

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer

**SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN
AN ELEKTRISCHEN GITARREN
(Zweite, überarbeitete Auflage)**

**SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN
AN ELEKTRISCHEN GITARREN
(Zweite, überarbeitete Auflage)**

von

Helmut Fleischer

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

Heft 2/01 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:
Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/01
Neubiberg 2001
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland
helmut.fleischer@unibw.de

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

SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN AN ELEKTRISCHEN GITARREN

Zusammenfassung

Gegenstand dieser Studie sind die mechanischen Schwingungen elektrischer solid-body-Gitarren im Bereich der Grundfrequenzen der Gitarrentöne. Sechs Instrumente werden in situ, d.h. in Spielhaltung von einer Person gehalten, mittels einer berührungslosen Messmethode untersucht, die auf Laser-Doppler-Vibrometrie basiert. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem von Steg und Sattel begrenzten Gebiet zwischen den Auflagern der Saiten. In einem ersten Schritt werden Betriebsschwingungsformen ermittelt, für die Resonanzfrequenzen dargestellt und mit den Biegeschwingungen eines gelenkig-freien Balkens verglichen. Für Instrumente mit symmetrischem Kopf ähneln die Grundschiwingungsmuster den Schwingungen de Balkens. Wenn der Kopf asymmetrisch ist, überlagert sich zusätzliche Torsion. In einem nächsten Schritt wird die mechanische Punkt-Admittanz ermittelt. Nach Vorstudien in Hinsicht auf Messrichtung, laterale Abhängigkeit usw. werden Serienexperimente durchgeführt. Der Realteil, d.h. die mechanische Konduktanz, wird senkrecht zur Korpus-Ebene am Sattel und am Steg gemessen. Weil der Steg einer gut gefertigten solid-body-Gitarre in aller Regel viel weniger beweglich ist als der Hals, konzentrieren sich die weiteren Messungen auf das Griffbrett. Die Konduktanz in Normalenrichtung wird am Sattel und an den Bündlen bestimmt. Die Ergebniskurven werden kombiniert und formen eine Konduktanz-"Landschaft", in der die "Berge" die Schwingungsmuster widerspiegeln. Diese Landschaft kann mit Hilfe einer Schablone ausgewertet werden, was quantitative Einsichten in die Konduktanz liefert, welche die Grundschiwingung "fühlt", wenn eine Saite an einer bestimmten Bundposition gegriffen wird. Da sich die Konduktanz an einem Auflager als Schlüssel-Kennwert für die Diagnose von "dead spots" erweist, werden die gesammelten Daten als Grundlage für weitere Untersuchungen zum Abklingen der Saitensignale elektrischer Gitarren dienen.

INVESTIGATIONS ON THE VIBRATIONS OF ELECTRIC GUITARS

Summary

The topics of this study are the mechanical vibrations of solid-body electric guitars in the range of the fundamental frequencies of guitar tones. Six instruments are investigated in situ, i.e. held by a person in playing position, using a non-contact measuring technique based on laser Doppler vibrometry. Special attention is paid to the region between the string terminations defined by the bridge and nut. In a first stage, operating deflection shapes are determined, displayed for the resonance frequencies and compared to bending vibrations of a simply supported-free beam. For instruments with symmetric heads the basic vibration patterns resemble the beam vibrations. If the head is asymmetric, additional torsion is superimposed. In a next stage, the mechanical driving-point admittance is ascertained. After tentative studies with respect to measuring direction, lateral dependence etc. a series of experiments is performed. The real part, i.e. the mechanical conductance, is measured perpendicular to the body plane at the nut and bridge. Because the bridge of a well-made solid-body guitar, as a rule, is much less mobile than the neck, further measurements focus on the fingerboard. The out-of-plane conductance is determined at the nut and frets. The resulting curves are assembled and create a conductance "landscape" in which the "mountains" reflect the vibration patterns of the neck. This landscape can be evaluated by means of an overlay chart which gives quantitative insight into the conductance which the fundamental vibration "feels" if the string is fingered at a specific fret position. Since the conductance at a termination proves as a key parameter for the diagnosis of "dead spots", the collected data will serve as a basis for further investigations on the decay of the string signals of electric guitars.

INHALT

VORWORT

1.	EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	1
2.	DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE	3
2.1.	Übersicht	3
2.2.	Gibson Les Paul (Instrument Nr. 1)	4
2.3.	Gibson Explorer (Instrument Nr. 2)	4
2.4.	Fender Stratocaster SRV (Instrument Nr. 3)	5
2.5.	Fender Stratocaster, weiß (Instrument Nr. 4)	7
2.6.	Squier Bullet (Instrument Nr. 5)	7
2.7.	Traveling Wilbury (Instrument Nr. 6)	8
2.8.	Zusammenfassende Bemerkung	8
3.	SCHWINGUNGEN DES INSTRUMENTENKÖRPERS	10
3.1.	Versuchsablauf	10
3.2.	Schwingungen des Instruments Nr. 4	11
3.3.	Schwingungen des Instruments Nr. 5	15
3.4.	Vergleich der Schwingungen der Instrumente Nr. 4 und 5 mit Balkenschwingungen	19
3.4.1.	Schwingungsformen des idealen Balkens	19
3.4.2.	Schwingungsformen von E-Gitarren	22
3.4.3.	Wertung	23
3.5.	Zusammenfassende Bemerkung	24
4.	SCHWINGUNGEN DES INSTRUMENTS ZWISCHEN STEG UND SATTEL	26
4.1.	Messungen am Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul)	26
4.2.	Messungen am Instrument Nr. 2 (Gibson Explorer)	29
4.3.	Messungen am Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV)	32
4.4.	Messungen am Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)	35
4.5.	Messungen am Instrument Nr. 5 (Squier Bullet)	38
4.6.	Messungen am Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury)	40
4.7.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede	43
4.7.1.	Typisierung der untersuchten Instrumente	43
4.7.2.	Vergleich mit theoretischen Ergebnissen	43
4.7.3.	Strukturierung der experimentellen Ergebnisse	45
4.8.	Zusammenfassende Bemerkung	47
5.	MESSUNG DER MECHANISCHEN ADMITTANZ	49
5.1.	Komplexe Punktadmittanz	49
5.1.1.	Experimentelle Bestimmung	49
5.1.2.	Reproduzierbarkeit und Einfluss der Saiten	50
5.2.	Admittanz an Steg und Sattel	52
5.2.1.	Lateraler Verlauf am Steg	52
5.2.2.	Lateraler Verlauf am Sattel	53
5.2.3.	Stegadmittanz von elektrischen und akustischen Gitarren	54

5.3.	Mechanische Punktkonduktanz.....	55
5.3.1.	Lateraler Verlauf am Steg	55
5.3.2.	Lateraler Verlauf am Sattel	57
5.3.3.	Verlauf längs des Halses	59
5.4.	Halskonduktanz in unterschiedlichen Richtungen	59
5.4.1.	Messungen am Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul).....	60
5.4.2.	Messungen am Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV).....	61
5.4.3.	Messungen am Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß).....	61
5.4.4.	Messungen am Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury).....	62
5.4.5.	Wertung.....	63
5.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	64
6.	ERGEBNISSE DER KONDUKTANZ-MESSUNGEN.....	65
6.1.	Konduktanz an Sattel und Steg	65
6.1.1.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul).....	66
6.1.2.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer).....	66
6.1.3.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV).....	66
6.1.4.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß).....	68
6.1.5.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet)	68
6.1.6.	Sattel und Steg des Instruments Nr. 6 (Traveling Wilbury).....	69
6.2.	Konduktanz längs des Halses	70
6.2.1.	Halskonduktanz des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul)	71
6.2.2.	Halskonduktanz des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer)	71
6.2.3.	Halskonduktanz des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)	75
6.2.4.	Halskonduktanz des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet).....	75
6.3.	Konduktanz längs der Mittellinie des Halses.....	76
6.3.1.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul).....	77
6.3.2.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer).....	77
6.3.3.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV).....	78
6.3.4.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß).....	79
6.3.5.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet)	79
6.3.6.	Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 6 (Traveling Wilbury)	80
6.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	81
7.	ABSCHLUSSDISKUSSION	82
	LITERATUR.....	86

Berichtigung

Bei einer Kalibrierung am 18.03.2004 wurde festgestellt, dass in Folge eines dejustierten Messgerätes sämtliche Admittanzen und Konduktanzen um etwa den Faktor 3 zu groß angegeben sind. Dies bezieht sich in diesem Bericht auf die meisten der Zahlenangaben ab Seite 49. Im Text der vorliegenden zweiten Auflage wurden die Zahlenwerte korrigiert. In den Bildunterschriften jeweils ist ein entsprechender Hinweis eingefügt.

Der Autor bittet um Beachtung und bedauert die falschen Angaben der ersten Auflage.

VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik behandelt Helmut Fleischer Untersuchungen an elektrischen Gitarren mit solidem Korpus, die früher oft als Vollholz-Gitarren bezeichnet wurden, während heute meist die Bezeichnung solid-body-Gitarre verwendet wird. Obwohl diese Instrumente bei der Entwicklung der Rock- und Popmusik die entscheidende Rolle spielten, ist ihre genaue Wirkungsweise hinsichtlich der Interaktion von Struktur und Saiten bisher weitgehend unerforscht. Dies ist wohl mit ein Grund dafür, dass sich um manche Instrumente, insbesondere wenn sie von bekannten Pop-Größen gespielt wurden, bereits Legenden ranken.

Es ist das Verdienst von Helmut Fleischer, sich in der vorliegenden Arbeit mit streng wissenschaftlichen Methoden einigen der "Geheimnisse" berühmter Vollholz-Gitarren wie Gibson Les Paul oder Fender Stratocaster zu nähern. Dabei geht er ganz grundlegend von den - hier unerwünschten - Schwingungen von Korpus und Hals aus und lässt zunächst absichtlich Einflüsse der Art und Anordnung von Tonabnehmern außer Acht.

Alle Messungen werden in situ, d.h. in einer typischen Spielhaltung durchgeführt, wodurch für die musikalische Praxis besonders aussagekräftige Daten gewonnen werden. Ähnlich wie von Helmut Fleischer in Heft 2/99 der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik bereits für Elektrobässe beschrieben, werden mit einem Laser-Scanning-Vibrometer die Betriebschwingungsformen (Operating Deflection Shapes, ODS) der solid-body-Gitarren gemessen. Solid-body-Gitarren erweisen sich keinesfalls als starre Körper, sondern führen ein "Eigenleben". Es ist einsichtig, dass wegen deren massivem Korpus der Steg dabei weniger schwingt als der Hals samt Kopf.

Von besonderer Bedeutung für die Dämpfung von Saitenschwingungen ist das Mitschwingen des Instruments an den Auflagern der Saiten. Dieses wird durch den Realteil der Admittanz, die so genannte Konduktanz, quantitativ erfasst. Bereits die Schwingungsmessungen lassen erwarten, dass die Konduktanz am Steg kleiner sein wird als am Griffbrett. So misst Helmut Fleischer auch ausführlich die Griffbrett-Konduktanz und präsentiert sie für jede Gitarre in Form einer Konduktanz-"Landschaft".

Die Messreihen der Schwingungsformen einerseits und der Konduktanz andererseits ergänzen sich in beispielhafter Art und Weise. Während die Schwingungsmessungen einen Überblick über die Bewegungen der Gesamtstruktur liefern, geben die Konduktanzmessungen konkrete Hinweise auf Orte mit hoher Dämpfung der Saiten. Dementsprechend dienen die letztgenannten Messungen dem Aufspüren von Orten mit hoher Auflagerdämpfung, die als Kandidaten für "dead spots" eines Instruments gelten können.

Die quantitative Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Beweglichkeit des Halses und dead spots bei solid-body-Gitarren steht noch aus. Sie wird in einem der folgenden Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik dargestellt werden.

München, im Juli 2001

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

In der Unterhaltungsmusik haben Elektrogitarren sowie Elektrobässe eine immense Verbreitung gefunden. Ungeachtet ihrer großen Bedeutung steckt die wissenschaftliche Beschäftigung mit den Prinzipien, auf denen Einzelheiten ihre Funktion beruhen, noch in den Anfängen. Zur Illustration sei das Standardwerk der Musikinstrumentenakustik von Fletcher und Rossing (1998) genannt, in dem E-Gitarren und -Bässe auf weniger als einer Seite abgehandelt werden. Zum Vergleich: Dem Triangel sind nahezu drei Seiten gewidmet. Im deutschsprachigen Raum wenden sich die Bücher von Schmitz (1982), Lemme (1982, 1994 und 1995) und Meinel (1987) vorwiegend an breitere Leserschichten. Dagegen behandeln die Arbeiten von May (1984) und Einbrodt (1997) auch akademische Fragestellungen.

Nach der Systematik von Hornbostel und Sachs (1914) ist die Gitarre ein gezupftes Chordophon. Damit ist die Erzeugung des musikalischen Signals durch freie Schwingungen einer gespannten Saite umschrieben. In Hinsicht auf die Umsetzung dieses Signals in Schall ist die E-Gitarre ein Elektrophon. Die Saitenschwingung wird nicht direkt, sondern auf indirektem Wege mit den Mitteln der Elektroakustik in Luftschwingungen umgesetzt. Im Folgenden wird einschränkend davon ausgegangen, dass das Saitensignal berührungsfrei mittels elektromagnetischer "pick-ups" abgenommen wird. Anders als bei der akustischen Gitarre braucht demnach der Korpus nicht schwingungsfähig zu sein, sondern kann aus Vollmaterial gefertigt werden. Solche "solid-body"-Gitarren mit elektromagnetischen Tonabnehmern sind Gegenstand der weiteren Betrachtungen.

Die akustische Gitarre ist - auch wenn dies von außen nicht sofort zu erkennen ist - relativ kompliziert aufgebaut. Seit den siebziger Jahren wird versucht, das Schwingungsverhalten des Instruments oder seiner wesentlichen Teile mit der Methode der Finiten Elemente (Schwab 1975, 1976) rechnerisch zu behandeln. Neuere Untersuchungen (Elejabarrieta et al. 2001) beziehen in die Rechnung neben der Gitarrendecke auch die Beleistung auf deren Unterseite mit ein. Elektrische Chordophone sind dagegen vergleichsweise übersichtlich strukturiert. Einschlägige numerische Untersuchungen wurden von Carlson (1998) an E-Gitarren und von Backwinkel (2000) an E-Bässen durchgeführt.

Schwingungen des Korpus sind bei akustischen Gitarren von fundamentaler Bedeutung für das Instrument, da sie dazu dienen, das Saitensignal in Schall umzusetzen. Bei elektrischen solid-body-Instrumenten haben sie dagegen keine Nutzfunktion, sondern sind im Gegenteil als eher parasitär zu betrachten. Da sie dazu geeignet sind, den Schwingungen der Saite Energie zu entziehen, können sie sogar als potentiell schädlich eingestuft werden. Schon bereits vor mehreren Jahren hat Heise (1993) Schwingungen des Körpers von E-Bässen als Ursache für "dead spots", d.h. das außergewöhnlich rasche Abklingen des Saitensignals bei bestimmten Saite-Bund-Kombinationen, erkannt und untersucht. In der Folge wurden Struktur-schwingungen elektrischer Instrumente mittels Modalanalyse (Heise 1993, Wogram 1994, Fleischer und Zwicker 1996, Ziegenhals 1997, Fleischer 1999b) gemessen. Für diese Experimente wurden die Instrumente meist in Versuchseinrichtungen eingespannt, die zwar reproduzierbare Ergebnisse sicherstellen, jedoch deutlich andere Randbedingungen als beim Spielen herstellen. Im Laufe der eigenen Untersuchungen zeigte sich, dass es anzustreben und auch möglich ist, die Schwingungen *in situ*, d.h. unter realitätsnahen Randbedingungen, zu messen. Dazu werden mit einem Laser-Scanning-Vibrometer die Betriebsschwingungsformen ("Operating Deflection Shapes", abgekürzt ODSs; vgl. Richardson 1997) des Instruments gemessen, während eine Person es in Spielhaltung festhält. Eine ganze Reihe solcher Messungen wurden von Twork (1997), Fleischer (1998b, 1999a und b), sowie Fleischer und Zwicker (1998) bereits veröffentlicht.

Für die Schwingung der Saite ist nicht die gesamte Bewegung des Instruments von Belang, sondern letztlich nur, wie sich dieses an den beiden Auflagern der Saite verhält. Für eine zielgenaue und "objektorientierte" Beschreibung, sozusagen aus der Sicht der Saite, ist eine Messung der mechanischen Punktadmittanz an den Auflagerpunkten von hoher Aussagekraft. Von größter Bedeutung im Zusammenhang mit dem Transfer von Energie von der Saite über das Auflager in das Instrument ist der Realteil der Admittanz, die Konduktanz. Für akustische Gitarren sind umfassende Untersuchungen der mechanischen Konduktanz von Fleischer (1997) und für elektrische Bässe von Fleischer und Zwicker (1996 und 1997) sowie Fleischer (1999a und b) veröffentlicht worden. Mit elektrischen Gitarren befassen sich die Arbeiten von Fleischer und Zwicker (1996, 1998 und 1999) sowie Fleischer (1998b, 1999e). Populärwissenschaftliche Versionen in Deutsch (Fleischer 1999c) und Englisch (Fleischer 1999d) können aus dem Internet abgerufen werden. Während darin der Zusammenhang zwischen dem raschen Abklingen der Saitenschwingung und der Konduktanz eher qualitativ nachgewiesen worden war, befassen sich neuere Arbeiten (Fleischer 2000 und 2001) mit quantitativen Betrachtungen, wie sie auch im vorliegenden Bericht angestellt werden sollen.

Diese Überlegungen schließen an Veröffentlichungen an, in denen die Qualität von Saiten im Allgemeinen und deren Abklingen im Besonderen betrachtet wurde. Die Grundlagen von Saitenschwingungen sind z.B. von Fletcher (1964 und 1976), Gough (1981a und b) sowie Cuesta und Valette (1988 und 1990) behandelt worden. Mit der Qualität von Gitarrensaiten haben sich u.a. Allen (1976), deDayans und Behar (1979), Hanson (1987) sowie Valenzuela (1999) befasst. Überlegungen hinsichtlich der verschiedenen Mechanismen, die zum Abklingen der Saitenschwingungen führen, finden sich bei Fletcher (1977), Rossing und Fletcher (1995) sowie Fletcher und Rossing (1998).

Damit ist die Basis für die Überlegungen beschrieben, die im folgenden und einem darauf aufbauenden Bericht zusammengestellt sind. Es sollen die wesentlichen Mechanismen beschrieben werden, die dafür verantwortlich sind, dass freie Schwingungen der Saiten elektrischer Gitarren mehr oder weniger rasch abklingen. Auf die Eigenschaften der Saite wird später eingegangen. In der vorliegenden Studie sollen die Einflüsse untersucht werden, die vom Instrumentenkörper herrühren können. Insbesondere soll herausgearbeitet werden, dass die Auflager der Saite an Brücke und Hals nicht starr sind, sondern beweglich und verlustbehaftet sein können. Dazu werden einschlägige Experimente durchgeführt. Im Lichte der dabei entwickelten Vorstellungen sind Kennwerte, die sich im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung als besonders aussagekräftig erweisen, zu finden und experimentell zu bestimmen. Letztlich soll quantifizierbar gemacht werden, auf welche Weise und in welchem Maße die Schwingfreudigkeit des Instrumentenkörpers mit dem Ausklingen von Saitenschwingungen zusammenhängt.

2. DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE

Für die Untersuchungen standen mehrere Gitarren zur Verfügung. Vier der wertvolleren sind im Besitz des Gitarrensammlers und -spielers Dr.-Ing. Tilmann Zwicker aus München, der seine Instrumente auch hinsichtlich ihres Abklingverhaltens untersucht hat. Je eine Gitarre stammt von den Herren Martin und Tobias Fleischer. Den Besitzern sei an dieser Stelle herzlich dafür gedankt, dass sie ihre Instrumente - wenn auch nicht ganz ohne Bedenken, so doch ohne finanzielle Forderungen - zur Verfügung gestellt haben.

2.1. Übersicht

Tab. I zeigt eine Zusammenstellung einiger Angaben zu den sechs E-Gitarren. Sämtliche Instrumente sind mit einem Vollholz-Korpus und einem Spannstab im Hals ausgestattet. Sie tragen jeweils sechs Stahlsaiten mit einer Mensur von etwa 62 cm bis 65 cm. Das Saitensignal wird über elektromagnetische Tonabnehmer abgegriffen, die nicht Gegenstand der derzeitigen Untersuchungen sind, deren Einfluss auf die Saitenschwingung jedoch zu gegebener Zeit einmal näher beleuchtet werden sollte (Zollner 2001).

Tab. I. Kennwerte der untersuchten Elektrogitarren

Nr.	Hersteller	Name	Anzahl der Bünde	Bemerkungen
1	Gibson	Les Paul K.M.	22	Hals mit dem Korpus verleimt; Wirbelbrett symmetrisch; einfaches cutaway
2	Gibson	Explorer	22	Hals mit dem Korpus verleimt; Wirbelbrett asymmetrisch; Korpus stark asymmetrisch
3	Fender	Stratocaster SRV	21	Hals mit dem Korpus verschraubt; Wirbelbrett asymmetrisch; doppeltes cutaway; Vibrato
4	Fender	Stratocaster (weiß)	21	Hals mit dem Korpus verschraubt; Wirbelbrett asymmetrisch; doppeltes cutaway
5	Squier	Bullet	21	Hals mit dem Korpus verschraubt; Wirbelbrett asymmetrisch; doppeltes cutaway; Vibrato
6	Traveling Wilbury	TW 500	18	Hals mit dem Korpus verschraubt; Wirbelbrett symmetrisch; einfaches cutaway

2.2. Gibson Les Paul (Instrument Nr. 1)

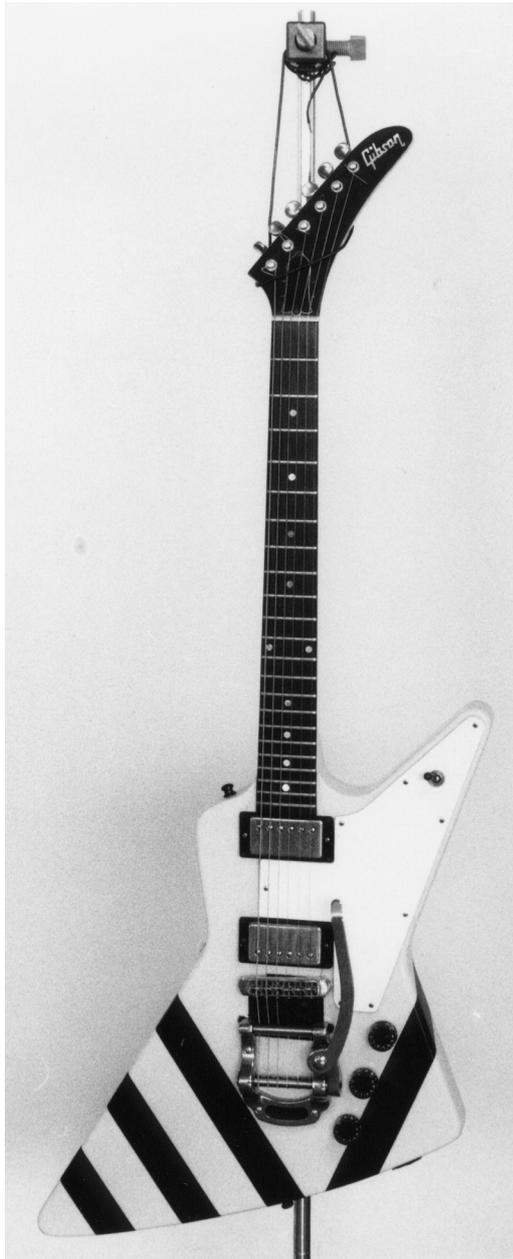
In Fig. 1 ist das Instrument Nr. 1, die Gitarre Les Paul K.M. der amerikanischen Firma Gibson von Tilmann Zwicker, abgebildet. Korpus und Hals sind aus Mahagoni gefertigt. Das Griffbrett ist mit Palisander belegt. Auf den Vollholz-Korpus ist eine Schicht aus Ahornholz aufgeleimt, dessen geflammte Struktur durch den Lack hindurch sichtbar ist. Der Kopf, der die Stimm-Mechaniken trägt, ist symmetrisch ausgebildet. Abgesehen von der Aussparung bei den Diskantsaiten ("cutaway") gilt dies auch für den Korpus. Der Vollholz-Korpus ist an seiner Ober- und Unterseite - ähnlich einem Geigenkörper - konvex gekrümmt. Der Hals ist in den Korpus eingeleimt.



Fig. 1. E-Gitarre Gibson Les Paul; Instrument Nr. 1.

2.3. Gibson Explorer (Instrument Nr. 2)

Ebenfalls aus dem Besitz von Tilmann Zwicker ist das Instrument Nr. 2, die Gitarre Explorer der Firma Gibson, die in Fig. 2 abgebildet ist. Sie hat ein futuristisches Aussehen und besteht aus Mahagoni mit einem Palisander-Griffbrett. Sowohl das Wirbelbrett wie auch der Vollholz-Korpus sind äußerst asymmetrisch ausgebildet. Der Saitenhalter ist als Bigsby-Vibrato-Mechanismus ausgeführt. Wie beim Instrument Nr. 1 ist auch hier der Hals mit dem Korpus fest verleimt.



*Gibson Explorer;
Fig. 2. E-Gitarre
Instrument Nr. 2.*

2.4. Fender Stratocaster SRV (Instrument Nr. 3)

Fig. 3 zeigt das Instrument Nr. 3, das von einem anderen großen Hersteller aus Amerika stammt. Es ist eine Gitarre Stratocaster SRV Signature der Firma Fender und gehört Tilmann Zwicker. Der Vollholz-Korpus besteht aus Eschenholz, der Hals aus Ahorn mit einem aufgeleimten Griffbrett aus Palisander. Beim Ausspannen werden die Saiten von unten durch den beweglichen Saitenhalter mit Vibrato-Funktion geführt. Dieses typische Stratocaster-Vibrato ist beim vorliegenden Instrument für Linkshänder, d.h. spiegelverkehrt zur üblichen Anordnung, ausgelegt. Der Kopf mit dem Wirbelbrett ist asymmetrisch geformt. Dasselbe gilt für den massiven Korpus, der zwei unterschiedliche cutaways aufweist. Anders als bei Gibson-Gitarren ist bei Instrumenten der Firma Fender der Hals üblicherweise über vier Schrauben mit dem Korpus verbunden.



Fig. 3. E-Gitarre Fender Stratocaster SRV; Instrument Nr. 3.

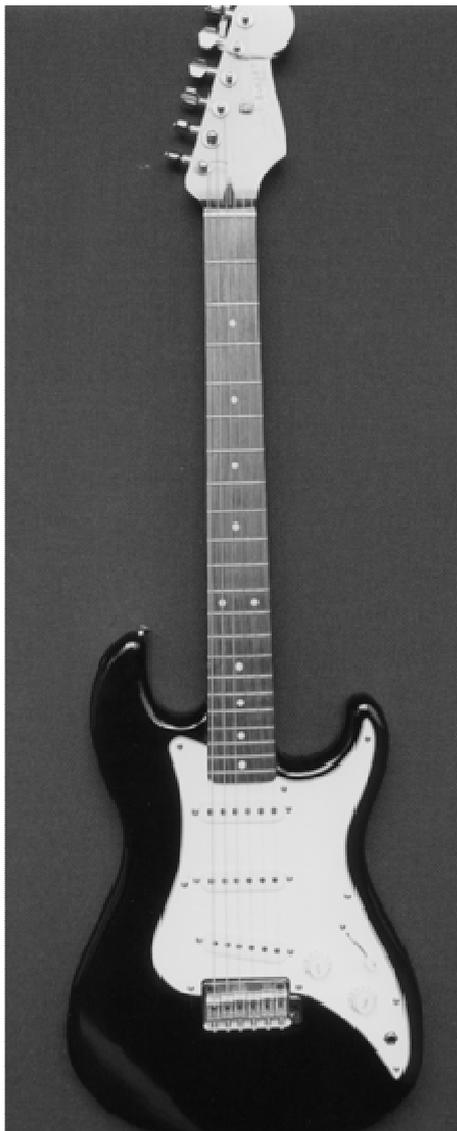


*Fig. 4.
E-Gitarre Fender
Stratocaster (weiß);
Instrument Nr. 4.*

2.5. Fender Stratocaster, weiß (Instrument Nr. 4)

Das in Fig. 4 abgebildete Instrument Nr. 4 gehört Tobias Fleischer. Es ist ebenfalls eine Stratocaster-Gitarre der Firma Fender und somit vom gleichen Typ wie die E-Gitarre Nr. 3. Auch hier ist der Hals mit dem Korpus verschraubt. Der Korpus ist weiß lackiert. Der Saitenhalter dieses Instruments hat keine Vibrato-Funktion, sondern ist fest mit dem Korpus verbunden.

2.6. Squier Bullet (Instrument Nr. 5)



*Fig. 5. E-Gitarre
Squier Bullet;
Instrument Nr. 5.*

In Fig. 5 ist das Instrument Nr. 5 aus dem Besitz von Martin Fleischer gezeigt. Es ist das Modell Bullet der Marke Squier, die zur Firma Fender gehört. Es verwundert daher nicht, dass diese Gitarre viele Merkmale des Stratocaster-Typs (vgl. die Instrumente Nr. 3 oder 4) aufweist. Der Korpus dieses Einsteiger-Modells ist schwarz lackiert, so dass die Holzart nicht zu bestimmen ist. Der Hals besteht aus Ahorn, das Griffbrett aus Palisander. Wie bei den Stratocaster-Modellen ist der Hals mit dem Korpus verschraubt. Das Instrument ist asymmetrisch gestaltet und verfügt über einen Vibrato-Mechanismus ähnlich dem der Gitarre Nr. 3.

2.7. Traveling Wilbury (Instrument Nr. 6)

Fig. 6 zeigt das Instrument Nr. 6, die Gitarre Traveling Wilbury TW 500 von Tilmann Zwicker. Der Entwurf zu diesem Einsteiger-Instrument stammt ursprünglich von der amerikanischen Firma Gretsch; gefertigt wurde dieses Exemplar höchstwahrscheinlich in Korea. Der Kopf mit den Stimm-Mechaniken ist symmetrisch ausgebildet. Abgesehen vom einseitigen cutaway trifft dies auch auf den Korpus zu. Der Hals aus Ahornholz mit aufgeleimtem Palisandergriffbrett ist an den Korpus geschraubt. Dieser dürfte aus Stücken weniger edlen Holzes, evt. auch aus Pressmaterial zusammengeleimt sein.



*Fig. 6. E-Gitarre
Traveling Wilbury;
Instrument Nr. 6.*

2.8. Zusammenfassende Bemerkung

Für die Untersuchungen kann auf sechs Instrumente zurückgegriffen werden, die Gemeinsamkeiten und auch elementare Unterschiede aufweisen. Gemeinsam ist diesen Gitarren der massive Korpus mit cutaway(s), der Halsstab sowie die Stahlsaiten. Unterschiede zeigen sich beispielsweise in der Art, auf die der Hals mit dem Korpus verbunden ist: Während er bei den Gitarren Nr. 1 und 2 mit dem Korpus verleimt ist, sind bei den übrigen Instrumenten Schrau-

ben für die Verbindung verwendet worden. Die Instrumente Nr. **1** und **6** haben einen symmetrischen, die übrigen einen asymmetrischen Kopf. Mit einem typischen Stratocaster-Vibrato sind die Instrumente Nr. **3** und **5** ausgestattet. Bei den Gitarren Nr. **1**, **4** und **6** fehlt solch ein Mechanismus. Am Steg haben die Saiten einen direkteren Kontakt mit dem Korpus, was weitgehend auch auf das Bigsby-Vibrato der Gitarre Nr. **2** zutrifft. Während Gitarren vom Typ der Instrumente Nr. **1** bis **4** der Firmen Gibson und Fender auch in professionellem Gebrauch sind, werden die beiden Exemplare Nr. **5** und **6** häufig von Einsteigern gespielt. Bereits dieser knappe Überblick zeigt, dass das Ensemble der Versuchsobjekte eine gewisse Vielfalt beinhaltet, die einige Gestaltungsmerkmale von solid-body-Gitarren abdeckt.

3. SCHWINGUNGEN DES INSTRUMENTENKÖRPERS

Die Schwingungen des Instrumentenkörpers in seiner Gesamtheit wurden ausnahmslos *in situ* gemessen. Darunter ist zu verstehen, dass eine Person die Gitarre in sitzender Spielhaltung hielt und versuchte, diese Position während des Messvorganges beizubehalten. Damit war gewährleistet, dass das schwingende Objekt realitätsnahe Randbedingungen vorfand.

3.1. Versuchsablauf

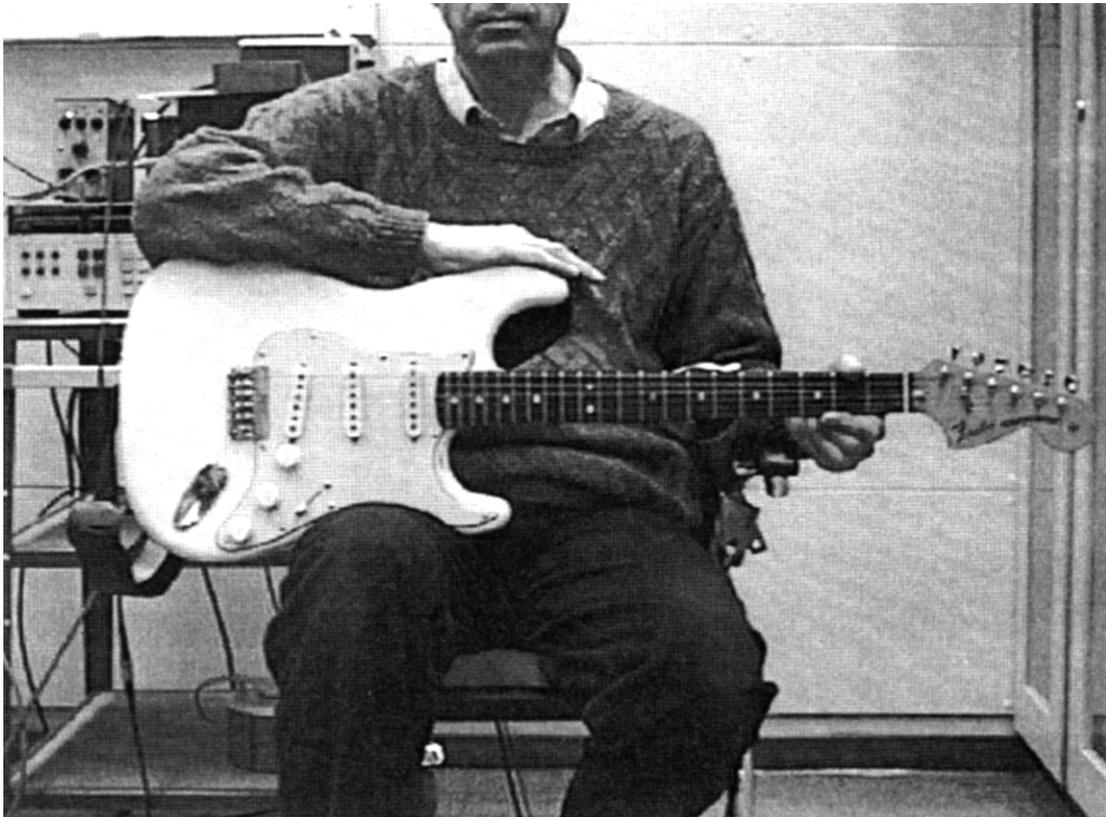


Fig. 7. Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), gehalten für die Schwingungsmessung.

Der Versuchsaufbau war derselbe, der für die Messung an Elektrobässen verwendet wurde und wie er von Fleischer (1999b und 2000) ausführlich beschrieben ist. Weitere Informationen sind bei Fleischer und Zwicker (1998 und 1999) zu finden. Kernstück des Messaufbaus war ein Scanning Vibrometer der Firma Polytec. Dieses lenkte einen Laserstrahl auf Punkte eines Messgitters, das der Versuchsleiter anhand eines Videobildes vorgab und auf dem Instrument positionierte. Aus der Dopplerverschiebung der Frequenz des reflektierten Laserlichts wurde auf die Schwinggeschwindigkeit der Oberfläche geschlossen, ohne diese Oberfläche berühren zu müssen. War die Laserquelle weit genug vom schwingenden Objekt entfernt, erhielt man auf diese Weise Aufschluss über die Schwinggeschwindigkeit senkrecht zur Ebene, in der das Griffbrett und der Korpus liegen. Im Fall der E-Gitarre, deren Oberfläche

weitgehend eben ist, wurden damit Balken- bzw. Plattenschwingungen erfasst, wobei neben dem dominierenden Biegeanteil auch Torsion erkennbar wurde.

Mit einem elektrodynamischen Schwingerreger wurde die Anregung der Gitarre über das halsseitige Ende der Saiten nachgebildet. Der Schwingerreger griff am 7. Bund an und wurde mit einem Rauschsignal gespeist, das Spektralkomponenten bis 500 Hz enthielt. Die Erregerkraft wurde senkrecht zum Griffbrett (und damit in derselben Richtung, in der auch die Schwinggeschwindigkeit erfasst wurde) mit einem Kraftaufnehmer gemessen. Aus der Eingangsgröße - der Kraft am siebten Bund - und der Ausgangsgröße - der Schwinggeschwindigkeit - wurde mittels Fast Fourier Transformation (FFT) für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion bestimmt, die eine Transfer-Admittanz darstellt. Durch Mittelung sämtlicher Punkt-Übertragungsfunktionen ergab sich eine Gesamt-Übertragungsfunktion, deren Maxima als Indikatoren für Eigenformen- und Eigenfrequenzen angesehen werden können. Obwohl dies im vorliegenden Zusammenhang nicht korrekt ist (vgl. Richardson 1997), werden die Betriebsschwingungsformen (Operating Deflection Shapes), die man für diese Maxima erhält, im Folgenden vereinfacht als (Schwingungs-)Moden und die zugehörigen Frequenzen als Eigenfrequenzen bezeichnet.

3.2. Schwingungen des Instruments Nr. 4

Ergebnisse von Experimenten, in denen auf dem gesamten Korpus und Hals der weißen Stratocaster-Gitarre gemessen wurde, sind im folgenden Abschnitt zusammengestellt. Sie wurden im Wesentlichen von Twork (1997) durchgeführt. An 223 Messpunkte wurde mit dem Laser-Vibrometer die Bewegung senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett abgetastet. Fig. 7 zeigt die Gitarre, wie sie auf dem rechten Oberschenkel einer Person - hier des Autors - ruht. Die linke

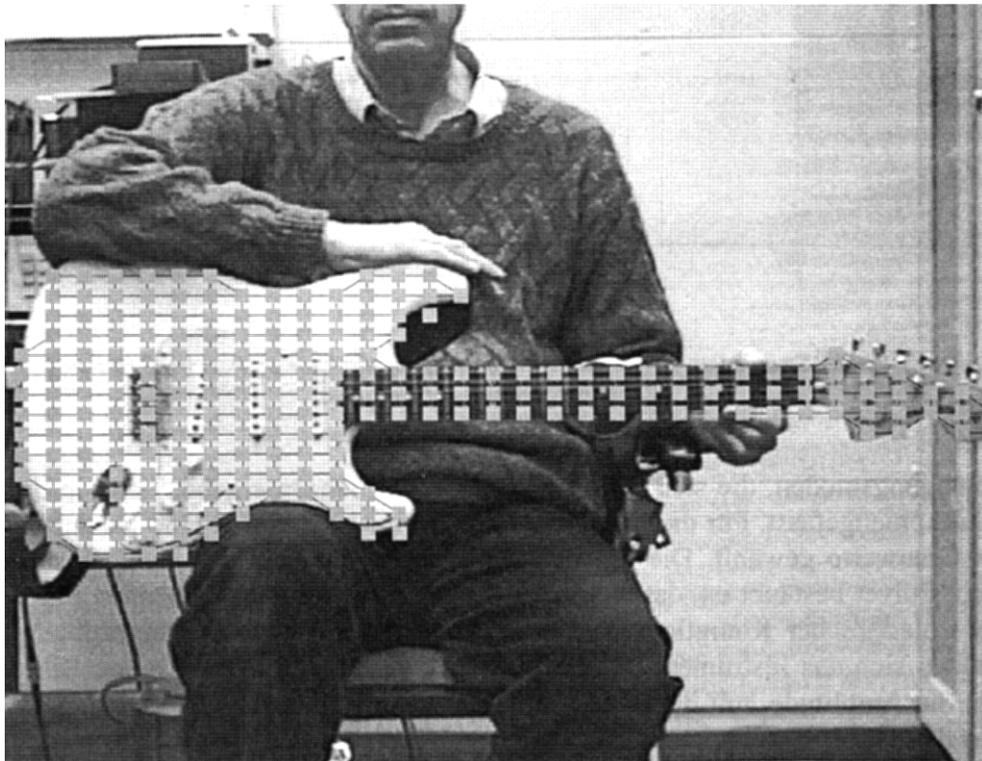


Fig. 8. Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) mit Messgitter.

Hand umfasst den Hals. Man erkennt den Schwingerreger, der von hinten auf den Hals wirkt. Links im Hintergrund ist ein Teil der Messapparatur zu sehen.

In Fig. 8 ist diesem Bild das Messgitter überlagert. Die Messpunkte sind durch graue Quadrate gekennzeichnet. Die Gesamt-Übertragungsfunktion, gemittelt über all diese Messpunkte, ist in Fig. 9 dargestellt. Die mittlere Transfer-Admittanz ist auf 1 m/s pro N bezogen und im Pegelmaß im Bereich zwischen -80 dB (entsprechend 0,0001 m/(Ns)) und -30 dB (entsprechend 0,032 m/(Ns)) über der Frequenz aufgetragen. Ausgeprägte Maxima treten bei 60 Hz, 190 Hz, 230 Hz und 432 Hz auf. Bei diesen Frequenzen ist für 1 N Anregungskraft die gemittelte Schwinggeschwindigkeit kleiner als 10 mm/s.

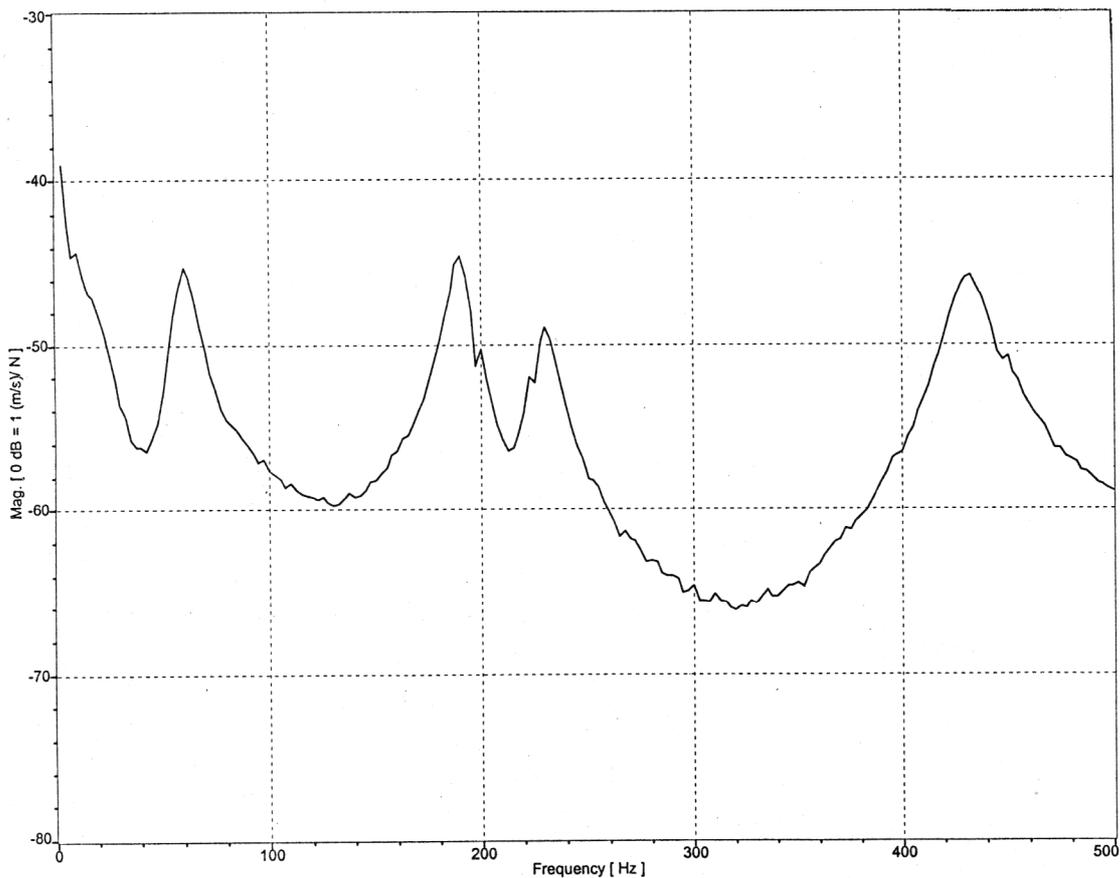


Fig. 9. Fender Stratocaster Nr. 4: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns) in Abhängigkeit von der Frequenz.

Die Schwingungsmoden, die sich für die vier Eigenfrequenzen ergeben, sind in den Fig. 10 und 11 zusammengefasst. Für die Darstellung ist in Fig. 10 zunächst eine Kodierung des Betrages in Grauwerte gewählt. Die Vorstellung ist hilfreich, dass das weiße Instrument mit schwarzem Pulver bestäubt ist, das sich bei Anregung mit der entsprechenden Eigenfrequenz nach Art Chladni'scher Klangfiguren (Chladni 1787) in den Schwingungsknoten sammelt, also dort, wo sich das Instrument in Ruhe befindet. Je heller das überlagerte Bild ist, desto größer ist die Amplitude, mit der die betreffende Stelle schwingt. Das Vorzeichen spielt bei dieser Art der Visualisierung keine Rolle. Bedauerlicherweise ist die druckbedingte Schwarz-Weiß-Repräsentation nicht sehr gut geeignet, die Schwingungsverteilung zu veranschaulichen. Eine colourmap-Darstellung, d.h. eine Kodierung von Amplituden in Farben (vgl. Fleischer 1999c und d, Gerjes 2001), würde die Vorstellung wesentlich besser unterstützen.

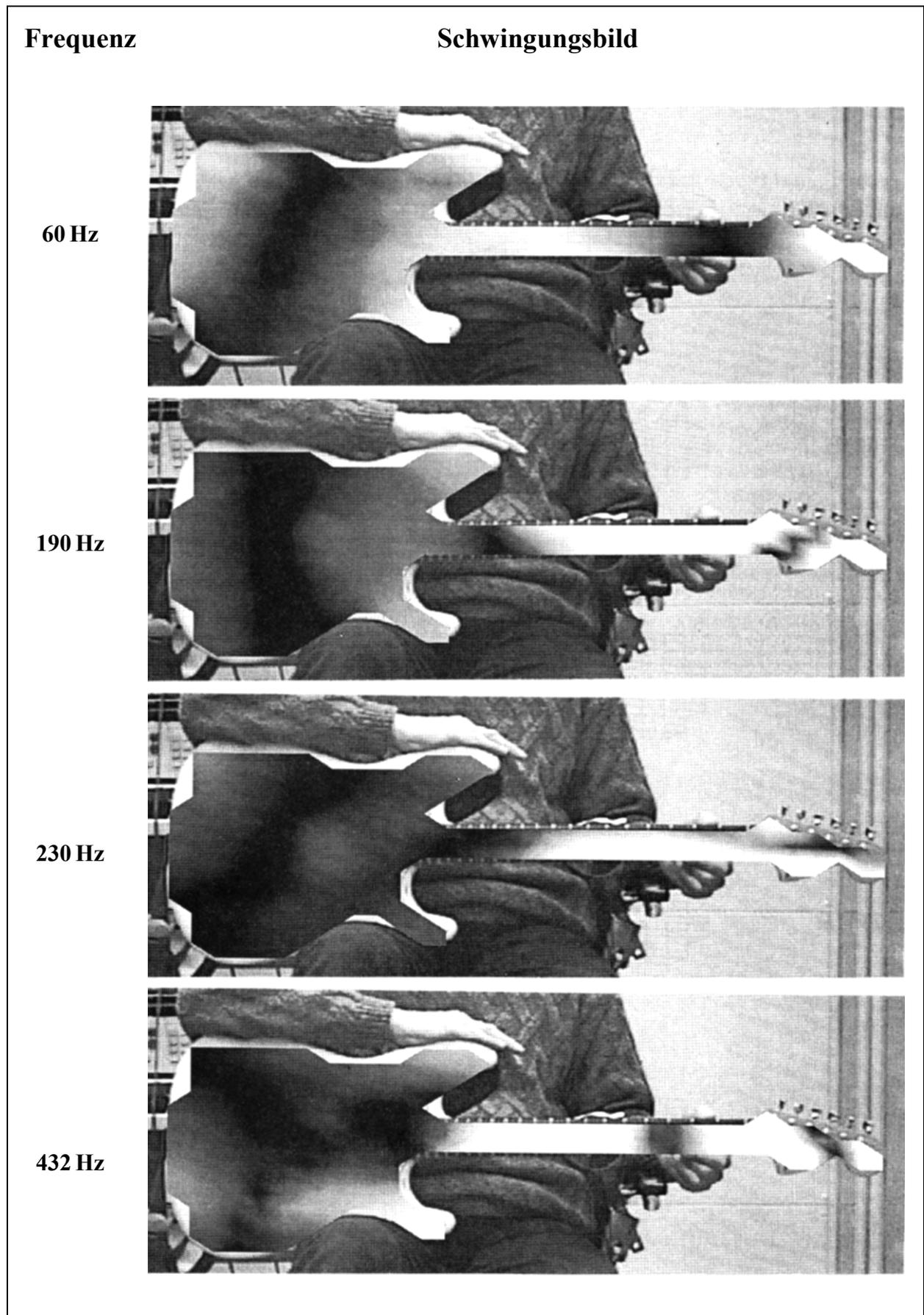


Fig. 10. Schwingungsmoden der E-Gitarre Fender Stratocaster Nr. 4 mit zugehörigen Frequenzen.

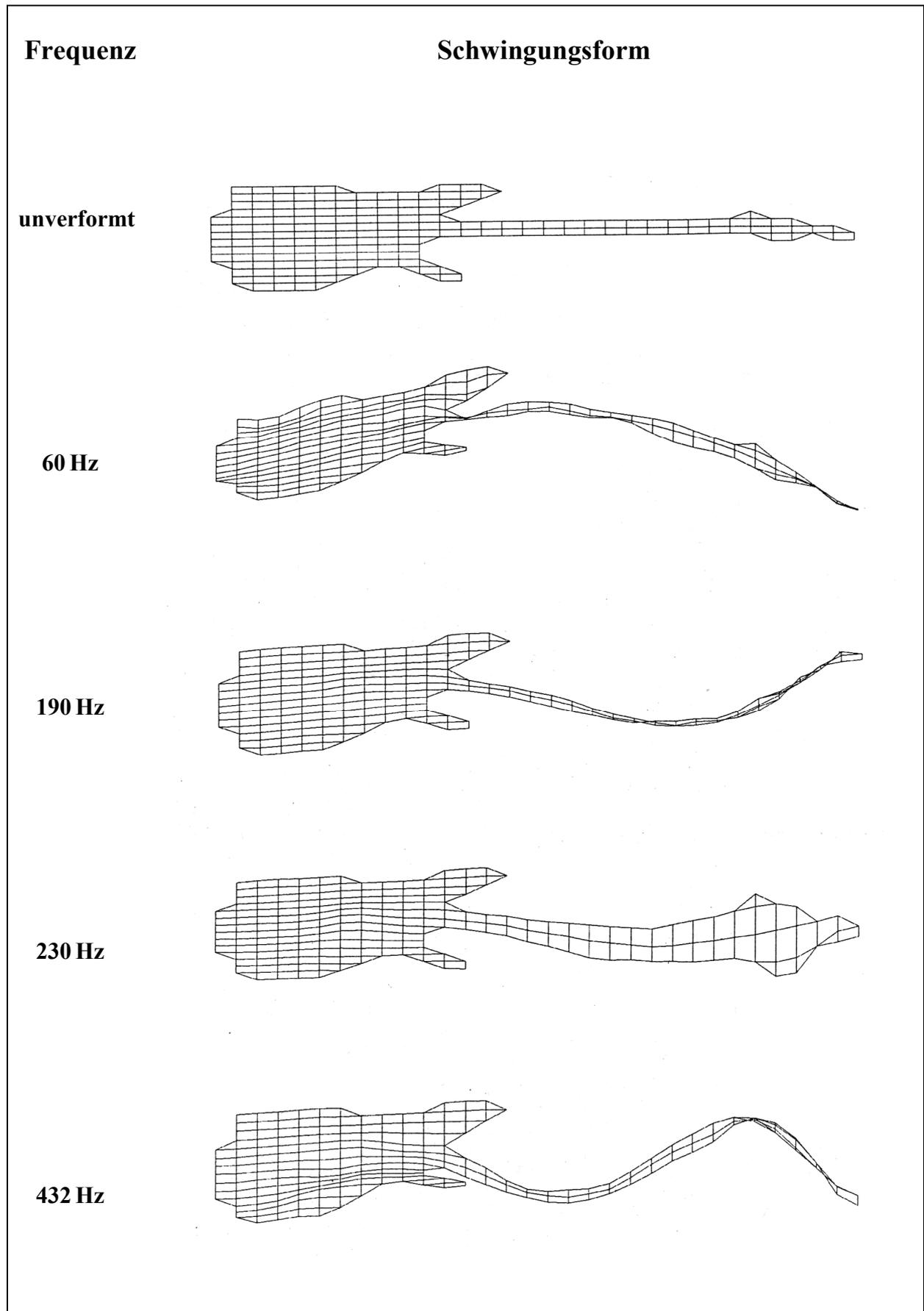


Fig. 11. Schwingungsmoden der E-Gitarre Fender Stratocaster Nr. 4 mit zugehörigen Frequenzen.

Derselbe Sachverhalt, jedoch dieses Mal unter Berücksichtigung des Vorzeichens, ist aus Fig. 11 ersichtlich. Die Form der Schwingung ist anhand eines Gittermodells, wie es von der Modalanalyse oder von FE-Berechnungen her bekannt ist, veranschaulicht. Zum leichteren Vergleich ist die unverformte Struktur mit angegeben. Man erkennt, dass vor allem der Hals sehr schwingfreudig ist. Drei unterschiedliche Grundformen bei 60 Hz, 190/230 Hz bzw. 432 Hz sind auszumachen. Die Formen bei 190 Hz und 230 Hz unterscheiden sich dadurch, dass bei der höheren Frequenz der Balkenschwingung eine ausgeprägte Torsionsbewegung überlagert ist.

3.3. Schwingungen des Instruments Nr. 5

Der vorliegende Abschnitt enthält Ergebnisse von Vibrometer-Messungen an der Gitarre Squier Bullet, die Gerjes (2001) durchgeführt hat. Es wurde wiederum innerhalb einer Frequenzbandbreite von 500 Hz gemessen. Fig. 12 gibt die Messsituation wieder: Eine sitzende Person hält die Gitarre, die auf dem rechten Oberschenkel aufliegt, mit der linken Hand in der Nähe des Sattels am Hals. Der Schwingerreger wirkt beim 7. Bund von hinten auf den Hals.



Fig. 12. Instrument Nr. 5 (Squier Bullet), gehalten für die Schwingungsmessung.

In Fig. 13 ist das Messgitter mit 306 Punkten zu erkennen, die durch graue Quadrate markiert sind. Die gemittelte Gesamt-Übertragungsfunktion kann Fig. 14 entnommen werden. Sie ist wiederum, bezogen auf 1 m/s pro N, im Pegelmaß zwischen -80 dB (was 0,0001 m/(Ns) entspricht) und -30 dB (entsprechend 0,032 m/(Ns)) aufgetragen. Hauptmaxima treten bei 55 Hz, 170 Hz, 210 (218) Hz und 423 (435) Hz auf. Diese Frequenzen werden hier verkürzt als Eigenfrequenzen bezeichnet. Bei Anregung mit 1 N Kraft am 7. Bund ist bei den angegebenen Frequenzen die gemittelte Schwinggeschwindigkeit kleiner als 10 mm/s und hat damit ungefähr die gleiche Größe wie beim vorher betrachteten Instrument Nr. 4.



Fig. 13. Instrument Nr. 5 (Squier Bullet) mit Messgitter.

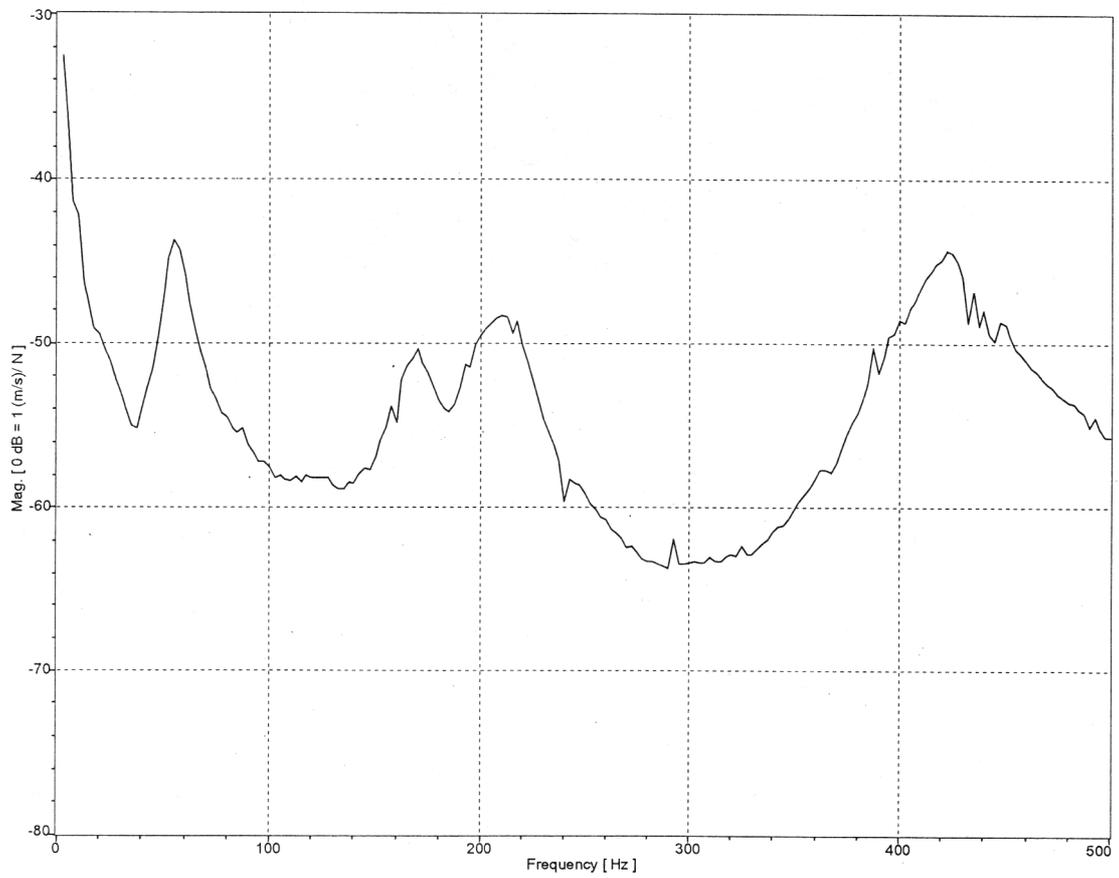


Fig. 14. Squier Bullet Nr. 5: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns).

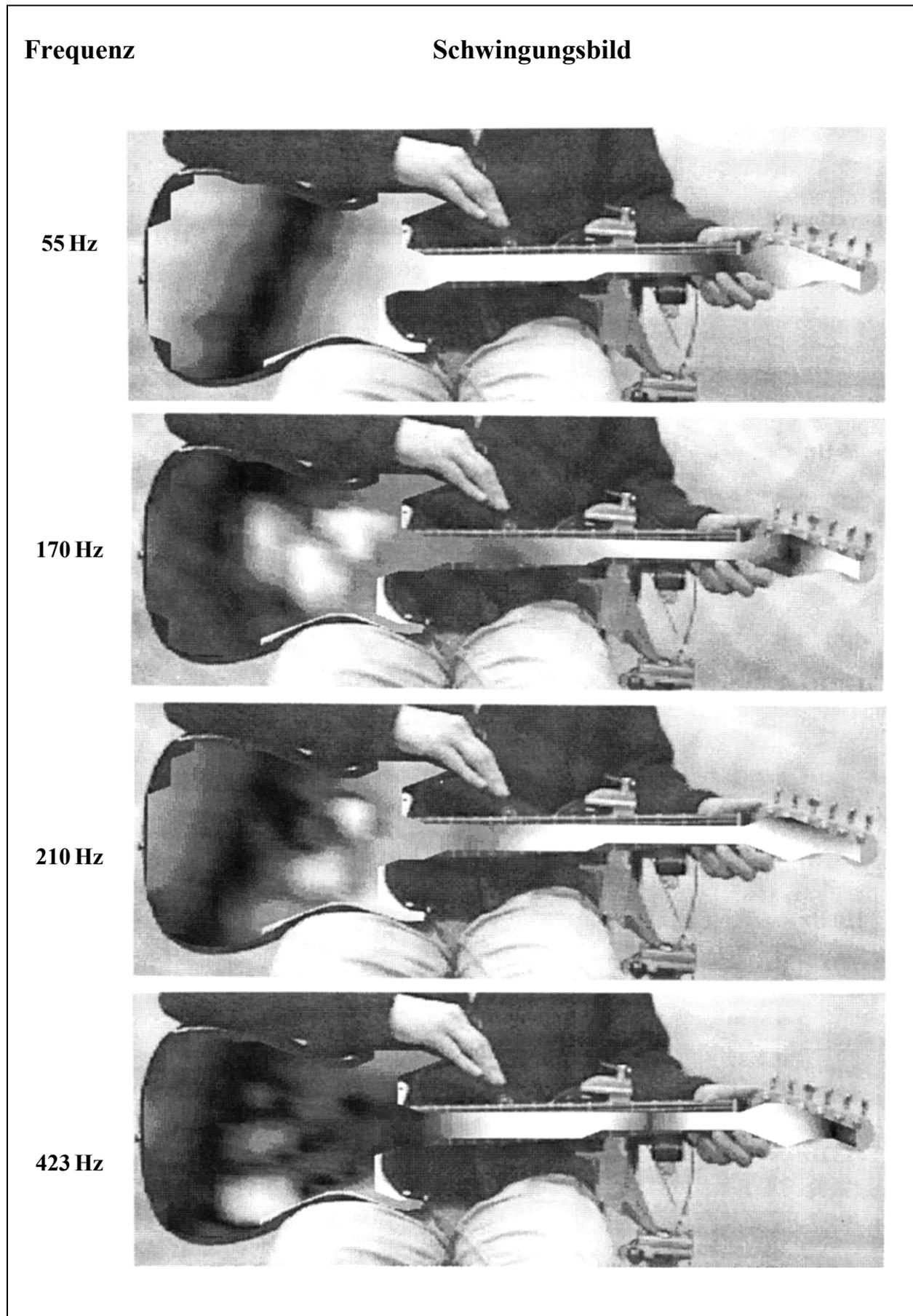


Fig. 15. Schwingungsmoden der E-Gitarre Squier Bullet Nr. 5 mit zugehörigen Frequenzen.

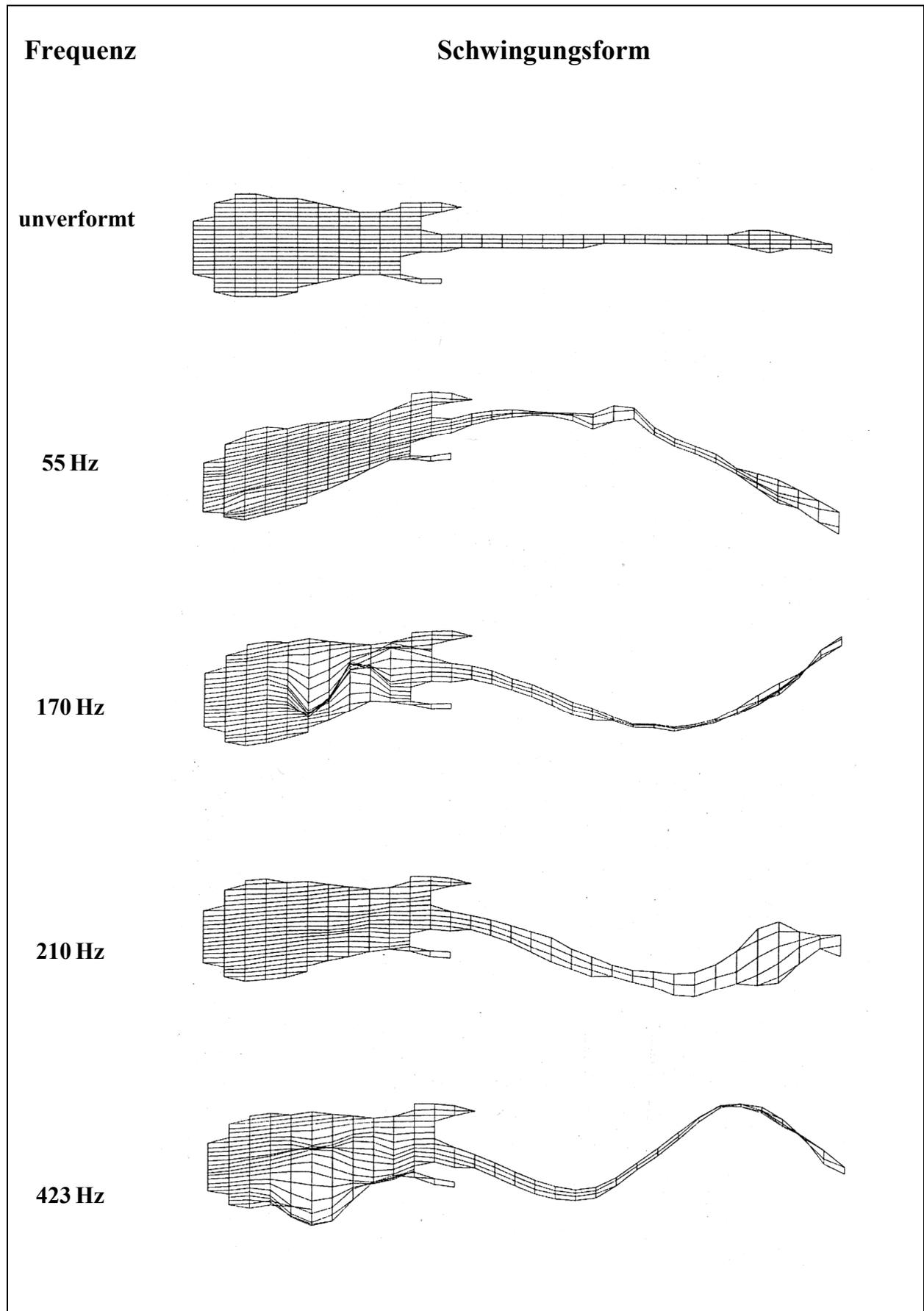


Fig. 16. Schwingungsmoden der E-Gitarre Squier Bullet Nr. 5 mit zugehörigen Frequenzen.

Die Schwingungsmoden, die sich für die Frequenzen der vier Hauptmaxima ergeben, sind in den Fig. 15 und 16 zusammengestellt. In Fig. 15 ist der Betrag in Grauwerten kodiert. Je heller das überlagerte Bild ist, desto größer ist an der betreffenden Stelle die Amplitude, mit der sich das Instrument bewegt. Der Vergleich zeigt, dass die hier betrachtete Gitarre Squier Bullet auf ganz ähnliche Weise schwingt, wie das in Fig. 10 behandelte Instrument Fender Stratocaster. Die Herkunft der beiden Gitarren aus demselben "Stall" lässt sich nicht verleugnen.

Ergänzend ist in Fig. 16 die Form der Schwingung anhand des Gittermodells visualisiert. Oben ist die unverformte Struktur angegeben. Wiederum erweist sich der Hals als sehr beweglich. Wie in ähnlicher Weise bereits in Fig. 11 beim Instrument Stratocaster zu erkennen war, lassen sich drei verschiedene Grundformen bei 55 Hz, 170/210 Hz bzw. 423 Hz unterscheiden. Bei 170 Hz liegt reine Biegung vor. Bei 210 Hz ist der Biegung zusätzliche Torsion überlagert. Die beiden untersuchten Gitarren weisen große Gemeinsamkeiten auf. Sowohl die Frequenzen ("Eigenfrequenzen"), bei denen die Gesamt-Übertragungsfunktionen maximal werden, als auch die Bewegungsmuster ("Eigenformen"), in denen die Gitarren bei diesen Frequenzen schwingen, stimmen weitgehend überein.

3.4. Vergleich der Schwingungen der Instrumente Nr. 4 und 5 mit Balkenschwingungen

3.4.1. Schwingungsformen des idealen Balkens

Ein Standardmodell eines Kontinuumsschwingers, bei dem die Rückstellkraft aus den elastischen Eigenschaften des Materials resultiert, ist der Balken. Wie in Lehrbüchern der Kontinuumsmechanik und beispielsweise im hier betrachteten Zusammenhang auch von Fleischer (1999b) ausgeführt, sind die freien Biegeschwingungen eines Balkens mit konstanter Biegesteifigkeit EI_y und Querschnittsfläche A nach der Bernoulli'schen Theorie durch die Differentialgleichung

$$EI_y w'''' + \rho A w'' = 0 \quad (1)$$

mit

- E Elastizitätsmodul,
- I_y Flächenträgheitsmoment,
- ρ Dichte,
- A Querschnittsfläche,
- w Auslenkung der Schwerachse,
- '''' vierte Ableitung nach der Längskoordinate x und
- '' zweite Ableitung nach der Zeit t .

beschrieben. Die Behandlung mit Standardmethoden der Schwingungslehre liefert die Eigenwerte λ_j und Eigenfrequenzen f_j mit der Ordnungszahl j . Die Eigenfrequenzen sind

$$f_j = \frac{\lambda_j^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}} \quad (2)$$

wobei l die Länge des Balkens ist.

Mit

$$I_y = \frac{b h^3}{12} \quad \text{und} \quad A = b h$$

wird daraus für Rechteckquerschnitt der Breite b und Dicke h

$$f_j = \frac{\lambda_j^2}{4\sqrt{3}\pi} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Aus Gl. (3) ist der Einfluss der Parameter des Balkens auf seine Eigenfrequenzen ersichtlich:

Die Eigenfrequenzen sind proportional zu

- dem Quadrat der Eigenwerte λ_j , die von den Randbedingungen abhängen,
- der Dicke h des Balkens,
- dem Kehrwert des Quadrats der Länge l des Balkens und
- der Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = (E/\rho)^{1/2}$ von Dehnwellen, die vom Material abhängig ist.

Für gleichartige Balken hängen die Eigenfrequenzen ausschließlich von den Eigenwerten ab, die ihrerseits von den Randbedingungen bestimmt werden. Deren Einfluss ist groß. Wie beispielsweise von Fleischer (1999b) auf S. 14 in einer kurzen Abschätzung gezeigt wurde, ist die erste Eigenfrequenz eines beidseitig freien Balkens mehr als sechsmal so hoch wie die eines gleichartigen Balkens, der an einem Ende eingespannt ist. Die dramatische Abhängigkeit des Schwingungsverhaltens von der Lagerung, die sich hierin zeigt, war der Beweggrund dafür, die Gitarren nicht in irgendwelchen Versuchseinrichtungen, sondern ausschließlich *in situ*, d.h. unter möglichst natürlichen Lagerungsbedingungen, zu untersuchen.

Aus Untersuchungen an Elektrobässen (Fleischer 1999b) kann geschlossen werden, dass von den Standard-Randbedingungen die Lagerungsart gelenkig-frei am ehesten geeignet ist, die Verhältnisse anzunähern, wie sie bei einer am Körper gehaltenen Elektrogitarre vorliegen. Am Gelenk ($x = 0$; im Folgenden als linkes Ende bezeichnet) verschwinden die Auslenkung und das Biegemoment. Am freien Ende ($x = l$; im Folgenden als rechtes Ende bezeichnet) werden das Biegemoment und die Querkraft zu Null. Aus diesen Bedingungen folgt die charakteristische Gleichung

$$\tan h \lambda_j - \tan \lambda_j = 0 \quad , \quad (4)$$

deren Lösungen die Eigenwerte

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 3,927 \quad , \\ \lambda_2 &= 7,069 \quad , \\ \lambda_3 &= 10,210 \quad , \\ \lambda_4 &= 13,352 \quad , \\ \lambda_5 &= 16,493 \quad , \\ &\vdots \\ \lambda_j &= (j + 1/4)\pi \quad , \\ \lambda_{j+1} &= \lambda_j + \pi \end{aligned} \quad (5)$$

sind. Damit folgt aus Gl. (2) oder (3), dass sich die Eigenfrequenzen wie

$$f_1 : f_2 : f_3 : f_4 : f_5 : \dots = 1 : 3,241 : 6,761 : 11,562 : 17,643 : \dots \quad (6)$$

verhalten. Die Eigenfunktionen in Abhängigkeit von der Koordinate x in Balkenlängsrichtung sind

$$\hat{w}_j(x) = \sin \lambda_j \frac{x}{l} + \frac{\cos \lambda_j}{\cosh \lambda_j} \sinh \lambda_j \frac{x}{l} \quad ; \quad (7)$$

diese stellen die auf den Maximalwert normierten Eigenschwingungsformen dar.

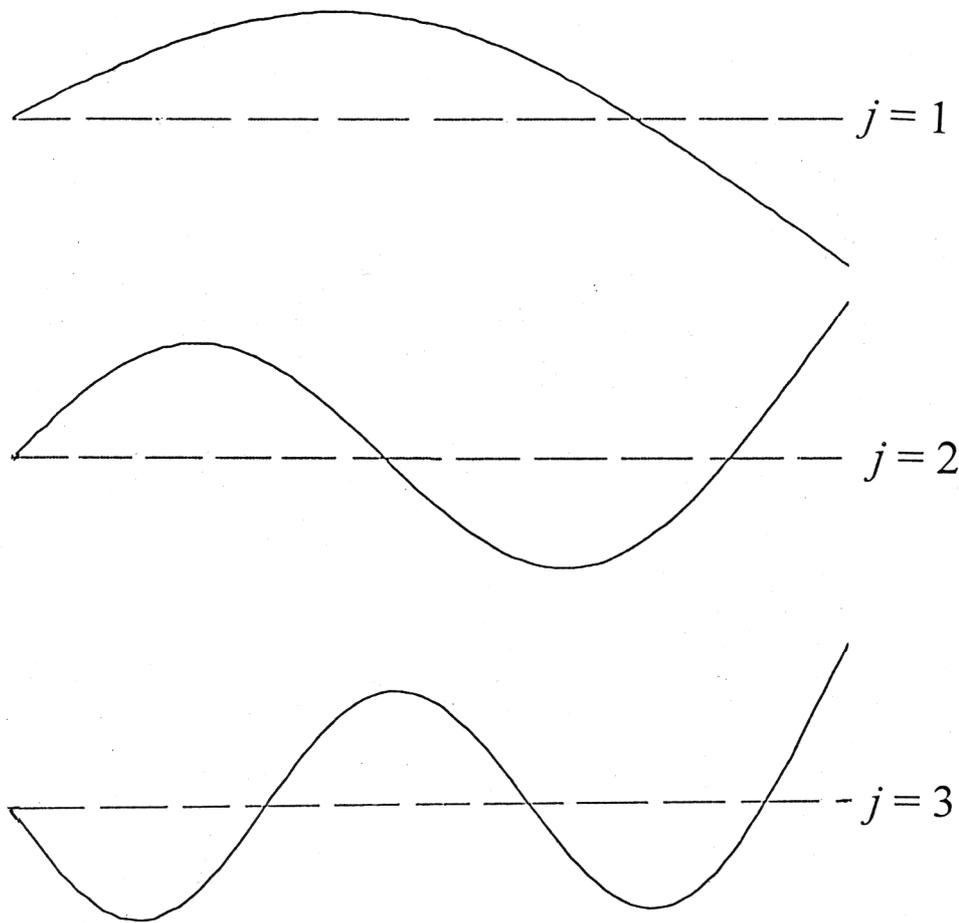


Fig. 17. Die ersten drei Schwingungsformen des gelenkig-freien Balkens.

Drei Eigenschwingungsformen des Balkens sind für die Ordnungszahlen $j = 1, 2, 3$ in Fig. 17 zusammengestellt. Zusätzlich zum Knoten am Gelenk treten j weitere Knoten, also insgesamt $j + 1$ Knotenpunkte auf. Dazwischen bilden sich j Schwingungsbäuche aus. Sehr große Auslenkungen sind am freien Ende zu beobachten.

3.4.2. Schwingungsformen von E-Gitarren

Die Hauptschwingungsformen sind dadurch gekennzeichnet, dass vorwiegend - wie bei einem Balken - reine Biegung auftritt. Ergebnisse der Vibrometer-Messungen an den beiden elektrischen Gitarren Nr. 4 und 5, die bereits aus den Fig. 10 und 11 bzw. 15 und 16 bekannt sind, wurden zum besseren Vergleich mit den Schwingungsformen des Balkens in seitlicher Ansicht dargestellt. Die Gerade, die gestrichelt eingezeichnet ist, charakterisiert den Ruhezustand. Weitere Schwingungsmuster können dadurch entstehen, dass sich der dargestellten Biegung des Gesamtinstruments Schwingungen von Teilen überlagern. Diese betreffen beispielsweise die Hörner, die aus dem Korpus durch das Ausschneiden der cutaways entstanden sind. Von größerer Bedeutung im Hinblick auf die Funktion des Instruments dürften Torsionsschwingungen des Halses sein; siehe hierzu das folgende Kapitel. Deren Theorie wird im Interesse einer Beschränkung auf das Wesentliche derzeit nicht behandelt.

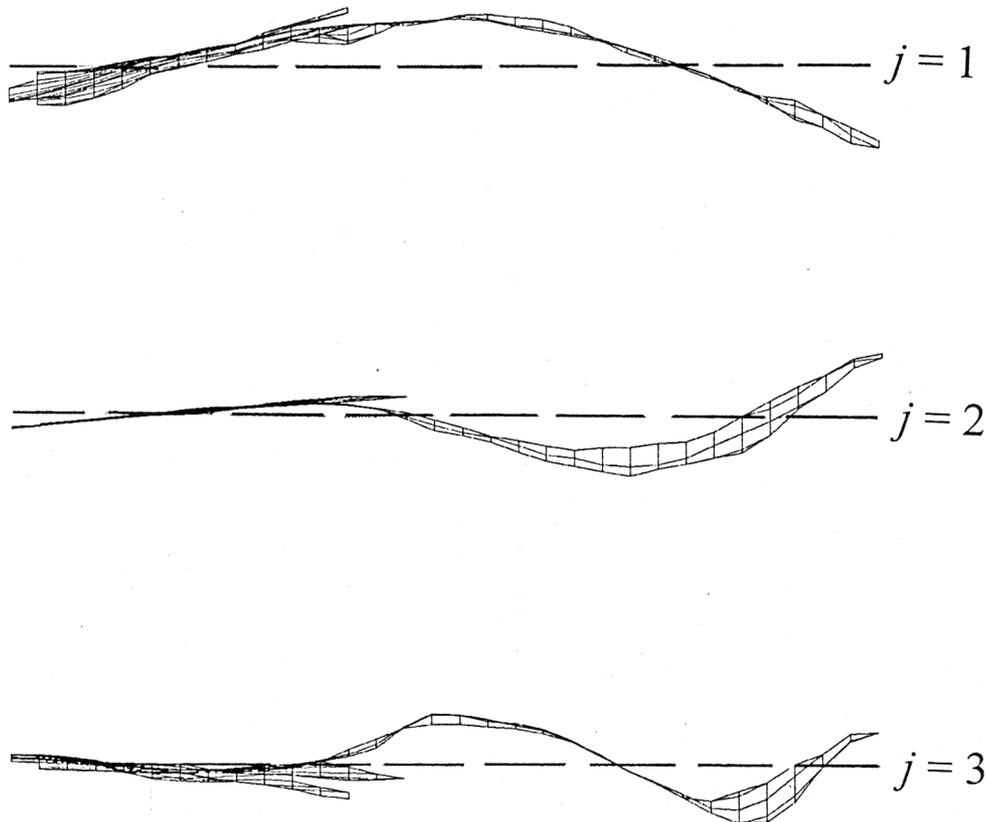


Fig. 18. Die ersten drei Hauptschwingungen bei 60 Hz, 190 Hz und 432 Hz (von oben nach unten) der E-Gitarre Fender Stratocaster Nr. 4.

Fig. 18 bezieht sich auf das Instrument Nr. 4 und seine Schwingungen bei 60 Hz, 190 Hz bzw. 432 Hz, die in Analogie zum gelenkig-freien Balken mit der Ordnungszahl j des zugehörigen Eigenwertes der Balkenschwingung bezeichnet werden. Es sind zwei, drei bzw. vier Schwingungsknoten zu beobachten.

Dasselbe gilt für das Instrument Nr. 5, dessen Hauptschwingungen in Fig. 19 für die Frequenzen 55 Hz, 170 Hz bzw. 423 Hz zusammengestellt sind. Die großen Amplituden im Bereich des Korpus beziehen sich nicht auf den Instrumentenkörper, sondern sind auf Schwingungen des aufgeschraubten Schlagbretts, von Armaturen usw. zurückzuführen.

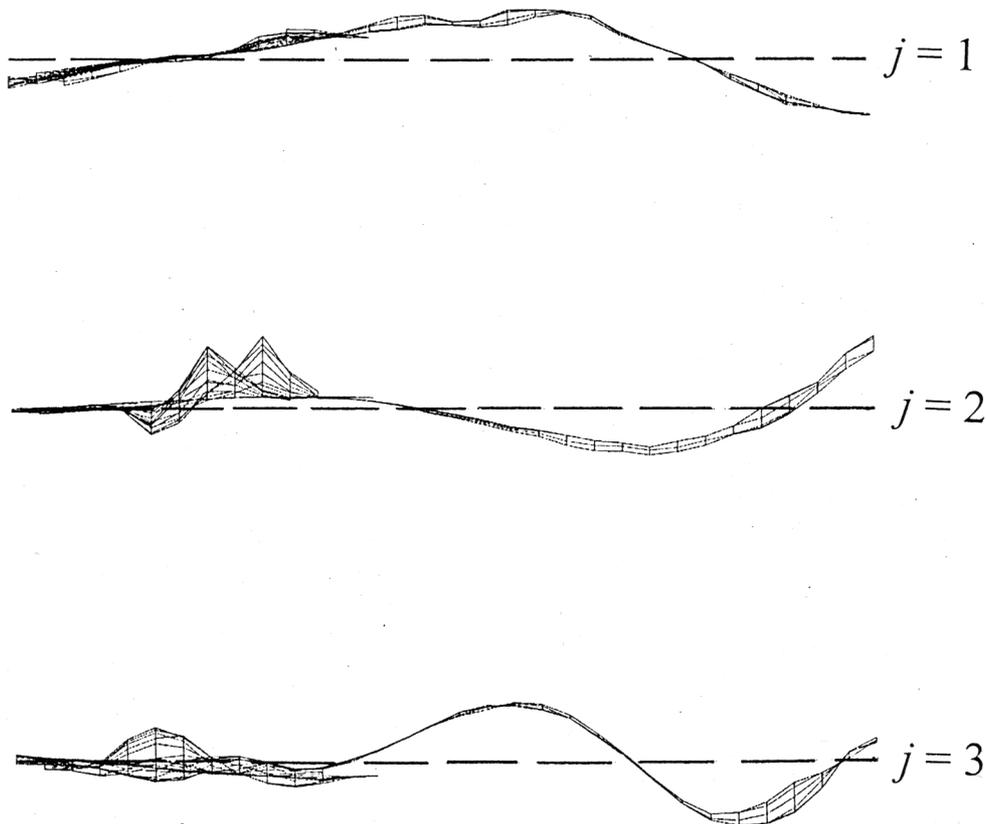


Fig. 19. Die ersten drei Hauptschwingungen 55 Hz, 170 Hz und 423 Hz (von oben nach unten) der E-Gitarre Squier Bullet Nr. 5.

Ein Vergleich zeigt weitestgehende Übereinstimmung zwischen den Schwingungsmustern dieser beiden Gitarren. Die zugehörigen Frequenzen weichen um maximal etwa zehn Prozent voneinander ab. Dabei ist zu beobachten, dass die Gitarre Stratocaster ihre Hauptschwingungen bei durchgängig etwas höheren Frequenzen als die Gitarre Bullet ausprägt.

3.4.3. Wertung

Bei beiden Instrumenten zeigen die Messergebnisse eine deutliche Verwandtschaft mit den Ergebnissen der Balkentheorie. Einige Annahmen, wie z.B. konstante Biegesteifigkeit und konstanter Querschnitt, die den theoretischen Berechnungen zu Grunde liegen, weichen naturgemäß von der Realität der Instrumente ab. Ebenso gibt die Modellierung der Lagerung mittels der Standard-Randbedingung gelenkig-frei die tatsächlichen Verhältnisse, wie sie die Instrumente am Körper des Spielers vorfinden, nur unzureichend wieder. Daraus müssen ge-

Tab. II. Intervalle der Frequenzen der Biegeschwingungen von zwei Elektrogitarren und des gelenkig-freien Balkens; Bezugswert ist die erste Eigenfrequenz

	Fender Stratocaster Nr. 4	Squier Bullet Nr. 5	Balken
1. Hauptschwingung ($j = 1$)	1	1	1
2. Hauptschwingung ($j = 2$)	3,17	3,10	3,24
3. Hauptschwingung ($j = 3$)	7,20	7,69	6,76
4. Hauptschwingung ($j = 4$)			11,56

wisse Diskrepanzen resultieren. So liegt der erste Knoten nicht - wie bei einem idealen Gelenk - exakt am linken Ende, sondern in der Nähe der Brücke der Gitarre. Während sich beim Balken die Schwingungsbäuche mit jeweils etwa gleicher Amplitude ausbilden, sind bei den Gitarren im Bereich des solid body die Auslenkungen erwartungsgemäß kleiner als auf dem Hals. Trotzdem stimmen für das Balkenmodell und die realen Instrumente wesentliche Merkmale der Schwingungsmuster, nämlich die Anzahl und ungefähre Lage der Knotenpunkte, im Wesentlichen überein. Die Übereinstimmung tritt noch deutlicher zutage, wenn die Verhältnisse der Eigenfrequenzen verglichen werden. Tab. II zeigt, dass die Intervalle der Eigenfrequenzen bei den Elektrogitarren ähnliche Werte wie beim gelenkig-freien Balken (siehe Gl. (6)) annehmen. Dies bestätigt die Beobachtungen, die bei Elektrobässen gemacht wurden; vgl. Fleischer (1999b). Ist eine Biegeschwingung identifiziert und ist ihre Frequenz bekannt, dann lassen sich mit Hilfe des Balkenmodells die Frequenzen der übrigen Biegeschwingungen abschätzen und Aussagen über die zugehörigen Schwingungsformen machen.

3.5. Zusammenfassende Bemerkung

Im vorliegenden Kapitel wurden anhand von zwei Exemplaren die Schwingungen der mechanischen Struktur "Elektrogitarre" einschließlich der gespannten Saiten, sämtlicher Beschläge usw. untersucht. Um wirklichkeitsnahe Randbedingungen zu schaffen, wurde während der Messung das Instrument von einer Person in sitzender Spielposition gehalten. Mittels Laser-Vibrometrie wurde die Komponente der Schwinggeschwindigkeit senkrecht zur Ebene Korpusoberseite-Griffbrett bestimmt. Die Bewegung des Instruments, ermittelt an mehreren hundert Messpunkten, und die am 7. Bund angreifende Kraft werden einer FFT-Analyse unterzogen. Als Ergebnis liegt eine entsprechende Anzahl von Übertragungsfunktionen vor. Da die gegenwärtigen Untersuchungen vorwiegend der Orientierung dienen, wurde der Bereich von Frequenzen zwischen 0 und 500 Hz als ausreichend erachtet. Prinzipiell lässt sich die obere Frequenzgrenze - naturgemäß um den Preis entsprechend verringerter Frequenzauflösung oder entsprechend verlängerter Messzeit - jederzeit erweitern. Die Maxima der gemittelten

Übertragungsfunktionen sind Indikatoren für Eigenfrequenzen und Eigenformen. Die auf diese Weise bestimmten Betriebsschwingungsformen weisen wesentliche Merkmale der Schwingungen eines Balkens auf, der am (Korpus-)Ende mit einem Gelenk gelagert ist und am (Kopf-)Ende frei schwingen kann. Diese überwiegend von Biegung bestimmten Hauptschwingungsformen lassen sich anhand des Balkenmodells klassifizieren und werden künftig durch die Ordnungszahl j des Eigenwertes der entsprechenden Balkenschwingung charakterisiert. Varianten entstehen vor allem dadurch, dass sich diesen Biegeschwingungen zusätzliche Torsionsschwingungen überlagern können. Auf den Versuch, absolute Frequenzwerte anhand des Modells zu berechnen, wurde verzichtet. Jedoch zeigt sich, dass Aussagen über die relativen Frequenzen möglich sind. Ist eine Biege-Eigenfrequenz einer E-Gitarre bekannt, dann lassen sich anhand der vom gelenkig-freien Balken her bekannten Intervalle die Frequenzen sowie die Formen der übrigen Hauptschwingungen brauchbar vorhersagen.

4. SCHWINGUNGEN DES INSTRUMENTS ZWISCHEN STEG UND SATTEL

Nachdem im vorigen Kapitel die Schwingungen des gesamten Instruments untersucht worden sind, fokussiert sich im Folgenden das Interesse auf den Bereich zwischen den beiden Auflagern der Saiten. Nimmt man an, dass die Saite leer gespielt wird, ist dies das Gebiet zwischen dem Steg und dem Sattel. Der übrige Teil des Instruments bleibt außer Betracht. Versuchsanordnung und Ablauf der Messungen waren wie in Kapitel 3 beschrieben. Ausgeführt wurden die Experimente von Twork (1997) und Geris (2001).

4.1. Messungen am Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul)



Fig. 20. Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul) während der Schwingungsmessung.

In Fig. 20 ist die Gitarre Gibson Les Paul abgebildet, wie sie Tilmann Zwicker für die Messung im Sitzen hält. Es wurde an $4 \cdot 20$ Punkten im Bereich zwischen Steg und Sattel gemessen. Die Gesamt-Übertragungsfunktion, die durch Mittelung über diese 80 Messpunkte entsteht, kann Fig. 21 entnommen werden. Die Frequenzachse reicht von 0 Hz bis 500 Hz; die Frequenz ist linear aufgetragen. Die Ordinate ist im Pegelmaß unterteilt. Die gemittelte Transfer-Admittanz liegt zwischen 1 mm/s pro N (entsprechend -60 dB) und 10 mm/s pro N (entsprechend -40 dB).

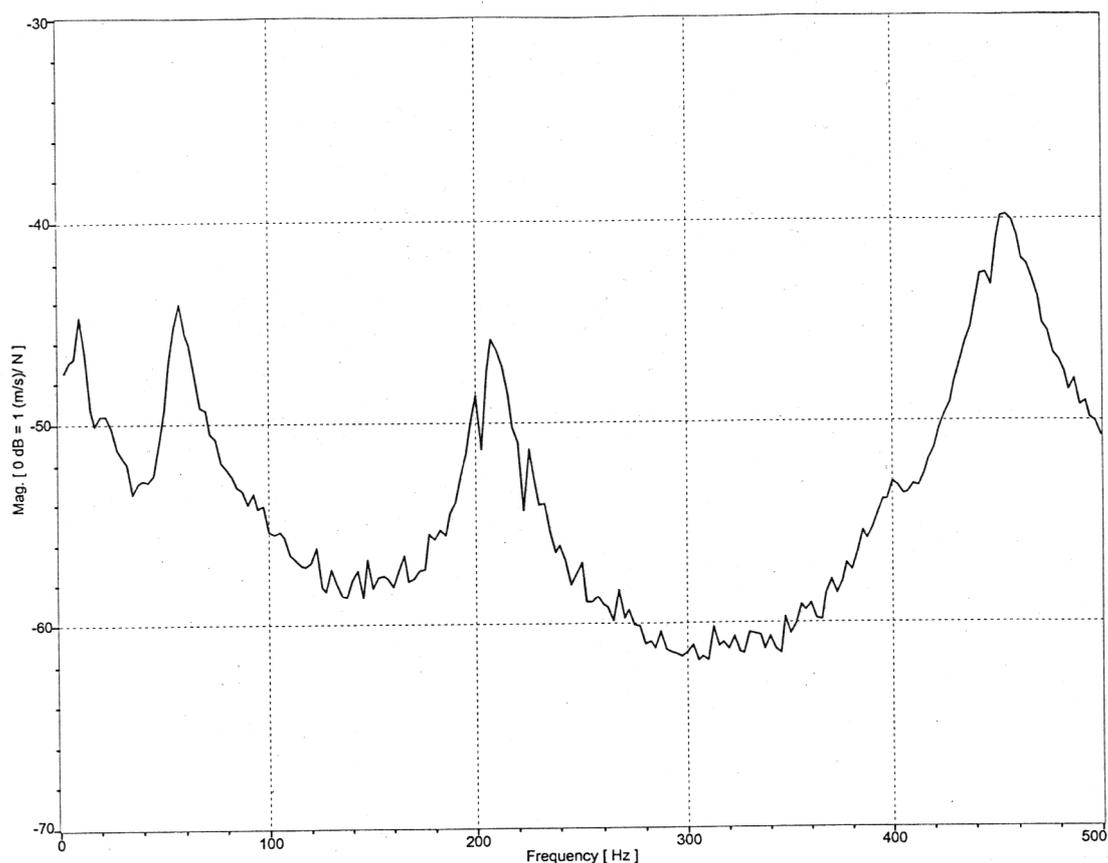


Fig. 21. Gibson Les Paul Nr. 1: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns).

Fig. 21 lässt drei ausgeprägte Hauptmaxima erkennen. Das erste liegt bei 58 Hz und damit unterhalb des Frequenzbereichs der Saitenschwingungen, deren tiefste Grundfrequenz mit 83 Hz diejenige der leer gespielten E_2 -Saite ist. Wie Fig. 21 entnommen werden kann, wirkt eine Hauptschwingung jedoch nicht nur bei einer Frequenz, sondern in einem weiten Bereich, in dem sie sich allerdings umso weniger ausprägt, je mehr sich die betrachtete Frequenz von der Eigenfrequenz unterscheidet. Da demzufolge ein "Übersprechen" in den Bereich der Saitenfrequenzen prinzipiell möglich ist, wird die erste Hauptschwingung zunächst in die weiteren Betrachtungen einbezogen. Ein weiteres Hauptmaximum tritt bei 208 Hz mit einem weniger prominenten Nebenmaximum bei 200 Hz auf. Am deutlichsten prägt sich das Hauptmaximum bei 455 Hz aus, dem ein Nebenmaximum bei 445 Hz zugeordnet werden kann.

In Fig. 22 sind Betriebsschwingungsformen (wiederum verkürzt als Moden bezeichnet), die sich für das Instrument Nr. 1 zwischen Steg und Sattel ergeben, samt den zugehörigen Frequenzen zusammengestellt. Fett gedruckte Frequenzen beziehen sich auf das nebenstehende Schwingungsbild. Normaler Druck weist auf Schwingungsbilder hin, die von der Abbildung nur unwesentlich abweichen und als Varianten der dargestellten Schwingung gedeutet werden können.

Oben ist jeweils dargestellt, wie die Gitarre bei der Messung gehalten wurde. Eine Zuordnung der Messergebnisse zum jeweiligen Ort auf dem Instrument wird dadurch erleichtert. Die Schwingungsbilder darunter sind um 90° gekippt und veranschaulichen die Bewegung senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett. Zur besseren Lokalisation von Knoten und Bäuchen ist in jede Schwingungsform als gestrichelte Linie das unverformte Instrument mit eingezeichnet.

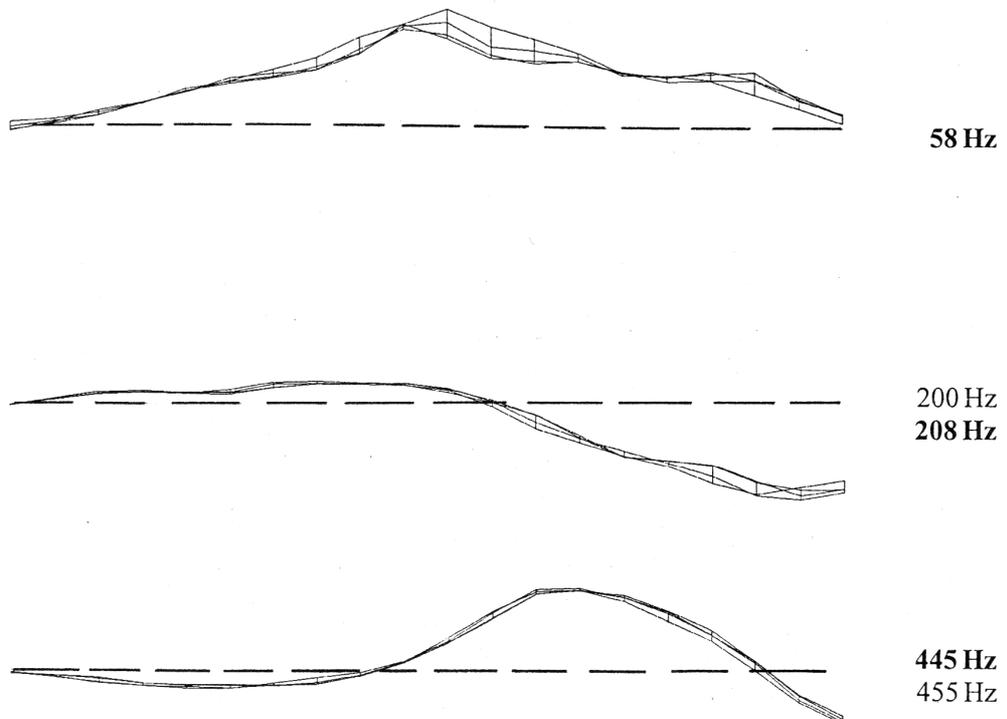


Fig. 22. Schwingungen der Gitarre Nr. 1 (Gibson Les Paul) zwischen Steg und Sattel.

Die Schwingung, die sich bei 58 Hz am stärksten ausprägt, hat im untersuchten Bereich zwei Knoten, von denen sich einer am Steg und einer am Sattel befindet. Die nächste Eigenform bei etwa 200 Hz ist durch je einen Knoten am Steg und rechts von der Mitte, d.h. in der Nähe des 10. Bundes, gekennzeichnet. Der Sattel schwingt mit großer Amplitude. Bei der dritten Schwingungsform (etwa 450 Hz) tritt ein weiterer Knoten auf. Wiederum ist der Steg praktisch in Ruhe. Neben einem Knoten ungefähr in der Mitte, d.h. nahe beim 12. Bund, ist ein weiterer etwa beim 2. Bund zu beobachten. In allen Fällen dominiert Biegung.

4.2. Messungen am Instrument Nr. 2 (Gibson Explorer)



Fig. 23. Instrument Nr. 2 (Gibson Explorer) während der Schwingungsmessung.

In Fig. 23 erkennt man die Gitarre Gibson Explorer, die der Autor für die Messung am Körper hält. Es wurde an 80 Punkten im Bereich zwischen den Auflagern der leeren Saiten gemessen. Die Gesamt-Übertragungsfunktion ist in Fig. 24 im Pegelmaß für Frequenzen zwischen 0 und 500 Hz dargestellt. Ähnlich wie auch beim vorher betrachteten Instrument nimmt die mittlere Transfer-Admittanz Werte etwa zwischen 1 mm/s pro N (entsprechend -60 dB) und 10 mm/s pro N (entsprechend -40 dB) an.

Fünf Hauptmaxima prägen sich aus. Die Spitzen der Kurve in Fig. 24 liegen bei 60 Hz, 142 bzw. 148 Hz, 213 bzw. 220 Hz, 343 Hz sowie 430 Hz mit Nebenmaxima bei 425 und 437 Hz. Fig. 25 zeigt die zugehörigen Betriebsschwingungsformen, wobei Fettdruck diejenigen Frequenzen markiert, bei denen die daneben abgebildete Schwingungsform auftritt.

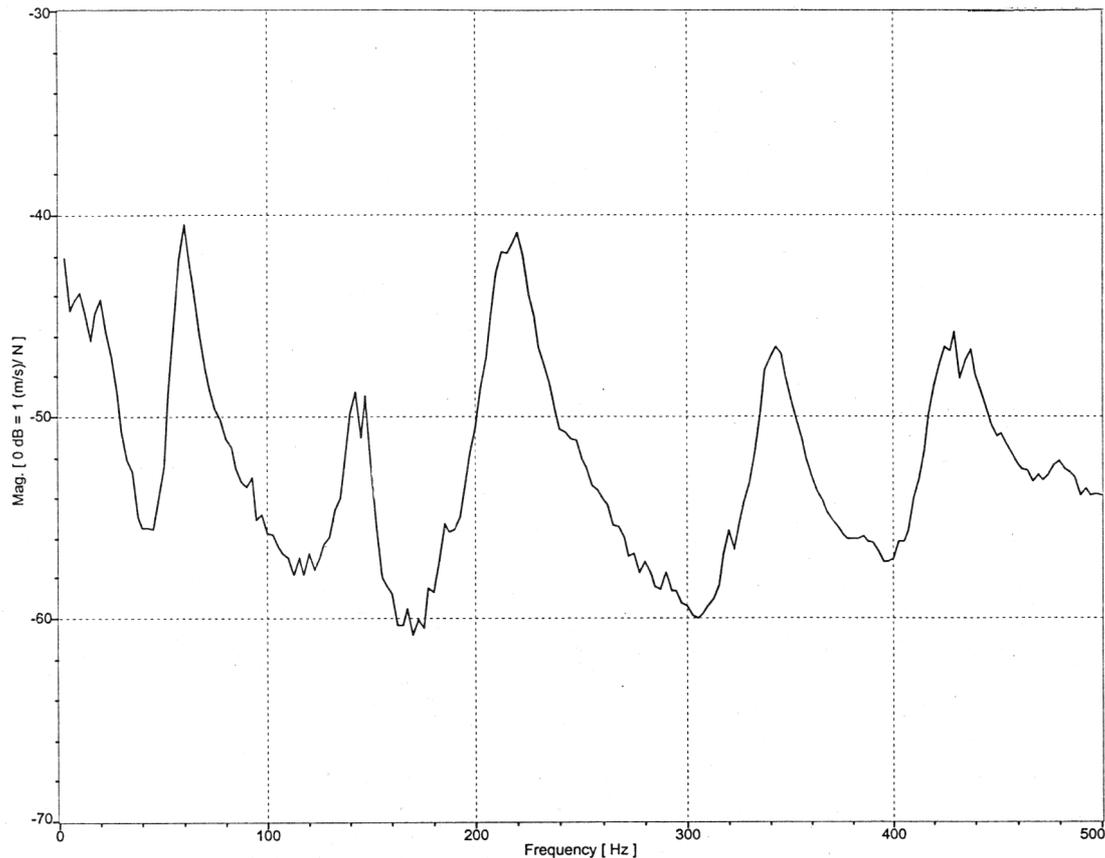


Fig. 24. Gibson Explorer Nr. 2: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns).

Bei 60 Hz erkennt man im untersuchten Bereich zwei Knoten, von denen sich einer am Steg und einer nahe dem Sattel ausbildet. Die beiden nächsten Eigenformen weisen je einen Knoten in der Nähe des Steges und der Mitte auf. Der Biegung ist Torsion überlagert. Die Torsion zeigt die Tendenz, lokal die Amplituden bei der zweiten Schwingung (142 Hz) zu vergrößern und bei der dritten Schwingung (220 Hz) zu verkleinern. Die beiden nächsten Schwingungen sind durch einen weiteren Knoten gekennzeichnet, der beim 4. Bund liegt. Der Sattel schwingt mit großer Amplitude. Die vierte Form bei 343 Hz zeigt neben Biegung starke Torsion, während bei der fünften Schwingungsform (um 430 Hz) Biegung dominiert.

Im Vergleich zum Instrument Nr. 1 desselben Herstellers fallen zwei Tatsachen auf: Zum einen liegt beim Instrument Nr. 2 der linke Knoten häufig außerhalb des untersuchten Bereichs. Demzufolge befindet sich der Steg bei den Schwingungen ab 213 Hz nicht mehr in Ruhe. Offenbar ist die Gitarre Explorer in dieser Hinsicht weniger gut ausbalanciert als die Gitarre Les Paul, woraus folgt, dass die Saiten bei höheren Frequenzen am Korpus unter Umständen ein bewegliches Auflager vorfinden. Zum anderen kommt beim Instrument Nr. 2 der Torsion eine wesentlich größere Bedeutung als beim vorher betrachteten Instrument zu. Neben den "Biege"-Moden bei etwa 60, 220 und 430 Hz, die in ähnlicher Weise auch bei der Gitarre Les Paul auftreten, finden sich bei der Gitarre Explorer um 142 und 343 Hz zusätzliche "Torsions"-Moden, bei denen sich der Biegeschwingung Torsion derart überlagert, dass die Amplituden insgesamt größer werden. Diese Neigung zu ausgeprägter Torsion des Halses dürfte mit der asymmetrischen Gestalt der Gitarre Explorer zusammenhängen. Sie bewirkt, dass die Beweglichkeit des Halses nicht nur von der Längskoordinate (beispielsweise ausgedrückt durch die Nummer des Bundes), sondern auch von der Querkoordinate abhängen kann. Diese laterale Abhängigkeit hat zur Folge, dass an ein und demselben Bund die Bass-Saiten eine andere Beweglichkeit des Auflagers als die Diskant-Saiten "fühlen".

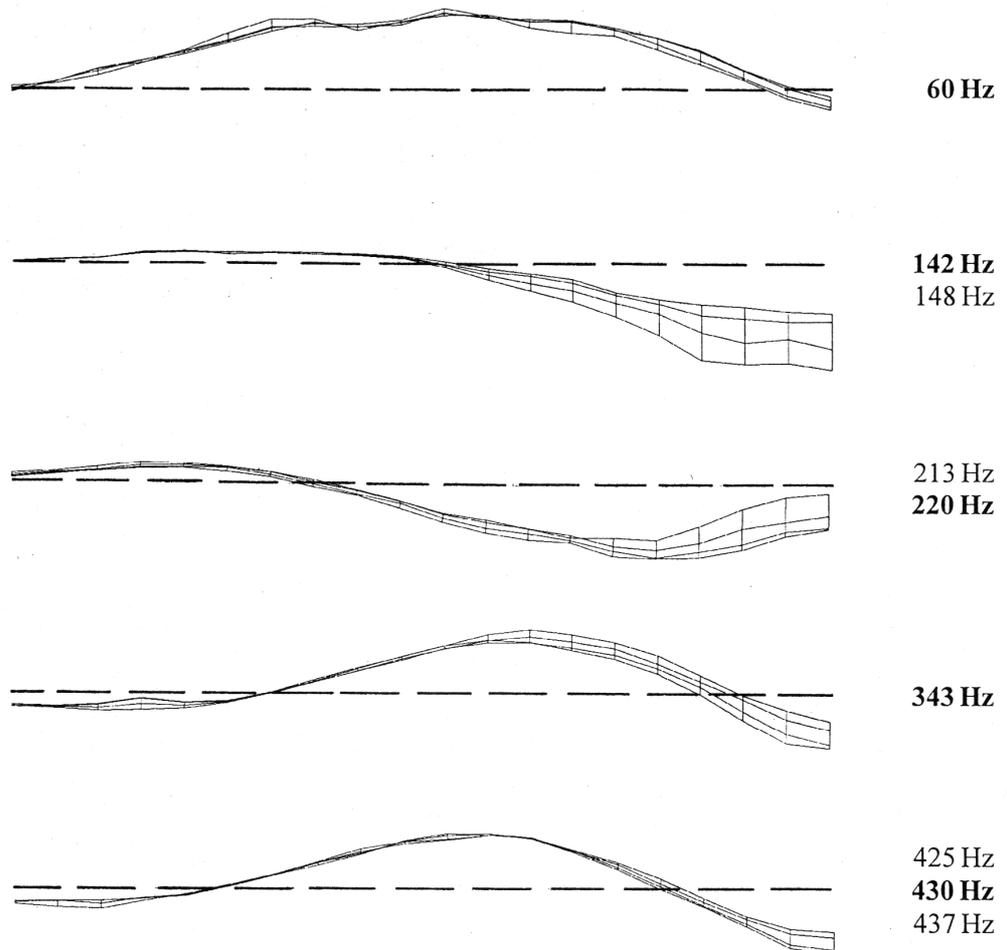
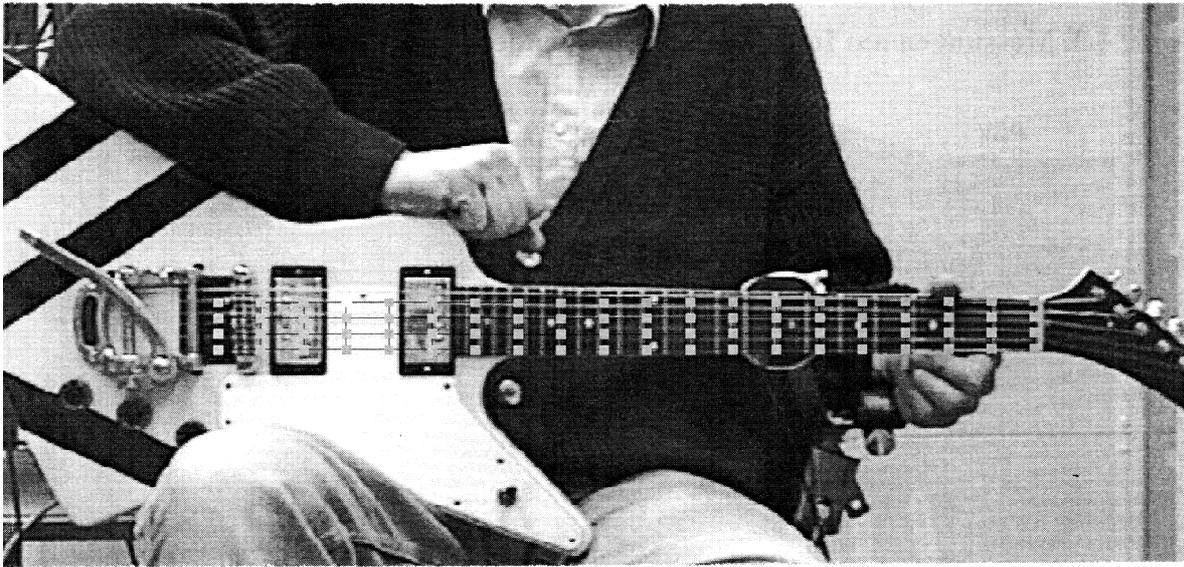


Fig. 25. Schwingungen der Gitarre Nr. 2 (Gibson Explorer) zwischen Steg und Sattel.

4.3. Messungen am Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV)



Fig. 26. Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV) während der Schwingungsmessung.

Fig. 26 gibt die Gitarre Fender Stratocaster SRV wieder, die Tilmann Zwicker für die Messung auf dem Schoß hält. Wiederum wurde an 80 Punkten im Bereich zwischen Steg und Sattel gemessen. Fig. 27 zeigt als erstes Ergebnis die Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß zwischen 0 und 500 Hz. Im Vergleich zu den vorher betrachteten Instrumenten nimmt die mittlere Transfer-Admittanz etwas kleinere Werte an. Diese liegen zwischen etwa 0,7 mm/s pro N (entsprechend -63 dB) und 7 mm/s pro N (entsprechend -43 dB).

In Fig. 27 sind vier Hauptmaxima zu erkennen. Diese liegen bei 64 Hz, 193 bzw. 200 Hz, 245 bzw. 258 Hz sowie 458 Hz mit Nebenmaxima bei 438 und 465 Hz. Die zugehörigen Betriebschwingungsformen sind in Fig. 28 zusammengestellt. Fett gedruckte Frequenzen beziehen sich auf die jeweils daneben abgebildete Schwingungsform. Davon unterscheiden sich die Schwingungsformen, die bei den normal gedruckten Frequenzen auftreten, nur geringfügig.

Bei 64 Hz sind im untersuchten Bereich zwei Knoten zu erkennen, die in der Nähe von Steg und Sattel auftreten. Die beiden nächsten Eigenformen weisen neben dem Knoten am Steg einen weiteren in der Mitte auf, der beim 12. Bund oder etwas darüber liegt. Ein und derselben Grundform der Biegeschwingung überlagert sich Torsion mit unterschiedlicher Tendenz: Die Torsion tendiert dazu, in den tiefen Lagen die Amplituden bei der zweiten Schwingung (etwa 200 Hz) zu verkleinern und bei der dritten Schwingung (etwa 258 Hz) zu vergrößern. Die vierte Schwingung weist einen weiteren Knoten in der Nähe des 3. Bundes auf. Hier

dominiert Biegung; der Sattel und der Bereich um den 10. Bund schwingen mit großer Amplitude.

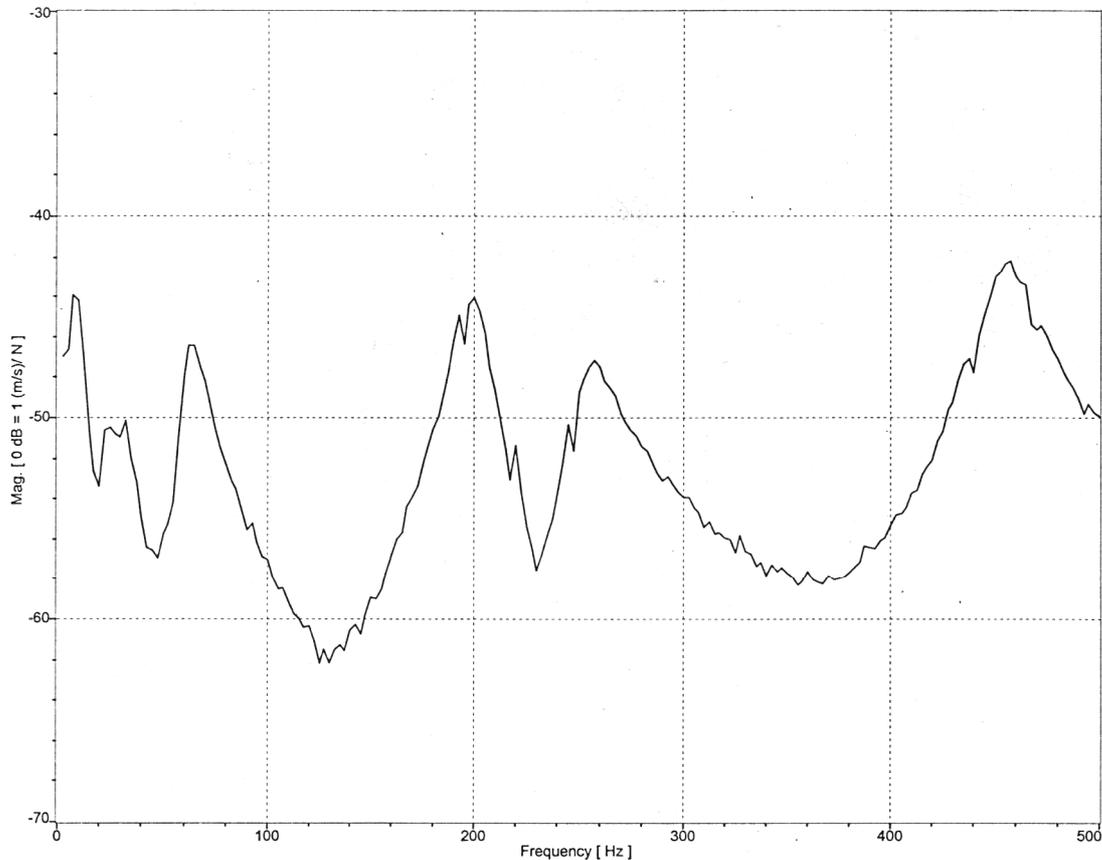


Fig. 27. Fender Stratocaster SRV Nr. 3: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re $1 \text{ m}/(\text{Ns})$.

Gitarren vom Typ Stratocaster werden häufig kritisch solchen von Typ Les Paul gegenüber gestellt. Vergleicht man die betrachtete Gitarre mit dem Instrument Nr. 1, so zeigt sich Ähnlichkeit hinsichtlich der Frequenzen und Formen der Grundmoden, die von reiner Biegung geprägt sind. Es fällt jedoch auf, dass der Hals des Instruments Nr. 3 zu Torsion neigt, die beim Instrument Nr. 1 zumindest nicht in solchem Ausmaß beobachtet wurde. Die überlagerte Torsion führt bei der Stratocaster-Gitarre auf Misch-Schwingungsformen, die sich bei etwa 200 und 250 Hz ausbilden. Es kann festgestellt werden, dass der Hals der Stratocaster-Gitarre sich insofern "schwingfreudiger" verhält, als er neben den für alle Gitarren typischen Biegeschwingungen zusätzliche Torsionsschwingungen ausführt. Aus der Analogie zum Instrument Nr. 2 lässt sich vermuten, dass der Grund in der asymmetrischen Formgebung des Instruments, insbesondere des Wirbelbretts, liegt. In Hinsicht auf die absoluten Werte zeigt sich die Gitarre Nr. 3 etwas weniger "schwingfreudig" als die beiden vorher betrachteten Instrumente. Beispielsweise aus den Gesamt-Übertragungsfunktionen ist zu entnehmen, dass die Amplituden, mit denen sich die Schwingungen ausbilden, bei der Gitarre Nr. 3 etwas geringer als bei den beiden Gibson-Instrumenten sind. Dies könnte damit zusammenhängen, dass bei Gitarren der Firma Fender der Hals über eine lösbare Verschraubung an den Korpus gefügt ist. Die Schraubverbindung bewirkt vermutlich eine höhere Fügestellen-Dämpfung als die Leimverbindung, die von der Firma Gibson verwendet wird.

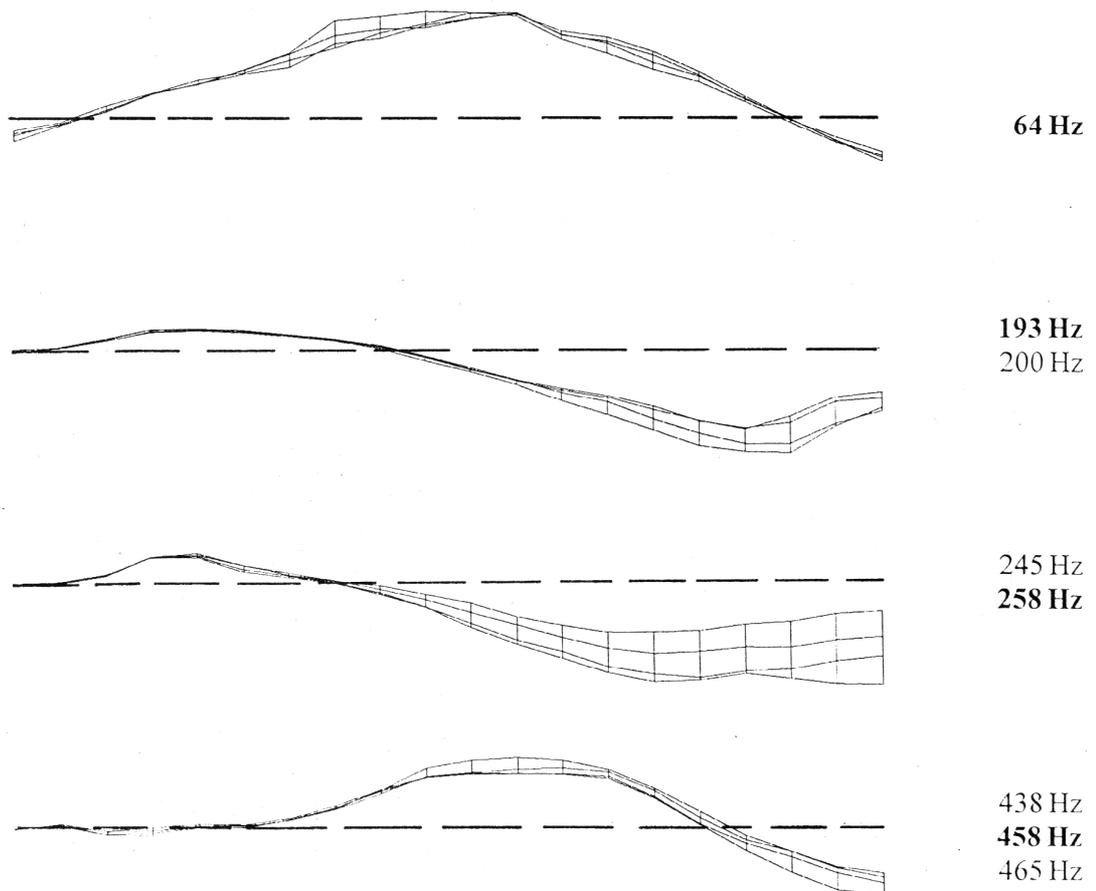


Fig. 28. Schwingungen der Gitarre Nr. 3 (Fender StratocasterSRV) zwischen Steg und Sattel.

4.4. Messungen am Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)

Fig. 29 zeigt die weiße Gitarre Fender Stratocaster, wie sie der Autor für die Messung hält. Am Gesichtsausdruck der Person ist unzweideutig zu erkennen, dass die Messung bereits übermäßig lang andauert, obwohl nur an $4 \cdot 20$ Punkten gemessen wurde. Die Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß, die man durch Mittelung über diese 80 Messpunkte erhält, kann Fig. 30 entnommen werden. Ähnlich wie bei der Stratocaster-Gitarre Nr. 3 liegt die gemittelte Transfer-Admittanz zwischen $0,7 \text{ mm/s pro N}$ (entsprechend -63 dB) und 7 mm/s pro N (entsprechend -43 dB). In Hinsicht auf die Spitzenwerte zeigen sich beide Stratocaster-Exemplare gleichermaßen als etwas weniger "schwingfreudig".

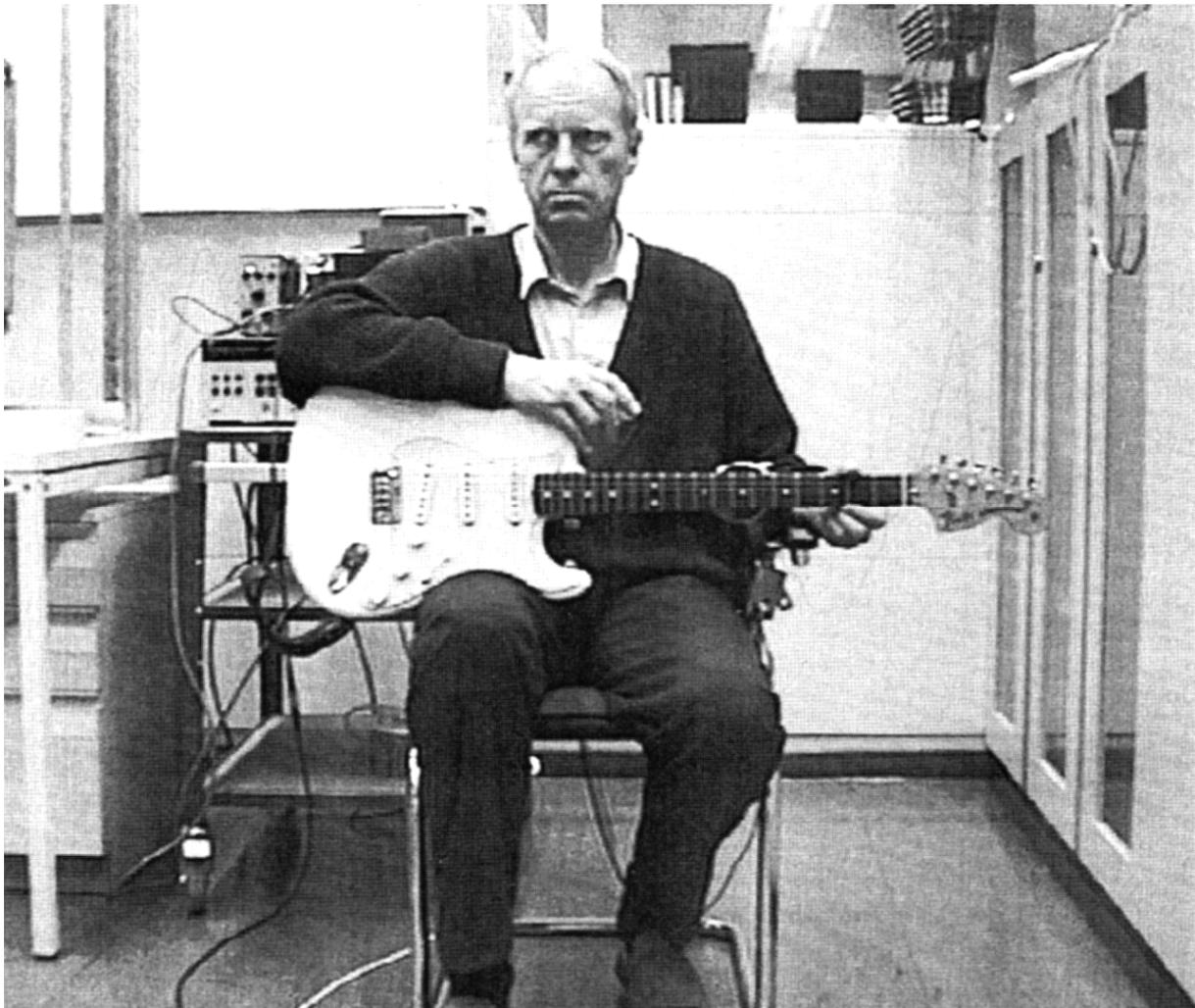


Fig. 29. Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) während der Schwingungsmessung.

Fig. 30 lässt drei hohe und ein weniger ausgeprägtes Hauptmaximum erkennen. Das erste liegt bei 58 Hz . Ein weiteres Hauptmaximum tritt bei 190 Hz mit einem untergeordneten Nebenmaximum bei 200 Hz auf. Etwas weniger prägt sich das Maximum bei 235 Hz aus, an das sich ein klares weiteres Hauptmaximum bei 432 Hz anschließt.

Die zugehörigen Schwingungsformen finden sich in Fig. 31. Sie stimmen weitestgehend mit denjenigen des Instruments Nr. 3 überein, die in Fig. 28 zusammengestellt sind und deren

Frequenzen zum Vergleich in Klammern beigefügt sind. Bei 58 Hz (Nr. 3: 64 Hz) erkennt man zwei Knoten in der Nähe der Enden der leeren Saiten. Die nächsten beiden Eigenformen weisen neben dem Knoten am Steg einen etwa in der Mitte auf. Derselben Grundform der Biegeschwingung ist in unterschiedlichem Maße Torsion superponiert. Bei 190 bzw. 200 Hz (Nr. 3: 193 bzw. 200 Hz) prägt sich der Einfluss der Torsion nicht sehr stark aus. Bei 235 Hz (Nr. 3: 245 bzw. 258 Hz) ist ihr Einfluss der dagegen so groß, dass die Gesamtschwingung erkennbar von einer Verdrehung des Halses geprägt ist. Für die vierte Schwingung bei 432 Hz (Nr. 3: 438, 458 bzw. 465 Hz) spielt Torsion dagegen keine große Rolle. Es tritt praktisch reine Biegung mit einem weiteren Knoten nahe dem 3. Bund auf.

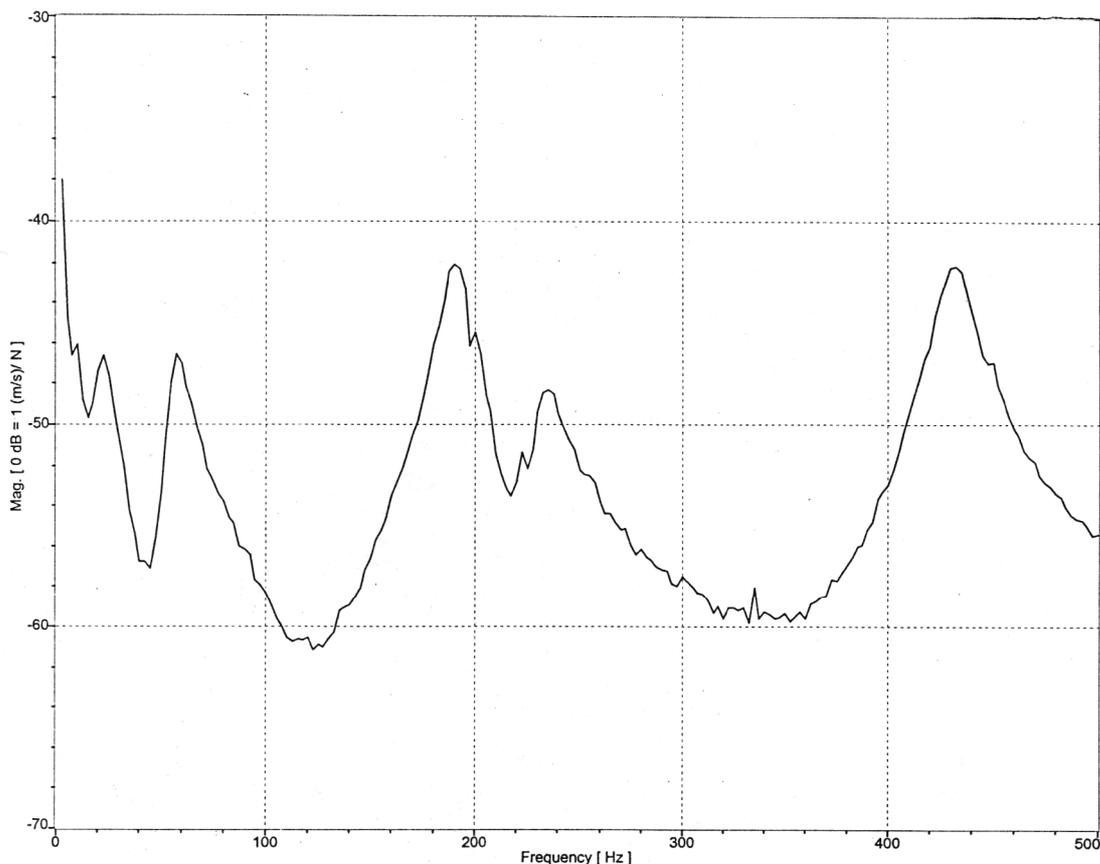


Fig. 30. Fender Stratocaster Nr. 4: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß $re 1 m/(Ns)$.

Die Instrumente Nr. 3 und 4 stammen beide vom selben Hersteller und sind von gleichem Typ. Der Vergleich macht die Ähnlichkeit in Hinsicht auf die Frequenzen und Schwingungsformen deutlich. Die erste und dritte Grundform sind von reiner Biegung geprägt. Der zweiten Biege-Grundform überlagert sich zusätzliche Torsion so, dass bei beiden Gitarren weitgehend identische Schwingungsmuster entstehen. Die Maxima der Gesamt-Übertragungsfunktion stimmen hinsichtlich ihrer Frequenzlage weitgehend überein. Jedoch ist den Fig. 28 bzw. 31 zu entnehmen, dass die Frequenzen, bei denen die Gesamt-Übertragungsfunktion maximal wird, für die Gitarre Nr. 3 zwischen 6 Hz und 26 Hz über diejenigen für die Gitarre Nr. 4 liegen. Offenbar ist demnach die Gitarre Nr. 3 um etwa 5 bis 10% höher abgestimmt als das Instrument Nr. 4.

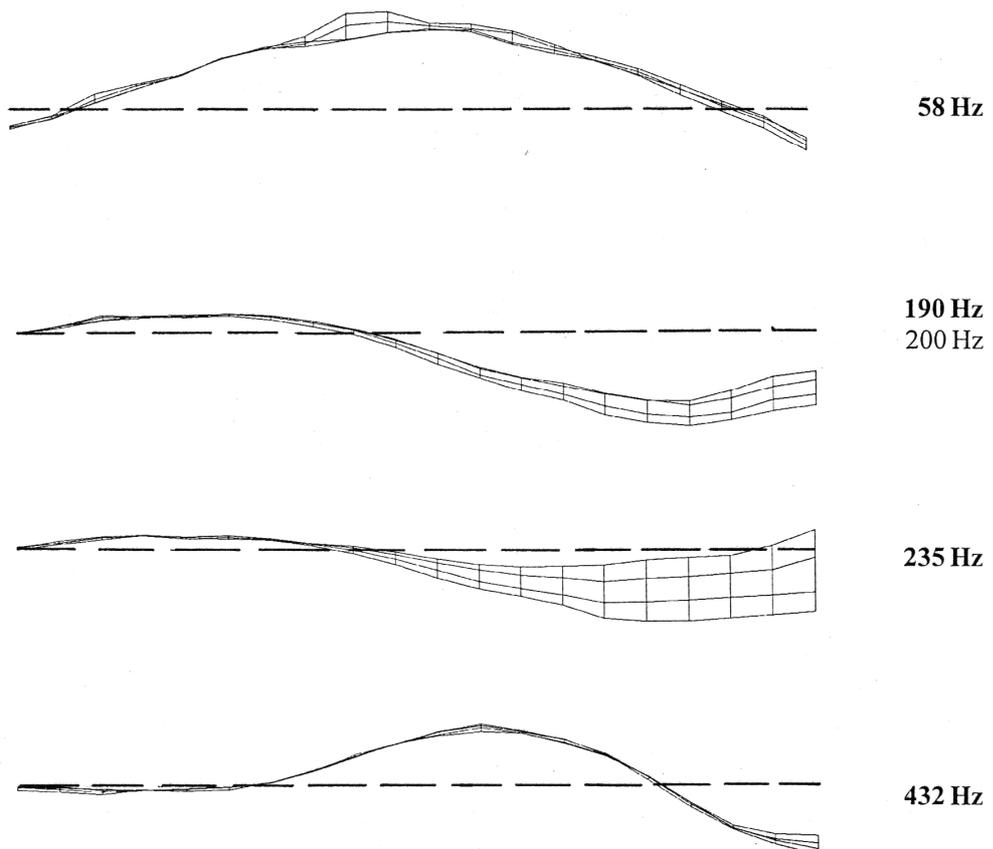


Fig. 31. Schwingungen der Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) zwischen Steg und Sattel.

4.5. Messungen am Instrument Nr. 5 (Squier Bullet)

Die folgenden Ergebnisse beruhen auf einer Neuauswertung von Daten, die bereits in Abschnitt 3.3 besprochen worden sind. Wie die Gitarre Squier Bullet vom Autor für die Messung am Körper gehalten wurde, war aus Fig. 12 zu ersehen. Aus den ursprünglich 306 Messpunkten wurden mittels der Funktion "invalidate" der Vibrometer-Software für die Darstellung diejenigen ausgeschaltet, die außerhalb des interessierenden Gebietes liegen. Die Schwingungen an den 94 Punkten, die im Bereich zwischen Steg und Sattel verbleiben, wurden visualisiert. Eine Gesamt-Übertragungsfunktion für diese eingeschränkte Anzahl von Messpunkten darzustellen und auszuwerten, ist nicht möglich. So zeigt Fig. 32 die mittlere Transfer-Admittanz für Messpunkte auf der gesamten Gitarre. Da der wenig bewegliche Korpus mit in die Mittelung eingeht, ergeben sich erwartungsgemäß kleinere Werte als bei den übrigen in diesem Kapitel behandelten Instrumenten. Fig. 32 sind Mittelwerte zwischen etwa 0,6 mm/s pro N (entsprechend -64 dB) und 6 mm/s pro N (entsprechend -44 dB) zu entnehmen.

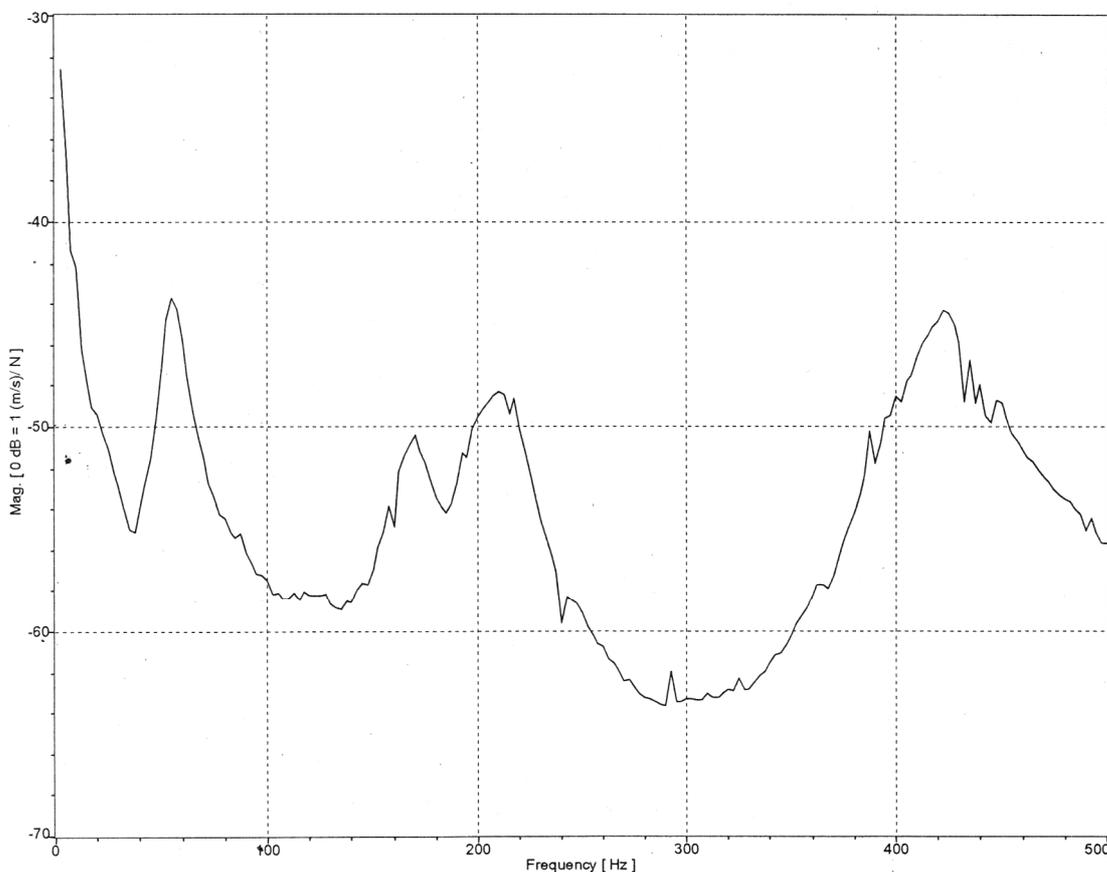


Fig. 32. Squier Bullet Nr. 5: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns).

In Fig. 32 sind vier Hauptmaxima zu erkennen. Wie bereits in Abschnitt 3.3 ausgeführt wurde, liegen diese bei 55 Hz, 158 bzw. 170 Hz, 193, 210 bzw. 218 Hz sowie 423 Hz mit Nebenmaxima bei 435, 440 und 448 Hz. Die zugehörigen Betriebsschwingungsformen sind in Fig. 33 zusammengestellt.

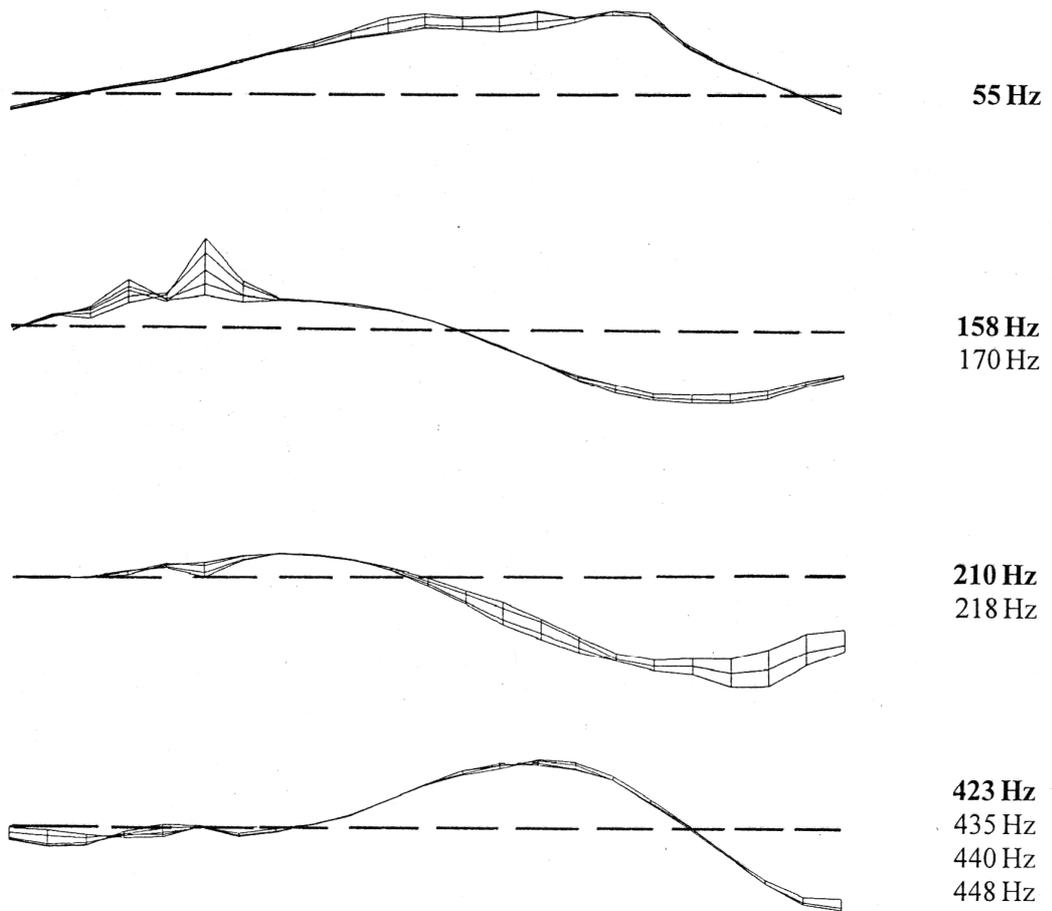
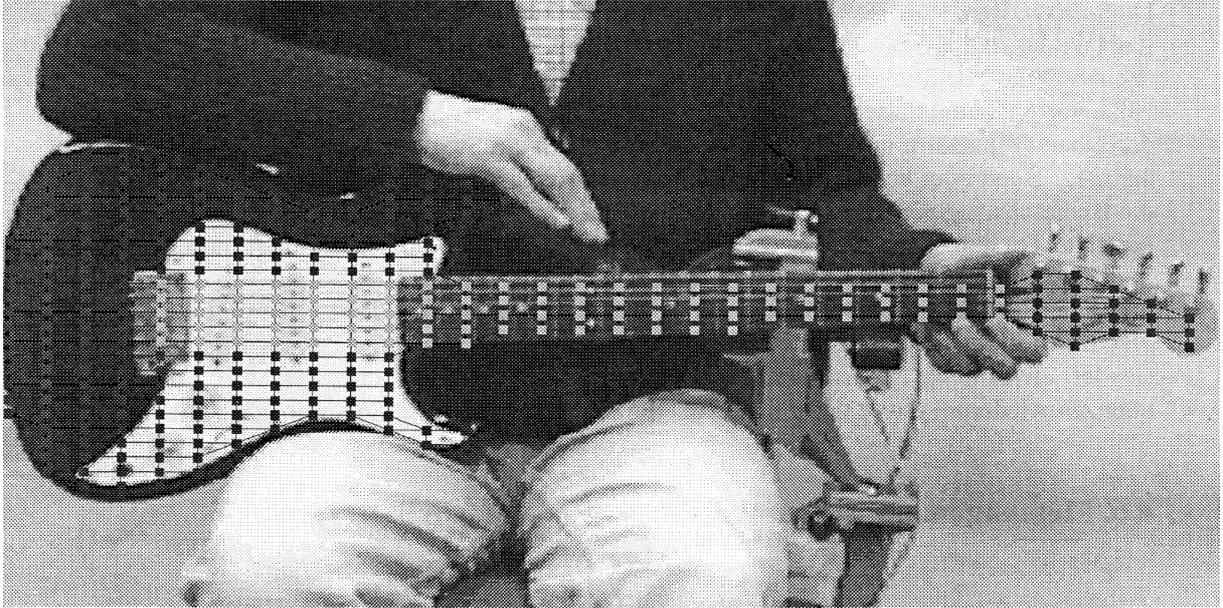


Fig. 33. Schwingungen der Gitarre Nr. 5 (Squier Bullet) zwischen Steg und Sattel.

Die verwandte Bauart sowie die gemeinsame Herkunft werden beim Vergleich der Schwingungsbilder in Fig. 28 (Fender Stratocaster SRV), Fig. 31 (Stratocaster, weiß) und Fig. 33 (Squier Bullet) deutlich. In Fig. 33 sind bei 55 Hz im untersuchten Bereich zwei Knoten in der Nähe von Steg und Sattel zu erkennen. Die beiden nächsten Eigenformen basieren auf ein und derselben Grundform und zeigen neben dem Knoten am Steg einen weiteren in der Mitte, der beim 12. Bund oder etwas darüber liegt. Bei der ersten Variante (158 bzw. 170 Hz) überwiegt die Biegeschwingung. Dieser überlagert sich bei der zweiten Variante (210 bzw. 218 Hz) ausgeprägte Torsion. Die vierte Schwingung weist drei Knoten auf. Einer liegt in der Nähe des Steges, einer links von der Mitte und einer nahe beim 3. Bund. Hier dominiert wiederum Biegung; der Sattel und insbesondere der 9. Bund schwingen mit großer Amplitude. Ein Vergleich der Frequenzen entsprechender Schwingungsformen zeigt, dass das Instrument Nr. 5 (Bullet) etwas tiefer abgestimmt ist als das Instrument Nr. 4 (Stratocaster, weiß), dessen Frequenzen wiederum etwas tiefer liegen als die des Instruments Nr. 3 (Stratocaster SRV).

4.6. Messungen am Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury)



Fig. 34. Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury) während der Schwingungsmessung.

Fig. 34 zeigt die Gitarre Traveling Wilbury, die der Autor für die Messung hält. Wie bei den Instrumenten Nr. 1 bis 4 wurde nur im Bereich zwischen den Auflagern der leeren Saiten gemessen. Die Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß, die man durch Mittelung über die

80 Messpunkte erhält, ist aus Fig. 35 ersichtlich. Die gemittelte Transfer-Admittanz liegt zwischen 0,8 mm/s pro N (entsprechend -62 dB) und nahezu 10 mm/s pro N (entsprechend -40 dB). Als besonders "schwingfreudig" erweist sich die betrachtete Gitarre bei etwa 200 Hz.

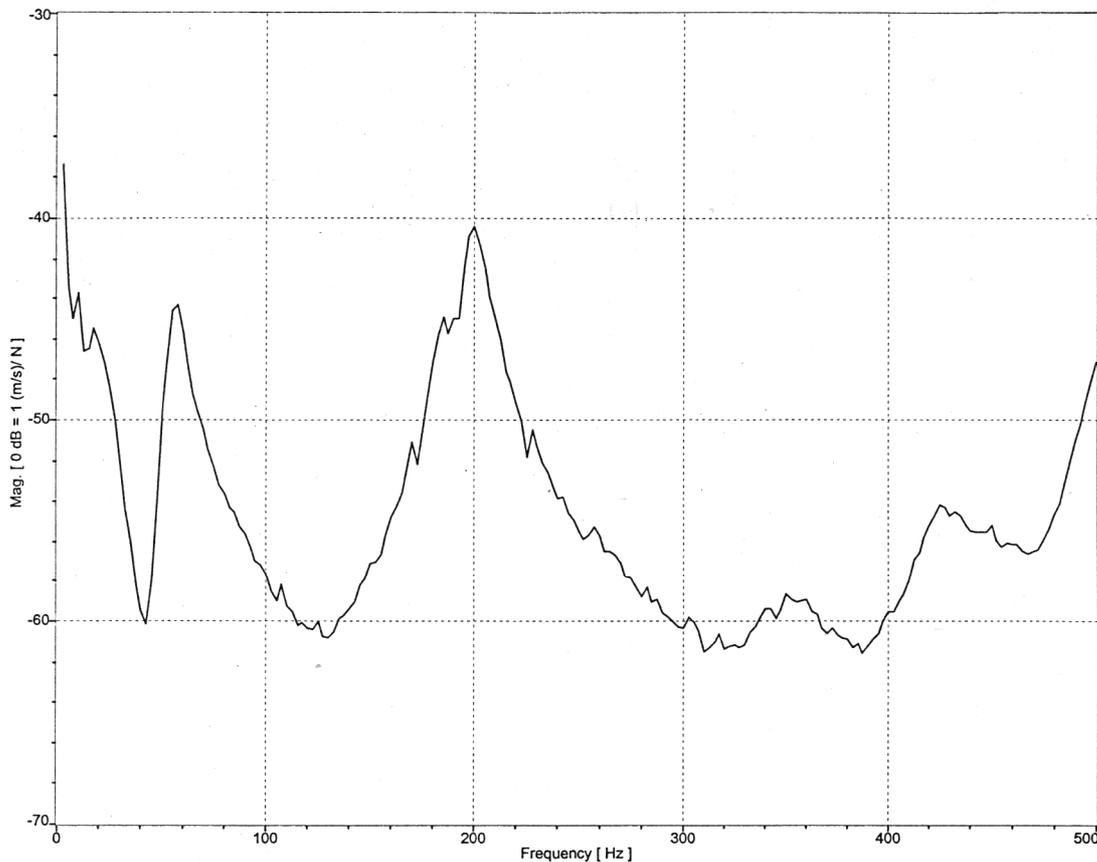


Fig. 35. *Traveling Wilbury Nr. 6: Gesamt-Übertragungsfunktion im Pegelmaß re 1 m/(Ns).*

Fig. 35 lässt zwei hohe, zwei weniger ausgeprägte Hauptmaxima sowie bei hohen Frequenzen den Anstieg zu einem weiteren Maximum erkennen. Die erste Spitze erste liegt bei 58 Hz. Das prominenteste Hauptmaximum tritt bei 200 Hz auf. Deutlich geringer prägen sich die Maxima bei 360 Hz und 425 Hz aus. Der Anstieg zum oberen Ende des untersuchten Frequenzbereichs hin lässt auf ein weiteres Maximum oberhalb von 500 Hz schließen.

Fig. 36 zeigt die zugehörigen Betriebsschwingungsformen. Bei 58 Hz liegen zwei Knoten in der Nähe der Endpunkte der leeren Saiten. Die nächste Eigenform bei 185, 200 bzw. 228 Hz weist neben dem Knoten am Steg einen etwas links von der Mitte auf. Das Schwingungsmuster bei den Frequenzen 350 bzw. 360 Hz prägt sich nur schwach aus. Ein Knoten ist links vom Steg zu vermuten; innerhalb des betrachteten Bereichs liegt ein Knoten am korpusseitigen Ende des Griffbretts sowie ein weiterer in der Nähe des 6. Bundes. In der Animation zeigt diese Schwingung nicht nur die erwartete stehende Welle, sondern auch Anteile einer Wanderwelle. Es ist nicht auszuschließen, dass es sich dabei um eine Mischform mit Anteilen der zweiten und vierten Schwingung handelt. Letztere tritt bei 425 Hz auf, ist ebenfalls nur schwach ausgeprägt und durch drei Knoten innerhalb des betrachteten Bereichs gekennzeichnet. Es deutet sich noch eine fünfte Schwingung an, deren Maximum oberhalb von 500 Hz

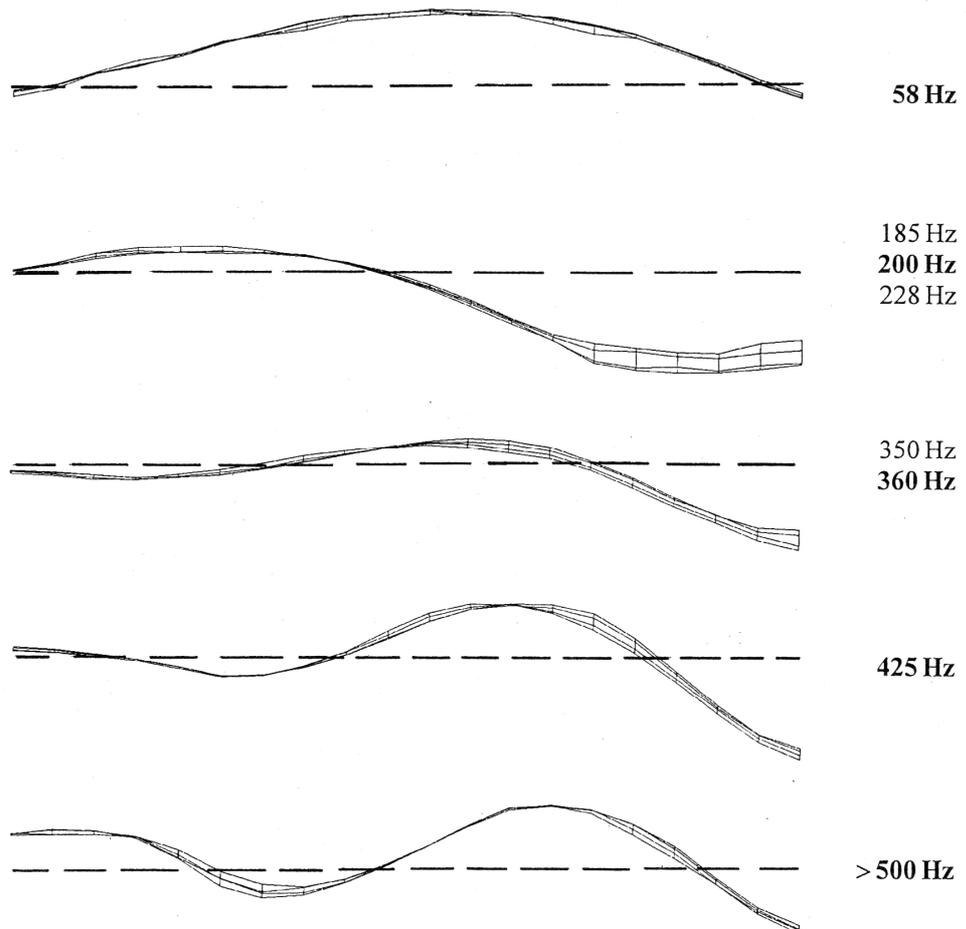
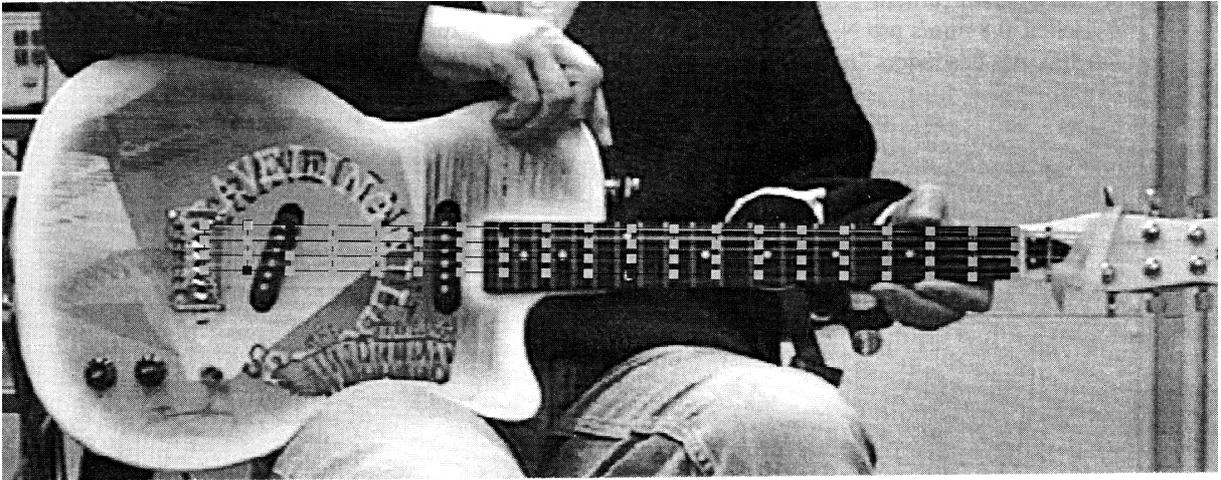


Fig. 36. Schwingungen der Gitarre Nr. 6 (TravelingWilbury) zwischen Steg und Sattel.

auftritt. Legt man den gelenkig-freien Biegebalken als Ersatz-Modell zugrunde, so wäre nach Tab. II für die vierte Hauptschwingung ($j = 4$) die Frequenz $58 \text{ Hz} \cdot 11,56 = 670 \text{ Hz}$ zu erwarten. Drei Knoten im untersuchten Bereich charakterisieren diese Schwingungsform, an der besonders auffällt, dass sich der Steg nicht in Ruhe befindet, sondern vielmehr mit beträchtlicher Amplitude schwingt. Daraus folgt, dass Saiten, die mit Frequenzen bei und etwas oberhalb von 500 Hz schwingen, am Steg kein unbewegliches, sondern ein im Gegenteil sehr "schwingfreudiges" Auflager vorfinden werden.

Bei all den Schwingungen, die in Fig. 36 abgebildet sind, tritt praktisch reine Biegung auf; Torsion spielt so gut wie keine Rolle. Daraus kann geschlossen werden, dass der symmetrische Aufbau des Halses - wie auch beim Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul) - die Neigung zu zusätzlichen Torsionsschwingungen weitgehend reduziert.

4.7. Gemeinsamkeiten und Unterschiede

4.7.1. Typisierung der untersuchten Instrumente

Um den Bezug der Schwingungen zur Bauform der Gitarre herzustellen, erscheint es zweckmäßig, die Instrumente zu Gruppen zusammenzufassen. Die untersuchten solid-body-Gitarren lassen sich wie folgt einteilen:

- Gruppe A: Gitarren mit symmetrischem Wirbelbrett (Instrumente Nr. 1 und 6);
- Gruppe B: Gitarren mit asymmetrischem Wirbelbrett (Instrumente Nr. 3 bis 5) und
- Gruppe C: Gitarren mit stark asymmetrischem Wirbelbrett (Instrument Nr. 2).

Im Laufe der Vibrometer-Untersuchungen hat sich gezeigt, dass neben Biegeschwingungen des Halses auch Torsionsschwingungen auftreten können. Es war zu beobachten, dass Instrumente umso mehr zu Torsionsschwingungen neigen, je weniger symmetrisch das Wirbelbrett (auch als Kopf bezeichnet) ausgeführt ist. Offenbar überlagert sich die Torsion der Biegung mit der Folge, dass die Hauptschwingungen aufgespaltet werden können. Bei den mäßig asymmetrischen Instrumenten der Gruppe B, welche die Stratocaster-Modelle und ihren Abkömmling, die Squier-Gitarre, umfasst, war solch eine Aufspaltung in zwei Varianten bei der zweiten Hauptschwingung zu beobachten. Die extrem asymmetrische Explorer-Gitarre zeigt diese Erscheinung auch bei der dritten Hauptschwingung.

4.7.2. Vergleich mit theoretischen Ergebnissen

Die Schwingungen des Bereiches der Gitarre, der sich zwischen Steg und Sattel befindet, zeigen bei allen Instrumenten dieser Studie deutliche Gemeinsamkeiten. Die Untersuchungen haben ergeben, dass im untersuchten Frequenzbereich bis 500 Hz drei Hauptschwingungen auftreten, die im Wesentlichen durch Biegung gekennzeichnet sind. Diese Grundtypen sind in Fig. 37 am Beispiel der Gitarre Nr. 1 (Gibson Les Paul; vgl. Fig. 22) illustriert. In Anlehnung an die Theorie des Balkens werden sie durch die Ordnungszahl j des Eigenwertes der Biegeschwingung gekennzeichnet.

Die Interpretation wird erleichtert, wenn die ersten drei Eigenformen des gelenkig-frei gelagerten Balkens zugrunde gelegt werden. Fig. 38 zeigt die von Fig. 17 her bekannten Schwingungsmuster. Das linke Ende entspricht dem Steg, das rechte der Spitze des Wirbelbretts. Lässt man versuchsweise den Teil jenseits des rechten Knotens der ersten Eigenform außer Betracht, da er das Wirbelbrett repräsentiert und deshalb außerhalb des untersuchten

Bereiches liegt, wird die Verwandtschaft zwischen den Schwingungsbildern der Fig. 38 und 37 deutlich. Die erste Hauptform ($j = 1$) hat je einen Knoten am linken und rechten Ende, das nun dem Sattel entspricht. Die zweite Hauptform ($j = 2$) weist neben dem Knoten am linken Ende einen weiteren auf, der etwa in der Mitte liegt; am rechten Ende treten große Amplituden auf. Die dritte Hauptform ($j = 3$) ist durch drei Knoten gekennzeichnet; auch hier sind am rechten Ende relativ große Amplituden zu beobachten. Der Vergleich von Fig. 37 mit Fig. 38 zeigt aber auch Abweichungen. So prägt sich erwartungsgemäß bei der Gitarre der linke (auf dem massiven Korpus liegende) Schwingungsbau wesentlich weniger aus, als dies bei einem homogenen Balken zu erwarten wäre. Wesentliche Merkmale - wie die Anzahl und ungefähre Lage der Schwingungsknoten - lassen sich mit Hilfe der einfachen Modellvorstellung jedoch gut beschreiben.

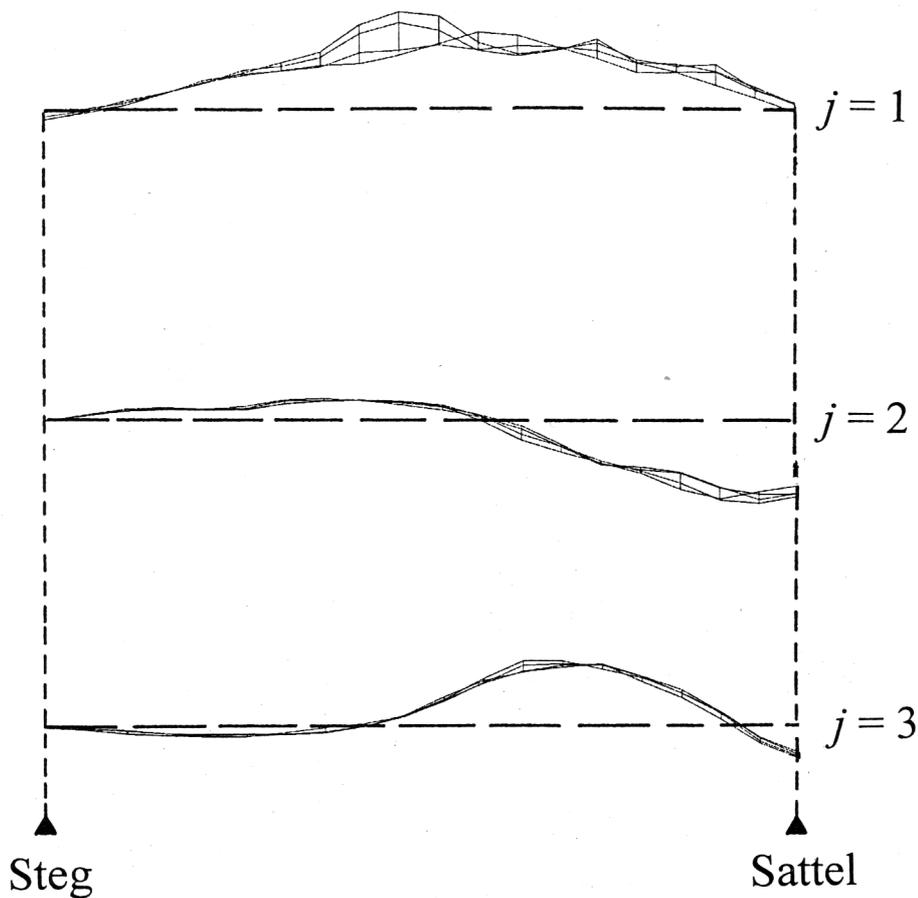


Fig. 37. Die ersten drei Hauptschwingungsformen der Gitarre Nr. 1 zwischen Steg und Sattel.

Überlagerte Torsionsschwingungen, die bei asymmetrischen Instrumenten beobachtet wurden, ändern nichts an der Feststellung, dass Biegeschwingungen des Gitarrenkörpers die wesentliche Schwingungsart darstellen. Die drei in den Fig. 37 und 38 zusammengestellten Grundtypen von Biegeschwingungen konnten im Frequenzbereich bis 500 Hz im Grundsatz bei sämtlichen untersuchten Instrumenten nachgewiesen werden. Die Vermutung ist begründet, dass sich bei höheren Frequenzen die Reihe in ähnlicher Weise fortsetzen wird, wie das Balken-Modell dies erwarten lässt.

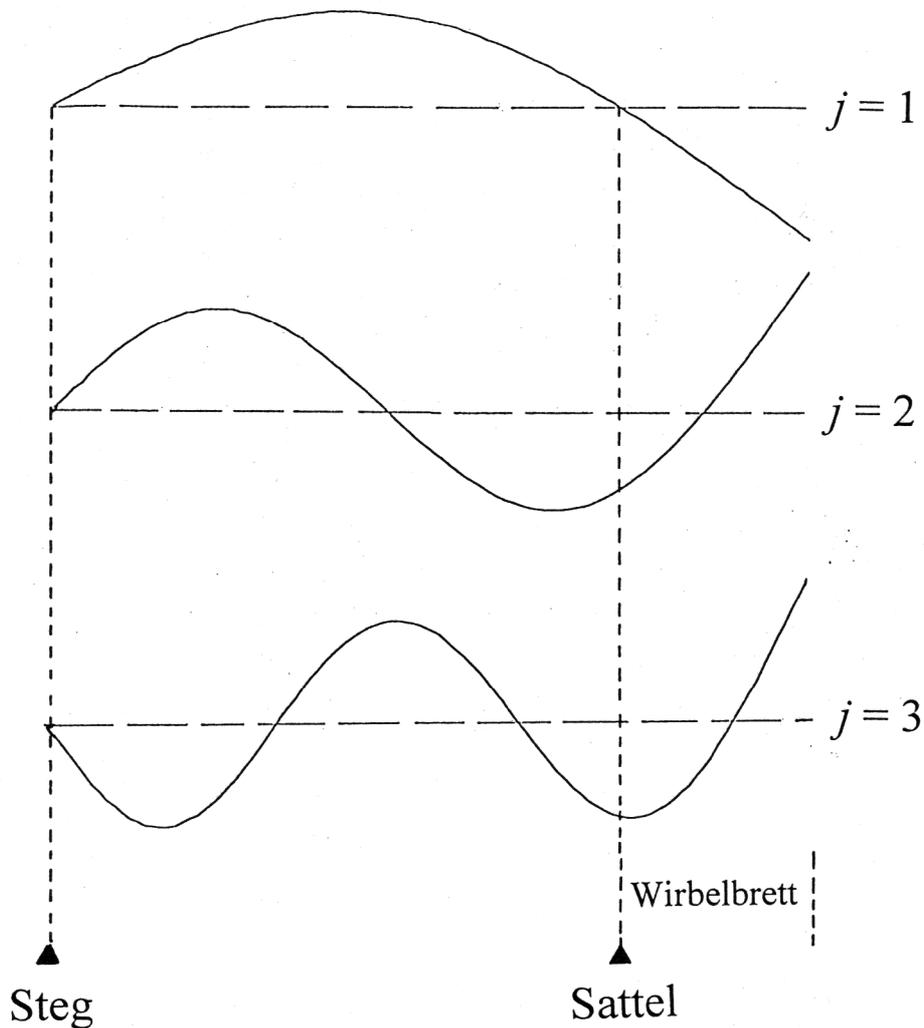


Fig. 38. Die ersten drei Eigenformen des gelenkig-freien Balkens; die zugeordneten Orte auf dem Instrumentenkörper sind angegeben.

4.7.3. Strukturierung der experimentellen Ergebnisse

Die Resultate der Schwingungsmessungen lassen sich anhand der Biegeschwingungen des Balkens grob wie folgt strukturieren:

Erste Hauptschwingung ($j = 1$): Tritt bei sämtlichen Gitarren in weitgehend identischer Gestalt bei Frequenzen von 58 Hz ... 64 Hz auf. Da sie unterhalb des tiefsten Gitarrentones ($E_2 \cong 82,5$ Hz) liegt, hat sie keine unmittelbare Bedeutung für deren Funktion.

Zweite Hauptschwingung ($j = 2$): Tritt bei den weitgehend symmetrisch geformten Instrumenten Nr. 1 und 6 (Gruppe A) bei Frequenzen zwischen 200 Hz ... 208 Hz "in Reinkultur" auf.

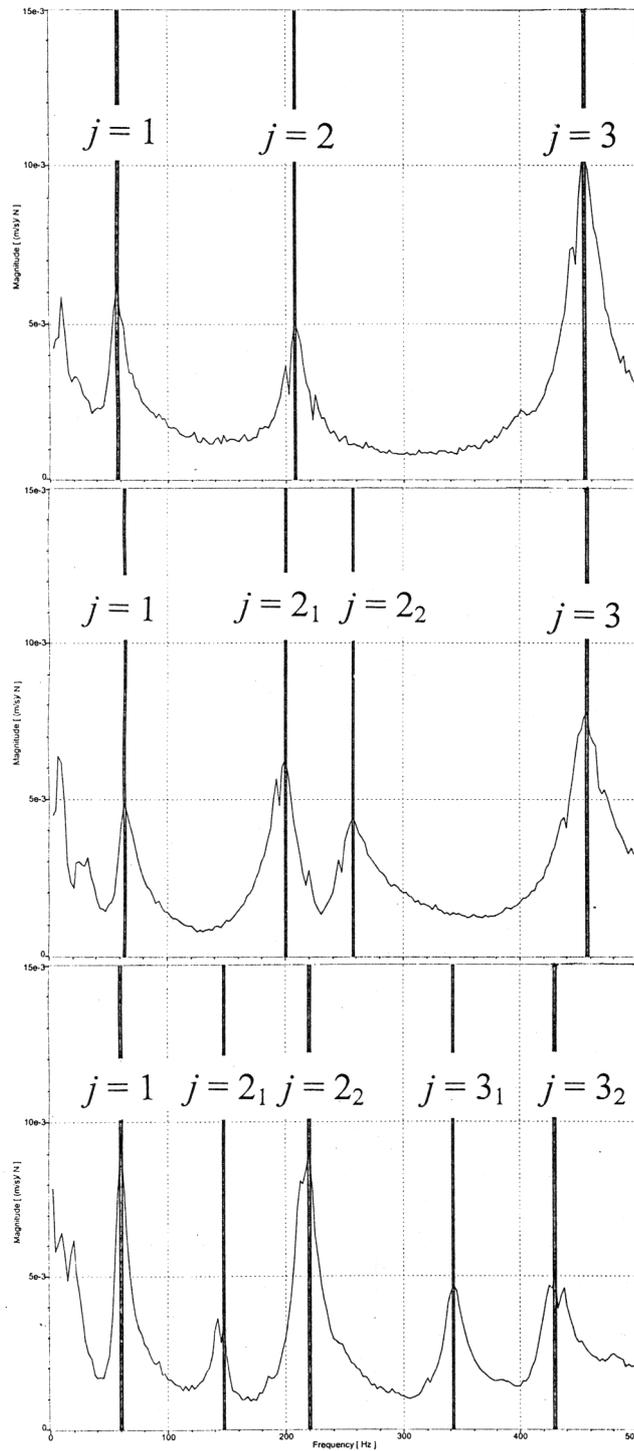


Fig. 39. Gesamt-Übertragungsfunktion für ein repräsentatives Instrument
 oben: der Gruppe A (Nr. 1; Gibson Les Paul),
 Mitte: der Gruppe B (Nr. 3; Fender Stratocaster SRV) und
 unten: der Gruppe C (Nr. 2; Gibson Explorer).
 Die Ziffern bezeichnen die zugehörigen Schwingungsformen.

Bei sämtlichen asymmetrischen Instrumenten Nr. **2** bis **5** (Gruppen B und C) ist eine Aufspaltung der Biegeschwingung, abhängig von der relativen Stärke und der Phasenlage der überlagerten Torsion, in zwei Varianten zu beobachten. Deren Frequenzen sind 142 Hz ... 200 Hz für die erste ($j = 2_1$) und 218 Hz ... 258 Hz für die zweite Variante ($j = 2_2$).

Dritte Hauptschwingung ($j = 3$): Prägt sich bei Instrumenten der Gruppen A und B (Nr. **1** und **3** bis **6**) bei 423 Hz ... 458 Hz aus.

Lediglich beim extrem asymmetrischen Instrument der Gruppe C (Nr. **2**) spaltet sich die Biegegrundform infolge überlagerter Torsion in zwei Varianten ($j = 3_1$ bzw. 3_2) bei 343 Hz bzw. 430 Hz auf.

Für einen Repräsentanten einer jeden Gruppe von E-Gitarren ist die Gesamt-Übertragungsfunktion in Fig. 39 dargestellt. Die Ordinate ist linear von 0 bis 15 mm/s pro N geteilt. Die dunklen Bänder markieren die Maxima, bei denen die angegebenen Schwingungsformen visualisiert wurden. Im oberen Diagramm prägen sich innerhalb des untersuchten Frequenzbereiches drei deutliche Maxima aus, die den angegebenen Hauptschwingungen entsprechen. Dieser einfache Fall ist bei weitgehend symmetrischen Gitarren wie Nr. **1** und **6** zu erwarten. Das mittlere Diagramm bezieht sich auf Gitarren vom Stratocaster-Typ (Nr. **3** bis **5**) mit asymmetrischem Wirbelbrett. Zwei Hauptschwingungen ($j = 1$ und 3) treten "sortenrein" auf, während die zweite Hauptschwingung sich infolge zusätzlicher Torsion in ihre Varianten aufspaltet. Das untere Diagramm gilt für die Gitarre Explorer. Für dieses extrem asymmetrische Instrument, das als einziges in die Gruppe C eingeordnet ist, zerfallen sowohl die zweite als auch die dritte Hauptschwingung in ihre Varianten, so dass in der Übertragungsfunktion innerhalb des Bereiches bis 500 Hz insgesamt fünf Hauptmaxima auszumachen sind.

4.8. Zusammenfassende Bemerkung

Im vorliegenden Kapitel wurden die Schwingungen gezielt nur in demjenigen Teil der E-Gitarre untersucht, der für Saiten von unmittelbarem Interesse sein kann. Es ist dies der Bereich zwischen den Auflagern der Saiten. Während eine Person die Gitarre in sitzender Spielhaltung festhielt, wurde der Hals am 7. Bund zum Schwingen angeregt. Zwangsläufig ist damit eine Einschränkung verbunden: Sollten Schwingungsformen an genau dieser Stelle einen Knoten aufweisen, so werden sie nicht angeregt und können demzufolge auf diese Weise nicht nachgewiesen werden. Mit dem Vibrometer wurde an üblicherweise vier Reihen von je 20 Punkten die Schwingungsgeschwindigkeit gemessen. Wie auch bei den Untersuchungen des vorherigen Kapitels wurde für diese Messungen, die eher von grundsätzlicher als von vollständiger Art sein sollen, der Frequenzbereich auf 0 bis 500 Hz begrenzt. In diesem Bereich wurden für die diejenigen Frequenzen, bei welchen die gemittelte Transfer-Admittanz Maxima aufweist, die Betriebsschwingungsformen (ODS; Richardson 1997) visualisiert, geordnet und für jedes Instrument gesondert zusammengestellt.

Unterhalb des tiefsten Gitarrentones (83 Hz) tritt eine Biegeschwingung auf, der hinsichtlich der Tonerzeugung keine unmittelbare Bedeutung zuzumessen ist. Oberhalb wurden zwei charakteristische Biegeschwingungsformen nachgewiesen, die bei weitgehend symmetrisch aufgebauten Gitarren Frequenzen von etwa 200 Hz bzw. 450 Hz haben. Erstere spaltet sich bei Gitarren mit asymmetrischem Wirbelbrett infolge zusätzlicher Torsionsschwingungen in zwei Varianten auf, deren Frequenzen um bis zu 50 Hz größer bzw. kleiner als die der "sortenreinen" Hauptschwingung sein können. Eine Aufspaltung der zweiten dieser Biegeschwin-

gungsformen wurde nur bei einer extrem asymmetrischen Gitarre beobachtet. Grob vereinfacht ist die Tendenz, die aus den Schwingungsmessungen zu ersehen ist, dass Biegung zwangsläufig immer auftritt. Im günstigen Fall hat es damit sein Bewenden; vgl. die Gitarre Nr. 1 (Les Paul), die im Bereich zwischen 83 und 500 Hz in zwei Frequenzbändern zum Mitschwingen gebracht werden kann. Im weniger günstigen Fall kann Torsion hinzukommen. Der Hals kann daher in einer größeren Zahl von Frequenzbändern mitschwingen; im extremen Fall der Gitarre Nr. 2 (Explorer) sind es insgesamt deren vier.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es offenbar möglich ist, das Instrument so auszubalancieren und den Steg so zu positionieren, dass das untere (Steg-)Ende der Saiten praktisch unbeweglich bleibt. Der Hals erweist sich jedoch als mehr oder weniger "schwingfreudig", so dass es ist nicht zu vermeiden ist, dass die Saiten an ihrem oberen (Hals-)Ende unter bestimmten Bedingungen ein bewegliches Auflager vorfinden.

5. MESSUNG DER MECHANISCHEN ADMITTANZ

In Fortführung der Überlegungen des vorherigen Kapitels wird im Folgenden beleuchtet, wie sich das Instrument an den beiden Auflagern der Saiten verhält. Am korpusseitigen Ende liegt die Saite stets am Steg auf. Wird die Saite leer gespielt, befindet sich das andere Ende am Sattel. Wird sie gegriffen, so definiert das nächsthöhere Bundstäbchen das halsseitige Auflager. An diesen Orten - Steg, Sattel und Bünden - wurde die mechanische Admittanz gemessen.

5.1. Komplexe Punktadmittanz

5.1.1. Experimentelle Bestimmung

Die komplexe Punktadmittanz

$$\underline{Y} = G + iB \quad (8)$$

ist definiert als

$$\underline{Y} = \underline{v}/\underline{F} \quad , \quad (9)$$

d.h. als das Verhältnis der komplexen Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) \underline{v} und der komplexen Kraft \underline{F} , gemessen am selben Punkt und in derselben Richtung. Experimentell wurde sie mit einem Aufbau bestimmt, der u.a. von Fleischer und Zwicker (1998 und 1999) sowie Fleischer (2000) ausführlich beschrieben worden ist. Kernstück war ein Impedanzmesskopf Brüel & Kjaer 8001, der einen Kraft- und einen Bewegungssensor enthält. Mittels einer elektrischen Massenkompensationseinheit Brüel & Kjaer 5565 wurde der Einfluss der Masse des Messkopfes, die zwischen Sensor und Messobjekt liegt, minimiert. Angetrieben wurde der Messkopf von einem kleinen Schwingerreger Brüel und Kjaer 4810, der über einen Leistungsverstärker mit einem Rauschsignal gespeist wurde. Der Versuchsleiter hielt das zu untersuchende Instrument in sitzender Spielhaltung auf dem Schoß. Der Schwingerreger samt Messkopf konnte variabel positioniert werden. Dies versetzte den Versuchsleiter in die Lage, das Instrument an demjenigen Punkt, dessen Admittanz gemessen werden sollte, in der gewünschten Richtung unter leichtem Druck in Kontakt mit dem Messkopf zu bringen. Aus dem Kraft- und dem Bewegungssignal wurde in einem Zweikanal-Analysator Ono Sokki CF 350 nach einer Fast Fourier Transformation (FFT) die komplexe Punkt-Admittanz berechnet. Für die in diesem Bericht zusammengestellten Ergebnisse wurden Frequenzen zwischen 75 Hz und 700 Hz betrachtet. Darin sind die Grundfrequenzen der Saitenschwingungen zwischen der leer gespielten (tiefen) E₂-Saite und der am 14. Bund gespielten (hohen) E₄-Saite eingeschlossen.

Fig. 40 zeigt exemplarisch ein Einzelergebnis. Am Sattel der weißen Stratocaster-Gitarre wurde die komplexe Admittanz senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett nahe dem Auflagepunkt der G₃-Saite gemessen. Im oberen Diagramm ist die "Schwingfreudigkeit" des Sattels am Messpunkt pauschal durch den Betrag der Admittanz gekennzeichnet. Man erkennt zwei ausgeprägte Hauptmaxima bei etwa 190 Hz und etwa 430 Hz, die mit der zweiten und dritten Hauptschwingung (vgl. Fig. 30 und 31) korrelieren. Die Admittanz erreicht dort 0,013 m/(Ns) bzw. 0,013 s/kg. Somit kann bei Anregung mit der Kraft 1 N für die genannten Frequenzen die Schwinggeschwindigkeit bis zu 13 mm/s erreichen. Der Realteil (mittleres Diagramm) lässt erkennen, wie groß der In-Phase-Anteil der Schwinggeschwindigkeit ist. Im Falle der Reso-

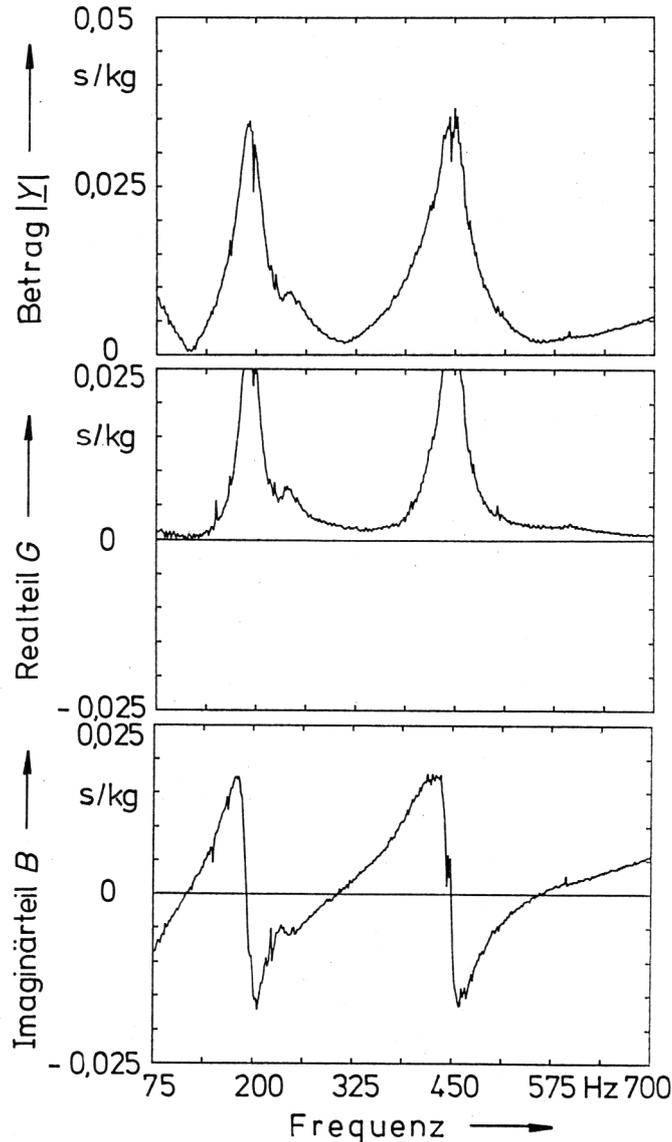


Fig. 40. Punktdmittanz am Sattel des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) als Funktion der Frequenz, gemessen am Auflagepunkt der G_3 -Saite; **die Zahlenwerte der Admittanz sind um den Faktor 3 zu groß angegeben!**
 Oben: Betrag $|Y|$; Mitte: Realteil G ; unten Imaginärteil B .

nanz wird die Admittanz maximal und ist rein reell. Der Realteil (Konduktanz G) ist dann gleich dem Kehrwert des Reibungswiderstandes, der hier etwa $r = 75 \text{ kg/s}$ beträgt. Während die Konduktanz naturgemäß stets positiv ist, kann die Suszeptanz B (unteres Diagramm) beide Vorzeichen annehmen. Hat der Imaginärteil ein positives Vorzeichen (positive Suszeptanz), dominieren am Messpunkt die Federeigenschaften. Bei negativer Suszeptanz verhält sich das Auflager am Messpunkt dagegen wie eine Masse. Eine Resonanz ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Feder- und Masseigenschaften gegenseitig kompensieren. Die Suszeptanz verschwindet ($B = 0$); die Admittanz ist dann rein reell und gleich der Konduktanz ($\underline{Y} = G$).

5.1.2. Reproduzierbarkeit und Einfluss der Saiten

Während der Messung ruhte das Instrument auf dem rechten Oberschenkel des Experimentators; bei allen hier beschriebenen Experimenten war dies der Autor. Dabei umfasste die linke

Hand den Hals nahe der Messstelle. Mit diesem Bild vor Augen könnte man vermuten, dass die "natürlichen" Randbedingungen, wie sie der Körper eines Spielers dem schwingenden Instrument bietet, soweit variieren, dass die Messung vorwiegend Zufallsergebnisse liefert.

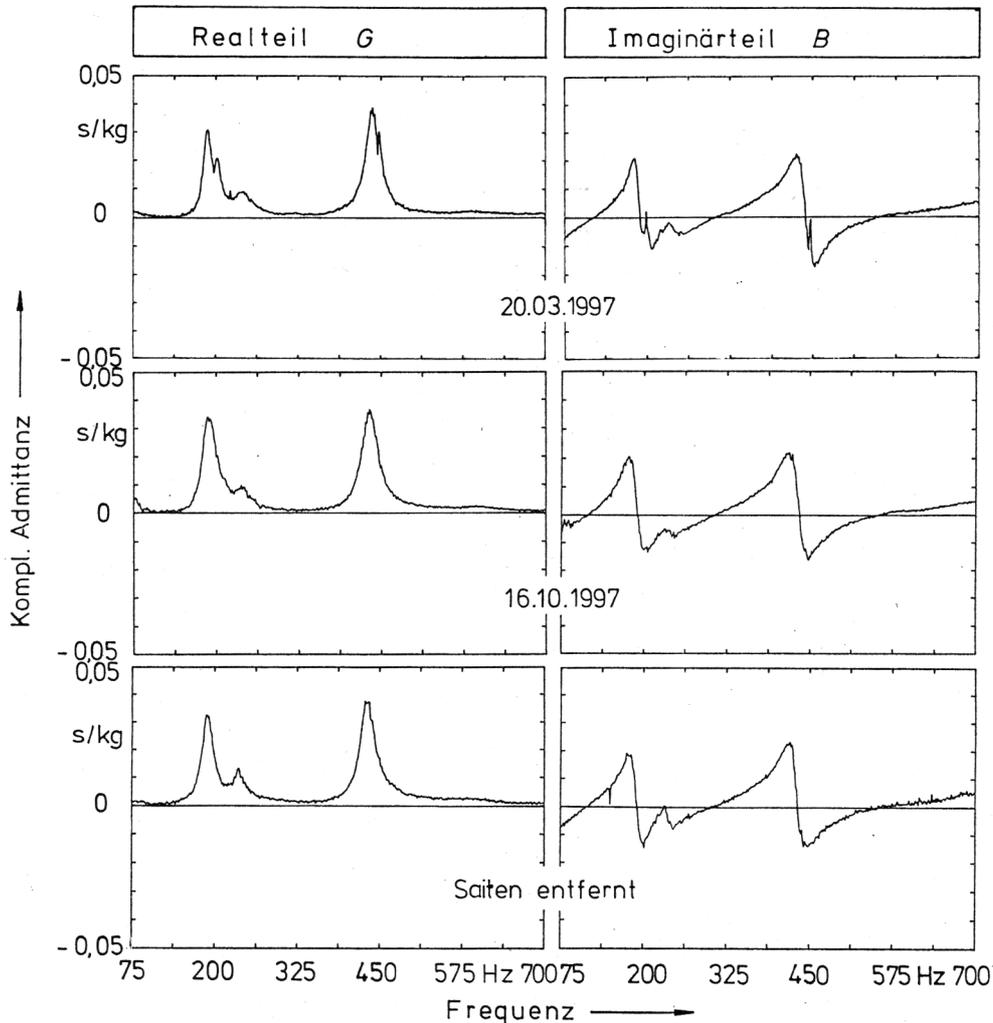


Fig. 41. Realteil G und Imaginärteil B der komplexen Punktadmittanz am Sattel des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), gemessen am Auflagepunkt der G_3 -Saite; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**
 Oben: mit Saiten, gemessen am 20.03.1997;
 Mitte: mit Saiten, gemessen am 16.10.1997;
 unten: ohne Saiten, gemessen am 16.10.1997.

Fig. 41 zeigt die Ergebnisse von drei verschiedenen Messungen an der weißen Stratocaster-Gitarre. Gemessen wurde jeweils am oberen Halsende senkrecht zum Griffbrett an der Stelle, an der die G_3 -Saite aufliegt. Die Diagramme in der Mitte und oben beziehen sich auf das Instrument mit aufgespannten Saiten in Standard-Stimmung. Wie bei allen Schwingungs- und Admittanz-Messungen war der Tonabnehmer-Ausgang nicht beschaltet. Zwischen den beiden Experimenten liegt mehr als ein halbes Jahr. Ein Vergleich zeigt, dass mit der beschriebenen Methode durchaus wiederholbare Messergebnisse zu erzielen sind.

Ergänzend ist im unteren Teil von Fig. 41 noch ein weiteres Ergebnis gezeigt. In diesem Fall waren vor der Messung die Saiten entfernt worden. Auch hier zeigt der Vergleich keine grundlegenden Unterschiede. Daraus kann geschlossen werden, dass die Saiten keinen so gro-

ßen Einfluss auf die Schwingungen des Instrumentenkörpers haben, dass daraus merkliche Auswirkungen auf die Ergebnisse der Admittanz-Messungen resultieren würden.

5.2. Admittanz an Steg und Sattel

5.2.1. Lateraler Verlauf am Steg

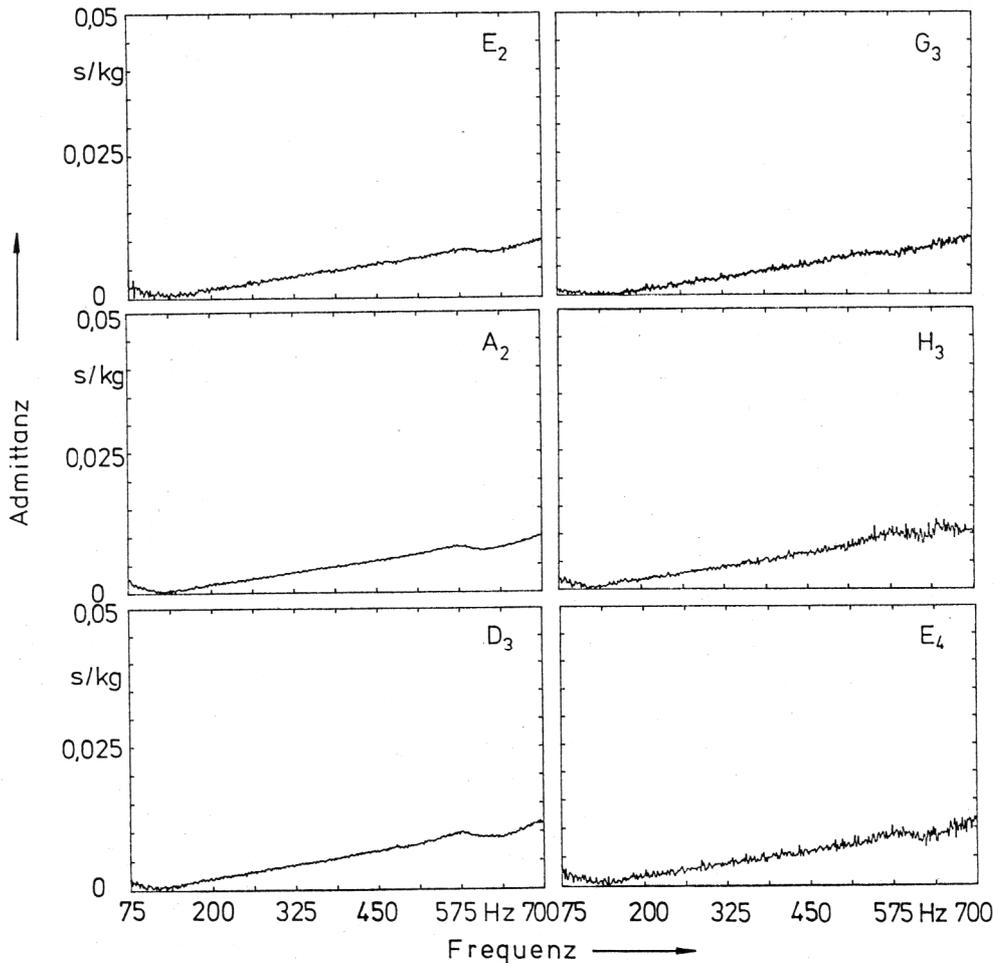


Fig. 42. Betrag der Punktadmittanz am Steg des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**

Als weiteres Problem wäre zu klären, inwieweit die Admittanz von der seitlichen (lateralen) Position des Messortes abhängig ist. Fig. 42 zeigt den Betrag der Admittanz am Steg der weißen Stratocaster-Gitarre. Dieser ist unter Verzicht auf eine Vibrato-Funktion fest mit dem Korpus verschraubt, jedoch sind die Auflager der Saiten individuell bezüglich Abstand, Länge und Höhe einstellbar. Unter "Steg" sind bei E-Gitarren somit in aller Regel sechs meist walzenförmige, unabhängig voneinander einstellbare Metallblöcke zu verstehen. Gemessen wurde senkrecht zur Oberfläche des Korpus an den Auflagepunkten der sechs Saiten. Es zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven, die alle die Tendenz aufweisen, mit der Frequenz von sehr kleinen Werten bis zu $|\underline{Y}| \approx 0,0033 \text{ s/kg}$ bei 700 Hz anzusteigen. Wäre die Admittanz rein imaginär und positiv, dann entspräche dies einer Feder

mit einer Steifigkeit von ungefähr 133 kN/m. In diesem Beispiel hängt die Admittanz so wenig von der Messposition in seitlicher Richtung ab, dass es gerechtfertigt erscheint, die Auflager sämtlicher Saiten durch ein und dieselbe Messkurve zu kennzeichnen.

5.2.2. Lateraler Verlauf am Sattel

Wiederholt man diese Messung am entgegengesetzten Auflager der leeren Saiten, erhält man die Admittanzkurven, die in Fig. 43 zusammengestellt sind. Auch hier ist die Tendenz zu erkennen, dass die Admittanz mit wachsender Frequenz ansteigt. Diesem Trend überlagern sich jedoch markante Maxima bei etwa 190/230 Hz sowie um 430 Hz. Wie der Vergleich zeigt, prägen sich diese an den verschiedenen Messpunkten in unterschiedlichem Maße aus. So erreicht das Maximum bei etwa 190 Hz für die (tiefe) E₂-Saite 0,02 s/kg. Für die (hohe) E₄-Saite ist es nur noch etwa halb so groß, während andererseits nun das Maximum bei etwa 230 Hz die Admittanz 0,013 s/kg erreicht. Im Maximum bei etwa 430 Hz steigt am Auflagepunkt der E₄-Saite die Admittanz auf 0,017 s/kg, an der E₂-Saite dagegen nur bis auf ungefähr die Hälfte dieses Wertes. Was bereits bei den Schwingungsmessungen (vgl. z.B. Kapitel 4) zu erkennen war, zeigt sich auch bei der Admittanz am Sattel: Den fundamentalen Biegeschwingungen des Halses überlagern sich zusätzliche Torsionsschwingungen. Bei Gitarren mit asymmetrischem

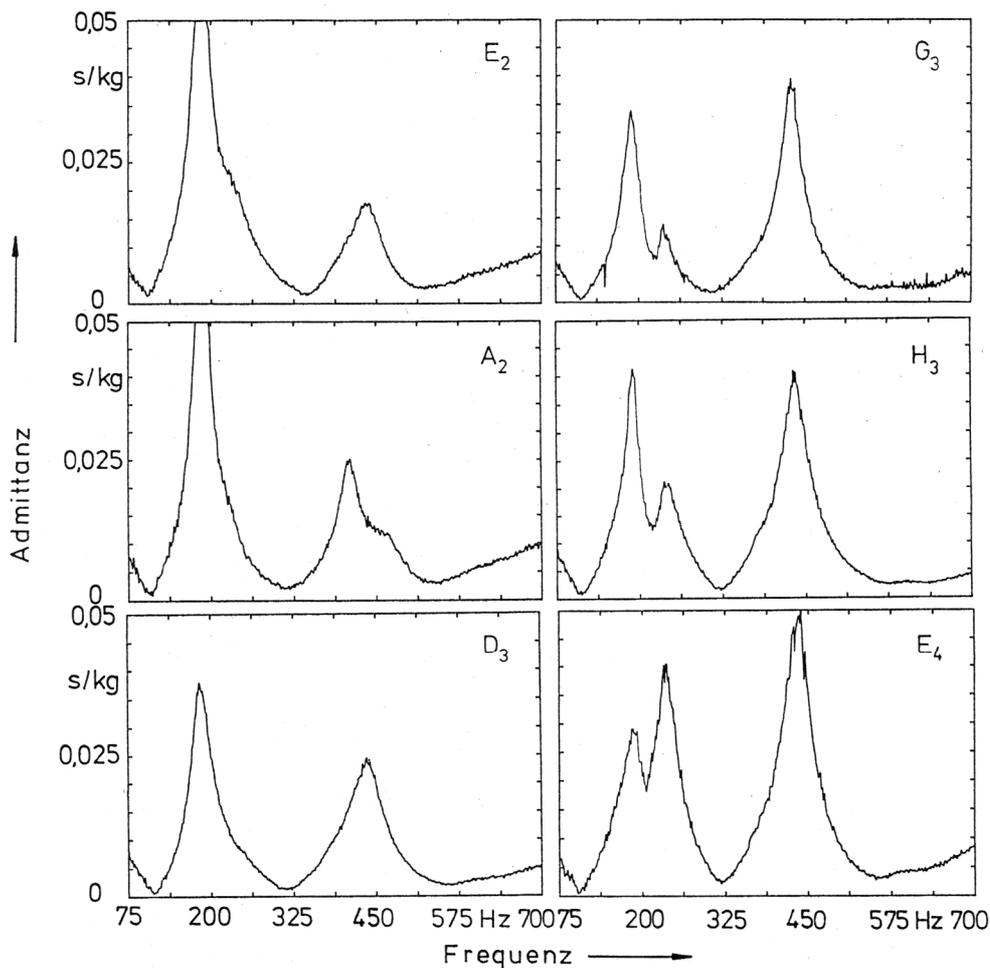


Fig. 43. Betrag der Punktadmittanz am Sattel des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten; die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Wirbelbrett, zu denen auch das Instrument Nr. 4 gehört, kann die überlagerte Torsion zu einer deutlichen lateralen Abhängigkeit der Admittanz führen. Diese kann so ausgeprägt sein, dass unter Umständen eine Messung - beispielsweise auf der Mittellinie des Griffbretts, - nicht ausreicht, die Schwingwilligkeit des Halses für alle sechs Saiten hinreichend zu repräsentieren. Im Vergleich von Fig. 43 mit Fig. 42 deuten die derzeit vorliegenden Erkenntnisse darauf hin, dass die Messergebnisse auf dem Hals in höherem Maße voneinander abweichen werden, als dies am Steg einer gut gemachten E-Gitarre zu erwarten ist.

5.2.3. Stegadmittanz bei elektrischen und akustischen Gitarren

Die akustische Gitarre ist zwar nicht Gegenstand dieser Betrachtungen, eignet sich jedoch gut als Kontrastbeispiel. Während der Steg einer elektrischen Gitarre den Saiten ein weitgehend unbewegliches Auflager bietet, gilt das Gegenteil für den Steg einer akustischen Gitarre. Dessen Aufgabe ist es, Schwingungsenergie auf den Korpus des Instruments zu übertragen, damit das Saitensignal in Schall umgewandelt werden kann. Dazu muss der Steg beweglich sein; vgl. Fleischer (1997). Wie sich dies in der Admittanz äußert, ist anhand von Fig. 44 illustriert.

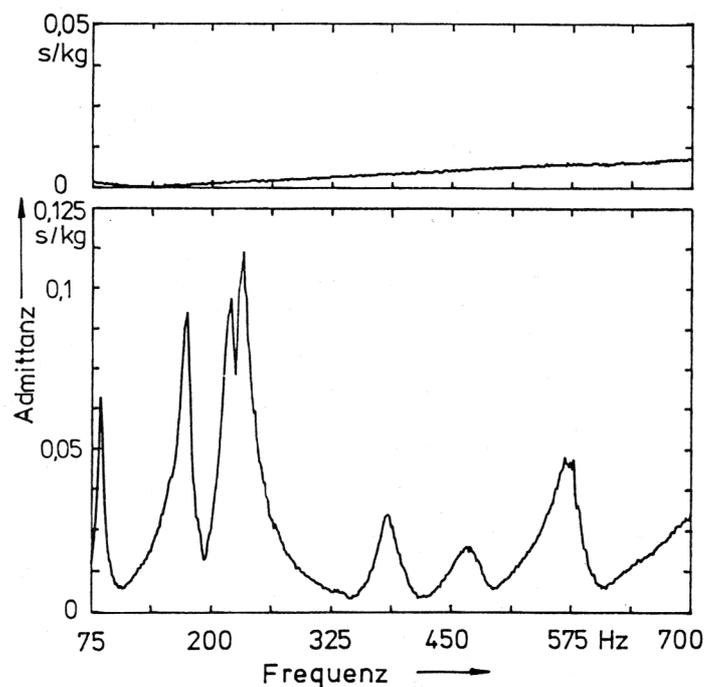


Fig. 44. Betrag der Punktadmittanz am Steg nahe dem Auflagepunkt der G_3 -Saite der elektrischen Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) bzw. einer akustischen Gitarre vom spanischen Typ; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**

Wie beispielsweise von Fleischer (1997) gezeigt, differiert eine akustische Gitarre hinsichtlich der Beweglichkeit des Halses nicht wesentlich von einer elektrischen. Für den Steg gilt allerdings das genaue Gegenteil. Dem Beispiel in Fig. 44 zufolge ist der Unterschied in keiner Weise zu übersehen. Während das obere Diagramm für die E-Gitarre den kontinuierlichen Anstieg von einer sehr kleinen Admittanz auf etwa 0,003 s/kg zeigt (vgl. auch Fig. 42), ist dem unteren Diagramm zu entnehmen, dass der Steg der spanischen Gitarre in hohem Maße beweglich sein kann. Die lokalen Maxima lassen auf eine Aneinanderreihung zahlreicher Resonanzen schließen; Maximalwerte von mehr als 0,35 s/kg sind zu beobachten. Der Steg

einer akustischen Gitarre zeigt sich somit um ein Vielfaches beweglicher als derjenige einer E-Gitarre. Die unterschiedlichen Wirkungsprinzipien der solid-body-Gitarre im Gegensatz zur akustischen Gitarre mit Schall abstrahlendem Korpus werden in den jeweiligen Stegadmittanzen offenkundig. Während bei der elektrischen Gitarre die Saiten am Steg möglichst unbeweglich gehalten werden sollen, müssen sie bei der akustischen Gitarre am Steg ein bewegliches Auflager vorfinden. Anders wäre es gar nicht möglich, ohne elektroakustische Hilfsmittel auf rein mechanischem Wege das Saitensignal in Schall umzusetzen.

5.3. Mechanische Punktkonduktanz

Ist das Auflager einer Saite nicht unbeweglich, sondern verhält es sich wie eine Masse oder eine Feder, so kann dies die Eigenfrequenz der Saite beeinflussen. Verhält es sich wie ein Dämpfer, so kann das Auflager der Saitenschwingung Energie entziehen und somit deren Ausklingen beschleunigen. Da der letztgenannte Aspekt hier im Mittelpunkt des Interesses steht, wird im Folgenden bevorzugt der Realteil der Admittanz - die Konduktanz G - gemessen und kommentiert. Orientierende Untersuchungen sollen die bisher vorliegenden Ergebnisse ergänzen und klären, in welchem Ausmaß die Konduktanz vom Messort abhängen kann.

5.3.1. Lateraler Verlauf am Steg

Die Konduktanz ist der Realteil der Admittanz, deren Betrag für das Beispiel der weißen Stratocaster-Gitarre Nr. 4 bereits in Fig. 42 dargestellt worden ist. Dieses Instrument besitzt keinen Vibrato-Mechanismus. Die Konduktanz, die hier nicht wiedergegeben ist, erweist sich für die Auflagepunkte sämtlicher Saiten am Steg als gleichermaßen klein.

Sie kann jedoch deutlich größere Werte annehmen, wenn die untersuchte Gitarre mit einem Vibrato-Mechanismus ausgestattet ist. Der "worst case", der bei Messungen der Stegkonduktanz beobachtet wurde, ist in Fig. 45 illustriert. Er bezieht sich auf die Gitarre Nr. 5 Squier Bullet. Um die Vorspannkraft der Saiten beim Spielen gezielt verändern zu können, ist das untere Auflager der Saiten nicht starr mit dem Korpus verbunden, sondern stützt sich über Federn auf der Unterlage ab. Ein Vibrato-Hebel macht es möglich, die Vorspannkraft um einen gewissen Betrag zu erhöhen und die Frequenzen der Saitenschwingungen zu "ziehen".

Beim vorliegenden Instrument ist dieser Vibrato-Mechanismus entweder unzureichend gefertigt, verschlissen oder falsch eingestellt. Auf jeden Fall zeigt Fig. 45 eine Erscheinung, die bisher bei keiner anderen E-Gitarre zu beobachten war. Am Steg weist die Konduktanz an den Auflagepunkten aller Saiten hohe Spitzen auf. Am deutlichsten prägt sich ein Maximum bei etwa 620 Hz aus, was etwa der Note Dis_5 entspricht. Sein Höchstwert wächst von den hohen zu den tiefen Saiten von 0,007 auf nahezu 0,0013 s/kg an. Damit sind beim Instrument Nr. 5 am unteren Ende der Saiten bei bestimmten Frequenzen Energieverluste einer Größe möglich, wie sie bei anderen E-Gitarren nur am Halsende auftreten. Geht Schwingungsenergie am Hals verloren, können sich "dead spots" ausbilden, da diesen Frequenzen entsprechende Griffpositionen zugeordnet sind. Schmalbandige Energieverluste, die am Steg auftreten, haben dagegen "dead frequencies" zur Folge. Diese treten dann auf, wenn eine Saitenfrequenz mit einer Frequenz übereinstimmt, bei der die Konduktanz am Auflager entsprechend groß ist. Welche Griffposition der Spieler verwendet, um diese Frequenz zu erzeugen, spielt dabei keine Rolle.

Einen worst case stellt das Exemplar Nr. 5 auch hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Konduktanzkurven dar, die an den Auflagepunkten der einzelnen Saiten gemessen wurden. Bei keiner anderen der untersuchten Gitarren, auch nicht bei der Fender Stratocaster Nr. 3, die einen ähnlichen Vibrato-Mechanismus hat, differieren die Ergebnisse in dem Ausmaß, wie es

sich in Fig. 45 offenbart. Der Steg des Instruments Nr. 5 bildet somit eine echte Ausnahme, die geradezu als Bestätigung der Regel gewertet werden kann, dass im betrachteten Frequenzbereich am Steg die Konduktanz für alle Saiten ähnlich klein ist.

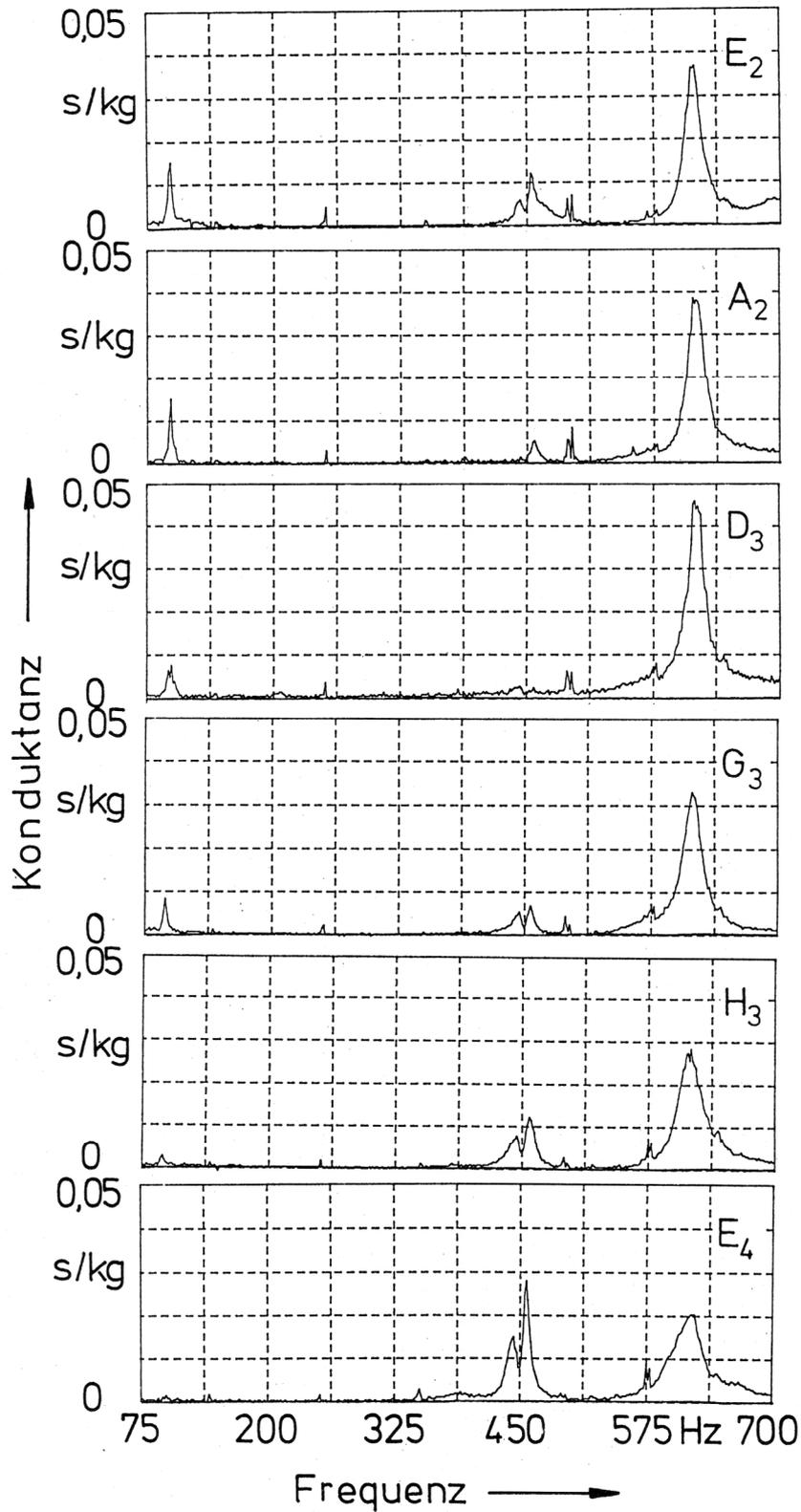


Fig. 45. Punktkonduktanz am Steg des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet) als Funktion der Frequenz, gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten; die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

5.3.2. Lateraler Verlauf am Sattel

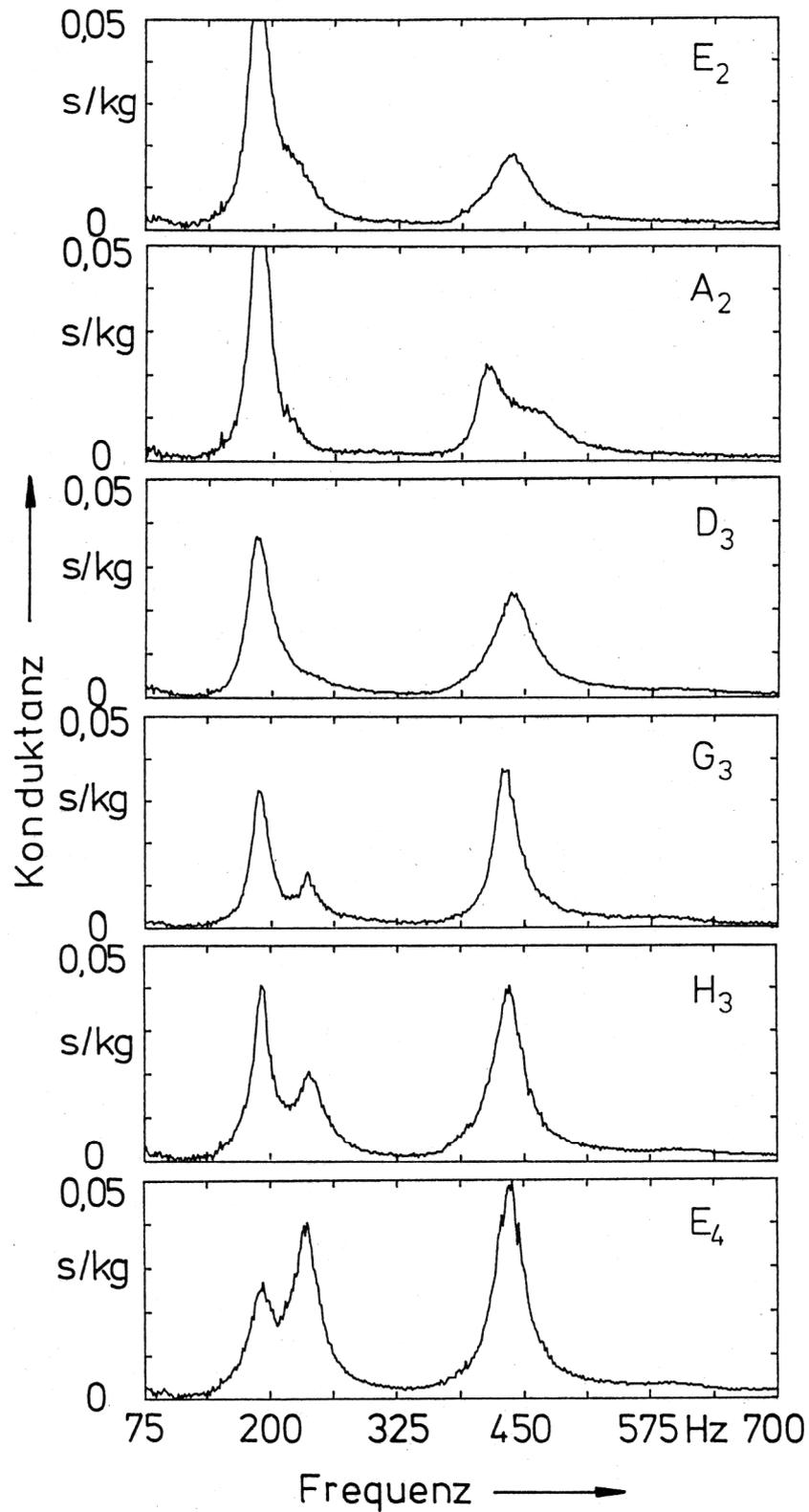


Fig. 46. Punktkonduktanz am Sattel des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), gemessen an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten; die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Fig. 43 im Abschnitt 5.2.2 hat bereits deutlich gemacht, dass der Betrag der Admittanz am Sattel für die hohen Saiten anders als für die tiefen Saiten sein kann. Dies bestätigt sich in Hin-

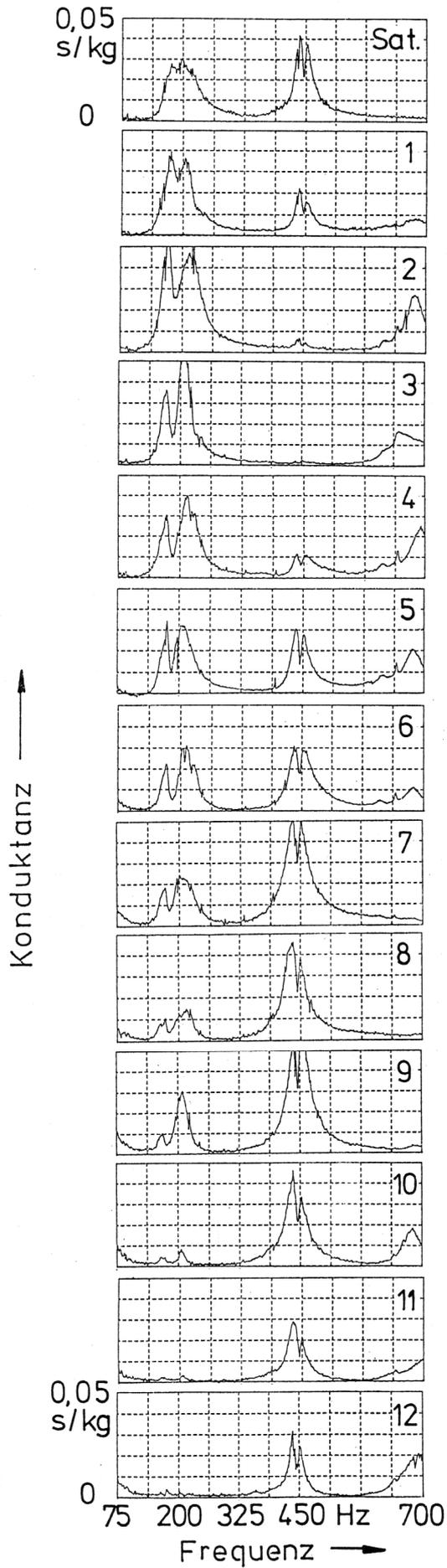


Fig. 47. Punktkonduktanz am Sattel (oben) und an den angegebenen Bündeln auf der Mittellinie längs des Halses des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

sicht auf deren Realteil. Fig. 46 zeigt für dieselbe Gitarre die Konduktanz an den halsseitigen Auflagepunkten der sechs leeren Saiten. Da der Imaginärteil der Admittanz (Suszeptanz) bei Resonanz verschwindet, stimmen die Maxima der Konduktanz bei 190/230 Hz und 430 Hz mit denjenigen der Admittanz überein. Mit Ausnahme der Maxima ist die Konduktanz naturgemäß kleiner als die Admittanz. Für den lateralen Verlauf scheint die Bauweise des Wirbelbretts, das sich an das Griffbrett anschließt, ausschlaggebend zu sein. Bei Gitarren mit symmetrischem Wirbelbrett ist zu erwarten, dass eine Messung an einem Punkt auf der Mittellinie des Griffbretts ein Ergebnis liefert, das einigermaßen repräsentativ für alle Saiten am betreffenden Bund bzw. am Sattel ist. Ist das Wirbelbrett dagegen - wie bei der vorliegenden Gitarre - asymmetrisch, ist mit Torsion zu rechnen. Demnach ist zu vermuten, dass es nur in den seltensten Fällen möglich sein wird, mit einer einzigen Messung die Konduktanz für alle sechs Saiten hinreichend zu kennzeichnen.

5.3.3. Verlauf längs des Halses

In den seltensten Fällen wird eine Saite leer, d.h. ungegriffen gespielt, so dass sie auf ihrer ganzen Länge zwischen Sattel und Steg schwingt. In der Mehrzahl der Fälle verkürzt der Gitarrist die Saite dadurch, dass er sie mit dem Finger gegen ein Bundstäbchen drückt und damit ein neues halsseitiges Auflager schafft. Um diesem wichtigen Fall Rechnung zu tragen, wurde die Konduktanz nicht allein am Sattel, sondern zusätzlich auch an den Bündlen gemessen. Ergebnisse sind in Fig. 47 zusammengestellt. Sie beziehen sich auf den Sattel und die ersten zwölf Bündle, was durch "Sat." für den Sattel bzw. die Nummer des Bundes charakterisiert ist. Man erkennt eine ganz extreme Abhängigkeit der Konduktanz von der Position längs des Halses. Pauschal lässt sich aussagen, dass die Konduktanz l ä n g s des Halses in wesentlich höherem Maße variiert, als sie dies q u e r zum Hals tut. Demnach erscheint es geboten, ergänzend zur Konduktanz am Sattel intensiv die an den Bündlen zu untersuchen. Dies wird in aller Ausführlichkeit durchgeführt und im anschließenden Kapitel kommentiert werden.

5.4. Halskonduktanz in unterschiedlichen Richtungen

Zuvor soll aber noch eine Frage geklärt werden, die mit der Richtung zusammenhängt, in der die Saite schwingt. Der Gitarrist reißt die Saite normalerweise mit einem Plektrum so an, dass sie anfänglich in einer Ebene schwingt, die mit dem Griffbrett einen Winkel bildet, der weder 0^0 noch 90^0 beträgt. Für die mechanische Schwingung sind zunächst sämtliche Richtungen gleichberechtigt. Es ist jedoch zu vermuten, dass unterschiedlich orientierte Komponenten der Saitenschwingung, insbesondere wenn deren Ebenen parallel bzw. senkrecht zum Griffbrett liegen, unterschiedliche Randlagerungen vorfinden. Um diese Vermutung hinsichtlich des Dämpfungsverhaltens zu überprüfen, wurde die Konduktanz nicht nur - wie bisher - senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus, sondern zusätzlich auch parallel zu dieser Ebene gemessen.

Bei den Beispielen, die im vorliegenden Abschnitt aufgeführt sind, kommt bereits eine Darstellung zum Einsatz, wie sie von nun an regelmäßig für die Halskonduktanz verwendet wird. In ein und demselben Diagramm sind Messkurven, wie sie in Fig. 47 noch untereinander angeordnet sind, so angeordnet, dass eine quasi-dreidimensionale "Landschaft" entsteht. Über einer Ebene, die von der Frequenz und dem Ort auf dem Hals aufgespannt wird, bilden sich "Höhenzüge" aus. Diese haben ihre Ursache in den Schwingungen des Halses, die insbesondere in Kapitel 4 behandelt worden sind. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei der Schwingungsmessung der Erreger stets am selben Ort - nämlich nahe den 7. Bund - fixiert war. Bei der Konduktanz-Messung wandert dagegen die Anregung mit, so dass genau an demjenigen Ort, an dem die Bewegung erfasst wird, auch angeregt wird.

5.4.1. Messungen am Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul)

Fig. 48 sind die Ergebnisse für das Instrument Nr. 1 zu entnehmen. Bei der Messung, die zum oberen Diagramm führte, drückte die Spitze des Impedanzmesskopfs stets zwischen der D₃- und der G₃-Saite senkrecht auf den Sattel bzw. das Griffbrett. Man erkennt zwei schmale, hohe "Gebirgszüge" bei etwa 200 Hz und 450 Hz. Diese spiegeln die halsseitigen Abschnitte der entsprechenden Schwingungsbilder wider, die in Fig. 22 unten dargestellt sind. In dieser Richtung ist der Hals sehr "schwingfreudig". An bestimmten Stellen überschreitet die Konduktanz 0,017 s/kg, was am "clipping" der Messkurven zu erkennen ist. Das untere Diagramm entstand dadurch, dass der Impedanzmesskopf um 90° gedreht wurde. Nunmehr drückte er am Rand, an dem sich die (hohe) E₄-Saite befindet, parallel zur Ebene des Griffbretts etwa an der Linie, an der das Griffbrett auf den Hals aufgeleimt ist, gegen die Schmalseite des Halses. Wiederum sind zwei Gebirgszüge zu erkennen, die jedoch von anderer Frequenzlage, Gestalt und Höhe sind. Der eine Gebirgszug tritt bei etwa 130 Hz, der andere bei etwa 380 Hz auf. Beide spiegeln Schwingungen in der Ebene Griffbrett-Korpus wider. Schwingungen in dieser Ebene sind experimentell bisher nicht untersucht worden und haben deshalb keine Entsprechung in den hier besprochenen Vibrometer-Messungen.

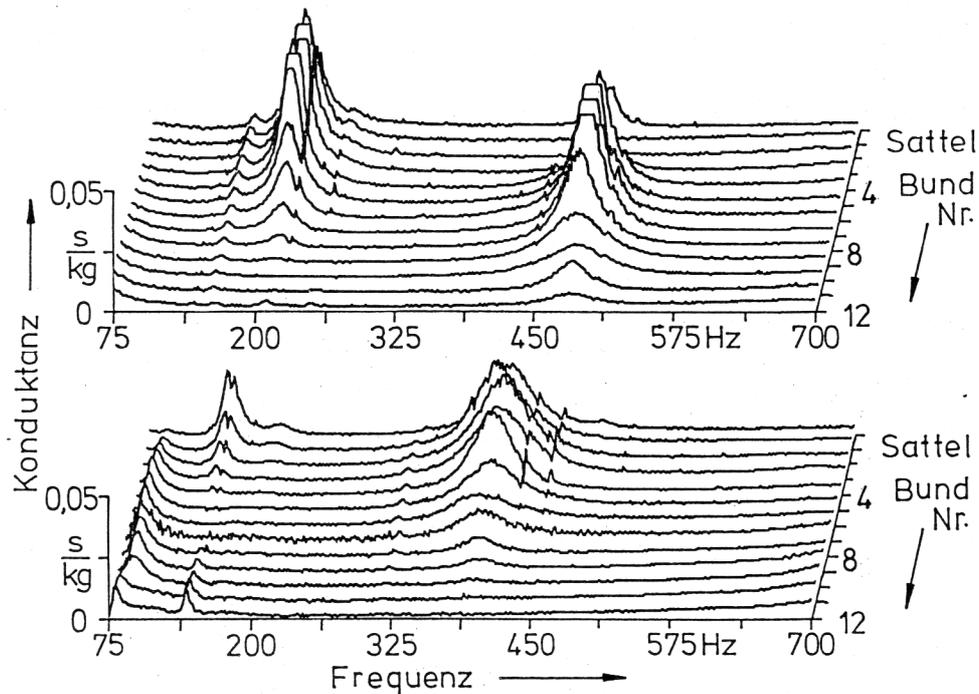


Fig. 48. Halskonduktanz der Gitarre Nr. 1 (Gibson Les Paul) als Funktion der Frequenz, experimentell bestimmt an 13 Messorten am Sattel und den Bündeln 1 bis 12; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**

Oben: Messrichtung senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus auf der Mittellinie des Griffbretts;

unten: Messrichtung parallel zur Ebene Griffbrett-Korpus.

Der Hals einer E-Gitarre ist im Mittel etwa 5 cm breit und 2,5 cm dick. Legt man für eine Abschätzung das Modell des Balkens mit Rechteckquerschnitt zugrunde, so besagt Gl. (3), wie die Abmessungen des Querschnitts in die Eigenfrequenzen eingehen. Die Eigenfrequenzen sind der Dicke h des Balkens direkt proportional; von seiner Breite b hängen sie nicht ab. Gleichartige Schwingungsmuster würden danach bei Schwingungen in der Ebene Griffbrett-Korpus ($h \approx 5$ cm) mit einer etwa doppelt so hohen Frequenz auftreten, wie wenn die Schwingung aus dieser Ebene heraus ($h \approx 2,5$ cm) erfolgt. Ein Vergleich der Verläufe längs des Hal-

ses in Fig. 48 zeigt dann auch, dass der zweite Gebirgszug im unteren Diagramm dem ersten im oberen Diagramm entspricht. Die zugehörigen Frequenzen 380 Hz bzw. 200 Hz verhalten sich erwartungsgemäß wie 1,9:1, was dem Schätzfaktor 2 sehr nahe kommt.

5.4.2. Messungen am Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV)

Das nächste Beispiel bezieht sich auf das Instrument Nr. 3, eine Gitarre vom Stratocaster-Typ. Wie das obere Diagramm in Fig. 49 erkennen lässt, offenbart die Messung senkrecht zum Griffbrett drei ausgeprägte Gebirgszüge, von denen die ersten beiden vom selben Grundtyp sind und bei etwa 200 bzw. 250 Hz auftreten; vgl. die Vibrometer-Messung in Fig. 28. Das untere Diagramm deutet bei etwa 380 Hz auf ein ähnliches Muster hin, mit dem der Hals in der Ebene des Griffbretts schwingt. Der zugehörige Gebirgszug ist breiter und weniger hoch als das Pendant im oberen Diagramm. Der Erwartung entsprechend tritt sein Maximum bei etwas weniger als dem Zweifachen derjenigen Frequenz auf, bei welcher der Hals eine gleichartige Schwingung aus der Ebene des Griffbretts heraus ausführt.

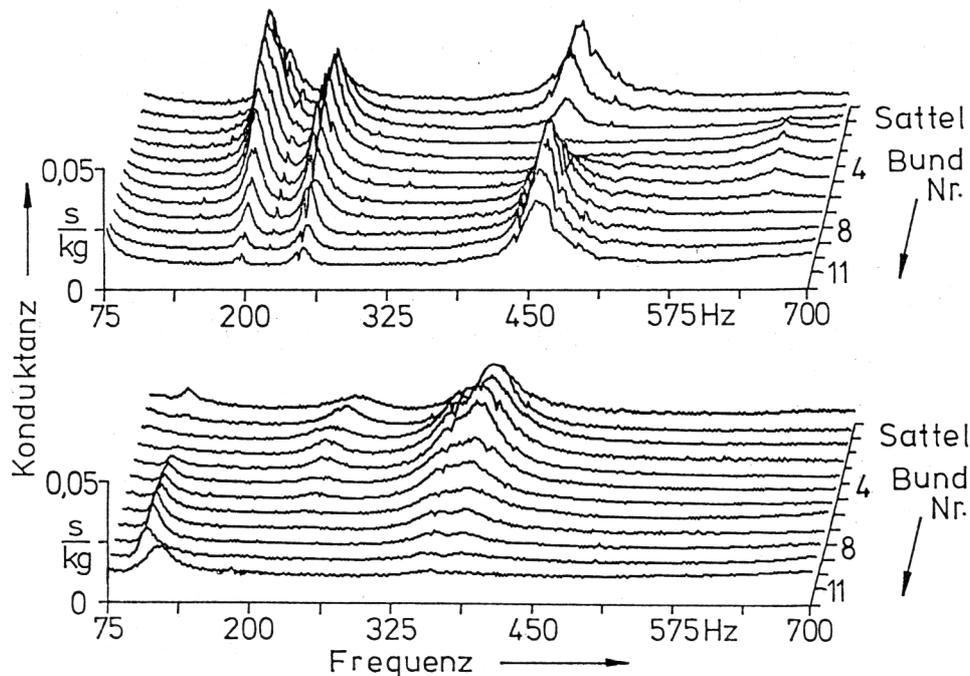


Fig. 49. Halskonduktanz der Gitarre Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV), experimentell bestimmt an 12 Messorten am Sattel und den Bünden 1 bis 11; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**
 Oben: Messrichtung senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus auf der Mittellinie des Griffbretts;
 unten: Messrichtung parallel zur Ebene Griffbrett-Korpus.

5.4.3. Messungen am Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)

Das Objekt der Messung, die zu Fig. 50 führt, ist das andere Fender-Instrument Nr. 4. Wie zu erwarten war, zeigen die Ergebnisse für beide Stratocaster-Gitarren prinzipielle Übereinstimmung. Der markanteste Gebirgszug im unteren Diagramm tritt nun bei etwa 340 Hz auf. Er entspricht dem in zwei Varianten vorhandenen Höhenzug, der im oberen Diagramm bei etwa 190 bzw. 230 Hz zu erkennen ist; vgl. die Schwingungsmessungen in Fig. 31. Die maximale Konduktanz, welche die Messung in der Ebene des Griffbretts liefert, ist deutlich kleiner als die Maximalwerte, die sich senkrecht zum Griffbrett ergeben.

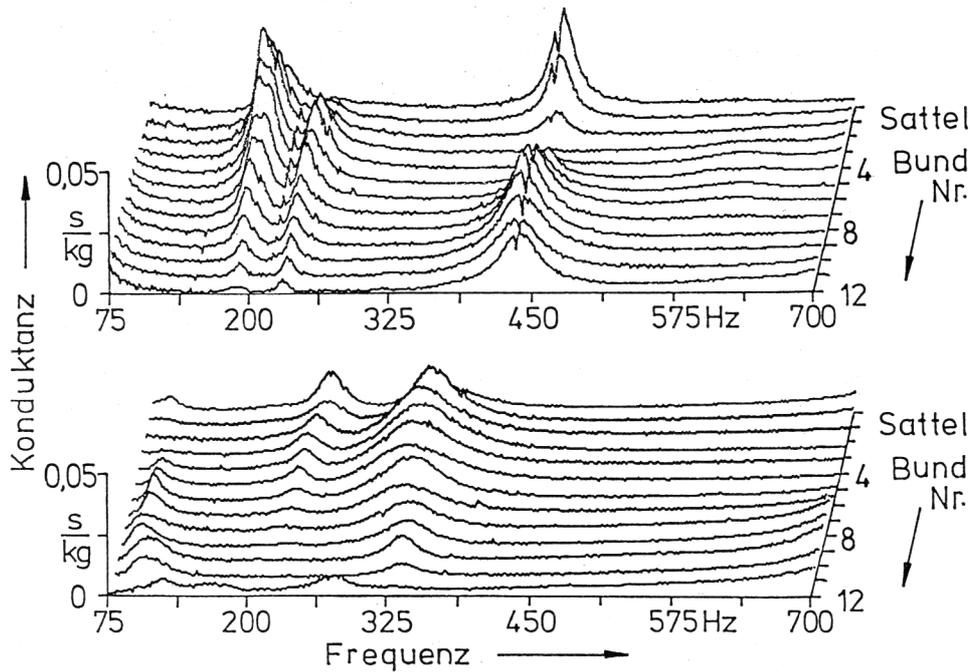


Fig. 50. Halskonduktanz der Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß), experimentell bestimmt an 13 Messorten am Sattel und den Bündlen 1 bis 12; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**
 Oben: Messrichtung senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus auf der Mittellinie des Griffbretts;
 unten: Messrichtung parallel zur Ebene Griffbrett-Korpus.

5.4.4. Messungen am Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury)

In Fig. 51 sind zwei Ergebnisse von Messungen am Instrument Nr. 6 zusammengestellt. Das obere Diagramm (Messung senkrecht zur Griffbrett-Ebene) lässt zwischen 75 und 700 Hz nicht weniger als fünf Gebirgszüge erkennen. Die Vielfalt der zugrunde liegenden Schwingungsmuster ist noch größer als diejenige, die bei der Vibrometer-Messung (vgl. Fig. 36) zutage getreten war. Dies dürfte mit den unterschiedlichen Anregungsorten zusammenhängen: Bei der Messung mit dem Vibrometer muss der Ort der Anregung a priori festgehalten bleiben; er wurde willkürlich auf den 7. Bund gelegt. Da die Anregung in einem Knoten nicht möglich ist, können Schwingungsmuster, die an genau dieser Stelle einen Knotenpunkt aufweisen, nicht sichtbar gemacht werden. Offenbar trifft dies bei der Gitarre Nr. 6 auf die Schwingung bei 325 Hz zu. Bei der Messung der Konduktanz wandert die Anregung dagegen zum jeweiligen Messort mit, so dass die Gewähr geboten ist, vollständigen Aufschluss über die Schwingfreudigkeit des Objekts und insbesondere über schwingungsbedingte Energieverluste zu erhalten.

Die Messung senkrecht zum Griffbrett (Fig. 51 oben) ergibt Gebirgszüge bei etwa 200 Hz, 325 Hz, 360 Hz, 425 Hz und 520 Hz. Ein weiterer Höhenzug deutet sich oberhalb von 700 Hz an. Der betrachtete Bereich erscheint dicht besetzt. Im Vergleich dazu ist das untere Diagramm von Fig. 51 deutlich schwächer belegt. Drei Gebirgszüge zeichnen sich ab. Für deren Zuordnung kann neben Fig. 36 auch Abschnitt 4.7.3. von Nutzen sein, wobei die dort angegebenen Frequenzen grob zu verdoppeln sind: In der Griffbrett-Ebene schwingt der Hals bei etwa 110 Hz mit seiner ersten Hauptform. Die zweite Hauptschwingung ist bei etwa 420 Hz

zu beobachten, und bei etwa 640 Hz tritt schließlich die dritte Hauptschwingung auf. Die Maximalwerte sind bei den Schwingungen in der Griffbrett-Ebene stets geringer als bei den vergleichbaren Schwingungen aus der Ebene heraus.

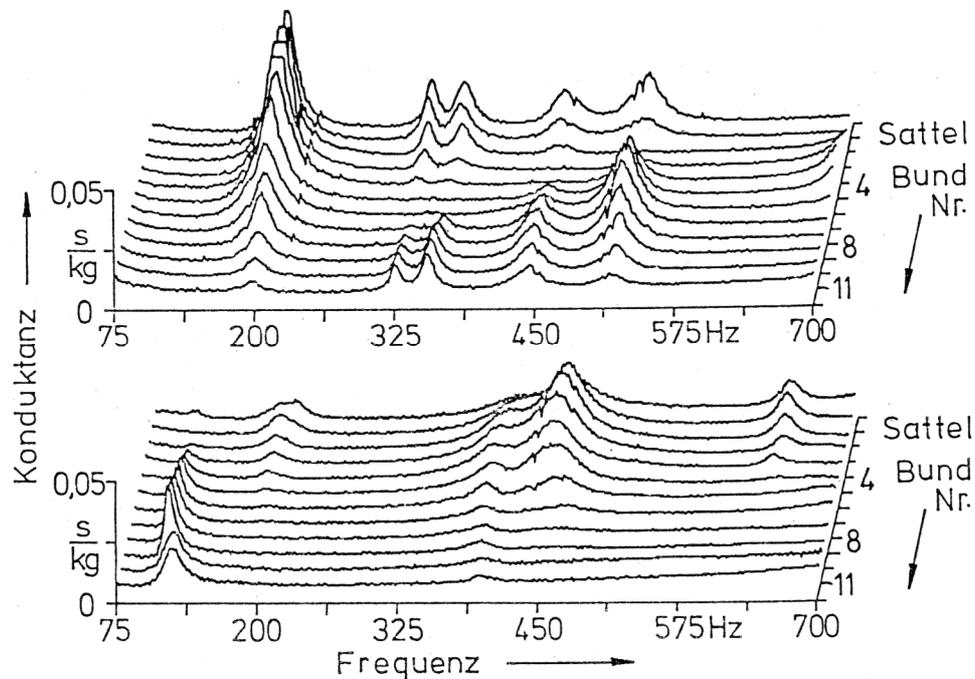


Fig. 51. Halskonduktanz der Gitarre Nr. 6 (Traveling Wilbury), experimentell bestimmt an 12 Messorten am Sattel und den Bündeln 1 bis 11; **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**
 Oben: Messrichtung senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus auf der Mittellinie des Griffbretts;
 unten: Messrichtung parallel zur Ebene Griffbrett-Korpus.

5.4.5. Wertung

Messort und Richtung, in welcher der Impedanzmesskopf gegen den Hals drückt, lassen sich bei der Messung von der Seite her nicht so genau definieren und beibehalten, wie wenn der Messkopf senkrecht zum Griffbrett steht. Die Ergebnisse in den unteren Diagrammen von Fig. 48 bis 51 sind demnach nicht ganz so gut reproduzierbar und streuen in etwas höherem Maße als diejenigen, welche in den entsprechenden oberen Diagrammen zusammengestellt sind. Sie lassen trotzdem die folgenden Aussagen zu:

- Wird der Hals zu Schwingungen in der Ebene des Griffbretts angeregt, so zeigen sich vergleichbare Schwingungsformen, wie wenn er senkrecht zum Griffbrett angeregt wird.
- Vergleichbare Schwingungen treten in der Griffbrett-Ebene mit etwa doppelt so hohen Frequenzen wie senkrecht zu dieser Ebene auf.
- Grob geschätzt nimmt die Konduktanz bei vergleichbaren Schwingungen in der Ebene des Griffbretts nur halb so große Werte an wie senkrecht zum Griffbrett.

Daraus kann vereinfachend geschlossen werden, dass die Saitenschwingung von der Beweglichkeit des Halses senkrecht zum Griffbrett in höherem Maße beeinflusst wird als von seiner Beweglichkeit in der Ebene. Eine hohe Konduktanz senkrecht zum Griffbrett wird demnach

dazu führen, dass die Komponente der Saitenschwingung senkrecht zum Griffbrett schneller abklingt als die Komponente parallel zum Griffbrett. Dies führt zu einer Polarisierung der Schwingungsrichtung dergestalt, dass die Saite anfänglich in einer beliebigen Richtung und abschließend vorwiegend parallel zum Griffbrett schwingt.

Nach bisheriger Erkenntnis ist jedoch ebenso bei der elektrischen wie auch bei der akustischen Gitarre die Komponente der Saitenschwingung senkrecht zum Griffbrett ("Normalkomponente") von größerer Bedeutung als die Parallelkomponente. Wie Jansson (1983b) gezeigt hat, lenkt eine statische Kraft die Decke einer Gitarre in höherem Maße aus, wenn sie senkrecht wirkt, als wenn sie parallel zur Decke angreift. Dasselbe dürfte für die Wechselkraft gelten, welche die Saite auf den Steg ausübt. Jansson (1983a) zeigt jedoch auch, dass bei der akustischen Gitarre die Parallelkomponente der Saitenschwingung einen zwar schwächeren, dafür aber länger anhaltenden Ton zur Folge hat.

"Akustische" Mechanismen der Umwandlung der mechanischen Saitenschwingung in ein Schallsignal sind bei der E-Gitarre außer Kraft gesetzt. Hier wird die Schwingung der Saite über Tonabnehmer mittels des elektromagnetischen Effekts in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dabei induziert die Bewegung der Saite zum Tonabnehmer hin bzw. von ihm weg eine wesentlich höhere Spannung, als wenn sie sich parallel zum Korpus in gleichbleibendem Abstand zum Tonabnehmer hin- und herbewegt (Zollner 2001). Bei den hier betrachteten Instrumenten ist demnach die Normalkomponente der Saitenschwingung von weitaus größerer Bedeutung als deren Parallelkomponente. Demzufolge ist es auch angezeigt, in erster Linie diejenigen Einflüsse zu untersuchen, welche diese Normalkomponente beeinflussen können; vgl. Fleischer (1999a bis e, 2000, 2001) sowie Fleischer und Zwicker (1997, 1998, 1999). Es sind dies die Reaktionen an den beiden Auflagern der Saiten, gemessen senkrecht zur Ebene Korpus-Griffbrett.

5.5. Zusammenfassende Bemerkung

Im Zusammenhang mit den hier angestellten Betrachtungen zum Abklingen der Saiten ist die mechanische Punktkonduktanz, in Normalenrichtung gemessen am Steg und auf dem Hals, die Kenngröße der Wahl. Den bisherigen Beobachtungen zufolge ist die Konduktanz bei einer gut gemachten E-Gitarre für alle Saiten am Steg wesentlich kleiner als am Hals. Hinsichtlich der Stegkonduktanz scheinen zwei Gruppen von Fehlern, die dem Instrumentenmacher unterlaufen können, möglich zu sein: Zum einen kann er den Steg auf dem Korpus so positionieren, dass er sich außerhalb von Schwingungsknoten befindet und deshalb die Eigenbewegungen des Instruments zumindest zum Teil mitmacht. Zum anderen verwendet er möglicherweise am Steg zu nachgiebige Teile (z.B. die Höhen-Stellschrauben der Walzen, auf denen die Saiten aufliegen), welche die Verbindung zwischen den Saiten und dem Korpus beweglich und verlustbehaftet machen. Als besondere Quelle möglicher Fehler erweist sich in diesem Zusammenhang der federnde Vibrato-Mechanismus.

Aus der Ebene des Griffbretts heraus ist der Hals "weicher" als in dieser Ebene, und umgekehrt in der Ebene des Griffbretts "steifer" als aus dieser Ebene heraus. Angesichts der Abtastung der Schwingung mit elektromagnetischen pick-ups wird die Beweglichkeit aus der Griffbrett-Ebene heraus als wichtiger eingestuft. Bei Gitarren mit symmetrischem Wirbelbrett ist zu erwarten, dass eine Messung auf einer Linie entlang dem Hals einen Konduktanzverlauf liefert, der weitgehend repräsentativ für alle Saiten ist. Bei allen Gitarren, deren Wirbelbrett unsymmetrisch gearbeitet ist, kann damit allenfalls bedingt gerechnet werden.

6. ERGEBNISSE DER KONDUKTANZ-MESSUNGEN

6.1. Konduktanz an Sattel und Steg

Mit diesen paarweisen Messungen soll die Situation erfasst werden, dass die Saiten nicht gegriffen sind, sondern "leer" gespielt werden. Sie schwingen demnach mit ihrer vollen Länge zwischen dem Steg und dem Sattel. Es wurde die Konduktanz senkrecht zur Ebene Griffbrett-Korpus an den Auflagepunkten der G_3 -Saite gemessen. Angesichts der Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel kann nicht erwartet werden, dass bei allen Gitarren diese Messkurven repräsentativ für die übrigen fünf Saiten sind. Trotzdem sind in der Schablone von Fig. 52 Skalen für alle sechs Saiten angegeben. Es ist Standard-Stimmung ($A_4 \cong 440$ Hz) vorausgesetzt. Über derselben Frequenzskale, die auch in sämtlichen Messdiagrammen verwendet worden ist, sind zunächst für jede Saite als ausgefüllte Kreise und mit der Ziffer "1" markiert die Grundtöne eingezeichnet. Die leeren Kreise repräsentieren die weiteren Harmonischen, die durch die entsprechenden Ziffern charakterisiert sind. Bei der (tiefen) E_2 -Saite liegen insgesamt acht Harmonische innerhalb des betrachteten Frequenzbereichs. Bei der (hohen) E_4 -Saite, die viermal so hoch gestimmt ist, sind es nur noch deren zwei. Im Sinne der Beschränkung auf das Wesentliche bleibt die folgende Interpretation der Ergebnisse auf die Grundfrequenzen reduziert, lässt sich aber jederzeit auf die höheren Harmonischen ausdehnen.

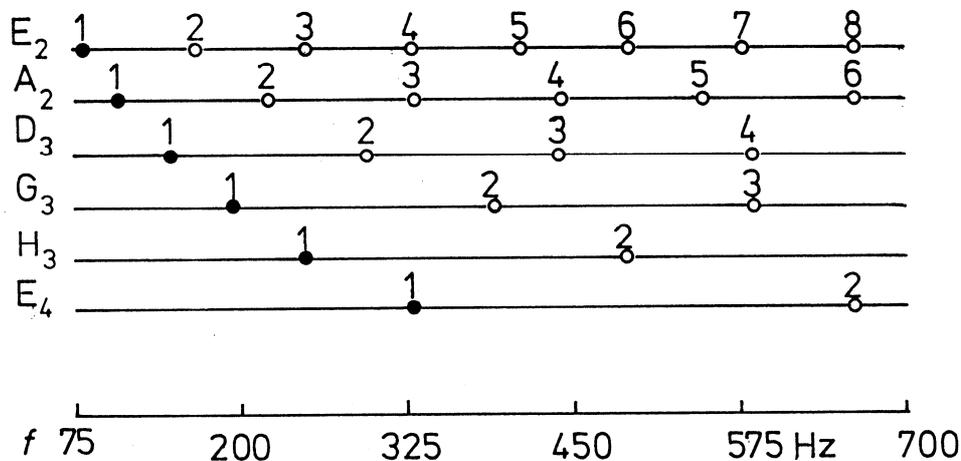


Fig. 52. Auswerteschablone für die Sattel- und Stegkonduktanz; die Ziffern markieren die Harmonischen der leer gespielten Saiten.

Einem Teil der Auflage liegt diese Schablone auf transparenter Unterlage bei. Sollte dies nicht der Fall sein, wird empfohlen, Fig. 52 auf Folie zu kopieren. Die Schablone lässt sich dann auf die Diagramme von Fig. 53 bis 58 legen. Für jede Harmonische kann abgelesen werden, wie groß die Konduktanz ist, welche die leer gespielte Saite am betreffenden Auflagepunkt "fühlt". Streng genommen sollte diese Betrachtung auf die G_3 -Saite beschränkt bleiben, an deren Auflagepunkten die Konduktanz gemessen worden ist. Für Übersichtszwecke und unter gewissen Vorbehalten - wie bereits mehrfach erwähnt, insbesondere bei Instrumenten mit asymmetrischem Kopf - lässt sie sich jedoch auch mit den übrigen Saiten durchführen.

6.1.1. Sattel und Steg des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul)

Legt man die Schablone auf das untere Diagramm von Fig. 53, so wird deutlich, dass die Konduktanz am Steg für die Grundtöne (1. Harmonischen) sämtlicher leer gespielten Saiten verschwindend gering ist. Am Halsende (oberes Diagramm) koinzidiert dagegen beispielsweise die Grundfrequenz der G₃-Saite mit dem Maximum der Sattelkonduktanz, so dass der Sattel für die zugehörige Grundschwingung ein relativ verlustreiches Auflager bilden wird.

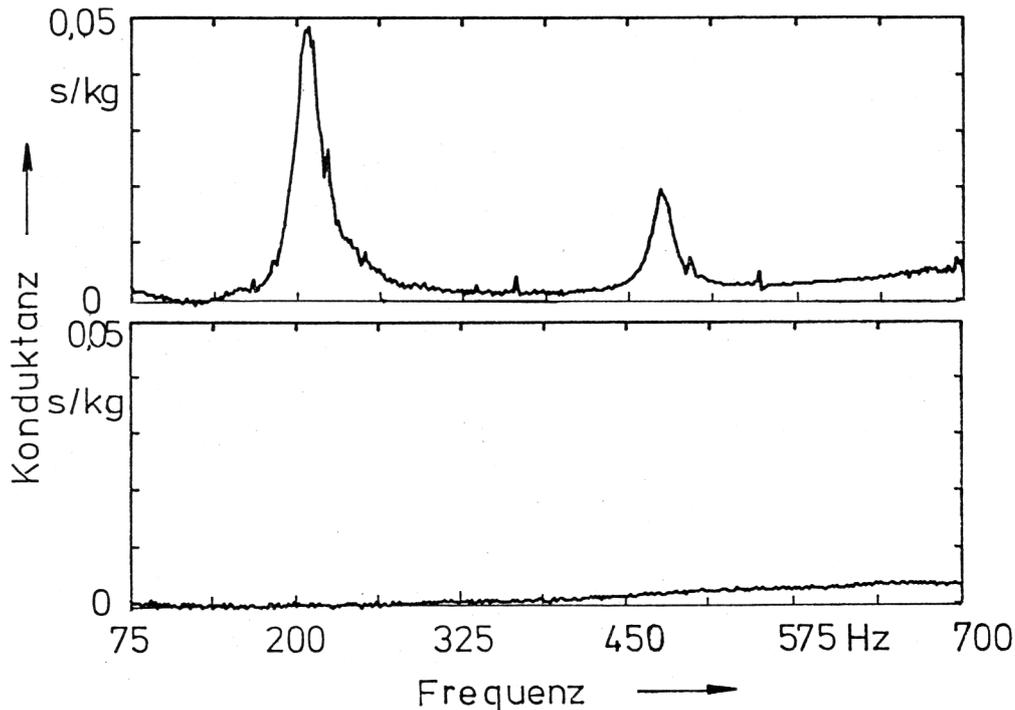


Fig. 53. Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten) in Abhängigkeit von der Frequenz; die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

6.1.2. Sattel und Steg des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer)

Diese Gitarre ist extrem asymmetrisch geformt, so dass bei der Übertragung der Ergebnisse in Fig. 54 von der G₃-Saite, für die sie gemessen wurden, auf die übrigen Saiten Vorsicht geboten ist. Mit Hilfe der Schablone wird aus dem unteren Diagramm ersichtlich, dass die Stegkonduktanz für sämtliche Grundtöne der leer gespielten Saiten sehr klein ist, für die höheren Harmonische aber Werte bis etwa 0,002 s/kg annehmen kann. Das obere Diagramm von Fig. 54 lässt erwarten, dass die Grundschwingungen der G₃-Saite und eventuell auch der D₃-Saite eine relativ hohe Sattelkonduktanz vorfinden.

6.1.3. Sattel und Steg des Instruments Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV)

Da auch die Fender-Gitarren asymmetrisch aufgebaut sind, lassen sich bei diesem und dem nächsten Instrument die dargestellten Ergebnisse nicht vorbehaltlos von der G₃-Saite auf die übrigen Saiten übertragen. Aus dem unteren Diagramm von Fig. 55 ist zu ersehen, dass die

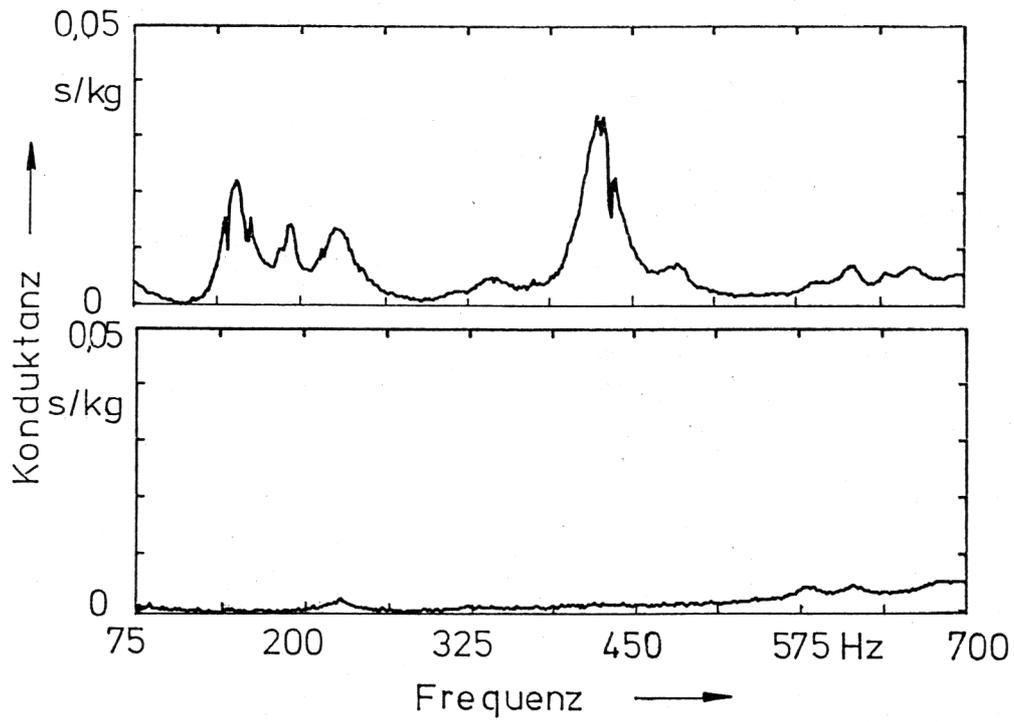


Fig. 54. Instrument Nr. 2 (Gibson Explorer): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

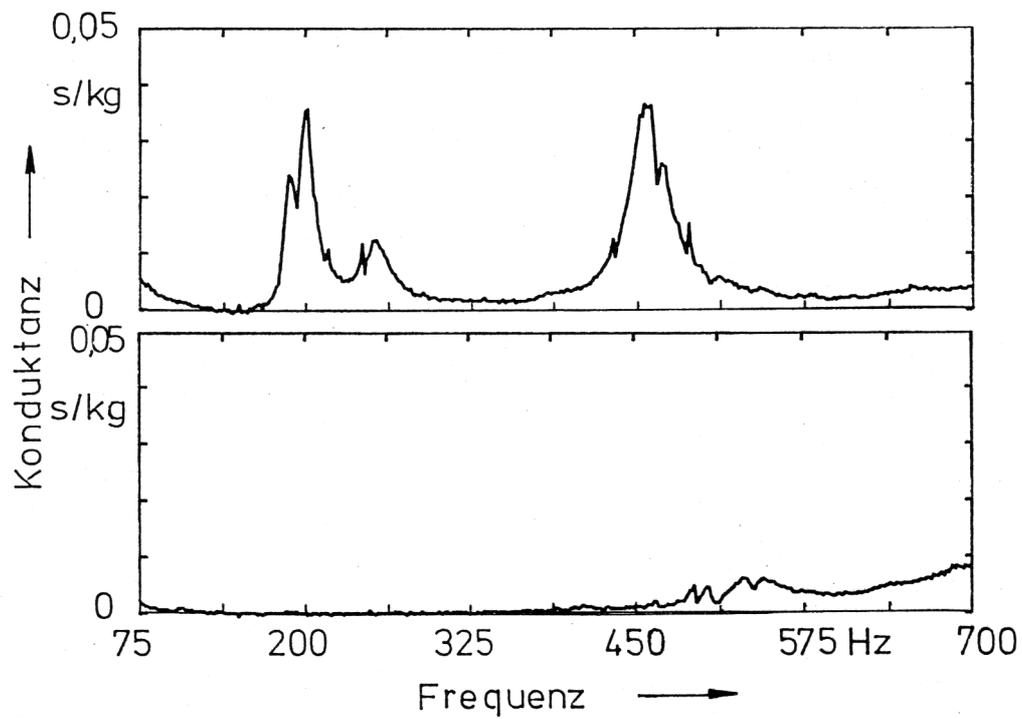


Fig. 55. Instrument Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Stegkonduktanz zwar für die Grundtöne der leer gespielten Saiten klein ist; für die höheren Harmonischen oder für gegriffene Saiten kann sie aber im untersuchten Frequenzbereich bis auf 0,008 s/kg ansteigen. Diese vergleichsweise hohen Werte sind offenkundig vom Vibrato-Mechanismus verursacht. Dem oberen Diagramm von Fig. 55 ist zu entnehmen, dass die Grundschiwingung der G₃-Saite am Sattel eine relativ hohe Konduktanz vorfindet. Dies gilt höchstwahrscheinlich auch für die H₃-Saite.

6.1.4. Sattel und Steg des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)

Dieses Instrument ist eng mit dem vorher betrachteten verwandt, verfügt allerdings nicht über einen Vibrato-Mechanismus. Dies äußert sich im unteren Diagramm von Fig. 56: Die Stegkonduktanz erweist sich im gesamten untersuchten Frequenzbereich als sehr klein, was im Vergleich mit Fig. 55 besonders deutlich wird. Erwartungsgemäß sind sich die oberen Diagramme von Fig. 56 und 55 sehr ähnlich. Demnach werden auch bei dieser Stratocaster-Gitarre die Grundschiwingungen der G₃- und wahrscheinlich auch der H₃-Saite am Sattel eine vergleichsweise hohe Konduktanz antreffen.

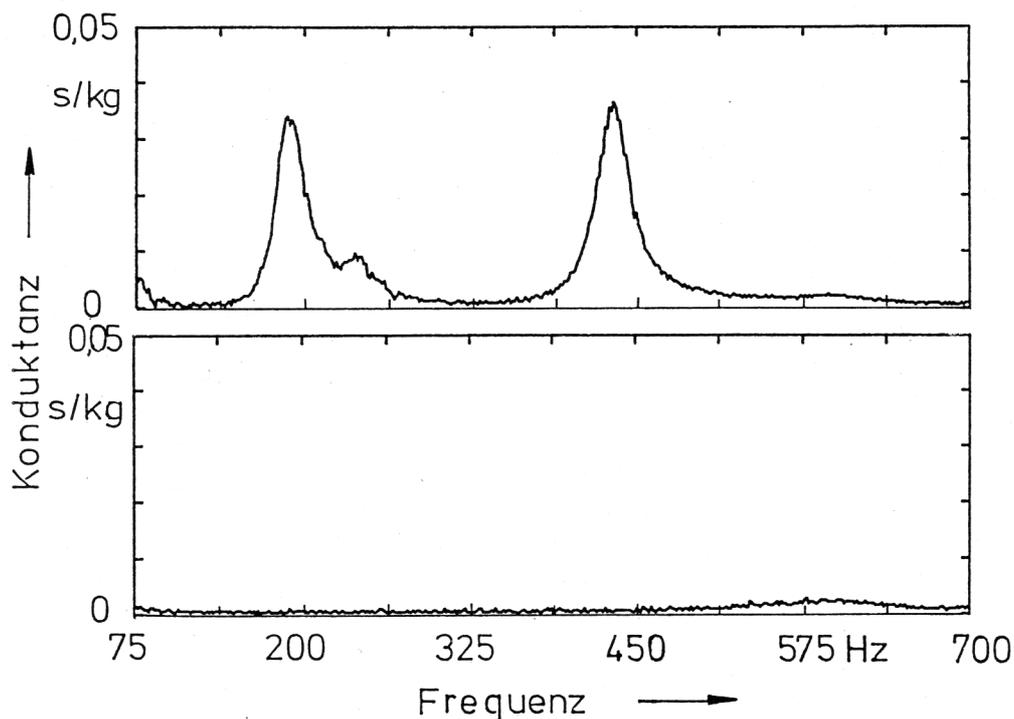


Fig. 56. Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

6.1.5. Sattel und Steg des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet)

Vergleicht man das obere Diagramm von Fig. 57 mit denen in Fig. 55 und 56, dann lässt sich die gemeinsame Herkunft aller drei Gitarren erahnen. Ausgeprägte Hauptmaxima finden sich bei etwa 200 Hz und etwas unterhalb von 450 Hz. Wie bereits mehrfach erkennbar geworden ist, nimmt die Gitarre Nr. 5 im Ensemble der untersuchten Instrumente jedoch eine gewisse

Sonderstellung ein. So zeigt sich das erste Hauptmaximum in Fig. 57 oben über einen weiten Frequenzbereich "verschmiert". Dies hat zur Folge, dass nicht nur die Grundschwingung der G₃-Saite, sondern höchstwahrscheinlich auch diejenigen der D₃- und H₃-Saite am Sattel relativ hohe Konduktanzwerte vorfinden. Das untere Diagramm von Fig. 57 lässt erkennen, dass auch hier die Stegkonduktanz für die Grundtöne der leer gespielten Saiten klein ist; für gegriffene Saiten kann sie aber bei etwa 620 Hz bis auf über 0,01 s/kg ansteigen. Dieser extrem hohe Wert wurde bereits in Abschnitt 5.3.1. ausführlich diskutiert und ist offensichtlich auf den schlecht eingestellten Vibrato-Mechanismus zurückzuführen. Fig. 57 repräsentiert somit eine der seltenen Abweichungen von der Regel, dass bei einer solid-body-Gitarre der Hals das "schwächere" Ende darstellt. Hier kann oberhalb von etwa 600 Hz unter Umständen der Steg das verlustreichere Auflager sein.

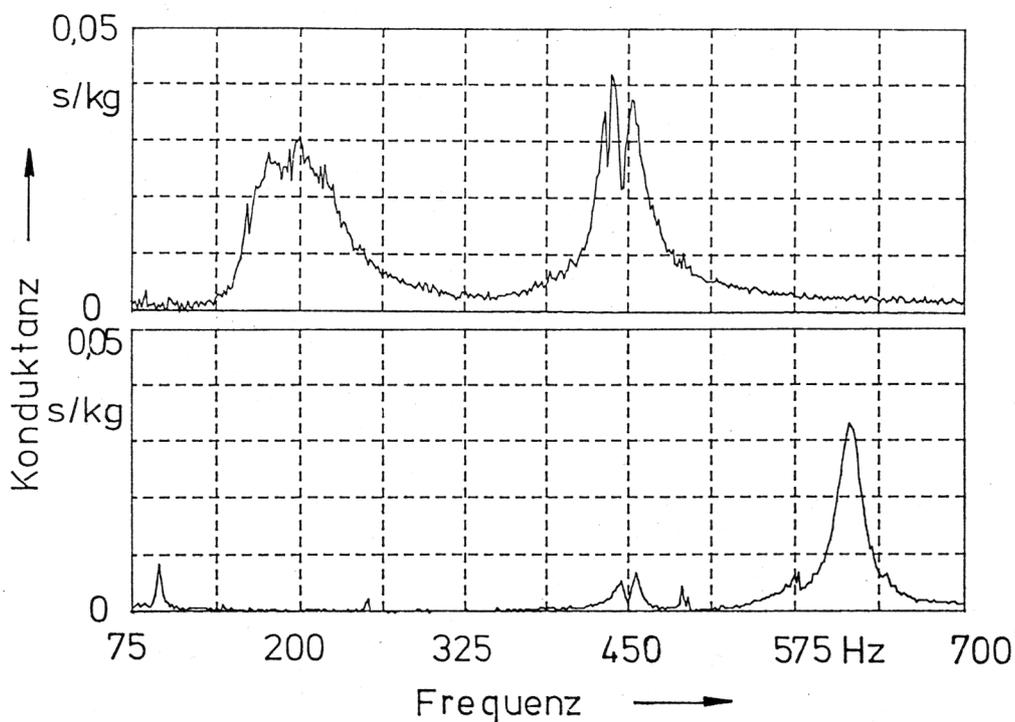


Fig. 57. Instrument Nr. 5 (Squier Bullet): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

6.1.6. Sattel und Steg des Instruments Nr. 6 (Traveling Wilbury)

Im oberen Diagramm von Fig. 58 wird wiederum die große Zahl von Konduktanz-Maxima deutlich, die von Fig. 51 her bekannt ist. Mit Hilfe der Schablone lässt sich ablesen, dass die Sattelkonduktanz bei der Grundfrequenz der G₃-Saite sehr hoch ist. Ebenso ist zu vermuten, dass die Grundschwingung der E₄-Saite am Sattel ein verlustreiches Auflager vorfinden wird. Anders als für die übrigen leeren Saiten ist für die E₄-Saite die Konduktanz auch am anderen Auflager (Steg; unteres Diagramm von Fig. 58) nicht mehr vernachlässigbar gering. Die Stegkonduktanz des Instruments Nr. 6 weist drei nicht sehr hohe, aber deutlich erkennbare Maxima auf. Da diese Gitarre über keinen Vibrato-Mechanismus verfügt, ist auf Grund der Schwingungsbilder von Fig. 36 zu vermuten, dass der Steg ungünstig platziert ist, so dass er teilweise die Bewegungen des Korpus mit vollzieht.

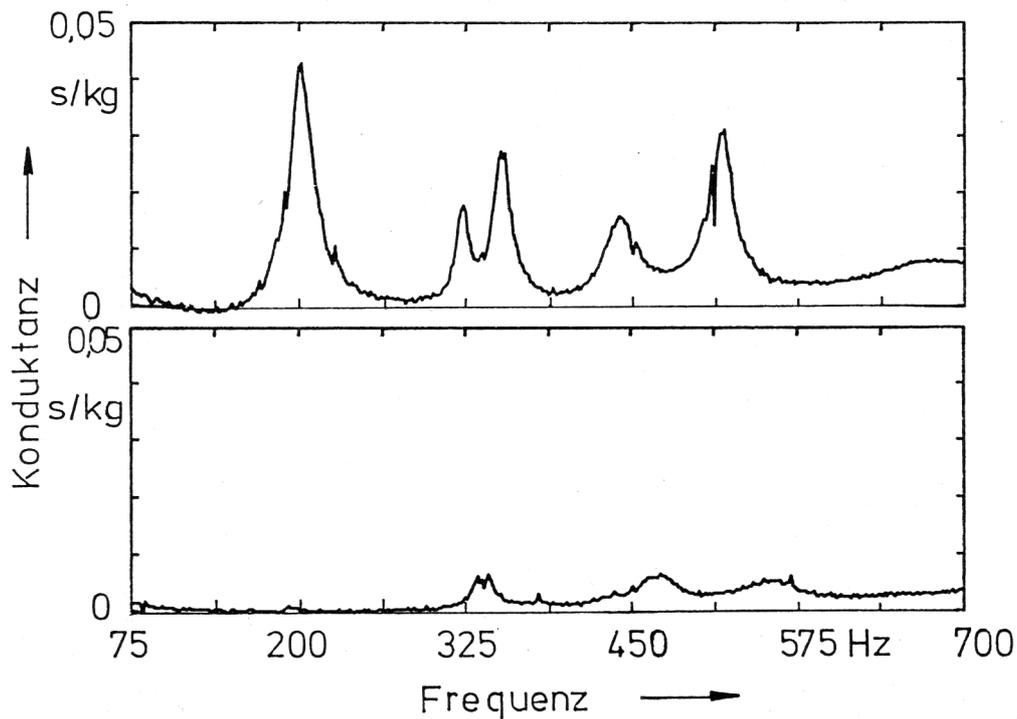


Fig. 58. Instrument Nr. 6 (Traveling Wilbury): Konduktanz am Sattel (oben) sowie am Steg (unten); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

6.2. Konduktanz längs des Halses

Die Ergebnisse des vorherigen Abschnittes haben gezeigt, dass für leer gespielte Saiten die Konduktanz am Hals in aller Regel größer als am Steg ist. Den Saiten bietet der Steg demzufolge ein potentiell weniger verlustbehaftetes Auflager, als dies der Hals tut. In vollem Umfang gilt dies für gut ausbalancierte Instrumente ohne Vibrato-Mechanismus, z.B. für die Gitarren Nr. 1 und 4. Es gilt in eingeschränktem Maße für weniger gut ausbalancierte Instrumente, wie z.B. Nr. 2 und 6 sowie für Gitarren, die einen Vibrato-Mechanismus haben. Das Instrument Nr. 3 kann dabei als ein "gutes" Beispiel, Nr. 5 dagegen als eine "schlechte" Ausnahme bezüglich der Stegkonduktanz gelten. In Hinsicht auf die Konduktanz kommt somit dem Hals erhöhte Aufmerksamkeit zu.

Die Konduktanz senkrecht zum Griffbrett wurde entlang des Halses nicht nur am Sattel, sondern auch an den anschließenden Bündeln gemessen. Die Ergebnisse, verkürzt als "Halskonduktanz" bezeichnet, werden mittels der 3D-Darstellung, die bereits in den Fig. 48 bis 51 verwendet worden ist, kompakt zusammengestellt. Einer ersten Auswertung dient die Schablone in Fig. 59. Einem Teil der Auflage liegt sie auf transparenter Unterlage bei. Sofern dies nicht der Fall sein sollte, empfiehlt es sich, die Schablone auf Folie zu kopieren. Man legt sie auf das Messdiagramm und kann ablesen, welche Konduktanz die betreffende Saite am Sattel bzw. am jeweiligen Bund vorfindet. Damit wird den Fällen Rechnung getragen, dass die Saite leer gespielt oder auch gegriffen wird. Um eine Überfrachtung zu vermeiden, sind in Fig. 59 nur die Grundtöne, nicht jedoch höhere Harmonische berücksichtigt.

Bereits in Voruntersuchungen (vgl. Fig. 46) hatte sich gezeigt, dass die Konduktanz am Sattel möglicherweise davon abhängt, ob in der Mitte, bei den Bass- oder bei den Diskantsaiten

gemessen wird. Um zu klären, welches Ausmaß diese laterale Abhängigkeit auf dem übrigen Griffbrett annehmen kann, wurden bei einigen Instrumenten entsprechende Experimente durchgeführt. Die Ergebnisse werden ohne Berücksichtigung von Einzelheiten eher global und mit Blick auf die Unterschiede verglichen, die für die einzelnen Saiten erkennbar werden. Die Vergleiche sollen die Frage klären, ob eine einzige Messung hinreichend Aufschluss über den Verlauf der Konduktanz längs des Halses geben kann, oder ob dafür eventuell mehrere Messungen notwendig sind.

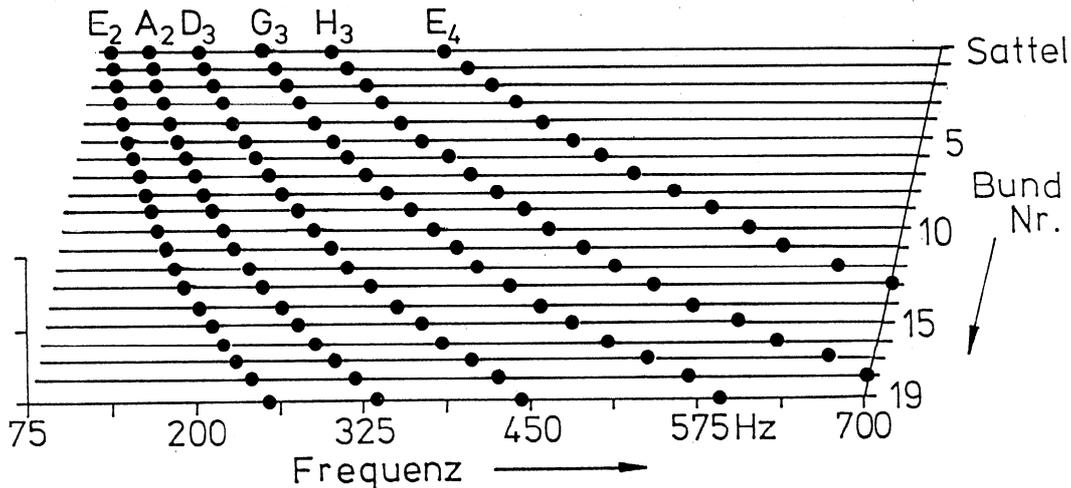


Fig. 59. Auswerteschablone für die Halskonduktanz;
die Punkte markieren die Frequenzen der Grundtöne der angegebenen Saiten am betreffenden Bund.

6.2.1. Halskonduktanz des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul)

Zwar ist die Symmetrie des Korpus der Gitarre Les Paul der Firma Gibson durch ein einseitiges cutaway gestört, das Wirbelbrett jedoch ist symmetrisch geformt. Wie Fig. 60 zeigt, führt dies offenbar dazu, dass sich - unabhängig davon, ob in der Mitte oder nahe den Rändern des Halses gemessen wird - jedes Mal nahezu die gleiche Konduktanz-Landschaft ausbildet. Die Diagramme, die sich auf einer Linie entlang des Halses bei den Basssaiten (oben), den mittleren Saiten (Mitte) und den Diskantsaiten (unten) ergeben, ähneln einander stark. Solange keine allzu hohen Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden, dürfte bei einem solchen Instrument mit symmetrischem Kopf eine einzige Messung - z.B. entlang der Mittellinie des Halses - ausreichen. Die darin enthaltene Information ermöglicht es, für alle sechs Saiten die Konduktanz hinreichend genau anzugeben.

6.2.2. Halskonduktanz des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer)

Diese erfreulich einfache Aussage lässt sich auf die nächste Gitarre nicht übertragen. Zwar stammt dieses Instrument ebenfalls von der Firma Gibson, ist aber äußerst asymmetrisch ausgebildet. Die Diagramme in Fig. 61, die sich auf jeweils eine Messung entlang des Halses zwischen den beiden Basssaiten (oben), mittleren Saiten (Mitte) bzw. Diskantsaiten (unten) beziehen, unterscheiden sich zum Teil deutlich voneinander. Die größten Diskrepanzen sind

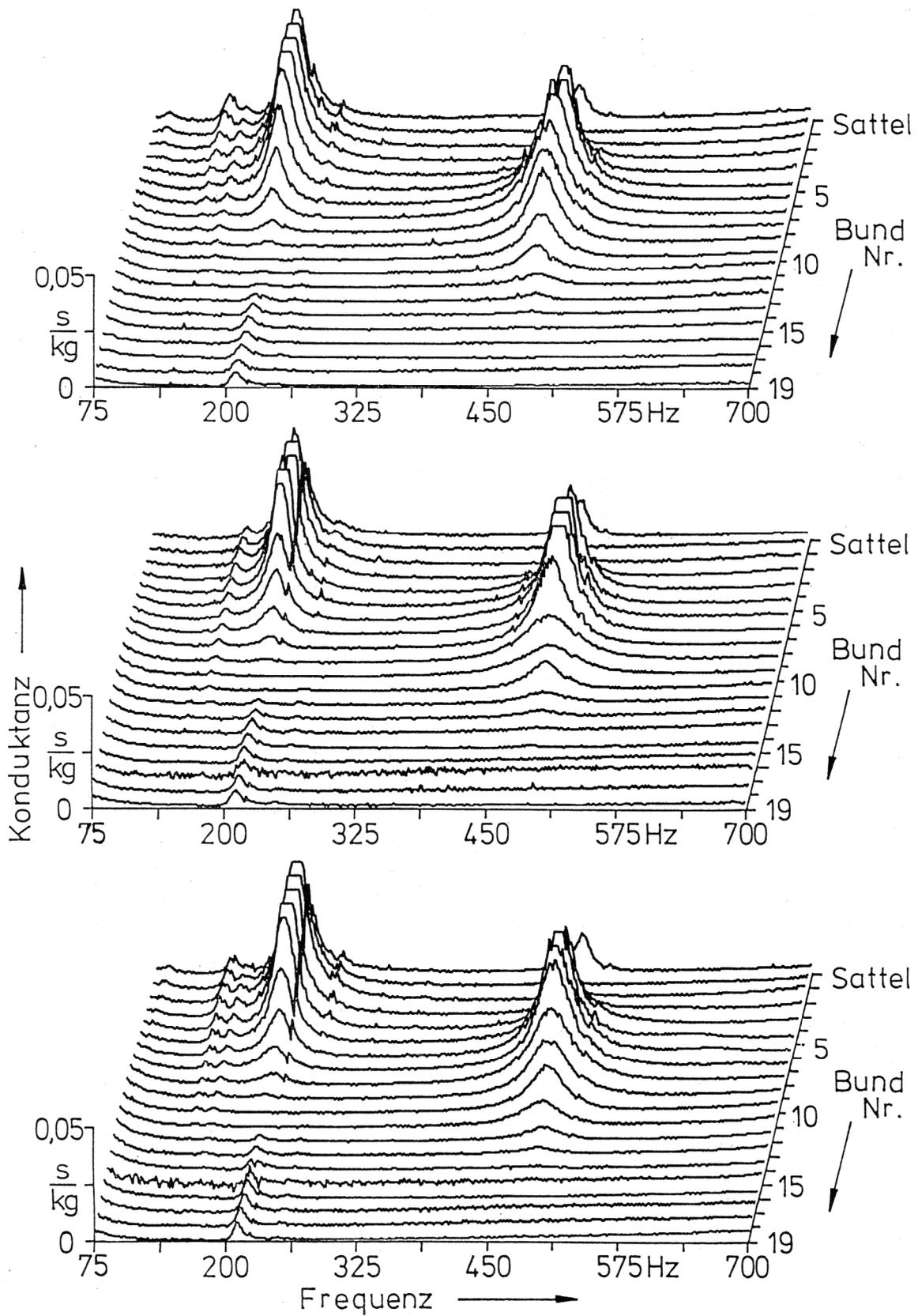


Fig. 60. Instrument Nr. 1 (Gibson Les Paul): Konduktanz (die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß) längs des Halses in Abhängigkeit von der Frequenz, gemessen zwischen E_2 - und A_2 -Saite (oben), zwischen D_3 - und G_3 -Saite (Mitte) bzw. zwischen H_3 - und E_4 -Saite (unten).

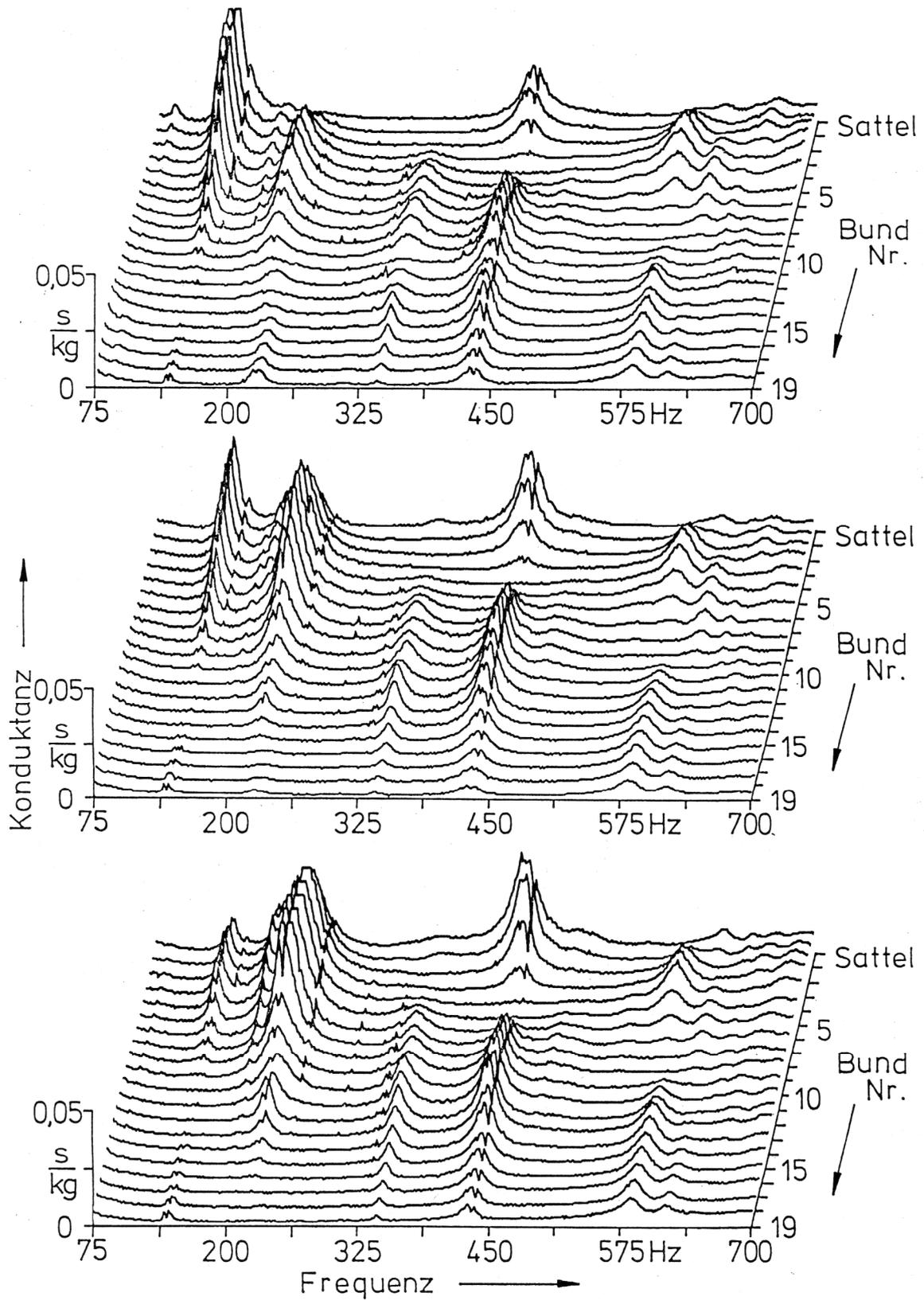


Fig. 61. Instrument Nr. 2 (Gibson Explorer): Konduktanz (die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß) längs des Halses, gemessen zwischen E₂- und A₂-Saite (oben), zwischen D₃- und G₃-Saite (Mitte) bzw. zwischen H₃- und E₄-Saite (unten).

bei den beiden linken Höhenzügen in den tiefen und mittleren Lagen zu beobachten. Deren erster (bei etwa 140 Hz) prägt sich am deutlichsten für die Basssaiten und am schwächsten für die Diskantsaiten aus. Genau das Gegenteil gilt für den zweite Höhenzug bei etwa 220 Hz, der für die Diskantsaiten wesentlich höhere Werte als für die Basssaiten erreicht. Bei der Messung entlang der Mittellinie des Halses (mittleres Diagramm) erweisen sich beide Höhenzüge als etwa gleich hoch. Aus dem mittleren Diagramm lassen sich zwar qualitative Erkenntnisse schöpfen. Quantitative Schlüsse von der Konduktanz, die längs der Mittellinie gemessen worden ist, auf diejenige für die Bass- oder Diskantsaiten sind jedoch nur innerhalb einer großzügigen Fehlermarge möglich.

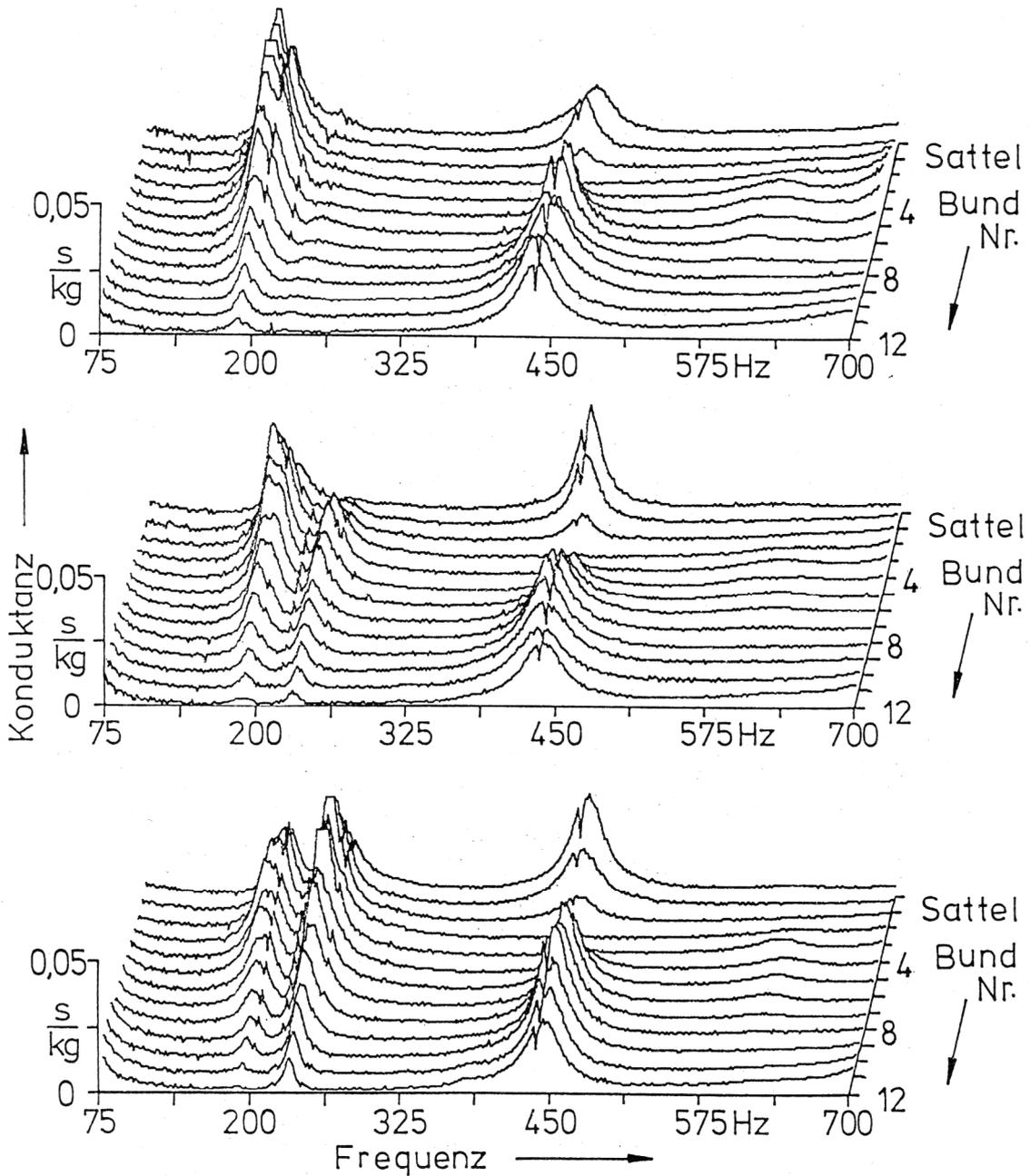


Fig. 62. Instrument Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß): Konduktanz (die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß) längs des Halses, gemessen zwischen E_2 - und A_2 -Saite (oben), zwischen D_3 - und G_3 -Saite (Mitte) bzw. zwischen H_3 - und E_4 -Saite (unten).

6.2.3. Halskonduktanz des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)

Da sich in den hohen Lagen keine wesentlichen Unterschiede zeigen, wurden die weiteren Messungen dieser Serie auf den Sattel und die ersten 12 Bünde beschränkt. Fig. 62 bezieht sich wiederum auf ein Instrument mit asymmetrischem Kopf, dieses Mal vom Stratocaster-Typ. Erwartungsgemäß ergibt sich längs des Halses ein anderer Verlauf, wenn zwischen den Basssaiten (oben) gemessen wird, als wenn die Konduktanz zwischen den mittleren Saiten (Mitte) bzw. Diskantsaiten (unten) abgetastet wird. Große Diskrepanzen treten auch hier bei den beiden ersten Gebirgszügen auf. Der erste Höhenzug bei etwa 190 Hz prägt sich am deutlichsten auf der Seite der Basssaiten und am schwächsten bei den Diskantsaiten aus. Das Umgekehrte gilt für den zweiten Höhenzug bei etwa 240 Hz. Dieser ist auf der Seite der Diskantsaiten wesentlich höher als bei den Basssaiten. Auch bei diesem asymmetrischen Instrument vermittelt die Messung entlang der Hals-Mittellinie zwar einen Eindruck vom prinzipiellen Verlauf, repräsentiert jedoch nur bedingt auch im Detail die Konduktanz, wie sie die äußeren Saiten vorfinden.

6.2.4. Halskonduktanz des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet)

Die in Fig. 63 zusammengestellten Ergebnisse umfassen ebenfalls neben dem Sattel die ersten zwölf Bünde. Die Gitarre Squier Bullet hat ein ähnlich asymmetrisches Wirbelbrett wie die vorher betrachtete Stratocaster-Gitarre. Demzufolge ist damit zu rechnen, dass auch hier der Konduktanzverlauf längs des Halses davon abhängen wird, ob in der Mitte oder ob nahe einem der Ränder gemessen wird. Diese Erwartung bestätigt sich: Die größten Diskrepanzen liefert die Messung zwischen den beiden Basssaiten (oben) im Vergleich zu derjenigen zwischen den Diskantsaiten (unten). Während bei den Basssaiten der erste Gebirgszug bei etwa 170 Hz dominiert, prägt sich am gegenüber liegenden Rand, d.h. bei den Diskantsaiten, der zweite Gebirgszug bei etwa 210 Hz ganz deutlich aus. Insbesondere in den tiefen Lagen zeigen sich Unterschiede ebenfalls für den mehrfach "zerklüfteten" Gebirgszug bei etwa 420 Hz.

Auch hier bestätigt sich, dass bei Instrumenten mit asymmetrischem Wirbelbrett (Nr. 2 bis 5) eine Messung entlang der Mittellinie des Halses nur einen Teil der Wahrheit offenbart. Die Schwingungsuntersuchungen (vgl. Abschnitt 4.7) haben gezeigt, worin der Grund hierfür zu suchen ist: Hals und Kopf führen neben Schwingungen nach Art eines Balkens auch Torsionsschwingungen aus. Offenbar gewinnt die Torsion gegenüber der Biegung umso mehr an Gewicht, je mehr die Symmetrie des Halses durch ein nicht spiegelbildlich geformtes Wirbelbrett gestört ist. Da der Hals sich dann nicht nur verbiegt, sondern auch verdrillen kann, muss damit gerechnet werden, dass die Konduktanz an den Rändern des Griffbretts von derjenigen in der Mitte abweicht.

Naturgemäß ist man daran interessiert, mit möglichst geringem Aufwand hinreichend Aufschluss über die Konduktanz zu erhalten, die jede der sechs Saiten an ihrem halsseitigen Auflager "fühlt". Dafür wird bei Instrumenten mit asymmetrischem Kopf wegen der höheren Neigung zur Torsion in den seltensten Fällen eine einzige Messreihe genügen. Im Gegensatz dazu sprechen die bisherigen Erfahrungen dafür, dass die Verhältnisse bei Instrumenten mit symmetrischem Wirbelbrett (Nr. 1 und 6) einfacher liegen. Die Neigung zur Torsion und die daraus resultierende laterale Abhängigkeit ist offenbar hier in aller Regel so gering, dass eine einzige Messung längs des Halses ausreicht. So kann die auf der Mittellinie gemessene Konduktanz als weitgehend repräsentativ für alle sechs Saiten gelten.

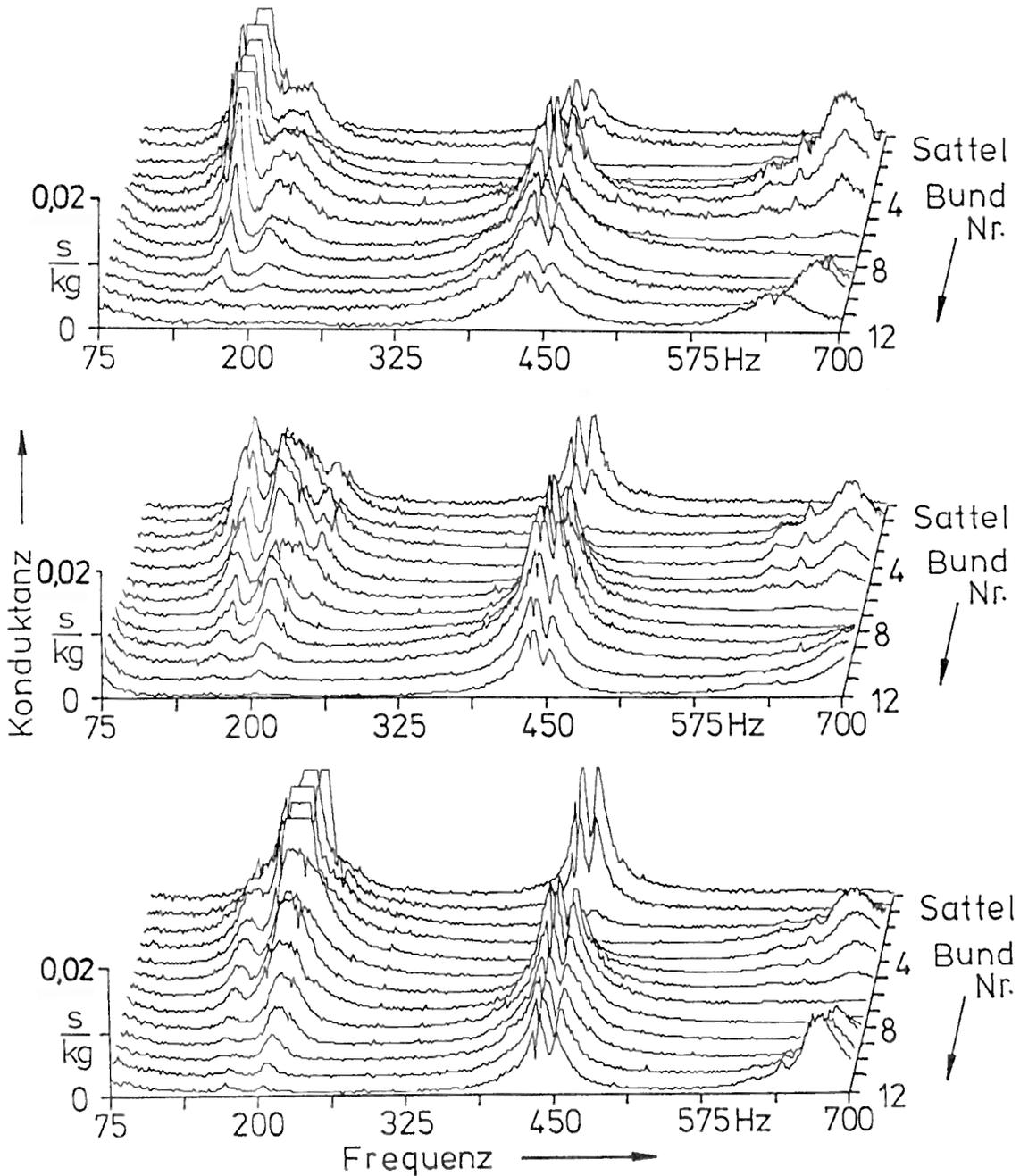


Fig. 63. Instrument Nr. 5 (Squier Bullet): Konduktanz längs des Halses, gemessen zwischen E_2 - und A_2 -Saite (oben), zwischen D_3 - und G_3 -Saite (Mitte) bzw. zwischen H_3 - und E_4 -Saite (unten).

6.3. Konduktanz entlang der Mittellinie des Halses

In diesem Abschnitt sind die Griffbrettkonduktanzen sämtlicher sechs Gitarren, gemessen vom Sattel bis zum 18. bzw. 19. Bund, zusammengestellt. Da die Messpunkte stets zwischen die D_3 - und G_3 -Saite, also auf die Mittellinie des Halses, gelegt wurden, wird das Ergebnis kurz als "Halsmitten-Konduktanz" bezeichnet. Die Resultate gelten zunächst für die unmittelbar benachbarten, d.h. die beiden mittleren Saiten. Inwieweit die gemessene Konduktanz re-

präsentativ für die übrigen Saiten ist, hängt von der Bauweise des Wirbelbretts ab. Wie im vorherigen Abschnitt ausgeführt, ist bei asymmetrischem Kopf damit zu rechnen, dass infolge überlagerter Torsion die Konduktanz an den Rändern des Halses von derjenigen in der Mitte abweicht. Bei solchen Instrumenten ist die Halsmitten-Konduktanz nur sehr eingeschränkt auf die Bass- und Diskantsaiten übertragbar. Dagegen spielt bei Instrumenten mit spiegelbildlich geformtem Kopf die Torsion des Halses eine so geringe Rolle, dass die Halsmitten-Konduktanz als gültig für alle sechs Saiten anzusehen ist. Wie groß die Konduktanz ist, die sich der Grundschwingung einer Saite am Sattel bzw. an einem Bund bietet, lässt sich mit Hilfe der Schablone von Fig. 59 ablesen. Aus den oben genannten Gründen beschränkt sich die Auswertung im Folgenden generell auf die D_3 - und G_3 -Saite.

6.3.1. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 1 (Gibson Les Paul)

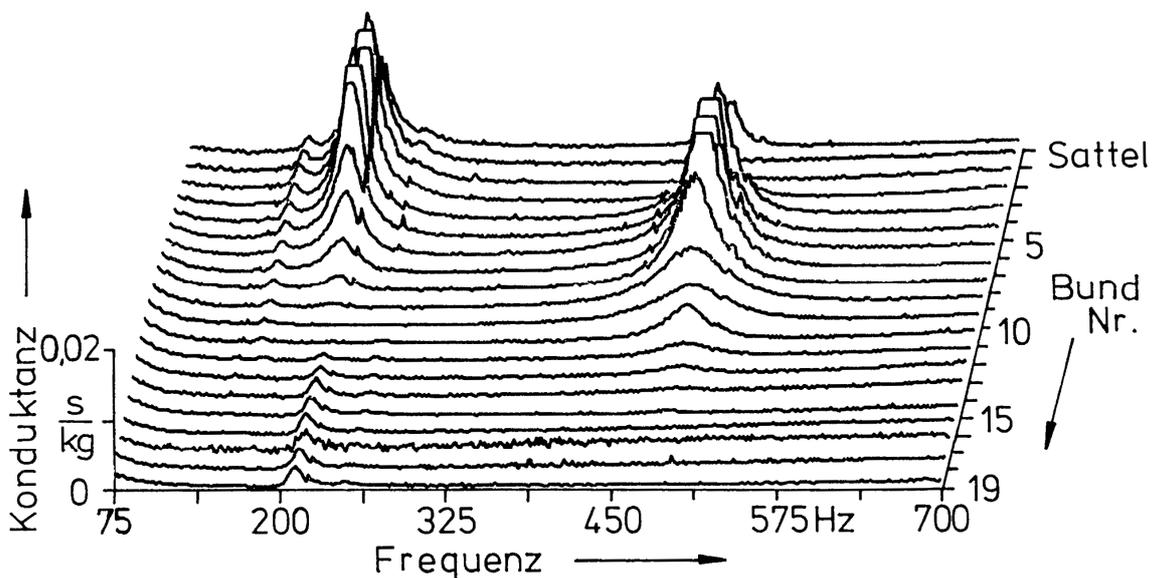


Fig. 64. Halskonduktanz als Funktion der Frequenz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 19 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 1 (Gibson Les Paul).

Die Konduktanz-Landschaft von Fig. 64, die sich für die Gitarre Les Paul ergibt, ist gekennzeichnet durch sehr wenige und sehr schmale Höhenzüge. Wenn man die Auswerteschablone auflegt, so wird deutlich, dass die Konduktanz auf der D_3 -Saite zwischen etwa dem 1. und 7. Bund ziemlich große Werte annimmt. Für die G_3 -Saite ist dies dann der Fall, wenn sie leer gespielt oder am 1. bis 4. Bund gegriffen wird. Werden diese Saiten an den betreffenden Stellen gespielt, dann ist zu erwarten, dass die Grundtöne besonders rasch abklingen.

6.3.2. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 2 (Gibson Explorer)

Wie Fig. 65 zeigt, ist für die Gitarre Explorer desselben Herstellers die Landschaft mit nicht ganz so hohen, dafür aber mit wesentlich mehr Konduktanz-Höhenzügen belegt. Für die D_3 -Saite bewirkt dies, dass die Konduktanz in den tiefen Lagen bis etwa dem 8. Bund sehr große Werte erreicht; für dieselbe Saite trifft dies außerdem am 14. und am 18. Bund zu. Auf der

G₃-Saite ist die Halskonduktanz dann besonders groß, wenn sie am 2. oder 3. Bund, in der Nähe des 10. Bundes bzw. in den hohen Lagen etwa am 19. Bund gegriffen wird.

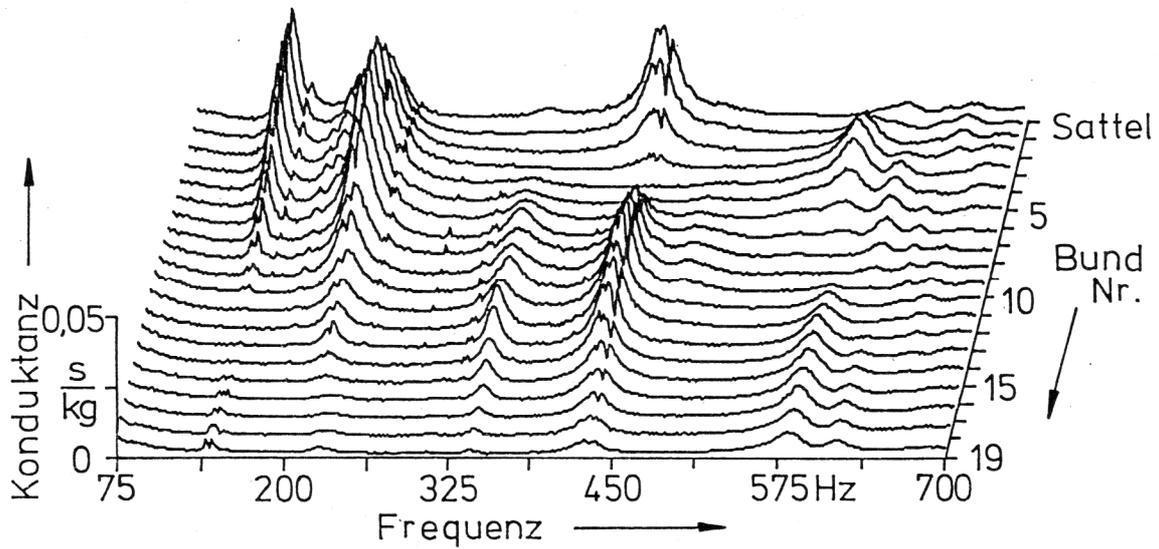


Fig.65. Halskonduktanz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 19 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 2 (Gibson Explorer);
die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

6.3.3. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV)

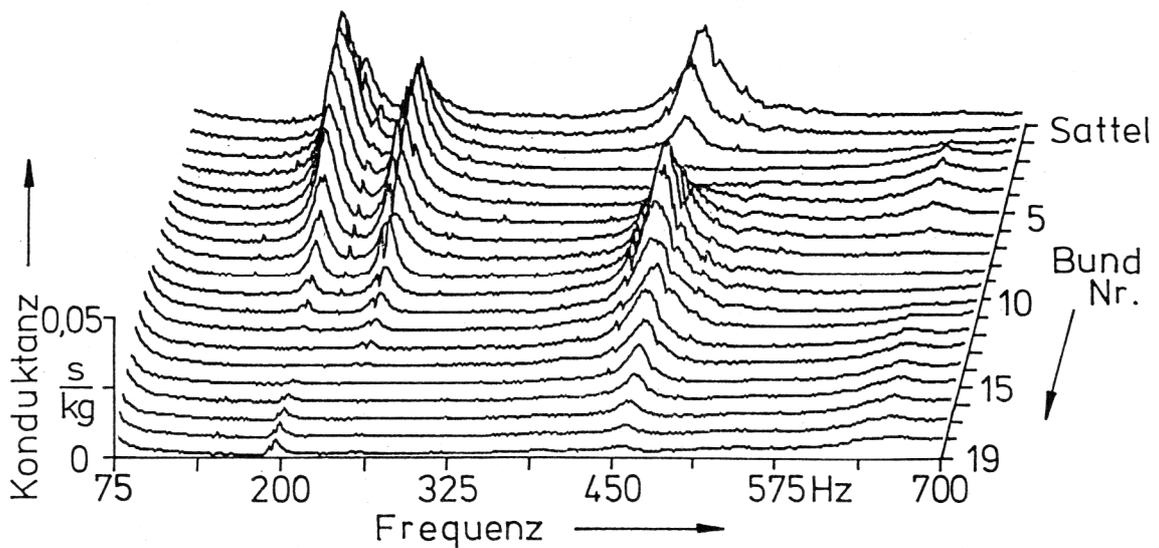


Fig.66. Halskonduktanz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 19 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 3 (Fender Stratocaster SRV);
die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Bei der Fender-Gitarre Stratocaster SRV nimmt gemäß Fig. 66 die Konduktanz für den Grundton jeweils besonders große Werte an, wenn der Spieler die D₃-Saite am 3. bis 6. Bund sowie am 9. Bund greift. Für die G₃-Saite ist eine hohe Konduktanz zu erwarten in den tiefen Lagen bis etwa zum 5. Bund, um den 14. und 15. Bund sowie in den hohen Lagen.

6.3.4. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß)

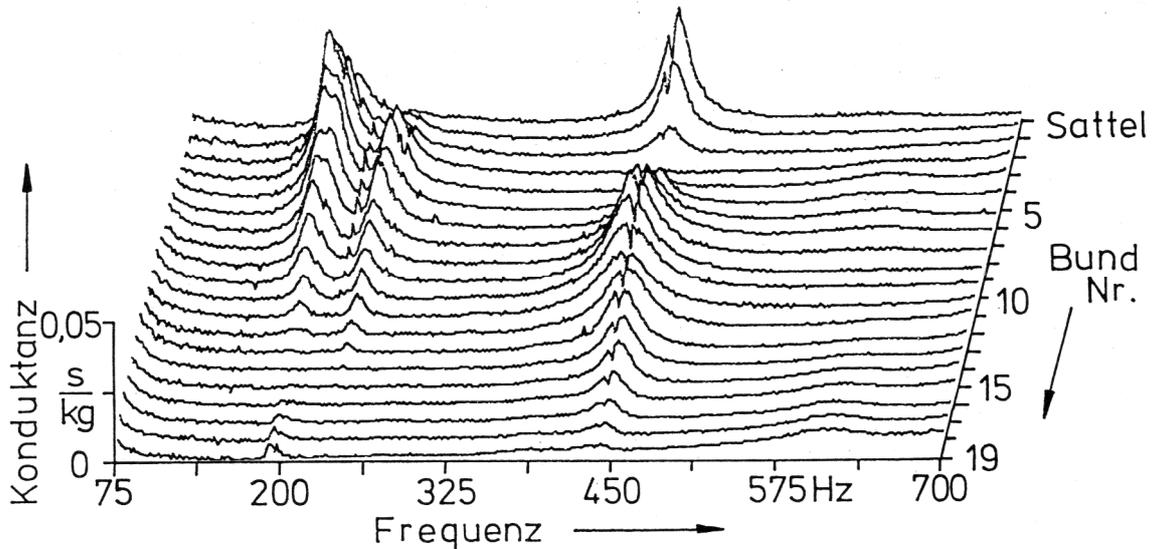


Fig. 67. Halskonduktanz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 19 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß); die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Da die weiße Stratocaster-Gitarre Nr. 4 vom gleichen Typ wie das eben betrachtete Instrument Nr. 3 ist, ähneln die Konduktanz-Landschaften in Fig. 66 und 67 sich erwartungsgemäß stark. Demzufolge sind hohe Werte der Konduktanz an etwa den gleichen, eventuell minimal zum Sattel hin verschobenen Stellen auf dem Griffbrett zu erwarten, an denen man sie auch bei der im vorherigen Abschnitt behandelten Gitarre Stratocaster SRV beobachtet.

6.3.5. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 5 (Squier Bullet)

Das oben Gesagte gilt in eingeschränktem Maße ebenfalls für die Gitarre Squier Bullet, die von ähnlicher Bauart wie die zwei Stratocaster-Instrumente ist. Der direkte Vergleich der Konduktanz-Landschaft in Fig. 68 beispielsweise mit der in Fig. 66 zeigt Ähnlichkeiten in Hinsicht auf die drei dominierenden Höhenzüge und deren Verlauf längs des Halses. Bei der Squier-Gitarre Nr. 5 sind diese Höhenzüge jedoch etwas nach links verschoben, d.h. sie bilden sich bei etwas tieferen Frequenzen als bei der Stratocaster-Gitarre Nr. 3 aus. Zudem zeigen sich diese Höhenzüge, die bei den Stratocaster-Instrumenten auf schmale Frequenzbänder beschränkt sind, bei der Squier-Gitarre weniger scharf begrenzt und erscheinen "verschmiert". Demzufolge ergeben sich hohe Werte der Konduktanz für einen Bereich von Griffpositionen, der etwas in Richtung des Sattels verschobenen sowie weiter ausgedehnt ist. Für den Grundton wird die Konduktanz besonders groß, wenn die D₃-Saite am 1. bis etwa 7. Bund gegriffen

wird. Eine hohe Konduktanz ist für die G₃-Saite zu erwarten vor allem in den tiefen Lagen bis etwa zum 5. Bund, in der Umgebung des 13. Bundes sowie in den ganz hohen Lagen.

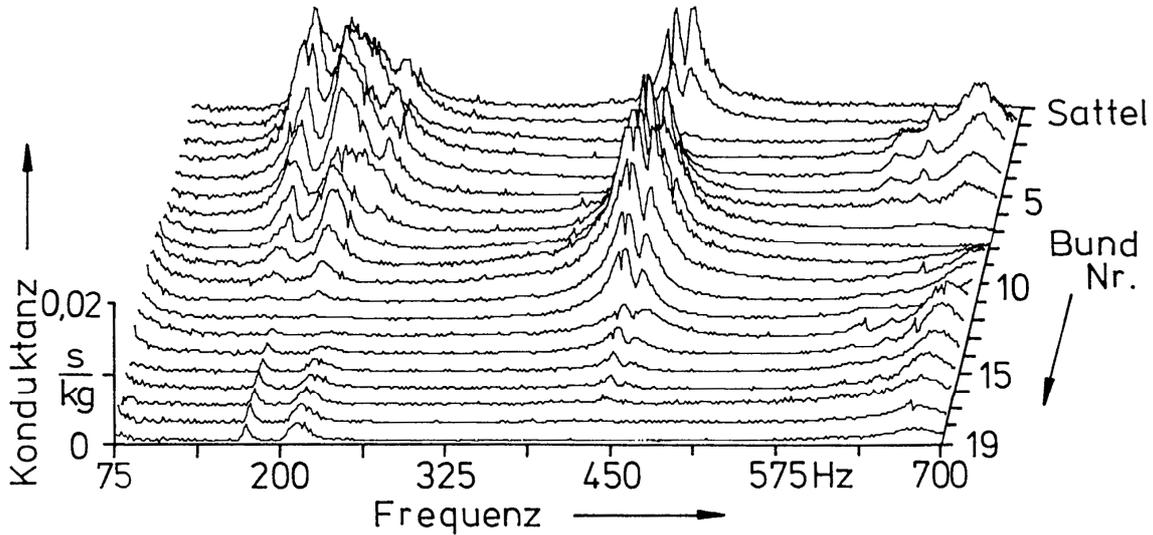


Fig.68. Halskonduktanz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 19 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 5 (Squier Bullet).

6.3.6. Halsmitten-Konduktanz des Instruments Nr. 6 (Traveling Wilbury)

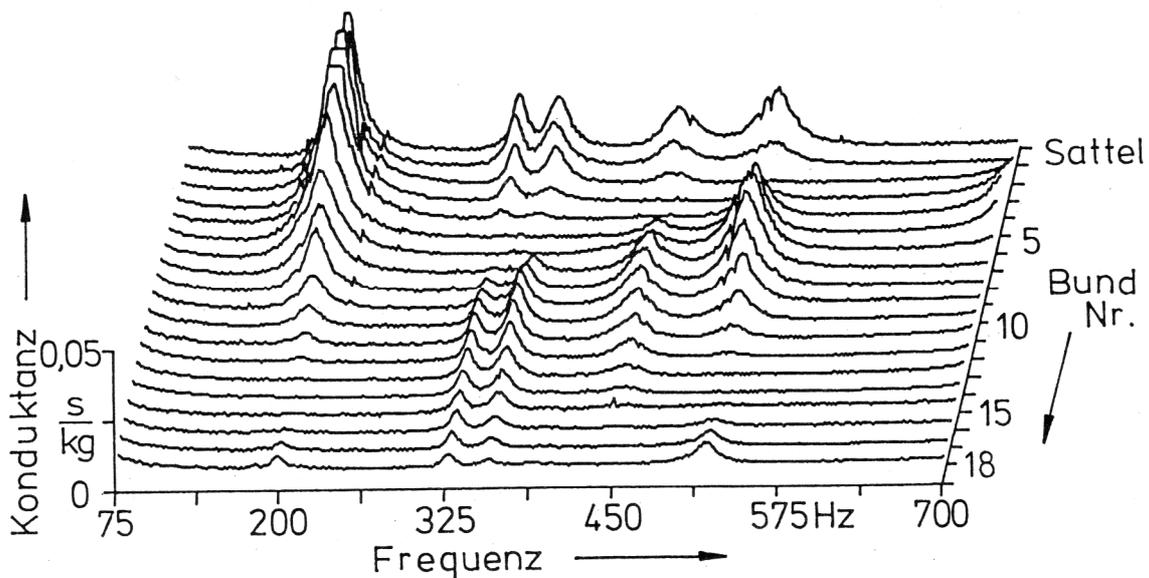


Fig.69. Halskonduktanz, gemessen senkrecht zum Griffbrett am Sattel und an den Bünden 1 bis 18 entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 6 (Traveling Wilbury); **die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!**

Im Gegensatz zu den anderen Instrumenten weist das Griffbrett der Gitarre Nr. 6 nur 18 Bünde auf. Dem Diagramm in Fig. 69 kann mit Hilfe der Schablone entnommen werden, dass für die Grundtöne die Konduktanz auf der D₃-Saite zwischen dem 2. und 6. Bund sowie am 13. bis 15. Bund besonders groß ist. Auf der G₃-Saite nimmt sie hohe Werte in der tiefen Lage vom Sattel bis zum 3. Bund, um den 9. Bund und 17. Bund an.

6.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die hier beschriebenen Reihenmessungen an sechs Instrumenten haben gezeigt, dass in aller Regel die Saiten einer sorgfältig gefertigten solid-body-Gitarre am halsseitigen Auflager eine deutlich höhere Konduktanz vorfinden als am Steg. Im Spielbetrieb werden die Saiten in der Mehrzahl der Fälle nicht leer - d.h. in voller Länge zwischen Steg und Sattel schwingend - gespielt, sondern dadurch verkürzt, dass der Spieler sie an den Bünden greift. Um diese Spielweise zu erfassen, wurde die Halskonduktanz nicht nur am Sattel, sondern auch auf dem Griffbrett an den Bünden gemessen. Da bei diesem Experiment das Instrument von einer Person im spielbereiten Zustand, d.h. mit aufgespannten Saiten, gehalten wurde, kann nur entlang der Lücke zwischen zwei Saiten gemessen werden. Führt man solche Messungen längs des Griffbretts in parallelen Linien einmal zwischen den tiefen Bass-, einmal zwischen den mittleren und einmal zwischen den hohen Diskantsaiten durch, so können sich Unterschiede ergeben. Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese Unterschiede dann groß sind, wenn das Instrument ein asymmetrisches Wirbelbrett hat und sich den Biege-Grundschrwingungen des Halses zusätzliche Torsionsschwingungen überlagern. Die lateralen Unterschiede sind gering bei Instrumenten, deren Wirbelbrett spiegelsymmetrisch geformt ist. Der Hals schwingt dann im Wesentlichen wie ein Balken, so dass an einem vorgegebenen Bund alle sechs Saiten weitgehend die gleiche Randbedingung vorfinden. Ein asymmetrisches Wirbelbrett lässt dagegen erwarten, dass die Halsmitten-Konduktanz nur bedingt Aussagen über die Randbedingung zulässt, welche die Bass- oder Diskantsaiten vorfinden.

Von dieser Randbedingung an den Auflagern der Saiten interessiert im hier betrachteten Zusammenhang vor allem der Dämpfungsanteil, die Konduktanz. Diese wurde bei allen Gitarren zumindest entlang der Mittellinie des Halses gemessen und als eine Art Landschaft dargestellt. Mittels der beigegefügtten Schablone ist es möglich, diejenigen Stellen auf dem Griffbrett aufzufinden, an denen das Instrument der Grundschrwingung einer Saite eine besonders hohe Konduktanz bietet. Darüber hinaus lässt sich angeben, wie groß die Konduktanz ist. Die Kenntnis dieses Messwertes ist notwendige Voraussetzung dafür, dass in einer nachfolgenden Rechnung abgeschätzt werden kann, wie schnell die Grundschrwingung der Saite abklingt. Es stellt keine prinzipielle Schwierigkeit dar, diese Überlegungen vom Grundton, der bisher betrachtet wurde, sinngemäß auf höhere Harmonische auszudehnen.

7. ABSCHLUSSDISKUSSION

Die Objekte der vorliegenden Studie sind elektrische solid-body-Gitarren. Diese unterscheiden sich von akustischen Gitarren bereits auf den ersten Blick durch den Korpus. Verglichen mit dem "Resonanz"-Körper einer akustischen Gitarre, der voluminös, hohl und dünnwandig ist, ist der Korpus einer E-Gitarre kleiner und vor allem aus Vollmaterial gefertigt. Für die Schwingung einer Saite bedeutet dies, dass das Auflager am Steg bei einem solid-body-Instrument weit weniger beweglich sein wird, als diese bei einer akustischen Gitarre der Fall ist.

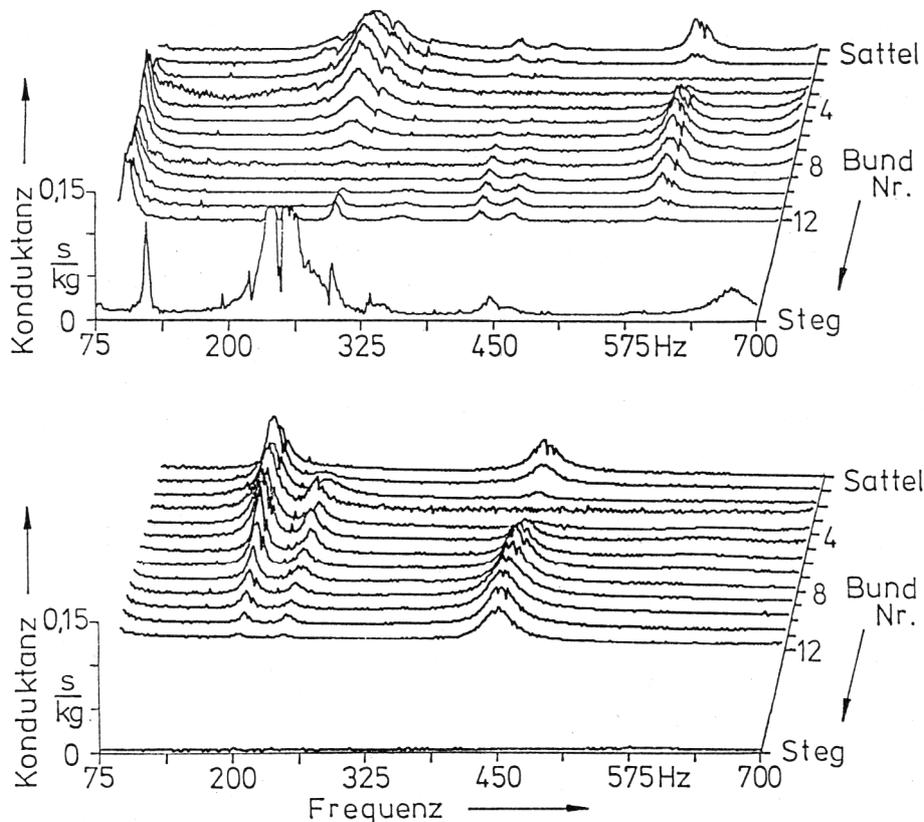


Fig.70. Konduktanz, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts (Sattel und Bünde 1 bis 12) sowie am Steg
oben: einer akustischen Gitarre (Wandergitarre II; Instrument Nr. 6a nach Fleischer 1998a) bzw.
unten: der elektrischen Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß);

die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß, d.h. der Skalenendwert ist 0,05 s/kg!

Ein bewegliches Auflager kann die Schwingung einer Saite auf verschiedene Arten beeinflussen, je nachdem ob es als Feder, Masse oder Dämpfer wirkt. Im Blickpunkt der vorliegenden Studie ist, wie schnell die Saitenschwingung abklingt. Demzufolge kommt den Dämpfer-Eigenschaften des Auflagers die größte Bedeutung zu. Diese lassen sich zielführend durch den Realteil der Punkt-Admittanz, die Konduktanz, kennzeichnen. Die Konduktanz kann mittels einer einfachen Vorrichtung gemessen werden, während eine Person das Instrument hält. Messorte sind die Auflager der Saiten, d.h. zum einen der Steg und zum anderen das Griffbrett. Fig. 70 zeigt zwei Ergebnisse solcher Messungen.

In Fig. 70 werden die grundlegenden Unterschiede zwischen akustischen und elektrischen Gitarren im Hinblick auf die Auflager deutlich. Der obere Teil der Diagramme zeigt, dass auf dem Hals die Abweichungen nicht so erheblich sind. Die Form und Lage der Höhenzüge lässt daraus schließen, dass die zugrunde liegenden Schwingungsformen eng verwandt sind. Da der Hals einer akustischen Gitarre (oben) dicker und kürzer als derjenige einer E-Gitarre (unten) ist, treten vergleichbare Schwingungsformen gemäß Gl. (3) bei etwas höheren Frequenzen auf. Die Konduktanz erreicht bei beiden Gitarren Maximalwerte um $0,02 \text{ s/kg}$, bei der akustischen Gitarre etwas weniger, bei der elektrischen Gitarre etwas mehr. Für den Steg (unten im Diagramm) zeigt sich jedoch eine fundamentale Diskrepanz: Während die Saiten der akustischen Gitarre am Steg Konduktanzwerte von mehr als $0,05 \text{ s/kg}$ vorfinden können, überschreitet die Konduktanz am Steg der elektrischen Gitarre im untersuchten Bereich niemals den Wert $0,001 \text{ s/kg}$. Auch wenn dieser Gegensatz nicht immer so ausgeprägt ist, zumal wenn die E-Gitarre einen Vibrato-Mechanismus besitzt, so lässt sich doch aussagen, an welchem Auflager die Saite eine größere Konduktanz "fühlt". Während dies bei der akustischen Gitarre der Steg ist, gilt für die E-Gitarre das Gegenteil. Bei einer gut gemachten solid-body-Gitarre findet sich die größere Konduktanz in aller Regel auf dem Hals. Daraus folgt, dass vor allem der Konduktanz auf dem Griffbrett einer E-Gitarre größte Aufmerksamkeit gebührt.

Hohe Konduktanz setzt hohe Beweglichkeit des Halses voraus. Die Ursache dafür wird deutlich, wenn man das "Eigenleben" der Gitarre in Hinsicht auf Schwingungen studiert. Entgegen dem ersten Eindruck erweist sich der Instrumentenkörper keineswegs als starr, sondern als durchaus schwingfreudig. Da die Untersuchungen der Schwingung ebenso wie die der Konduktanz *in situ* durchgeführt wurden, d.h. während eine Person die Gitarre in Spielhaltung auf dem Schoß hielt, sind die Messergebnisse weitgehend kompatibel. Ein prinzipieller Unterschied bestand allerdings darin, dass bei der Schwingungsmessung die Anregung ortsfest war. Sofern der Anregungsort mit einem Schwingungsknoten zusammenfiel, wurde die zugehörige Schwingungsform nicht angeregt. Bei der Messung der Konduktanz wanderte die Anregung dagegen zum jeweiligen Messort mit. Demnach ist zu erwarten, dass die Ergebnisse der Konduktanz-Messung in dieser Hinsicht umfassender sein werden als diejenigen einer Untersuchung, bei der mehr oder weniger willkürlich ein Anregungsort gewählt werden muss. Darüber hinaus können Auflagerverluste nicht nur durch Abfließen von Energie in den mit-schwingenden Instrumentenkörper zustande kommen. Insbesondere ein schlecht eingestellter Vibrato-Mechanismus kann durchaus dämpfend wirken, ohne dass dies durch eine Schwingungsmessung nachweisbar wäre. Eine Messung der Konduktanz am Auflagepunkt der Saite legt auch diese Ursache möglicher Verluste offen.

Das Beispiel von Fig. 71 illustriert die Zusammenhänge zwischen Konduktanz und Schwingung. Die Konduktanz am Sattel und am Hals des Instruments Nr. 4, wie sie aus Fig. 66 bekannt ist, ist durch die Schwingungsbilder des Instrumentenkörpers ergänzt, die bereits in Fig. 11 dargestellt waren. Im betrachteten Frequenzbereich bilden sich insgesamt drei Schwingungen ab. Die beiden ersten basieren auf derselben Balkenschwingung der Ordnungszahl $j = 2$; vgl. Abschnitt 4.7. Überlagerte Torsion spaltet die Grundschiwingung in zwei Mischformen bei etwa 190 Hz und etwa 230 Hz auf. In der Konduktanz-Landschaft auf dem Griffbrett weist jeder der beiden daraus resultierenden Höhenzüge ein Minimum auf, das einen Schwingungsknoten widerspiegelt. Ein dritter Höhenzug rührt von der Schwingung der Ordnungszahl $j = 3$ her. Auf dem Griffbrett hat die zugehörige Schwingungsform insgesamt zwei Knoten, die sich als Minima der Konduktanz äußern. Kleinere Diskrepanzen bezüglich der Frequenzen, bei denen die Schwingamplitude bzw. die Konduktanz maximal wird, können ihre Ursache in einer unterschiedlichen Beeinflussung durch die linke Hand der Person haben. Bei der Schwingungsmessung umfasste diese Hand den Hals des Instruments stets an derselben Stelle, meist in der Nähe des 3. Bundes. Als die Konduktanz gemessen wurde, wanderte dagegen die Hand stets mit und hielt den Hals nahe demjenigen Bund, an dem eben

gemessen wurde. Damit sollte nachgebildet werden, dass die Griffhand beim Spielen in unterschiedlichen Lagen den Hals auch an unterschiedlichen Stellen umfasst. Mögliche Frequenzabweichungen erwiesen sich aber nie als so groß, dass sie den Blick auf die eindeutige Korrelation von Schwingung und Konduktanz hätten trüben können.

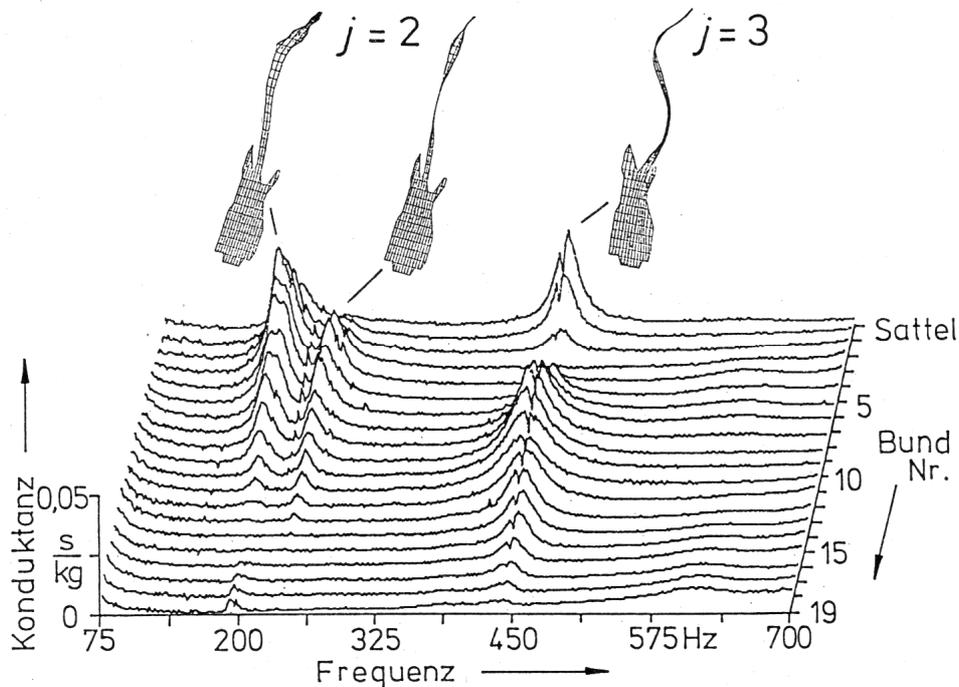


Fig. 71. Halskonduktanz, gemessen entlang der Mittellinie des Griffbretts der Gitarre Nr. 4 (Fender Stratocaster, weiß) mit den zugehörigen Schwingungsformen des Gitarrenkörpers; die Zahlenwerte sind um den Faktor 3 zu groß!

Mit Blick auf die Grundfrequenzen, mit denen die sechs Saiten einer normal gestimmten Gitarre schwingen, wurde der Messbereich zunächst auf Frequenzen bis 500 Hz (Korpusschwingung) bzw. 750 Hz (Konduktanz) beschränkt. Aus dieser Beschränkung auf das Wesentliche darf nicht geschlossen werden, dass höheren Harmonischen des Saitenklanges keine Bedeutung zugemessen wird. Sollte sich im Verlaufe weiterer Untersuchungen zeigen, dass höherfrequente Teiltöne von wesentlicher Bedeutung sind, so könnte sich dieser Frequenzbereich durchaus als zu eng erweisen. Es bedeutet dann keinerlei prinzipielle Schwierigkeit, mit dem vorhandenen Messaufbau die obere Frequenzgrenze zu verschieben und auch den Obertonbereich hoher Gitarrentöne zu erfassen.

Vergleicht man den Aufwand der unterschiedlichen Verfahren und die Praxisrelevanz der Ergebnisse, so lässt sich Folgendes feststellen:

- Die Messung der Schwingung mit dem Vibrometer ist aufwendiger und dauert länger. Sie vermittelt einen Überblick über die Bewegung der Gesamtstruktur. Dies erleichtert und vertieft das Verständnis der Hintergründe, liefert in gewisser Hinsicht aber mehr Information, als für die gestellte Aufgabe relevant ist.
- Die Konduktanz-Messung ermöglicht innerhalb kurzer Zeit und ohne großen Aufwand "objektorientierte" Aussagen im Hinblick auf die Dämpfung, die eine Saite an ihren beiden

Auflagern erfährt. Durch die Konduktanz lassen sich zielgerichtet die frequenzabhängigen Dämpfer-Eigenschaften der Auflager quantitativ kennzeichnen. Ihre Kenntnis stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine realistische Beurteilung des Ausmaßes dar, in dem Energie von der Saite in den Korpus abfließt.

Insbesondere im Lichte der übergeordneten Aufgabenstellung, das Abklingen von Gitarrentönen zu untersuchen, erscheint die *in-situ*-Messung der Konduktanz als gut geeignet und aussichtsreich. Da sich gezeigt hat, dass bei gut gefertigten Instrumenten die Konduktanz am korpusseitigen Ende der Saite in aller Regel deutlicher kleiner als am halsseitigen Auflager ist, kommt der Griffbrett-Konduktanz eine Schlüsselrolle zu. Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen wird in einem nachfolgenden Bericht abgeschätzt werden, welche Einflüsse das Abklingen der Saiten der E-Gitarre bestimmen und welche Rolle dabei insbesondere die Beweglichkeit des Halses spielt.

Der Autor dankt Frau Dipl.-Phys. Sieglinde Iosif sowie Dipl.-Ing. Karin Danneberg für das Überarbeiten des Manuskripts. Dank gebührt auch Herrn Dr.-Ing. Tilmann Zwicker für die enge Kooperation und viele fruchtbare Diskussionen zwischen dem Praktiker und dem Theoretiker. Den Herren Martin und Tobias Fleischer sei dafür gedankt, dass sie Teile ihres Instrumentenfundus für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben.

Berichtigung

Bei einer Kalibrierung am 18.03.2004 wurde festgestellt, dass in Folge eines dejustierten Messgerätes sämtliche Admittanzen und Konduktanzen um etwa den Faktor 3 zu groß angegeben sind. Dies bezieht sich in diesem Bericht auf die meisten der Zahlenangaben ab Seite 49. Im Text der vorliegenden zweiten Auflage wurden die Zahlenwerte korrigiert. In den Bildunterschriften jeweils ist ein entsprechender Hinweis eingefügt.

Der Autor bittet um Beachtung und bedauert die falschen Angaben der ersten Auflage.

LITERATUR

- Allen, J.B., *On the aging of steel guitar strings. Catgut Acoust. Soc. Newsl.* **26** (1976), 27 - 28.
- Backwinkel, M., *FEM-Berechnungen der Schwingungen eines E-Basses. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2000.*
- 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.*
- Cuesta, C. und Valette, C., *Evolution temporelle de la vibration des cordes de clavecin. Acustica* **66** (1988), 37 - 45.
- Cuesta, C. und Valette, C., *Théorie de la corde pincée en approximation linéaire. Acustica* **71** (1990), 28 - 40.
- deDayans, H.G. und Behar, A., *The quality of strings for guitars: An experimental study. J. Sound and Vibr.* **64** (1979), Heft 3, 421 - 431 mit Comments von Hanson, R.J., *J. Sound and Vibr.* **64** (1983), Heft 2, 283 - 285.
- 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 '98). 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.
- 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-muenchen.de/campus/LRT/work/we4/egitarr.html> 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., *Diagnosing dead spots of electric guitars and basses by measuring the mechanical conductance. Collected Papers of the 137th ASA Meeting and 2nd EAA Convention integrating the 25th DAGA (CD-ROM), 5AMUB_6, Berlin 1999e.*
- Fleischer, H., *Dead spots of electric basses. 2. Diagnosis. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/00. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2000.*
- Fleischer, H., *Abklingen der Saitenschwingungen von Solid-Body-Gitarren. In: Fortschritte der Akustik (DAGA 2001). DEGA, Oldenburg 2001, erscheint demnächst .*
- 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., *Admittanzmessungen an Elektrobässen. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '97). DEGA, Oldenburg 1997, 301 - 302.*
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Mechanical vibrations of electric guitars. Acustica - acta acustica 84 (1998), 758 - 765.*
- Fleischer, H. und Zwicker, T., *Investigating dead spots of electric guitars. Acustica - acta acustica 85 (1999), 128 - 135.*
- Fletcher, H., *Normal vibration frequencies of a stiff piano string. J. Acoust. Soc. Amer. 36 (1964), 203 - 209.*
- Fletcher, N.H., *Plucked strings - A review. Catgut Acoust. Soc. Newsl. 26 (1976), 13 - 17.*
- Fletcher, N.H., *Design and performance of harpsichords. Acustica 37(1977), 139- 147.*
- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., *The physics of musical instruments. 2 Auflage. Springer, New York 1998.*
- Geries, S. *Serienmessungen spanischer Gitarren mit dem Laser-Vibrometer. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 2001.*
- Gough, C.E., *The theory of string resonances on musical instruments. Acustica 49 (1981a), 124 - 141.*
- Gough, C. *The acoustics of stringed instruments studied by string resonances. Catgut Acoust. Soc. Newsl. 35 (1981b), 22 - 28.*
- Hanson, R.J., *Analysis of "live" and "dead" guitar strings. J. Catgut Acoust. Soc. 48 (1987), 10 - 16.*
- Heise, U., *Untersuchungen zur Ursache von Dead Spots an Baßgitarren. Das Musikinstrument 42 (1993), Heft 6/7, 112 - 115.*
- Hornbostel, E.M. und Sachs, C., *Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie 46 (1914).*
- Jansson, E.V., *Acoustics for the guitar player. In: Function, construction and quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983a), 7 - 26.*
- Jansson, E.V., *Acoustics for the guitar maker. In: Function, construction and quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music, Publication No. 38 (1983b), 27 - 50.*
- 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.
- May, U., *Elektrische Saiteninstrumente in der populären Musik*. Dissertation Universität Münster, Münster 1984.
- Meinel, E., *Elektrogitarren*. E. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1987.
- Richardson, M.H., *Is it a mode shape, or an operating deflection shape? Sound and Vibration*, Jan. 1997, 54 - 61.
- Rossing, T.D. und Fletcher, N.H., *Principles of vibration and sound*. Springer, New York 1995.
- Schmitz, A., *Das Gitarrenbuch*. 2. Aufl. Krüger, Frankfurt 1982.
- 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.
- Twork, Th., *Laser-Vibrometrie: Berührungsfreies Messen von Oberflächenschwingungen*. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1997.
- Valenzuela, M.N., *Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten*. *Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/99*. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 1999.
- Wogram, K., *Schwingungsuntersuchungen an Musikinstrumenten*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '94)*, DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 53 - 64.
- Ziegenhals, G., *Zum mechanisch-akustischen Verhalten von Halbresonanz-Elektrogitarren*. In: *Fortschritte der Akustik (DAGA '97)*, 309 - 310.
- Zollner, M., *Persönliche Mitteilung*, 2001.

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.

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik