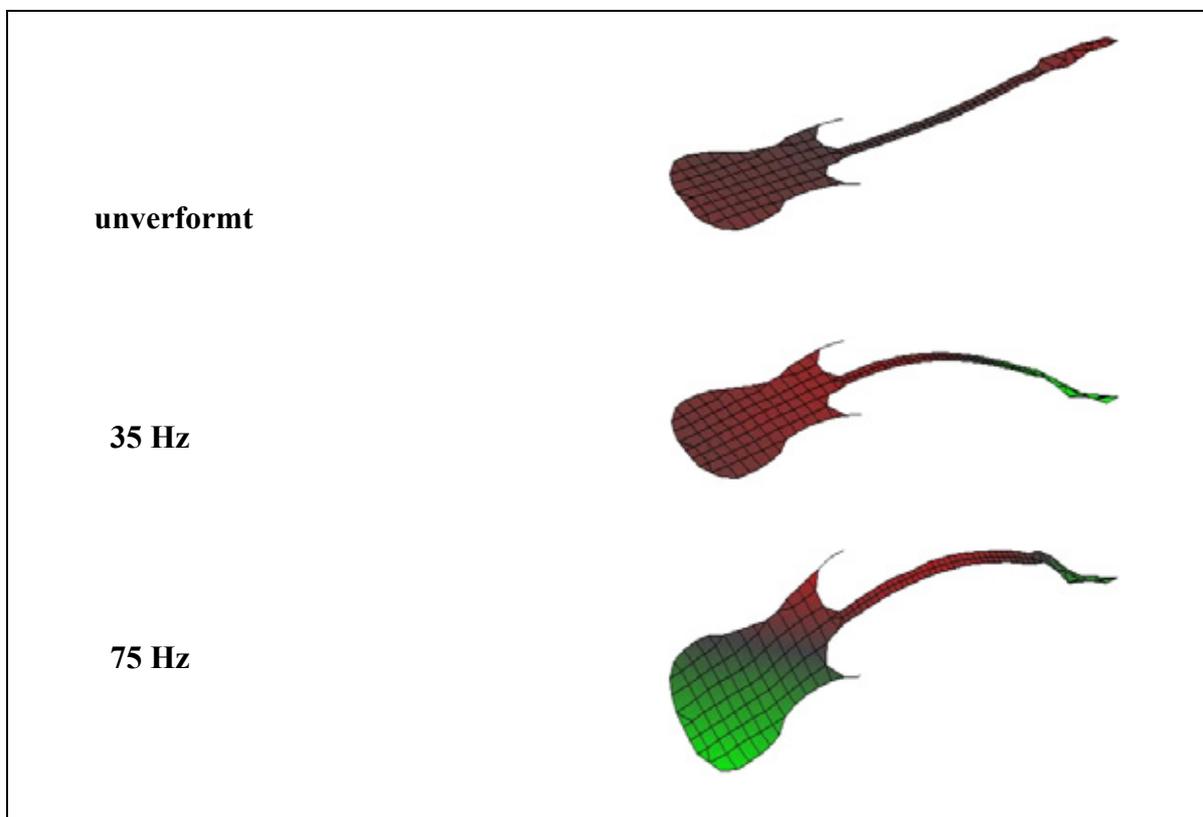
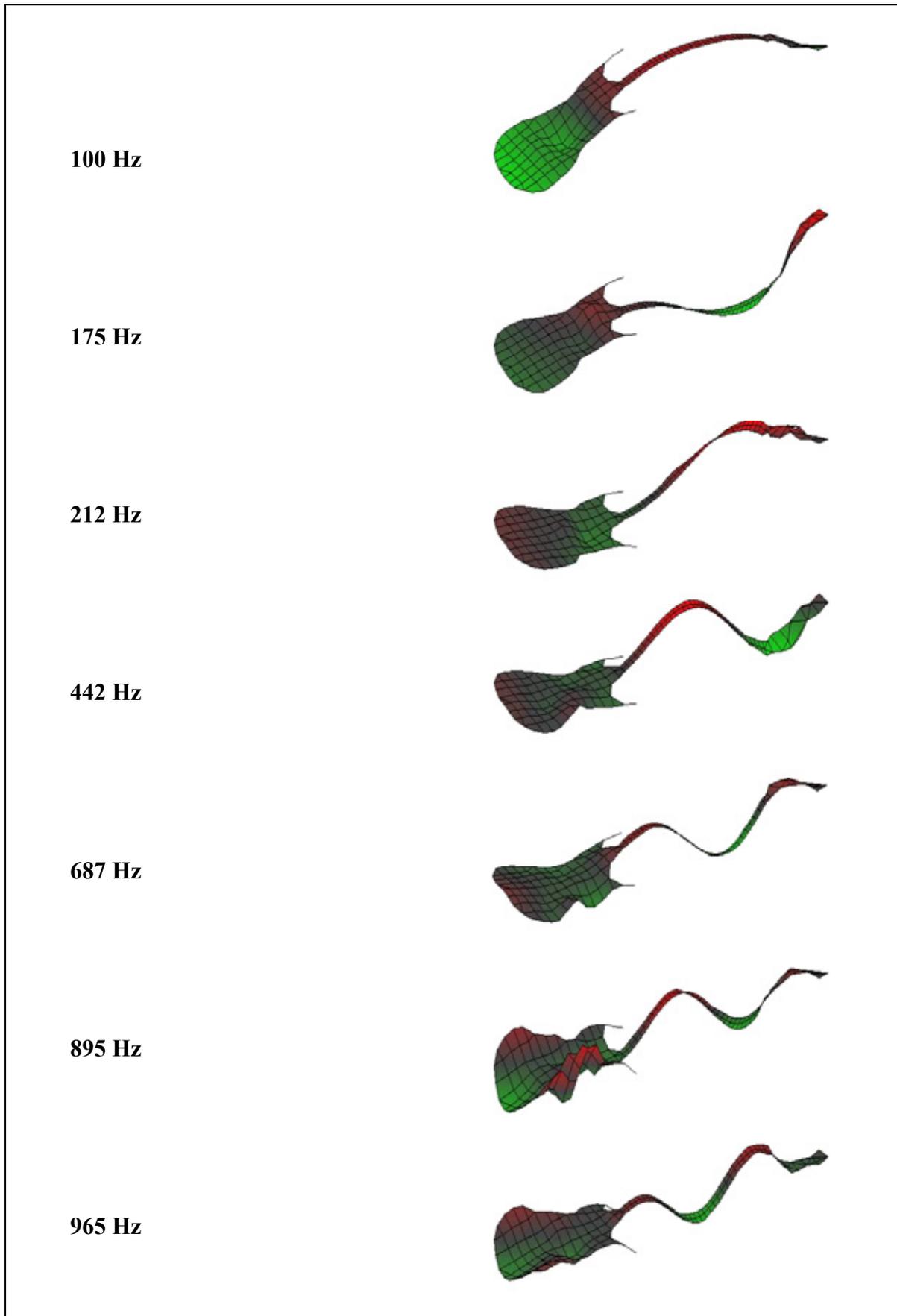


Abb. 41. Messgitter; die Gitarre liegt auf einem Gitarrenständer und wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Tab. VII. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil I



Tab. VII. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Ständer stehenden Gitarre Teil 2



## 4.5. Zusammenfassende Bemerkung

Die Schwingungen des Instrumentenkörpers in Hauptrichtung wurden mit stationärer Rauschanregung und Laser-Vibrometrie experimentell untersucht. Verschiedenartige Lagerungen wurden erprobt:

- (a) Relativ feste Einspannung am unteren (korpuseitigen) Ende;
- (b) weitgehend gelenkige Aufhängung nahe dem oberen (kopfseitigen) Ende;
- (c) relativ nachgiebige Lagerung in einem Gitarrenständer.

Die unverschiebliche Lagerung (a) am unteren Ende ist in Abschnitt 4.2 behandelt. Sie liefert naturgemäß charakteristische Schwingungsformen, die an der Einspannstelle einen Knoten aufweisen. Eine kurze Zusammenstellung findet sich in Tab. VIII. Den übrigen Schwingungsformen, deren charakteristische Frequenzen nicht aufgeführt sind, ist deutliche Torsion überlagert.

*Tab. VIII. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, korpuseitig im Schraubstock eingespannt (Abschnitt 4.2)*

<b>Charakteristische Frequenz der Biegeschwingung</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>
39 Hz ... 46 Hz	2
117 Hz ... 164 Hz	3
454 Hz ... 587 Hz	4
697 Hz	5
979 Hz	6

Demgegenüber treten bei der gelenkigen Aufhängung (b) nahe dem Kopf (Abschnitt 4.3) Schwingungsknoten im Bereich der ersten Bünde auf. Ergebnisse hinsichtlich der Biegung sind in Tab. IX zusammengefasst. Den Schwingungsformen, deren charakteristische Frequenzen nicht hierbei vermerkt sind, überlagert sich mehr oder weniger ausgeprägte Torsion. Erwartungsgemäß unterscheiden sich nicht nur die Schwingungsbilder der Lagerfälle (a) und (b), sondern auch die zugehörigen Frequenzen deutlich voneinander.

*Tab. IX. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, kopfseitig aufgehängt (Abschnitt 4.3)*

<b>Charakteristische Frequenz der Biegeschwingung</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>
64 Hz	2
112 Hz ... 248 Hz	3
352 Hz ... 368 Hz	4
688 Hz ... 776 Hz	5

Die Lagerung im Gitarrenständer (c) wurde in zwei Varianten verwendet. Das Instrument lag an seinem korpuseitigen Ende immer an zwei Stellen auf. Darüber hinaus ruht es bei zwei

Messungen zusätzlich an einem dritten Punkt auf der Rückseite des Korpus. Die Unterschiede, die daraus resultieren, erweisen sich als marginal. Etwas größere Diskrepanzen folgen aus Unterschieden im Ort der Krafteinleitung. Dieser sollte simulieren, dass die Saite den Korpus in einem Fall am Steg (Abschnitt 4.4.1), in den anderen Fällen am Hals (Abschnitte 4.4.2 bis 4.4.5) zum Schwingen anregt. Naturgemäß prägen sich die Formen in unterschiedlichem Maße aus. Die charakteristischen Frequenzen differieren in engem Rahmen und die Torsion, die sich der ansonsten dominierenden Biegung überlagern kann, prägt sich unterschiedlich aus. Im Übrigen stimmen die Ergebnisse aller Messungen im Gitarrenständer ungeachtet der Details der Lagerung und der Anregung weitgehend überein. Als repräsentativ kann die folgende Zusammenstellung von Tab. X gelten, die sich auf die Gesamtheit der Messungen von Abschnitt 4.4 bezieht.

*Tab. X. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, im Gitarrenständer stehend (Abschnitt 4.4)*

<b>Charakteristische Frequenz der Biegeschwingung</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>
32 Hz .. 40 Hz	1
72 Hz .. 80 Hz	2 (+ Torsion)
96 Hz .. 117 Hz	2 (+ Torsion)
174 Hz ... 177 Hz	3 (+ Torsion)
200 Hz ... 220 Hz	3 (+ Torsion)
442 Hz ... 450 Hz	4
672 Hz ... 690 Hz	5

Es fällt auf, dass nicht in allen Fällen reine Biegung zu beobachten ist. Nicht selten tritt zusätzliche Torsion auf. Die Schwingungen mit zwei oder drei Knoten, die in Tab. X jeweils getrennt ausgewiesen sind, erscheinen in mehreren Varianten. Diese unterscheiden sich in Details der Bewegung der Hörner oder Ähnlichem, stimmen jedoch hinsichtlich der Biegung des Halses überein.

Die Anzahl der Knoten allein ist kein hinreichendes Unterscheidungskriterium; sie sagt nichts über deren Lage aus. Es leuchtet ein, dass im Fall (a) Knoten sich regelmäßig am unteren Korpusende, im Fall (b) dagegen bei den ersten Bündeln in der Nähe des Sattels ausbilden. Die unterschiedliche Lage der Knoten wirkt sich am stärksten auf die tieffrequenten Schwingungen aus, die nur wenige in Gegenphase schwingende Bereiche aufweisen. Je mehr Bäuche und Knoten sich ausbilden, d.h. je feiner sich das Instrument beim Schwingen unterteilt, desto ähnlicher werden sich die Schwingungsmuster ungeachtet der speziellen Randlagerung und desto weniger unterscheiden sich die zugehörigen Frequenzen. So zeigt der Vergleich der Tab. VIII bis X, dass die Schwingungen mit fünf Knoten in allen Fällen bei etwa 700 Hz zu erwarten sind. Es kann vermutet werden, dass oberhalb dieser Frequenz die Randlagerung keine große Rolle mehr spielt. Unterhalb ist sie dagegen von maßgeblicher Bedeutung. Da dies der Bereich ist, in dem die Grundtöne der Gitarrenklänge liegen, muss den Randbedingungen erhöhte Aufmerksamkeit entgegen gebracht werden. Im nächsten Kapitel wird deshalb versucht, von „künstlichen“ Randbedingungen abzugehen und bei der Schwingungsmessung für eine möglichst „natürliche“ Lagerung des Instruments zu sorgen.

## 5. MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN *IN SITU* IN SITZENDER SPIELHALTUNG

Die Messungen der bisher vorliegenden Kapitel haben gezeigt, dass der Instrumentenkörper bei bestimmten Frequenzen an bestimmten Stellen besonders beweglich sein kann. Die Ursache hierfür sind Schwingungen der Instrumentenstruktur. Diese Schwingungen sind im Kapitel 4 zunächst unter verschiedenartigen „künstlichen“ Randbedingungen studiert worden. Im Weiteren werden sie bei möglichst „natürlicher“ Lagerung untersucht. Im vorliegenden Kapitel 5 ist darunter zu verstehen, dass eine Person auf einem Stuhl sitzt und die Gitarre am Körper hält.

### 5.1. Versuchsmethode und –aufbau

Wie bei den im letzten Kapitel beschriebenen Versuchen wurde das *Laser Scanning Vibrometer* von Polytec verwendet. Versuchsperson samt Schwingererregter (*Mini Shaker* B&K 4810) befanden sich auf einem Stuhl mit Arm- und Rückenlehnen. Der Erreger war mit Hilfe eines Platinenschraubstocks an der linken Armlehne angeschraubt und konnte mit einem Kugelgelenk justiert werden. Abb. 42 zeigt diese Konfiguration.

Abb. 42. Lehnstuhl mit Schwingererregter B&K 4810 und aufgeschraubtem Kraftaufnehmer B&K 8200.



Die Versuchsperson (im Folgenden meist als VP abgekürzt, Mehrzahl VPn) saß auf dem Stuhl und hielt das Instrument in Spielhaltung vor dem Körper. Mit seiner unteren Aussparung lag der Korpus am rechten Oberschenkel auf. Abb. 43 macht deutlich, wie die linke Hand den Hals umfasste. Die rechte ruhte meist auf dem Korpus. Da die Messung „vor Ort“ erfolgt, wird die Situation mit dem Begriff „*in situ*“ bezeichnet. Aufgabe der VP war es, ihre Position und die Lage des Instruments während des Messvorgangs so weit wie möglich beizubehalten.

Anregungssignal war nach wie vor Pseudo-Rauschen aus einem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A. Dieses wurde über einen Leistungsverstärker B&K 2706 in den Schwingererregter eingespeist. Die VP drückte die Rückseite des Halses der Gitarre gegen einen Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200), dessen Signal in einem *Conditioning Amplifier* B&K 2626 aufbereitet wurde. Dieses Verfahren wurde schon mehrmals beschrieben; siehe z.B. Fleischer und Zwicker (1996, 1998, 1999) oder Fleischer (1998). Das Kraftsignal diente als Eingangsgröße bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen.



*Abb. 43. Gitarre auf dem Schoß der VP FL und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger B&K 4810 angeregt.*

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel dargelegt, wurde die Schwingung des Instrumentenkörpers mit Hilfe des *Optical Scanning Head OFV 055* abgetastet. Dazu sandte ein Laser einen Messstrahl aus, den zwei bewegliche Spiegel auf einen der vorher festgelegten Punkte der schwingenden Oberfläche lenkten. Das von dort reflektierte Laserlicht gelangte zum Messkopf zurück. Aus der Dopplerverschiebung des reflektierten relativ zum originalen Strahl wurde die Schwinggeschwindigkeit der Oberfläche in Richtung des Laserstrahls ermittelt. Diese war die Ausgangsgröße für die Bestimmung einer Übertragungsfunktion. Die Messsignale wurden im Steuer- und Auswerterechner des Polytec-Systems analysiert und für jeden Messpunkt die Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/Anregungskraft bestimmt. Als Messbandbreite wurden Frequenzen bis höchstens 1 kHz gewählt. Verwendete man für die Fourier-Transformation 400 FFT-Linien, so ergab sich aus dieser Bandbreite eine Frequenzauflösung von 2,5 Hz. Aus den Vibrometer-Daten wurden an Hand von Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion diejenigen „charakteristischen Frequenzen“ ausgewählt, für die Betriebsschwingungsformen (*Operating Deflection Shapes*, Richardson 1997) dargestellt werden sollten. Entsprechend dem Sprachgebrauch in diesem Bericht werden die Schwingungsmuster, die bei den charakteristischen Frequenzen vorliegen, als „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ bezeichnet.

## **5.2. Messungen von S. Geris am Gesamtinstrument**

Am Rande seiner Untersuchungen an akustischen Gitarren hat Geris im Jahr 2001 auch die E-Gitarre Squier Bullet behandelt. Abb. 44 zeigt die Situation bei dieser Messung. Die VP FL hielt die Gitarre auf dem Schoß. Die linke Hand umschloss den Hals nahe dem Sattel und verblieb während der ganzen Messung dort. Der rechte Unterarm und die Hand lagen locker auf dem Korpus.

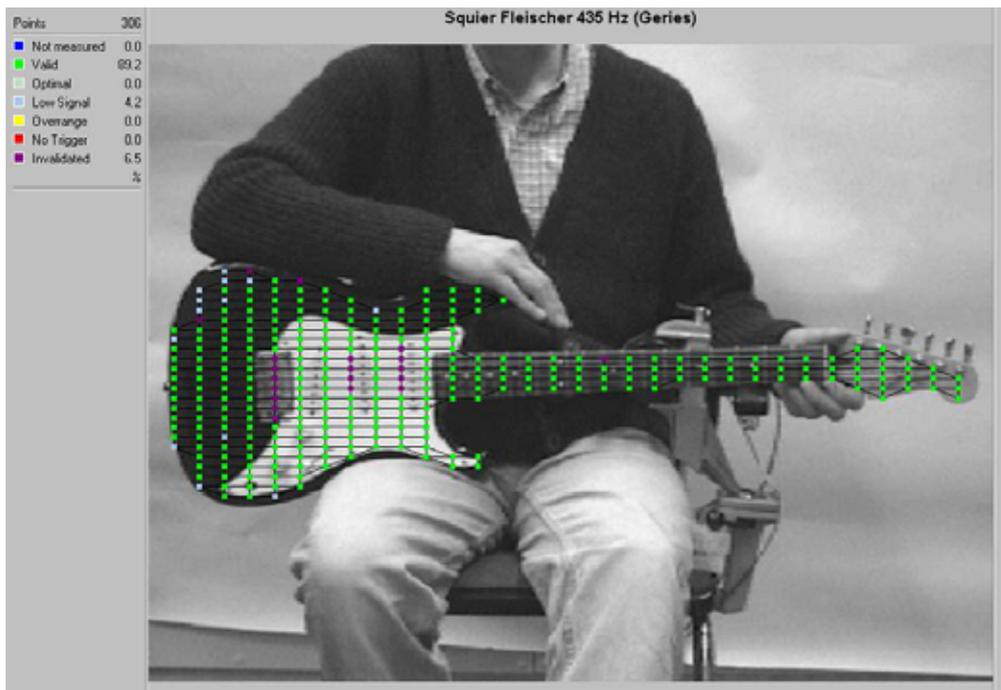


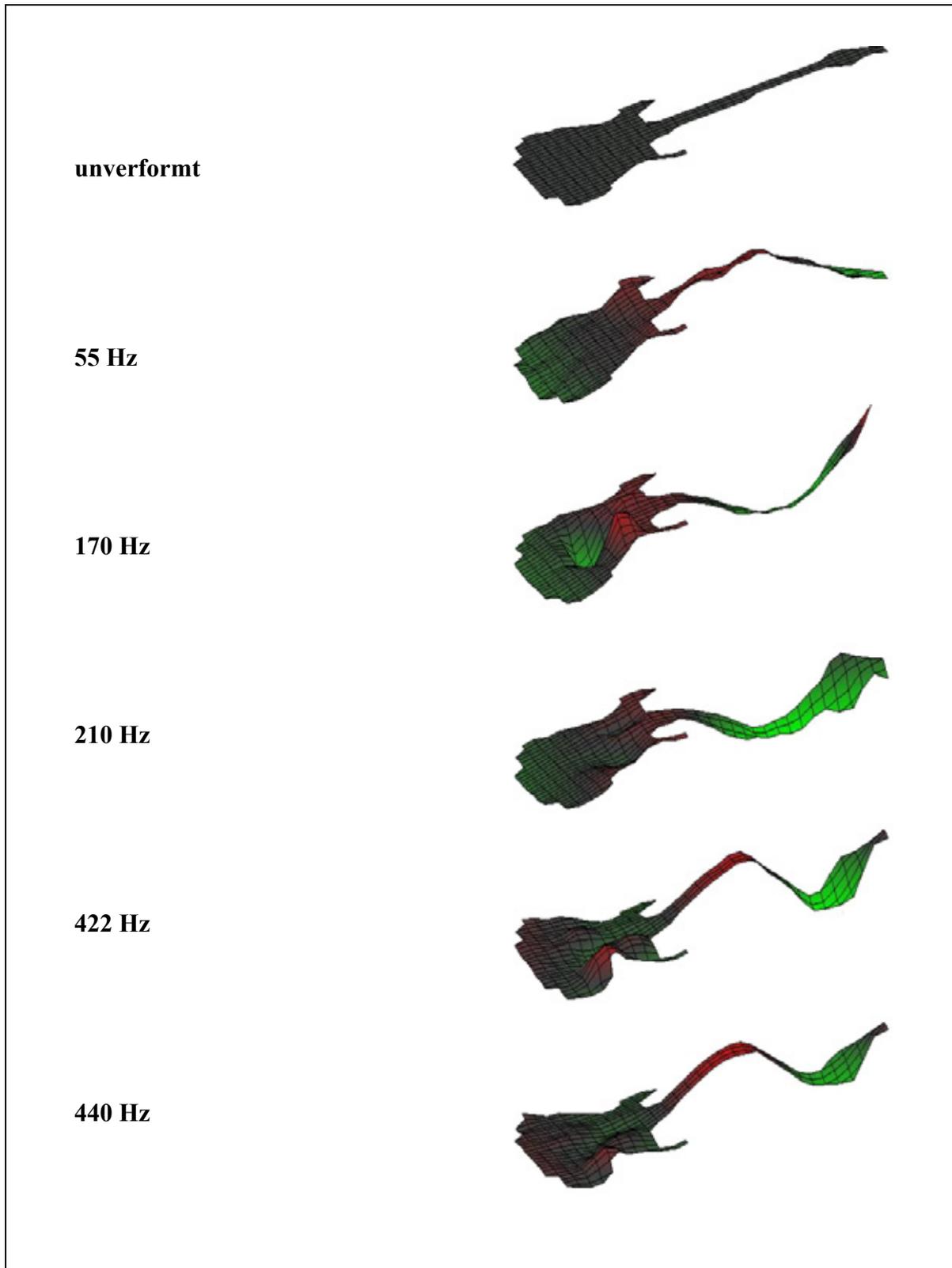
Abb. 44. Messgitter bei der Messung mit VP FL in sitzender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Geries (2001) hat 306 Messpunkte auf der Oberfläche von Korpus, Griffbrett und Kopf verteilt. Jede Messung wurde dreimal durchgeführt und anschließend komplex gemittelt. 89% der Ergebnisse wurden als gültig (*valid*) eingestuft. Ungültige Ergebnisse waren beispielsweise dann zu vermerken, wenn der Laserstrahl auf den abgeschrägten Teil des Korpus fiel und an der spiegelnden Oberfläche in den Raum, nicht jedoch zurück zum Messkopf geworfen wurde. In manchen Fällen traf der Strahl auch Saiten oder Beschläge. Es wurde der Frequenzbereich von 0 Hz bis 500 Hz untersucht; die Frequenzauflösung betrug 2,5 Hz. Ein Messdurchgang dauerte nur wenige Minuten, so dass es für die VP keine Schwierigkeit bedeutete, ihre Sitz- und Halteposition während dieser Zeitspanne beizubehalten.

Bei der vorliegenden Aufgabenstellung ist es von hohem Interesse, wo genau die Bäuche und Knoten der Schwingungen auf dem Gitarrenkörper liegen. Um die Zuordnung zu erleichtern, empfiehlt sich eine Art der Visualisierung, wie sie in der Tabelle in Anhang 1 verwendet worden ist. Dem Videobild ist das Schwingungsbild überlagert. Die Schwingung wird teiltransparent wiedergegeben, so dass man noch Details des dahinter befindlichen Instruments erkennen kann. Die Amplitude und die Schwingungsrichtung sind in den Farbtönen kodiert. Dargestellt ist der Augenblickswert. Rot steht für das positive, Grün für das negative Vorzeichen. Je heller die Farbe ist, desto größer ist die Schwinggeschwindigkeit an der betreffenden Stelle. Dunkle Stellen, die rote von grünen Bereichen trennen, kennzeichnen Schwingungsknoten. Helle Stellen charakterisieren Schwingungsbäuche.

Um die Zusammenhänge mit den Ergebnissen sichtbar zu machen, die in Kapitel 4 zusammengetragen sind, wird zunächst weiterhin die 3D-Darstellung verwendet. Tab. XI zeigt die Resultate der Messung von Geries. Es sind drei Gruppen von charakteristischen Schwingungsformen zu erkennen. Bei 55 Hz biegt sich die Gitarre durch; in der Nähe der Brücke und in der Nähe des Sattels bilden sich Knoten aus. Bei 170 Hz und 210 Hz tritt eine ausgeprägte Biegeschwingung mit zwei Knoten auf dem Hals auf. Da sich Torsion auf unterschiedliche Arten überlagert, bilden sich zwei verschiedenartige Mischformen aus. Eine ähnliche Beobachtung macht man bei 422 Hz und 440 Hz. Auch hier überlagert sich unterschiedliche Torsion der gleichen Biegeform mit drei Knoten, so dass bei benachbarten Frequenzen zwei ähnliche, im Detail aber differierende Mischformen entstehen.

*Tab. XI. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Sitzen am Körper der VP FL gehaltenen Gitarre*



In Anhang 1 sind „Blitzlichtaufnahmen“ zu sehen, bei denen die beschriebenen Schwingungsmuster im Augenblick großer Auslenkung „eingefroren“ sind. Ergänzend ist in Anhang 2 eine weitere Art der Darstellung gewählt. Der Betrag der Schwinggeschwindigkeit ist auf die an-

regende Kraft bezogen und in den Helligkeitsstufen der Farbe Blau kodiert. Dunkle Stellen kennzeichnen Schwingungsknoten, helle Schwingungsbäuche. Diese Visualisierung, bei der das Vorzeichen naturgemäß verloren geht, entspricht somit Chladni'schen Klangfiguren (Chladni 1787), wenn blaues Pulvers auf eine weiße Gitarre gestreut wird.

### 5.3. Reihenmessungen von T. Stechel am Gesamtinstrument

Eine Reihenuntersuchung an elektrischen Gitarren hat Stechel im Jahr 2003 durchgeführt. Damit der Laserstrahl besser zum Messkopf zurück geworfen wird, ist die Oberfläche des Instruments mit einem Spray behandelt worden. Unter anderem hat Stechel (2003) in zwei Experimenten die Schwingungen der Gitarre Squier Bullet gemessen, während sie von den VPn FL (Abb. 45) und SC (Abb. 46) im Sitzen gehalten wurden. Bei beiden Messungen hat er nahezu 600 Punkte auf der Oberfläche der Gitarre positioniert. Die Bandbreite war 1 kHz und damit doppelt so groß wie bei Geries (2001). Die Frequenzauflösung betrug 5 Hz. Jede Messung wurde drei Mal gemittelt. Praktisch sämtliche Messpunkte wurden als gültig eingestuft.

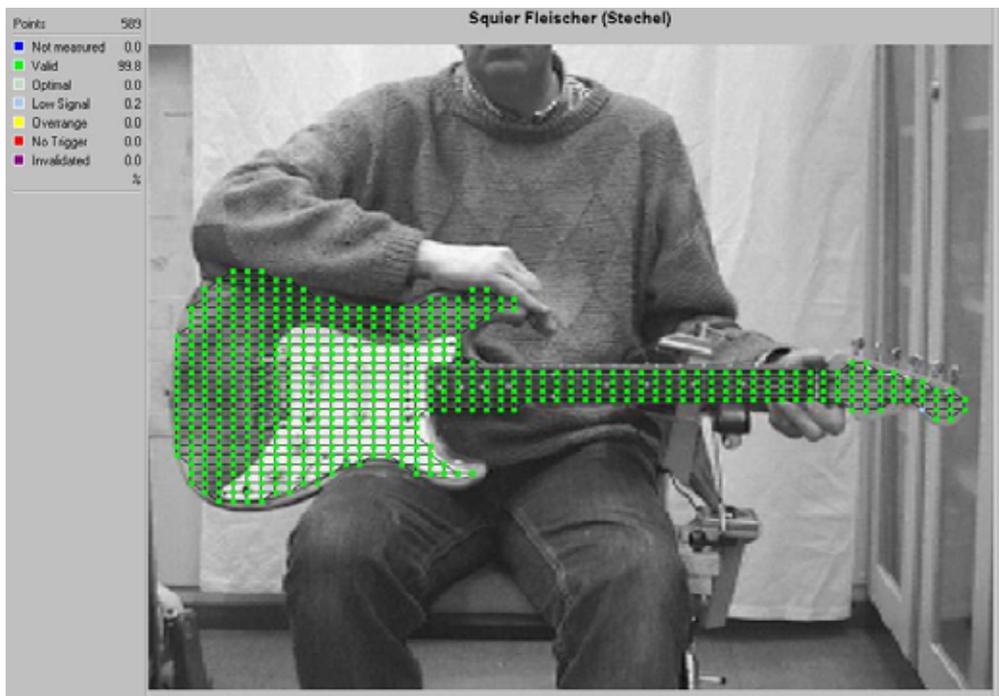


Abb. 45. Messgitter bei der Messung mit VP FL in sitzender Spielhaltung die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Ergebnisse der Messung mit der VP FL sind zunächst in Form des Mittelwertes der Übertragungsfunktionen sämtlicher Messpunkte in Abb. 47 oben dokumentiert. An Hand der Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktion legte der Experimentator die charakteristischen Frequenzen fest, die durch die Bänder markiert worden sind. Für die ausgewählten Frequenzen wurden die zugehörigen Schwingungsbilder errechnet. Die charakteristischen Betriebsschwingungsformen, die man auf diese Weise erhält, finden sich in farbiger Darstellung im Anhang 3. Die bereits bekannten Schwingungsmuster (vgl. Anhang 1) bei 55 Hz, 175/210 Hz und 425/445 Hz spiegeln sich hierin wider. Zusätzlich treten bei höheren Frequenzen zwei weitere Formen auf. Auf Griffbrett und Kopf sind vier Knoten bei 690 Hz und fünf Knoten bei 945 Hz zu beobachten.

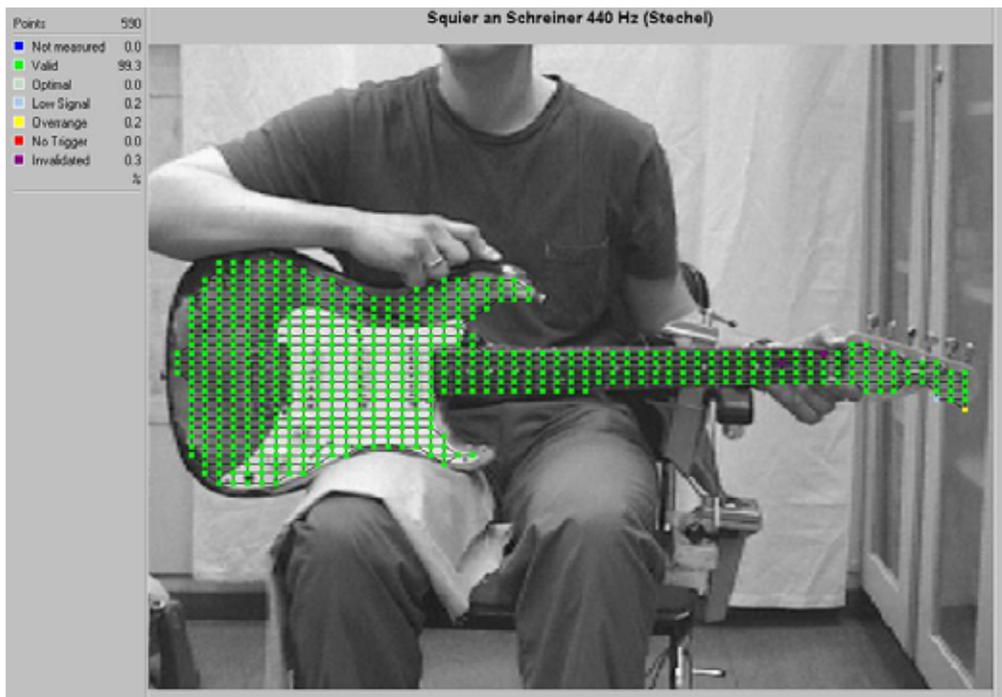


Abb. 46. Messgitter bei der Messung mit VP SC in sitzender Spielhaltung die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die Situation bei der Messung mit der anderen VP (Abb. 46) war im Wesentlichen dieselbe, wie sie in Abb. 45 dargestellt ist. Bei den Ergebnissen der beiden Messungen war weitgehende

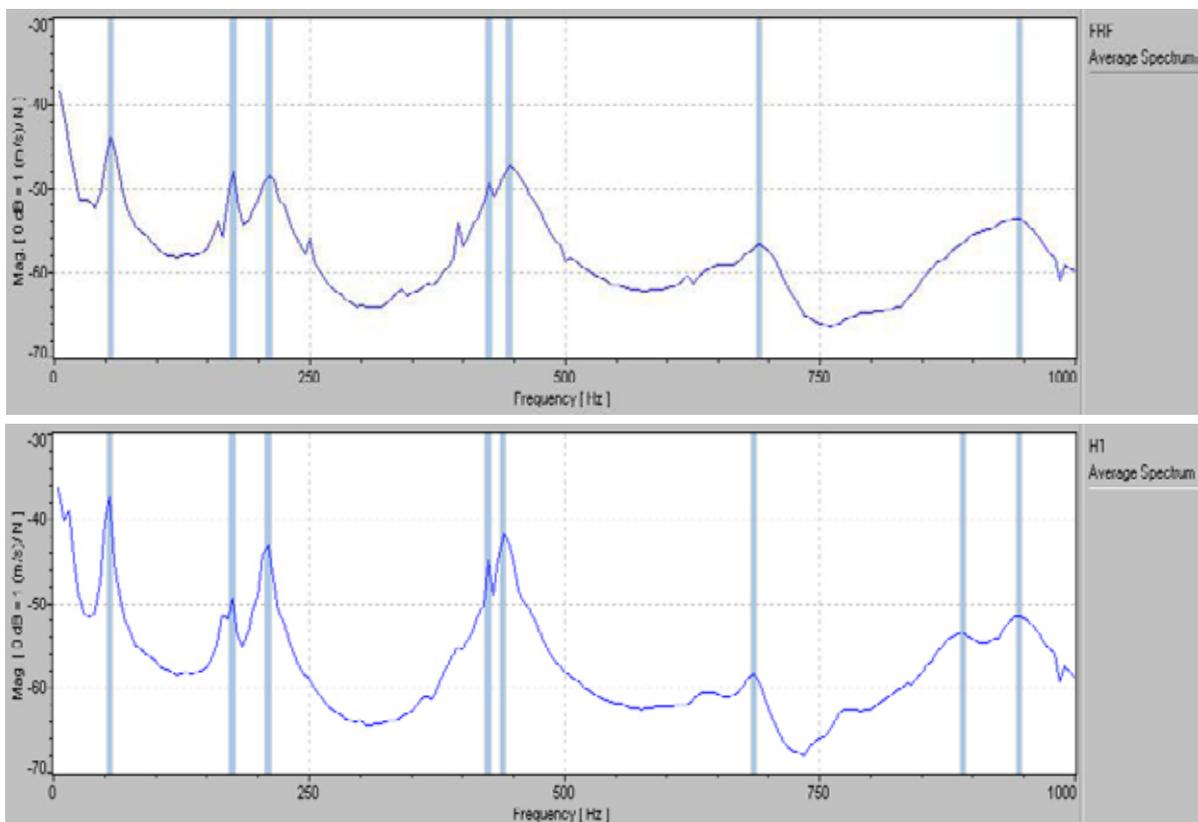


Abb. 47. Gesamt-Übertragungsfunktion der Messungen in sitzender Spielhaltung oben: mit der VP FL; unten: mit der VP SC.

Übereinstimmung zu beobachten. Man erkennt dies bereits beim Vergleich der zugehörigen Gesamt-Übertragungsfunktionen in Abb. 47. Eine deutliche Verwandtschaft der beiden Messkurven ist zu erkennen. Bei der Untersuchung mit der VP SC (unten) bildet sich lediglich bei 890 Hz ein flaches lokales Maximum aus, was für die VP FL (oben) nicht zu beobachten war. Hierbei scheint es sich nicht um eine eigenständige neue Schwingungsform, sondern um eine Variante der Schwingung bei 945 Hz zu handeln.

Somit vermittelt diese vergleichende Untersuchung zum ersten Mal einen Begriff davon, welchen Einfluss die VP und ihre individuelle Art, das Instrument zu halten, auf die Messergebnisse haben können. Der Vergleich der Kurven in Abb. 47 belegt, dass die Maxima in beiden Fällen bei praktisch denselben Frequenzen auftreten. Auch die zugehörigen Schwingungsformen ähneln einander so stark, dass auf die gesonderte Darstellung der Schwingungsbilder für die VP SC verzichtet worden ist. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die charakteristischen Frequenzen und die charakteristischen Schwingungsformen bei beiden VPn weitgehend übereinstimmen. Gewisse Unterschiede zeigen sich in der Höhe der lokalen Maxima. Offenbar kann die Dämpfung leicht unterschiedlich sein, so dass die Schwingungen der Gitarre bei der einen VP sich etwas stärker ausbilden, als wenn die andere VP sie hält. Es ist zu vermuten, dass dies damit zusammenhängt, wie fest die linke Hand der VP den Hals der Gitarre umfasst. Diese Unterschiede haben aber weder einen Einfluss auf die Frequenzen, noch auf die Formen, mit denen sich die Gitarre bewegt.

## 5.4. Reihenmessungen von Chr. Franz am Gesamtinstrument

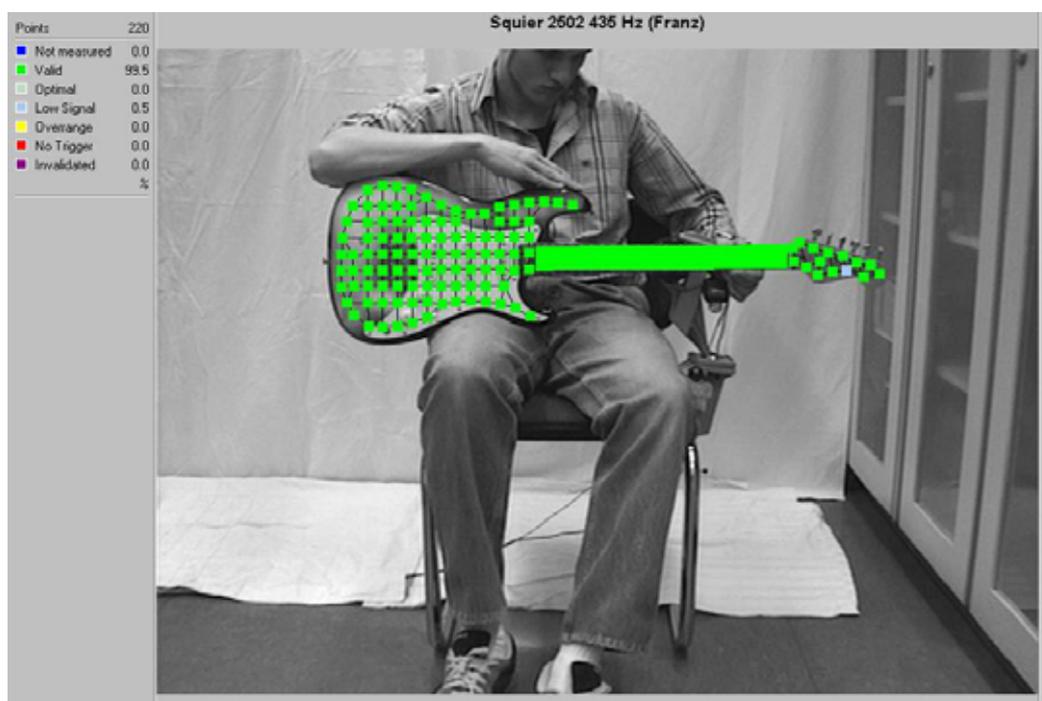


Abb. 48. Messgitter bei der Messung mit VP KA in sitzender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Untersuchung mit mehreren „natürlichen“ Randbedingungen, bei der neben anderen Instrumenten auch die E-Gitarre Squier Bullet behandelt wurde, hat Franz im Jahr 2004 durchgeführt. Der vorliegende Abschnitt nimmt auf Messungen mit drei VPn Bezug.

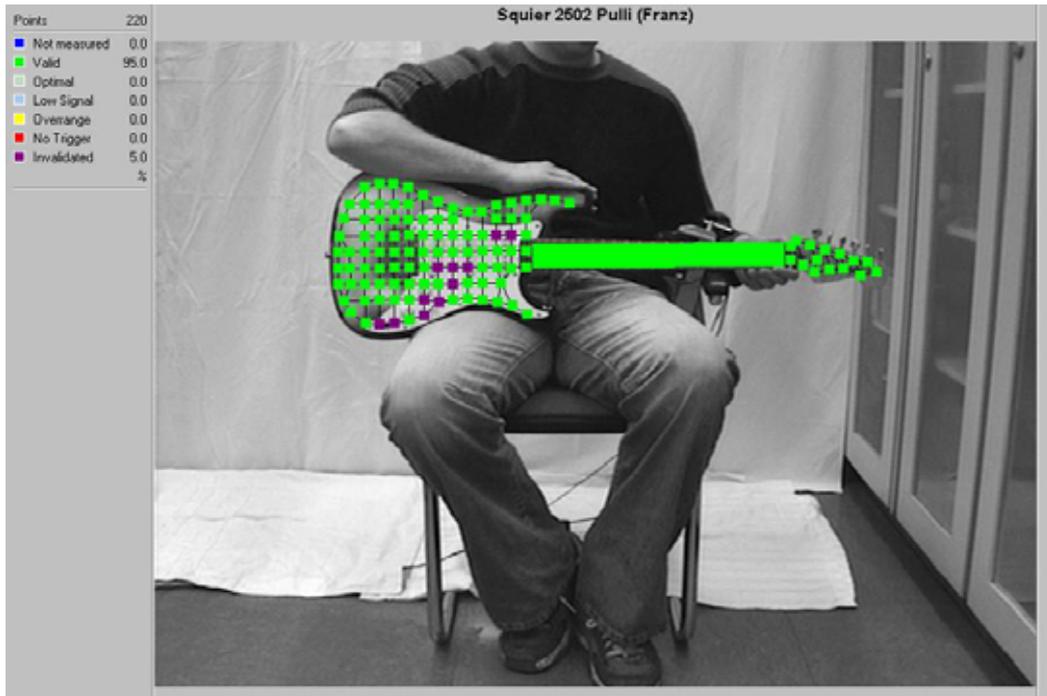


Abb. 49. Messgitter bei der Messung mit VP PU in sitzender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die Situation bei diesen Experimenten kann den Abb. 48 bis 50 entnommen werden. Der Versuchsaufbau stimmt mit demjenigen überein, der bei Gerjes (2001) und Stechel (2003) Verwendung fand. Franz (2004) hat ein Messgitter mit 220 Punkten verwendet. Da ein neuer Modus für die Definition des Gitters zur Verfügung stand, hat er die Messpunkte auf dem Hals, wo Details der Schwingung von besonderem Interesse sind, dichter gelegt als auf dem Korpus.

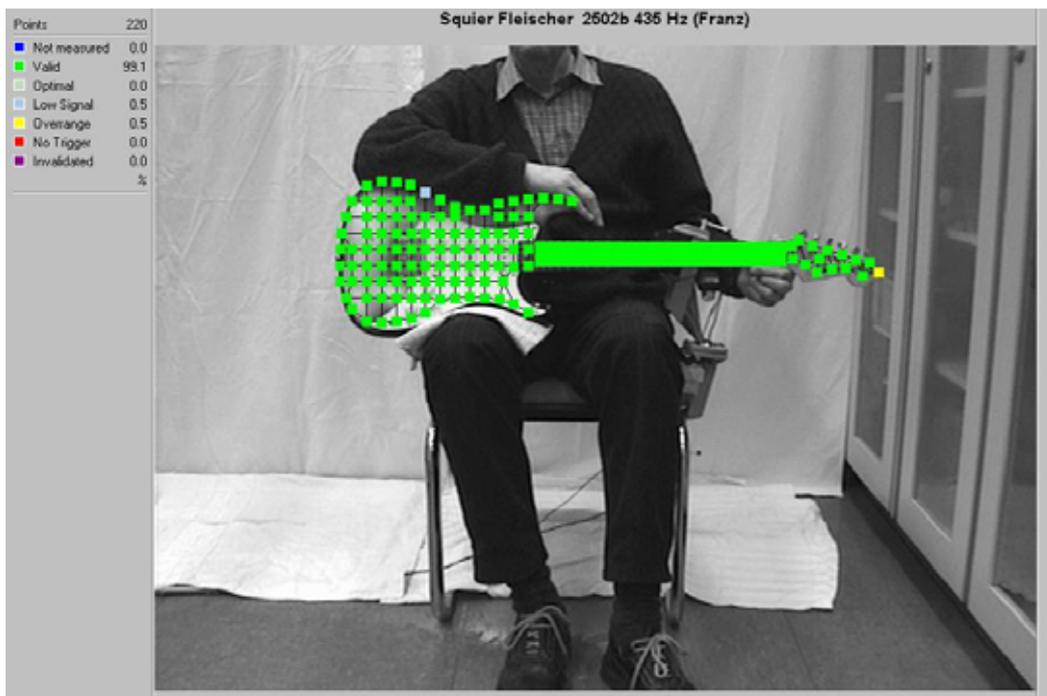


Abb. 50. Messgitter bei der Messung mit VP FL in sitzender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die Abb. 48 bis 50 lassen erkennen, dass Franz stets dasselbe Messgitter benutzt hat. Die Messbandbreite war 1 kHz, die Frequenzauflösung 2,5 Hz. Jede Einzelmessung wurde dreimal komplex gemittelt. Anders als bei den Messungen unter künstlichen Randbedingungen (Kapitel 4) wurde bei den *in-situ*-Messungen darauf verzichtet, im Anschluss an den *Area Scan* die Messungen an Punkten mit unzulänglicher Qualität zu wiederholen (*Remeasure*). Insgesamt dauerte ein Messdurchgang etwa neun Minuten. Während dieser Zeit hatte die VP ihre Position so weit wie möglich beizubehalten und gegebenenfalls nach Anweisung des Experimentators leicht zu korrigieren.

Es waren immer mindestens 95% der Messungen gültig. Der Rest der Ergebnisse konnte deshalb nicht in die abschließende Auswertung mit einbezogen werden, weil der Laserpunkt bei der Messung auf eine Saite oder einen Beschlag zu liegen kam. In manchen Fällen traf der Strahl auch auf die abgeschrägten Kanten des Instruments und wurde so reflektiert, dass keine verwertbare Lichtmenge mehr zum Messkopf zurück gelangte.

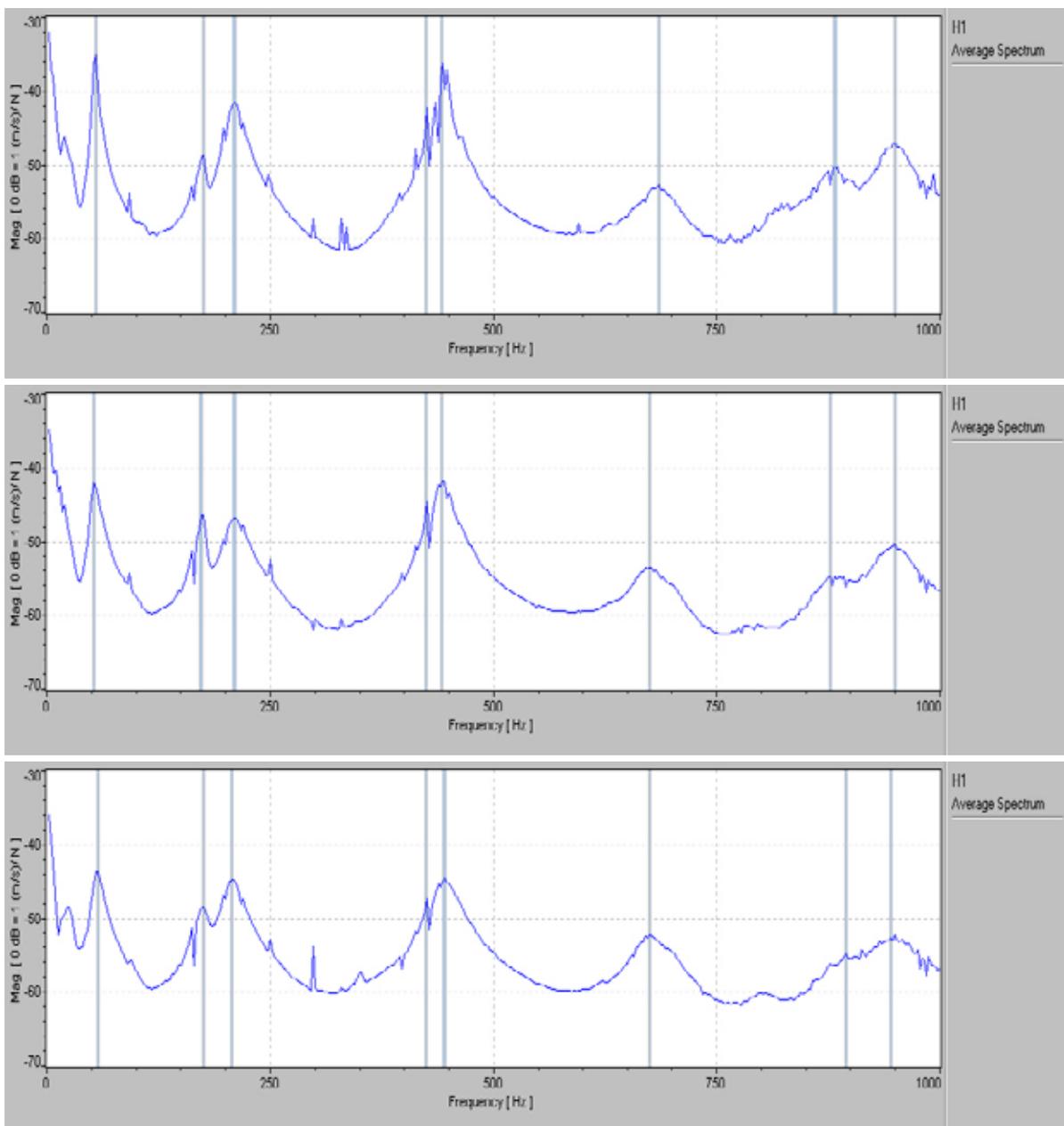
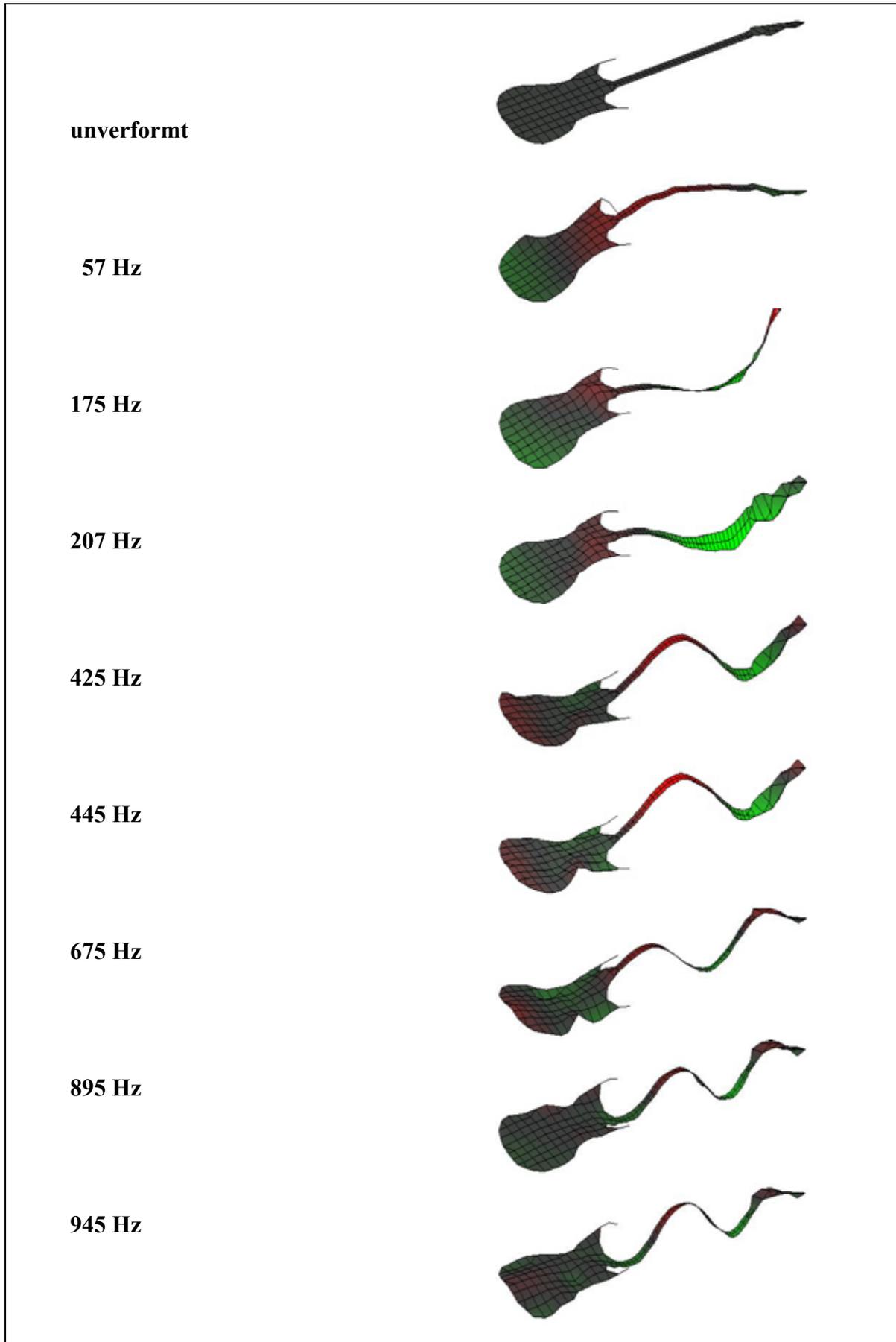


Abb. 51. Gesamt-Übertragungsfunktion der Messungen in sitzender Spielhaltung  
oben: mit der VP KA; Mitte: mit der VP PU; unten: mit der VP FL.

Tab. XII. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Sitzen am Körper der VP FL gehaltenen Gitarre



Da hier nun Messergebnisse mit drei Personen unter identischen Messbedingungen vorliegen, ist ein Vergleich in Hinsicht auf die inter-individuellen Unterschiede möglich. Dies beinhaltet, die von den verschiedenen VPn herrührenden Diskrepanzen aufzufinden und zu quantifizieren. Die Auswertung ergibt, dass die charakteristischen Betriebsschwingungsformen weitgehend übereinstimmen. Da ihr Vergleich im Einzelnen schwierig ist, sollen die Gesamt-Übertragungsfunktionen miteinander verglichen werden. Sie sind in Abb. 51 zusammengestellt.

Die Maxima, an Hand derer die charakteristischen Frequenzen bestimmt werden, sind durch Bänder markiert. Die dadurch definierten charakteristischen Frequenzen stimmen in allen drei Fällen sehr gut überein. Sie variieren im Allgemeinen um höchstens 2,5 Hz, was der Frequenzauflösung der FFT entspricht. Etwas größere Abweichungen zeigen sich erst bei den höherfrequenten flachen Maxima. So tritt das Maximum, das für zwei VPn (PU und FL) bei 675 Hz lokalisiert wird, bei der VP KA bei 685 Hz auf. Einem schwach ausgeprägten lokalen Maximum wird je nach VP eine Frequenz zwischen 877 und 895 Hz zugeordnet. Das letzte, etwas deutlicher ausgeprägte Maximum tritt bei 945 Hz bzw. 950 Hz auf. Die größte Schwankungsbreite beträgt somit etwa 2%. Es kann festgestellt werden, dass die inter-individuellen Diskrepanzen sich in Hinsicht auf die Frequenzen in einem engen Rahmen bewegen. Sie sind so gering, dass es hinnehmbar erscheint, eine der Messungen auszuwählen und als repräsentativ für das Ensemble der drei Experimente zu präsentieren.

Hierfür wurden die charakteristischen Betriebsschwingungen ausgewählt, wie sie die Messung mit der VP FL ergeben haben. Als 3D-Bilder sind sie in Tab. XII zusammengestellt. Ergänzend findet sich eine farbige Visualisierung samt Videobild in Anhang 4. Ein Vergleich der Schwingungsbilder untereinander zeigt, dass diejenigen für 175 Hz und 207 Hz hinsichtlich der Biegung identisch sind, sich jedoch stark in der überlagerten Torsion unterscheiden. Dies gilt ebenfalls für 425 Hz und 445 Hz, wobei die differierenden Schwingungsanteile hier weniger stark ins Gewicht fallen. Eine ähnliche Variantenbildung ist bei 895 Hz und 945 Hz zu beobachten. Hier treten kleine Unterschiede der Schwingung auf dem Korpus auf, die sich in den Bildern von Tab. XII nur schwach darstellen. Die weitgehende Übereinstimmung der drei Messkurven in Abb. 51 bestätigt somit den Befund von Abschnitt 5.3 und lässt ihn repräsentativ nicht nur für eine, sondern für einen größeren Kreis von Personen erscheinen.

## 5.5. Zusammenfassende Bemerkung

Im vorliegenden Kapitel sind Experimente beschrieben, bei denen die Gitarre unter wirklichkeitsnahen Bedingungen untersucht worden ist. Mit einem kleinen elektromagnetischen Erreger wurde sie am Hals zum Schwingen gebracht. In sitzender Spielhaltung haben verschiedene VPn das Instrument gehalten, während mit dem *Scanning Vibrometer* die wandnormale Schwingung der Oberfläche abgetastet wurde. Ein Messdurchgang dauerte in aller Regel weniger als zehn Minuten, so dass es für die VP keine große Schwierigkeit bedeutete, die Position der Gitarre während der Dauer der Messung beizubehalten.

Über mehrere Jahre hinweg haben verschiedene Experimentatoren Messungen mit verschiedenen VPn durchgeführt. Teilweise waren die Messparameter unterschiedlich. Die Messergebnisse differieren weniger, als vermutet werden könnte. Tab. XIII fasst sie zusammen. Die charakteristischen Schwingungsformen sind im Wesentlichen durch Biegung geprägt. In der Tabelle sind die Biegeschwingungen durch die Anzahl der Knoten auf dem gesamten Instruments charakterisiert. Wenn Varianten dadurch entstehen, dass sich Torsion überlagert, ist dies in Klammern vermerkt.

Tab. XIII. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, die VPn in sitzender Spielhaltung auf dem rechten Unterschenkel halten

Charakteristische Frequenz der Biegeschwingung	Anzahl der Knoten
52 Hz ... 57 Hz	2
170 Hz ... 175 Hz	3 (+ Torsion)
207 Hz ... 210 Hz	3 (+ Torsion)
422 Hz ... 425 Hz	4 (+ Torsion)
440 Hz ... 445 Hz	4 (+ Torsion)
675 Hz ... 690 Hz	5
945 Hz ... 950 Hz	6

Die charakteristischen Frequenzen, bei denen diese Schwingungsformen auftreten, bewegen sich innerhalb eines sehr engen Rahmens. In manchen Fällen entsprechen die Abweichungen der Frequenzauflösung, die der Experimentator für die Messung gewählt hat. Die inter-individuellen Unterschiede sind bei Weitem nicht so groß sind, dass sie eine *in-situ*-Messung als sinnlos erscheinen ließen.

Deutlich kristallisieren sich im Bereich bis 1 kHz fünf Hauptformen der Biegung heraus:

- Die erste Form mit zwei Knoten tritt zwischen 52 Hz und 57 Hz auf. Sie liegt damit unterhalb des „Betriebsbereiches“ der Grundfrequenzen einer Gitarre in Standard-Stimmung, der bei 82 Hz beginnt.
- Zwischen 170 Hz und 210 Hz treten Schwingungen auf, die wesentlich durch Biegung mit drei Knoten gekennzeichnet sind. Zusätzliche Torsion überlagert sich so, dass Varianten entstehen, die deutlich voneinander zu unterscheiden sind. Abb. 52 gibt zwei Beispiele wieder. Es ist der Betrag dargestellt, der in Grautönen kodiert ist. Man kann sich eine weiße Gitarre vorstellen, auf die dunkle Mohnkörner gestreut sind. Bringt man die Gitarre mit 175 Hz zum Schwingen, erhält man die obere Chladni'sche Klangfigur. Auf den tieferen Bündlen des Halses bildet sich ein Schwingungsbauch längs der Basssaiten, d.h. nahe dem Daumen der linken Hand aus. Wird jedoch mit 210 Hz angeregt, entsteht ein Bauch bei den Diskantsaiten, also nahe den übrigen Fingern der linken Hand der VP (Abb. 52 unten). Man beobachtet eine laterale Abhängigkeit dergestalt, dass der Hals sich nicht nur verbiegt, sondern stellenweise auch kippt. So zeigt Abb. 52 unterschiedliche Erscheinungsformen der Überlagerung zweier Schwingungsarten, einer Biegeschwingung mit drei Knoten und einer Torsionsschwingung. Dass die Beweglichkeit des Halses in Querrichtung unterschiedlich sein kann, war bereits bei der Messung der Konduktanz beobachtet worden.
- Zwischen 422 Hz und 425 Hz sowie zwischen 440 und 445 Hz weist die Gesamt-Übertragungsfunktion regelmäßig je ein lokales Maximum auf. Die zugehörigen Schwingungsformen unterscheiden sich nur marginal. Gemeinsam ist ihnen ausgeprägte Biegung mit vier Knoten. Im Allgemeinen ist das zweite Maximum höher, d.h. die Schwingung bei 440/445 Hz weist die größere Amplitude auf.
- Eine Biegeschwingung mit fünf Knoten wird bei Frequenzen zwischen 675 Hz und 690 Hz beobachtet. Torsion spielt keine wesentliche Rolle.
- Bei einer Frequenz zwischen 945 Hz und 950 Hz bildet der Instrumentenkörper eine Biegeschwingung aus, die längs des Korpus sechs Knoten aufweist. In manchen Fällen zeigt die

Übertragungsfunktion ein Nebenmaximum etwas unterhalb von 900 Hz, bei dem sich Teile des Korpus anders bewegen als bei 945/945 Hz, der Hals jedoch in praktisch derselben Weise schwingt. Diese Schwingung dürfte die Ursache für das Maximum der Stegkonduktanz sein, das um 900 Hz beobachtet wurde; vgl. Abschnitt 2.3.



*Abb. 52. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung. Dargestellt ist der Betrag, wobei hell für einen Schwingungsbauch, dunkel für einen Schwingungsknoten steht.  
Oben: für 175 Hz;  
unten: für 210 Hz.*



Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Kapitel 4, insbesondere Abschnitt 4.5, zeigt in einigen Teilen Übereinstimmung. Obwohl dort künstliche Lagerbedingungen verwendet wurden, gibt es Ähnlichkeiten in Hinsicht auf die Schwingungsfrequenzen und -formen. Bei Aufhängung der Gitarre am Kopfende (Tab. IX) ist diese Übereinstimmung für die Biegeschwingung mit fünf Knoten, d.h. ab etwa 675 Hz zu beobachten. Ist das Instrument am Korpusende eingespannt (Tab. VIII) treten verwandte Schwingungen dann auf, wenn die Biegung mindestens vier Knoten ausbildet, was ab etwa 450 Hz der Fall ist. Am weitesten geht die Übereinstimmung bei der Lagerung im Gitarrenständer (Tab. X). Ab etwa 175 Hz, sobald die Biegeschwingung drei Knoten aufweist, liefert die Messung im Gitarrenständer ähnliche Schwingungsformen wie die *in-situ*-Messung in sitzender Spielhaltung.

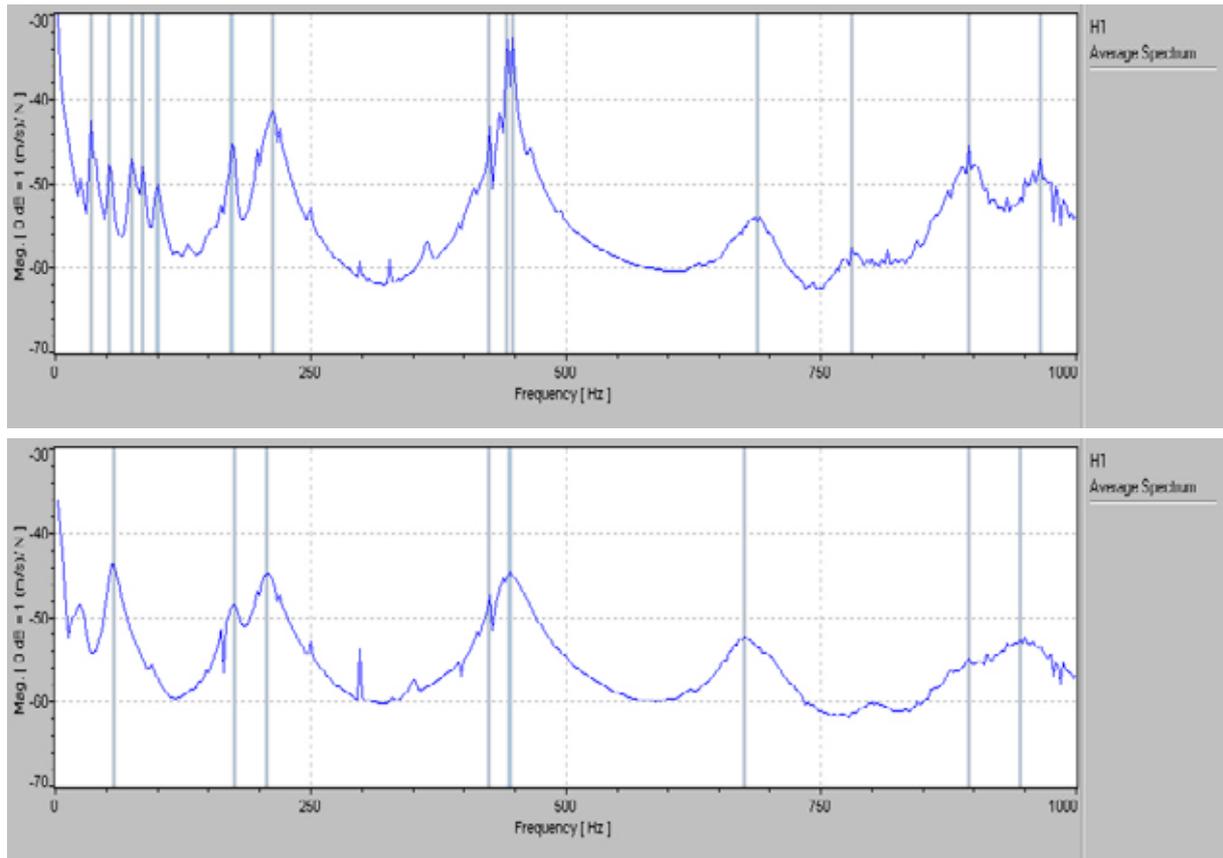


Abb. 53. Gesamt-Übertragungsfunktionen von Messungen am gesamten Instrument nach Franz (2004).  
 Oben: im Gitarrenständer gem. Abschnitt 4.4.5; unten: in situ an VP FL.

Dies soll abschließend am Beispiel zweier Experimente von Franz (2004) belegt werden. Die Gesamt-Übertragungsfunktionen für die Mess-Bandbreite 1 kHz sind in Abb. 53 einander gegenüber gestellt. Das obere Diagramm bezieht sich auf die Messung im Gitarrenständer, das untere auf eine Messung, bei der die Gitarre im Sitzen am Körper gehalten wurde. Bei tiefen Frequenzen unterscheiden sich die beiden Messkurven. Ab etwa 175 Hz erkennt man jedoch eine gewisse Verwandtschaft der Kurven. Deren lokalen Maxima liegen bei nahezu den gleichen Frequenzen. In Hinsicht auf die absoluten Werte zeigen sich jedoch Diskrepanzen: Die Maxima nehmen höhere Werte an, wenn die Gitarre im Gitarrenständer „künstlich“ gelagert wird. Im Vergleich dazu bringt die „natürliche“ Lagerung am menschlichen Körper offenbar eine größere Dämpfung mit sich, was flachere Resonanzkurven zur Folge hat.

## 6. MESSUNG DER STRUKTURSCHWINGUNGEN *IN SITU* IN STEHENDER SPIELHALTUNG

Die Messungen des letzten Kapitels haben gezeigt, dass es durchaus möglich ist, die Schwingungen des Instruments in einer „natürlichen“ Lagerung zu untersuchen. Im Kapitel 5 war dafür die sitzende Spielhaltung ausgewählt worden. Da die Gitarre sehr häufig im Stehen gespielt wird, erscheint es angebracht, auch diese Körperhaltung in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Im folgenden Kapitel 6 werden die Schwingungen des Instruments gemessen und visualisiert, wenn männliche Personen sie am Körper halten und dabei aufrecht stehen.

### 6.1. Versuchsmethode und –aufbau

Der Versuchsaufbau war derselbe wie derjenige, der im vorhergehenden Kapitel, insbesondere in Abschnitt 5.4, Verwendung fand. Franz (2004) hat zur Messung nach wie vor das *Laser Scanning Vibrometer* von Polytec verwendet. Um diffuse Reflexion des Laserlichts sicherzustellen, war die Oberfläche der Gitarre besprüht. Die VP stand aufrecht und lehnte sich gegen einen hohen Labortisch, an dem der Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) befestigt war. Der Erreger war in einem Platinenschraubstock festgeklemmt und konnte mit einem Kugelgelenk so positioniert werden, so dass der aufgeschraubte Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200) senkrecht von hinten gegen den Hals drückte. Abb. 54 gibt die Konfiguration für die Anregung der Schwingung wieder.

Abb. 54. Labortisch mit Schraubstock, Schwingerreger B&K 4810 und Kraftaufnehmer B&K 8200.



Die VP hatte das Instrument mit einem Trageriemen umgehängt und hielt es in stehender Spielhaltung vor dem Körper. Abb. 55 zeigt die Situation bei der Messung. Die linke Hand umfasste den Hals nahe dem Sattel. Die rechte war am Korpus aufgelegt. Da diese Messung ebenso wie die im Kapitel 5 betrachtete „vor Ort“ erfolgt, wird auch hierfür der Begriff „*in situ*“ verwendet. Aufgabe der VP war es, die Lage während des Messvorgangs so weit wie möglich beizubehalten und gegebenenfalls nach Anweisung des Experimentators geringfügig zu korrigieren.

Wie bei allen hier beschriebenen Vibrometer-Messungen war das Anregungssignal ein Pseudo-Rauschen aus dem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A. Nach Verstärkung im *Power Amplifier* B&K 2706 wurde es in den *Mini Shaker* B&K 4810 eingespeist. Die VP drückte den Hals der Gitarre in der Höhe des Bundes Nr. 7 gegen den *Force Transducer* B&K 8200.

Dessen Signal wurde in einem *Conditioning Amplifier* B&K 2626 verstärkt und stellte die Eingangsgröße bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen dar. Die Schwinggeschwindigkeit normal zur Oberfläche wurde mit dem *Optical Scanning Head* OFV 055 aus der Dopplerverschiebung des Laserlichts bestimmt. An jedem Punkt war dieser Messwert die Ausgangsgröße für die Übertragungsfunktion Schwinggeschwindigkeit/ Anregungskraft, die somit eine Transfer-Admittanz darstellt. Die Signale wurden mit Hilfe der Schneller Fourier-Transformation (FFT) analysiert. Um die Qualität der Ergebnisse zu steigern, wurde über drei Messungen komplex gemittelt.



Abb. 55. Gitarre auf dem Schoss der VP FL und am Bund Nr. 7 über einen Schwingerreger B&K 4810 angeregt.

Der Experimentator Franz (2004) hat das 220 Punkte umfassende Messgitter bei sämtlichen Experimenten, die in diesem Kapitel beschrieben sind, unverändert beibehalten. Wie bereits in Abschnitt 5.4 beschrieben, hat er als Messbandbreite 1 kHz gewählt. Mit 400 FFT-Linien folgte daraus die Frequenzauflösung 2,5 Hz. Welche Betriebsschwingungsformen dargestellt werden sollten, wurde an Hand von lokalen Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktion festgelegt. Wiederum werden die Frequenzen, bei denen diese Übertragungsfunktion maximal wird, als „charakteristischen Frequenzen“ und die Schwingungsmuster, die sich dafür ergeben, als „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ bezeichnet.

## 6.2. Messung mit der Versuchsperson HE

Abb. 56 gibt die Situation bei der Messung mit der VP HE wieder. Die Gitarre wurde an einem Lederriemen getragen, der über die Schulter geführt war. Der Korpus hatte Kontakt mit dem Bauch und dem rechten Unterarm der Person. Der Hals wurde beim Sattel von der linken Hand umfasst und gegen den Schwingerreger gedrückt, der nahe dem Bund Nr. 7 positioniert ist. Bei dieser Messung wurden die Teilergebnisse für alle 220 Messpunkte als gültig (*valid*) eingestuft.

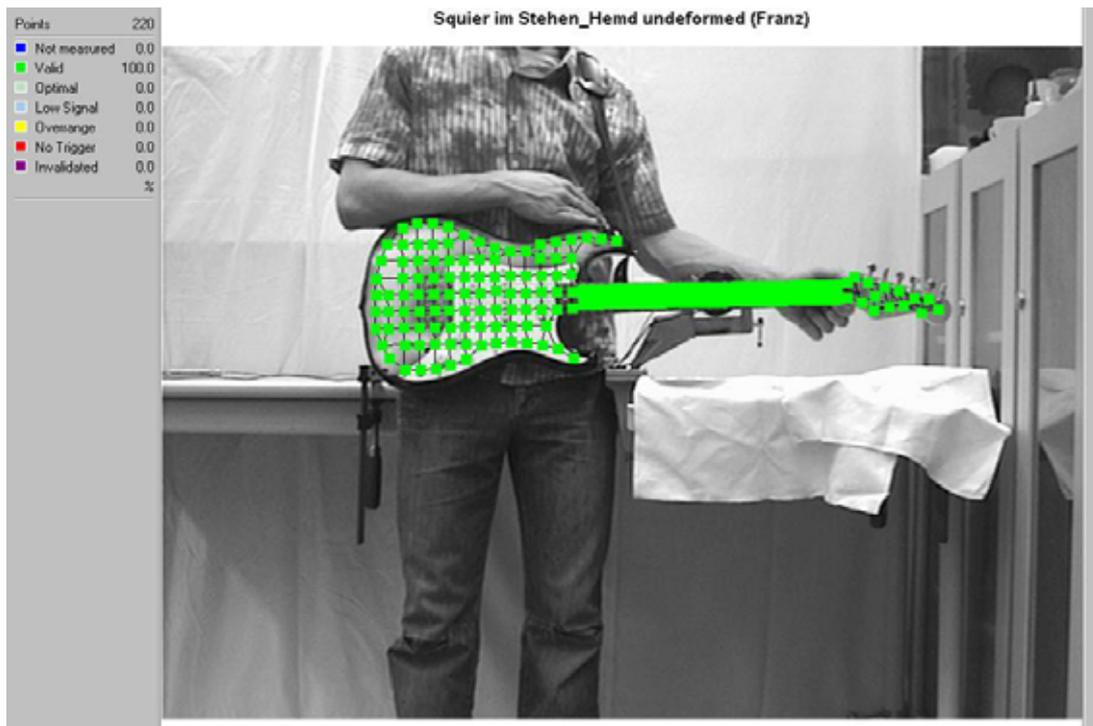


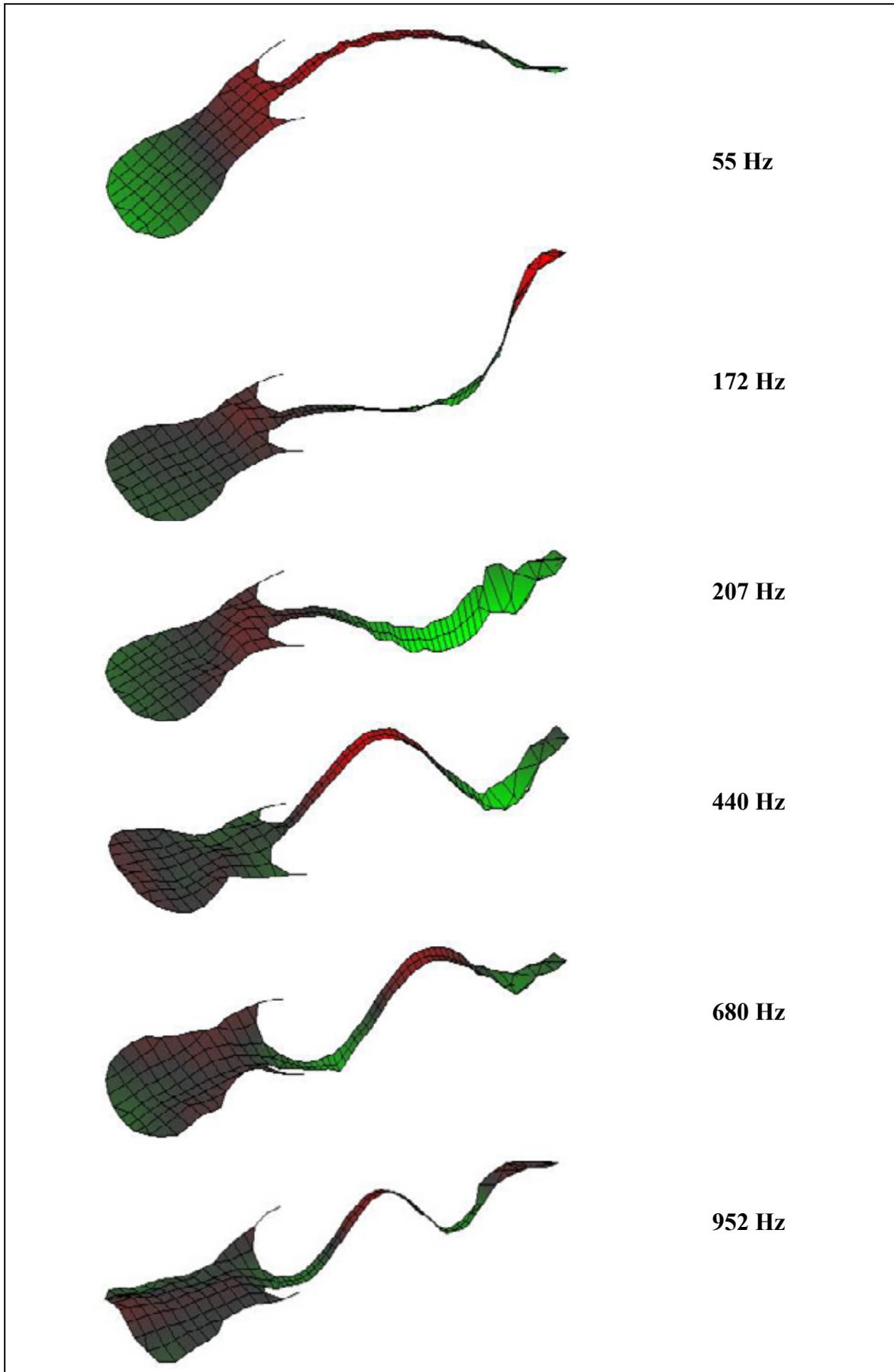
Abb. 56. Messgitter bei der Messung mit VP HE in stehender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die wesentlichen Ergebnisse sind als 3D-Bilder in Tab. XIV zusammengefasst. Auf eine Wiedergabe der unverformten Struktur ist dabei verzichtet. Verwandte Schwingungsmuster wurden nur für das jeweils größte lokale Maximum dargestellt. Die Varianten der Schwingungen bei 440 Hz und 952 Hz, die bei etwa 425 Hz und etwas unterhalb von 900 Hz auftreten, sind weggelassen.

Der Vergleich mit Tab. XII in Abschnitt 5.4 zeigt weitestgehende Übereinstimmung, obwohl eine andere VP an einem anderen Tag die Gitarre in einer anderen Spielhaltung trug. Nicht nur die charakteristischen Frequenzen, bei denen die Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion liegen, sondern auch die charakteristischen Betriebsschwingungen sind weitestgehend identisch. Bereits hier zeichnet sich ab, dass es für die Schwingung der Gitarrenstruktur offenbar keinen großen Unterschied macht, ob eine Person sie umhängt oder auf den Oberschenkel legt.

Ergänzend sind im Anhang ausgewählte Ergebnisse der Messung mit der VP HE in stehender Spielhaltung beigegefügt. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche sind nur die Hauptschwingungsformen zusammengestellt, die innerhalb der Grenzen 82 Hz (Grundfrequenz der leeren E<sub>2</sub>-Saite) und 1 kHz (obere Grenze des Mess-Frequenzbereiches) liegen. Die tief-frequente Schwingung bei 55 Hz ist weggelassen, da sie außerhalb der Grundfrequenzen einer normal gestimmten Gitarre liegt. In Anhang 5 ist die 3D-Darstellung von Tab. XIV mit zusätzlicher Unterstützung durch die Farben Rot und Grün verwendet. Anhang 6 zeigt Bilder derselben Schwingungen, die farblich kodiert über das Videobild gelegt sind. Die Farbe Rot steht für Schwinggeschwindigkeit aus der Ebene heraus, Grün für Schwinggeschwindigkeit in die Ebene hinein. Schwingungsbäuche zeichnen sich hell ab. Dunkle Bänder markieren Schwingungsknoten. Varianten sind in aller Regel nicht wiedergegeben. Lediglich die Biegeschwingung bei etwa 200 Hz, die sich in Folge der überlagerten Torsion in zwei deutlich unterscheidbare Mischformen aufspaltet, ist mit beiden Varianten vertreten.

Tab. XIV. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Stehen am Körper der VP HE gehaltenen Gitarre



### 6.3. Messung mit der Versuchsperson PU

Dem Statusbericht in der linken oberen Ecke von Abb. 57 zufolge wurden bei der Messung mit einer anderen Person über 93% der Teil-Ergebnisse als gültig eingestuft. Die charakteristischen Schwingungsfrequenzen und –formen sind in Anhang 7 zusammengefasst. Es ist die Darstellung des Augenblickswertes in die in Rot-Grün-Kodierung gewählt. Zur besseren Unterscheidbarkeit von den übrigen Ergebnissen, denen andersartige Mess-Situationen zu Grunde liegen, ist das Videobild unterlegt.

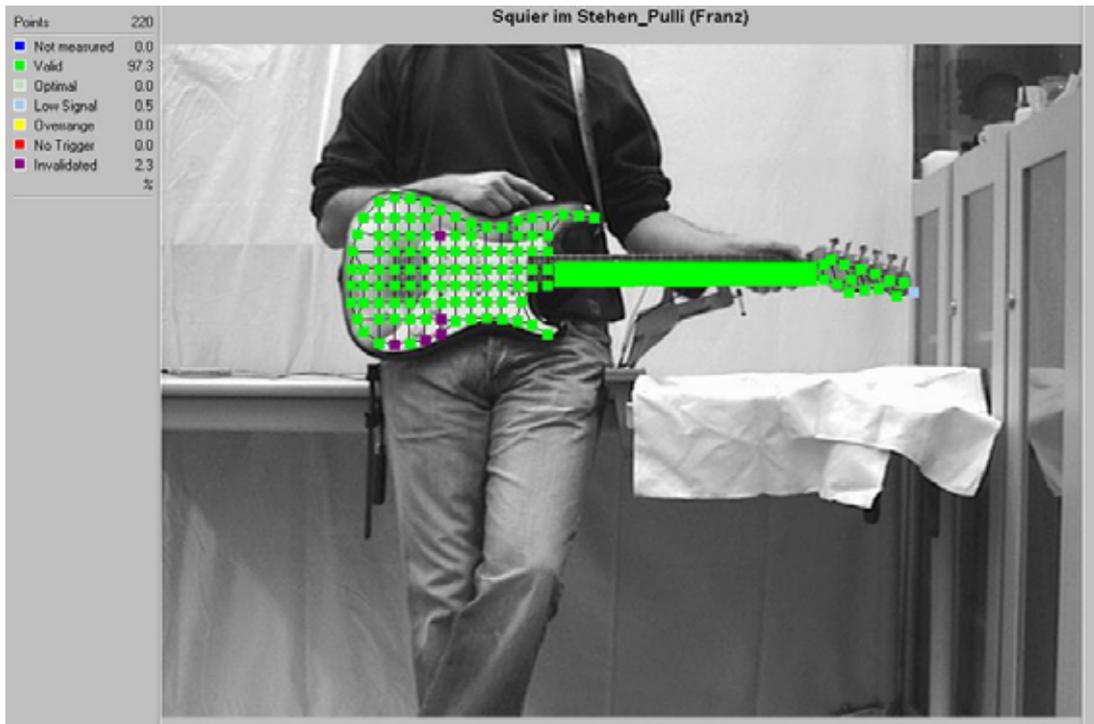


Abb. 57. Messgitter bei der Messung mit VP PU in stehender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Die Versuchsergebnisse von Anhang 7 weisen große Ähnlichkeit mit denjenigen von Anhang 6 auf. Die Frequenzen differieren um höchstens 5 Hz, was dem Doppelten der gewählten Frequenzauflösung entspricht. Da auch die Schwingungsbilder weitgehend identisch sind, kann von weitestgehender Übereinstimmung der Ergebnisse für die beiden VPn gesprochen werden.

### 6.4. Messung mit der Versuchsperson TS

Die Situation bei der Messung, die Franz (2004) mit einer weiteren VP durchgeführt hat, ist Abb. 58 zu entnehmen. Die Messungen waren zu 100% gültig. Die Person TS umfasste den Hals unweit der Anregungsstelle in der Nähe des Bundes Nr. 5. Entgegen der Erwartung beeinflusst dies weder die charakteristischen Frequenzen noch die zugehörigen Schwingungsformen in einem Rahmen, der die bisher beobachtete Schwankungsbreite überschreiten würde. Ein Vergleich der Resultate von Anhang 8 mit den übrigen Ergebnissen bestätigt diesen Befund.

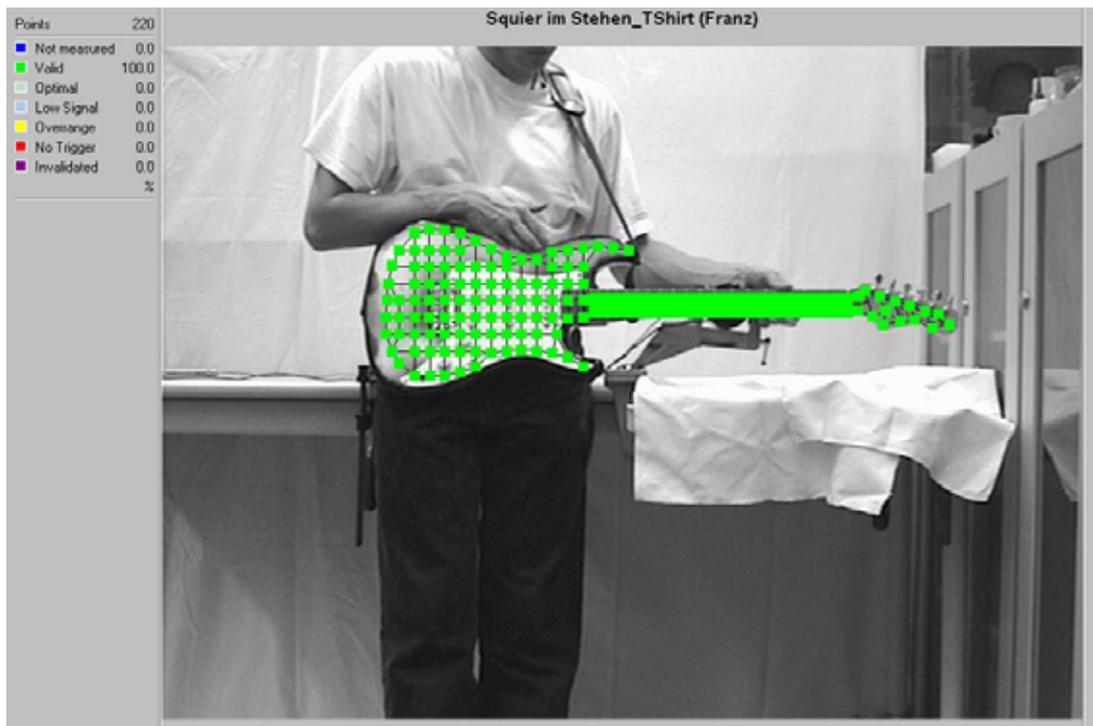


Abb. 58. Messgitter bei der Messung mit VP TS in stehender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

## 6.5. Messung mit der Versuchsperson FL



Abb. 59. Messgitter bei der Messung mit VP FL in stehender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Tab. XV. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der im Stehen am Körper der VP FL gehaltenen Gitarre

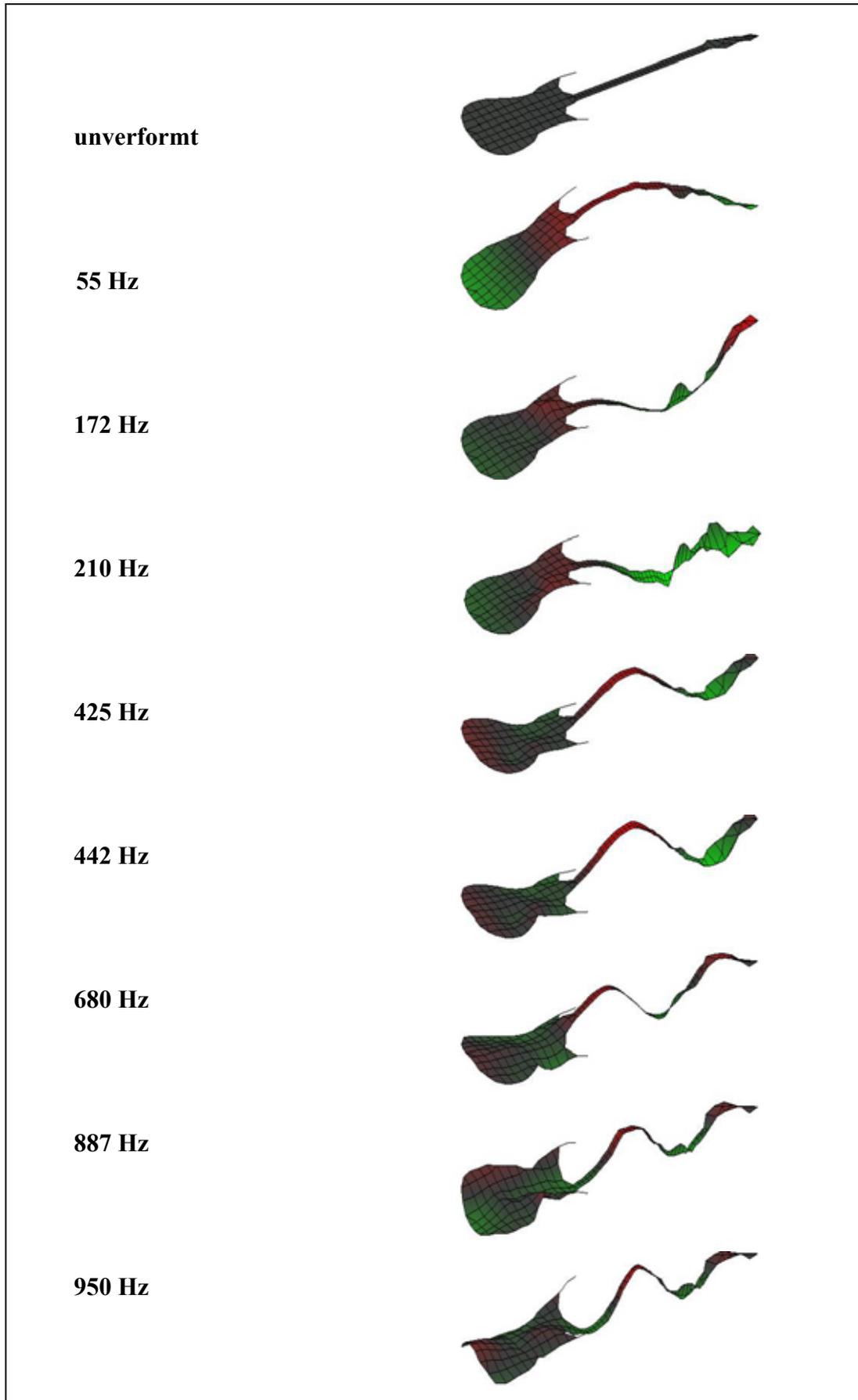


Abb. 59 bezieht sich auf eine vierte Messung in stehender Spielhaltung, bei der die VP FL die Gitarre hielt und mit der linken Hand den Hals nahe dem Sattel umfasste. Mit einer einzigen Ausnahme wurden alle Messpunkte als gültig eingestuft. Die Ergebnisse sind unter Einbeziehung sämtlicher Varianten in Tab. XV aufgeführt. Ergänzt wird diese Zusammenstellung durch Anhang 8. Dort sind die die Grundformen in farbiger Darstellung des Augenblickswerts wiedergegeben, die dem Videobild überlagert ist. Auch diese weitere Messreihe liefert Ergebnisse, die mit denjenigen der Abschnitte 6.2 bis 6.4 konsistent sind.

## 6.6. Zusammenfassende Bemerkung

Zum ersten Mal im Verlaufe der *in-situ*-Untersuchungen von Korpuschwingungen wurde die Gitarre in stehender Spielhaltung betrieben. Abgesehen von der unterschiedlichen Körperhaltung waren die Versuchsbedingungen dieselben, wie sie Franz (2004) auch bei den Messungen in sitzender Spielhaltung (Abschnitt 5.4) verwendet hat. Da auch dieselben Personen beteiligt waren, ist ein direkter Vergleich der Resultate zulässig. Dies gilt beispielsweise für die VP FL, die an beiden Experimenten teilgenommen hat.

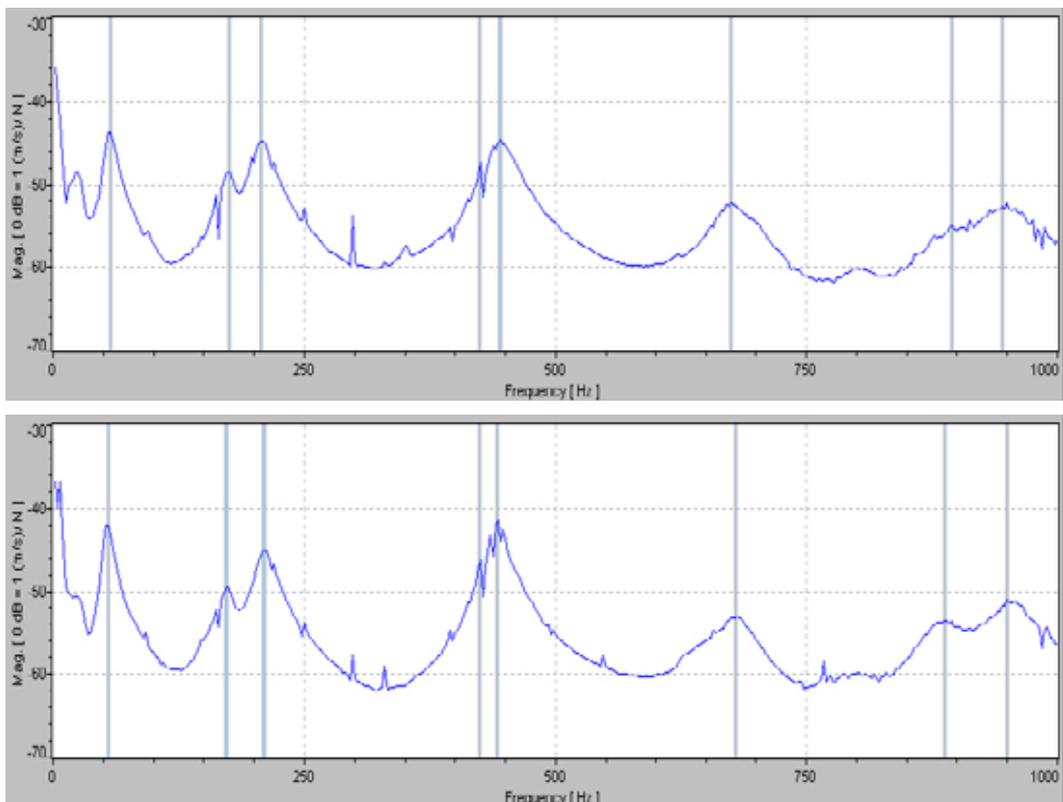


Abb. 60. Gesamt-Übertragungsfunktion von Messungen, bei denen ein und dieselbe VP die Gitarre oben: in sitzender Spielhaltung bzw. unten: in stehender Spielhaltung hält.

In Abb. 60 sind die zugehörigen Gesamt-Übertragungsfunktionen einander gegenüber gestellt. Im Großen und Ganzen weisen die beiden Messkurven große Ähnlichkeit auf. In aller Regel erreichen die Maxima bei der Messung im Stehen (unten) etwas größere Werte, als wenn die Person sitzt (oben). Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Gitarre eine etwas größere Kontaktfläche zum Körper hat, wenn sie im Sitzen nicht nur am Bauch, sondern zusätzlich auch am Oberschenkel aufliegt. Eine höhere Dämpfung der Schwingungen könnte die Folge sein, was sich darin widerspiegelt, dass die Maxima weniger ausgeprägt sind.

*Tab. XVI. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, die ein und dieselbe VP in sitzender Spielhaltung bzw. in stehender Spielhaltung hält*

<b>Charakteristische Frequenz im Sitzen</b>	<b>im Stehen</b>	<b>Anzahl der Knoten der charakteristischen Schwingungsform</b>
57 Hz	55 Hz	2
175 Hz	172 Hz	3 (+ Torsion)
207 Hz	210 Hz	3 (+ Torsion)
425 Hz	425 Hz	4 (+ Torsion)
445 Hz	442 Hz	4 (+ Torsion)
675 Hz	680 Hz	5
895 Hz	887 Hz	6
945 Hz	950 Hz	6

Die lokalen Maxima der Übertragungsfunktionen, ermittelt bei sitzender bzw. stehender Spielhaltung, treten jeweils bei nahezu der gleichen Frequenz auf. Tab. XVII lässt erkennen, dass die charakteristischen Frequenzen in aller Regel um höchstens 5 Hz, d.h. im Rahmen des Doppelten der Frequenzauflösung, differieren. Die charakteristischen Schwingungsformen, die sich bei diesen Frequenzen einstellen, sind für sitzende und stehende Spielhaltung weitestgehend identisch. Eine Ausnahme macht die Biegeschwingung mit sechs Knoten bei etwa 900 Hz. Da deren erster Variante in den Übertragungsfunktionen ein sehr flaches lokales Maximum zugeordnet ist, kann der zugehörige Höchstwert nur mit einer Abweichung von 7,5 Hz bestimmt werden. Im Übrigen ist sowohl in Hinsicht auf die charakteristischen Frequenzen, als auch die entsprechenden Schwingungen, wie sie beispielsweise in Anhang 4 und 9 zusammengestellt sind, ein hohes Maß an Übereinstimmung festzustellen.

Abschließend soll noch geprüft werden, wie groß die inter-individuellen Unterschiede sind. In Tab. XVII sind die Frequenzen der Grundtypen der Schwingungen der Gitarre aufgeführt. Dabei sind die Bereiche vermerkt, innerhalb derer die zugehörigen charakteristischen Frequenzen bei den vier VPn lagen, die an den Messungen von Franz (2004) teilgenommen haben.

*Tab. XVII. Charakteristische Biegeschwingungen der Gitarre, die vier VPn in stehender Spielhaltung am Körper halten*

<b>Charakteristische Frequenz der Biegeschwingung</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>
55 Hz	2
172 Hz	3 (+ Torsion)
205 Hz ... 210 Hz	3 (+ Torsion)
440 Hz ... 442 Hz	4
675 Hz ... 680 Hz	5
947 Hz ... 952 Hz	6

Der Vergleich zeigt bei 55 Hz (zwei Knoten) sowie bei 172 Hz (drei Knoten mit Torsion) vollständige Kongruenz. Bei den drei anschließenden Schwingungen bis 680 Hz (drei Knoten mit Torsion, vier bzw. fünf Knoten) beträgt die Varianz höchstens 5 Hz und damit das Zwei-

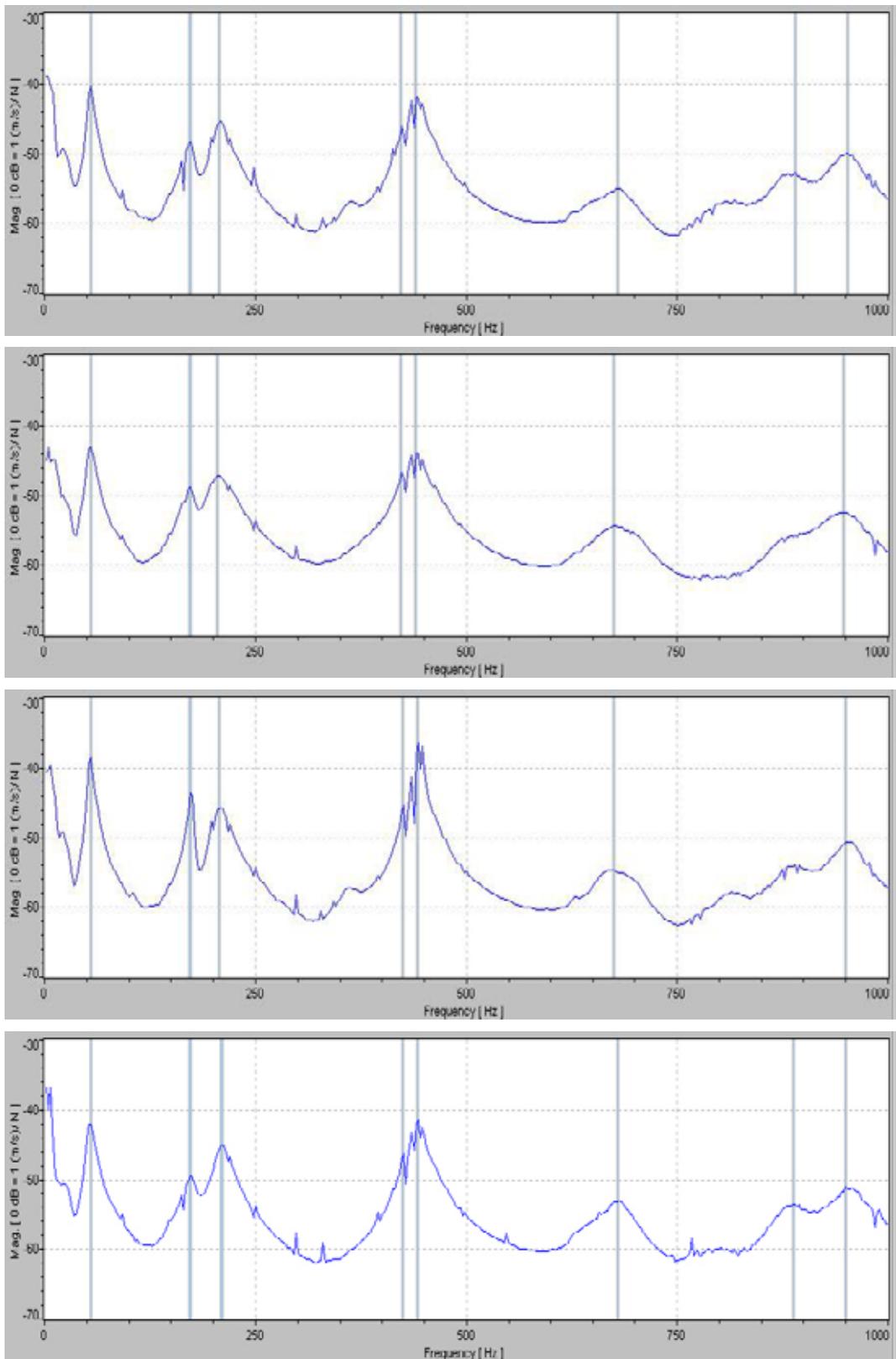


Abb. 61. Gesamt-Übertragungsfunktion der Messungen mit verschiedenen VPn im Stehen;  
von oben nach unten: VP HE, VP PU, VP TS und VP FL.

fache der Frequenzauflösung. Lediglich bei etwa 950 Hz können sich die charakteristischen Frequenzen der Biegschwingung mit sechs Knoten um das Dreifache der Frequenzauflösung unterscheiden.

Abb. 61 erleichtert die Interpretation. Es wird deutlich, dass das lokale Maximum, das sich um 950 Hz ausbildet, in allen vier Übertragungsfunktionen relativ flach ist. Es prägt sich ähnlich schwach aus wie die Maxima bei etwa 680 Hz und ein Nebenmaximum etwas unterhalb von 900 Hz. Letzteres ist bei einigen VPn nur mit äußerster Mühe zu lokalisieren.

Trotz dieser Unterschiede im Detail sind die Gemeinsamkeiten der vier Messkurven nicht zu übersehen. Auch die zugehörigen Schwingungsbilder im Anhang 6 bis 9 belegen, dass es sich um gleichartige Schwingungsformen handelt, die stets bei nahezu den gleichen Frequenzen auftreten. Zwei Aussagen können gemacht werden:

- Trotz der Unterschiede im Körperbau und in der Art und Weise, wie die Gitarre im Stehen gehalten wurde, weichen die Ergebnisse für vier VPn nur in geringem Maße voneinander ab. Bereits die Messung mit einer dieser Personen liefert aussagekräftige Ergebnisse über das Schwingungsverhalten des Instruments in einer sehr wirklichkeitsnahen Randlagerung.
- Den Erkenntnissen des vorhergehenden Kapitels zufolge ist eine *in-situ*-Messung unverzichtbar. Für aussagekräftige Experimente ist die Gitarre am Körper zu halten. Im vorliegenden Kapitel hat sich jedoch gezeigt, dass im untersuchten Frequenzbereich bis 1 kHz die Messung im Stehen keine wesentlich anderen Ergebnisse liefert als diejenige im Sitzen. Es ist zu erwarten, dass bei höheren Frequenzen noch weniger Abweichungen auftreten werden. Demnach ist keine zwingende Notwendigkeit erkennbar, der VP die anstrengende Körperhaltung im Stehen zuzumuten. Aussagekräftige Ergebnisse sind auch dann zu erwarten, wenn die Gitarre in sitzender Spielhaltung gehalten wird.

## 7. MESSUNG DER HALS-KOPF-SCHWINGUNGEN IN SITZENDER SPIELHALTUNG

Die Experimente der beiden letzten Kapitel haben gezeigt, dass es möglich ist, mit der beschriebenen Messmethode die Schwingungen des Instruments *in situ*, d.h. in einer „natürlichen“ Randlagerung am Körper einer Person zu untersuchen. Im Kapitel 5 war dafür die sitzende Spielhaltung, in Kapitel 6 die stehende Spielhaltung erprobt worden. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die beiden Spielhaltungen haben sich als so gering erwiesen, dass es vertretbar erscheint, zukünftig ausschließlich im Sitzen zu messen. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche wird in diesem Kapitel nicht länger das Gesamtinstrument betrachtet, sondern lediglich untersucht, wie die Gitarre zwischen den Auflagepunkten der Saiten schwingt.

### 7.1. Versuchsmethode und –aufbau



Abb. 62. Messgitter bei der Messung der Hals-Kopf-Schwingung mit VP FL in sitzender Spielhaltung; die Gitarre wird am Bund Nr. 7 angeregt.

Auf der Korpusseite (links in Abb. 63) liegt eine Saite immer am Steg auf. Kopfseitig (rechts im Bild) kann sie am Sattel und an jedem Bund Kontakt mit dem Hals haben. Für den Spielbetrieb interessiert somit vorrangig, wie sich der Steg und der Hals bewegen. Das Messgitter wurde deshalb so gewählt, wie es Abb. 62 zu entnehmen ist. Es umfasst das Feld, das die Saiten überspannen, und den Kopf. Obwohl sich auf dem Kopf kein Saitenaufleger befindet, wurde er in die Messung mit einbezogen. Dies erleichtert die Orientierung, wenn dem Schwingungsbild kein Video-Bild unterlegt ist.

Stechel hat im Jahr 2003 eine Studie mit fünf männlichen VPn durchgeführt, bei der auch die E-Gitarre Squier Bullet untersucht wurde. Der Bereich des Instruments, den der Laserstrahl abtastet, wurde mit einem Spray behandelt. Dies bewirkt, dass die Oberfläche diffus reflektiert und einen großen Teil des Laserlichts zum Messkopf zurück wirft. Wie die übrigen Ex-

perimentatoren, die flächenhafte Schwingungsmessung durchgeführt haben, hat auch Stechel (2003) das *Laser Scanning Vibrometer* von Polytec benützt. Die Versuchseinrichtung ist bereits ausführlich zu Eingang des Kapitels 5 beschrieben worden. Die VP saß auf einem Stuhl, an dessen Armlehne ein Schwingerreger (*Mini Shaker* B&K 4810) befestigt war. Der Erreger konnte mit dem Kugelgelenk eines Platinenschraubstocks justiert werden. Die Person hielt das Instrument in sitzender Spielhaltung so vor dem Körper, dass die untere Aussparung des Korpus am rechten Oberschenkel auflag. Abb. 62 zeigt die Körperhaltung der VP und wie sie die Gitarre hielt.

Als Anregungssignal wurde Pseudo-Rauschen aus einem *Arbitrary Waveform Generator* hp 33120A verwendet, wie es sich bei den vorangegangenen Experimenten bereits bewährt hatte. Das Rauschsignal wurde über einen Leistungsverstärker B&K 2706 in den Schwingerreger eingespeist. Die VP drückte den Hals der Gitarre gegen einen Kraftaufnehmer (*Force Transducer* B&K 8200), der am Bund Nr. 7 senkrechten Kontakt mit der Rückseite hatte. Wiederrum stellte das Kraftsignal, in einem *Conditioning Amplifier* B&K 2626 verstärkt, die Eingangsgröße bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen dar.

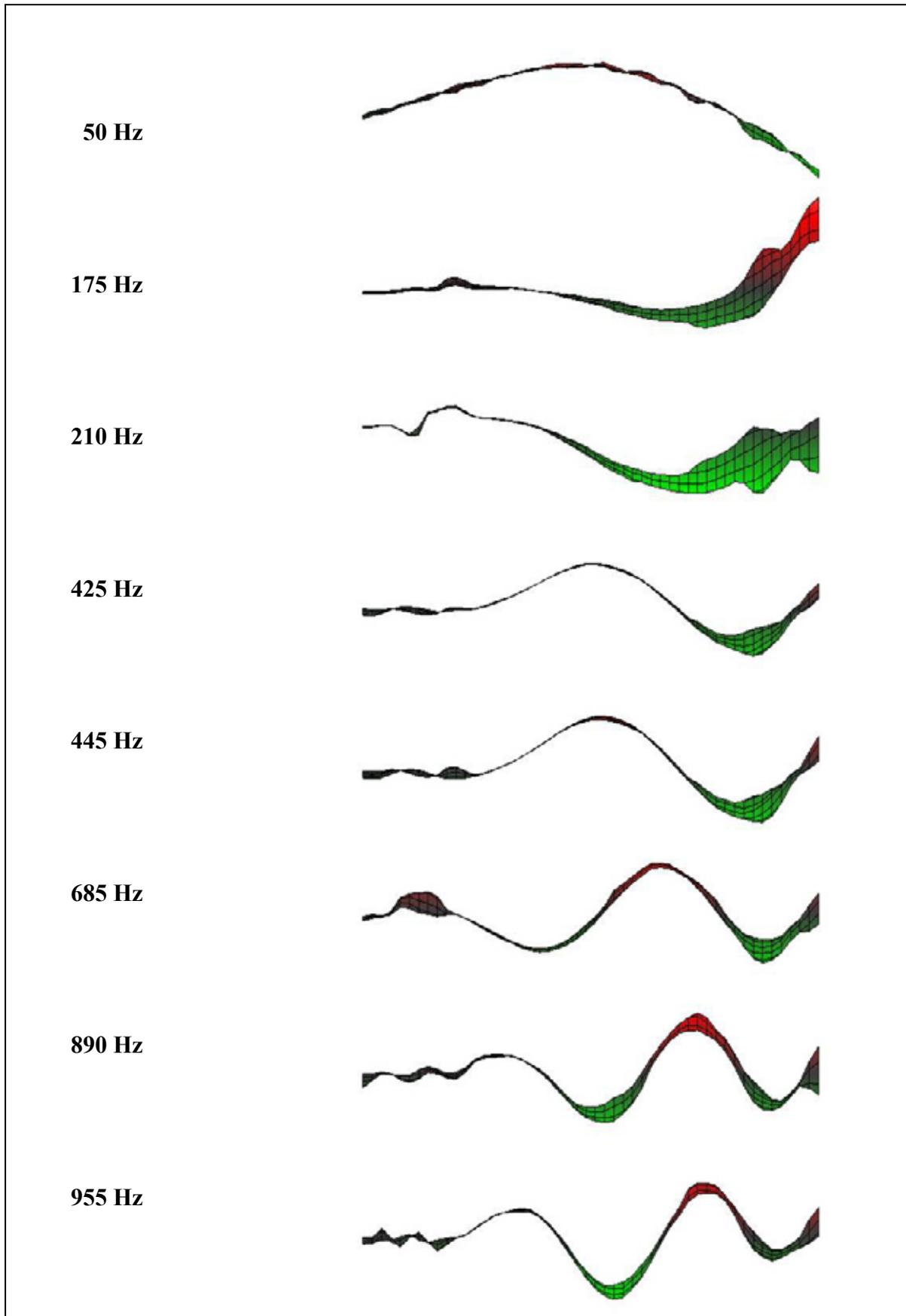
Die Schwingungen des Instruments zwischen Steg und Kopf wurden mit Hilfe des *Optical Scanning Head* OFV 055 abgetastet, der einen Laserstrahl auf den zu untersuchenden Punkt schickt. Die Schwinggeschwindigkeit am jeweiligen Messpunkt wurde aus der Dopplerverschiebung des hinlaufenden und des reflektierten Laserlichts ermittelt. Sie diente als Ausgangsgröße für die Bestimmung der Übertragungsfunktionen Schwinggeschwindigkeit/Anregungskraft. Als Messbandbreite wurde durchgängig 1 kHz gewählt. Mit 200 FFT-Linien folgte daraus die Frequenzauflösung von 5 Hz. Einige Messungen wurden mit Mittelung, andere aus Zeitgründen ohne Mittelung durchgeführt. Wie auch bei den bisherigen Messungen wurden an Hand der Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktion „charakteristische Frequenzen“ ausgewählt und die zugehörigen „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ visualisiert.

## 7.2. Messung mit der Versuchsperson FL

Abb. 62 ist die Situation beim Experiment mit der VP FL zu entnehmen. Die Teilergebnisse für die 211 Messpunkte wurden zu 97% als gültig (*valid*) eingestuft. Um den Versuchsablauf zu beschleunigen, wurde auf eine Mittelung verzichtet.

Ergebnisse dieser Messung sind zunächst als 3D-Bilder in Tab. XVIII dokumentiert. Ergänzend finden sich die Resultate in farbiger *Color-Map*-Darstellung im Anhang 10. Der Teil der Gitarre, dessen Schwingung gemessen wurde, wird in Tab. XVIII von der Seite betrachtet, so dass die unverformte Struktur einen waagerechten Strich darstellt. Es zeigt sich, dass der Steg (das linke Ende) nur wenig beweglich ist und meist einen Schwingungsknoten bildet. Die bereits bekannten Schwingungsmuster (vgl. beispielsweise Tab. XII) finden sich wieder. Bei 50 Hz ist nahe dem Sattel ein weiterer Knoten zu beobachten. Die Schwingung bei 175/210 Hz weist einen Knoten nahe dem Bund Nr. 12 auf. Da hier Biegung und Torsion kombiniert auftreten, bildet sich ein weit ausgedehnter Schwingungsbauch längs des Griffbretts bei den Basssaiten (175 Hz) bzw. bei den Diskantsaiten (220 Hz) aus. Insgesamt vier Knoten, zwei davon auf dem Griffbrett, sind bei 425/445 Hz erkennbar. Die zugehörigen Formen unterscheiden sich so wenig voneinander, dass zukünftig nur noch diejenige bei 445 Hz dargestellt wird. Drei Knoten auf dem Griffbrett bzw. vier Knoten auf dem Hals samt Kopf bzw. insgesamt fünf Knoten treten bei 685 Hz auf. Bei 890/945 Hz sind auf dem untersuchten Bereich zwischen Steg und Kopf sechs Knoten festzustellen. Abgesehen von geringfügigen Unterschieden durch überlagerte Torsion stimmen die beiden Formen so weitgehend überein, dass zukünftig nur noch die höherfrequente aufgeführt wird.

Tab. XVIII. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen von Hals und Kopf der im Sitzen am Körper der VP FL gehaltenen Gitarre



### 7.3. Messungen mit den Versuchspersonen HA, JU und KI

Stechel hat mehrere Messungen der Hals-Kopfschwingung durchgeführt, bei denen zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes dreimal im Modus *complex* gemittelt wurde. In diesem Abschnitt werden Experimente mit drei VPn präsentiert und einander gegenüber gestellt. Das Messgitter wurde der jeweiligen individuellen Orientierung des Halses angepasst und gegebenenfalls leicht modifiziert. Angeregt wurde durchgängig am Bund Nr. 7.

Abb. 63. Messgitter bei der Messung der Hals-Kopf-Schwingung mit VP HA in sitzender Spielhaltung.

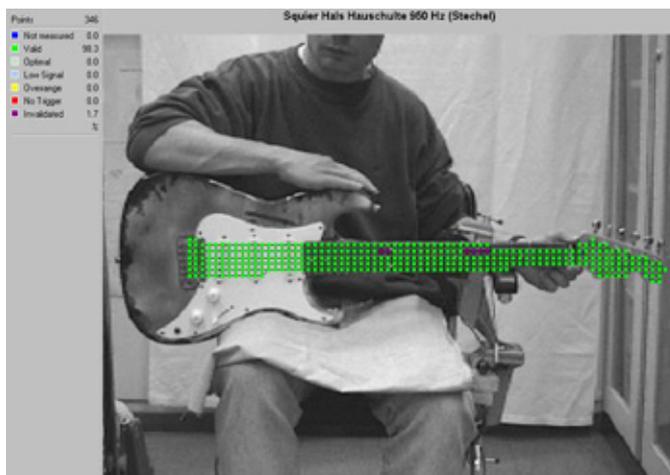


Abb. 64. Messgitter bei der Messung der Hals-Kopf-Schwingung mit VP JU in sitzender Spielhaltung.

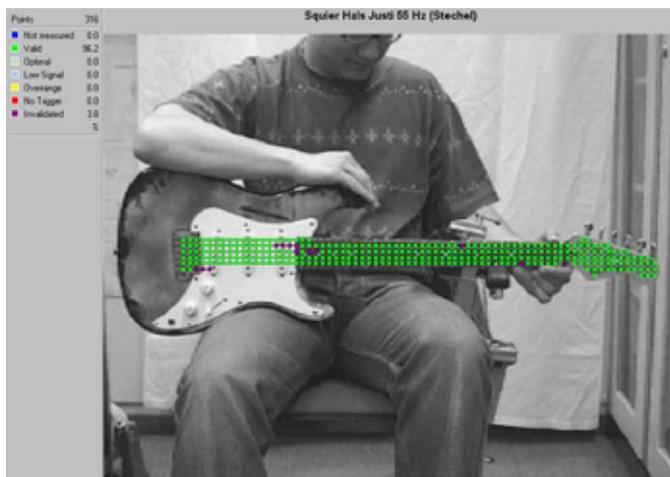


Abb. 65. Messgitter bei der Messung der Hals-Kopf-Schwingung mit VP KI in sitzender Spielhaltung.

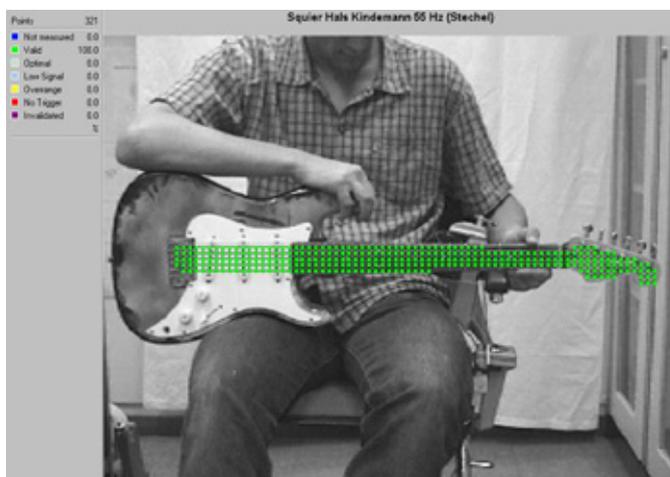
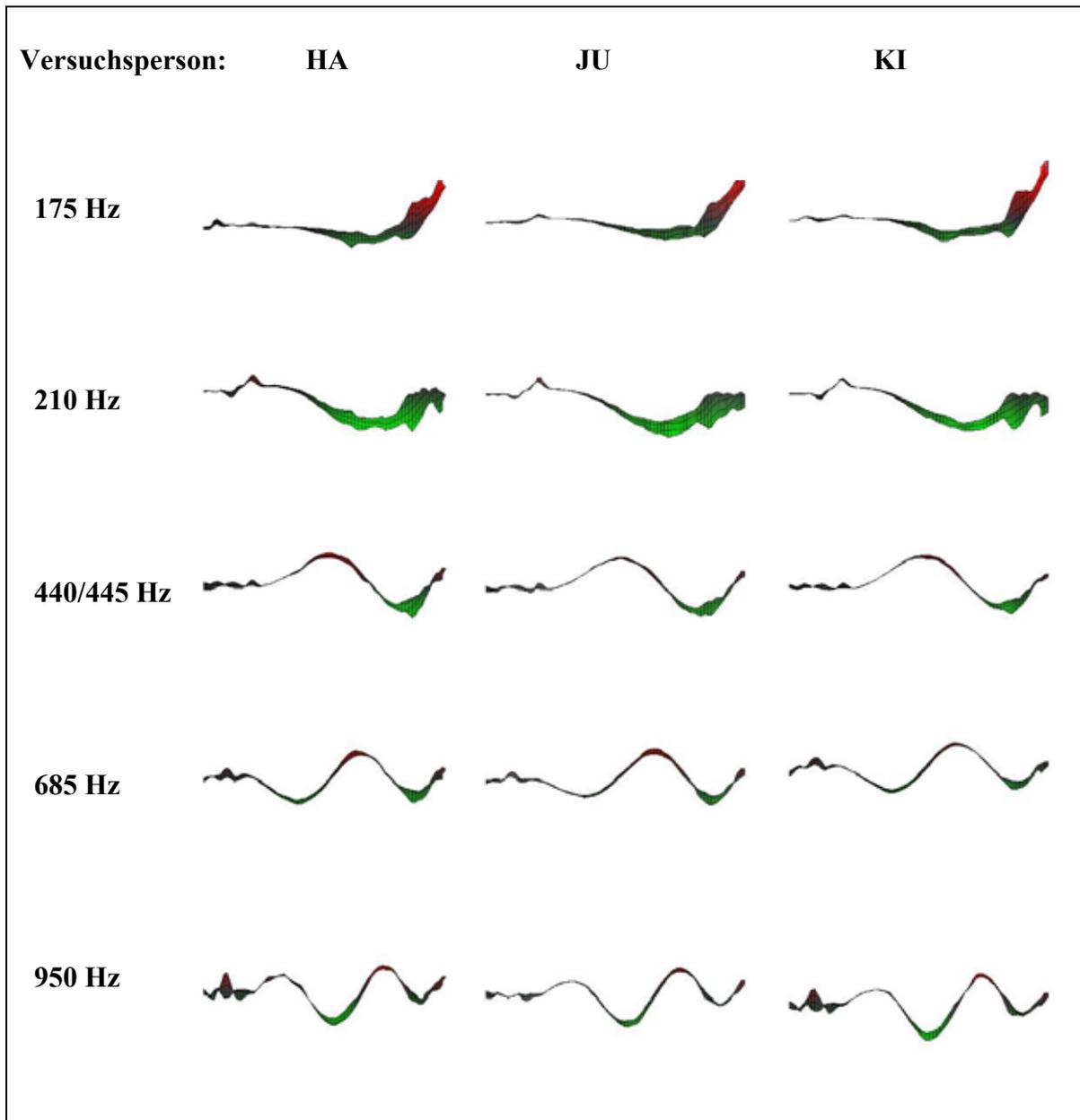


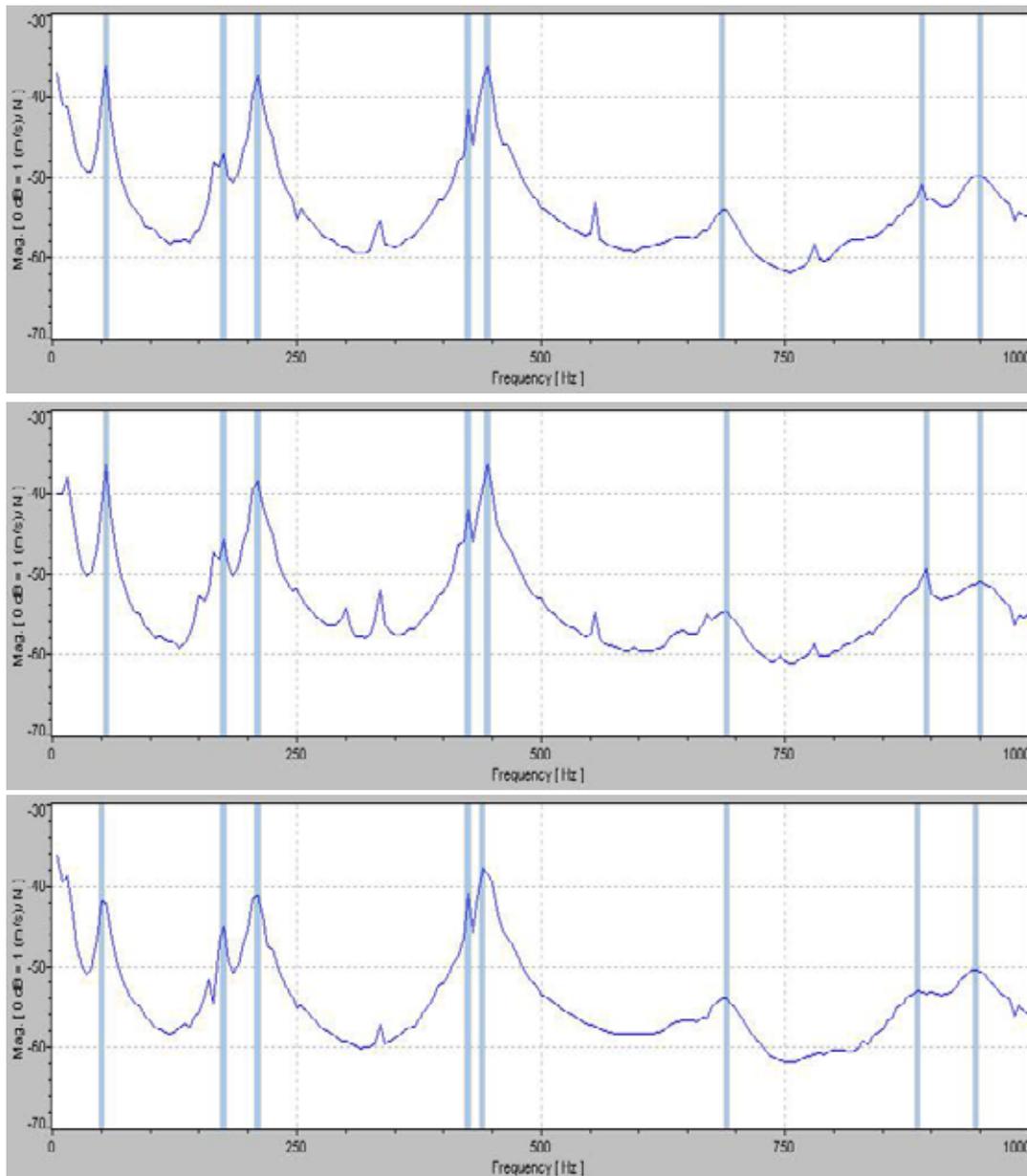
Abb. 63 bezieht sich auf die Messung mit der VP HA. Bei diesem Experiment wurde ein dichtes Messgitter mit 346 Punkten benutzt. Die Ergebnisse waren zu mehr als 98% gültig (*valid*). Die verbleibenden Messpunkte wurden nicht ausgewertet (*invalidated*), sondern durch Interpolation überbrückt. Bei der VP JU (Abb. 64) umfasste das Messgitter 316 Punkte. Davon waren mehr als 96% gültig, die restlichen wurden invalidiert. Das Gitter bei der VP KI (Abb. 65) hatte 321 Punkte, die alle als gültig bewertet wurden. Die Messungen fanden innerhalb von zwei aufeinander folgenden Tagen statt.

Tab. XIX. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen von Hals und Kopf der im Sitzen am Körper der VP HA gehaltenen Gitarre



Die wesentlichen Resultate für alle drei Durchgänge sind in Tab. XIX dreidimensional dargestellt und nebeneinander angeordnet. Schwingungsbilder, die bei benachbarten Frequenzen auftreten und lediglich marginal differieren, sind nur einmal wiedergegeben. Die Schwingung bei 50/55 Hz wurde weggelassen, da ihre Frequenz unterhalb des Bereichs der Grundtöne einer normal gestimmten Gitarre liegt.

Man erkennt Biegeschwingungen mit drei bis sechs Knoten zwischen Steg und Kopf. Die Schwingung bei etwa 200 Hz spaltet sich dadurch in zwei unterschiedliche Muster auf, dass sich Torsion in unterschiedlicher Phase der Biegung überlagert. Ein Vergleich der drei Spalten in Tab. XIX belegt, dass sich diese Charakteristika in den Ergebnissen für alle drei VPn finden. Daraus folgt, dass hinsichtlich der Schwingungsformen die inter-individuellen Unterschiede äußerst gering sind. Dies gilt auch für die nicht aufgeführte Biegeschwingung bei 50/55 Hz. Die charakteristischen Schwingungsformen hängen demzufolge nur unwesentlich davon ab, welche Person die Gitarre hält.



*Abb. 66. Gesamt-Übertragungsfunktion von Messungen der Hals-Kopf-Schwingung, bei denen verschiedene VPn die Gitarre halten. Von oben nach unten: VP HA, VP JU und VP KI.*

In Hinsicht auf die Frequenzen, bei denen sich die Struktur maximal bewegt, lassen die drei zugehörigen Gesamt-Übertragungsfunktionen in Abb. 66 einen Vergleich zu. Unterschiede in der Lage der Maxima sind nur bei 50 Hz bzw. 55 Hz sowie 440 Hz bzw. 445 Hz zu beobach-

ten. Sie sind nicht als signifikant einzustufen, da sie von derselben Größe wie die Frequenzauflösung sind. Auch bezüglich der charakteristischen Frequenzen erweisen sich die interindividuellen Unterschiede somit als gering.

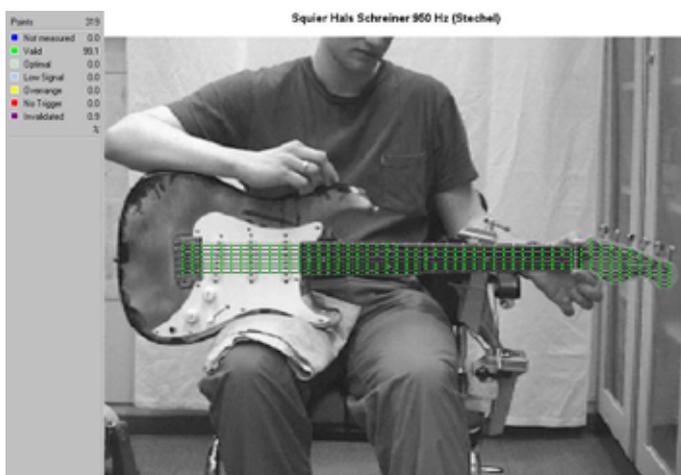
Anhang 11 gibt für die VP HA die Schwingungsbilder als *Color Map* wieder. Anhang 12 bezieht sich auf die VP JU, Anhang 13 auf KI. Auch hier zeigt sich weitgehende Übereinstimmung. Offenbar werden weder die Schwingungsmuster noch die Frequenzen, bei denen die Gitarre mit besonders großer Amplitude schwingt, sehr stark vom Körperbau, der Haltung usw. der Person beeinflusst, die das Instrument hält. Demnach erscheinen zeitaufwendige Reihenmessungen zukünftig verzichtbar.

## 7.4. Messungen mit der Versuchsperson SC

Die Abb. 67a und b zeigen die Situation bei zwei Messungen mit der VP SC, die kurz hintereinander durchgeführt wurden. In beiden Fällen wurde dasselbe Gitter mit 319 Messpunkten benutzt. Die VP behielt ihre Körperhaltung soweit möglich bei. Unterschiedlich war hingegen der Aufwand bei der Datenerfassung. Bei der ersten Messung wurde auf eine Mittelung verzichtet. Beim zweiten Durchgang wurde dreimal komplex gemittelt, was eine etwa dreimal längere Messdauer mit sich bringt. Der Vergleich sollte Hinweise darauf geben, ob der erhöhte Zeitaufwand, den das Mitteln mit sich bringt, durch eine entsprechend hohe Qualität der Messergebnisse gerechtfertigt ist.

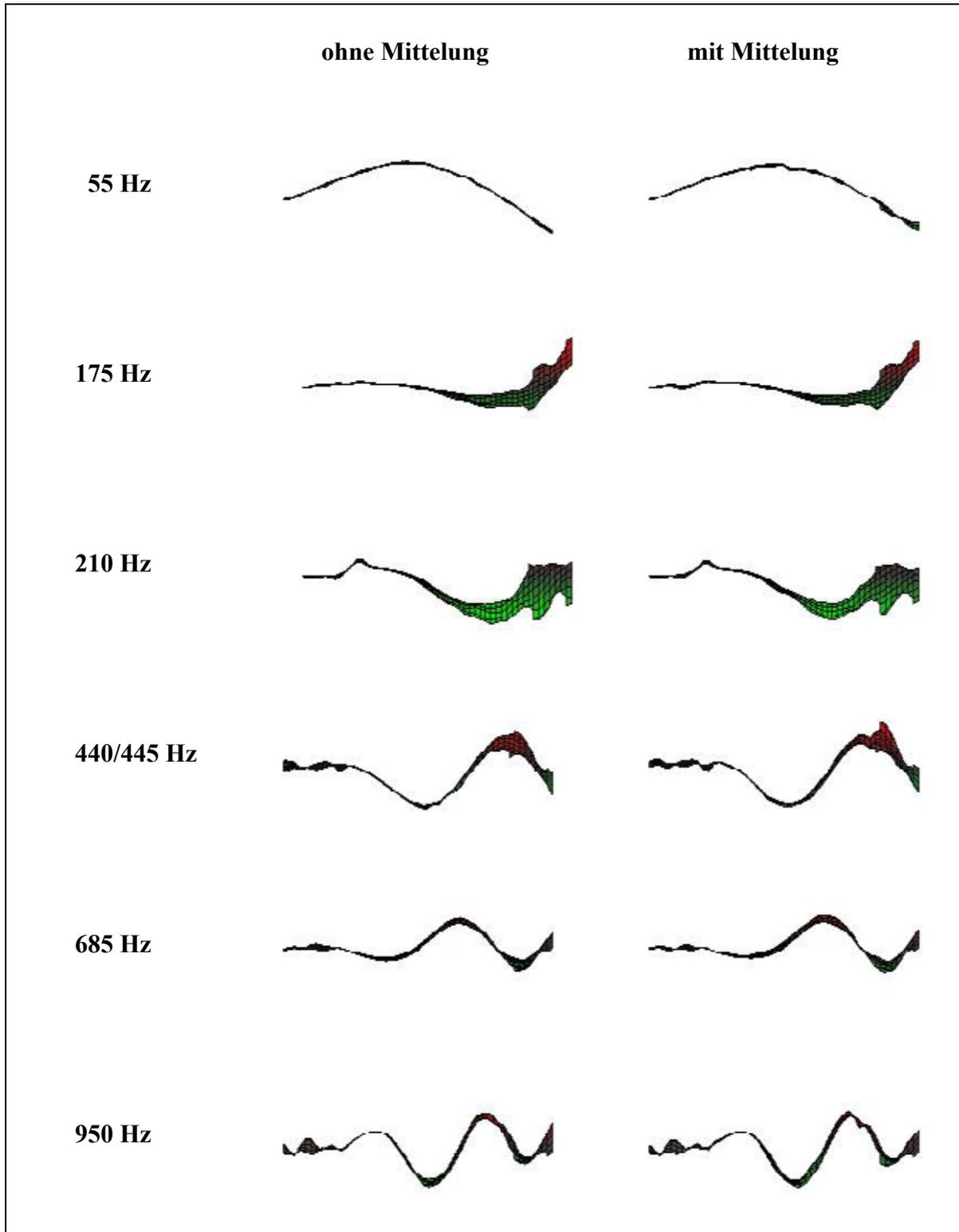


*Abb. 67a. Messgitter bei der Messung der Hals-Kopf-Schwingung mit VP SC in sitzender Spielhaltung; ohne Mittelung.*



*Abb. 67b. wie oben, jedoch mit dreifacher Mittelung (Averaging) bei der Messung.*

Tab. XX. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen von Hals und Kopf der im Sitzen am Körper der VP SC gehaltenen Gitarre; links: ohne Mittelung; rechts: mit dreifacher Mittelung



Die wesentlichen Resultate sind in Tab. XX dreidimensional dargestellt. Schwingungsbilder, die einander ähneln, aber bei mehreren Frequenzen auftreten (z.B. 425/445 Hz und 890/950 Hz), sind nur einmal abgebildet. Man erkennt die Biegeschwingungen mit zwei bis sechs Knoten zwischen Steg und Kopf, die aus den übrigen Untersuchungen dieses Kapitels bereits bekannt sind. Nebeneinander angeordnete Schwingungsmuster sind im selben Maßstab darge-

stellt; sie sind einander so ähnlich, dass von nahezu vollständiger Übereinstimmung gesprochen werden kann. Die Frequenzen stimmen mit einer Ausnahme bei 440/445 Hz überein. Diese geringe Abweichung entspricht der Auflösung bei dieser Messung. Demnach sind auch die intra-individuellen Streuungen gering.

Auch die beiden Gesamt-Übertragungsfunktionen in Abb. 68 weisen ausgeprägte Gemeinsamkeiten auf. Naturgemäß eignet sich das Mitteln (*Averaging*) grundsätzlich dazu, die Qualität von Messsignalen zu verbessern. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird vergrößert und der Einfluss stets vorhandener Störungen verringert. Jedoch sind die Resultate der beschriebenen Messung ohne Mittelung gut genug, dass sich daraus brauchbare Schwingungsformen und –frequenzen extrahieren lassen. Es bleibt festzuhalten, dass die Mittelung von Messsignalen zwar wünschenswert ist, jedoch keine zwingende Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse darstellt. Spricht eine Abwägung gegen die längere Messzeit, die damit zwangsläufig verbunden ist, können Einmal-Messungen durchaus akzeptable Ergebnisse liefern.

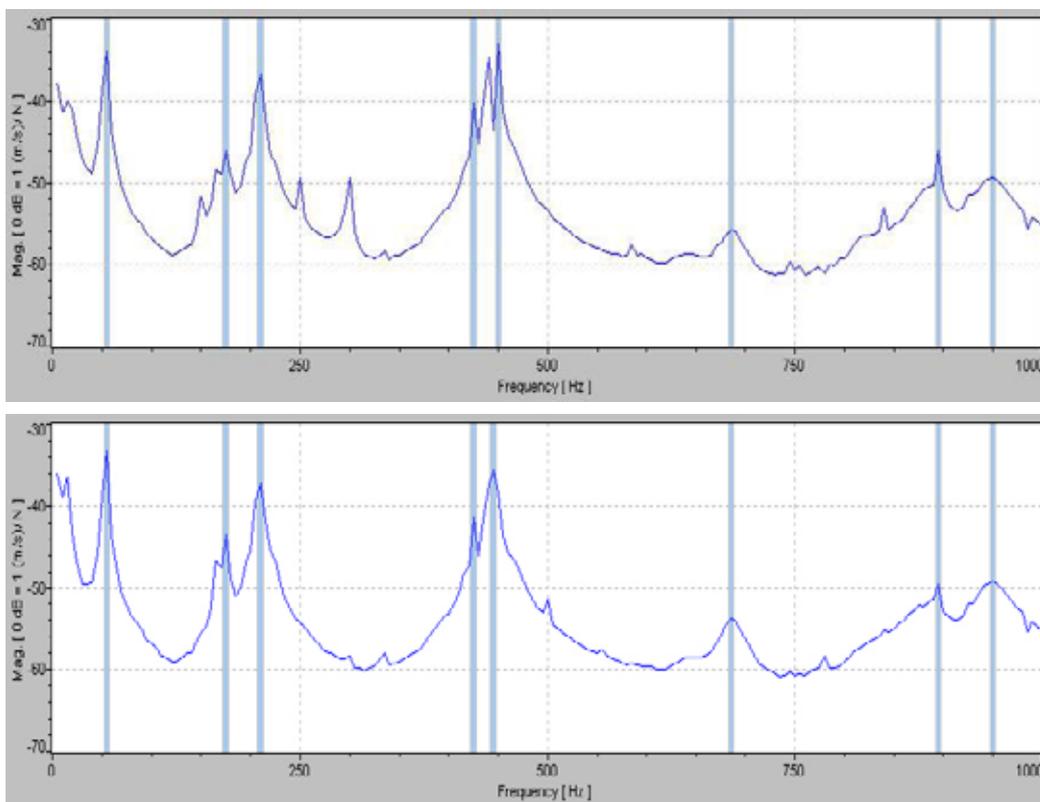


Abb. 68. Gesamt-Übertragungsfunktion von Messungen der Hals-Kopf-Schwingung mit der VP SC.  
Oben: ohne Mittelung; unten: dreimal komplex gemittelt.

Die entsprechende Zusammenstellung in Anhang 14 zeigt die Schwingungsbilder für den Durchgang mit dreimaliger Mittelung als *Color Map*. Diese Visualisierung erleichtert die Zuordnung von Schwingungsbäuchen und -knoten zu den markanten Orten auf der Gitarre wie dem Sattel, den Bündlen usw. Es ergeben sich keine neuen Erkenntnisse. Somit bestätigen die Resultate die bisherigen Befunde.

## 7.5. Zusammenfassende Bemerkung

Messungen am Gesamt-Instrument sind in gewisser Weise problembehaftet. Häufig überlagern Schwingungen von Beschlügen wie Tonabnehmer, Schalter, Schlagbrett o.ä. die

Schwingungen des Instrumentenkörpers, die primär interessieren. Dies ist einer der Gründe dafür, warum im vorliegenden Kapitel das Messfeld auf denjenigen Teil der Gitarre verengt wurde, der für die musikalische Funktion des Instruments die größte Bedeutung hat. Es ist dies zunächst der Bereich zwischen den Auflagern der leeren Saite, d.h. zwischen Steg und Sattel. Um die Orientierung bei der Darstellung der Ergebnisse zu vereinfachen, wurde der Kopf in die Messung mit einbezogen. Da das Messfeld und die Zahl der Messpunkte kleiner sind als beim Abtasten der Gesamtstruktur, dauert der Messvorgang weniger lang. Dies und die Tatsache, dass die VP während des Experiments bequem im Stuhl sitzen kann, wird von den Teilnehmern an den Experimenten als sehr angenehm empfunden.

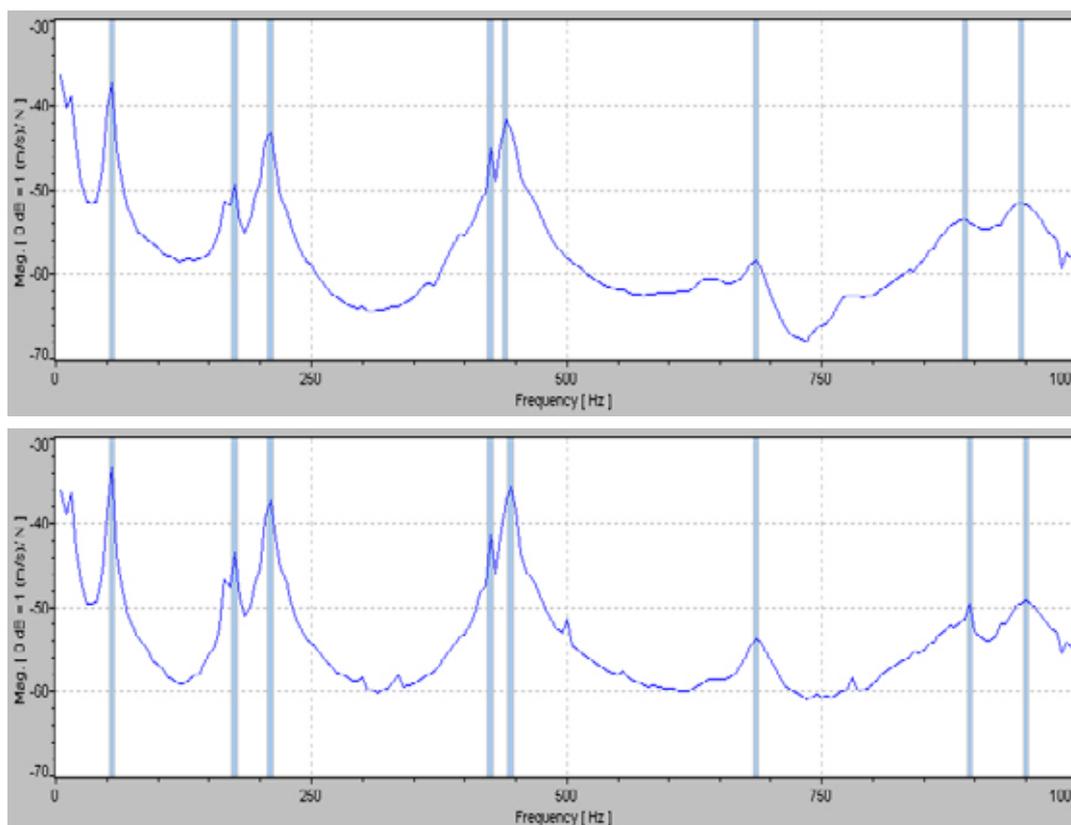


Abb. 69. Gesamt-Übertragungsfunktion von Messungen in sitzender Spielhaltung mit der VP SC.  
Oben: gesamte Gitarre; unten: Steg-Hals-Kopf.

In Abb. 69 stehen sich zwei Gesamt-Übertragungsfunktionen gegenüber. Diese gehen auf Messungen des Experimentators Stechel (2003) mit derselben VP zurück. Der wesentliche Unterschied ist, dass sich das obere Diagramm auf die Messung des Gesamt-Instruments (Abschnitt 5.3), das untere dagegen auf die Messung im Hals-Kopf-Bereich (Abschnitt 7.4) bezieht. Beide Messkurven zeigen dieselbe Charakteristik. Auch treten die Maxima bei nahezu den gleichen Frequenzen auf. Es fällt lediglich auf, dass die Maxima der unteren Kurve höhere Werte annehmen als in der oberen. Dies ist damit zu erklären, dass der Korpus sich im Mittel weniger stark bewegt als der Hals. Insgesamt fällt deshalb der Durchschnitt der Transfer-Admittanzen für Messpunkte auf dem Gesamtinstrument kleiner aus als der Mittelwert, der ausschließlich aus Messungen auf dem Hals gebildet wird.

Messungen in Spielhaltung sollten möglichst rasch ablaufen. Dies liegt im Interesse aller Beteiligten und stellt sicher, dass die Auflagerbedingungen im Verlauf der Messung im Wesentlichen beibehalten werden. Die Messdauer lässt sich zum einen dadurch reduzieren, dass auf mehrmalige Wiederholung der Einzelmessungen mit anschließender Mittelwertbildung ver-

zichtet wird. Zum anderen kann das Feld, auf dem die Schwingung gemessen wird, verkleinert werden. Beide Maßnahmen erweisen sich als zulässig; sie sparen Zeit, ohne die Qualität der Ergebnisse inakzeptabel zu verringern. Zukünftige Messungen könnten demnach zielgerichtet auf den Bereich der Gitarre, den die Saiten überspannen, begrenzt werden. Von *Averaging* könnte dabei abgesehen werden, ohne dass wesentliche Qualitätseinbußen zu befürchten sind.

## 8. MODALANALYSE DER KORPUSSCHWINGUNGEN

Sämtliche Schwingungsmuster, die bisher experimentell bestimmt worden sind, stellen Betriebschwingungsformen (im Englischen *Operating Deflection Shapes*; siehe Richardson 1997) dar. Als Indikatoren für deren Auswahl wurden Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion verwendet, die sich bei den „charakteristischen Frequenzen“ ausbilden. Die Schwingungsmuster, die sich für diese Frequenzen ergeben, werden als „charakteristische Betriebschwingungsformen“ bezeichnet. In wieweit die charakteristischen Frequenzen mit den Eigenfrequenzen und die charakteristischen Betriebschwingungsformen mit den Eigenschwingungsformen übereinstimmen, soll in diesem Kapitel an Hand einer Messreihe untersucht werden (Blau 2006). Ein Satz von Daten, gemessen mit dem *Scanning Vibrometer*, wurde zunächst mit der System-Software des Vibrometers ausgewertet. Derselbe Satz von Messdaten wurde anschließend einer gesonderten Modalanalyse unterzogen. Die Ergebnisse werden zum Abschluss miteinander verglichen.

### 8.1. Versuchsmethode und –aufbau

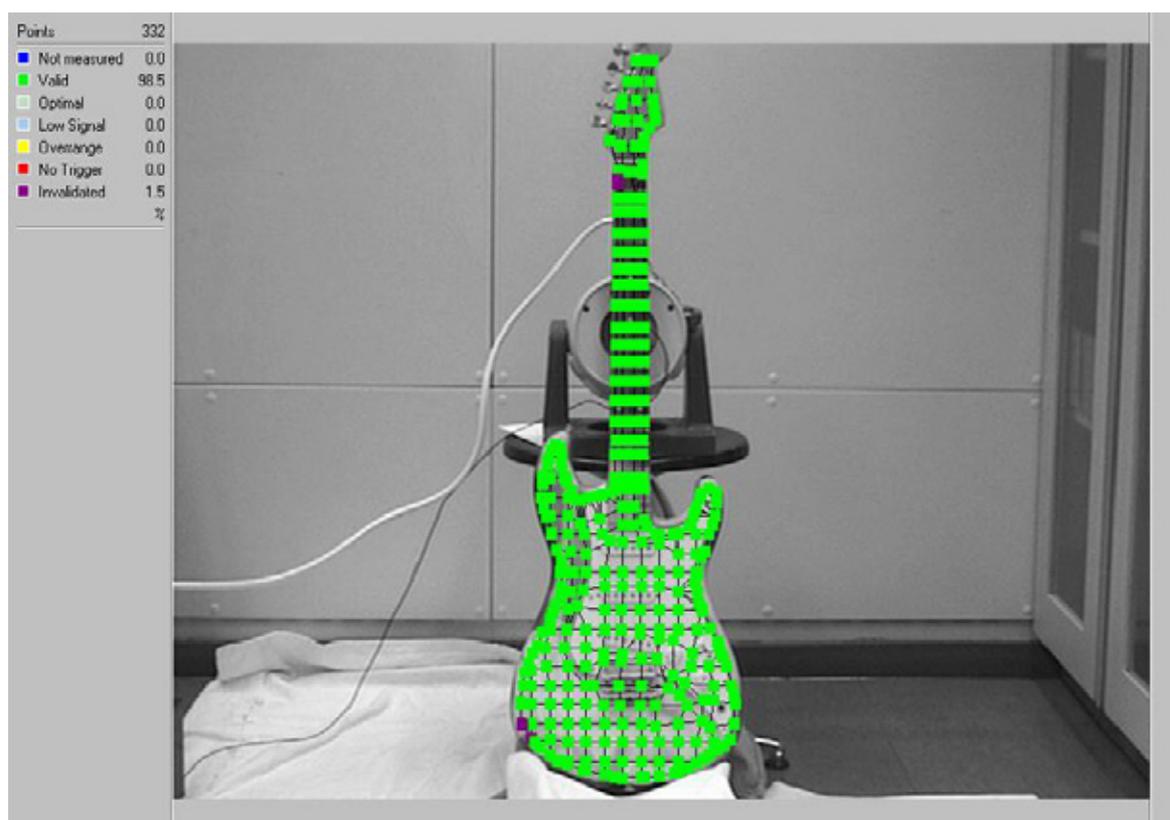


Abb. 70. Messgitter bei der Messung der Korpuschwingung des Instruments im Gitarrenständer.

Die Lagerung der Gitarre entsprach derjenigen, welche in den Abschnitten 4.4.3 bis 4.4.5 beschrieben ist. Das Instrument ruhte an zwei Punkten auf den unteren Haltestangen eines Gitarrenständers. Wie Abb. 70 zu erkennen ist, wurde es am Hals beim Bund Nr. 7 von hinten durch einen Shaker zum Schwingen gebracht. Gemessen wurde an 332 Punkten, von denen fünf bei der Visualisierung invalidiert wurden. Die Mess-Bandbreite war 800 Hz, die Auflösung 2 Hz. Abb. 71 gibt die Summen-Übertragungsfunktion dieser Messung wieder.

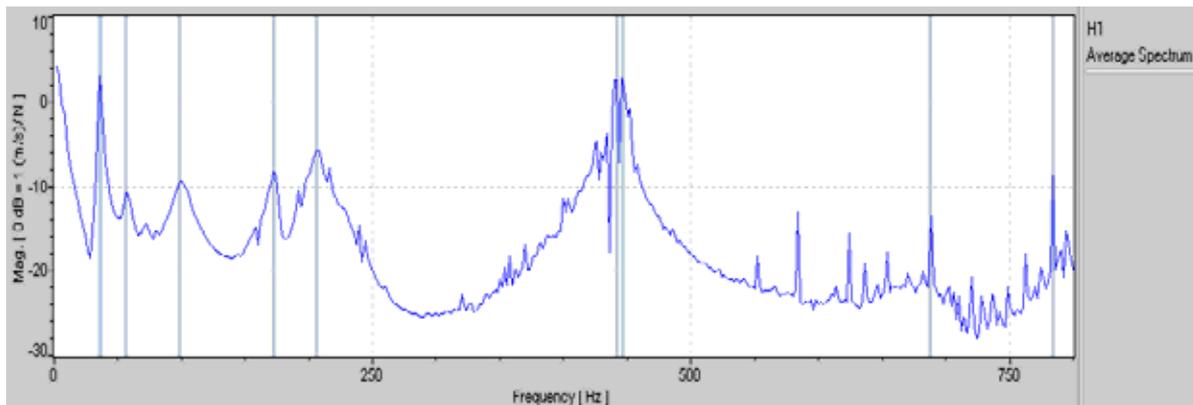


Abb. 71. Gesamt-Übertragungsfunktionen für die Messung im Gitarrenkörper nach Blau (2006).

## 8.2. Charakteristische Betriebsschwingungsformen

Im ersten Schritt wurden die Messdaten mit der Software des *Scanning Vibrometer* auf dieselbe Weise ausgewertet, wie bei allen bisher beschriebenen Untersuchungen. Abb. 71 zeigt neun Bänder, die der Experimentator bei Maxima der Übertragungsfunktion gelegt hat. Die zugehörigen charakteristischen Frequenzen stimmen mit Ausnahme von 57 Hz mit denjenigen überein, die in Tab. X zusammengestellt sind. Die Diskrepanz zwischen 57 Hz (Abb. 71) bzw. 72 Hz ... 80 Hz (Tab. X) könnte von Unterschieden in der individuellen Lagerung bei den Messungen liegen. Da diese Frequenzen unterhalb des Bereiches liegen, in den die Grundfrequenzen der Gitarrenklänge fallen, wurde der Abweichung keine weitere Bedeutung zugemessen.

Die charakteristischen Schwingungsformen, die sich bei den Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion ausbilden, sind in Rot-Grün-Darstellung in Anhang 15 aufgelistet. Zum Vergleich ist die unverformte Struktur eingefügt. Mit Ausnahme der Betriebsschwingung bei 784 Hz stimmen die Formen mit denjenigen überein, welche vergleichbare Messungen ergeben haben und wie sie bereits beispielsweise in Tab. VII gezeigt wurden.

## 8.3. Experimentelle Modalanalyse

Die Modalanalyse beinhaltet die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens des Instrumentenkörpers durch seine modalen Parameter. Diese sind die Eigenformen, die Eigenfrequenzen und die zugehörigen modalen Dämpfungen. Die Unterschiede zwischen Betriebsschwingungen, wie sie bisher betrachtet wurden, und Eigenschwingungen, wie sie im vorliegenden Kapitel untersucht werden sollen, hat Richardson (1997) ausführlich und an Hand zahlreicher Beispiele erläutert. Kurz gesagt stellen die Eigenschwingungen die „Atome“ einer jeden Strukturschwingung dar. Sie sind definiert über das Eigenwertproblem und gehorchen strengen mathematisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

### 8.3.1. Grobanalyse

Für die weitere Verarbeitung wurde der Satz von Messdaten als *Universal File* in einen anderen Computer überspielt, auf dem die Modalanalyse-Software StarModal der Firma SMS installiert ist. Wie Blau (2006) beschrieben hat, wurde aus den Daten des Messgitters ein Geometriemodell erstellt. Durch Verbinden geeigneter Punkte entstand ein so genanntes Drahtmodell der unverformten Gitarre.

Die Analyse der Übertragungsfunktionen begann damit, dass im Modus *Advanced Curve Fit* zunächst 20 mögliche Eigenfrequenzen identifiziert wurden; vgl. Tab. XXI. Neben den Frequenzen sind auch die zugehörigen Dämpfungswerte als absolute Halbwertsbreite in Hertz sowie als relative Halbwertsbreite in Prozent angegeben. Die relative Halbwertsbreite, geteilt durch 100, entspricht dem Kennverlustfaktor bzw. dem doppelten Lehr'schen Dämpfungsmaß.

Tab. XXI. Zwanzig mögliche Eigenfrequenzen und modale Dämpfungen der Gitarre im Gitarrenständer

Mode	Freq.(Hz)	Damp.(Hz)	Damp.(%)
1	36.03	1.06	2.93
2	56.88	2.98	5.23
3	77.15	7.41	9.56
4	99.17	8.07	8.11
5	173.31	3.40	1.96
6	206.91	5.68	2.74
7	230.25	17.22	7.46
8	240.59	2.07	862.14e-3
9	321.23	4.19	1.30
10	352.33	7.03	1.99
11	425.58	2.73	640.94e-3
12	443.73	6.55	1.48
13	492.56	4.63	940.05e-3
14	552.10	3.46	626.95e-3
15	583.95	65.97e-3	11.30e-3
16	622.46	2.57	413.27e-3
17	636.77	10.98	1.72
18	687.43	3.40	495.02e-3
19	720.23	15.98	2.22
20	783.09	2.64	337.17e-3

Ob die zugehörigen Schwingungen tatsächlich Eigenschwingungen sind, lässt sich an Hand der MAC-Tabelle beurteilen. Die zugehörigen Vektoren werden skalar miteinander multipliziert und normiert. Das Skalarprodukt eines Vektors mit sich selbst muss den Wert Eins liefern. Stehen zwei Vektoren orthogonal aufeinander, ist das Skalarprodukt Null. Die Skalarprodukte der Vektoren werden zu einer Matrix angeordnet und stellen ein Maß für deren lineare Abhängigkeit dar. Eigenschwingungen sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Vektoren orthogonal sind. Für Eigenvektoren ist das *Modal Assurance Criterion* (MAC) demnach sehr klein und hat im Idealfall den Wert Null.

In Tab. XXIIa und b sind die beiden Hälften der MAC-Matrix für die 20 Schwingungen wiedergegeben. Während die Hauptdiagonale zwangsläufig mit Einsen gefüllt ist, sind die übrigen Werte kleiner als Eins. Viele dieser Zahlenwerte sind relativ groß und weichen deutlich vom Idealwert Null ab. Dies besagt, dass zahlreiche der im ersten Schritt ausgewählten Schwingungen voneinander linear abhängig sind. Als ein Beispiel für enge Kopplung kann die Schwingung Nr. 8 bei 251 Hz dienen. Sie ist ziemlich stark mit den benachbarten Schwingungen Nr. 6, 9 und 10 verknüpft. Die zugehörigen Zahlenwerte sind immer größer als 0,60. Ein Gegenbeispiel stellt die Schwingung Nr. 6 bei 207 Hz dar. Hier ist die Kopplung mit den übrigen Schwingungen wesentlich schwächer, was sich in den deutlich kleineren Zahlenwerten ausdrückt.

Einige der Schwingungsmuster, die sich bei dieser Analyse für Frequenzen unterhalb von 500 Hz ergeben, sind in Tab. XXIII den charakteristischen Betriebsschwingungsformen gegenüber gestellt. Übereinstimmung der auf unterschiedlichen Wegen ermittelten Ergebnisse ist zu erkennen. Es wird jedoch auch deutlich, dass die verschiedenen Schwingungsbilder Ähnlichkeiten untereinander aufweisen. Beispielsweise könnte die Schwingung bei 98/99 Hz eine Überlagerung zweier anderer Formen darstellen. Es zeigt sich zudem, dass einige der Schwingungen nicht durch den Korpus, sondern durch Bewegungen von Beschlägen (Schlagbrett, Potentiometerknöpfe o.ä.) bestimmt werden.

Tab. XXIIIa. MAC-Matrix der 20 Schwingungen, deren Frequenzen und Dämpfungen Tab. XVI zu entnehmen sind, linker Teil

Modes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.00	0.17	0.08	0.01	0.01	0.12	0.00	0.00	0.03	0.02
2	0.17	1.00	0.22	0.48	0.02	0.07	0.24	0.26	0.21	0.19
3	0.08	0.22	1.00	0.49	0.08	0.14	0.56	0.58	0.55	0.43
4	0.01	0.48	0.49	1.00	0.06	0.08	0.30	0.33	0.43	0.33
5	0.01	0.02	0.08	0.06	1.00	0.10	0.13	0.21	0.09	0.07
6	0.12	0.07	0.14	0.08	0.10	1.00	0.47	0.43	0.21	0.15
7	0.00	0.24	0.56	0.30	0.13	0.47	1.00	0.92	0.74	0.63
8	0.00	0.26	0.58	0.33	0.21	0.43	0.92	1.00	0.72	0.61
9	0.03	0.21	0.55	0.43	0.09	0.21	0.74	0.72	1.00	0.93
10	0.02	0.19	0.43	0.33	0.07	0.15	0.63	0.61	0.93	1.00
11	0.16	0.02	0.14	0.04	0.02	0.02	0.07	0.11	0.09	0.13
12	0.05	0.03	0.18	0.07	0.04	0.00	0.18	0.19	0.33	0.32
13	0.03	0.09	0.25	0.18	0.15	0.16	0.20	0.26	0.05	0.03
14	0.02	0.11	0.34	0.22	0.16	0.20	0.32	0.39	0.18	0.12
15	0.01	0.03	0.05	0.03	0.01	0.00	0.03	0.04	0.04	0.04
16	0.01	0.08	0.22	0.17	0.10	0.11	0.26	0.30	0.21	0.14
17	0.01	0.10	0.29	0.21	0.14	0.13	0.31	0.37	0.27	0.21
18	0.02	0.07	0.28	0.18	0.24	0.13	0.30	0.33	0.23	0.19
19	0.02	0.10	0.40	0.27	0.35	0.18	0.43	0.49	0.34	0.25
20	0.00	0.01	0.06	0.05	0.06	0.08	0.08	0.09	0.05	0.03

Tab. XXIIIb. MAC-Matrix der 20 Schwingungen, deren Frequenzen und Dämpfungen Tab. XVI zu entnehmen sind, rechter Teil

Modes	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.16	0.05	0.06	0.04	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00
2	0.02	0.03	0.05	0.06	0.03	0.07	0.08	0.08	0.10	0.01
3	0.14	0.18	0.24	0.30	0.07	0.27	0.31	0.33	0.42	0.09
4	0.04	0.07	0.11	0.15	0.04	0.16	0.17	0.18	0.26	0.06
5	0.02	0.04	0.06	0.09	0.01	0.08	0.09	0.20	0.28	0.07
6	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.04	0.04	0.08	0.10	0.08
7	0.07	0.18	0.25	0.29	0.05	0.30	0.33	0.35	0.45	0.12
8	0.11	0.19	0.27	0.33	0.05	0.33	0.37	0.37	0.51	0.13
9	0.09	0.33	0.35	0.37	0.07	0.35	0.41	0.35	0.46	0.09
10	0.13	0.32	0.31	0.34	0.06	0.30	0.37	0.31	0.38	0.06
11	1.00	0.26	0.20	0.29	0.02	0.22	0.26	0.11	0.17	0.07
12	0.26	1.00	0.37	0.09	0.12	0.69	0.76	0.47	0.52	0.10
13	0.28	0.97	1.00	0.95	0.13	0.75	0.83	0.53	0.62	0.12
14	0.29	0.89	0.95	1.00	0.15	0.76	0.87	0.54	0.67	0.14
15	0.02	0.12	0.13	0.15	1.00	0.12	0.15	0.06	0.11	0.05
16	0.22	0.69	0.75	0.76	0.12	1.00	0.81	0.52	0.55	0.11
17	0.26	0.76	0.83	0.87	0.15	0.81	1.00	0.48	0.62	0.18
18	0.11	0.47	0.53	0.54	0.06	0.52	0.48	1.00	0.67	0.11
19	0.17	0.52	0.62	0.67	0.11	0.55	0.62	0.67	1.00	0.21
20	0.07	0.10	0.12	0.14	0.05	0.11	0.18	0.11	0.21	1.00

Tab. XXIII. Ergebnisse der Vibrometermessungen (links) und der nachgeschalteten Modalanalyse für die Gitarre im Gitarrenständer

Vibrometer-Messung	Modalanalyse
36 Hz	 36 Hz
72 Hz	 77 Hz
98 Hz	 99 Hz
172 Hz	 173 Hz
204 Hz	 207 Hz
442 Hz	 444 Hz

### 8.3.2. Feinanalyse

Um die hier interessierenden Eigenformen des Korpus aufzufinden, muss die Auswahl von den ursprünglich 20 Schwingungen auf deutlich weniger verringert werden. Im Frequenzbereich bis 500 Hz hat Blau (2006) vier reine Korpus-Moden identifiziert. Eigenfrequenzen und modale Dämpfungen können mit neuer Nummerierung Tab. XXIV entnommen werden.

Tab. XXIV. Vier Eigenfrequenzen und zugehörige Dämpfungen der Gitarre im Gitarrenständer

Mode	Freq.(Hz)	Damp.(Hz)	Damp.(%)
1	36.03	1.06	2.93
2	173.31	3.40	1.96
3	206.91	5.68	2.74
4	443.73	6.55	1.48

Tab. XXV zeigt die zugehörige MAC-Tabelle. Die Moden Nr. 2 und 3 sind etwas stärker miteinander verknüpft. Die niedrigen Zahlenwerte besagen, dass die übrigen beiden miteinander und mit den anderen Schwingungen wenig gemein haben. Die Wahrscheinlichkeit ist demnach groß, dass es sich hierbei um Eigenformen handelt. Die Dämpfungen liegen zwischen etwa 1,5 und 3 Prozent.

Tab. XXV. MAC-Matrix der vier Eigenschwingungen, deren Frequenzen und Dämpfungen Tab. XIX zu entnehmen sind

Modes	1	2	3	4
1	1.00	0.01	0.08	0.06
2	0.01	1.00	0.16	0.03
3	0.08	0.16	1.00	0.00
4	0.06	0.03	0.00	1.00

Dass bei diesen Schwingungen sich vor allem der Gitarrenkörper bewegt, zeigt Tab. XXVI. Eigenbewegungen von Beschlagteilen spielen keine wesentliche Rolle. Für 36 Hz und 444 Hz ist praktisch reine Biegung des Korpus mit einem bzw. vier Knoten zu erkennen. Bei 173 Hz und bei 207 Hz überlagert sich mit unterschiedlicher Orientierung Torsion. Die zugrunde liegende Biegung weist drei Knoten auf. Die Schwingungsform mit zwei Knoten, die nach Tab. X zwischen 72 Hz und 117 Hz beobachtet worden war, hat Blau bei seiner Analyse nicht gefunden.

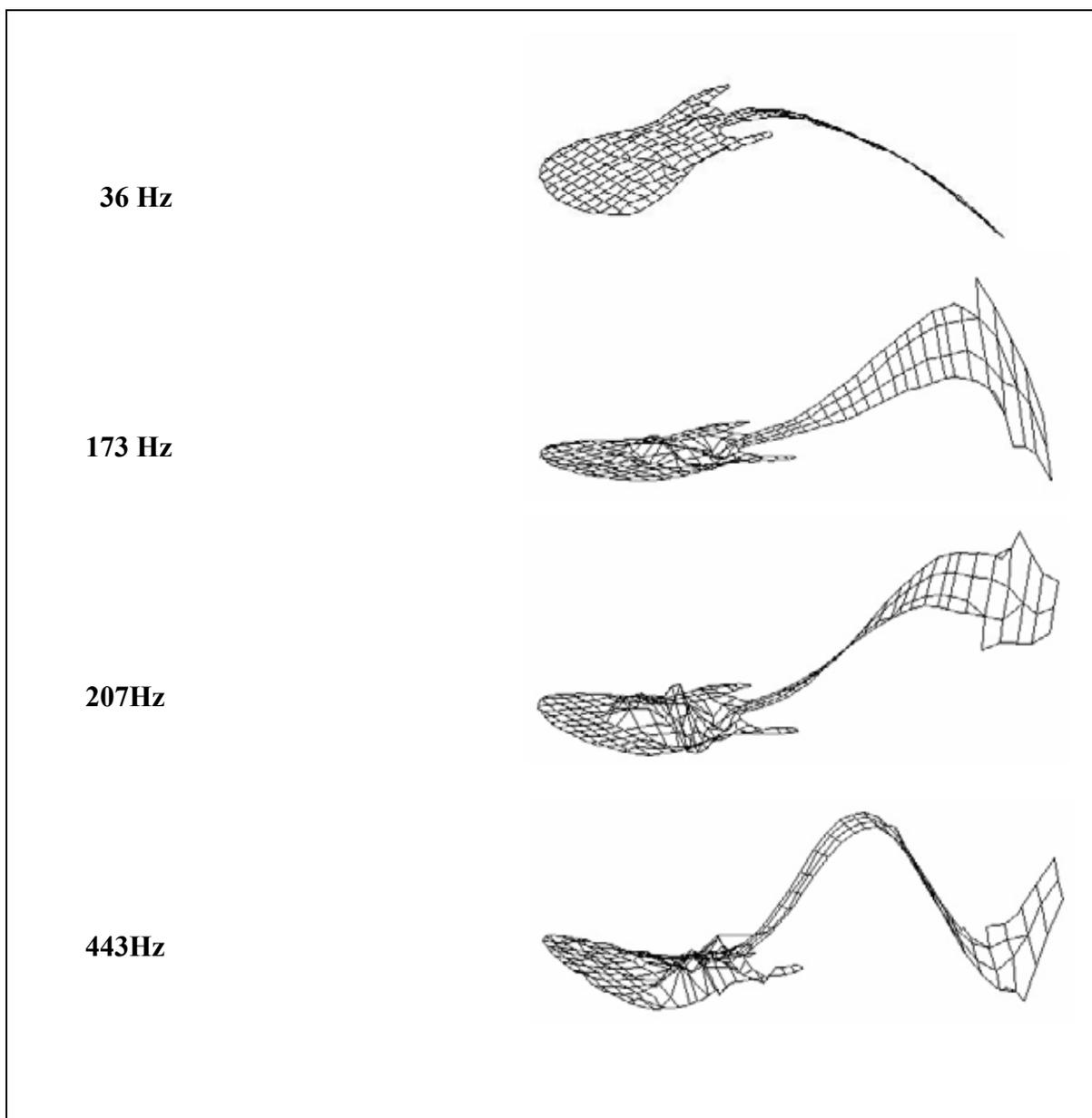
## 8.4. Zusammenfassende Bemerkung

Ausgehend vom selben Satz von Messdaten wurden charakteristische Betriebschwingungen und Eigenmoden ermittelt. Die Gegenüberstellung ergibt Folgendes:

Um die Modalanalyse durchführen zu können, ist eine gesonderte Software notwendig. Der Import der Daten vom *Scanning Vibrometer* sowie die Generierung eines Drahtmodells aus den Geometriedaten bereiten keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Die eigentliche Modalanalyse erfordert jedoch einiges an Erfahrung und Zeit. Die Software, die am Institut für Mechanik zur Verfügung stand, ist bereits älteren Datums und darf deshalb nicht vorbehaltlos mit der moderneren Software des *Scanning Vibrometer* verglichen werden. So lässt die Grafik

von StarModal beispielsweise keine Glättung von „Ausreißer“-Messpunkten zu, hat keinen *Hidden Line*-Algorithmus und arbeitet lediglich schwarz-weiß. Da zudem eine Invalidierung einzelner Messpunkte nicht vorgesehen ist, ergibt sie die ehrlicheren, da absolut ungeschönten Aussagen. Optisch ansprechender sind jedoch die Bilder, die das *Scanning Vibrometer* liefert. Ohne Konkurrenz ist die Modalanalyse in zweierlei Hinsicht: Zum einen extrahiert sie nicht nur Eigenfrequenzen und Eigenformen, sondern auch modale Dämpfungen. Zum anderen wird die Auswahl der Schwingungen durch die MAC-Matrix objektiviert, da das *Modal Assurance Criterion* eine quantitative Aussage über deren lineare Unabhängigkeit ermöglicht. Die Willkür des Experimentators ist damit weitgehend ausgeschaltet.

Tab. XXVI. Vier Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen der Gitarre im Gitarrenständer



Ein großer Vorteil der Auswerte-Software des *Scanning Vibrometer* ist, dass sie in das System integriert ist. Sie lässt sich einfach handhaben und liefert bereits nach kürzester Zeit Ergebnisse. Auf Grund der vielfältigen Möglichkeiten der Farb-Grafik können die Ergebnisse

sehr anschaulich visualisiert und beispielsweise dem Videobild der jeweils vorliegenden Versuchssituation überlagert werden. Dabei ist es sehr hilfreich, misslungener Messungen an einzelnen Messpunkten invalidieren und die invalidierten Messwerte interpolieren zu können. Durch örtliche Filterung lassen sich darüber hinaus glatte Kurvenformen erzielen. Diese gefälligere Darstellung kann aber unter Umständen eine Präzision und ein Ebenmaß vortäuschen, die bei einer realen Messung in aller Regel gar nicht erreichbar sind. Dem Vorteil der ausgeklügelten Visualisierung stehen allerdings auch einige Nachteile gegenüber. So kann die Dämpfung nur grob abgeschätzt werden. Vor allem aber ist die Auswertung der Messergebnisse in gewissem Maße mit Willkür behaftet. Der Experimentator legt die Bänder für die Visualisierung an Hand der Summen-Übertragungsfunktion, jedoch mehr oder weniger nach eigenem Gutdünken – oder positiv ausgedrückt: aufbauend auf dem Schatz seiner Erfahrungen - fest. Ob eine charakteristische Schwingung tatsächlich das Eigenverhalten widerspiegelt, wird durch keine Maßzahl „legitimiert“. Der Erfahrung und Objektivität des Experimentators kommt dabei eine hohe Bedeutung zu.

Insgesamt zeigt der Vergleich am Beispiel der im Ständer ruhenden Gitarre jedoch, dass eine sorgfältige Auswahl von charakteristischen Schwingungen bereits viel über das Eigenverhalten der schwingenden Struktur auszusagen vermag. Dass keine exakten Aussagen über die Dämpfung und das *Modal Assurance Criterion* möglich sind, kann hier in Kauf genommen werden. Die Vorteile der raschen Auswertung und der geglätteten Darstellung, die das Augenmerk von den Messfehlern weg hin zum eigentlichen Gegenstand der Messung lenkt, werden als sehr hoch eingeschätzt. Auch zukünftig wird das Schwingungsverhalten eines Musikinstruments in aller Regel durch die charakteristischen Betriebsschwingungen beschrieben werden, die sich direkt mit der Software des *Scanning Vibrometer* bestimmen lassen.

## 9. RECHNERSIMULATION DER KORPUSSCHWINGUNGEN MIT DER METHODE DER FINITEN ELEMENTE

Die experimentellen Daten, die bisher gezeigt worden sind, zeigen den jeweiligen Ist-Zustand des Korpus. Sollen die Schwingungen hinsichtlich ihrer Form und Frequenz beeinflusst werden, bleibt als einzige Möglichkeit, Modifikationen am Gitarrenkörper vorzunehmen und die Auswirkungen in weiteren Experimenten zu überprüfen. Dieser Weg ist mühevoll und zeitraubend. Sehr viel attraktiver erscheint es, ein geometrisch-physikalisches Modell der Gitarre zu generieren und daran „numerische Experimente“ durchzuführen, d.h. Geometrie oder Materialeigenschaften zu modifizieren und die Auswirkungen dieser Veränderungen in der Simulation zu verfolgen.

Eine Idealisierung der Gitarre als Biegebalken war von Fleischer (2001b) versucht worden. Naturgemäß kann ein derart einfaches Modell die Realität nur grob annähern. Weit mehr Möglichkeiten versprechen moderne Rechenverfahren, die auf Computern laufen. In Richtung einer Verfeinerung der Approximation wurden bereits vereinzelt Anstrengungen unternommen. Hinsichtlich der Decken akustischer Gitarren hat Schwab (1975, 1976) vor etwa 30 Jahren über erste Versuche berichtet, Computer-Berechnungen anzuwenden. Eine neuere Arbeit stammt von Elejabarrieta (2001). Dass ein namhafter amerikanischer Hersteller von E-Gitarren ebenfalls numerische Rechnungen durchführt, zeigt der Artikel von Carlson (1998). Die Ergebnisse, die im Folgenden präsentiert werden, stammen aus der Studienarbeit von Meiershöfer und Pieper (2002) am Institut für Mechanik.

### 9.1. Allgemeines zur Methode und Diskretisierung der Gitarre

Es wurde die *Finite Element Method* (FEM) verwendet. Sie beruht auf einer Zerlegung der Struktur in kleine Teile, die als Finite Elemente bezeichnet werden. Für die Verschiebung werden in jedem Element Näherungsansätze gewählt, die mit den Ansätzen der Nachbar-elemente kompatibel gemacht werden müssen. In jedem einzelnen Element müssen die Grundgesetze der Mechanik erfüllt sein. Mit Hilfe ausgeklügelter numerischer Methoden gelingt es auf diese Weise, Lösungen für die Gesamtstruktur zu ermitteln. Im vorliegenden Beispiel wird auf diesem Wege die Schwingung der Gitarre berechnet.

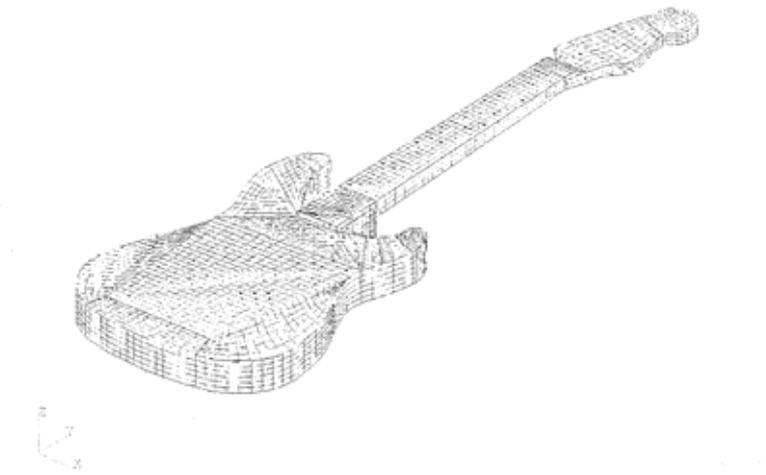


Abb. 72. Simplifiziertes FE-Modell der Elektrogitarre Squier Bullet.

Meiershöfer und Pieper (2002) haben das Programmsystem NASTRAN/PATRAN der Firma McNeal Schwendler verwendet. Wie in ihrer Studienarbeit beschrieben, haben sie den hölzernen Körper der E-Gitarre Squier modelliert. Saiten, Wirbel, Tonabnehmer und sämtliche elektrischen Anbauteile haben sie nicht berücksichtigt. Ebenso wurde auf die Modellierung des Metallstabes verzichtet, mit dem sich die Krümmung des Halses einstellen lässt. Neben diesem haben Meiershöfer und Pieper noch ein „vereinfachtes“ Modell verwendet. Dabei wurden hinsichtlich der Geometrie die Abschrägungen am Korpus ebenso wenig erfasst wie die Ausfräsungen des Korpus, die der Aufnahme der Tonabnehmer sowie des Vibrato-Mechanismus dienen. Darüber hinaus wurde der Hals mit rechteckigem Querschnitt nachgebildet. Dieses simplifizierte Modell ist in Abb. 72 dargestellt. Erwartungsgemäß haben sich die damit erzielten Ergebnisse als weniger gut erwiesen, was vor allem mit der unzureichenden Nachbildung des Halsquerschnitts zusammenhängen dürfte. Im Folgenden werden Resultate dargestellt, die sich auf das „vollständige“ Modell beziehen. Dieses besteht aus 13 845 Elementen vom Hex8-Typ.

## 9.2. Randbedingungen und Materialkennwerte

Um mit dem „vollständigen“ Geometriemodell Berechnungen durchführen zu können, müssen Aussagen über die Randbedingungen und das Material gemacht werden. Als Referenz sollten die Messwerte für die Einspannung des Korpus im Schraubstock dienen; vgl. Abschnitt 4.1. Die Einspannung haben Meiershöfer und Pieper im FE-Modell dadurch berücksichtigt, dass sämtliche Freiheitsgrade der entsprechenden Knoten gesperrt wurden.

In Hinsicht auf die Dichte der Hölzer wurde aus dem Volumen des Modells und der Gesamtmasse der realen Gitarre, die 3,3 kg beträgt, zunächst ein mittlerer Wert abgeschätzt. Letztlich wurde mit dem Wert  $650 \text{ kg/m}^3$  für den Hals gerechnet, was im realistischen Bereich für Bergahorn liegt. Die Dichte des Korpus, der offenbar aus verleimtem Schichtholz unbekannter Herkunft gefertigt ist, wurde mit  $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$  geschätzt.

Aussagen über die Werkstoffkenngrößen der Holzmaterialien, aus denen die Gitarre besteht, sind in aller Regel problematisch. Die elastischen Eigenschaften des Korpus wurden als gleich verteilt und richtungsunabhängig betrachtet und durch den Elastizitätsmodul  $E = 6,2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  sowie die Querkontraktionszahl  $\nu = 0,27$  beschrieben. Der Hals aus Ahorn wurde als orthotropes Material behandelt. Für die elastischen Eigenschaften haben Meiershöfer und Pieper folgende Werte angenommen:

Elastizitätsmodul	$E_{11} = 1 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Elastizitätsmodul	$E_{22} = 6 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Elastizitätsmodul	$E_{33} = 1 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Schubmodul radial	$1,1 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Schubmodul tangential	$1,1 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Schubmodul längs	$0,22 \cdot 10^9 \text{ Pa,}$
Querkontraktionszahl $\nu_{12}$	$= 0,4$
Querkontraktionszahl $\nu_{31}$	$= 0,4$
Querkontraktionszahl $\nu_{23}$	$= 0,06$ .

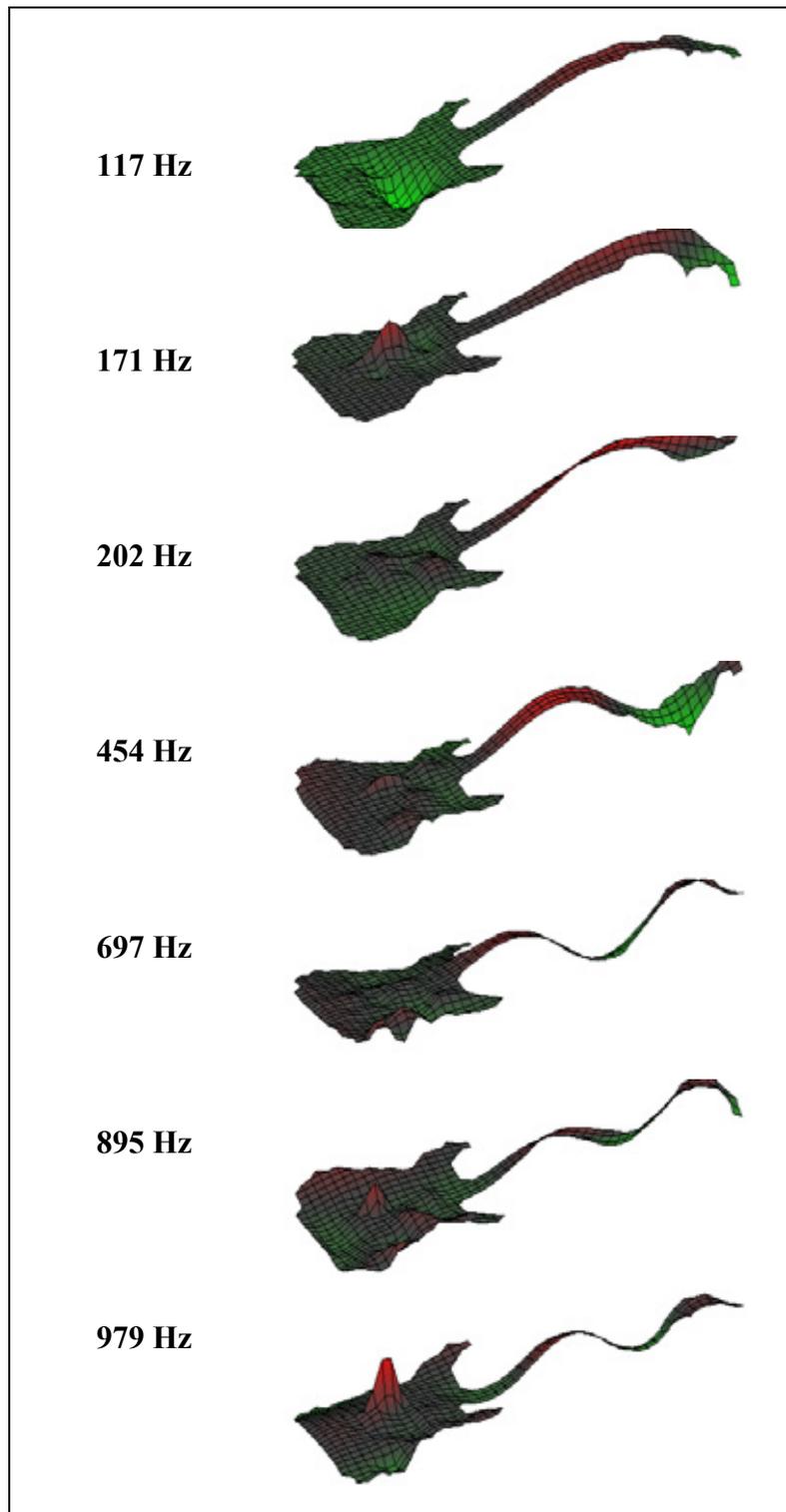
Diese Materialkennwerte sind teilweise Tabellenwerken (z.B. Kollmann 1982, Lohmann 1998) entnommen, teilweise auch „gefittet“ worden. Insgesamt erscheinen sie plausibel.

## 9.3. Ergebnisse der FE-Modalanalyse

### 9.3.1. Vorliegende experimentelle Resultate

Als Referenz sind in Tab. XXVII zunächst erneut Ergebnisse der Messung mit dem Scanning Vibrometer (Abschnitt 4.2) zusammengestellt, bei der die Gitarre am unteren Korpusende in

*Tab. XXVII. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der Gitarre im Schraubstock (Laser-Vibrometrie)*



einen Schraubstock eingespannt war. Diese Lagerung ist zwar realitätsfern, lässt sich aber physikalisch-mathematisch leicht formulieren. Neben den charakteristischen Frequenzen im Bereich zwischen 82 Hz (entsprechend der leeren E<sub>2</sub>-Saite) bis 1000 Hz enthält die Tabelle die zugehörigen Betriebsschwingungsformen. In Übereinstimmung mit sämtlichen übrigen Ergebnissen zeigt sich vorwiegend Biegung senkrecht zur Korpus-Griffbrett-Ebene, der in einigen Fällen Torsion überlagert ist.

*Tab. XXVIII. Charakteristische Schwingungen der Gitarre, die korpusseitig im Schraubstock eingespannt ist (vgl. die Messung in Abschnitt 4.2)*

<b>Charakteristische Frequenz</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>	<b>Schwingungstyp</b>
117 Hz	3	Biegung in Hauptrichtung
171 Hz ... 202 Hz	3	dito mit Torsion
454 Hz	4	Biegung in Hauptrichtung
697 Hz	5	Biegung in Hauptrichtung
895 Hz ... 979 Hz	6	dito mit Torsion

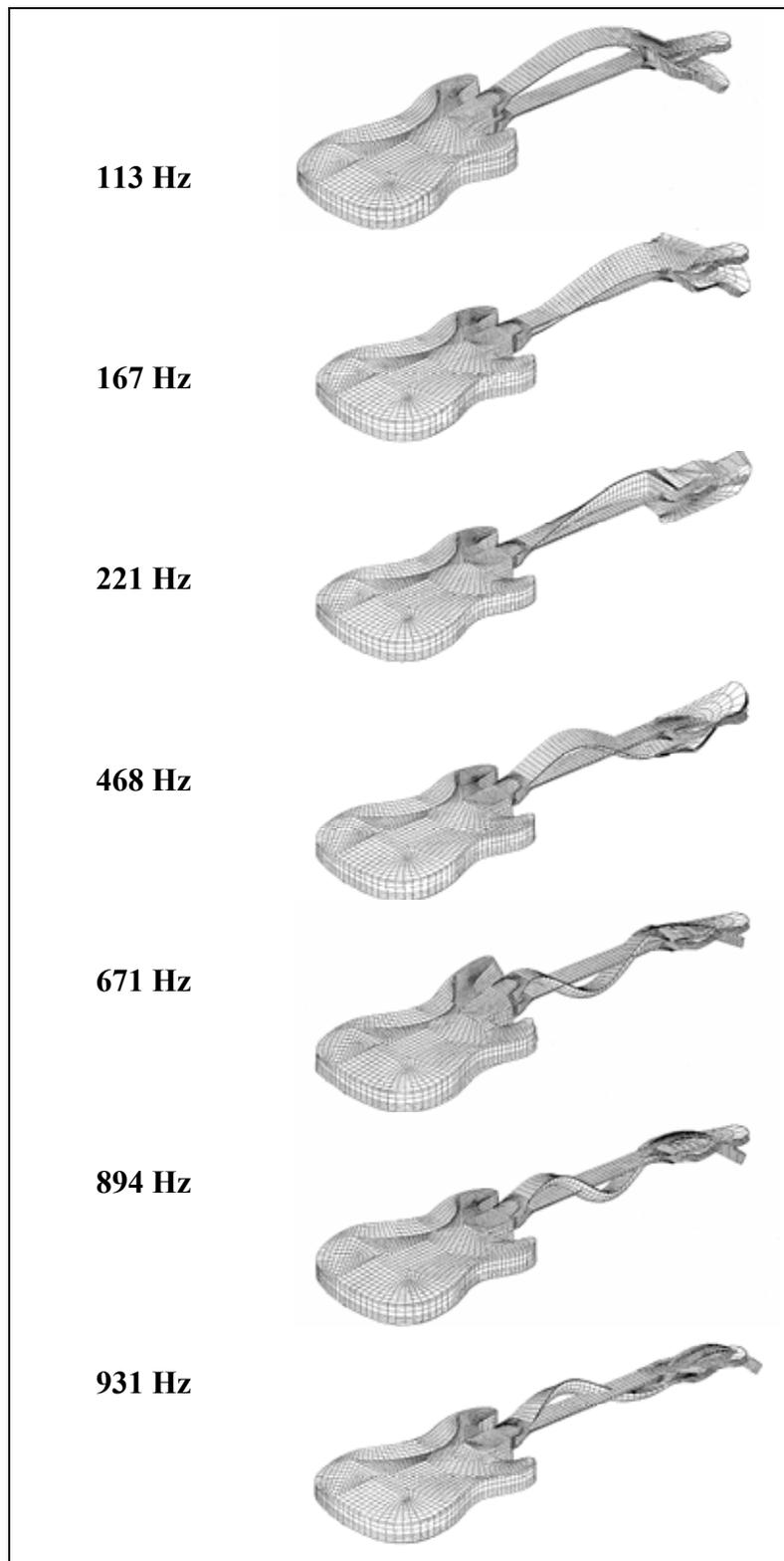
In einer weiteren Tab. XXVIII sind die Werte bzw. die Bereiche zusammengestellt, innerhalb derer die charakteristischen Frequenzen gemessen wurden. Als Ordnungskriterium dient primär die Anzahl der Knoten der Biegeschwingung senkrecht zur Korpus-Griffbrett-Ebene. In Abschnitt 2.4 war eingeführt worden, diese Schwingungsrichtung als Hauptrichtung zu bezeichnen. Den Überlegungen dieses Abschnitts zufolge hat diese Bewegungsrichtung die größte Bedeutung für die Funktion der E-Gitarre. Ergänzend ist angegeben, ob die Bewegung durch Biegung aus der Korpus-Griffbrett-Ebene heraus dominiert wird oder ob es sich um eine Kombination der Schwingungsarten Biegung und Torsion handelt.

Der untersuchte Bereich umfasst die Grundfrequenzen aller Töne, die auf dem Griffbrett gegriffen werden können. Es lassen sich Biegeschwingungsformen mit drei bis sechs Knoten unterscheiden. Dass sich der reinen Biegung in vielfältiger Weise Torsion überlagern kann, zeigt sich ganz deutlich zwischen 117 Hz und 202 Hz. In diesem Bereich hat die Messung mehrere Schwingungsmuster ergeben, die allesamt durch Biegung mit drei Knoten gekennzeichnet sind. Sie unterscheiden sich dadurch, dass mehr oder weniger ausgeprägter Torsion hinzukommt, woraus dann verschiedenartige Kombinationen resultieren.

### **9.3.2. Numerische Resultate**

Diesen experimentellen Ergebnissen stehen direkt die Resultate der FE-Rechnungen von Tab. XXIX gegenüber. Die Tabelle gibt Eigenfrequenzen samt den zugehörigen Eigenformen wieder, die vor allem durch Biegung in Hauptrichtung, d.h. aus der Korpus-Griffbrett-Ebene heraus, geprägt sind. Zusätzlich zur verformten Gitarre ist in jedem Bild die unverformte Struktur abgebildet, so dass sich die Schwingungsformen leicht identifizieren lassen.

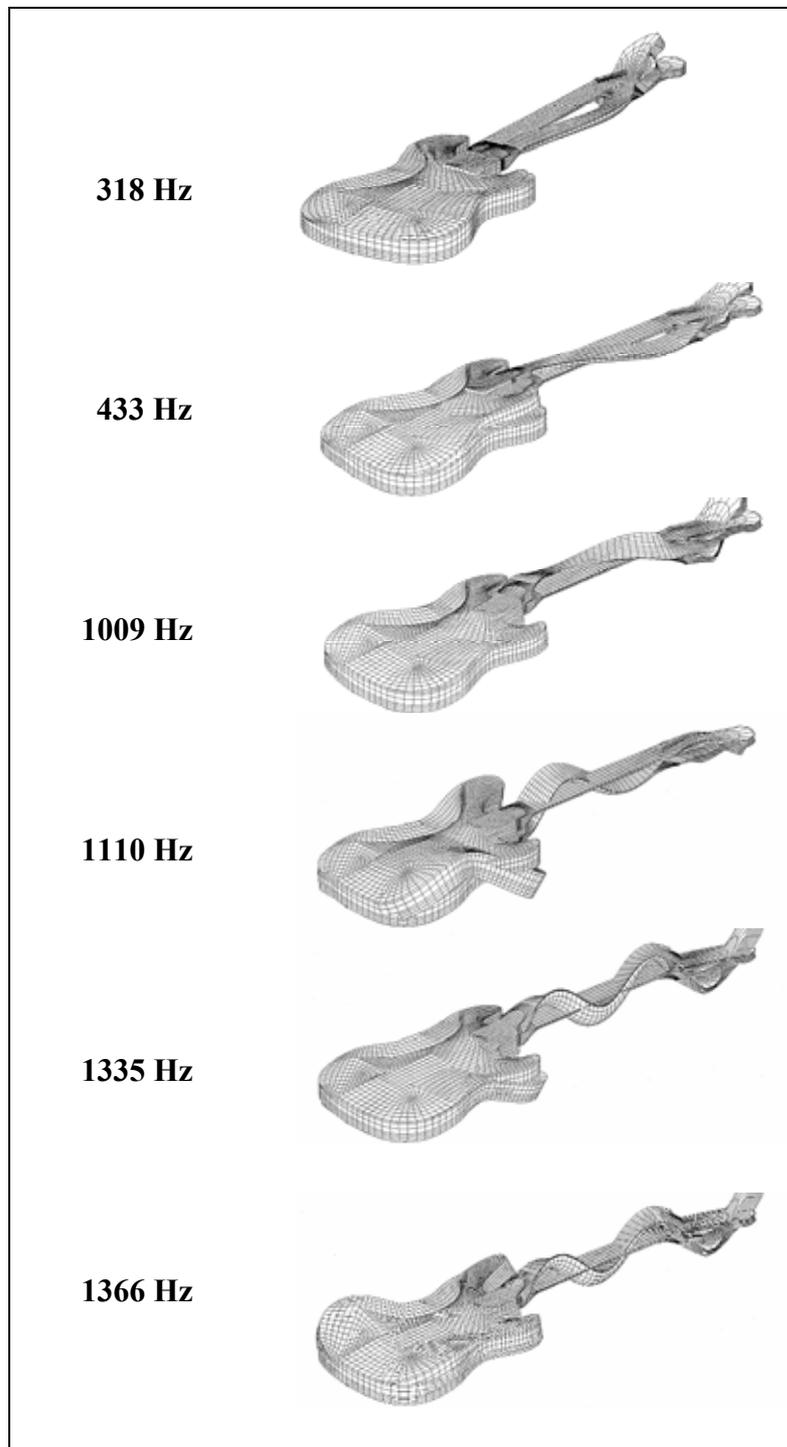
Tab. XXIX. Eigenfrequenzen und Eigenformen in Hauptrichtung der unten am Korpus festgehaltenen Gitarre im Frequenzbereich bis 1000 Hz (FEM)



Während diese Eigenformen direkt mit den Betriebsschwingungen von Tab. XXVII in Abschnitt 9.3.1 zu vergleichen sind, zeigt Tab. XXIX weitere Schwingungen, die bei der Vibrometermessung in Hauptrichtung nicht zutage traten. Beispiele sind die Eigenschwingungen bei 318 Hz und 433 Hz, die vor allem durch Biegung in Nebenrichtung, d.h. in der Ebene von

Korpus und Griffbrett, gekennzeichnet sind. Diese Schwingungen haben praktisch keine Komponenten in Richtung des Laserstrahls und können demnach keine Doppler-Verschiebung bewirken. In Hinsicht auf den Aspekt, dass sie auch Moden sichtbar macht, die sich der eindimensionalen Messung entziehen, reicht die Berechnung über das Experiment hinaus.

Tab. XXX. Weitere Eigenfrequenzen und Eigenformen der unten am Korpus festgehaltenen Gitarre (FEM)



Dies gilt in analoger Weise für die obere Grenze des betrachteten Frequenzbereichs. Die weiteren Eigenformen in Tab. XXX treten bei Frequenzen auf, die höher als 1 kHz sind. So ist bei 1009 Hz eine Biegeschwingung mit sechs Knoten und ausgeprägter Torsion zu beobach-

ten. Eine andere Variante, bei der sich der Korpus stark verwindet, zeigt sich bei 1110 Hz. Die beiden Eigenformen, die für 1335 und 1366 Hz errechnet wurden, weisen sieben Knoten auf und unterscheiden sich vor allen in den Bewegungsrichtungen der Hörner des Instrumentenkörpers. Während es schwierig ist, die höherfrequenten Schwingungen experimentell zu bestimmen, bereitet es keine Probleme, sie mit dem FE-Modell zu errechnen. Somit bietet sich die FE-Simulation als Werkzeug dafür an, Schwingungen des Gitarrenkörpers insbesondere bei hohen Frequenzen zu untersuchen.

Die errechneten Frequenzen sind in Tab. XXXI zusammengefasst. Die Schwingungsformen sind durch die Anzahl der Knoten längs der Gitarre und durch die Schwingungsart charakterisiert. Oberhalb der tiefsten Frequenz 82 Hz, die den Grundton der leeren E<sub>2</sub>-Saite kennzeichnet, sind im Bereich bis 1400 Hz insgesamt acht elementare Schwingungsformen zu unterscheiden. Varianten entstehen dadurch, dass Torsion überlagert ist oder dass Teile des Korpus sich unterschiedlich bewegen.

*Tab. XXXI. Mit FEM errechnete Eigenschwingungen der korpusseitig eingespannten Gitarre*

<b>Eigenfrequenz</b>	<b>Anzahl der Knoten</b>	<b>Schwingungstyp</b>
113 Hz	2	Biegung in Hauptrichtung
167 Hz ... 221 Hz	3	dito mit Torsion
318 Hz	2	Biegung in Nebenrichtung
433 Hz	3	Biegung in Nebenrichtung
468 Hz	4	Biegung in Hauptrichtung
671 Hz	5	Biegung in Hauptrichtung
894 Hz ... 1110 Hz	6	dito mit Torsion
1335 Hz ... 1366 Hz	7	Biegung in Hauptrichtung

### 9.3.3. Vergleich zwischen Experiment und Rechnung

Hinsichtlich der Schwingungsformen ist ein Vergleich der gemessenen Betriebsschwingungen mit den Ergebnissen der FE-Berechnungen an Hand von Anhang 16 möglich. Die Ergebnisse der Messungen (vgl. Tab. XXVII) und die entsprechen Rechenergebnisse (vgl. Tab. XXIX) sind dort zu einer gemeinsamen Auflistung so zusammengefasst, dass die Schwingungsmuster direkt nebeneinander liegen.

Im Allgemeinen ist die Übereinstimmung gut. Eine Ausnahme stellt die erste Biegeschwingung dar. Die Messung ergibt die Frequenz 117 Hz und einen Knoten im oberen Teil des Halses. Der Korpus weist zwei Knoten auf. Die Berechnung liefert bei fast der gleichen Frequenz 113 Hz ebenfalls einen Knoten nahe dem Sattel, auf dem Korpus jedoch lediglich einen Knoten bei der Einspannstelle. Offenbar ist der Korpus doch nicht ideal eingespannt und verhält sich „weicher“, als dies bei der FE-Rechnung angenommen wird. Im Übrigen stimmt die Rechnung mit dem Experiment sowohl in Hinsicht auf die Frequenz wie auch auf die Form der Schwingungen weitgehend überein. Es wurde daher nicht für notwendig erachtet, die Halterung im Schraubstock oder den Korpus anders zu modellieren.

Die Frequenzen der errechneten Eigenschwingungen sind denen der charakteristischen Betriebsschwingungen, wie sie die Messung ergeben hat, in Tab. XXXII gegenüber gestellt.

Aufgrund der Orientierung des Laserstrahls ist der Vergleich nur in Bezug auf die Haupt- richtung möglich. Die errechneten Frequenzen sind in aller Regel um 0,1 bis 3,8% kleiner als die gemessenen Werte. In wenigen Fällen ergibt die Rechnung höhere Frequenzen. So ist für Biegung mit Torsion bei 221 Hz bzw. 202 Hz der errechnete Wert um 9,4% größer als der ge- messene. Für Biegung mit vier Knoten ergibt die Rechnung einen um 3,1% höheren Wert als die Messung. Insgesamt gesehen ist mit dieser Modellierung bereits eine zufrieden stellende Nachbildung der tatsächlichen Verhältnisse erreicht.

Tab. XXXII. Mit FEM errechnete Eigenfrequenzen und gemessene charakteristische Frequenzen der korpusseitig eingespannten Gitarre

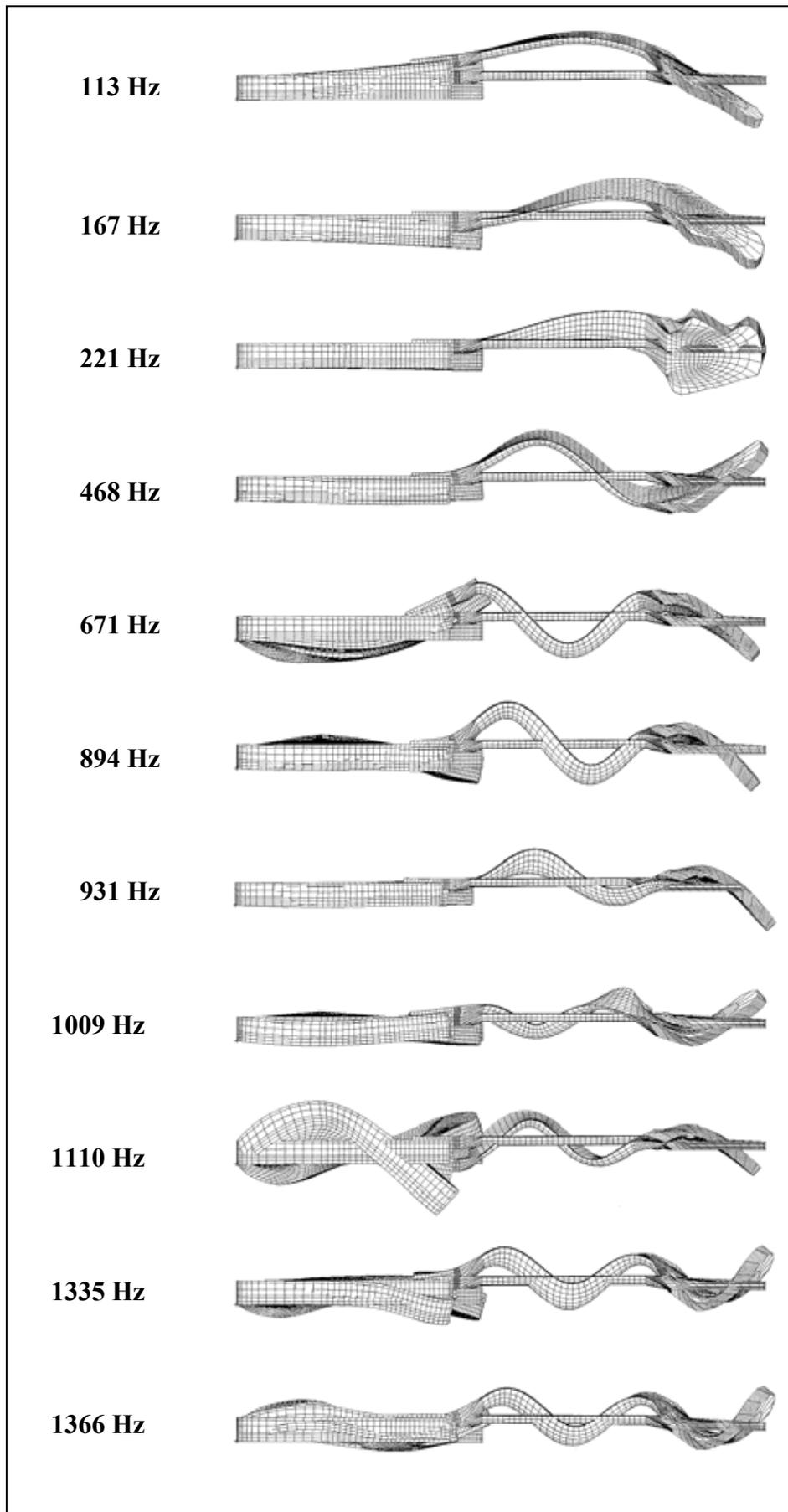
Anzahl der Knoten	Schwingungstyp	Eigenfrequenz (errechnet mit FEM)	charakteristische Frequenz (gemessen mit Vibrometer)	Ab- weichung
2	Biegung	113 Hz	117 Hz	-3,4%
3	dito mit Torsion	167 Hz ... 221 Hz	171 Hz ... 202 Hz	-2,3 ... +9,4%
4	Biegung	468 Hz	454 Hz	+3,1%
5	Biegung	671 Hz	697 Hz	-3,8%
6	dito mit Torsion	894 Hz	895 Hz	-0,1%

Es ist zu vermuten, dass die beobachteten Diskrepanzen sich durch Verfeinerung des Modells hinsichtlich Geometrie und Nachbildung der physikalischen Eigenschaften des Instruments weiter verringern lassen. Außerdem lehrt die Erfahrung, dass die Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment umso kleiner werden, je höher die Frequenz wird. Demnach kann vermutet werden, dass ein verfeinertes FE-Modell der E-Gitarre insbesondere bei hohen Fre- quenzen brauchbare Resultate liefern wird. Wie sich dies am Beispiel eines E-Basses gezeigt hat (Fleischer 2005), kann die Computer-Simulation dann zu einer wertvollen Ergänzung der experimentellen Untersuchung werden.

## 9.4. Zusammenfassende Bemerkung

Prinzipiell ist eine Simulation des Instrumentenkörpers im Computer anzustreben. Die Vor- stellung, das Instrument in „numerischen Experimenten“ entsprechend den Vorgaben zu op- timieren, ohne es tatsächlich verändern oder neu bauen zu müssen, ist bestechend. Der Weg zu einem hinreichenden Abbild der Realität birgt jedoch mehrere Schwierigkeiten. Zum einen ist die Geometrie des Korpus hinreichend genau zu übertragen. Mit entsprechendem Mess- und Diskretisierungsaufwand lässt sich diese Aufgabe lösen. Zum anderen sind die physikali- schen Eigenschaften der verwendeten Materialien zu beschreiben. Dieses Vorhaben ist insbe- sondere bei den verschiedenen Hölzern, aus denen eine Gitarre zusammengesetzt ist, ungleich schwieriger. Vermutlich lässt es sich gar nicht *en détail* lösen, sondern muss *en gros* durch iteratives „Fitten“, d.h. durch ständigen Vergleich von Rechnung und Experiment, erledigt werden.

Ein weiteres Problem ist, dass die Randbedingungen, wie sie beim Halten des Instruments in Spielhaltung am Körper in der Realität vorliegen, sich nur mit allergrößtem Aufwand nach- bilden lassen. Bei den Untersuchungen im vorliegenden Kapitel wurde diese Schwierigkeit dadurch umgangen, dass als Referenz das Festklemmen des Korpus an seinem unteren Ende gewählt wurde. Zwar ist diese Lagerung absolut praxisfern, hat aber den Vorteil, sich in der

*Tab. XXXIII. Eigenfrequenzen und Eigenformen der unten am Korpus festgehaltenen Gitarre (FEM)*

FE-Simulation leicht beschreiben zu lassen. Es kann jedoch keinesfalls erwartet werden, dass die hiermit errechneten Eigenfrequenzen und –formen in vollem Umfang repräsentativ für das Verhalten des Instruments am Körper sind. Jedoch hat bereits der Vergleich von Messungen unter „künstlichen“ Randbedingungen (Kapitel 4) mit den Ergebnissen der *in-situ*-Messungen in sitzender (Kapitel 5) und stehender Spielhaltung (Kapitel 6) gezeigt, dass der Einfluss der Randbedingungen mit zunehmender Frequenz nachlässt. So ist zu vermuten, dass die FE-Simulation trotz unzulänglicher Nachbildung der Randbedingungen am besten im höherfrequenten Bereich wirkt. Sie kann ihr bevorzugtes Einsatzgebiet bei denjenigen hohen Frequenzen finden, bei denen die Messung anfängt, allmählich schwierig und unergiebig zu werden.

Tab. XXXIII bezieht sich auf die Gitarre, die am unteren Korpusende fest eingespannt ist. Die Schwingungsformen und –frequenzen sind abschließend noch einmal in seitlicher Ansicht dargestellt, so dass die Bewegung deutlich wird, die für die Funktion der E-Gitarre die größte Bedeutung hat. Im Allgemeinen wird die Schwingung von Biegung in Hauptrichtung dominiert. Mit wachsender Frequenz steigt die Anzahl der Knoten längs der Mittellinie an. In einigen Fällen, so bei 167 Hz bzw. 221 Hz, überlagert sich Torsion. Dies geschieht in unterschiedlichen Phasenlagen und führt damit auf verschiedenartige Schwingungsbilder. Bei 894 Hz bzw. 931 Hz verbiegt sich der Hals auf jeweils gleiche Weise, jedoch führt der Korpus andersartige Bewegungen aus. Wenn noch Torsion hinzukommt (1009 Hz) und sich der Hals verwindet, sieht die Gesamtschwingung anders aus, als wenn sich vor allem der Korpus tordiert (1110 Hz). Da neben der verformten Struktur auch der Ruhezustand dargestellt ist und sich den rechnergenerierten Schwingungsbildern keinerlei Messfehler überlagern, lassen sich die diversen Schwingungsarten klar und deutlich identifizieren.

## 10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Im Laufe vieler Jahre wurde die E-Gitarre Squier Bullet am Institut für Mechanik auf vielfältige Art untersucht. Der vorliegende Bericht stellt eine Sammlung dar, in der umfassendes Material zum Schwingungsverhalten des Instruments zusammengetragen ist. Der Bogen ist weit gespannt von der punktuellen Messung von Admittanz und Konduktanz über Messungen der Schwingungsformen bei unterschiedlichen Randbedingungen bis hin zur Computer-Simulation der Korpuschwingungen. In Hinsicht auf die Schwingungen des Instrumentenkörpers ergibt sich daraus das folgende Gesamtbild.

Obwohl das *Solid Body*-Instrument auf den ersten Blick starr erscheint, erweist es sich doch als potentiell beweglich. Die Messungen mit dem Laser-Vibrometer (Kapitel 4 bis 7) haben zahlreiche unterschiedliche Betriebsschwingungen sichtbar gemacht. Hierbei hat sich wiederum bestätigt, in welchem hohem Maße Strukturschwingungen von den Randbedingungen beeinflusst werden. Experimente mit verschiedenartigen „künstlichen“ Lagerungen (Kapitel 4) haben Unterschiede in Form der charakteristischen Schwingungen und ihrer Frequenzen ergeben. Diese prägen sich am stärksten bei tiefen Frequenzen aus und verlieren umso mehr an Bedeutung, je höher die Frequenz wird.

Erst die Messungen *in situ*, d.h. wenn die Gitarre von einer Person in Spielhaltung am Körper gehalten wird, bilden die „natürlichen“ Randbedingungen nach, die das Instrument in der Realität tatsächlich vorfindet. Es wurden Experimente durchgeführt, bei denen die Gitarre im Sitzen (Kapitel 5) bzw. im Stehen (Kapitel 6) gehalten wurde. Für wirklichkeitsnahe Aussagen über das Schwingungsverhalten ist eine *in-situ*-Messung zumindest bis zu Frequenzen von etwa 400 Hz unverzichtbar. Bei der Messung ist die Gitarre am Körper zu halten. Jedoch hat sich gezeigt, dass die Messung im Stehen keine wesentlich anderen Ergebnisse liefert als diejenige im Sitzen. Es ist demnach keine zwingende Notwendigkeit erkennbar, der Person die anstrengende Körperhaltung im Stehen zuzumuten. Aussagekräftige Ergebnisse sind auch dann zu erwarten, wenn sie die Gitarre in sitzender Spielhaltung hält. Weitere Experimente (Kapitel 7) haben gezeigt, dass es im Hinblick auf die Rückwirkung des Korpus auf die Saitenschwingungen ausreicht, lediglich den Bereich zwischen dem Steg und dem Sattel zu erfassen. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche könnten zukünftige Messungen demnach zielgerichtet auf denjenigen Bereich der Gitarre begrenzt werden, welchen die Saiten überspannen.

Die bisherigen Messungen ergeben Betriebsschwingungen, jeweils gekennzeichnet durch die charakteristische Schwingungsform mit charakteristischer Frequenz. Inwiefern diese Schwingungen das Eigenverhalten des Korpus charakterisieren, wurde dadurch überprüft, dass ein Satz von experimentellen Vibrometer-Daten einer Modalanalyse unterzogen wurde. Insgesamt zeigt der Vergleich am Beispiel der im Ständer ruhenden Gitarre, dass eine sorgfältige Auswahl von charakteristischen Betriebsschwingungen bereits viel über das Eigenverhalten auszusagen vermag. Dass keine exakten Aussagen über die Dämpfung möglich sind und die Auswertung wesentlich vom Geschick des Experimentators abhängt, kann hierbei in Kauf genommen werden. Die Vorteile der raschen Auswertung und der leistungsfähigeren Visualisierung, die das Augenmerk von den Messfehlern weg und hin zum eigentlichen Gegenstand der Messung lenkt, werden als sehr hoch eingeschätzt. Es erscheint ausreichend, das Schwingungsverhalten des Musikinstruments durch die charakteristischen Betriebsschwingungen zu beschreiben, die sich direkt mit der Software des *Scanning Vibrometer* bestimmen lassen. Eine gesonderte Modalanalyse bedeutet einen sehr viel höheren Aufwand, dem kein allzu großer Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Funktion des Instruments gegenüber steht.

Im abschließenden Kapitel 9 ist erstmals die Methode der Finiten Elemente dazu verwendet worden, den Korpus der Gitarre Squier Bullet und sein Schwingungsverhalten am Rechner zu simulieren. Die Geometrie des Instruments ist problemlos zu beschreiben. Dagegen gelingt es nur unzureichend, seine Materialien und die Randbedingungen zu charakterisieren. Die Materialkennwerte mussten teilweise „gefittet“ werden. Als Lagerung wurde die zwar realitätsferne, aber leicht zu formulierende Einspannung am unteren Ende gewählt. Da die rechnergenerierten Schwingungsbildern keinerlei Messungenauigkeiten enthalten, lassen sich die diversen Schwingungsarten klar und deutlich identifizieren. Insgesamt nähern die Rechnergebnisse experimentelle Daten brauchbar an. Damit ist nun im Grundsatz die Voraussetzung dafür geschaffen, „numerische Experimente“ durchzuführen. Geometrie und/oder Material lassen sich modifizieren und die Auswirkungen auf Schwingungsformen und Schwingungsfrequenzen simulieren, ohne dass am Instrument tatsächlich Änderungen vorgenommen werden müssen.

Die Grundtöne der normal gestimmten Gitarre liegen zwischen 83 Hz (leere E<sub>2</sub>-Saite) und 988 Hz (E<sub>4</sub>-Saite, gegriffen am Bund Nr. 21). Die Messungen haben übereinstimmend ergeben, dass das Instrument in diesem Bereich jene fünf markanten Schwingungsformen ausbildet, auf die sich Tab. XXXIV bezieht. Dabei handelt es sich primär um Biegeschwingungen. Der ersten dieser Schwingungen überlagert sich Torsion, so dass zwei Kombinationsformen entstehen, die sich so deutlich voneinander unterscheiden, dass sie getrennt aufgeführt sind.

*Tab. XXXIV. Charakteristische Halsschwingungen der Gitarre, die VPn am Körper halten*

<b>Charakteristische Frequenz</b>	<b>Anzahl der Knoten auf dem Griffbrett</b>
170 Hz ... 175 Hz	1 (+ Torsion)
205 Hz ... 210 Hz	1 (+ Torsion)
422 Hz ... 445 Hz	2
675 Hz ... 690 Hz	3
945 Hz ... 955 Hz	4

In Abb. 73 sind einige Schwingungsformen, die sich zwischen Steg (links im Bild) und Sattel (rechts) ausbilden, zusammengestellt. Man blickt seitlich auf den Hals. Das Griffbrett nimmt etwa die rechten drei Viertel der Strecke zwischen dem Sattel und dem Steg ein. Demzufolge weisen die ersten Schwingungsformen einen Knoten, die zweite dagegen zwei Knoten auf dem Griffbrett auf. Im Bereich der Grundfrequenzen bilden sich noch zwei weitere Schwingungen mit drei bzw. vier Knoten auf dem Griffbrett aus. Zu wissen, wo ein Knoten liegt, ist insofern wichtig, als eine Anregung der betreffenden Schwingung im Knoten nicht möglich ist. Am wirkungsvollsten lässt sich die Schwingung an den dazwischen liegenden Bäuchen hervorrufen.

Wie wirken die Schwingungen des Instrumentenkörpers auf die Saiten zurück? Eine akustische Gitarre funktioniert nur dann, wenn die Saite an mindestens einem ihrer beiden Enden beweglich gelagert ist. So kann die Saite Schwingungsenergie auf den Korpus übertragen und das Instrument zum Mitschwingen bringen. Obwohl zu einem gewissen Maße auch der Hals Energie aufnehmen kann (Fleischer 1997, 2001c), ist primär der Steg das bewegliche Ende und damit das „Eingangstor“ für Schwingungsenergie in den Schallstrahler.

Das Umgekehrte gilt für die elektrische Gitarre. Schall entsteht hier nicht durch Mitschwingen des Korpus. Vielmehr werden die Schwingungen der Saite über die Tonabnehmer in

elektrische Signale umgewandelt, verstärkt und über Lautsprecher abgestrahlt. Eine gut gefertigte E-Gitarre ist am Steg praktisch stets in Ruhe. Ein bewegliches (Admittanz ungleich null) bzw. für Energie aufnahmefähiges (Konduktanz ungleich null) Auflager kann die Saite dagegen am Hals vorfinden. In diesem Fall ist das Griffbrett - oder bei leer gespielter Saite der Steg - das Eingangstor für Schwingungsenergie. Während bei der akustischen Gitarre Schall nur dadurch entstehen kann, dass Schwingungsenergie von der Saite in den Abstrahlkörper fließt, bringt bei der E-Gitarre eine Anregung des Korpus zum Schwingen keinerlei Nutzeffekt. Ein Mitschwingen des Korpus bewirkt lediglich, dass die Saitenschwingung in Folge des zusätzlichen Energieverlustes rascher abklingt, als dies bei einem unbeweglichen Abschluss der Fall wäre. Es ist daher als parasitär anzusehen.

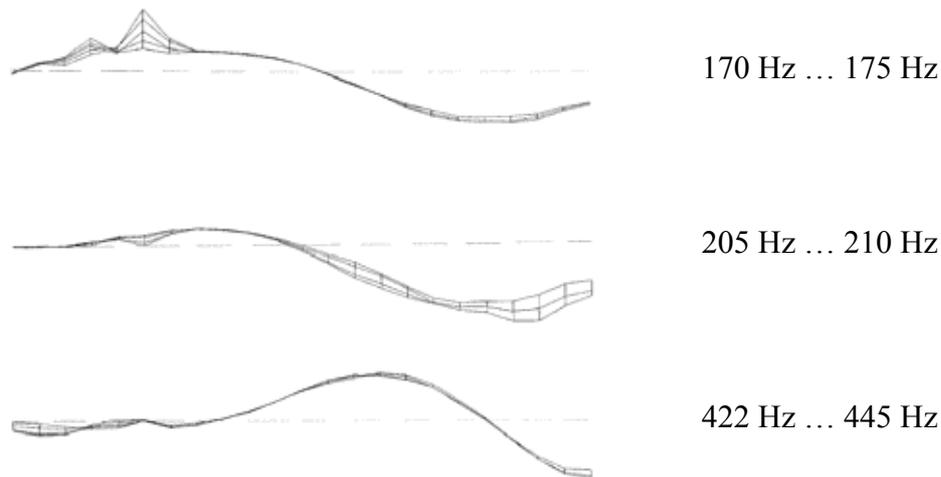


Abb. 73. Schwingungen des Korpus im Bereich zwischen dem Steg (links) und dem Sattel (rechts).

Die Messgröße, mit der sich die „Schwingfreudigkeit“ des Korpus kennzeichnen lässt, ist die Punktadmittanz (Kapitel 2). Die Aufnahmefähigkeit für Schwingungsenergie ist durch deren Realteil, die Konduktanz, beschrieben. Bei deren Messung auf dem Griffbrett stellt man für die Stellen, an denen die Saiten aufliegen, eine starke Abhängigkeit vom Ort und von der Frequenz fest. Bestimmt man die Konduktanz längs des Halses als Funktion der Frequenz und fügt die Messkurven zu einem Diagramm zusammen, so entsteht eine Art Gebirge (Kapitel 3). Ob mit Auswirkungen auf das Abklingen der Grundschwingungen der Saiten zu rechnen ist, lässt sich mittels einer Auswerteschablone abschätzen, die auf das Konduktanz-Gebirge gelegt wird. Bedingt durch die Torsion, die sich beispielsweise bei etwa 200 Hz in unterschiedlicher Relation zur Biegung ausprägt, ist bei der betrachteten Gitarre zudem eine laterale Abhängigkeit der Konduktanz zu beobachten. Um im Einzelnen zu untersuchen, wie sich die Konduktanz auf das Abklingen der Saitenschwingungen auswirken wird, ist es in aller Regel geboten, die Konduktanz an den Auflagepunkten für jede Saite getrennt zu messen.

Abb. 74 zeigt ein Beispiel. Die Konduktanz wurde an halsseitigen Auflagepunkten der D<sub>3</sub>-Saite gemessen. Als charakteristisch sind Ergebnisse für den Sattel (Bund Nr. 0) sowie für vier weitere Bündel herausgegriffen. Neben den Messdiagrammen sind die Frequenzen der beiden ersten Teilschwingungen der leeren bzw. gegriffenen Saite angegeben. Diese rufen die beiden ersten Teiltöne im Tonabnehmersignal und damit im Gitarrenklang hervor. Mechanische Schwingung und elektrisches Signal klingen im selben Maße ab, so dass die Unterscheidung zwischen Teilschwingung und Teilton entfallen kann. Inharmonizitäten im Klangspektrum, wie sie z.B. Völk et al. (2006) behandelt haben, wurden bei den Teiltönen mit kleiner Ordnungszahl nicht beobachtet. Folglich hat der zweite Teilton die doppelte Frequenz des ersten Teiltönen. Die musikalischen Bezeichnungen sind in Klammern eingefügt. Mit Hilfe des *Search Point* des FFT-Analysators wurden für die angegebenen Frequenzen die Zahlenwerte der Konduktanz ausgelesen. Sie finden sich im unteren Diagramm von Abb. 75.

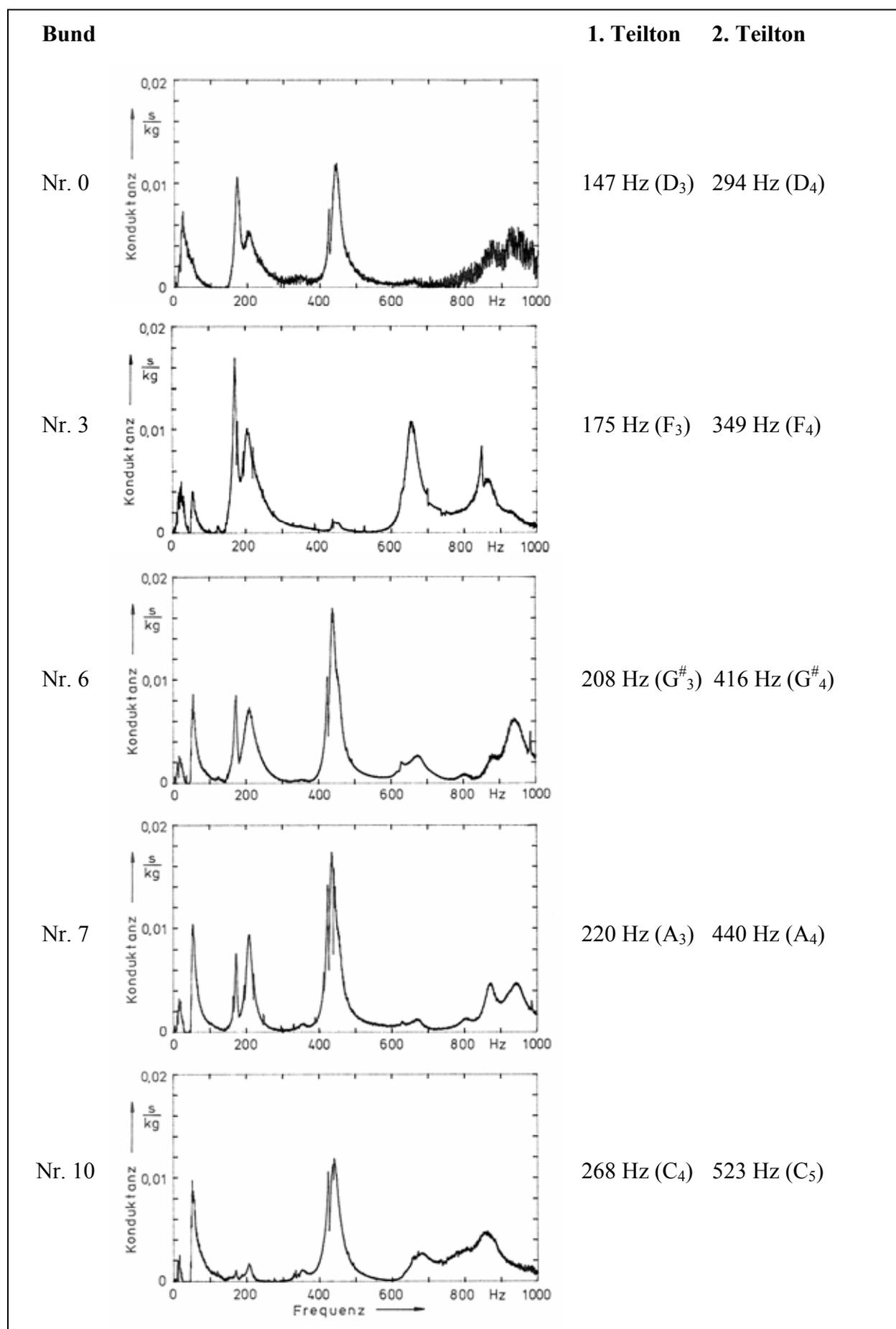


Abb. 74. Konduktanz an verschiedenen Auflagepunkten der D<sub>3</sub>-Saite

Im oberen Diagramm von Abb. 75 ist die Abklingzeit  $T_{30}$  angegeben. Sie basiert auf den „Wasserfalldiagrammen“ von Abb. 77. Die dort angegebenen Zahlenwerte kennzeichnen, nach welcher Zeit  $T_{30}$  der Pegel des betreffenden Teiltones um 30 dB abgefallen ist. Dieser Kennwert hat sich in früheren Untersuchungen (Fleischer 2000, 2001a, 2005, Fleischer und Zwicker 1999) als sinnvolle Messgröße bewährt. Er ist gleich dem 3,45-Fachen der Zeitkonstante  $\tau$  bzw. der Hälfte der Nachhallzeit  $T_N$ , die in der Raumakustik gebräuchlich ist.

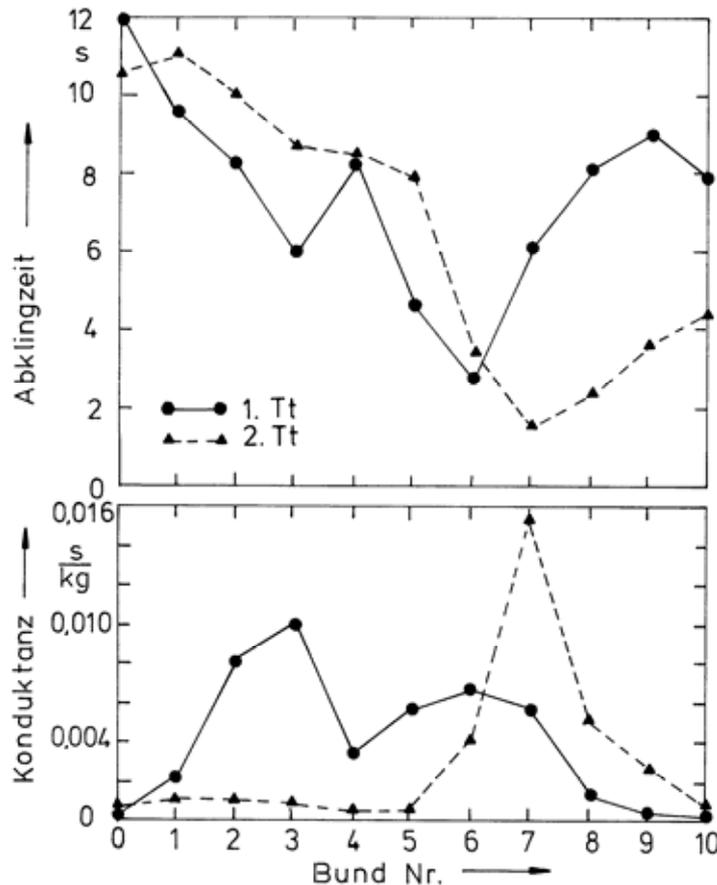


Abb. 75. Konduktanz (unten) und Abklingzeit  $T_{30}$  (oben) am Sattel und an zehn Bünden der  $D_3$ -Saite für den ersten (ausgefüllte Kreise) und den zweiten Teilton (Dreiecke).

Für den ersten Teilton (Kreise in Abb. 75) nimmt die Konduktanz (unten) Werte zwischen weniger als 0,001 s/kg und 0,01 s/kg an. Der Höchstwert wird am Bund Nr. 3 erreicht, ein weiteres lokales Maximum am Bund Nr. 6 beobachtet. Für den zweiten Teilton (Dreiecke) misst man bis zum Bund Nr. 5 Konduktanzen, die kleiner als 0,001 s/kg sind. Zu den mittleren Lagen hin ist ein dramatischer Anstieg zu verzeichnen. Das Maximum mit 0,0154 s/kg tritt am Bund Nr. 7 auf. Danach fällt die Konduktanz wieder ab.

Findet die Saite zwei feste Auflager vor, dann wirkt lediglich die innere Dämpfung. Nach früheren Überlegungen (Fleischer 2000, 2001a, 2005) ist die Abklingzeit, die daraus resultiert, der Frequenz umgekehrt proportional. In diesem „regulären“ Fall wäre zu erwarten:

- Die Abklingzeit eines Teiltones nimmt stetig im selben Maße ab, wie seine Frequenz zunimmt. Von einem Bund zum nächsten wird sie entsprechend dem Halbtonschritt um den Faktor  $1/1,06 = 0,944$  kleiner. Sie ist am Bund Nr. 12 noch halb so groß, wie wenn die Saite leer gespielt wird (Bund Nr. 0).
- Da der zweite Teilton eine doppelt so hohe Frequenz wie der erste hat, klingt er auch doppelt so schnell ab. Seine Abklingzeit ist halb so groß wie die des ersten Teiltones.

Diesen Erwartungen entsprechen die Messwerte im oberen Diagramm von Abb. 75 in weiten Bereichen nicht. Zwar ist eine gewisse abfallende Tendenz der Abklingzeit zu erkennen, jedoch nimmt weder die Abklingzeit eines Teiltones stetig ab, wenn an einem höheren Bund gegriffen wird, noch klingt der zweite Teilton immer doppelt so schnell ab wie der erste.

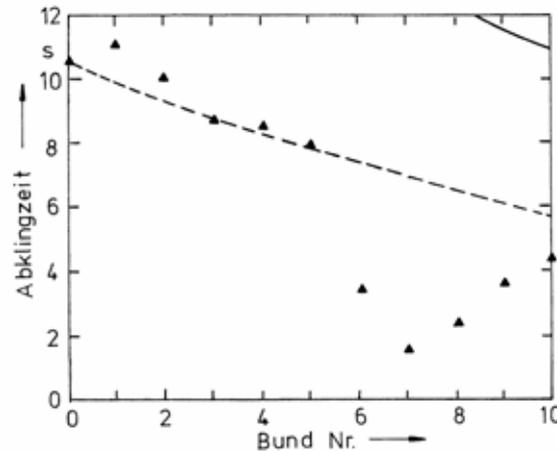


Abb. 76. Abklingzeit  $T_{30}$  am Sattel und an zehn Bünden der  $D_3$ -Saite für den zweiten Teilton.  
Gestrichelte Kurve: Abklingen in Folge innerer Dämpfung mit dem Verlustfaktor  $E_2/E_1 = 0,0004$ .  
Durchgezogene Kurve: Entsprechender theoretischer Verlauf für den ersten Teilton.

Der Grund für die Diskrepanz ist die Tatsache, dass die Saite am halsseitigen Ende ein Auflager vorfindet, das nach Maßgabe der Konduktanz Dämpfungseigenschaften hat. Dies hat zur Folge, dass an Stellen mit hoher Konduktanz nicht mehr die innere Dämpfung, sondern die Auflagerdämpfung das Abklingen dominiert. Abb. 76 zeigt dies am Beispiel der Abklingzeit des zweiten Teiltones. Die durchgezogene Kurve rechts oben würde das Abklingen des ersten Teiltones in Folge innerer Dämpfung mit einem Verlustfaktor für 0,4 Promille kennzeichnen. Gestrichelt ist die Kurve eingezeichnet, die das „reguläre“ Ausschwingen des zweiten Teiltones beschreibt. Sie gibt den Verlauf der gemessenen Abklingzeiten für die Bündel Nr. 0 bis 5 sowie Nr. 10 brauchbar wieder. Insbesondere an den Bündel Nr. 6 bis 8 klingt der zweite Teilton jedoch sehr viel rascher ab, als es bei ausschließlicher Wirkung innerer Dämpfung zu erwarten wäre. Ein Blick auf Abb. 76 unten lehrt, dass für den zweiten Teilton die Konduktanz an den Bündel Nr. 6 bis 8 sehr viel höhere Werte annimmt, als in den tiefen und hohen Lagen. Die irregulär kurzen Abklingzeiten, die für manche Orte und Frequenzen beobachtet werden, lassen sich nur interpretieren, wenn die Konduktanz in Betracht gezogen wird.

Dies soll nicht quantitativ im Detail geschehen. Vielmehr soll ein qualitativer Vergleich der Abklingzeiten in Abb. 75 oben mit der Konduktanz in Abb. 75 unten aufzeigen, dass eine hohe Konduktanz zu einer kurzen Abklingzeit führt. Dies war für den zweiten Teilton schon belegt worden; die extrem kurze Abklingzeit von 1,6 s am Bund Nr. 7 geht mit der extrem hohen Konduktanz von 0,0154 s/kg einher. Analoge Beobachtungen sind an anderen Bündel für den ersten Teilton zu machen. In Abb. 75 fallen im oberen Diagramm zwei lokale Minima auf, denen zwei lokale Maxima im unteren Diagramm gegenüber stehen. So korrespondiert am Bund Nr. 3 die (kurze) Abklingzeit 6,2 s mit der (großen) Konduktanz 0,01 s/kg. Am Bund Nr. 6 werden die Abklingzeit 2,1 s und die Konduktanz 0,0068 s/kg gemessen. Auch in diesen Beispielen zeigt sich deutlich ein inverser Zusammenhang: Eine hohe Konduktanz führt dazu, dass die betroffene Teilschwingung der Saite – und damit der Teilton im Gitarrenklang – irregulär rasch abklingt.

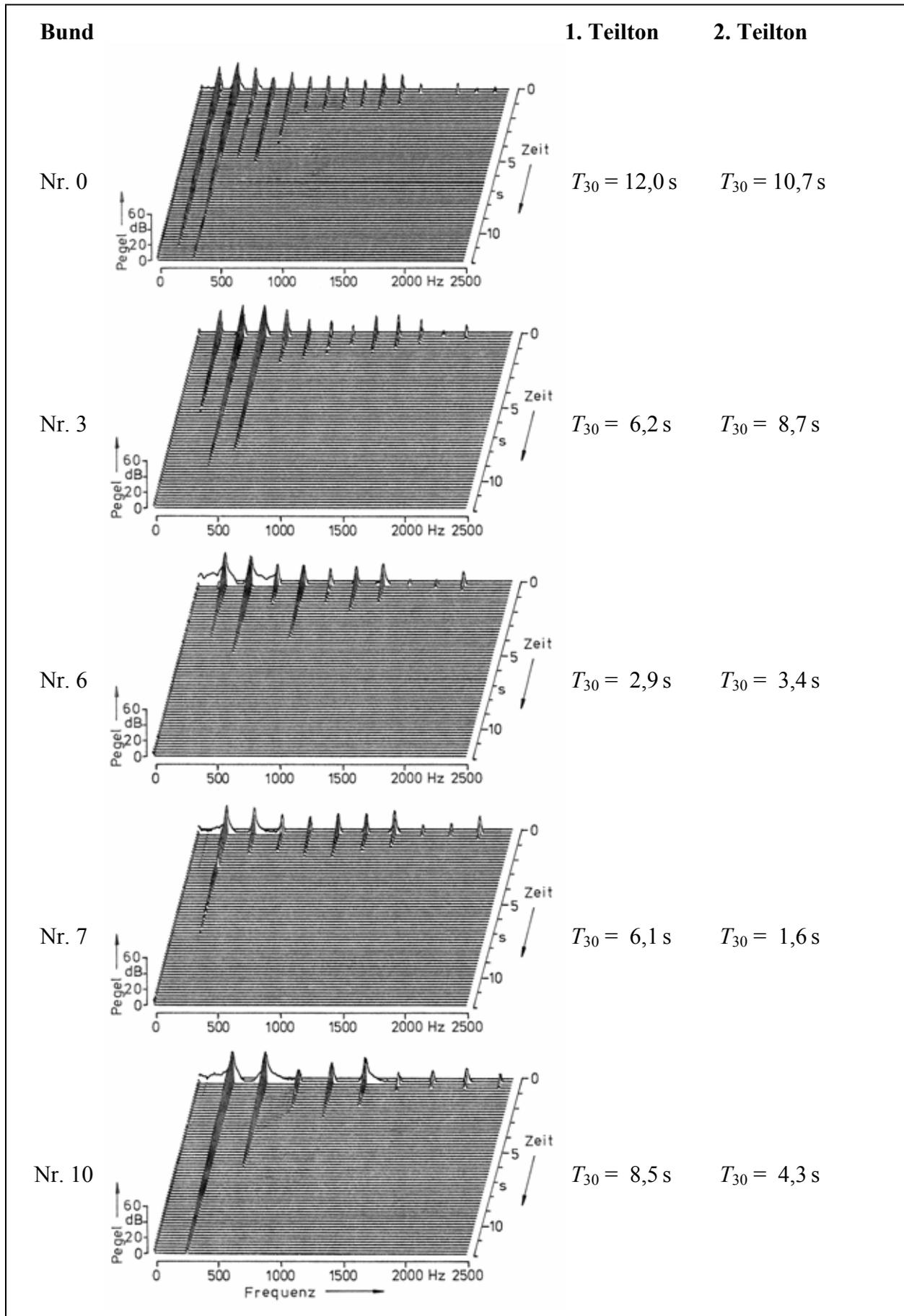


Abb. 77. Abklingen des Tonabnehmersignals an verschiedenen Bündeln der  $D_3$ -Saite

Welche Folge diese Erscheinung auf das Abklingen des Gesamtklages haben kann, lässt sich an Hand der Wasserfalldiagramme von Abb. 77 beurteilen. Dort ist in dreidimensionaler Darstellung der Pegel des Tonabnehmersignals über der Frequenz (nach rechts) und über der Zeit (nach vorne) aufgetragen, so dass der zeitliche Verlauf der einzelnen Teiltöne des Gitarrenklages sichtbar wird.

- Die Bünde Nr. 0 oder Nr. 10 können als Beispiele für den Fall dienen, dass innere Dämpfung das Abklingen der Teiltöne weitgehend bestimmt: Je größer die Ordnungszahl eines Teiltones ist, desto kürzer ist seine Abklingzeit. Der erste Teilton klingt am längsten nach und bestimmt das Abklingen des Gesamtklages. Je kürzer die Saite gegriffen wird, d.h. je höher die Frequenz wird, desto rascher klingt der Gesamtklang ab.
- Am Bund Nr. 7 klingt der zweite Teilton besonders kurz nach. Die Auswirkung auf das Abklingen des Gesamtklages ist gering, da dieses durch den ersten Teilton dominiert wird.
- Am Bund Nr. 3 klingt der erste Teilton irregulär schnell ab. Dies wirkt sich auf den Gesamtklang insofern stärker aus, als nunmehr der zweite Teilton mit seiner von Hause aus kürzeren Abklingzeit das Abklingen des Gesamtklages bestimmt. Diese Konstellation könnte als „*Dead Spot* erster Art“ bezeichnet werden.
- Ein „*Dead Spot* zweiter Art“ mit noch eklatanteren Auswirkungen auf das Abklingen des Gesamtklages ist am Bund Nr. 6 zu beobachten. Sowohl der erste als auch der zweite Teilton klingen irregulär schnell ab. (Dasselbe gilt für den dritten Teilton, der hier nicht explizit behandelt wird). Der Gitarrist spricht hier von schlechtem *Sustain*. Der Klang der D<sub>3</sub>-Saite, gegriffen an diesem Bund, „steht“ nicht. Er schwindet rasch und hört sich „tot“ an.

Nachdem nun Abfließen von Schwingungsenergie über das kopfseitige Ende der gegriffenen Saite als Ursache für „*Dead Spots*“ feststeht, soll abschließend noch einmal die Ursache klar-

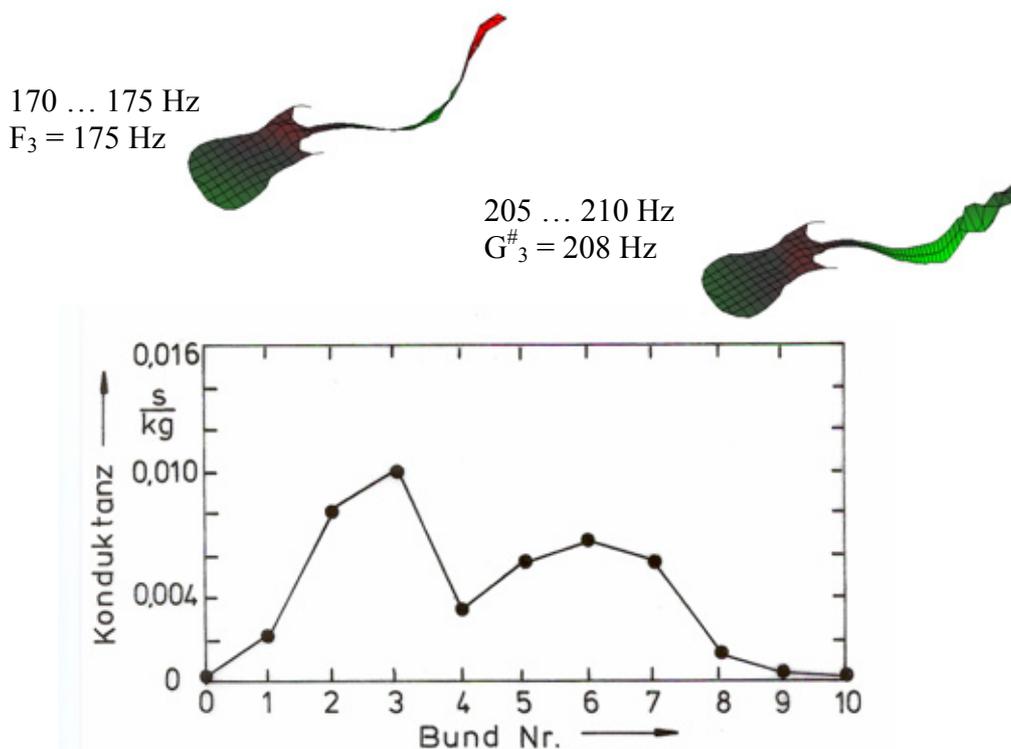


Abb. 78. Konduktanz am Sattel und an zehn Bänden der D<sub>3</sub>-Saite für den ersten Teilton.

gemacht werden. Die Saite bringt mit der „passenden“ Frequenz an einer „passenden“ Stelle den Instrumentenkörper zum Mitschwingen. Die mechanischen Schwingungen des Instrumentenkörpers, die in den betrachteten Fällen eine Rolle spielen, sind in den Abb. 78 und 79 visualisiert.

Abb. 78 bezieht sich auf den ersten Teilton. Zwei Fälle sind zu unterscheiden: Wird die D<sub>3</sub>-Saite am Bund Nr. 3 gegriffen, dann entsteht die musikalische Note F<sub>3</sub> entsprechend 175 Hz. Bei Frequenzen zwischen 170 Hz und 175 Hz tritt eine Halsschwingung auf, die einen Bauch nahe dem Bund Nr. 3 aufweist; vgl. auch Abb. 73. Die Saite bringt den Hals in starkem Maße zum Mitschwingen. Der zweite Fall tritt ein, wenn der Gitarrist dieselbe Saite am Bund Nr. 6 greift und die Note G<sup>#</sup><sub>3</sub> entsprechend 208 Hz erklingt. Zwischen 205 Hz und 210 Hz wird eine zweite Variante der Halsschwingung beobachtet, die einen Schwingungsbauch an der Stelle aufweist, an der die Saite Kontakt mit dem Griffbrett hat. Wiederum versetzt die Grundschwingung der Saite den Hals in Resonanz.

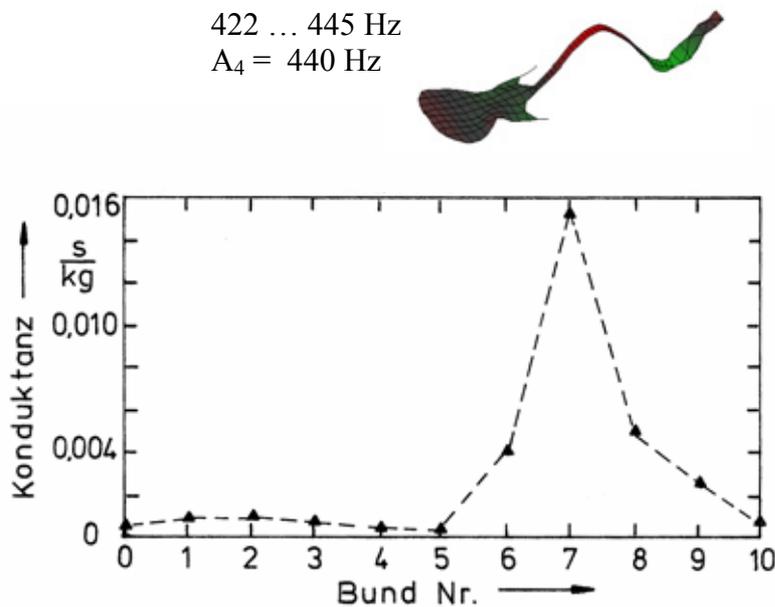


Abb. 79. Konduktanz am Sattel und an zehn Bünden der D<sub>3</sub>-Saite für den zweiten Teilton.

Abb. 79 gilt für den zweiten Teilton. Wird die D<sub>3</sub>-Saite am Bund Nr. 7 gegriffen, entsteht ein Klang, der mit A<sub>3</sub> entsprechend 220 Hz notiert ist. Der zweite Teilton, eine Oktave höher, ist A<sub>4</sub> entsprechend 440 Hz. Die 440 Hz-Teilschwingung der Saite versetzt den Hals in Resonanz. Die Frequenz der entsprechenden Halsschwingung liegt zwischen 422 Hz und 445 Hz. Die Anregung gelingt besonders gut, da der Hals einen ausgeprägten Schwingungsbauch am Bund Nr. 7 aufweist; vgl. Abb. 73. Auch hier ist die Wirkungskette deutlich zu erkennen: Eine Teilschwingung der Saite versetzt den Instrumentenkörper in starkem Maße in Resonanz, da sowohl die Frequenz, als auch der Kontaktpunkt zwischen Saite und Hals „passen“. Schwingungsenergie fließt von der Saite zum Instrumentenkörper und wird dort letztlich in Wärme umgewandelt. Anders als bei einem Streichinstrument wird der Saite einer Gitarre keine Energie nachgeliefert. Stärke und Dauer der Saitenschwingung – und damit des musikalischen Signals – sind ausschließlich von der beim Zupfen einmalig zugeführten Energie und deren Abfließen bestimmt. Fließt mehr Energie ab, als durch die physikalischen Gegebenheiten (innere Dämpfung; evt. Luftreibung) ohnehin determiniert ist, klingt die betreffende Saitenschwingung unter Umständen sehr viel rascher ab, als dies ohne den zusätzlichen Energieverlust der Fall wäre.

Dieser Sachverhalt und seine Auswirkungen auf das Abklingverhalten ist für elektrische Gitarren und Bässe inzwischen ausführlich untersucht und auch in Online-Veröffentlichungen (Fleischer 1999c und d) populärwissenschaftlich dargestellt worden. Er stellt den Schlüssel zum Verständnis des Effekts der „*Dead Spots*“ dar und zeigt, dass auch bei scheinbar massiven Instrumenten mit *Solid Body* Schwingungen auftreten und die Funktion des Gesamtsystems merklich beeinflussen können. Damit steht die untersuchte Gitarre als Beispiel für vielfältige weitere Strukturen aus dem Bereich der Technik, bei denen Schwingungen zu völlig unerwarteten Erscheinungen führen können.

*Der Autor dankt Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif für hilfreiche Anmerkungen zum Manuskript. Frau Dipl.-Ing. Karin Danneberg hat dankenswerterweise wertvolle Unterstützung bei der Erfassung und der digitalen Weiterverarbeitung der Messdaten geliefert.*

## LITERATUR

- Blau, Ph., *Laservibrometrie mit anschließender Modalanalyse. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2006.*
- Bürger, C., *Schwingungsmessungen mit dem Scanning Vibrometer an Lautsprechern und Gitarren. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2002.*
- Carlson, M., *Application of Finite Element Analysis for an improved musical instrument design. Technical Report, Fender Corp., Corona 1998 (?)*.
- Chladni, E.F.F., *Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.*
- Einbrodt, U.D., *Experimentelle Untersuchungen zum Gitarrensound in der Rockmusik. Peter Lang, Frankfurt am Main 1997.*
- Elejbarrieta, M.J., Ezcurra, A. und Santamaria, C., *Vibrational behaviour of the guitar soundboard analysed by the Finite Element Method. Acustica - acta acustica 87 (2001), 128 - 136.*
- Fleischer, H., *Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 01/97. Hrsg. F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1997.*
- Fleischer, H., *Schwingungen akustischer Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/98. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. UniBw München, Neubiberg 1998a.*
- Fleischer, H., *In-situ-Messung der Schwingungen von E-Gitarren. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 1998). DEGA, Oldenburg 1998b, 300 - 301.*
- Fleischer, H., *Diagnosing dead spots of electric guitars and basses by measuring the mechanical conductance. Acustica - acta acustica 85 (1999a), Suppl. 1, 404 und Collected Papers of the 137th ASA Meeting and 2nd EAA Convention Integrating the 25th DAGA, 5 AMUB\_6.*
- Fleischer, H., *Dead spots of electric basses. 1. Structural vibrations. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/99. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 1999b.*
- Fleischer, H., *Dead Spots von Elektrogitarren. WWW-Artikel unter der Adresse [http://www.unibw.de/lrt4/forschung/forschung\\_fleischer/veroeffentlichungen\\_fleischer/deadspots\\_pic/deadspots\\_d](http://www.unibw.de/lrt4/forschung/forschung_fleischer/veroeffentlichungen_fleischer/deadspots_pic/deadspots_d). Neubiberg 1999c.*
- Fleischer, H., *Dead spots of electric guitars and basses. Lay Language Paper der Acoust. Soc. Amer. im WWW unter der Adresse <http://www.acoustics.org/press/137th/fleischer.html>. Berlin 1999d.*
- Fleischer, H., *Dead spots of electric basses. 2. Diagnosis. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/00. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2000.*
- Fleischer, H., *Abklingen der Saitenschwingungen von Solid-Body-Gitarren. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2001). DEGA, Oldenburg, 2001a, 432 - 433.*

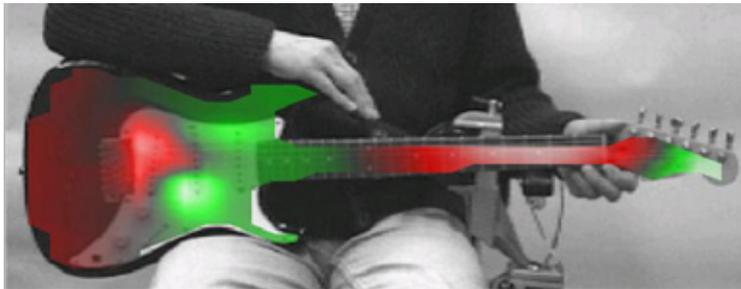
- Fleischer, H., *Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/01*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2001b.
- Fleischer, H., *Betriebsschwingungsformen und Admittanzen von Gitarren. Seminar des FAMA in der DEGA 2001*, Institut für Musikinstrumentenbau, Zwota 2001c, 24 - 28.
- Fleischer, H., *Schwingung und Schall eines Hackbretts. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/04*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2004.
- Fleischer, H., *Vibration of an electric bass guitar. Acustica united with acta acustica 91* (2005), 247 - 260.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Dead Spots. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/96*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl. UniBw München, Neubiberg 1996.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Mechanical vibrations of electric guitars. Acustica - acta acustica 84* (1998), 758 - 765.
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Investigating dead spots of electric guitars. Acustica - acta acustica 85* (1999), 128 - 135.
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments*. 2. Auflage. Springer, New York 1998.
- Franz, Chr., *Laserschwingungsmessung mit dem Scanning Vibrometer II. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2004*.
- Geries, S., *Serienmessungen spanischer Gitarren mit dem Laser-Vibrometer. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2001*.
- Kollmann, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer Verlag, Berlin 1982.
- Lemme, H., *Elektrogitarren*, 4. Auflage. Frech-Verlag, Stuttgart 1982.
- Lemme, H., *Elektro-Gitarren-Sound*. Pflaum-Verlag, München 1994.
- Lemme, H., *Gitarren-Verstärker-Sound*. Pflaum-Verlag, München 1995.
- Lemme, H., *Elektrogitarren. Technik + Sound*. Elektor-Verlag, Aachen 2003.
- Lohmann, U., *Holzhandbuch*, DRW-Verlag, Rosenheim 1998.
- May, U., *Elektrische Saiteninstrumente in der populären Musik. Dissertation Universität Münster, Münster 1984*.
- Meiershofer, Chr. und Pieper, G., *Messung und Berechnung des Schwingungsverhaltens einer E-Gitarre. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2002*.
- Meinel, E., *Elektrogitarren*. E. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1987.
- Meinel, E. (Hrsg.), *Intonation, Temperierung, Mensurkompensation bei Zupfinstrumenten*. Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau 2006.
- Richardson, M.H., *Is it a mode shape, or an operating deflection shape? Sound and Vibration*, Jan. 1997, 54 - 61.

- Schwab, H.L., Finite Element analysis of a guitar soundboard. Catgut Acust. Soc. Newsl. 24 (1975), 13 - 15.*
- Schwab, H.L., Finite Element analysis of a guitar soundboard - Part II. Catgut Acust. Soc. Newsl. 25 (1976), 13 - 15.*
- Stechel, T., Laserschwingungsmessung mit dem Scanning Vibrometer I. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2003.*
- Twork, Th., Laser-Vibrometrie: Berührungsfreies Messen von Oberflächenschwingungen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1997.*
- Völk, F., Fastl, H., Fruhmann, M. und Kerber, S., Psychoakustische Untersuchungen zu Inharmonizitäten von Gitarrensaiten. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2006). DEGA, Berlin, 743 - 744.*
- Zollner, M., Persönliche Mitteilung, 2005.*

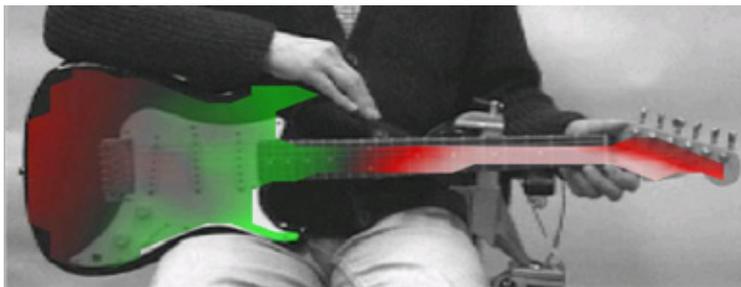
*Anhang 1. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Gerjes/VP FL).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



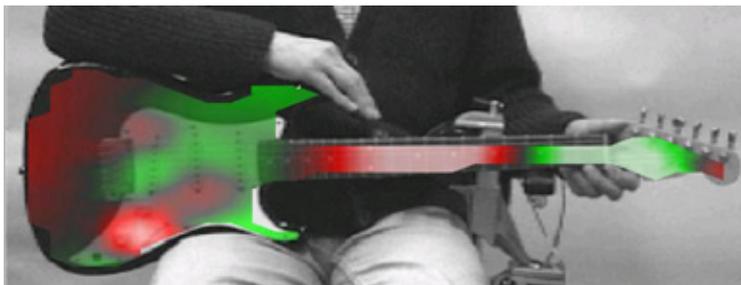
**55 Hz**



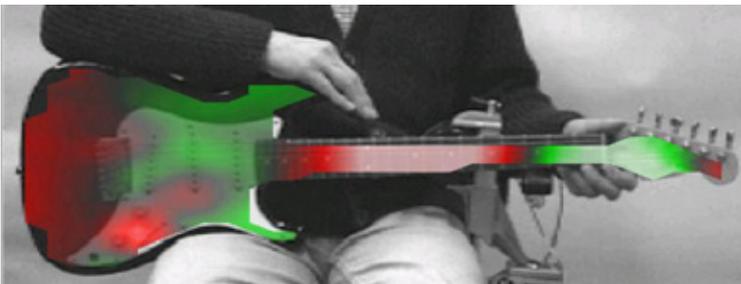
**170 Hz**



**210 Hz**

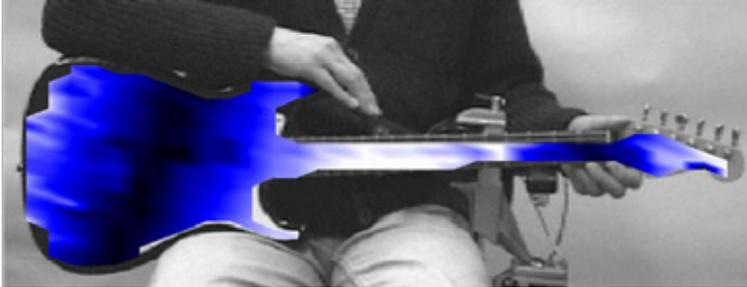


**422 Hz**

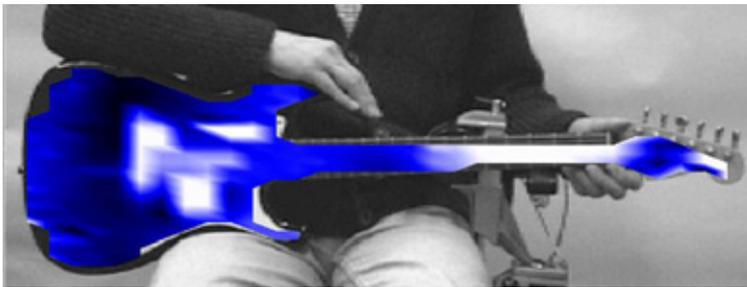


**440 Hz**

Anhang 2. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Gerjes/VP FL). Dargestellt ist der Betrag; helles Blau steht für einen Schwingungsbauch, dunkles Blau für einen Schwingungsknoten



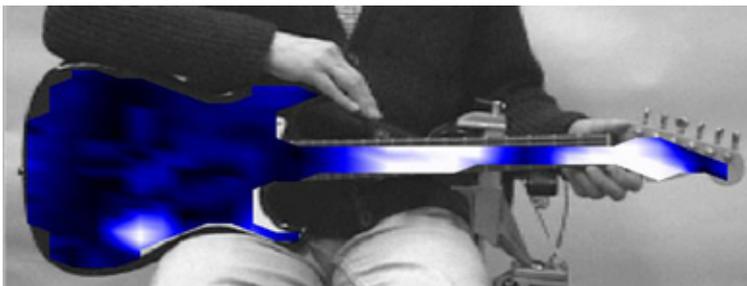
**55 Hz**



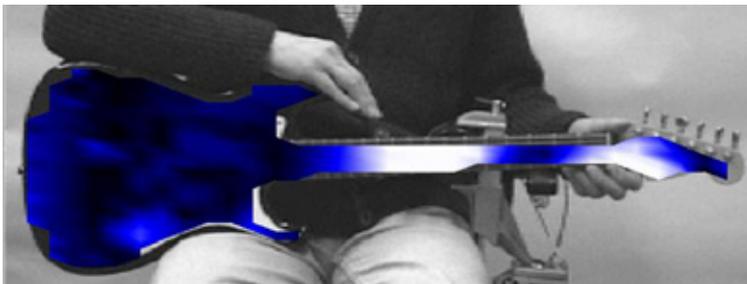
**170 Hz**



**210 Hz**

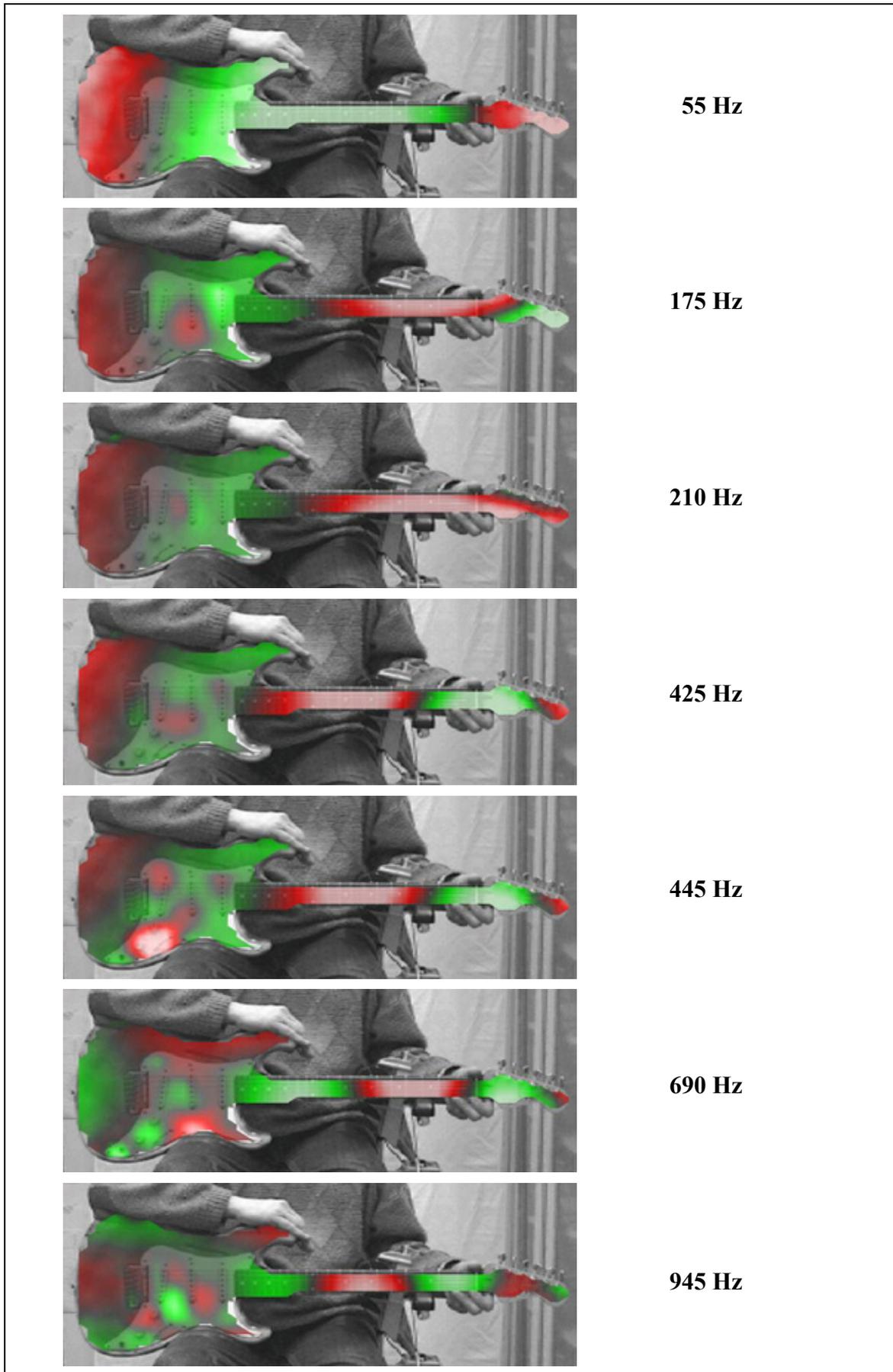


**422 Hz**

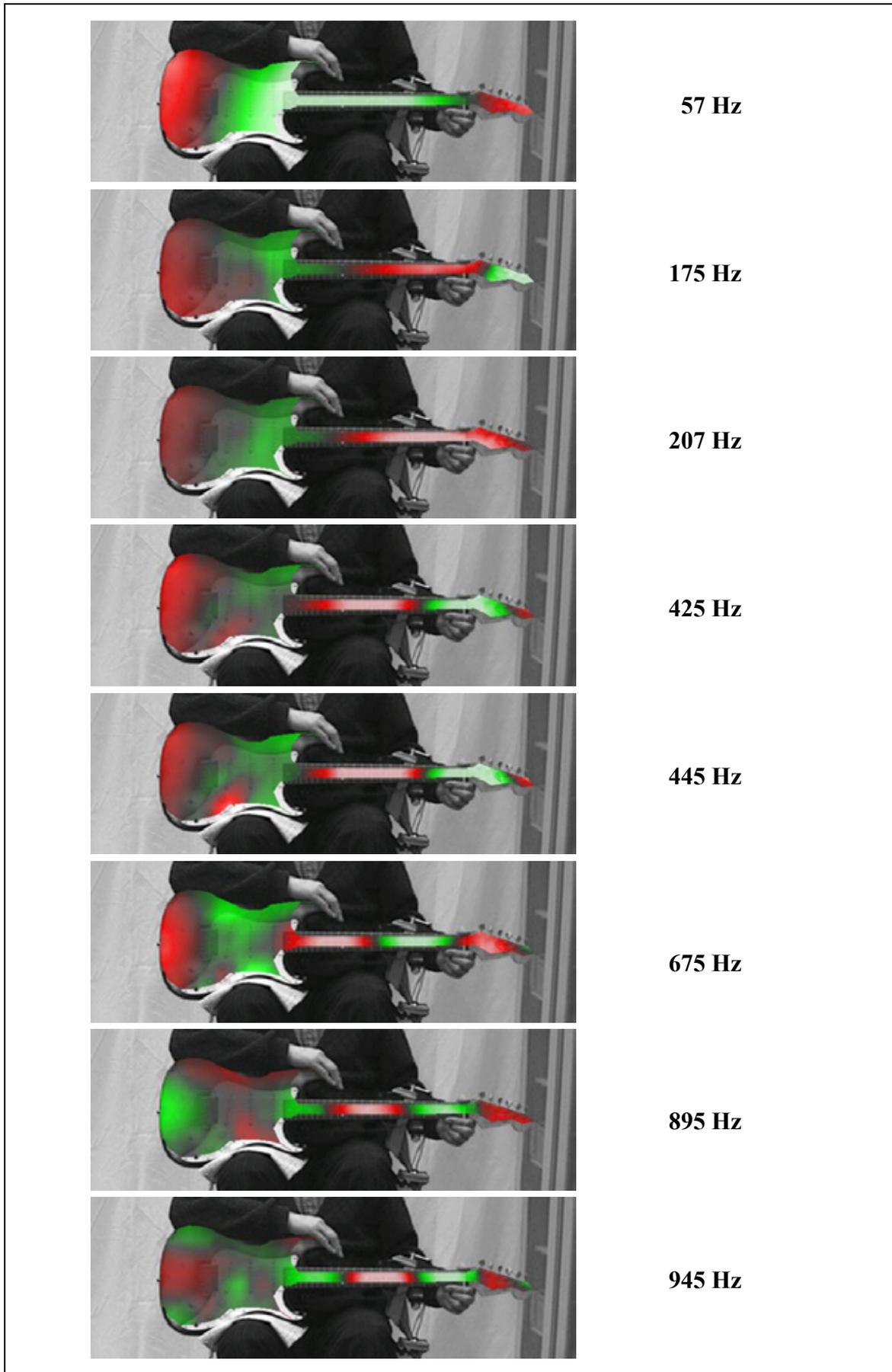


**440 Hz**

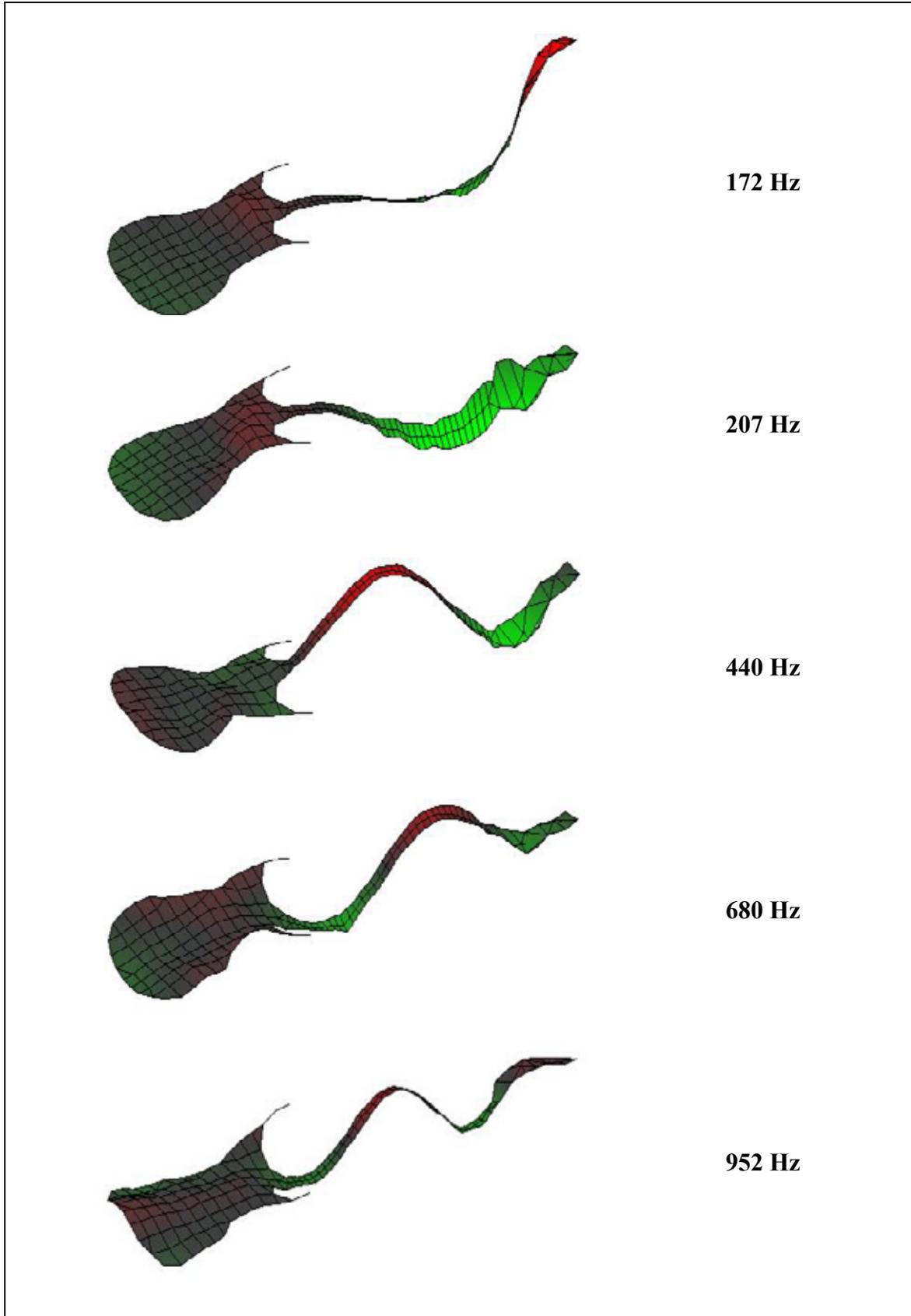
Anhang 3. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP FL).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen



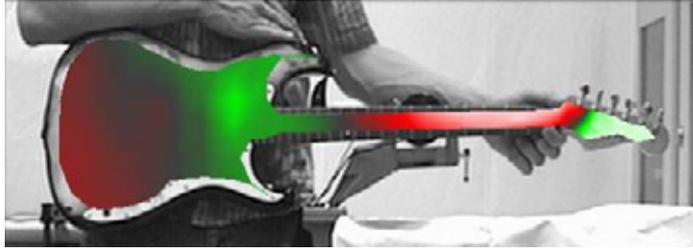
Anhang 4. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP FL).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen



*Anhang 5. Gitarre am Körper in stehender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP HE).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



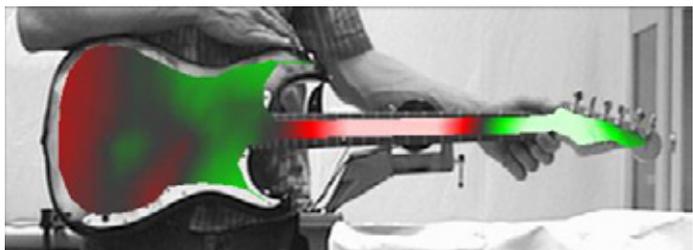
*Anhang 6. Gitarre am Körper in stehender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP HE).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



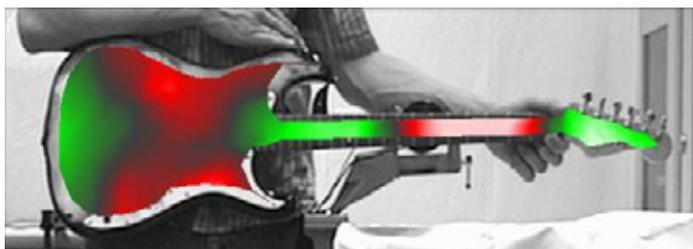
**172 Hz**



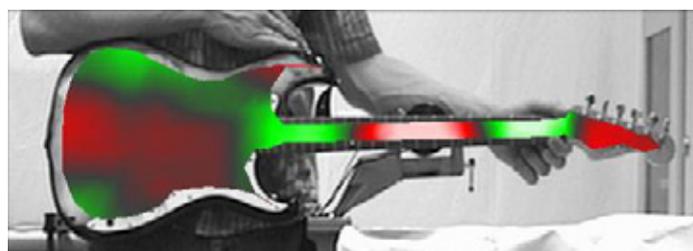
**207 Hz**



**440 Hz**



**680 Hz**



**952 Hz**

*Anhang 7. Gitarre am Körper in stehender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP PU).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



**172 Hz**



**205 Hz**



**440 Hz**

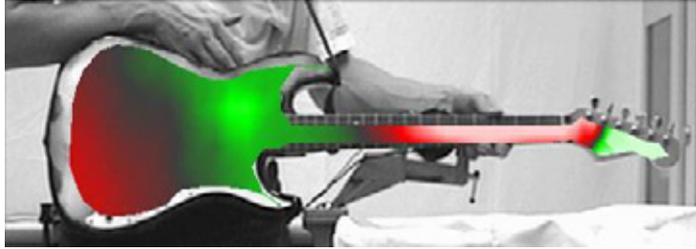


**675 Hz**

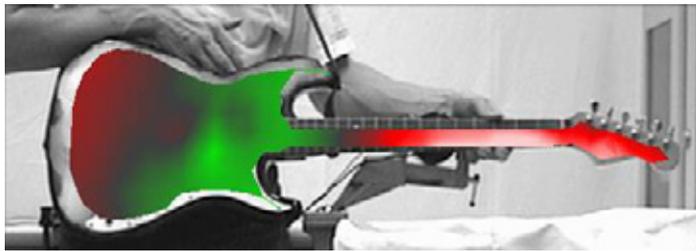


**947 Hz**

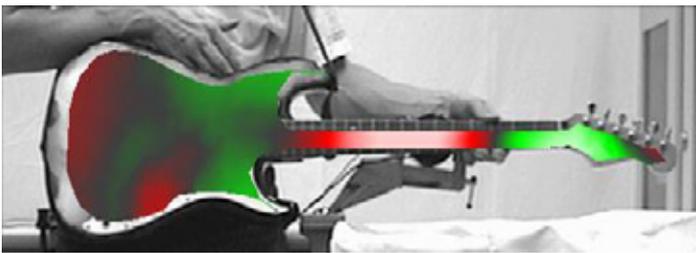
*Anhang 8. Gitarre am Körper in stehender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP TS).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



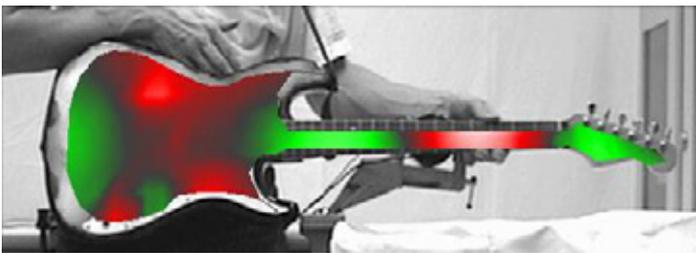
**172 Hz**



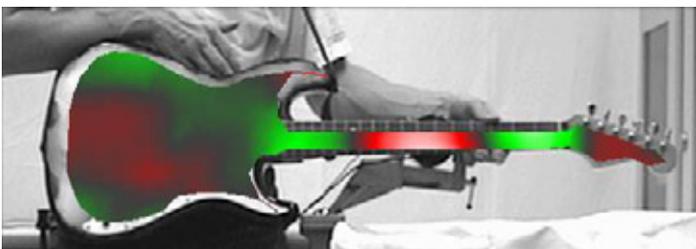
**207 Hz**



**442 Hz**



**682 Hz**



**950 Hz**

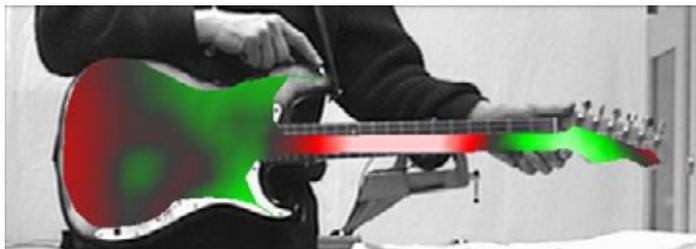
*Anhang 9. Gitarre am Körper in stehender Spielhaltung (Experimentator Franz/VP FL).  
Dargestellt ist der Augenblickswert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen*



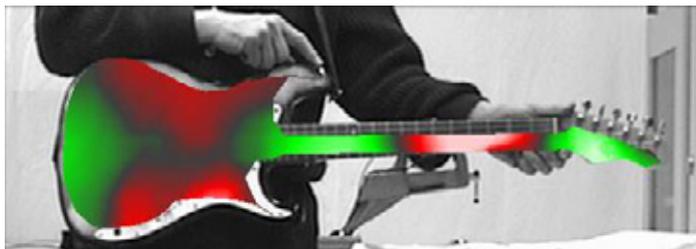
**172 Hz**



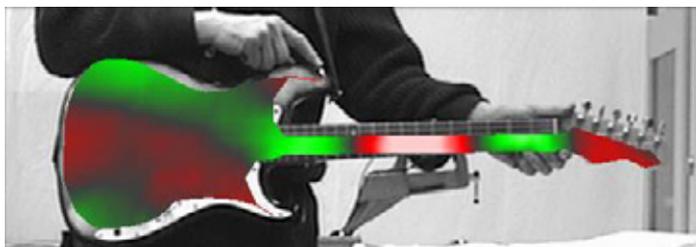
**210 Hz**



**442 Hz**

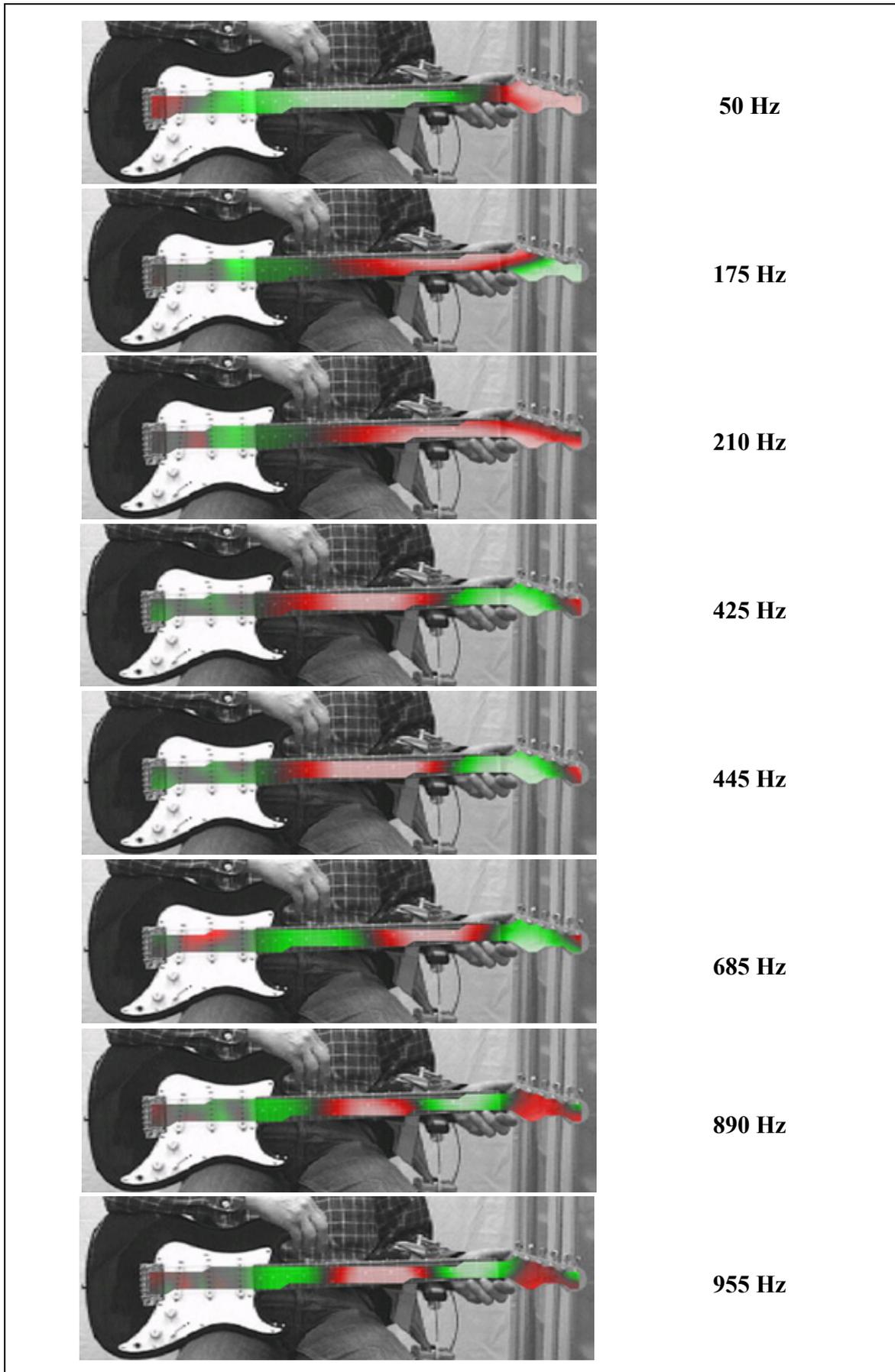


**680 Hz**

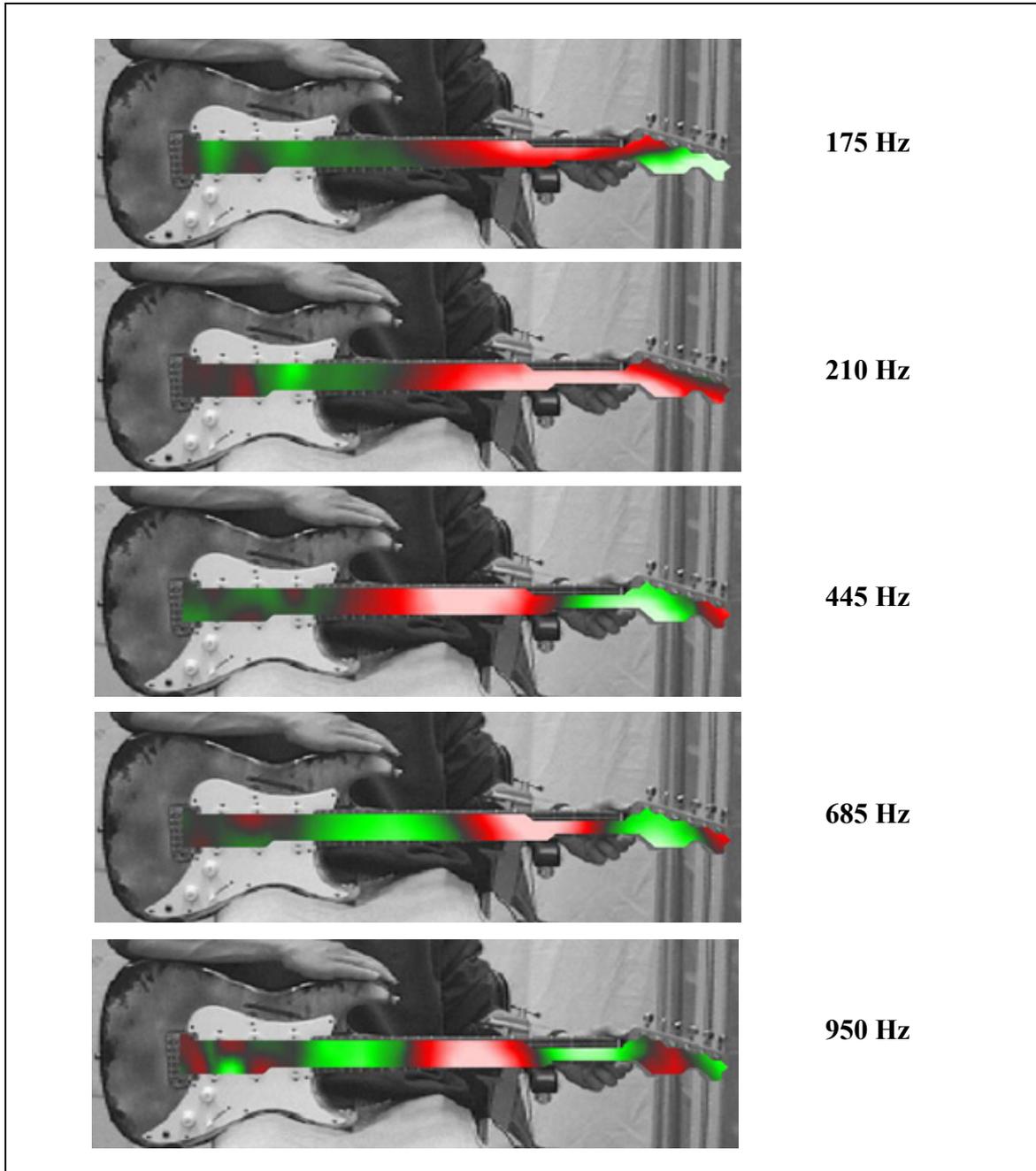


**950 Hz**

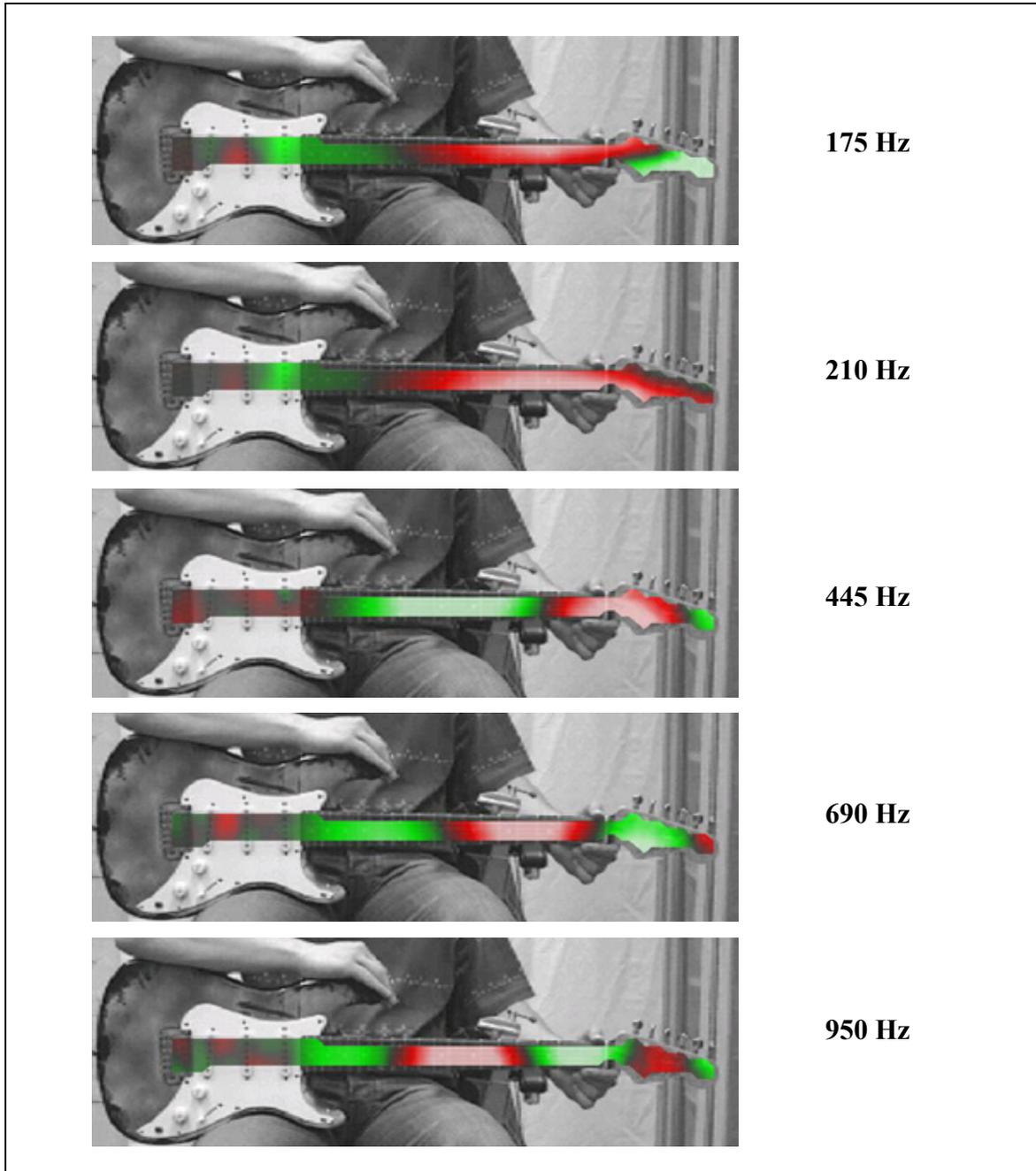
Anhang 10. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP FL). Dargestellt ist der Augenblickswert der Hals-Kopf-Schwingung; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen



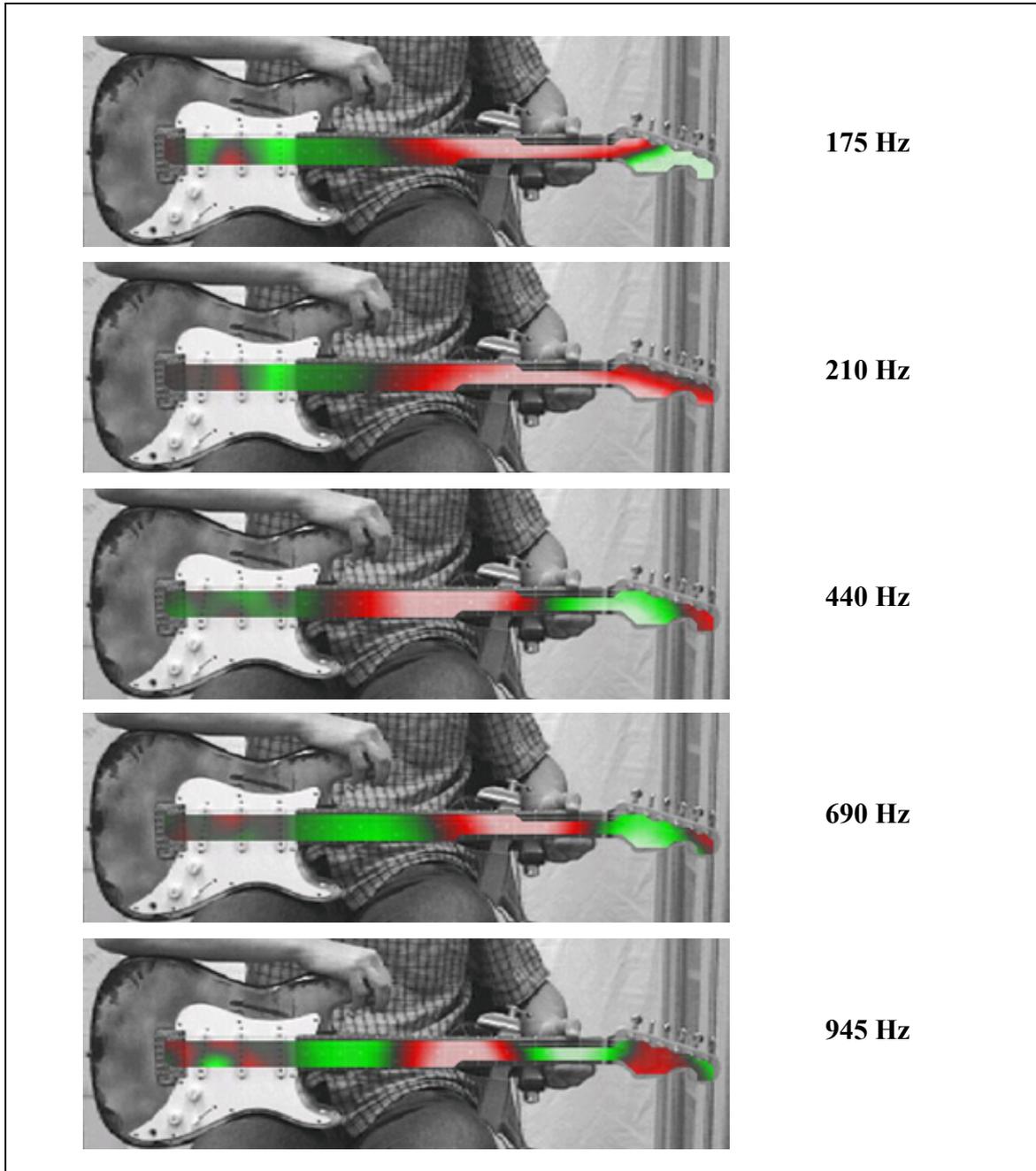
Anhang 11. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP HA). Dargestellt ist der Augenblickswert der Hals-Kopf-Schwingung; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen



Anhang 12. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP JU). Dargestellt ist der Augenblickswert der Hals-Kopf-Schwingung; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen

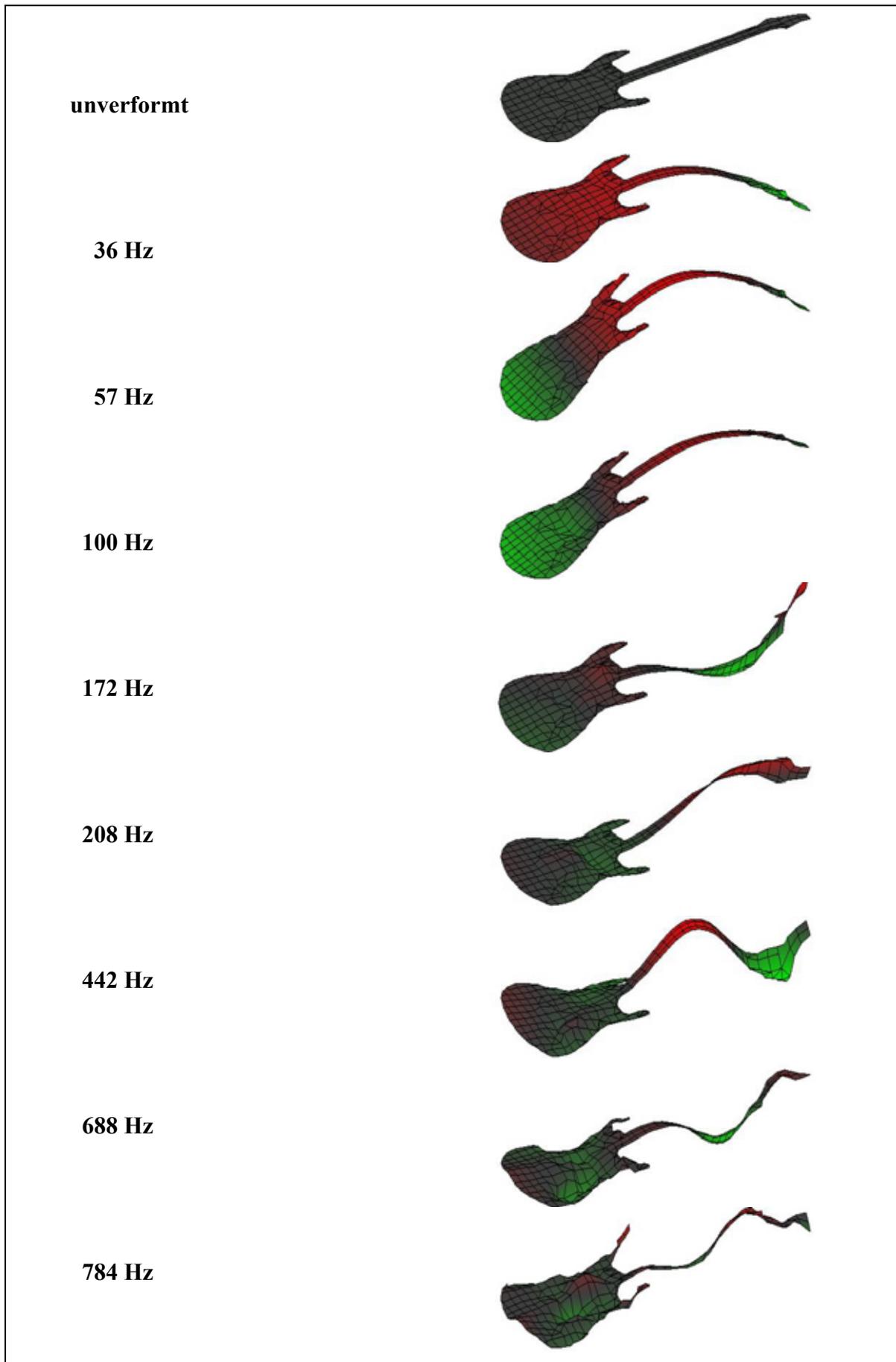


Anhang 13. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP KI). Dargestellt ist der Augenblickswert der Hals-Kopf-Schwingung; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen

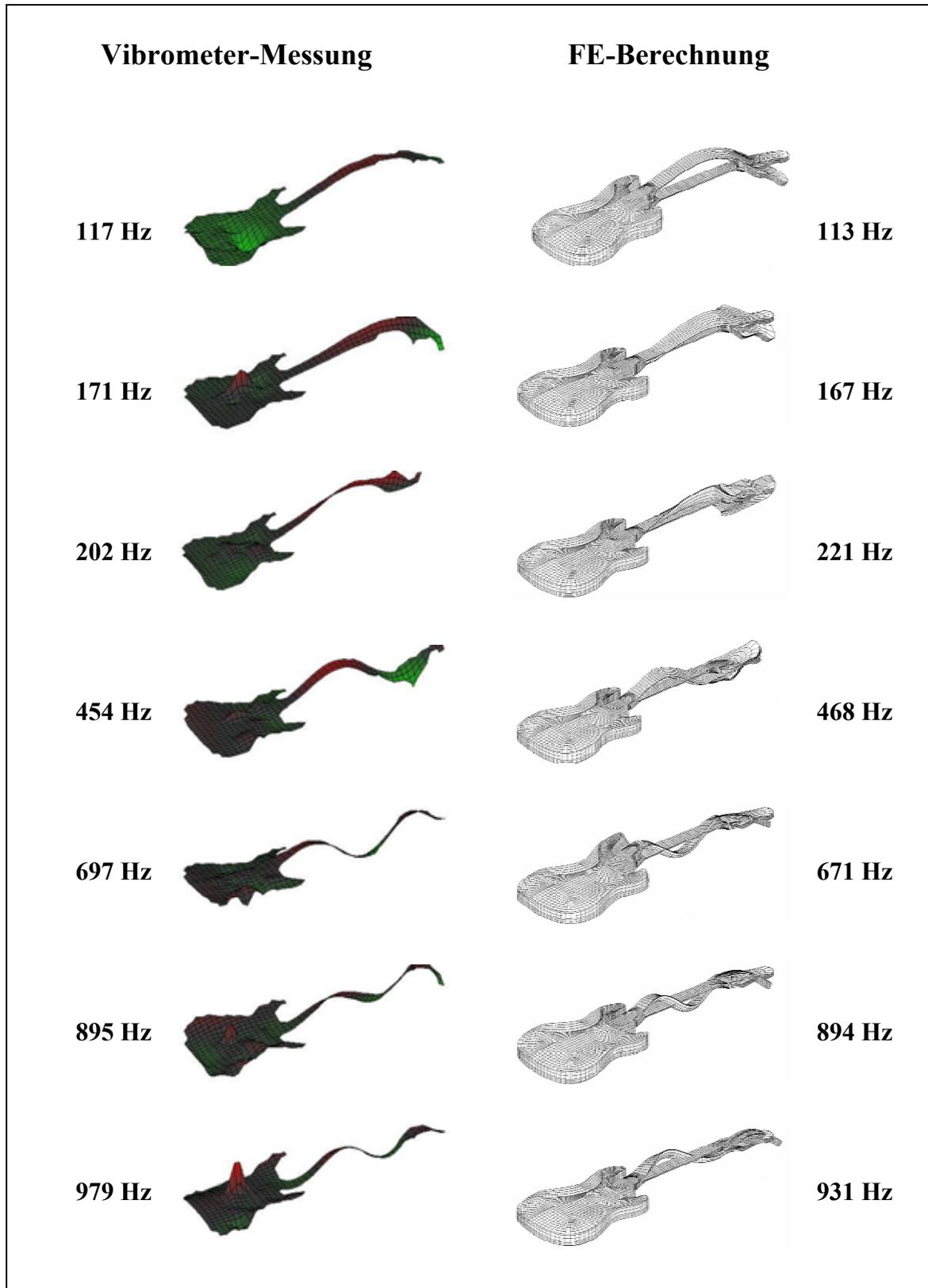


Anhang 14. Gitarre am Körper in sitzender Spielhaltung (Experimentator Stechel/VP SC mit Mittelung).  
Dargestellt ist der Augenblickswert der Hals-Kopf-Schwingung;  
rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen

**175 Hz****210 Hz****445 Hz****685 Hz****950 Hz**

*Anhang 15. Charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen der Gitarre im Gitarrenständer*

Anhang 16. Ergebnisse der Vibrometer-Messungen (links) und der FE-Berechnungen (rechts)  
für die am Korpusende eingespannte Gitarre



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

- Heft 1/96      Fleischer, H. und Zwicker, T., DEAD SPOTS. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren.
- Heft 1/97      Fleischer, H., Glockenschwingungen.
- Heft 1/98      Fleischer, H., Schwingungen akustischer Gitarren.
- Heft 1/99      Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten.
- Heft 2/99      Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. I. Structural Vibrations (in Englisch).
- Heft 1/00      Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. II. Diagnosis (in Englisch).
- Heft 2/00      Varsányi, A., Zur Akustik des javanischen *gong ageng*.
- Heft 3/00      Krump, G., Der akustische Nachton. Beschreibung und Funktionsschema.
- Heft 1/01      Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an Gongs.
- Heft 2/01      Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren.
- Heft 1/02      Fleischer, H., Nichtlinearität bei Gongs: Analyse des Schallsignals.
- Heft 2/02      Fleischer, H., Gehörbezogene Analyse von Gongklängen.
- Heft 1/03      Fleischer, H., Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla.
- Heft 1/04      Fleischer, H., Schwingung und Schall eines Hackbretts.
- Heft 1/05      Fleischer, H., Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen.

---

**ISSN 1430-936X**

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik