

**Beiträge
zur
Vibro- und Psychoakustik**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer und Tilmann Zwicker

DEAD SPOTS

Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Bassgitarren

**Beiträge
zur
Vibro- und Psychoakustik**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Helmut Fleischer und Tilmann Zwicker

DEAD SPOTS

**Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Bassgitarren
2. Auflage**

Herausgeber:

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

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

Postanschrift:

LRT 4 UniBwM, D-85577 Neubiberg

Fleischer, Helmut und Zwicker, Tilmann:
Dead Spots. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Bassgitarren.
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/96
Neubiberg 1996
ISSN 1430-936X

Postanschriften der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg, Germany
Helmut.Fleischer@unibw.de

Dr.-Ing. Tilmann Zwicker
Maenherstr. 39
D-81375 München, Germany
Timann.Zwicker@t-online.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.

DEAD SPOTS

Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Bassgitarren

Zusammenfassung

Das Phänomen der "Dead Spots" ist Spielern eines Elektrobasses wohlbekannt. Es besagt, dass für bestimmte Bünde auf bestimmten Saiten das "Sustain" nicht so gut wie an benachbarten Bündlen ist. Den betreffenden Bund nennt der Spieler einen "Dead Spot". Mit dem Begriff "Live Spot" wird der entgegengesetzte Effekt bezeichnet, d.h. ein relativ zu Nachbarbündlen gutes Sustain. Eine Anzahl von elektrischen Gitarren und Bassgitarren werden gründlich in Bezug auf Dead und Live Spots untersucht. In einer systematischen Studie werden die Nachklingzeiten der elektrischen Signale gemessen, die jede Saite an den unterschiedlichen Bündlen erzeugt. Zu erwarten ist eine stetige Abnahme des Nachklingens in dem Sinne, dass die Nachklingzeit mit abnehmender Saitenlänge abnehmen wird, d.h. je höher die Nummer des Bundes wird. Abweichungen von dieser einfachen Regel finden sich in den Versuchsdaten nicht nur für Elektrobässe, sondern auch für Elektrogitarren.

Das Augenmerk ist auf die Bündlen gerichtet, an denen die Nachklingzeit besonders kurz ist. Experimentelle Ergebnisse für die betrachteten Elektrobässe, die mit Laser-Vibrometrie und Modalanalyse ermittelt wurden, deuten auf eine Beziehung zwischen den Schwingungsmustern des Halses und dem zeitlichen Ausschwingen der Saiten hin. Das untere Auflager der Saite (am Steg) ist offenbar immer relativ steif. Im Gegensatz dazu kann das obere Auflager der Saite (am Sattel oder an einem Bund) mehr oder weniger nachgiebig sein. Somit kann Schwingungsenergie von der Saite auf den Hals übertragen werden, wo sie sich in Wärme umsetzt mit dem Ergebnis, dass die Saitenschwingung nicht so lange anhält wie sie es würde, wenn der Hals starr wäre. Dies wird zutreffen, wenn das obere Ende der Saite nicht mit einem Knoten, sondern - im schlimmsten Fall - mit einem Bauch der Schwingung des Halses zusammenfällt. Da sich das Nachklingen des ersten Teiltones als maßgeblich für das Abklingen des gesamten komplexen Saitensignales erweist, spielt in diesem Zusammenhang die Grundfrequenz die Hauptrolle.

Um ein direktes Messverfahren finden zu können, werden einige Voruntersuchungen durchgeführt. In ihnen erweist sich die mechanische Admittanz als der am besten geeignete Kennwert. Sie wird mittels eines Zweikanal-FFT-Analysators unter Verwendung eines Impedanz-Messkopfes bestimmt, der über einen Minishaker angetrieben und an den Bündlen gegen den Hals gedrückt wird. Die Interpretation der Diagramme wird durch eine Hilfsschablone erleichtert, in der die Grundfrequenzen der Saitenschwingung am betreffenden Bund markiert sind. Fällt die Grundfrequenz auf ein Tal im Admittanz-"Gebirge", deutet dies auf gutes Sustain, also einen Live Spot, hin. Fällt im Gegensatz dazu die Grundfrequenz mit einem "Berg" oder gar mit einem "Gipfel" der Admittanz zusammen, spricht dies für einen Dead Spot. Auf diese Weise gelingt es, Dead Spots auf einfache und übersichtliche Weise anhand der Halsimpedanz zu erklären.

DEAD SPOTS

On the vibrational behaviour of electric guitars and bass guitars

Summary

The phenomenon of "dead spots" is well-known among the players of electric bass guitars. It means that for certain fret positions on certain strings the "sustain" is not as good as it is at adjacent frets. The player calls the corresponding fret a "dead spot". The term "live spot" designates the inverse phenomenon, i.e. a better sustain relative to neighbouring frets. A number of electric guitars and bass guitars are thoroughly investigated with respect to dead and live spots. In a systematic study, the decay times of the electric signals produced by each string at the different frets are measured. A steady decrease of the decay is expected in the sense that the decay time will decrease with decreasing string length, i.e., the higher the number of the fret becomes. Deviations from this simple rule are found in the experimental data not only for electric basses but also for electric guitars.

The attention is focussed to the frets positions displaying particularly short decay times. Experimental results for the electric basses under consideration obtained by laser vibrometry and modal analysis indicate a relation between the vibrational patterns of the neck and the temporal decay of the strings. Obviously, the lower boundary of the string (at the bridge) is always relatively stiff. In contrast, the upper boundary of the string (at the saddle or at a fret) can be more or less flexible. Thus, vibrational energy can be transferred from the string to the neck where it converts into heat with the result that the vibration of the string does not last as long as it would if the neck were rigid. This will take place if the upper end of the string does not coincide with a node but, as a "worst case", with an antinode of the neck vibration. As the decay of the first partial tone proves to govern the decay of the entire complex string signal, the fundamental frequency plays the major role in this context.

In order to find a direct measuring approach some tentative investigations are performed. They prove the mechanical admittance to be the best suited parameter. It is ascertained by means of a dualchannel-FFT-analyzer using an impedance head which is driven by a mini-skaker and pressed against the neck at the different frets. Interpretation of the diagrams is facilitated by a transparent overlay indicating the fundamental frequencies of the string vibration at the corresponding fret. Coincidence of the fundamental frequency with a "valley" in the admittance "mountains" points to good sustain, i.e. a live spot. In contrast, coincidence of the fundamental frequency with a "mountain" or even a "summit" predicts a dead spot. In this way, dead spots can be easily and lucidly interpreted via the neck admittance.

INHALT

1.	EINLEITUNG	1
1.1.	Stand des Wissens	1
1.2.	Aufgabenstellung	2
2.	DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE	4
2.1.	Prinzipieller Aufbau	4
2.2.	Elektrische Bassgitarren	6
2.2.1.	Action Bass	6
2.2.2.	Peavey Dyna Bass	7
2.2.3.	Frequenzbereich	7
2.3.	Elektrische Gitarren	11
2.3.1.	Travelling Wilbury TW 500	11
2.3.2.	Gibson Explorer	12
2.3.3.	Gibson Les Paul K.M.	13
2.3.4.	Fender Stratocaster SRV Signature	13
2.3.5.	Frequenzbereich	14
3.	SCHWINGUNGSMODEN VON ELEKTROBÄSSEN	17
3.1.	Messverfahren	17
3.2.	Schwingungen des Action Bass	17
3.3.	Schwingungen des Peavey Dyna Bass	19
3.4.	Zusammenfassende Bemerkungen	21
4.	MESSUNG DES ABKLINGVERHALTENS	22
4.1.	Einfluss der Saite	22
4.2.	Messverfahren	22
4.3.	Abklingen bei Elektrobässen	25
4.4.	Abklingen bei Elektrogitarren	28
4.5.	Zusammenfassende Bemerkungen	36
5.	KENNZEICHNUNG DES MECHANISCHEN VERHALTENS	37
5.1.	Messverfahren	37
5.2.	Darstellung der Messergebnisse	38
5.2.1.	Mechanische Impedanz	38
5.2.2.	Mechanische Admittanz	41
5.2.3.	Dynamische Nachgiebigkeit	43
5.3.	Einfluss des Messortes, der Lagerung und der Aufnehmermasse	46
5.3.1.	Messort	46
5.3.2.	Lagerung des Instruments	49
5.3.3.	Massenkompensation	51
5.4.	Einfluss der Messrichtung	54
5.5.	Zusammenfassende Bemerkungen	57
6.	GEMESSENE HALS- UND STEGADMITTANZEN	60
6.1.	Admittanzen von Elektrobässen	60
6.2.	Admittanzen von Elektrogitarren	62
6.3.	Zusammenfassende Bemerkungen	66
7.	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN NACHKLINGEN UND ADMITTANZ	68
7.1.	Saitenklänge und Halsadmittanzen bei Elektrobässen	68
7.2.	Saitenklänge und Halsadmittanzen bei Elektrogitarren	71
8.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION	75
	LITERATUR	82
	Auswerteschablone	84

1. EINLEITUNG

In der Unterhaltungsmusik stellt die Gitarre dasjenige Musikinstrument dar, das heutzutage mit Abstand am häufigsten verwendet wird. Noch größere Bedeutung als den akustischen Gitarren kommt dabei elektrischen Gitarren zu. Ungeachtet der gegenwärtigen "Unplugged"-Bewegung sind weder Elektrogitarren noch Elektrobässe, die hier auch als elektrische Bassgitarren bezeichnet werden, aus der Popmusik wegzudenken.

Aus der Sicht der Vibroakustik sind elektrische Gitarren und ihre größeren Schwestern, die Elektrobässe, wesentlich übersichtlichere Gebilde als akustische Gitarren. Im Gegensatz zu akustischen Gitarren haben Elektrogitarren das mechanische Signal nicht selbst in ein Schallsignal umzuwandeln; vielmehr wird die Umsetzung in ein Schallsignal von getrennten Geräten - Verstärkern und Lautsprechern - übernommen. Lässt man die Umwandlung der Saitenschwingung in ein elektrisches Signal außer Betracht, so verbleibt bei elektrischen Gitarren ein Problem rein schwingungstechnischer Natur. Dieses Problem soll im Folgenden behandelt werden.

1.1. Stand des Wissens

Die Gitarre gehört zur Instrumentenfamilie der Saiteninstrumente oder Chordophone im weiteren Sinne und zur Familie der Zupfinstrumente im engeren Sinne [1]. Die Elektrogitarre wird zu den elektromechanischen Musikinstrumenten gezählt und nimmt deshalb eine Zwitterstellung zwischen den mechanischen und den elektronischen Instrumenten, den sog. Elektrophonen, ein.

In Standardwerken, in denen die physikalischen Grundlagen der Erzeugung von Musiksignalen zusammengestellt sind (z.B. [2]), findet die akustische Gitarre in aller Regel den gebührenden Raum; Elektrogitarren werden dagegen meist lediglich am Rande erwähnt. Nur wenige Bücher sind wie [3] ausschließlich elektrischen Gitarren gewidmet. Wissenschaftliche Arbeiten sind ebenfalls selten. Die Dissertation [4] befasst sich mit der Rolle der Elektrogitarre in der zeitgenössischen Musik; im Anschluss an einen historischen Rückblick sind dort auch Experimente geschildert, in denen der im folgenden betrachtete Einfluss des Korpus auf den Klang untersucht wird.

Experimente, in denen Vibrationen konventioneller Musikinstrumente untersucht werden, haben Tradition. Eine mögliche Methode, die seit mehr als zweihundert Jahren praktiziert wird, ist die mechanische Erzeugung von Schwingungsmustern. Diese werden nach ihrem Erfinder [5] als "Chladni'sche Klangfiguren" bezeichnet. Heute wird die Schwingung üblicherweise optisch oder mechano-elektrisch gemessen, wobei unterschiedliche Sensoren zur Auswahl stehen. Da die Decken akustischer Gitarren sehr dünnwandig sind, sind kontaktlose Messverfahren prinzipiell im Vorteil. Aus diesem Grunde wird in [6] eine optische Methode angewandt. Interferometrische Untersuchungen mittels Laser-Holografie [7] liefern für monofrequente Anregung komplette Schwingungsbilder. Entsprechende Ergebnisse werden immer wieder angeführt, wenn in zusammenfassenden Arbeiten die Bewegungsformen der Gitarrendecke visualisiert werden sollen; Beispiele hierfür sind [2 und 8].

Eine weitere Möglichkeit besteht in der punktwisen Messung der Schwingung mittels Laser-Vibrometrie bei breitbandiger Anregung und anschließender Modalanalyse [9 und 10]. Verwendet man für die Untersuchung akustischer Gitarren Kontakt-Sensoren wie Beschleunigungsaufnehmer [11], dann müssen diese sehr leicht sein, um mit ihrer Masse die Gitarrenwandung nicht unzulässig zu belasten. Andererseits erlauben sie es beispielsweise, Messungen in mehreren Raumrichtungen ohne aufwendige Umbauten vorzunehmen. Die Mehrzahl der Elektrogitarren und -bässe haben einen

soliden Korpus. Die Untersuchung von Instrumenten solcher Konstruktion ist deshalb auch mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern möglich [12].

1.2. Aufgabenstellung

Es ist unbestritten, dass Musik und ein Musikinstrument letztlich immer einer subjektiven Bewertung zu genügen haben. In jüngerer Zeit wird jedoch zunehmend auch versucht, objektive Verfahren heranzuziehen mit dem Ziel, die Qualität von Musikinstrumenten bei der Fertigung besser beherrschbar zu machen. Bei elektrischen Gitarren sind zurzeit Finite-Elemente-Berechnungen in Erprobung [13]. Große Schwierigkeit bereitet dabei unter anderem die korrekte Berücksichtigung der Materialeigenschaften von Holz. Messungen erscheinen deshalb derzeit aussichtsreicher als Berechnungen. Zielgerichtete Experimente und geeignete Messverfahren können dazu beitragen, Phänomene zu verstehen und Fehler zu vermeiden [11 und 14]. Die Erscheinung, die in der vorliegenden Arbeit auf diese Weise untersucht wird, sind die sogenannten "Dead Spots". So werden bei einer Gitarre oder einem Bass Töne bezeichnet, die im Vergleich zu anderen schneller abklingen. Wie sich zeigen wird, sind sie als eine Folge der Interaktion von Korpus und Hals mit der Saite zu sehen.

Bereits seit der Antike sind mathematische Gesetze bekannt, welche die Zusammenhänge zwischen der Länge einer Saite und den Frequenzen der Teiltöne, die sie hervorruft, beschreiben. Diese Regeln prägen unsere Vorstellungswelt so weit, dass es uns bereits mit Erstaunen erfüllt, wenn die Frequenzreihe der Teiltöne eines Saitenklanges nicht exakt der Folge 1:2:3:4:... gehorcht, sondern sich als leicht unharmonisch erweist. Dabei stellt - misst man nur genau genug - Inharmonizität bei Saiten den Normalfall dar. Sie war auch bei den eigenen Untersuchungen zu beobachten, wird im Weiteren jedoch nicht gesondert behandelt werden. Grundsätzlich sollte man auch im vorliegenden Zusammenhang nie aus dem Gedächtnis verlieren, dass die einfachen mathematischen Gesetzmäßigkeiten auf idealisierenden Annahmen beruhen, die in der Praxis eben nur annähernd erfüllt sind.

Eine dieser Annahmen ist, dass die Saite an beiden Endpunkten unnachgiebig festgehalten ist. Die Randbedingungen, welche die Saiten einer Elektrogitarre oder eines Elektrobasses wirklich "sehen", genügen dieser Idealisierung häufig nicht. Die Bedeutung der realen Randbedingungen hat sich der Beobachtung schon frühzeitig erschlossen. So schreibt Athanasius Kircher in [15] auf S. 113: "Die Saitte gibt den Thon von sich nach Beschaffenheit des Stegs oder Sattel / worauf sie ruhet und liget ...". Offenbar hat er erkannt, dass nicht die Saite allein den Klang bestimmt, sondern auch deren Auflager von Bedeutung sind. Da der Korpus und insbesondere der Hals zwar relativ steif, jedoch nicht absolut unbeweglich sind [16], werden sie die Saitenschwingung und damit das musikalische Signal beeinflussen.

Eine für das Spielen des Instruments ganz wesentliche Auswirkung kann sein, dass die Saitenschwingung und damit das musikalische Signal besonders schnell abklingt. Auf diesen Sachverhalt ist bereits in [17 und 12] hingewiesen worden. Eigene Experimente am Institut für Mechanik [18] haben belegt, dass Elektrobässe keineswegs starr, sondern vielmehr elastisch sind und ein deutlich nachweisbares "Eigenleben" führen. Einige typische Ergebnisse von Schwingungsuntersuchungen an Elektrobässen werden im Weiteren dargestellt werden. Ähnliche Erscheinungen sind für Elektrogitarren zu erwarten.

Gegenstand der folgenden Überlegungen sind elektrische Gitarren sowie Bässe und das Nachklingen der musikalischen Signale, die sie erzeugen. Gesucht werden Zusammenhänge zwischen dem Schwingungsverhalten des Instrumentes und dem Ausschwingverhalten der Saitenklänge. Mittels systematischer Messungen des "Sustain" der Klänge werden zunächst Dead Spots aufgedeckt. Durch

die experimentelle Ermittlung geeigneter mechanischer Größen soll deren Ursache gefunden und zielgerichtet charakterisiert werden. Großer Wert wird dabei darauf gelegt, dass

- die untersuchten Instrumente denjenigen entsprechen, wie sie von Musikern heute tatsächlich verwendet werden,
- die Untersuchungen unter möglichst wirklichkeitsnahen Bedingungen stattfinden und
- die Messapparatur sowie das Messverfahren nicht komplizierter als unbedingt notwendig werden.

Dadurch soll sichergestellt werden, dass die entsprechenden Untersuchungen in ihrer Anwendbarkeit nicht auf das Labor beschränkt bleiben, sondern in einem späteren Stadium möglichst vor Ort durchgeführt werden können.

2. DIE UNTERSUCHTEN INSTRUMENTE

Aus dem Bestand des Autors T. Z. wurden vier Modelle ausgewählt, die als repräsentativ für ganze Familien von elektrischen Gitarren gelten können. Tobias Fleischer, Sohn des Autors H. F., steuerte für die Experimente aus seinem Bestand zwei Elektrobässe bei, wofür ihm an dieser Stelle herzlich gedankt sei. Diese Instrumente werden im Folgenden aufgrund ihrer engen Verwandtschaft mit den Gitarren auch als Bassgitarren bezeichnet, obwohl in [3] diese Bezeichnung als angeblich falsch eingestuft wird.

2.1. Prinzipieller Aufbau

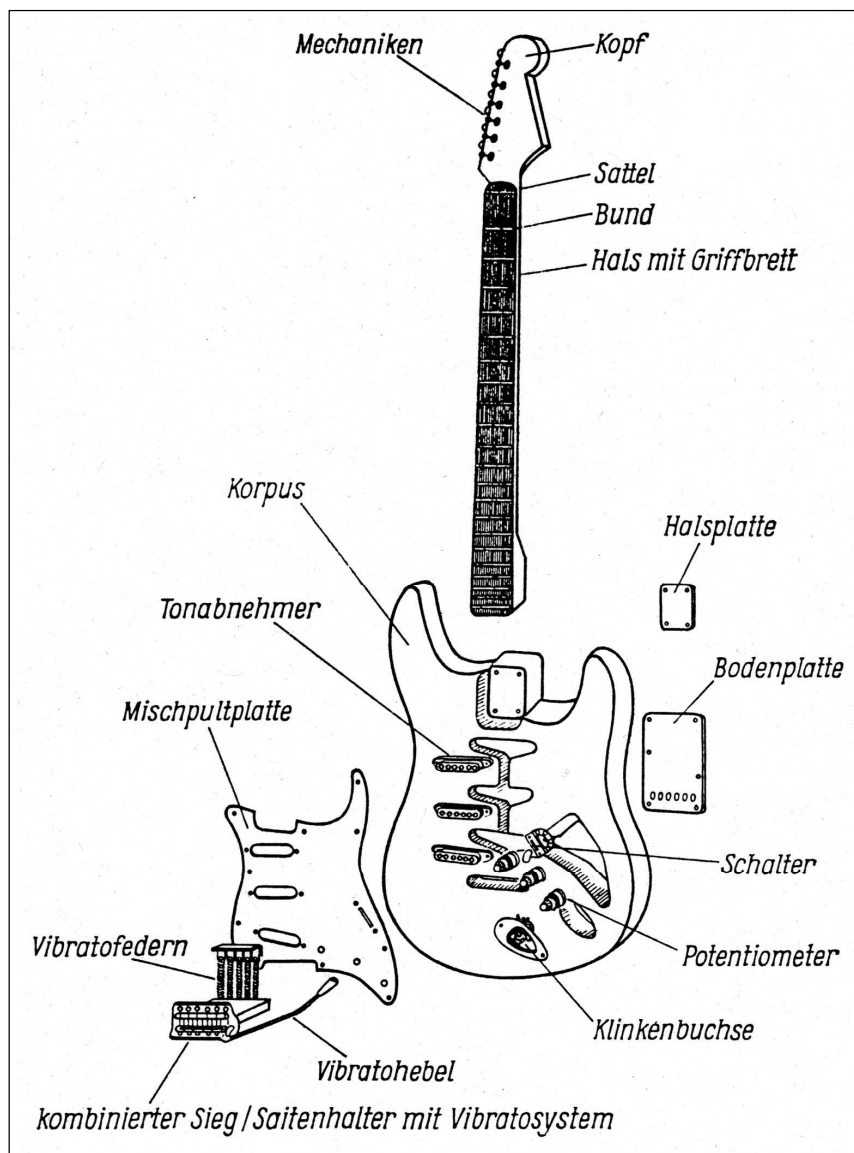


Fig. 1. Prinzipieller Aufbau einer elektrischen Gitarre (nach [3]).

Sämtliche untersuchten elektrischen Bässe und Gitarren sind im Prinzip gleichartig aufgebaut. Wie Fig. 1 am Beispiel einer Gitarre der Stratocaster-Familie zeigt, besteht ein solches Instrument aus einem Hals, an dessen oberem Ende der Kopf mit den Stimm-Mechaniken angebracht ist. An seinem unteren Ende ist der Hals mit dem soliden Korpus verschraubt (wie abgebildet) oder verleimt. Am unteren Ende des Korpus ist der Steg (auch als Brücke bezeichnet) mit den Saitenhaltern angebracht. Darüber hinaus trägt der Korpus die elektromagnetischen Tonabnehmer, mit denen die mechanische Saitenschwingung in ein elektrisches Signal umgewandelt wird, samt den zugehörigen Schaltern zur Tonabnehmerauswahl sowie Potentiometern zur Lautstärke und Klangeinstellung. Das elektrische Signal wird über eine Klinkenbuchse und ein Kabel dem Verstärker zugeführt.

Die musikalisch aktiven Elemente einer Gitarre oder Bassgitarre sind die Saiten. Elektrische Gitarren haben üblicherweise sechs, die untersuchten Elektrobässe vier Saiten, die aus Metall gefertigt sind. Das untere Ende des schwingenden Teiles einer Saite ist durch den Steg festgelegt. Die Schwingungsfrequenzen einer gegebenen Saite mit gegebenen Randbedingungen lassen sich auf zwei Arten verändern. Zum einen kann die Vorspannkraft variiert werden, deren Quadratwurzel der Frequenz proportional ist. Dies wird zum Stimmen der Saiten mittels der Wirbel sowie zur Modulation beim Spielen genutzt, was entweder der Vibratohebel oder die Finger der Griffhand durch Ziehen einer Saite bewirken. Zum anderen kann die Länge der Saite variiert werden, die der Frequenz umgekehrt proportional ist. Die Saite hat die größte Länge und damit die tiefste Frequenz, wenn sie "leer" gespielt wird; ihr oberes Ende liegt dann am Sattel auf. Wird sie gegriffen, bestimmt der jeweilige Bund das obere Ende; ihre Länge wird verkürzt und die Frequenz damit erhöht.

2.2. Elektrische Bassgitarren

2.2.1. Action Bass

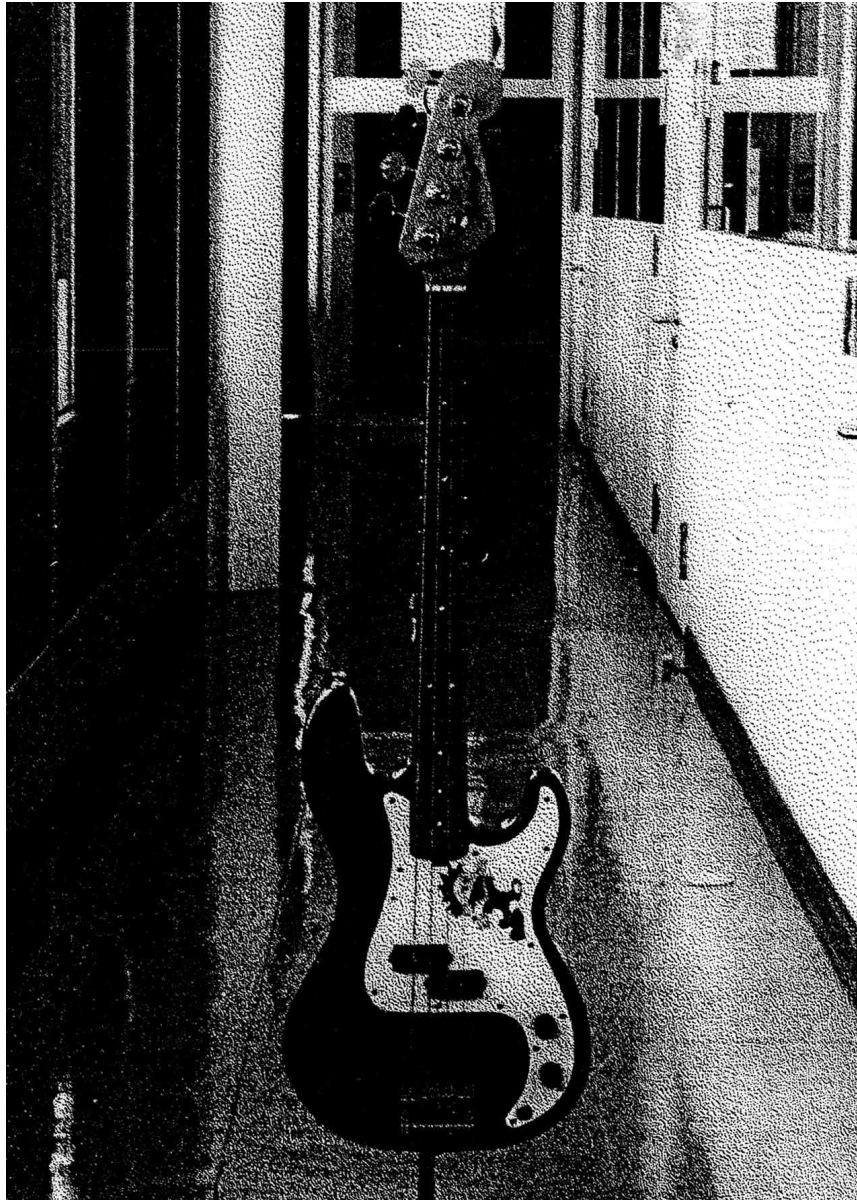


Fig. 2. Elektrische Bassgitarre Action Bass.

In Fig. 2 ist einer der beiden untersuchten Elektrobässe abgebildet. Er trägt die Bezeichnung Action Bass; der Hersteller ist nicht vermerkt. Das Instrument hat vier Saiten und kann als Nachbau des bekannten Fender Precision Bass angesehen werden. Der Hals ist mit dem Korpus verschraubt und hat 20 Bünde. Der Abstand zwischen Steg und Sattel - und somit die Länge der leeren Saiten - beträgt im Mittel 87 cm.

2.2.2. Peavey Dyna Bass

Als weiterer Elektrobass wurde der in Fig. 3 abgebildete Dyna Bass der Firma Peavey untersucht. Auch er hat vier Saiten, deren Länge im Mittel 87 cm ist. Der Hals trägt 21 Bünde und ist mit dem Korpus fest verbunden, wahrscheinlich verleimt.

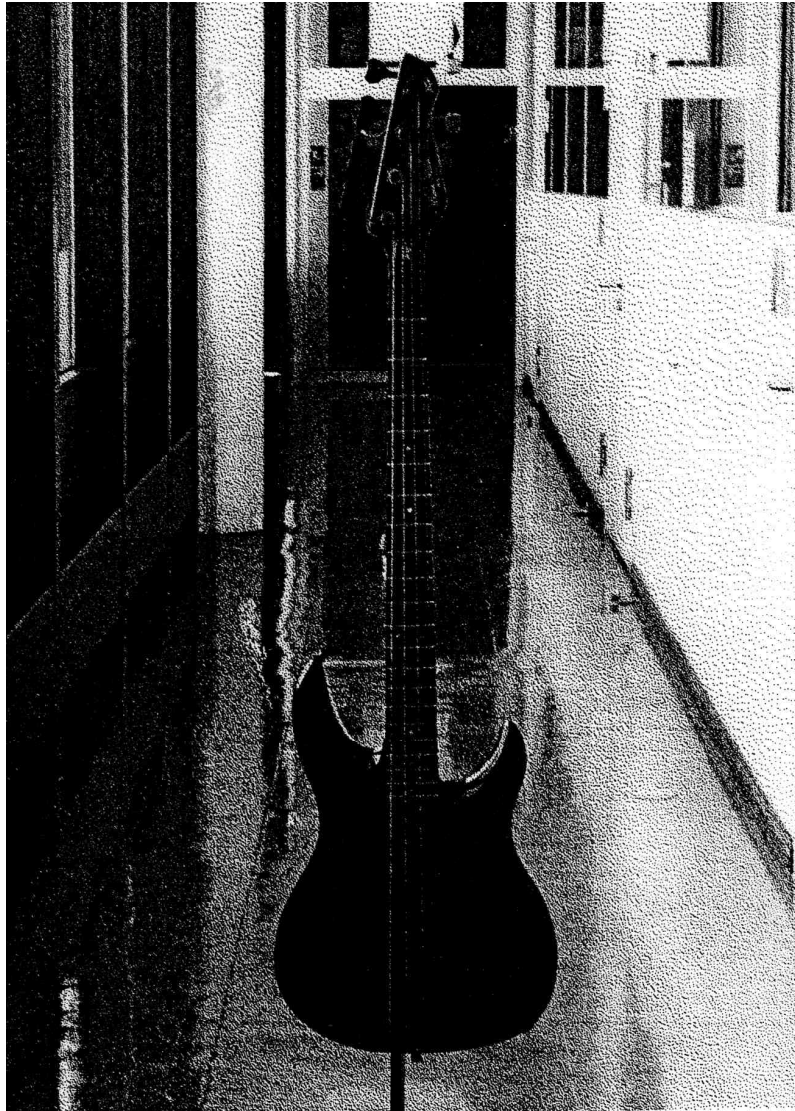


Fig. 3. Elektrische Bassgitarre Peavey Dyna Bass.

2.2.3. Frequenzbereich

Die Saiten eines Elektrobasses sind - ebenso wie bei einem Kontrabass - in Quartan gestimmt. Bei viersaitigen Modellen ist die Stimmung auf folgende Grundtöne üblich:

- 4. Saite: E1 entsprechend 41 Hz,
- 3. Saite: A1 entsprechend 55 Hz,
- 2. Saite: D2 entsprechend 73,5 Hz und
- 1. Saite: G2 entsprechend 98 Hz.

Für einen Elektrobass mit 21 Bünden ergeben sich somit folgende Bereiche, in denen die Grundfrequenzen der Saitenklänge durch Greifen variiert werden können:

4. Saite: 41 Hz bis 139 Hz,
3. Saite: 55 Hz bis 185 Hz,
2. Saite: 73,5 Hz bis 262 Hz und
1. Saite: 98 Hz bis 350 Hz.

Diese Frequenzen beziehen sich auf die Grundschnwingungen. Ein Saitenklang besteht jedoch praktisch nie allein aus der Grundschnwingung; vielmehr sind neben dem Grundton immer weitere Teiltöne enthalten. Die Frequenzen der höheren Harmonischen sind annähernd ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Die Amplituden hängen u.a. von der Art und vom Ort des Anzupfens ab; siehe hierzu beispielsweise [6]. Zur Illustration sind in Fig. 4 die Zeitfunktion und das Pegel-Frequenz-Spektrum des Signales dargestellt, wie es unmittelbar nach dem Anzupfen der leeren A-Saite am Klinkenausgang des Action Bass anliegt. Es handelt sich um einen Originalausdruck, wie man ihn mit dem FFT-Analysator Ono Sokki CF 350 erhält. Man erkennt eine annähernd periodische Zeitfunktion sowie ein Linienspektrum, das im betrachteten Bereich etwa zehn Teiltöne enthält.

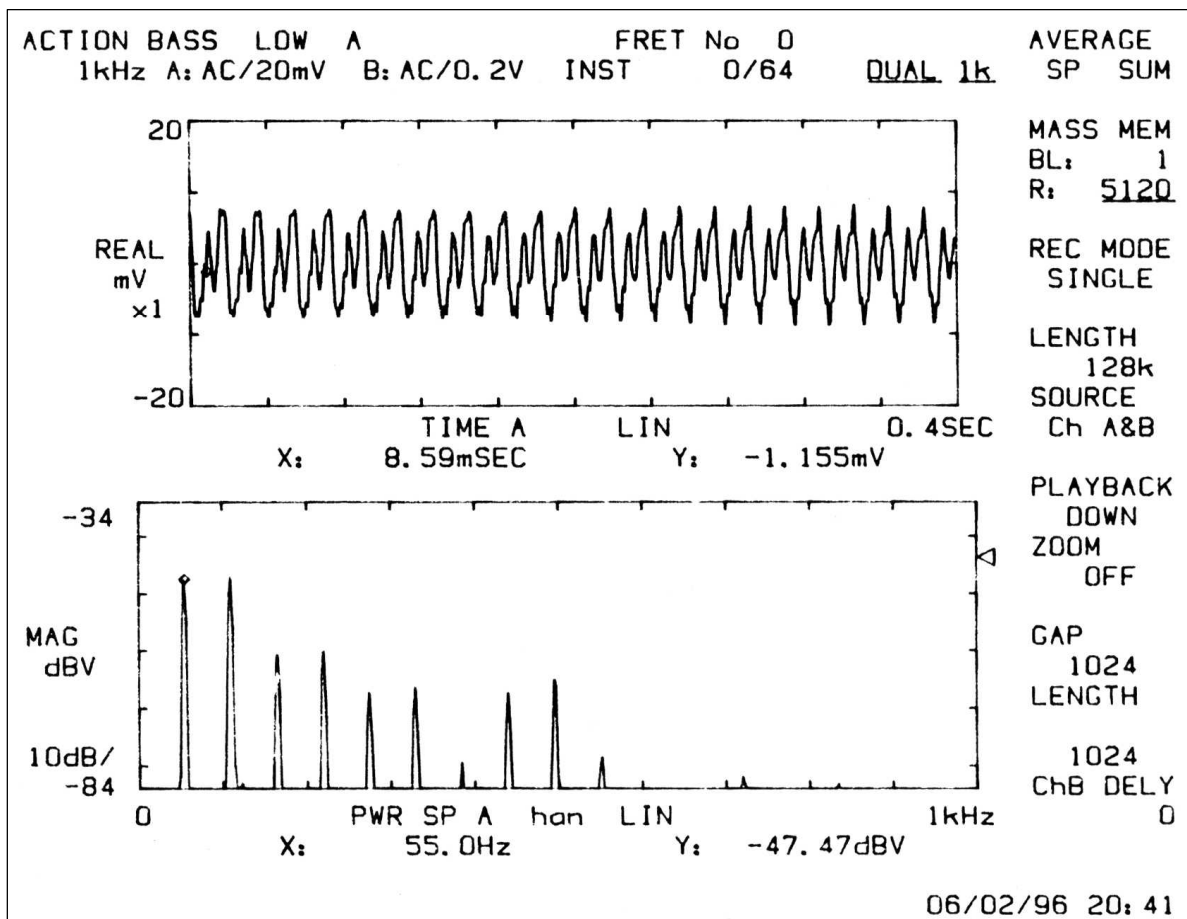


Fig. 4. Zeitfunktion (oben) und Spektrum (unten) eines Saitenklanges; Original-Ausdruck Ono Sokki CF 350.

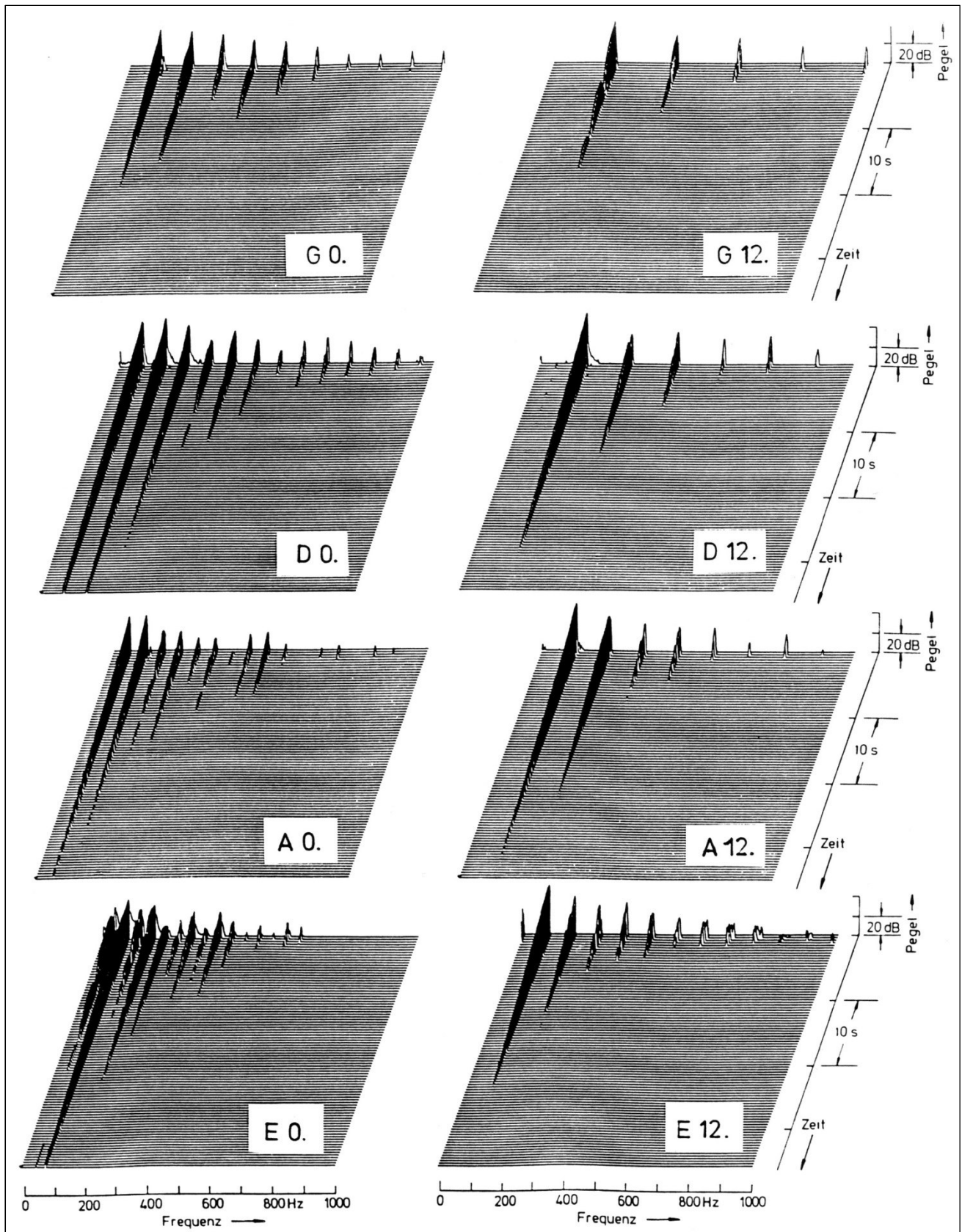


Fig. 5. "Wasserfalldiagramme" von Saitenklängen des Action Bass.
Die Abkürzungen bezeichnen die Saite und den Bund.

Anders als bei einem Streichinstrument wird bei einem Zupfinstrument der Saite mechanische Energie nicht kontinuierlich, sondern durch das Anzupfen kurzzeitig und einmalig zugeführt. Demzufolge wird die Amplitude der Saitenschwingung nach dem Zupfen abnehmen. In Fig. 4 ist das Zeitfenster so kurz, dass eine Abnahme noch kaum zu erkennen ist. Fig. 5 zeigt dazu sogenannte Wasserfalldiagramme, in denen in dreidimensionaler Darstellung der Pegel über der Frequenz und der Zeit aufgetragen ist. Diese Darstellungsweise veranschaulicht, wie die einzelnen Teiltöne über der Zeit abklingen. Damit wird die "Lebensgeschichte" eines jeden Teiltones erkennbar.

Die linke Spalte bezieht sich auf die leer gespielten Saiten E (unten) bis G (oben). Die Null neben der Bezeichnung der Saite steht für den 0. Bund, d.h. den Sattel. Die Diagramme der rechten Spalte entstehen, wenn die jeweilige Saite in einer höheren Lage gespielt wird; im Beispiel wird sie am 12. Bund gegriffen. Der Grundton des dabei entstehenden Klanges ist eine Oktave höher als derjenige der leeren Saite.

Für den Zeitpunkt des Anzupfens (am oberen Ende eines jeden Teildiagrammes) erkennt man bis zu einem Dutzend Teiltöne. Deren Frequenzen sind annähernd Vielfache der Grundfrequenz. Die relativen Pegel der Teiltöne hängen - wie bereits oben erwähnt - vom Ort und der Art der Anregung sowie auch von der Einstellung des "Tone"-Reglers ab. Sie interessieren hier weniger als die Abnahme der einzelnen Teiltöne. Deren Pegel fallen in aller Regel etwa linear über der Zeit ab. Abgesehen von einer Ausnahme (links unten: E 0., d.h. leere E-Saite), auf die später eingegangen wird, klingen die Teiltöne umso schneller ab, je höher ihre Frequenz ist. Ebenso lässt sich feststellen, dass Saitenklänge, die an höheren Bünden entstehen, im Allgemeinen schneller abklingen als diejenigen derselben leeren Saite.

Aus Fig. 5 sind somit zwei Regeln ersichtlich:

- Üblicherweise klingen Saitenklänge umso rascher ab, je kürzer die Saite gegriffen wird.
- Üblicherweise dominiert das Abklingen des Grundtones das Abklingen des Gesamtklanges.

In der Praxis sind jedoch Abweichungen von diesen einfachen Regeln zu beobachten. Diese Abweichungen stehen im Mittelpunkt des vorliegenden Berichtes; sie werden im Folgenden ausführlich untersucht werden.

2.3. Elektrische Gitarren

Es wurden vier Gitarren unterschiedlicher Bauart aus unterschiedlichen Preisklassen untersucht.

2.3.1. Travelling Wilbury TW 500

Als Beispiel für eine besonders preisgünstige Gitarre wurde die in Fig. 6 gezeigte Travelling Wilbury TW 500 in die Messungen einbezogen. Dabei handelt es sich um ein Instrument mit einem vermutlich aus verschiedenen Holzreststücken, u.a. auch Schichtholz und Pressspan, hergestellten Korpus und aufgeschraubtem Ahornhals mit Palisandergriffbrett. Die Anzahl der Bünde beträgt 18, die Saitenlänge von Steg zu Sattel im Mittel 61,5 cm. Die Saiten werden zur Befestigung von unten durch den Korpus geführt.

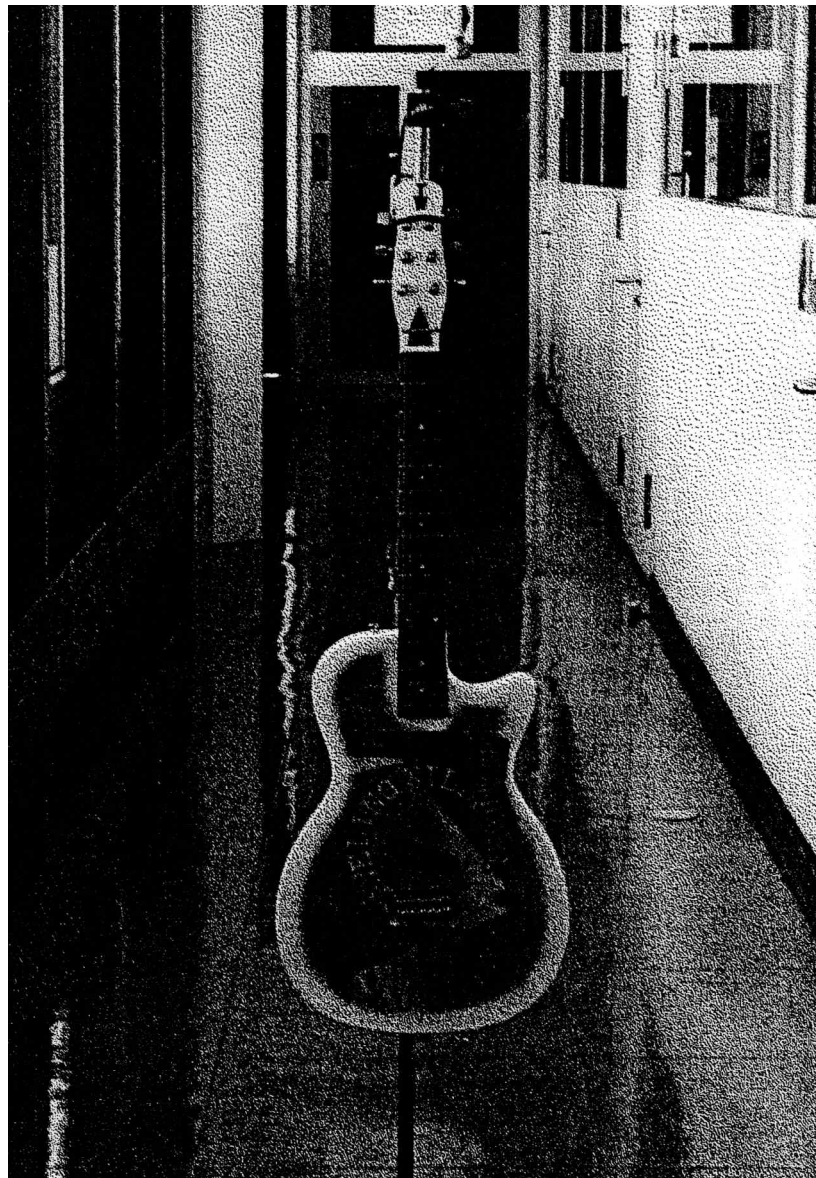


Fig. 6. Elektrische Gitarre Travelling Wilbury TW 500.

2.3.2. Gibson Explorer

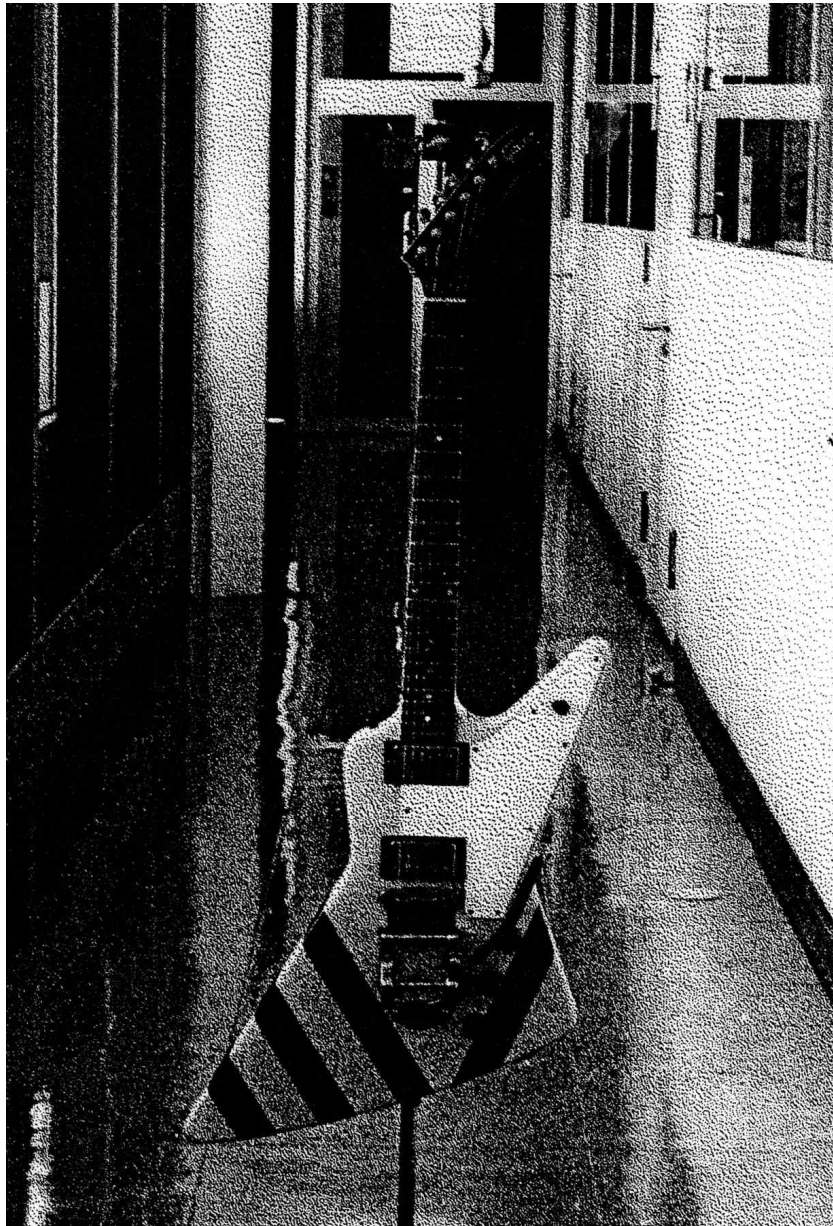


Fig. 7. Elektrische Gitarre Gibson Explorer.

Die in Fig. 7 dargestellte Explorer der Firma Gibson besitzt einen Mahagoni-Korpus mit eingeleimtem Hals, der ebenfalls aus Mahagoni gefertigt ist. Das Griffbrett besteht aus Palisander und trägt 22 Bünde. Der mittlere Abstand zwischen Steg und Sattel beträgt 62,8 cm. Die untersuchte Gitarre hat ein nicht-serienmäßiges Bigsby-Vibrato als Saitenhalterung.

2.3.3. Gibson Les Paul K.M.

Die Konstruktion der untersuchten Gitarre Les Paul K.M. (ähnlich der Zeichnung in Fig. 8), einer Spielart der bekannten Les Paul Standard der Firma Gibson, entspricht derjenigen der Gibson Explorer. Auf die Oberfläche des Mahagoni-Korpus ist jedoch zusätzlich eine Schicht Ahorn aufgeleimt.

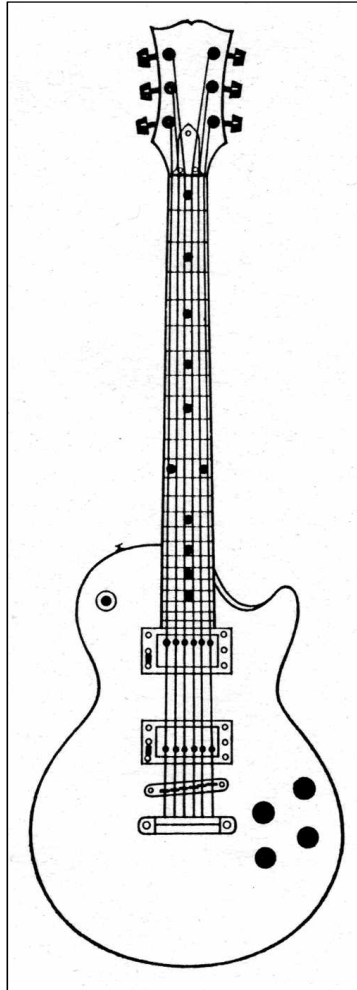


Fig. 8. Elektrische Gitarre Gibson Les Paul (nach [3]).

2.3.4. Fender Stratocaster SRV Signature

Als viertes Gitarrenmodell wurde auch eine Stratocaster (siehe die Fig. 1 und 9) der Firma Fender untersucht. Ihr Korpus besteht aus Eschenholz, der Hals aus Ahorn trägt ein Palisandergriffbrett mit 21 Bünden, wobei der Abstand zwischen Steg und Sattel 65,2 cm beträgt. Bei dieser Gitarre werden die Saiten zur Befestigung von unten in den kombinierten Saitenhalter mit Vibrato-Funktion eingeführt. Abgesehen vom spiegelverkehrten "Linkshänder"-Vibrato/Saitenhalter ist diese Gitarre baugleich mit der üblichen Fender Stratocaster.

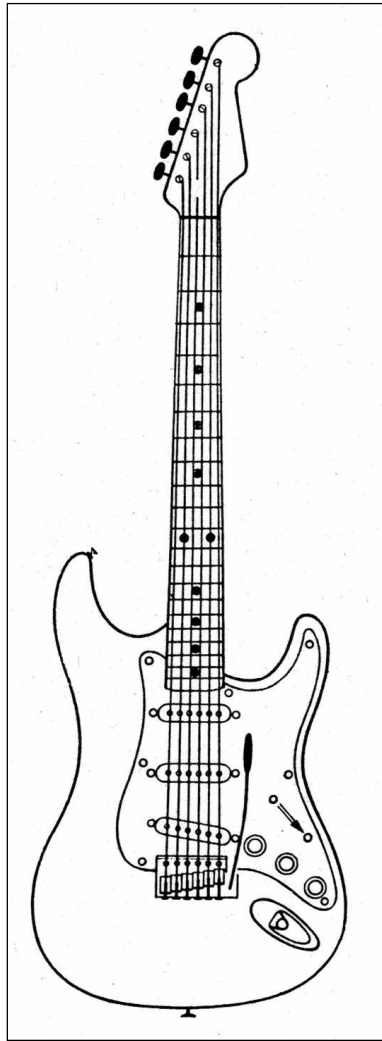


Fig. 9. Elektrische Gitarre Fender Stratocaster (nach [3]).

2.3.5. Frequenzbereich

Die Standardstimmung sechssaitiger elektrischer Gitarren ist dieselbe wie diejenige von akustischen Gitarren. Die unteren vier Saiten sind eine Oktave höher gestimmt als bei Elektrobässen. Insgesamt umfasst die Stimmung folgende Grundtöne:

- 6. Saite: E₂ entsprechend 83 Hz,
- 5. Saite: A₂ entsprechend 110 Hz,
- 4. Saite: D₃ entsprechend 147 Hz,
- 3. Saite: G₃ entsprechend 196 Hz,
- 2. Saite: H₃ entsprechend 247 Hz und
- 1. Saite: E₄ entsprechend 330 Hz.

Hat eine Gitarre 22 Bünde, dann ergeben sich Grundtöne mit den folgenden Frequenzen:

- 6. Saite: 83 Hz bis 294 Hz,
- 5. Saite: 110 Hz bis 392 Hz,
- 4. Saite: 147 Hz bis 524 Hz,
- 3. Saite: 196 Hz bis 700 Hz,
- 2. Saite: 247 Hz bis 880 Hz und
- 1. Saite: 330 Hz bis 1176 Hz.

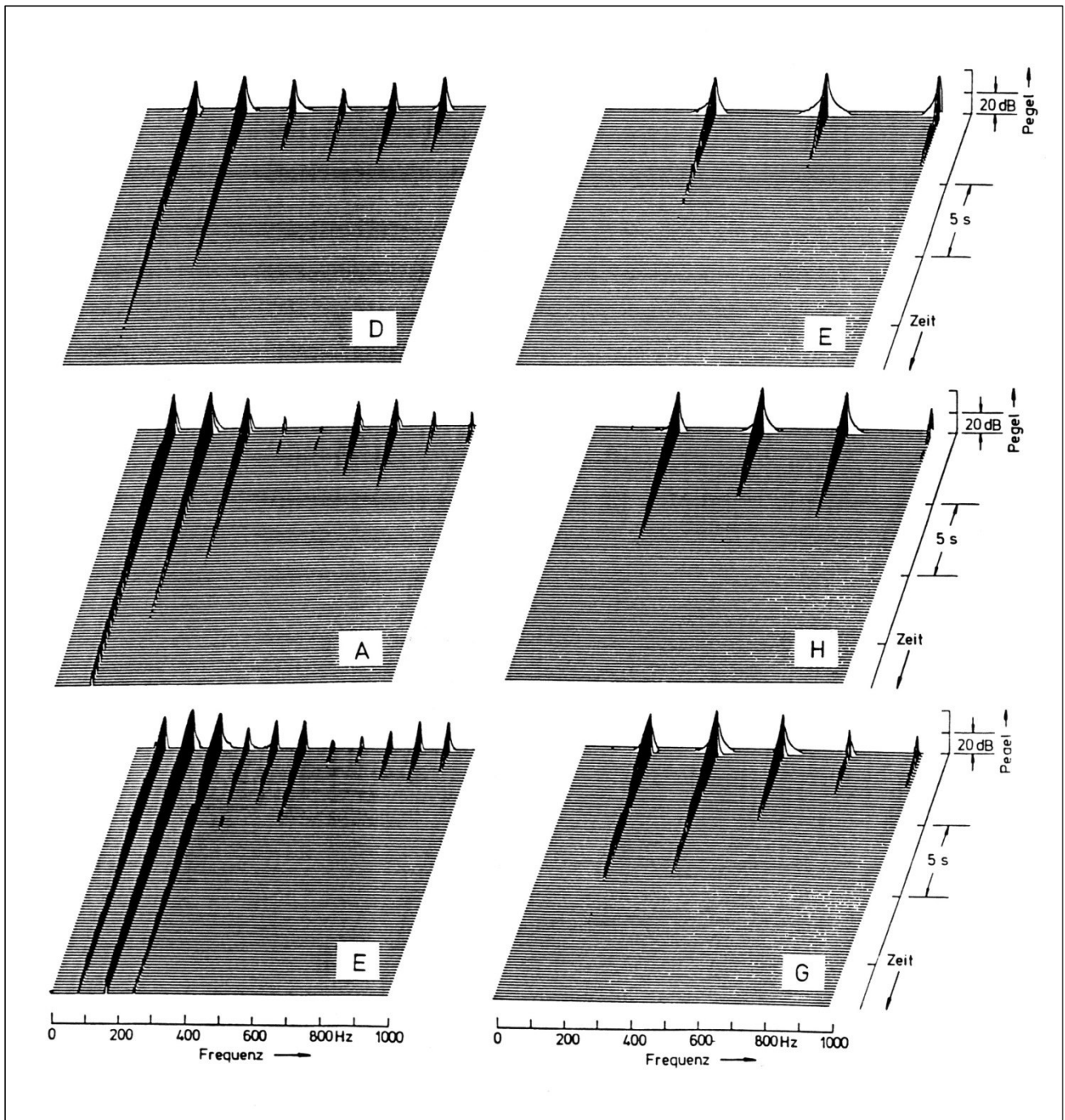


Fig. 10. "Wasserfalldiagramme" von Saitenklängen der Gitarre Gibson Explorer.
Die Abkürzungen bezeichnen die leer gespielte Saite.

Fig. 10 gibt das Ausschwingverhalten der Saitenklänge einer Gitarre wieder. Die sechs Saiten (von der tiefen E-Saite links unten bis zur hohen E-Saite rechts oben) der Gibson Explorer wurden leer mit dem Plektrum gespielt. Ebenso wie bei Elektrobässen (siehe Fig. 5) ist auch bei Elektrogitarren zu erkennen, dass die Saitenklänge in aller Regel umso kürzer nachklingen, je höher ihre Frequenz ist. Darüber hinaus kann auch erwartet werden, dass sie im allgemeinen umso kürzer nachklingen, je höher die Lage ist, in der sie gegriffen werden. Am längsten klingt in aller Regel auch hier der Grundton nach, der somit in der Mehrzahl der Fälle das Abklingen des Gesamtklantes bestimmen wird.

3. SCHWINGUNGSMODEN VON ELEKTROBÄSSEN

Den eingangs geschilderten Überlegungen zufolge stellen die Saiten den musikalisch aktiven Teil eines elektrischen Zupfinstrumentes dar. Korpus und Hals haben bezüglich der Erzeugung des musikalischen Signales eine lediglich passive Funktion. Es gibt jedoch eine ganze Reihe von Hinweisen darauf, dass der Klang durch deren Schwingungsverhalten mitbestimmt wird. Um Aufschluss darüber zu erhalten, bei welchen Frequenzen der Korpus und der Hals mitschwingen, und welche Schwingungsformen sie dabei ausbilden, wurden Untersuchungen an den zwei Bassgitarren durchgeführt.

3.1. Messverfahren

Mit einer Messapparatur, die in [18] ausführlich beschrieben ist, wurden zwei Bassgitarren hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens untersucht. Der Korpus des zu untersuchenden Instrumentes lag auf der Plattform einer Zwei-Achsen-Verstelleinrichtung. Mit einem elektrodynamischen Schwingerreger, der nahe dem Steg von der Unterseite her angedrückt war, wurde der Korpus senkrecht zu seiner Oberfläche durch ein Pseudo-Rauschsignal zum Schwingen gebracht. Aufbauend auf den Überlegungen von Abschnitt 2.2.3 wurde für die Messung der Frequenzbereich von 0 Hz bis 500 Hz gewählt. Die auf den Korpus übertragene Wechselkraft wurde mit einem Piezo-Aufnehmer gemessen. Zur kontaktlosen Messung der Bewegung des Korpus und des Halses wurde ein Laser-Doppler-Vibrometer (Polytec OFV 3000 mit OFV 302) verwendet. Die Bewegung wurde senkrecht zur Oberfläche, d.h. in derselben Richtung wie die anregende Kraft gemessen. Es wird also ausschließlich die Bewegung aus der Ebene heraus betrachtet, die durch den Korpus und den Hals aufgespannt wird. Die zugehörigen Schwingungen könnten in mechanischer Nomenklatur als Plattenschwingungen bezeichnet werden. Scheibenschwingungen, bei denen sich der Korpus oder der Hals in ihrer Ebene bewegen, lassen sich mit der verwendeten Apparatur nicht messen.

Die Übertragungsfunktion Schnelle/Kraft wurde für jeden Messpunkt mit einem Analysator Ono Sokki CF 6400 bestimmt und über IEC-Bus in einen Rechner übertragen. Da der Einleitungspunkt der Kraft im Allgemeinen ein anderer als der Punkt ist, an dem die Schnelle gemessen wird, handelt es sich bei der Übertragungsfunktion um eine Transfer-Impedanz bzw. um deren Kehrwert, eine Transfer-Admittanz.

Im Rechner wurde mit dem Programmpaket STARMODAL eine Modalanalyse durchgeführt. Einige Ergebnisse, die als typisch gelten können, sind in den beiden folgenden Abschnitten zusammengestellt.

3.2. Schwingungen des Action Bass

Im vorliegenden Abschnitt werden die Bewegungsformen des Action Bass (siehe Abschnitt 2.2.1) behandelt. Die dargestellten Moden umfassen den Bereich der Grundtonfrequenzen bis etwa zum 15. Bund der G-Saite.

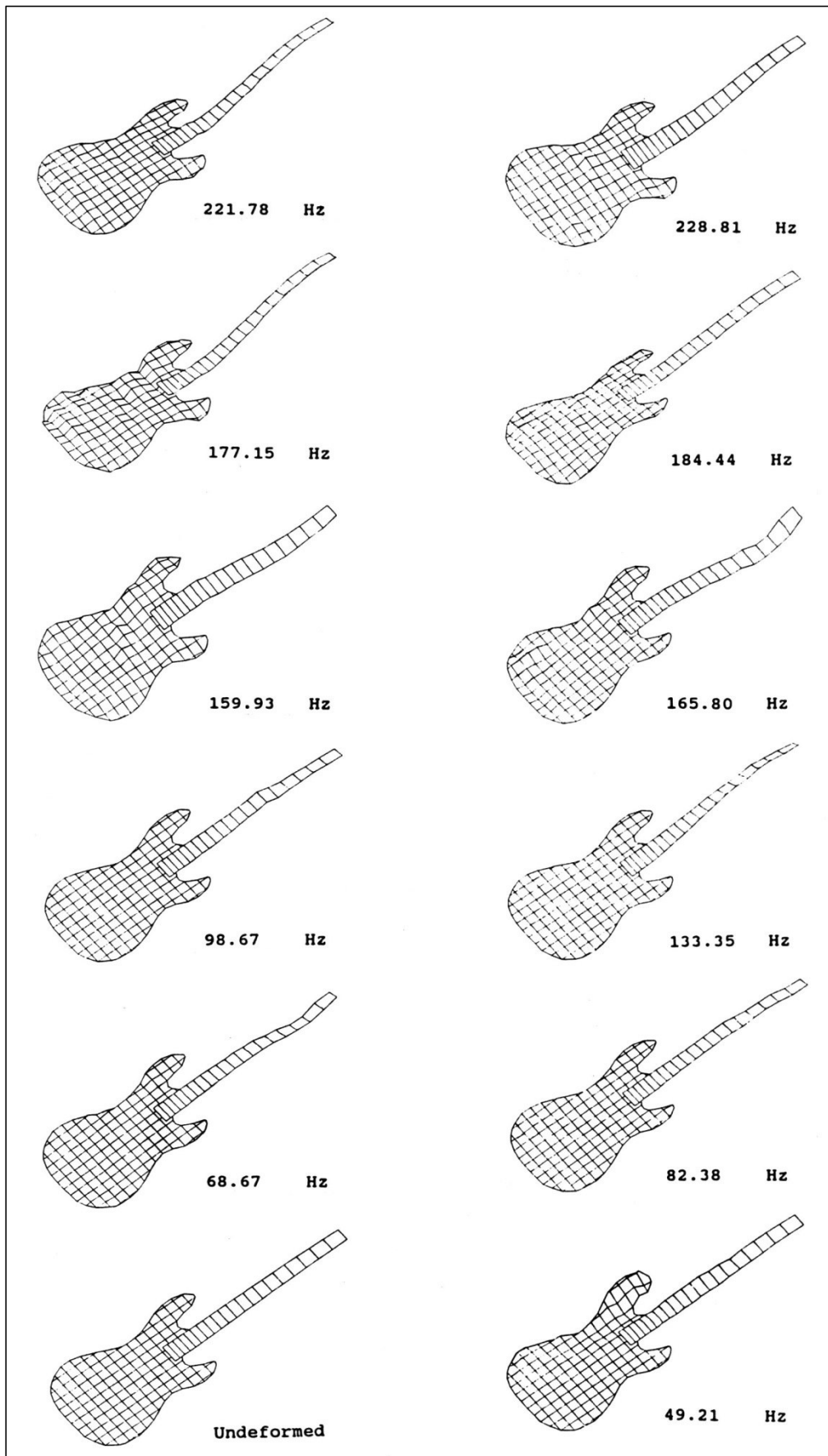


Fig. 11. Schwingungsformen und -frequenzen des Action Bass.

Fig. 11 zeigt eine Auswahl von Ergebnissen; weitere Resultate können [18] entnommen werden. Auf dem Korpus wurde ein 3 cm * 3 cm-Messraster verwendet; auf dem Hals wurde nahe der Bünde gemessen. Die Auslenkungen sind stark überhöht wiedergegeben. Zum Vergleich ist im linken unteren Teildiagramm von Fig. 11 (und ebenso von Fig. 12) die unverformte Struktur dargestellt. Die charakteristischen Frequenzen, wie sie die Analyse in STARMODAL liefert, sind bis auf zwei Stellen hinter dem Komma angegeben. Diese Nachkommastellen werden im Folgenden fallengelassen.

Man erkennt eine Vielzahl unterschiedlicher Schwingungsformen, die teilweise durch Bewegungen des Korpus, teilweise durch Verformungen des Halses gekennzeichnet sind. So deformiert sich beispielsweise bei 184 Hz der Korpus stark, während der Hals weitgehend in Ruhe bleibt. Bei 159 Hz bzw. 165 Hz führt der Hals ausgeprägte Biegeschwingungen aus, für die zwei Bäuche der Durchbiegung auszumachen sind. Bei 133 Hz verdreht sich der Hals und führt eine Torsionsschwingung aus.

3.3. Schwingungen des Peavey Dyna Bass

Die Schwingungsmoden von Fig. 12 beziehen sich auf den Peavey Bass, der in Abschnitt 2.2.2. vorgestellt wurde. Links unten ist wiederum die unverformte Bassgitarre mit dem Messraster eingefügt. In der Mitte des Halses ist nun eine weitere Messlinie hinzugefügt worden. Eine Torsionsschwingung des Halses ist beispielsweise bei 117 Hz zu beobachten. Mehrere unterschiedliche Biegeschwingungen treten auf; so sind z.B. bei 143 Hz auf dem Hals deutlich zwei Schwingungsbäuche zu erkennen.

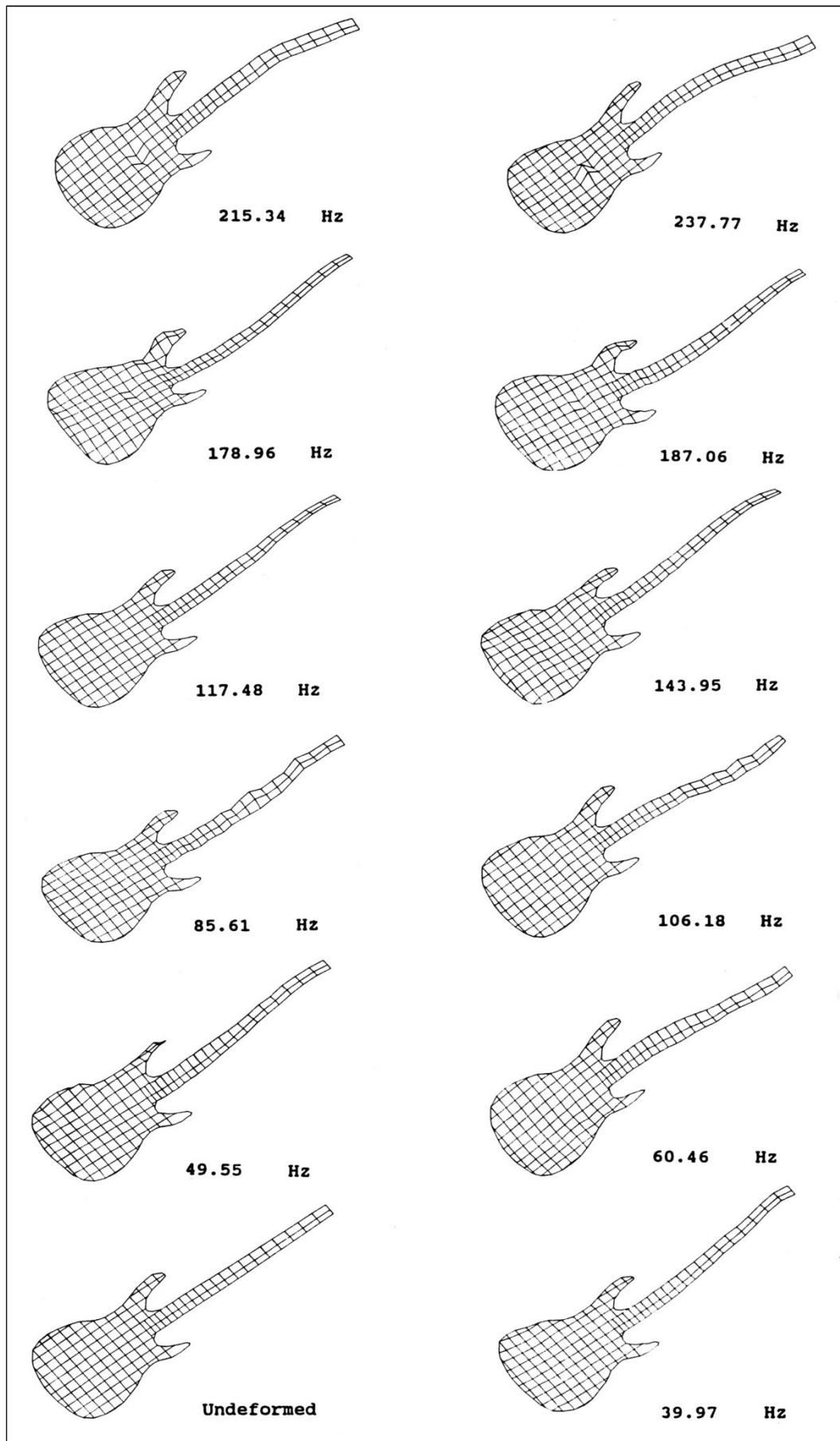


Fig. 12. Schwingungsformen und -frequenzen des Peavey Dyna Bass.

3.4. Zusammenfassende Bemerkungen

Die Schwingungsbilder der Fig. 11 und 12 liefern anschauliche Belege dafür, dass Korpus und Hals von Bassgitarren in keiner Weise starre Körper darstellen; vielmehr zeigen sie ein vielgestaltiges "Eigenleben". Dies lässt Rückwirkungen auf die Schwingungen der Saiten und damit Einflüsse auf die Saitenklänge erwarten. Aus mehreren Gründen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die dargestellten Ergebnisse einerseits zu wenig, andererseits zu viel Information zu sämtlichen Ursachen von Dead Spots enthalten.

Bei den in diesem Kapitel beschriebenen Messungen wurde der Elektrobass in der Nähe des Steges angeregt. Schwingungsmoden, die an dieser Stelle einen Knoten aufweisen, bleiben unerkannt. In diesem Sinne sind die Ergebnisse der Modalanalyse im Hinblick auf Dead Spots möglicherweise unvollständig. Zudem erfolgt die Anregung senkrecht zur Oberfläche des Korpus. Wie schon oben unter 3.1 diskutiert, wird in derselben Richtung die Bewegung von Korpus und Hals gemessen. Diese Art von Modalanalyse kann somit zwangsläufig Schwingungen nur in einer Richtung, nämlich senkrecht zur Oberfläche von Korpus und Hals erfassen. Es steht zu vermuten, dass diese Schwingungen, die wie bei einem Balken oder einer Platte in Biege- und Torsionsschwingungen unterteilt werden können, die größte Bedeutung in Bezug auf Dead Spots haben. Die Bewegung in der Ebene des Korpus, die für Dead Spots möglicherweise ebenfalls relevant sein könnte, lässt sich auf diese Art jedoch nicht messen.

Andererseits liefert die Modalanalyse höchstwahrscheinlich auch mehr Information, als für die musikalische Nutzung der Bassgitarre relevant ist. Die in den Fig. 11 und 12 zusammengestellten Schwingungsformen sind sehr anschaulich; einige von ihnen stellen mit Sicherheit auch die Ursache vieler Erscheinungen dar, die der Spieler bemerkt. Aussagen über ihre tatsächliche Bedeutung lassen die Schwingungsbilder jedoch nur bedingt zu. Zum einen sind die Amplituden normiert, so dass das wirkliche Ausmaß der Schwingung nicht direkt erkennbar ist. Zum anderen können beim Spielen Anregungsort und -frequenz so beschaffen sein, dass manch eine der möglichen Schwingungsmoden gar nicht angeregt wird.

Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt ist, dass die Bassgitarre zur Schwingungsmessung anders gelagert werden muss, als dies beim Spielen der Fall ist. Beispielsweise liegt der Korpus auf einer hölzernen Unterlage und wird seitlich arretiert. Die Randbedingungen haben bekanntlich einen ausgeprägten Einfluss auf Schwingungen. Unterschiede in der Auflagerung können daher unterschiedliche Schwingungsformen und -frequenzen zur Folge haben.

Daraus resultieren zwei Vorgaben für die folgenden Untersuchungen. Als erstes sind Dead Spots im realen Spielbetrieb nachzuweisen und zu lokalisieren (Kapitel 4). Dies hat an repräsentativen Instrumenten unter realen Bedingungen zu erfolgen. Als zweites sind an denselben Instrumenten unter möglichst ähnlichen Bedingungen zielgerichtete Messungen derjenigen mechanischen Größen durchzuführen, die möglichst direkte Rückschlüsse auf das Zusammenwirken zwischen Saite und Instrument zulassen (Kapitel 5 und 6). Die Ergebnisse sollen möglichst direkten und möglichst vollständigen Aufschluss über die Ursachen der beobachteten Dead Spots geben.

4. MESSUNG DES ABKLINGVERHALTENS

Im Folgenden wird das zeitliche Abklingen des Saitensignales behandelt. Dieses Signal wird von einem schwingungsfähigen Gebilde erzeugt, dessen aktiver Teil die gezupfte Saite ist. Den passiven Teil bilden Korpus und Hals zusammen mit den Auflagern.

4.1. Einfluss der Saite

Demnach ist zu erwarten, dass das Saitensignal zunächst vom Ort und von der Art des Anzupfens, Anschlagens bzw. Anreißens abhängen wird [19 bis 21]. Darüber hinaus weiß jeder Gitarrist, welche große Rolle die Qualität der Saite spielen kann [22 und 23]. Keiner dieser - mit Sicherheit vorhandenen - Einflüsse soll hier untersucht werden. Es wird demnach nicht betrachtet, inwiefern sich die Abklingzeiten unterschiedlich gearteter oder unterschiedlich lang bespielter Saiten unterscheiden. Vielmehr wird lediglich interpretiert, inwiefern die Abklingdauern von Klängen, die auf ein und derselben Saite, jedoch an unterschiedlichen Bündeln gespielt werden, vom erwarteten Verlauf abweichen. Zu erwarten wäre dabei den Untersuchungen von Kapitel 2 zufolge, dass ein Klang im Allgemeinen umso schneller abklingt, je höher der Bund ist, an dem die Saite gedrückt wird.

Sämtliche untersuchten Instrumente sind mit Saiten der gleichen Stärke und etwa gleichem Zustand (eingespielt, circa zehn Spielstunden) bestückt. Gestimmt wird auf Standard-Tonhöhe, d.h. relativ zu A4 entsprechend 440 Hz. Das Abklingen wird breitbandig gemessen, d.h. einzelne Teiltöne werden dabei nicht herausgefiltert. Wenn die Amplituden der Teiltöne eines Saitenklanges vergleichbar groß sind, können demnach Schwebungseffekte eine Rolle spielen, die davon herrühren, dass die Intervalle der Teiltonfrequenzen nicht streng harmonisch sind. Dies liegt zum einen in der Biegesteifigkeit der Saite begründet, die somit keine ideale (biegeschlaffe) Saite im mechanischen Sinne, sondern vielmehr einen (biegesteifen) Balken unter starker Vorspannung darstellt [24]. Zum anderen spielt die von der Frequenz abhängige Impedanz an den beiden Enden der Saite eine Rolle, die sich auf die einzelnen Teiltöne in unterschiedlichem Maße auswirkt [25]. Darüber hinaus kann auch die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung eine Rolle spielen [26].

All diese Einflüsse können wirksam sein, werden jedoch nicht gesondert betrachtet. Vielmehr wird für jede Saite an jedem Bund ein Ein-Zahl-Wert dadurch bestimmt, dass gemessen wird, wie der Gesamtpegel des jeweiligen Saitenklanges als Funktion der Zeit abnimmt.

4.2. Messverfahren

Das zu untersuchende Instrument wurde von einem versierten Hobby-Musiker dem normalen Spielbetrieb entsprechend gehandhabt, d.h. mittels eines Riemens umgehängt und im Stehen gespielt. Haltung und Handpositionen entsprachen ebenfalls den Verhältnissen beim üblichen Spielen. Während bei den Elektrobässen die Finger zum Anreißen der Saite verwendet wurden, kam bei den Gitarren hierzu ein Plektrum zum Einsatz. Die Einstellung der jeweils am Instrument vorhandenen Regler erfolgte so, dass sie die geringste Einflussnahme auf Amplitude und Frequenzverlauf des Ausgangssignals aufwiesen; bei Instrumenten mit mehreren Tonabnehmern wurde der dem Hals nächstgelegene auf den Klinkenausgang geschaltet und sein Signal für die weitere Untersuchung herangezogen. Nach hochohmiger Auskopplung und Verstärkung wurde dieses Signal einem Pegelschreiber Brüel & Kjaer 2305 bzw. 2307 mit einem 50 dB-Potentiometer zugeführt. Auf dem Registrierpapier,

das mit der Geschwindigkeit 3 mm/s lief, wurde der zeitliche Verlauf des Gesamtpegels beim und nach dem Anzupfen breitbandig aufgezeichnet.

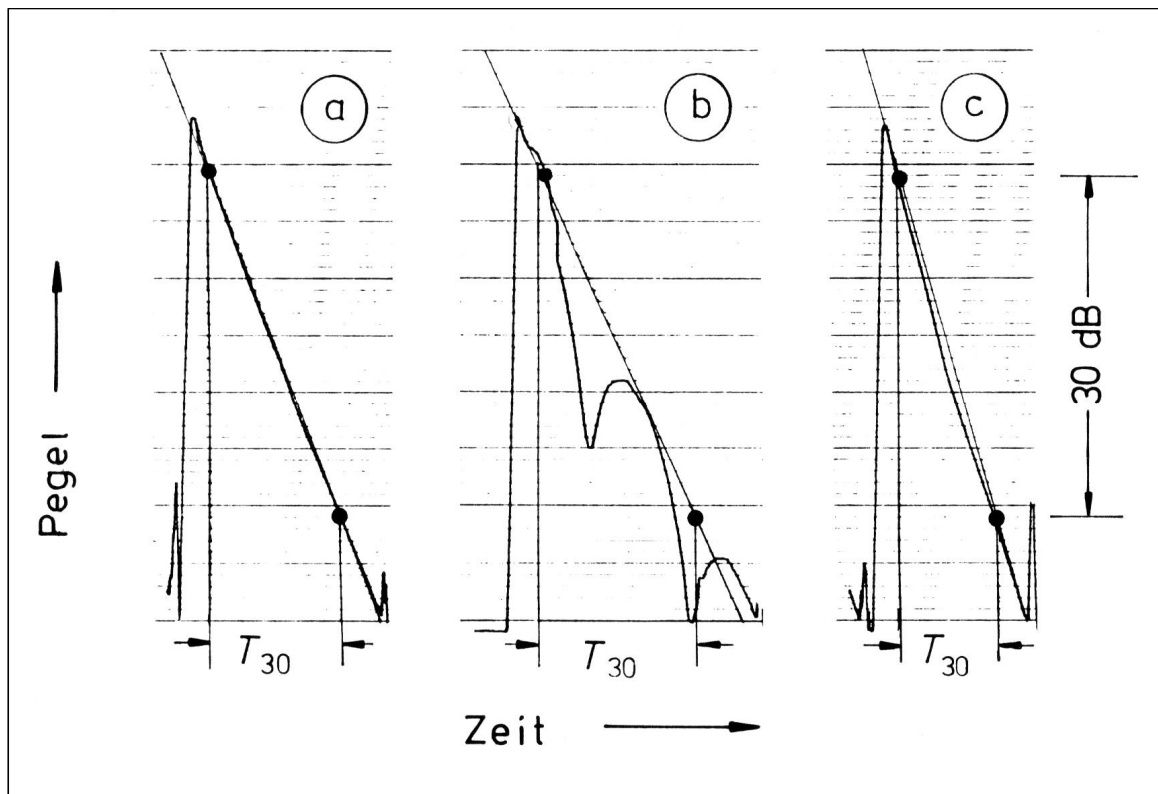


Fig. 13. Typische Abklingkurven der Gitarre Gibson Explorer mit Hilfskurven zur Entnahme der Nachklingzeit T_{30} .

Das gemessene Abklingverhalten ist in Fig. 13 anhand von drei Varianten beispielhaft dargestellt. Ursprünglich war generell mit einem Verhalten wie im linken Teildiagramm a gerechnet worden, nämlich einem im Pegelmaß geradlinigen Abklingen. Es zeigt sich jedoch, dass dies nur in den wenigsten Fällen auftritt. So ergibt sich durchaus des Öfteren ein nicht-monotones Abklingen (Beispiel im mittleren Teildiagramm b). Die meisten Versuche resultieren in einem weniger dramatischen, jedoch dennoch nicht-geradlinigem Abklingverhalten, wie beispielhaft im rechten Teildiagramm c gezeigt. Die Unterschiede, die sich in den Abklingkurven von Fig. 13 zeigen, lassen sich anhand des unterschiedlich raschen Abklingens der einzelnen Teiltöne des jeweiligen Saitenklanges erklären.

Üblicherweise wird eine Ausschwingzeit durch diejenige Zeitdauer definiert, nach der das betrachtete Signal nach geeigneter Anregung um eine vorgegebene Pegeldifferenz abgesunken ist. Diese Definition wird auch bei den vorliegenden Messergebnissen angewandt. Da aber für Abklingkurven wie in Fig. 13 b bei der Auswertung eine Mehrdeutigkeit auftreten kann, wird durch sämtliche gemessenen Verläufe eine Gerade gelegt. Dies erfolgt rein optisch so, dass die Gerade das mittlere Abklingverhalten wiedergibt. Entsprechende Auswertungen sind aus Fig. 13 a bis c zu ersehen.

In der Raumakustik wird als Kriterium für die Nachhallzeit ein Absinken des Pegels um eine Differenz von 60 dB herangezogen. Eine so große Pegeländerung ist für das Spielen eines Musikinstruments wenig relevant. Mit Blick auf die Anwendung auf Musikinstrumente wurde deshalb für die vorliegenden Messungen ein kleinerer Bereich, nämlich 30 dB gewählt. So ist die Nachklingzeit T_{30} als diejenige Zeitdauer definiert, innerhalb derer der gemittelte Gesamtpegel um 30 dB abnimmt. Diese Nachklingzeit, von Musikern auch "Sustain" genannt, lässt sich dementsprechend aus den Versuchsprotokollen entnehmen, indem man die horizontale Distanz der Schnittpunkte der oben erwähnten Näherungsgeraden mit zwei Pegellinien misst, die 30 dB auseinander liegen, und dabei die Papiergeschwindigkeit berücksichtigt. Zur Veranschaulichung wird wieder auf Fig. 13 a bis c verwiesen.

Gemäß dem oben beschriebenen Vorgehen wurden für jedes der untersuchten Instrumente für jede Saite an jedem Bund (einschließlich des 0. Bundes, also der leeren Saite) Messprotokolle angefertigt. Jede Messung wurde zweimal durchgeführt. Zum Greifen der Saite wurde der Zeige- oder der Mittelfinger benutzt, wobei die Griffhand zwischen zwei Messungen jeweils vollständig gelockert oder vom Hals des Instrumentes abgenommen wurde, um eventuell mögliche Einflüsse des Greifens auf den Nachklang weniger ausgeprägt in die Ergebnisse einfließen zu lassen.

In den folgenden Ergebnisdiagrammen ist nun die Nachklingzeit T_{30} des Saitenklanges, die gemäß obiger Beschreibung bestimmt wurde, über der Nummer des jeweils gegriffenen Bundes aufgetragen. Für jede Saite ist ein Diagramm erstellt. Beide Messungen je Bundposition sind eingetragen, so dass auch ein Eindruck von der Messunsicherheit vermittelt wird. Bei den Elektrobässen lassen sich generell etwas größere Unterschiede als bei den Gitarren feststellen. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die Gitarrensaiten konsistent auf dieselbe Weise mit dem Plektrum angerissen wurden. Bei den Bässen wurden dagegen die Saiten das eine Mal mit dem Zeigefinger, das andere Mal mit dem Daumen angezupft.

4.3. Abklingen bei Elektrobässen

Zunächst werden Elektrobässe betrachtet. Stellvertretend ist in Fig. 14 der Action Bass abgebildet. In Fig. 15 findet sich das Abklingverhalten für eben diesen Elektrobass. Es ist stets für diejenige Saite, die im betreffenden Teildiagramm vermerkt ist, die Nachklingzeit T_{30} über der Nummer des Bundes angegeben, an dem die Saite gegriffen wird. In Fig. 16 sind die entsprechenden Ergebnisse für den Peavey Dyna Bass dargestellt. Die Teildiagramme sind so angeordnet, dass die tiefste Saite immer links unten und die höchste rechts oben zu finden ist.



Fig. 14. Elektrobass Action Bass.

Allen Kurven ist die generelle Tendenz zu entnehmen, dass mit zunehmender Bund-Nummer die Nachklingdauer, also das "Sustain", abnimmt. Dies deckt sich mit den in Abschnitt 2.3.3 gemachten Beobachtungen und entspricht somit der Erwartung. Die Abnahme des Sustain über der Bund-

Nummer ist jedoch, wie schon oben erwähnt, keineswegs gleichmäßig. So können z.B. in Fig. 15 links oben ausgeprägte lokale Maxima im Sustain beobachtet werden. Für den Musiker machen sie sich darin bemerkbar, dass diese Saite im 3., 9. und 16. Bund ein relativ "schlechtes", im 8. und 13. Bund jedoch ein relativ "gutes" Sustain aufweist. Ähnliche Erscheinungen treten auch bei den anderen Saiten auf. So nimmt das Sustain z.B. bei der D-Saite des Action Bass (Fig. 15 rechts unten) sehr kleine Werte an, sobald diese Saite in den tieferen Lagen (niedrige Bund-Nummern) gegriffen wird, erholt sich am 6. Bund etwas und nimmt dann noch weiter ab. Oberhalb des 11. Bundes ist das Sustain jedoch wieder deutlich größer und fällt erst am 22. Bund wieder auf die schon am 4. Bund beobachtete Länge ab.

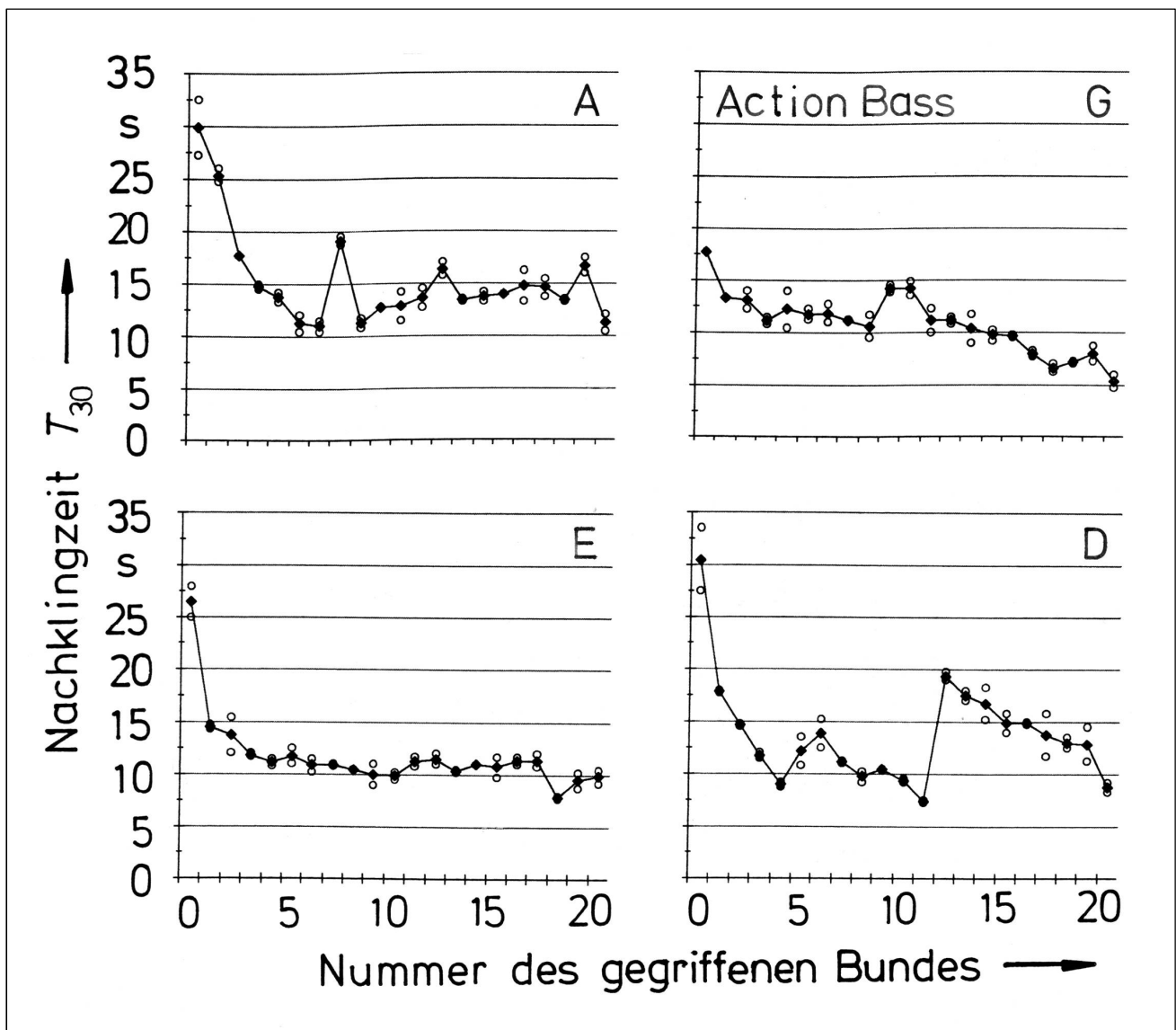


Fig. 15. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall des Action Bass.

Im Zusammenhang mit einer Stelle, an der das Sustain besonders kurz ist, wird von einem "Dead Spot" gesprochen. Für ein besonders langes Sustain existiert kein allgemeiner Ausdruck, doch könnte man solche Stellen dann konsequenterweise z.B. "Live Spots" oder "Sweet Spots" nennen.

Aus den Diagrammen in Fig. 15 auf der vorhergehenden Seite ergibt sich nun bezüglich von Dead Spots des Action Bass:

- A-Saite: 6. und 8. Bund, entsprechend 77,5 Hz und 87,5 Hz;
- D-Saite: 4., 8. und 11. Bund, entsprechend 92,5 Hz, 116,5 Hz und 139 Hz;
- G-Saite: 3., 8., 11. u. 17. Bund, entsprechend 116,5 Hz, 155 Hz, 185 Hz u. 262 Hz.

Live Spots treten auf bei:

- A-Saite: 7., 12. und 19. Bund, entsprechend 82,5 Hz, 110 Hz und 165 Hz;
- D-Saite: 6. und 12. Bund, entsprechend 104 Hz und 147 Hz;
- G-Saite: 9. und 10. Bund, entsprechend 165 Hz und 175 Hz.

Gemäß Fig. 16 auf der folgenden Seite hat der Peavey Dyna Bass Dead Spots bei:

- A-Saite: 3., 9. und 16. Bund, entsprechend 65,5 Hz, 92,5 Hz und 139 Hz;
- D-Saite: 3., 8. und 15. Bund, entsprechend 87,5 Hz, 116,5 Hz und 175 Hz;
- G-Saite: 1. und 7. Bund, entsprechend 104 Hz und 147 Hz.

Live Spots sind zu beobachten bei:

- E-Saite: 17. Bund, entsprechend 110 Hz;
- A-Saite: 7. und 13. Bund, entsprechend 82,5 Hz und 116,5 Hz;
- D-Saite: 5., 11. und 17. Bund, entsprechend 98 Hz, 139 Hz und 196 Hz;
- G-Saite: 8. Bund, entsprechend 155 Hz.

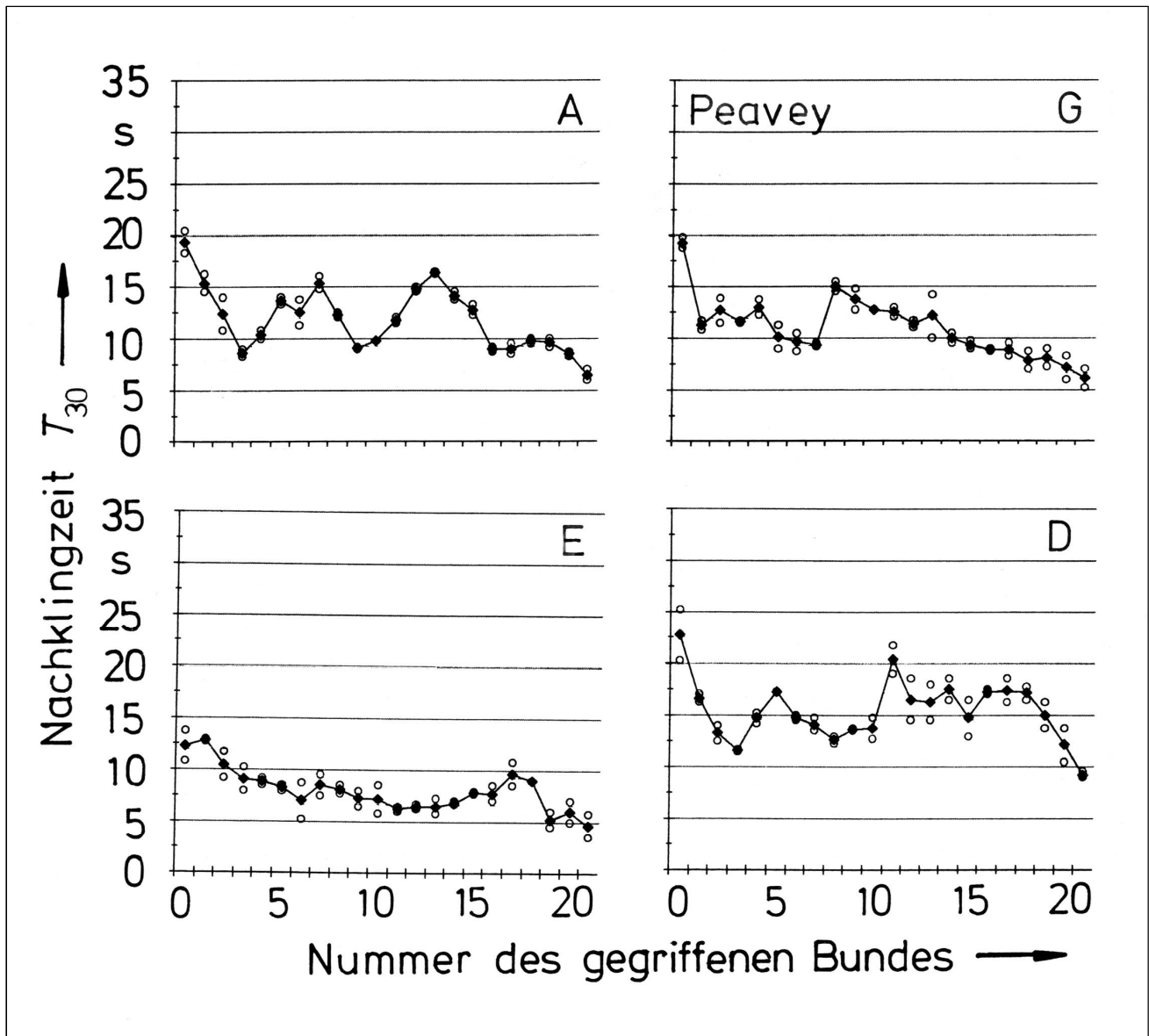


Fig. 16. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall des Peavey Dyna Bass.

4.4. Abklingen bei Elektrogitarren

Als Beispiel für eine der untersuchten Elektrogitarren ist in Fig. 17 zunächst die Gitarre Travelling Wilbury TW 500 abgebildet. Die Messergebnisse (Nachklingzeit T_{30} über der Bund-Nummer) sind in den Fig. 18 und 20 bis 22 zusammengestellt. Diese Diagramme sind entsprechend den im vorhergehenden Abschnitt für die Bassgitarren beschriebenen Figuren aufgebaut und angeordnet. Die Unterscheidung zwischen tiefer und hoher E-Saite ergibt sich aus dem Zusammenhang. Wie es zu erwarten war, zeigen sich prinzipielle Übereinstimmungen zwischen Gitarren und Bässen, wobei allerdings die Abnahme des Nachklings zu höheren Lagen (Bund-Nummern) hin bei den Gitarren klarer ausgeprägt ist. Wieder zeigen sich in einzelnen Lagen bei einzelnen Saiten lokale Maxima und Minima, die auf Dead Spots und Live Spots hinweisen.

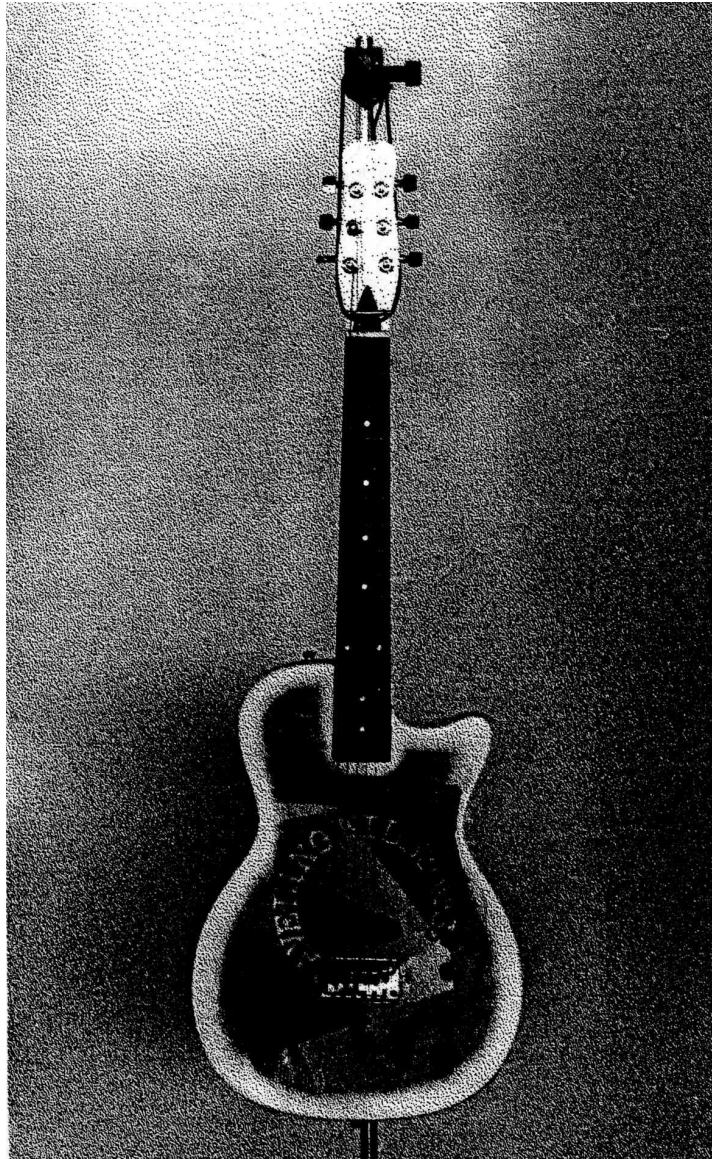


Fig. 17. Elektrogitarre Travelling Wilbury TW 500.

Fig. 18 bezieht sich auf die in Fig. 17 abgebildete Gitarre Travelling Wilbury TW 500. Einige Positionen erweisen sich als auffällig. So hat die TW 500 Dead Spots bei:

- A-Saite: 10. Bund, entsprechend 196 Hz;
- D-Saite: 2. und 5. Bund, entsprechend 165 Hz und 196 Hz;
- G-Saite: 1. Bund, entsprechend 208 Hz;
- H-Saite: 1. Bund, entsprechend 247 Hz;
- E-Saite: 2. und 7. Bund, entsprechend 370 Hz und 494 Hz.

Live Spots zeigen sich bei:

- E-Saite: 13. Bund, entsprechend 175 Hz;
- A-Saite: 11. Bund, entsprechend 208 Hz;
- D-Saite: 4. und 9. Bund, entsprechend 185 Hz und 247 Hz;

G-Saite: 7. Bund, entsprechend 294 Hz;
 H-Saite: 6. Bund, entsprechend 370 Hz;
 E-Saite: 4. und 11. Bund, entsprechend 416 Hz und 620 Hz.

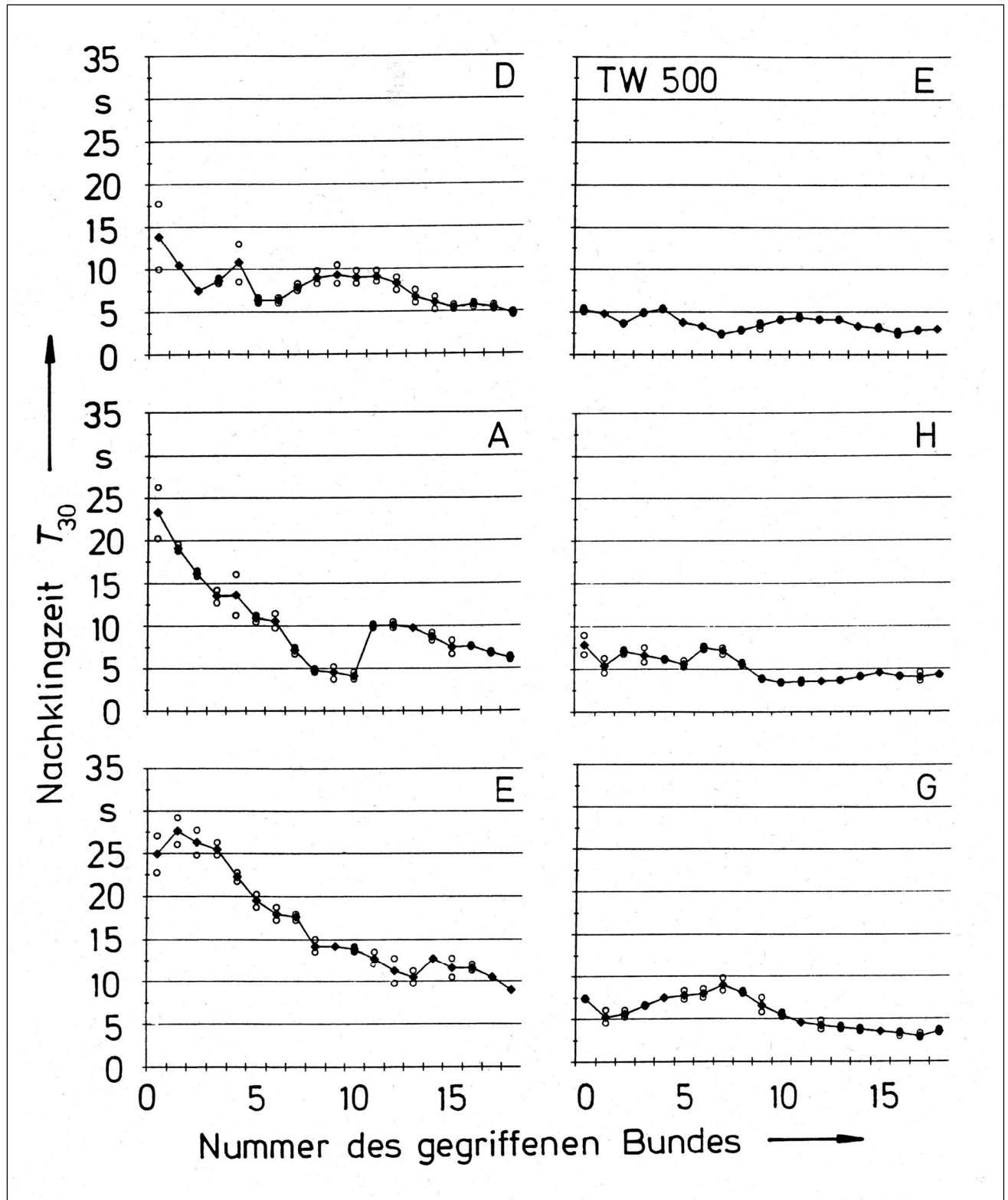


Fig. 18. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall der Gitarre Travelling Wilbury TW 500.



Fig. 19. Elektrogitarre Gibson Explorer.

Gemäß Fig. 20 auf der nächsten Seite hat die Gibson Explorer (abgebildet in Fig. 19) Dead Spots bei:

- E-Saite: 1., 9. und 17. Bund, entsprechend 87 Hz, 138 Hz und 220 Hz;
- A-Saite: 4., 6. und 13. Bund, entsprechend 138 Hz, 155 Hz und 233 Hz;
- D-Saite: 2. und 8. Bund, entsprechend 165 Hz und 233 Hz;
- G-Saite: 2., 5., 10. u. 14. Bund, entsprechend 220 Hz, 262 Hz, 350 Hz und 440 Hz;
- H-Saite: 1. und 10. Bund, entsprechend 262 Hz und 440 Hz;
- E-Saite: 14. Bund, entsprechend 740 Hz.

Live Spots treten auf bei:

- E-Saite: 3. und 11. Bund, entsprechend 98 Hz und 155 Hz;

- A-Saite: 7. Bund, entsprechend 165 Hz;
 D-Saite: 3. und 10. Bund, entsprechend 175 Hz und 262 Hz;
 G-Saite: 3., 7., 12. u. 17. Bund, entsprechend 233 Hz, 294 Hz, 392 Hz und 524 Hz;
 H-Saite: 2. und 13. Bund, entsprechend 278 Hz und 524 Hz;
 E-Saite: 2. und 17. Bund, entsprechend 370 Hz und 880 Hz.

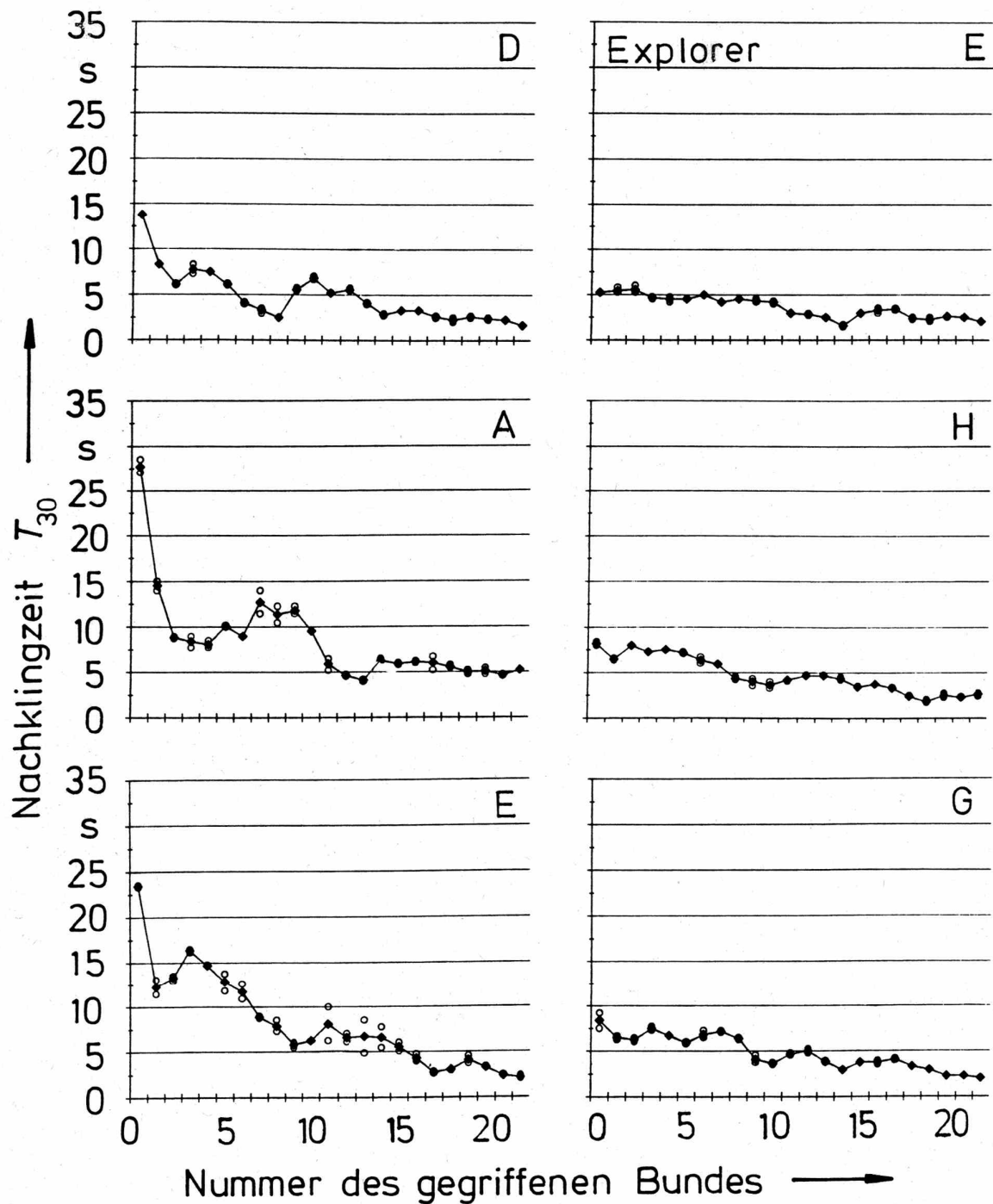


Fig. 20. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall der Gitarre Gibson Explorer.

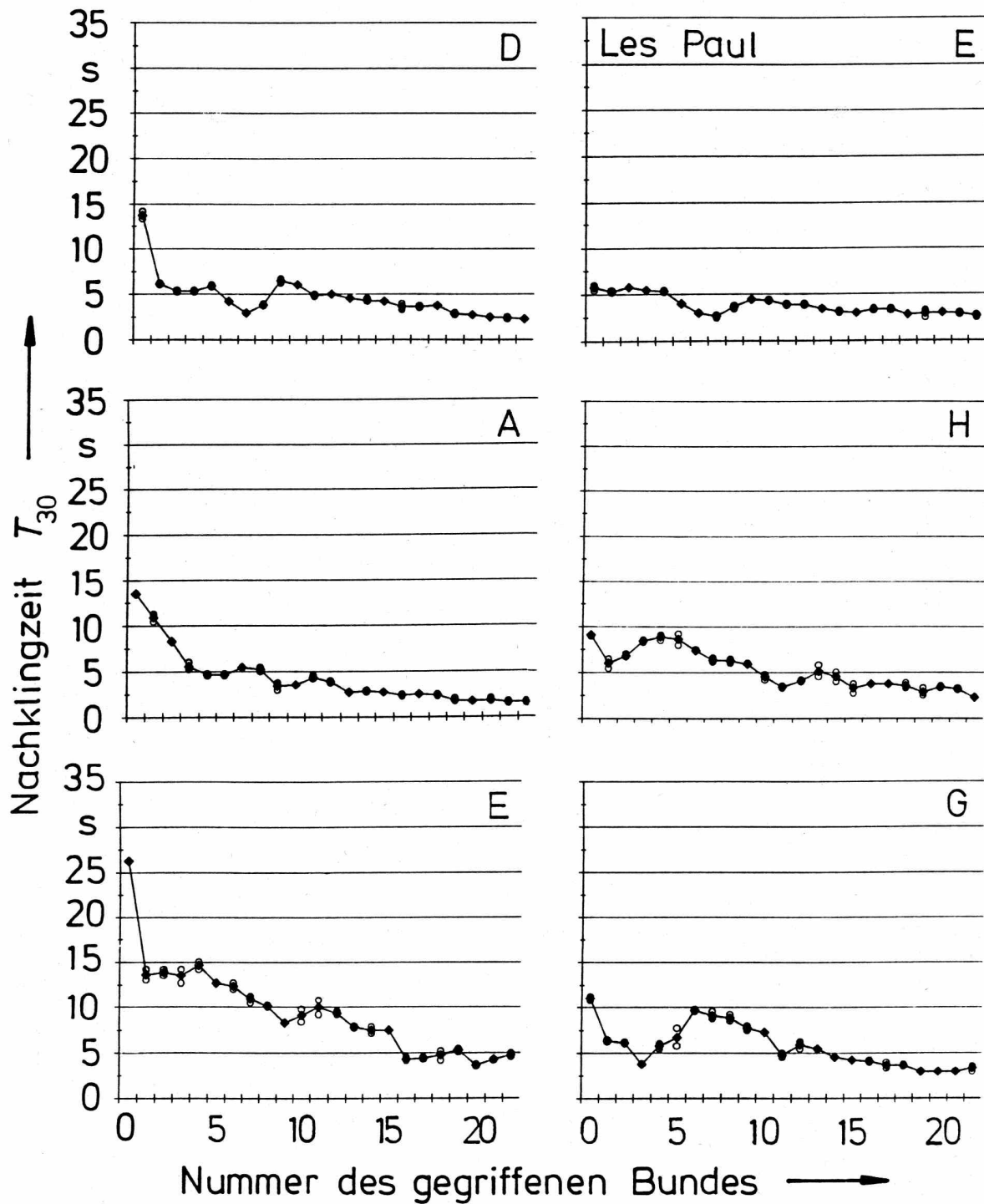


Fig. 21. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall der Gitarre Gibson Les Paul.

Wie Fig. 21 auf der vorherigen Seite zeigt, hat die Gibson Les Paul Dead Spots bei:

- E-Saite: 1., 9., 16. und 20. Bund, entsprechend 87 Hz, 138 Hz, 208 Hz und 262 Hz;
- A-Saite: 4., und 8. Bund, entsprechend 138 Hz und 175 Hz;

D-Saite: 2. und 6. Bund, entsprechend 165 Hz und 208 Hz;
 G-Saite: 1., 3., und 11. Bund, entsprechend 208 Hz, 233 Hz und 370 Hz;
 H-Saite: 1., 11. und 15. Bund, entsprechend 262 Hz, 466 Hz und 588 Hz;
 E-Saite: 7. Bund, entsprechend 660 Hz.

Live Spots sind zu beobachten bei:

E-Saite: 4., 11. und 19. Bund, entsprechend 104 Hz, 155 Hz und 247 Hz;
 A-Saite: 6. und 10. Bund, entsprechend 155 Hz und 196 Hz;
 D-Saite: 8. Bund, entsprechend 233 Hz;
 G-Saite: 6. Bund entsprechend 278 Hz;
 H-Saite: 4. und 13. Bund, entsprechend 310 Hz und 524 Hz.

Die Fender Stratocaster (Fig. 22 auf der nächsten Seite) weist Dead Spots auf bei:

E-Saite: 8. Bund, entsprechend 131 Hz;
 A-Saite: 2., 5., 10. u. 14. Bund, entsprechend 123 Hz, 146 Hz, 196 Hz und 247 Hz;
 D-Saite: 4., 6. und 9. Bund, entsprechend 185 Hz, 208 Hz und 247 Hz;
 G-Saite: 1., 5. und 11. Bund, entsprechend 208 Hz, 262 Hz und 370 Hz;
 H-Saite: 2. und 10. Bund, entsprechend 278 Hz und 440 Hz;
 E-Saite: 2., 6. und 13. Bund, entsprechend 370 Hz, 466 Hz und 700 Hz.

Sie hat Live Spots bei:

E-Saite: 9. Bund, entsprechend 138 Hz;
 A-Saite: 3., 6., 11. u. 15. Bund, entsprechend 131 Hz, 155 Hz, 208 Hz und 262 Hz;
 D-Saite: 8. und 11. Bund, entsprechend 233 Hz und 278 Hz;
 G-Saite: 9. und 13. Bund, entsprechend 330 Hz und 416 Hz;
 H-Saite: 7. und 13. Bund, entsprechend 370 Hz und 524 Hz;
 E-Saite: 3. und 17. Bund, entsprechend 392 Hz und 880 Hz.

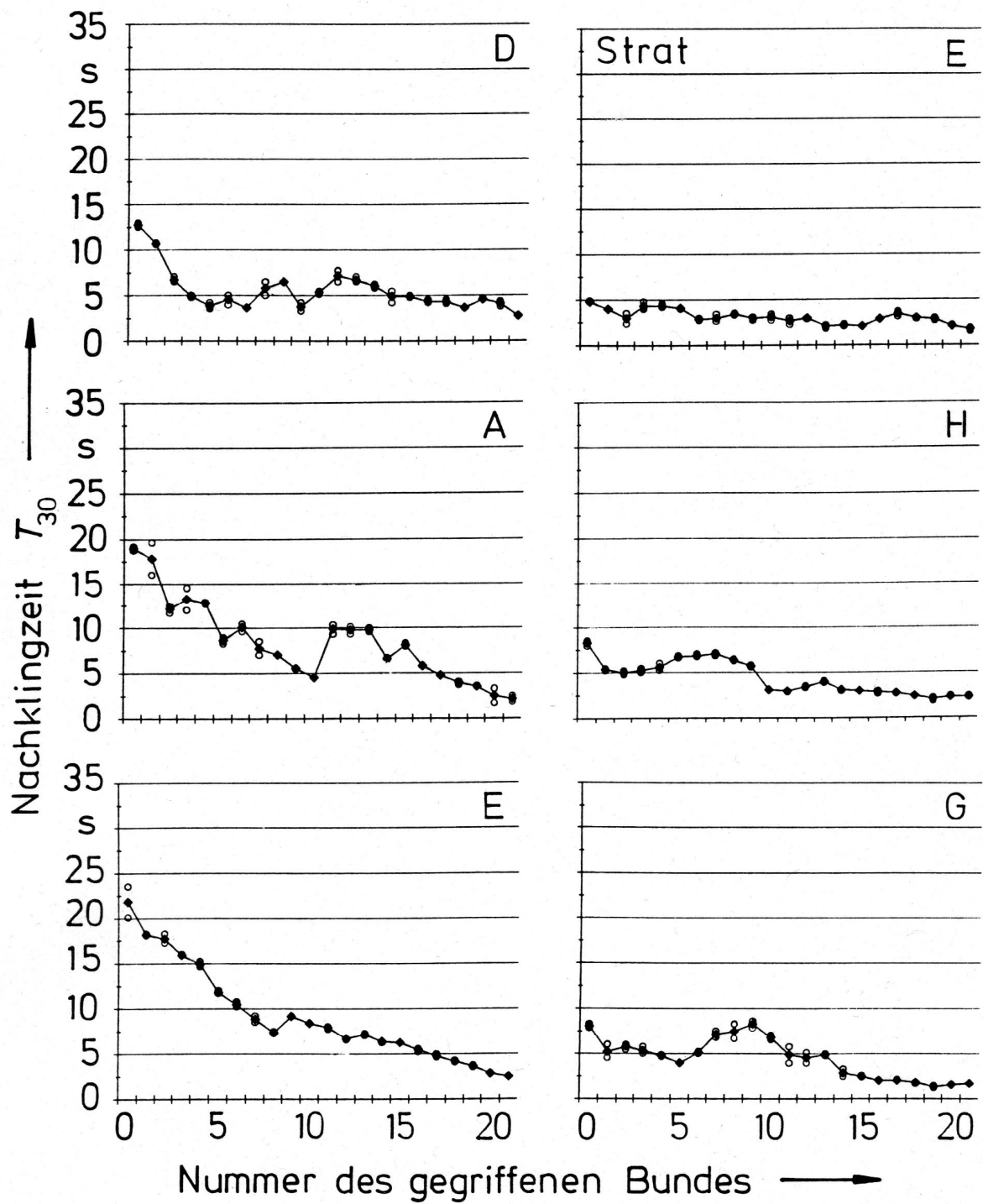


Fig. 22. Nachklingzeiten T_{30} für 30 dB Pegelabfall der Gitarre Fender Stratocaster.

4.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Dead Spots wie auch die dazu konträre Erscheinung, Live Spots, lassen sich sowohl bei Elektrobässen wie auch bei elektrischen Gitarren eindeutig nachweisen. Ihre Messung ist einfach und erfordert keinen hohen apparativen Aufwand.

Gemessen wurde die Nachklingzeit T_{30} als diejenige Zeitdauer, in welcher der Gesamtpegel eines Saitenklanges um 30 dB abfällt. Bekanntlich geht eine Differenz des Pegels von 10 dB grob mit einer Halbierung der Lautstärke einher. Subjektiv entspricht die gewählte Pegeldifferenz von 30 dB somit einer Abnahme der Lautstärke auf etwa ein Achtel ihres anfänglichen Wertes. Bei Elektrobässen misst man dafür Werte zwischen etwa 5 Sekunden und 30 Sekunden. Bei Elektrogitarren reicht diese Spanne von etwa 2 Sekunden bis in einigen Fällen über 20 Sekunden. Im Allgemeinen nimmt die Nachklingzeit mit zunehmender Bund-Nummer ab. Die Messung ergibt jedoch teilweise große Abweichungen von dieser generellen Tendenz, die nun für zwei Elektrobässe und vier Elektrogitarren dokumentiert sind.

Festzuhalten bleibt, dass die Messungen der Nachklingzeit in normaler Spielhaltung vorgenommen wurden. Es wurde weder eine Anschlagvorrichtung noch ein Kapodaster, wie z.B. in [14], verwendet. Auch wurde, anders als in [17], der Gesamtklang und nicht nur der Grundton untersucht. Nach Überzeugung der Autoren ist damit größte Praxisnähe dieser Messung gewahrt.

Um die weiteren Messungen durchführen zu können, muss die Gitarre vom Spieler getrennt und für die Untersuchung gesondert gelagert werden. Das schwingungsfähige Gebilde "Gitarre" bzw. "Elektrobass" findet damit in beiden Fällen nicht vollständig dieselbe Lagerung vor. Zwangsläufig ist damit in Kauf zu nehmen, dass die Randbedingungen des Gesamtsystems sich bei den im vorliegenden Kapitel beschriebenen Experimenten in gewissem Maße von denjenigen unterscheiden werden, die bei den folgenden Untersuchungen vorliegen.

5. KENNZEICHNUNG DES MECHANISCHEN VERHALTENS

Gegenstand der weiteren Experimente ist das mechanische Verhalten von Korpus und Hals aus der Sicht der Saite bzw. die Frage, welche Randbedingungen für eine Saite an ihrem oberen und an ihrem unteren Ende bei realen Musikinstrumenten gelten. Für die Beantwortung dieser Frage soll eine möglichst einfache und zielführende Messmethode gefunden werden.

5.1. Messverfahren

Eigene Untersuchungen haben es als sinnvoll erwiesen, an jeweils ein und derselben Stelle eine kinematischen Größe (Schwingbeschleunigung, -schnelle oder -weg) zusammen mit einer dynamischen Größe (Wechselkraft) zu bestimmen, die in derselben Richtung wirkt. Dazu dient eine Messapparatur, deren Kernstück aus einem Mini-Schwingerreger Brüel & Kjaer 4810 und einem Impedanzmesskopf Brüel & Kjaer 8001 besteht. Die zu untersuchende Gitarre oder Bassgitarre liegt auf einem Steintisch. Der Korpus ruht auf einer nachgiebigen Unterlage, der Hals ist frei beweglich. Wie Fig. 23 erkennen lässt, wird der Schwingerreger hängend so positioniert, dass die Spitze des Impedanzmesskopfes unter Vorlast (aus dem Gewicht resultierend) auf die zu messende Stelle gedrückt wird. Der Schwingerreger wird über einen Leistungsverstärker Brüel & Kjaer 2706 aus einem Rauschgenerator Brüel & Kjaer 1405 mit weißem Rauschen gespeist. Der Impedanzmesskopf misst die Wechselkraft und die Schwingbeschleunigung. Beide Signale werden in Ladungsverstärkern Brüel & Kjaer 2635 aufbereitet

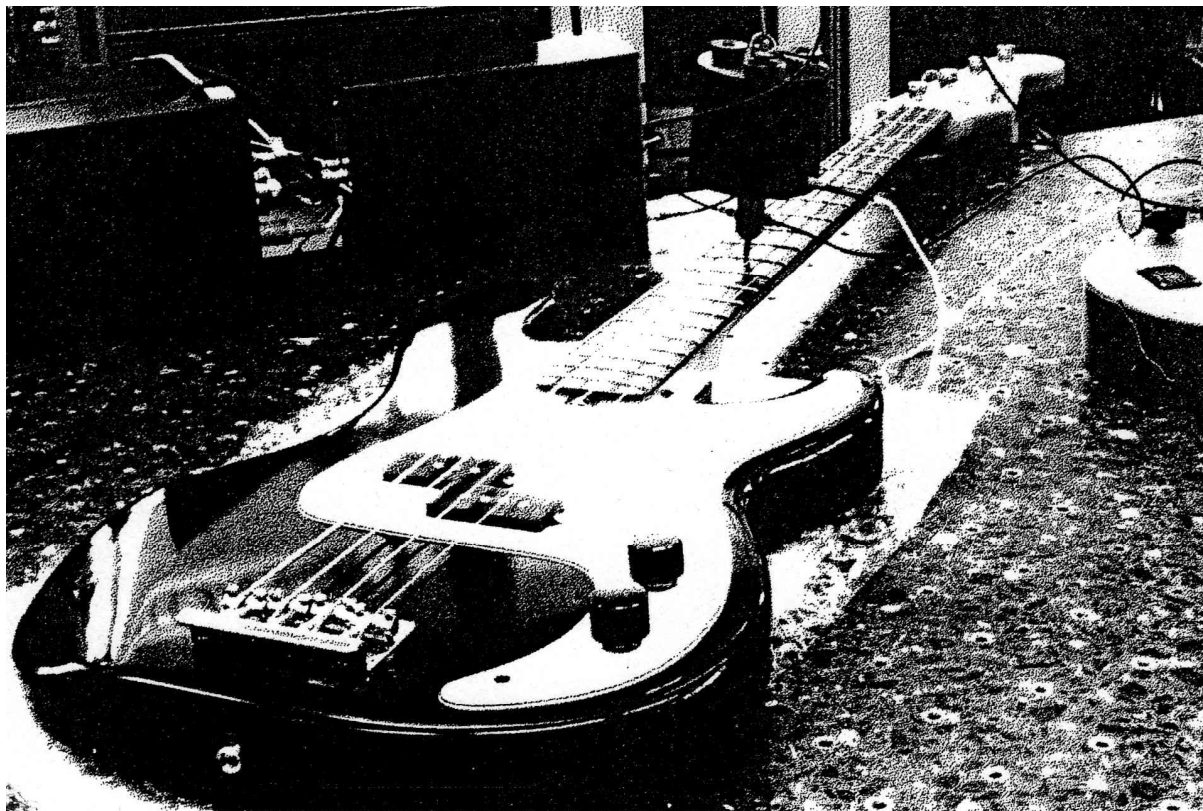


Fig. 23. Schwingerreger, Impedanzmesskopf und Tastspitze, positioniert auf dem 11. Bund des Action Bass.

und gegebenenfalls integriert, so dass aus der gemessenen Beschleunigung auch die Schwingschnelle oder der Schwingweg ermittelt werden kann.

Mit einem Zweikanal-FFT-Analysator Ono Sokki CF 350 werden das Kraft- und das Bewegungssignal im Spektralbereich miteinander zur Übertragungsfunktion verknüpft, wobei im Spektralbereich über 64 Messungen gemittelt wird. Das Ergebnis wird auf einem Plotter ausgegeben. Da die Kraft und beispielsweise die Schnelle am selben Ort bestimmt werden, handelt es sich bei dem Quotienten im Beispiel um eine Punkt-Impedanz bzw. um deren Kehrwert, eine Punkt-Admittanz.

5.2. Darstellung der Messergebnisse

Bevor jedes der vorliegenden Instrumente untersucht werden konnte, war zu überprüfen, welche Schwingungsgröße zweckmäßigerweise zu messen ist und auf welche Weise die Ergebnisse am besten darzustellen sind. Einige der Möglichkeiten, die erprobt wurden, sind im Folgenden anhand von Beispielen erläutert.

5.2.1. Mechanische Impedanz

Es liegt nahe, das mechanische Eingangsverhalten der Auflagepunkte der Saiten durch die Impedanz zu kennzeichnen, wie dies in [27] bereits für die Saite selbst praktiziert worden ist. Die mechanische Impedanz ist als

$$\underline{Z} = \underline{F}/\underline{v}$$

und somit als der Quotient aus der Wechselkraft $\underline{F}$ und der Schnelle $\underline{v}$ in derselben Richtung definiert. Um aus der gemessenen Beschleunigung die Schnelle zu ermitteln, wird im Ladungsverstärker Brüel & Kjaer 2635 über die Zeit integriert. Im Analysator wird aus den beiden Spektren die Übertragungsfunktion gebildet. Um die Information zu reduzieren, wurde darauf verzichtet, Real- und Imaginärteil getrennt darzustellen. Vielmehr ist immer der Betrag der komplexen Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz f angegeben. Beispielhaft sind zwei Sätze von Ergebnissen in den Fig. 24 und 25 zusammengestellt.

Fig. 24 auf der folgenden Seite bezieht sich auf den Peavey Dyna Bass. Dargestellt ist der Betrag der mechanischen Impedanz im Pegelmaß in einem Bereich von 60 dB. Die Frequenzachse ist linear geteilt und reicht von 0 Hz bis 500 Hz. Die zehn Teildiagramme gelten für unterschiedliche Messpunkte in der Mitte der angegebenen Bündel. Die Bezeichnung Fret No 0 (links unten) steht dabei für den Sattel, Fret No 999 (rechts oben) für den Steg. Um ein gutes Sustain zu gewährleisten, ist auf dem Hals eine möglichst hohe Impedanz anzustreben, wie sie auch am Steg in einem weiten Frequenzbereich vorliegt. Am Sattel und an den Bündeln erkennt man jedoch Minima, die darauf hindeuten, dass der Hals an diesen Stellen für bestimmte Frequenzen nicht starr, sondern nachgiebig ist.

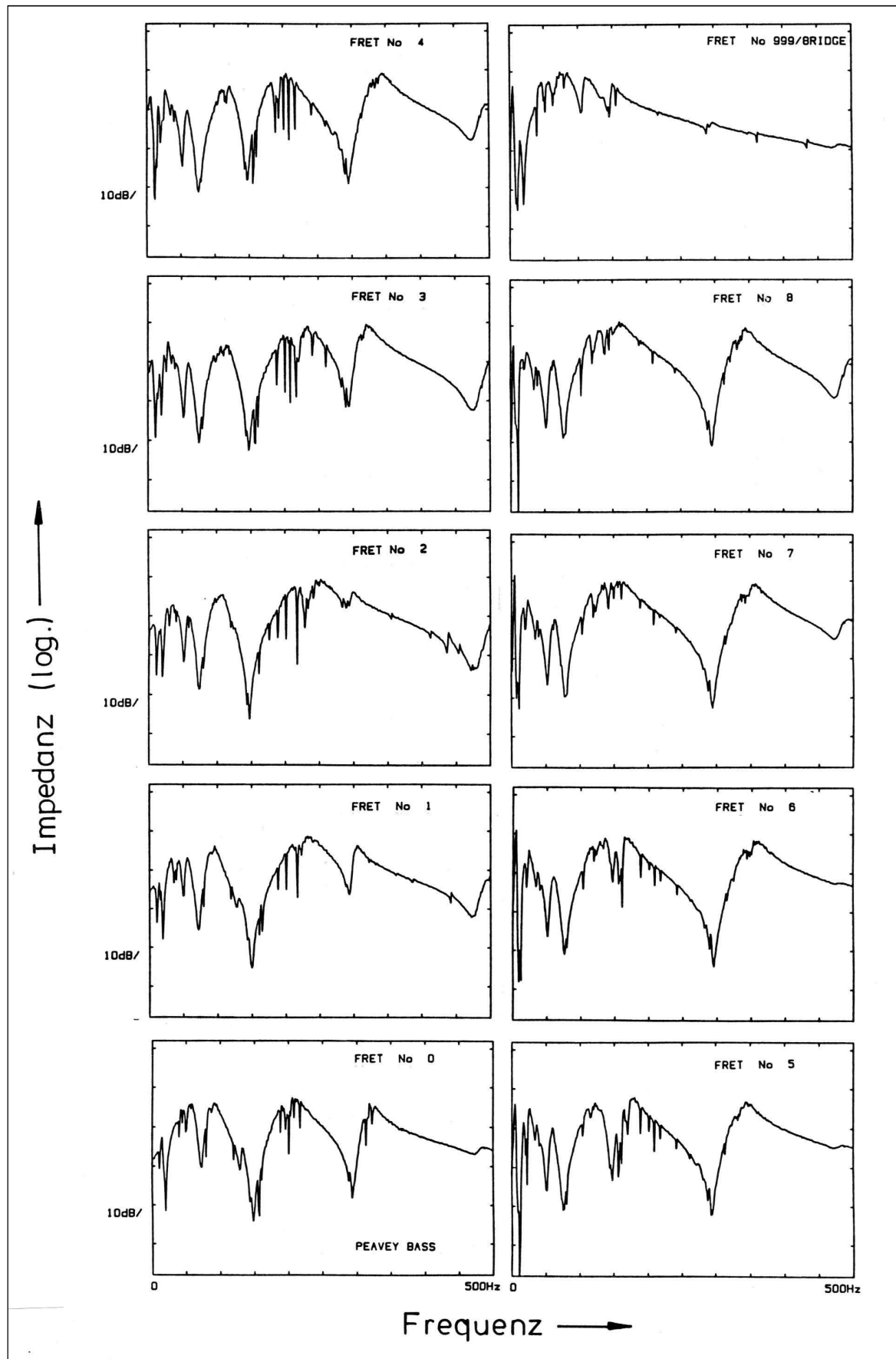


Fig. 24. Betrag der mechanischen Impedanz, aufgetragen im Pegelmaß als Funktion der Frequenz, für den Elektrobass Peavey Dyna Bass. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

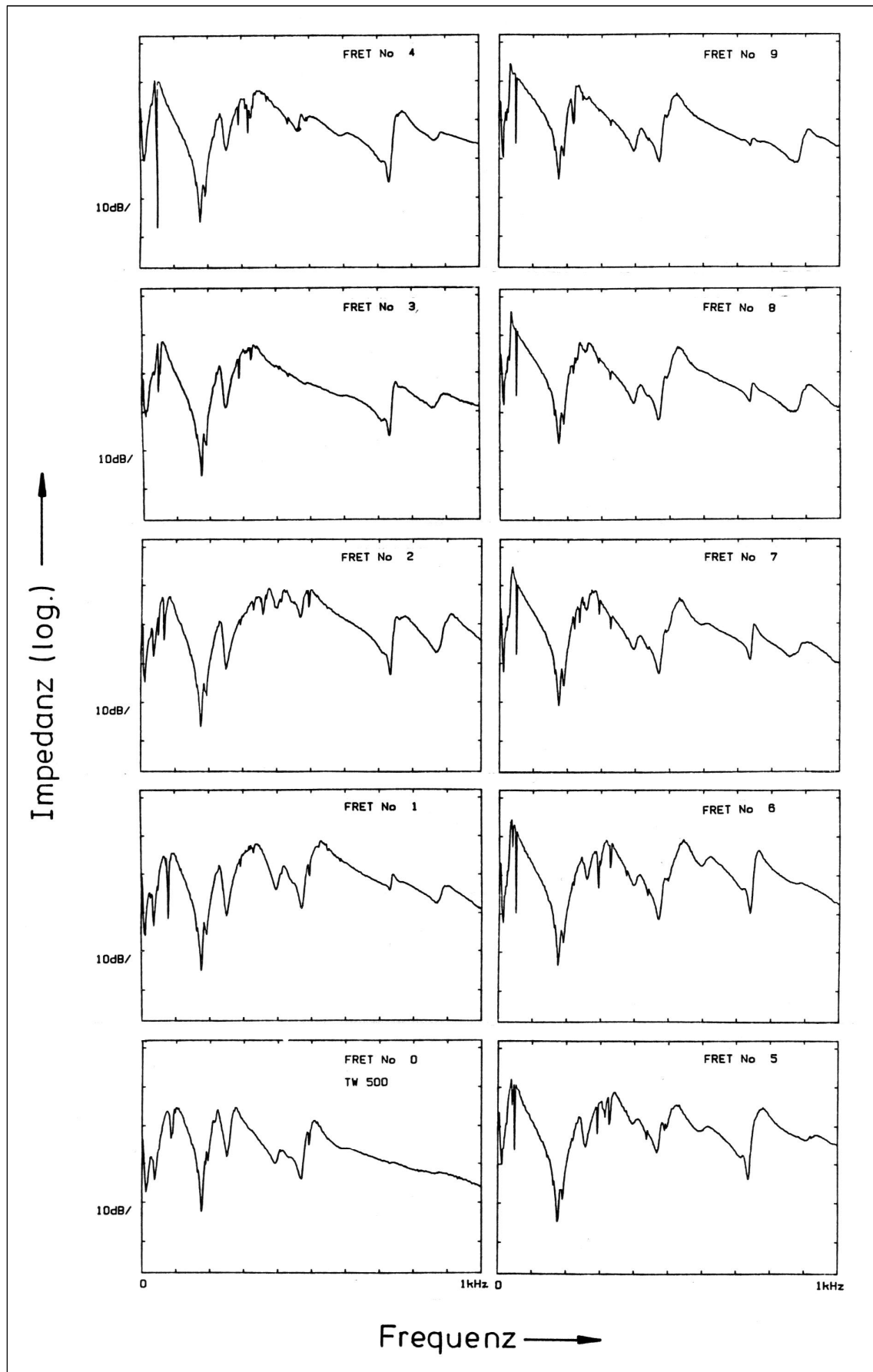


Fig. 25. Betrag der mechanischen Impedanz, aufgetragen im Pegelmaß als Funktion der Frequenz, für die Gitarre Travelling Wilbury TW 500. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

Dieselbe Methode wurde auch an Elektrogitarren erprobt. Fig. 25 auf der vorhergehenden Seite gilt für die Travelling Wilbury TW 500. Wiederum ist der Betrag der Impedanz im Pegelmaß über der Frequenz aufgetragen, die nun bis 1 kHz reicht. Das rechte obere Teildiagramm bezieht sich hier auf den 9. Bund. In der Gesamtschau zeigt sich, dass zwar in jedem Teildiagramm die notwendige Information enthalten ist; die Darstellung befriedigt jedoch noch nicht vollständig. Dies liegt zum einen daran, dass infolge der logarithmischen Darstellung die Dynamik stark komprimiert wird. Zum anderen zeigen sich die Effekte, die von besonderem Interesse sind, nicht als Maxima, sondern als Minima, was im Hinblick auf eine griffige Darstellung als weniger geeignet erscheint.

5.2.2. Mechanische Admittanz

Es stellt kein Problem dar, im Analysator anstelle der mechanischen Impedanz deren Kehrwert, die Admittanz, bestimmen und darstellen zu lassen. Diese ist definiert als

$$\underline{Y} = \underline{v}/\underline{F} \quad .$$

Um die Aufmerksamkeit gezielter auf die wesentlichen Erscheinungen zu lenken, wird im Folgenden auch für die Ordinate der Frequenzgänge eine lineare Teilung gewählt.

Der Impedanzmesskopf misst neben der Wechselkraft $\underline{F}$ in derselben Richtung die Beschleunigung $\underline{a}$ als Schwingungsgröße. Daraus muss die Schnelle $\underline{v}$ erst gebildet werden. Dies ist auf mehrere Arten möglich:

- Das gemessene Beschleunigungssignal wird - wie bereits im vorhergehenden Abschnitt praktiziert - im Ladungsverstärker zeitlich integriert.
- Das gemessene Beschleunigungssignal wird im Analysator zeitlich integriert.
- Im Analysator wird die Übertragungsfunktion $\underline{A} = \underline{a}/\underline{F}$ (die Acceleranz; siehe z.B. Abschnitt 5.3.3) gebildet und mit $1/j2\pi f$ (f ist die Frequenz) multipliziert, was einer Integration über die Zeit entspricht.

Prinzipiell sind alle drei Vorgehensweisen gleichwertig. Versuche haben jedoch ergeben, dass im Hinblick auf die Signalqualität die besten Resultate zu erzielen sind, wenn das Schwingungssignal in einem möglichst frühen Stadium, d.h. bereits im Ladungsverstärker, integriert wird. Deshalb wurden die Admittanzen auf diese Weise ermittelt; sie sind im Folgenden zusammengestellt.

Fig. 26 auf der nächsten Seite zeigt als Ergebnis von Messungen an der E-Gitarre Travelling Wilbury TW 500 den Betrag der Admittanz, die auch als Mobilität (englisch: Mobility) bezeichnet wird. Der Betrag ist normiert und im linearen Maßstab als Funktion der Frequenz f dargestellt. Am Steg (Teildiagramm rechts oben) zeigt sich neben einem gleichförmigen frequenzproportionalen Anstieg nichts Auffälliges. Ganz anders verhält sich dagegen der Hals: Besonders markant ist eine deutliche Unregelmäßigkeit bei etwas mehr als 170 Hz, die sich als Mehrfachspitze darstellt und sich an jedem Bund unterschiedlich ausprägt.

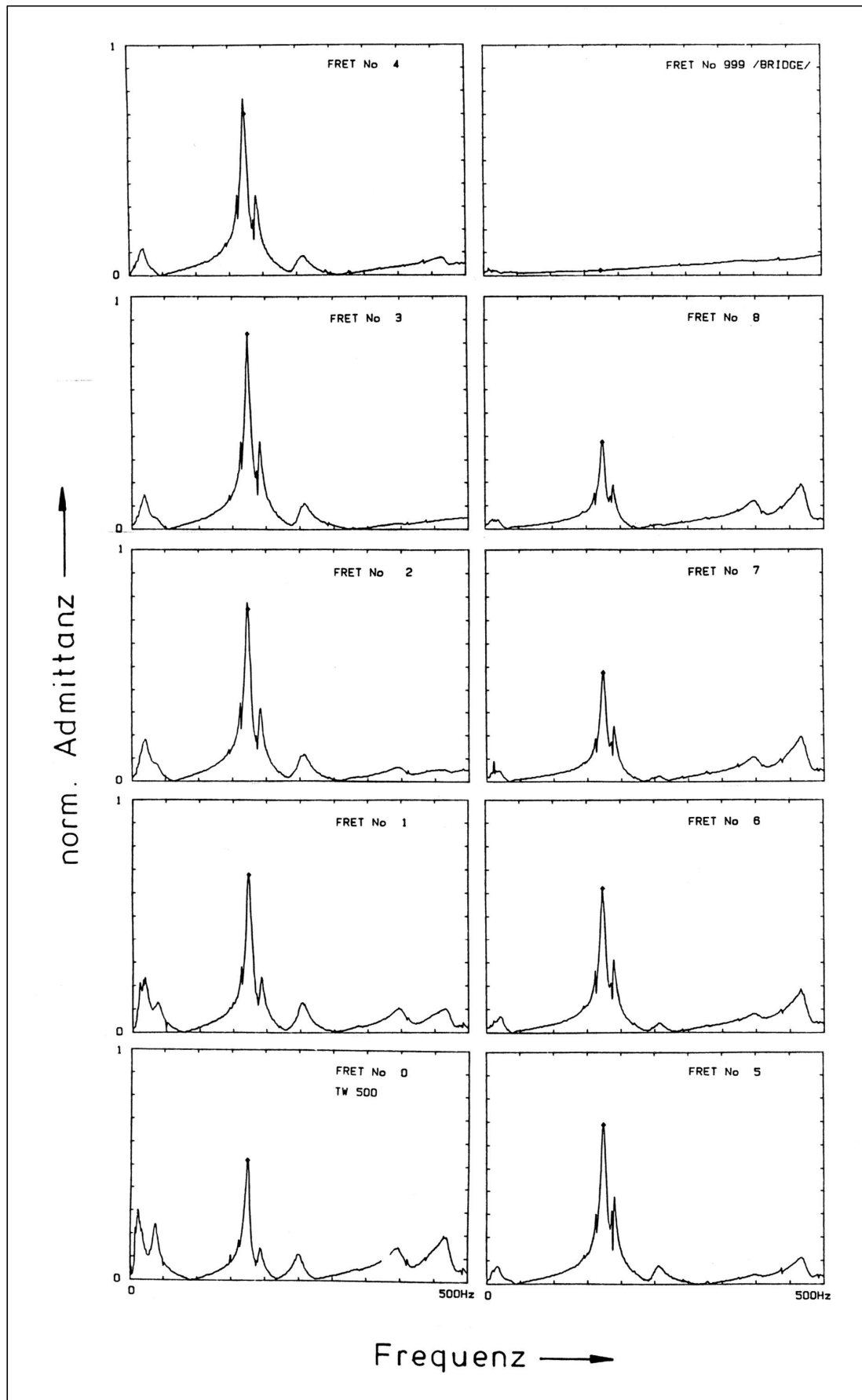


Fig. 26. Normierter Betrag der mechanischen Admittanz als Funktion der Frequenz für die Gitarre Travelling Wilbury TW 500. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

5.2.3. Dynamische Nachgiebigkeit

Ebenso wie aus der Schwingbeschleunigung $\underline{a}$ die Schnelle $\underline{v}$ bestimmt werden kann, lässt sich aus der Schnelle $\underline{v}$ durch nochmalige Integration der Schwingweg $\underline{x}$ ermitteln. Der Quotient

$$\underline{C} = \underline{x}/\underline{F} \quad ,$$

der dabei entsteht, wird im Englischen Compliance genannt. Im vorliegenden Zusammenhang wird hierfür die Bezeichnung "dynamische Nachgiebigkeit" verwendet.

Die Fig. 27 und 28 zeigen zwei Beispiele. Der normierte Betrag der dynamischen Nachgiebigkeit ist in Abhängigkeit von der Frequenz f dargestellt. Der Normierungsfaktor ist jeweils derselbe. Fig. 27 gibt die Nachgiebigkeit des Halses und des Steges der E-Gitarre Gibson Explorer wieder. In den Diagrammen für die Bünde 0 (Sattel) bis 8 erkennt man bis zu vier Maxima, deren Größe vom Messort abhängt. Der Steg (rechts oben) erweist sich als wesentlich weniger nachgiebig als der Hals; er verhält sich wie eine Feder sehr hoher Steifigkeit.

Die dynamische Nachgiebigkeit verknüpft den Schwingweg, d.h. die Auslenkung am Messpunkt, direkt mit der anregenden Kraft. Bezüglich der Mechanismen am Gitarrenhals kommt die aufgetragene Größe damit eher der Vorstellung entgegen, als dies beispielsweise die mechanische Impedanz tut. Wie insbesondere in Fig. 28 zu erkennen ist, bereiten die Größenunterschiede der Messwerte jedoch gewisse Schwierigkeiten bei der Darstellung. Für einige Frequenzen erweist sich der Hals der in Fig. 28 betrachteten Bassgitarre Action Bass als extrem nachgiebig. Die dynamische Nachgiebigkeit ist an manchen Bündlen so groß, dass sie sich im gewählten Rahmen nicht darstellen lässt. Zudem zeigt sich im tieffrequenten Bereich ein scheinbarer Anstieg, der mit den physikalischen Gegebenheiten nicht übereinstimmt, sondern ein Kunstprodukt der zweimaligen Integration ist.

Obwohl die gewünschte Information in jeder dieser Darstellungen prinzipiell in gleichem Maße enthalten ist, wird die Impedanz im Folgenden nicht mehr, die dynamische Nachgiebigkeit nur noch in einigen Ausnahmefällen verwendet. In aller Regel wird das mechanische Verhalten von Steg und Hals in den weiteren Untersuchungen durch die Admittanz charakterisiert.

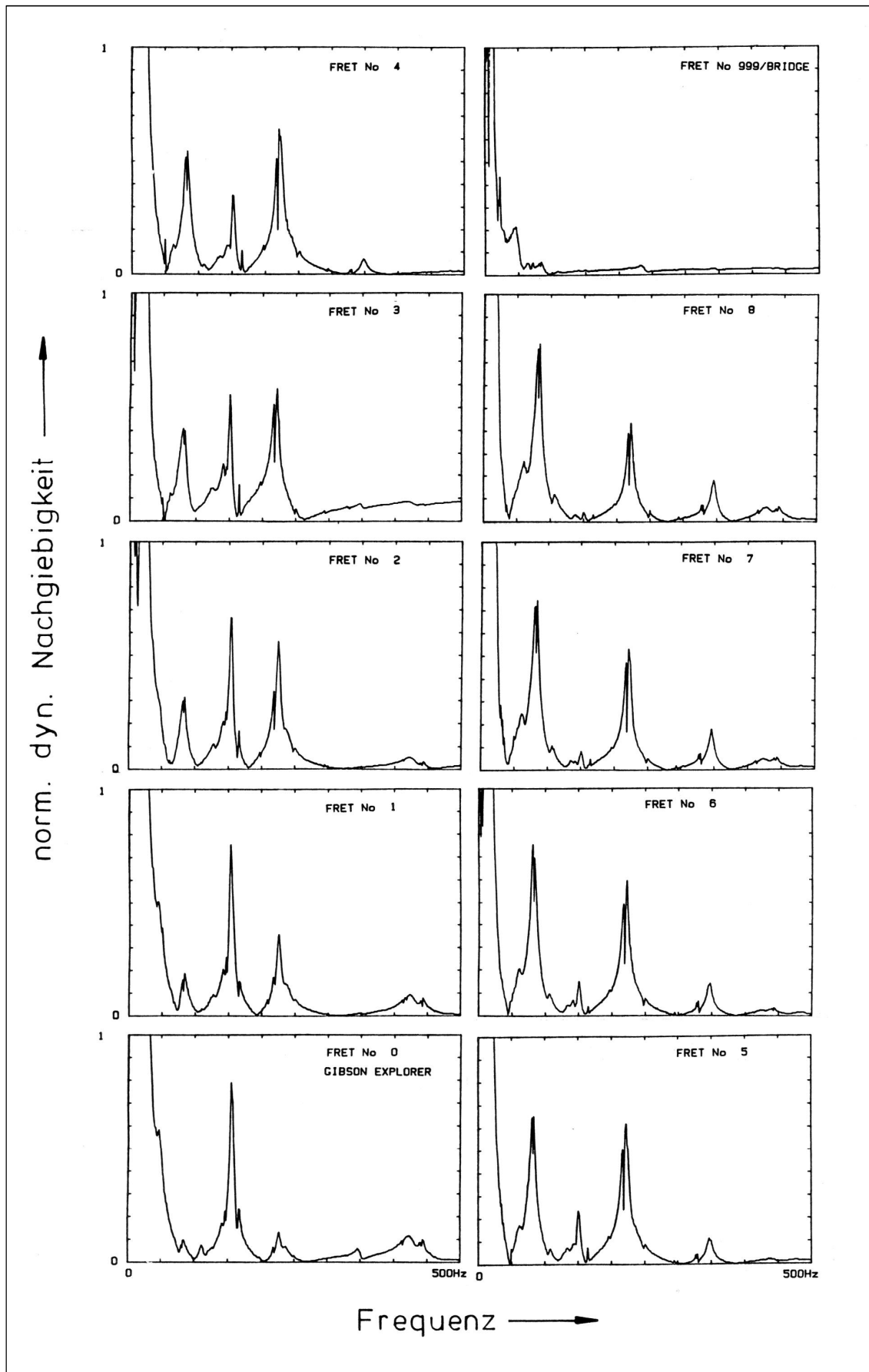


Fig. 27. Normierter Betrag der dynamischen Nachgiebigkeit als Funktion der Frequenz für die Gitarre Gibson Explorer. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

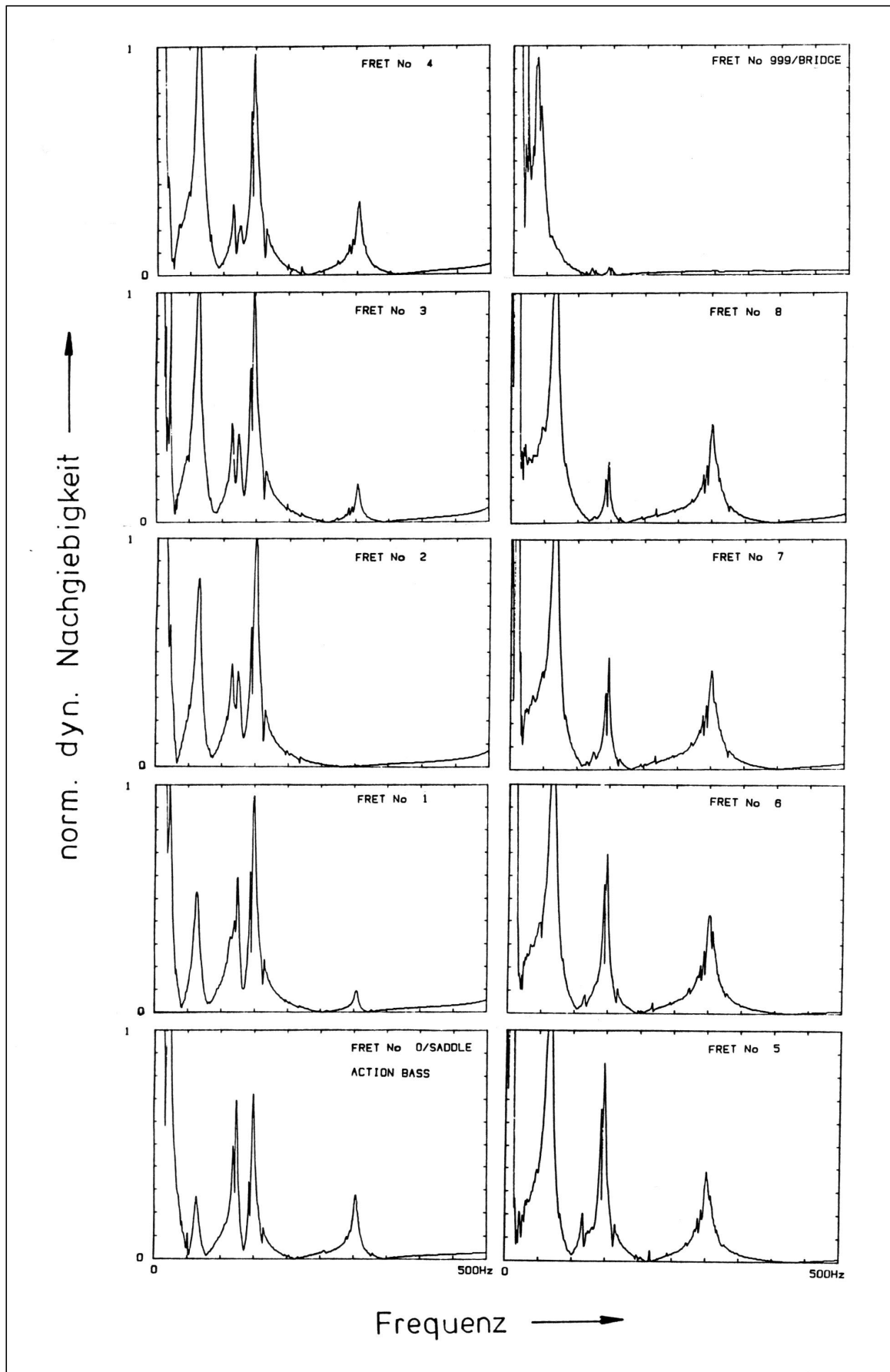


Fig. 28. Normierter Betrag der dynamischen Nachgiebigkeit als Funktion der Frequenz für den Elektrobass Action Bass. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

5.3. Einfluss des Messortes, der Lagerung und der Aufnehmermasse

Bevor die Gitarren und Elektrobässen mit Blick auf ihr mechanisches Eingangsverhalten untersucht werden, das die Saiten vorfinden, sind noch einige orientierende Experimente durchzuführen.

5.3.1. Messort

Um die Fülle der Information möglichst zu reduzieren, wird der Hals bei den folgenden Messungen vereinfachend als eindimensionales Kontinuum betrachtet. Dabei liegt es nahe, sein mechanisches Verhalten in der Mitte eines jeden Bundes, d.h. an der Stelle der halben Halsbreite, zu messen. Im ersten Vorversuch wird untersucht, welche Variation zu erwarten ist, wenn diese Beschränkung fallen gelassen und auch außermittig gemessen wird. Als Beispiel zeigt Fig. 29 eine Messung am Sattel (0. Bund) nicht auf der Mittellinie des Halses, sondern an der Kerbe, durch welche die E-Saite geführt ist.

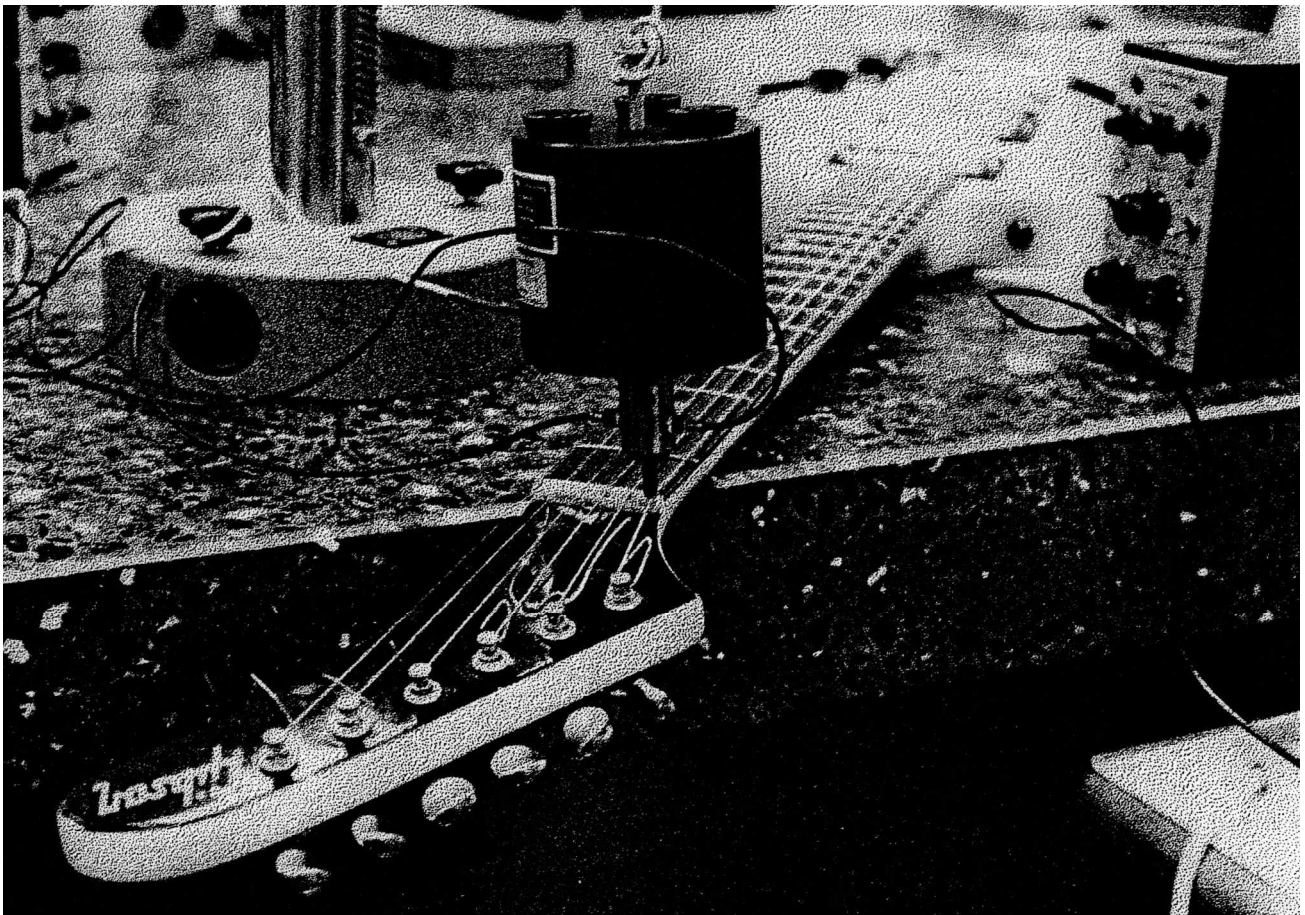


Fig. 29. Gitarre Gibson Explorer mit Schwingerreger und Impedanzmesskopf am Sattel an der E-Saite.

Zur Erläuterung sind in Fig. 30 einige Resultate für die Gitarre TW 500 zusammengestellt. Die dynamische Nachgiebigkeit ist als Funktion der Frequenz aufgetragen. Die unteren Teildiagramme (Fret No 0) gelten für den Sattel, die darüber angeordneten für die ersten drei Bünde. Für jede der drei Spalten ist der Messort ein anderer. Am jeweils angegebenen Bund wurde einmal im Bereich der tiefen Saiten (linke Spalte), einmal mittig (mittlere Spalte) sowie einmal im Bereich der hohen Saiten (rechte Spalte) gemessen.

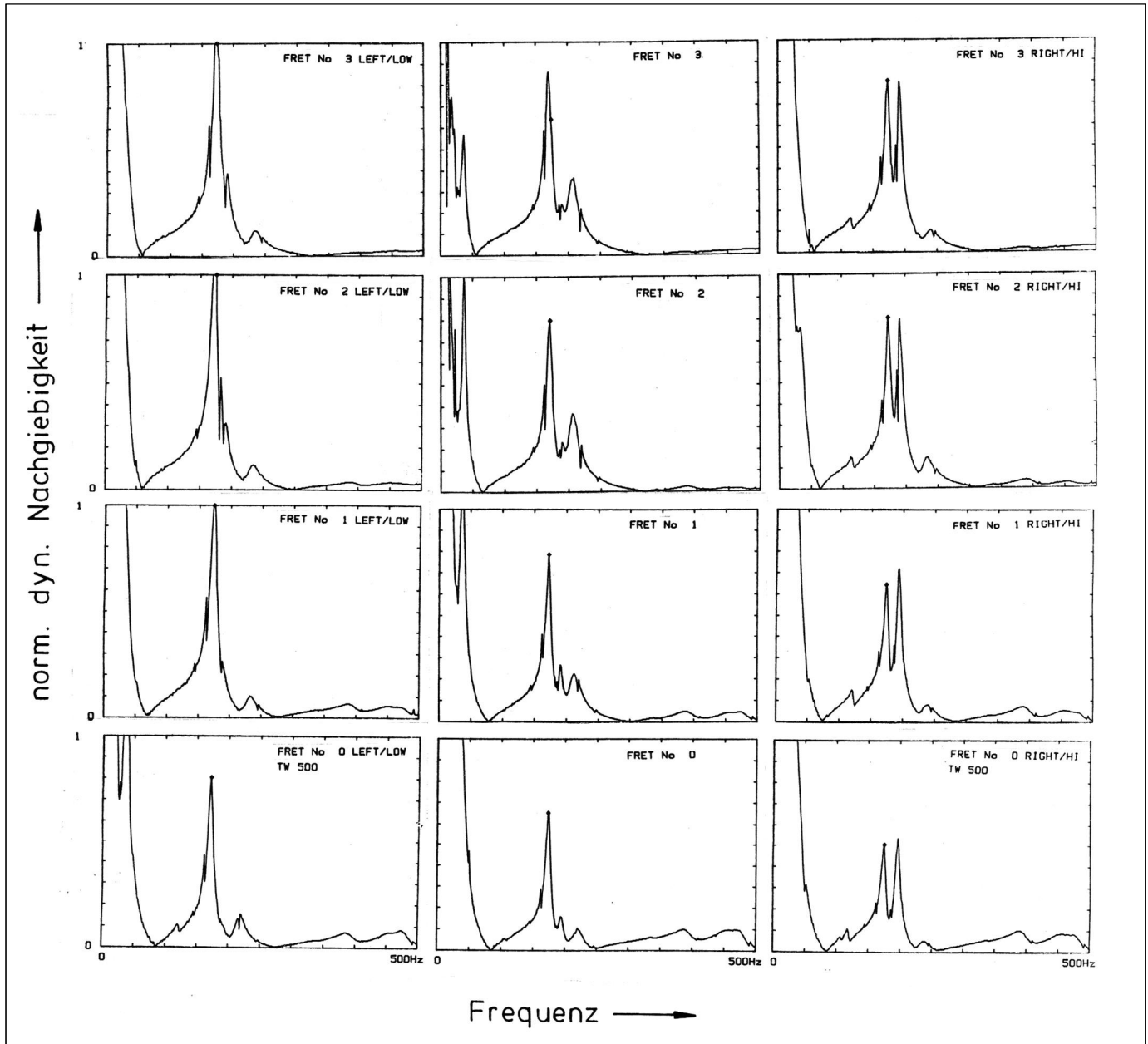


Fig. 30. Normierter Betrag der dynamischen Nachgiebigkeit als Funktion der Frequenz für die Gitarre Travelling Wilbury TW 500. Der Bund, an dem jeweils gemessen wurde, ist in jedem Teildiagramm vermerkt.

Linke Spalte: Messung zwischen der E- und der A-Saite;
 Mittlere Spalte: Messung mittig zwischen der D- und der G-Saite;
 Rechte Spalte: Messung zwischen der H- und der hohen E-Saite.

Fig. 30 lässt erkennen, dass eine seitliche Verschiebung des Messortes Ergebnisse mit einer verwandten Charakteristik liefert, diese sich jedoch unterschiedlich ausprägen kann. So zeigt die linke Spalte, dass für die Basssaiten der Gitarre der Hals am nachgiebigsten bei einer Frequenz von etwa 170 Hz bis 175 Hz ist. Dies gilt auch für die mittleren Saiten (mittlere Spalte), jedoch wird bei etwa 15 Hz mehr bereits ein zweites Maximum der Nachgiebigkeit erkennbar. In der rechten Spalte prägt sich dieses zweite Maximum in derselben Weise aus wie das erste, so dass die hohen Saiten nicht nur für 175 Hz, sondern auch für 190 Hz einen sehr nachgiebigen Hals vorfinden.

Offenbar hängen die Messergebnisse in gewissem Maße davon ab, an welcher Stelle ein und desselben Bundes gemessen wird. Die Ursache für eine laterale Abhängigkeit der Messergebnisse dürfte darin liegen, dass einige der Schwingungsformen des Halses auch Komponenten von Torsion aufweisen; siehe hierzu die Fig. 11 und 12. Die beobachtete Schwankung des mechanischen Verhaltens über die Breite eines Bundes wird zur Kenntnis genommen, zunächst jedoch nicht weiter verfolgt. Im Sinne der Beschränkung auf das Wesentliche wird im weiteren stets für jeden Bund nur eine Messung, und zwar in der Mitte, durchgeführt.

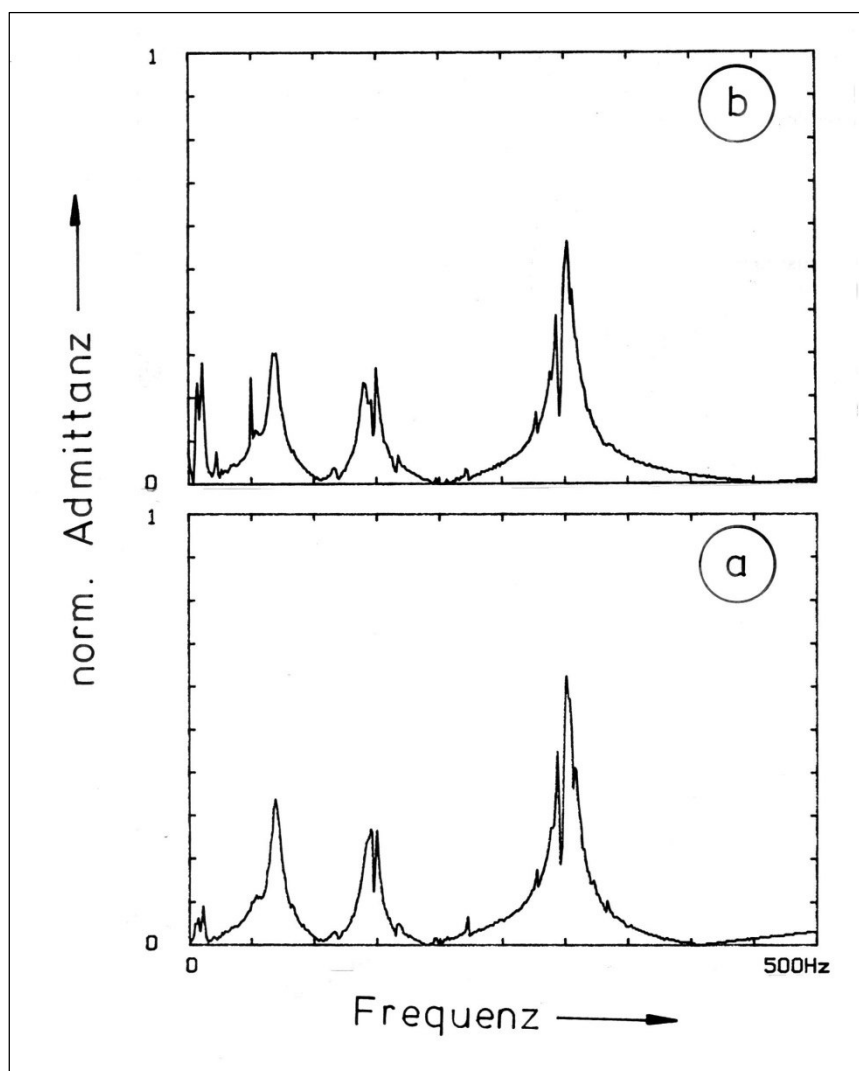


Fig. 31. Normierter Betrag der mechanischen Admittanz als Funktion der Frequenz für den Elektrobass Action Bass. Gemessen wird
 a) unmittelbar neben der 6. Bundeinlage bzw.
 b) direkt auf der 6. Bundeinlage.

Nachdem überprüft worden ist, wie sensibel die Messergebnisse bezüglich einer lateralen Verschiebung sind, soll nun abgeschätzt werden, welche Abweichung im Messort längs des Halses zulässig ist. Was die Saite an ihrem oberen Ende "sieht", ist das mechanische Verhalten des Halses auf dem Bund. Im Laufe der Messungen hat sich als schwierig erwiesen, die Spitze des Impedanzmesskopfes für die Dauer eines jeden Messvorganges auf der metallenen Bundeinlage zu halten. Es wurde deshalb untersucht, welche Unterschiede zu erwarten sind, wenn nicht auf, sondern unmittelbar neben der Bundeinlage auf dem Griffbrett (in Richtung höherer Töne) gemessen wird.

Bei der Messung liegt der Korpus des Action Bass auf einer einfachen Lage einer Kunststoff-Doppelfolie, die in Kammern eingeschlossene Luftpolster enthält; Fig. 23 zeigt diese Art der Lagerung. Die Messspitze sitzt auf der Mitte der Bundeinlage bzw. unmittelbar (in Richtung zum Korpus gesehen) davor auf dem Griffbrett. Die beiden Frequenzgänge der mechanischen Admittanz, die man auf diese Weise erhält, sind in Fig. 31 zusammengestellt.

Im Vergleich erkennt man kleinere Unterschiede in demselben Ausmaß, wie es bei aufeinanderfolgenden Messungen mechanischer Größen immer wieder beobachtet wird. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse weitgehend übereinstimmen. Daraus wird die Berechtigung abgeleitet, die Messspitze des Impedanzmesskopfes gegebenenfalls auch unmittelbar vor der Bundeinlage zu positionieren, falls die Messung direkt auf der Bundeinlage sich als zu schwierig erweisen sollte.

5.3.2. Lagerung des Instruments

Der Spieler einer Gitarre oder eines Elektrobasses hat sein Musikinstrument in aller Regel so umgehängt, dass der Korpus am Bauch des Spielers anliegt. Es wurde versucht, diese Art der Lagerung beim Messen so gut wie möglich nachzubilden. Deshalb wurden die zu untersuchenden Instrumente bei der Messung nicht direkt auf den Steintisch gelegt, sondern auf mehr oder weniger nachgiebige Unterlagen gebettet.

Fig. 32 zeigt zwei Beispiele für die Admittanz desselben Instrumentes an derselben Messstelle unmittelbar neben dem 6. Bund. Das untere Teildiagramm a bezieht sich auf eine Messung, bei der zwischen Korpus und Tisch vier Lagen dünnen weißen Schaumstoffs gelegt wurden, wie er als Verpackungsmaterial verwendet wird. Diese Art der Lagerung ist z.B. in Fig. 33 zu erkennen. Das Messergebnis ähnelt demjenigen von Teildiagramm a der vorhergehenden Fig. 31. Bei der zugrunde liegenden Messung war eine Doppelfolie aus Kunststoff zwischengelegt worden, in der relativ große Luftblasen eingeschlossen sind. Das obere Teildiagramm 32 b gibt das Ergebnis einer Messung wieder, bei der zusätzlich zum Schaumstoff solch eine Luftkammer-Doppelfolie untergelegt wurde.

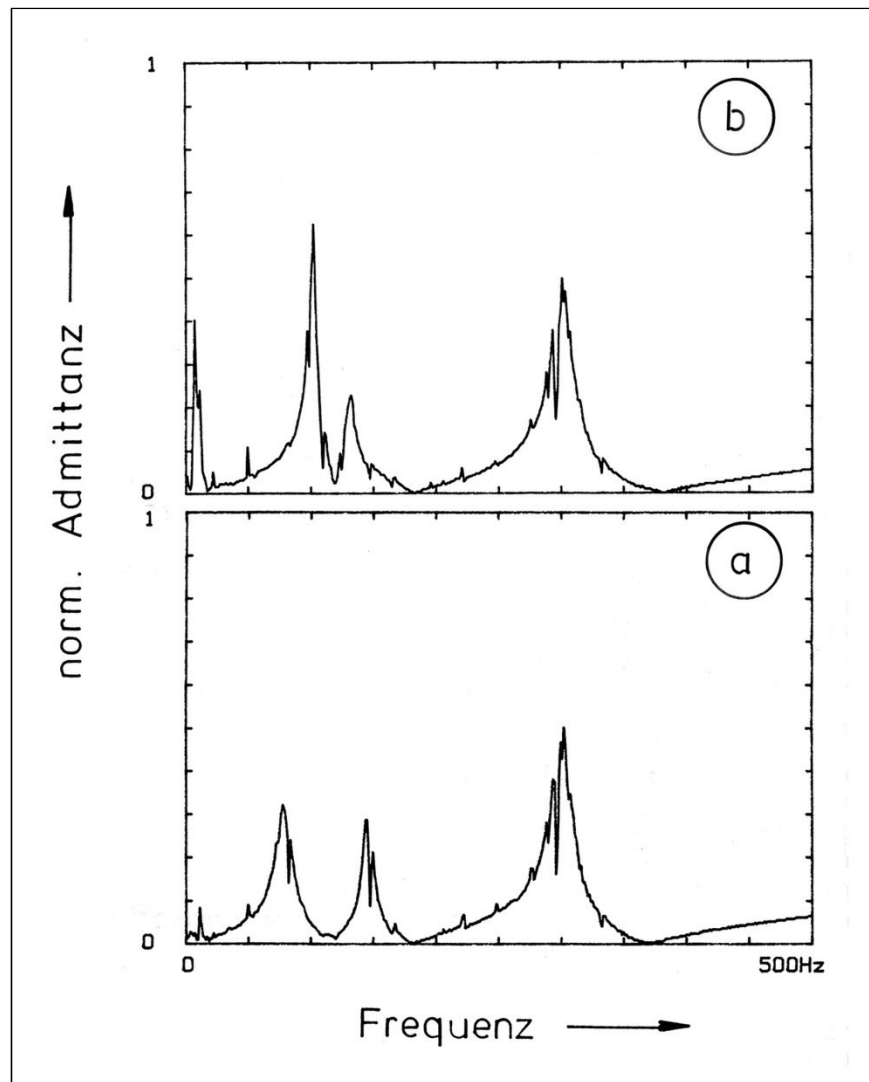


Fig. 32. Normierter Betrag der mechanischen Admittanz als Funktion der Frequenz für den Elektrobass Action Bass. Gemessen wird am 6. Bund, wobei der Korpus
 a) auf dünnem Schaumstoff bzw.
 b) auf dünnem Schaumstoff und zusätzlich einer Doppelfolie mit eingeschlossenen Luftkammern aufliegt.

Ein Vergleich ergibt, dass das Hauptmaximum bei etwa 300 Hz durch die unterschiedlichen Arten der Lagerung offenbar nicht beeinflusst wird. Deutliche Unterschiede prägen sich jedoch im tief-frequenten Bereich bis etwa 150 Hz aus. Besonders fallen Differenzen beim ersten wesentlichen Maximum auf: Lagert der Korpus auf dem dünnen Schaumstoff (Teildiagramm a), dann liegt diese Spitze bei etwas mehr als 70 Hz; wird die Luftblasen-Folie zwischengelegt, verschiebt sich das Maximum nach etwa 100 Hz und nimmt etwa die doppelte Höhe an.

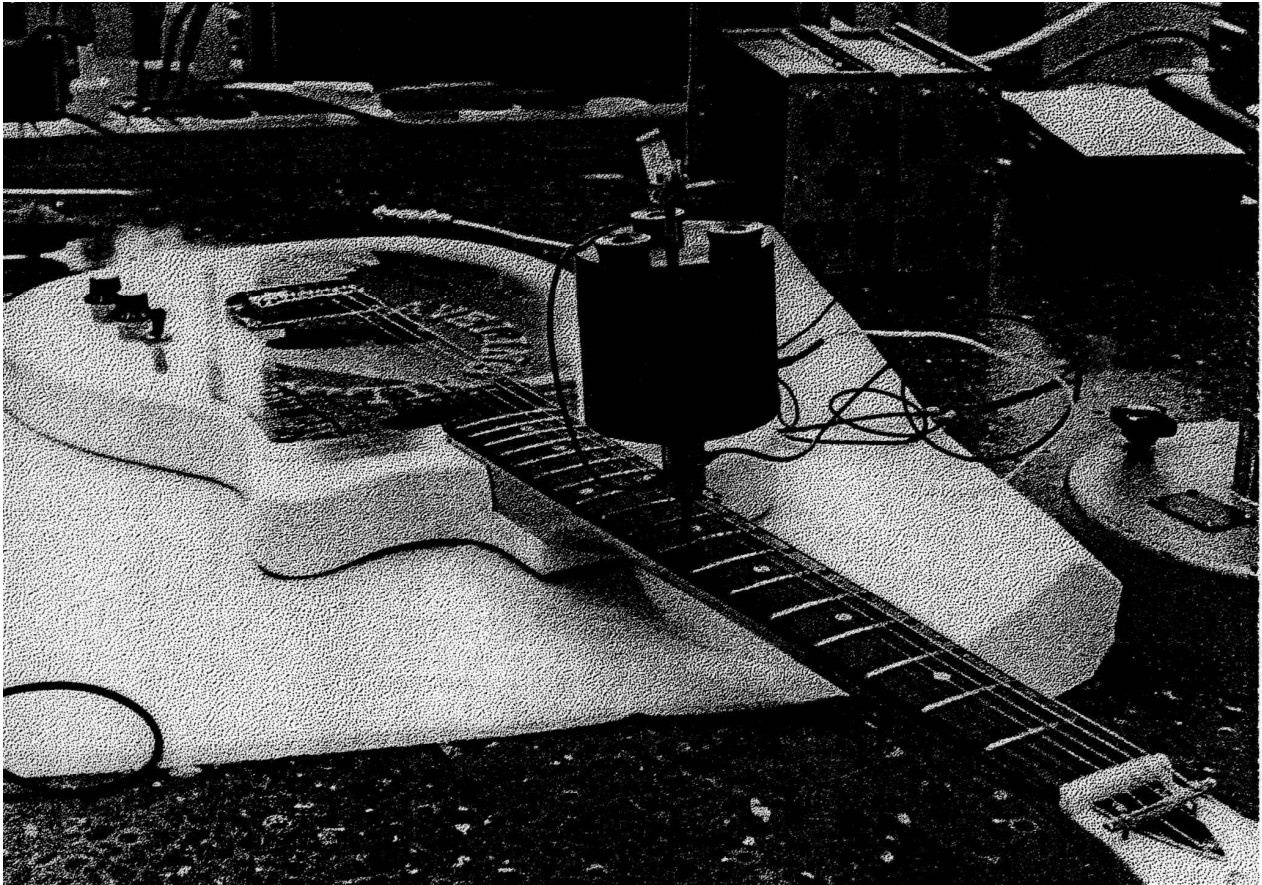


Fig. 33. Gitarre Travelling Wilbury TW 500, gelagert auf vier Lagen dünnen Schaumstoffs, mit Schwingerreger und Impedanzmesskopf beim achten Bund.

Hierbei wird die aus der Mechanik wohlbekannte Tatsache deutlich, dass die Randbedingungen einen elementaren Einfluss auf die Eigenformen und Eigenfrequenzen haben. Im betrachteten Fall bedeutet dies, dass bei den unterschiedlichen Messungen (Modalanalyse, Abklingverhalten der Töne, mechanische Admittanz usw.) im Idealfall gleiche, in der Praxis zumindest möglichst ähnliche Lagerungsbedingungen vorliegen sollten. Im Sinne der Prämisse, möglichst realitätsnah zu messen, wurde das Abklingverhalten in normaler Spielposition am Körper des Instrumentalisten bestimmt. Zur Messung der mechanischen Admittanz musste das Instrument jedoch abgenommen und auf den Steintisch gelegt werden. Dabei wurde die Randbedingung, die das Instrument am Körper des Spielers vorfindet, näherungsweise durch vier Lagen des dünnen weißen Schaumstoffs nachzubilden. Dabei handelt es sich um einen ersten Versuch; Verbesserungen sind durchaus vorstellbar.

5.3.3. Massenkompensation

In Fig. 34 ist nach oben als weitere Größe, durch die probeweise das mechanische Verhalten des Halses gekennzeichnet wird, die Acceleranz

$$\underline{A} = \underline{a}/\underline{F}$$

aufgetragen. Diese ergibt sich als Quotient aus der Schwingbeschleunigung $\underline{a}$ und der Wechselkraft $\underline{F}$ in derselben Richtung.

Mit Fig. 34 wird eine neue Darstellungsweise eingeführt, die sich im Weiteren als sehr effektiv erweisen wird, da sie es erlaubt, viel Information auf wenig Raum zu komprimieren. Nach Art eines Wasserfalldiagramms werden in ein Bild voreinander mehrere Messkurven gezeichnet. Die hintere gilt für den Sattel (0. Bund), die nächste für den ersten Bund usw. bis zum zwölften Bund. Gemessen wurde jeweils halbsmittig auf dem Sattel bzw. in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Bundes. Insgesamt sind auf diese Weise dreizehn Kurven zusammengestellt, die auf dem Hals gemessen wurden. Sie kennzeichnen, was die Saite an ihrem oberen Ende vorfindet. Die daran anschließenden sechs Geraden beinhalten keine Information; sie sollen den freien Raum zwischen dem Griffbrett und dem Steg symbolisieren. Die vordere Kurve gilt für den Steg. Sie wurde möglichst mittig nahe einer Saitenauflage gemessen und charakterisiert, welche Acceleranz bzw. Admittanz die Saite an ihrem unteren Ende vorfindet.

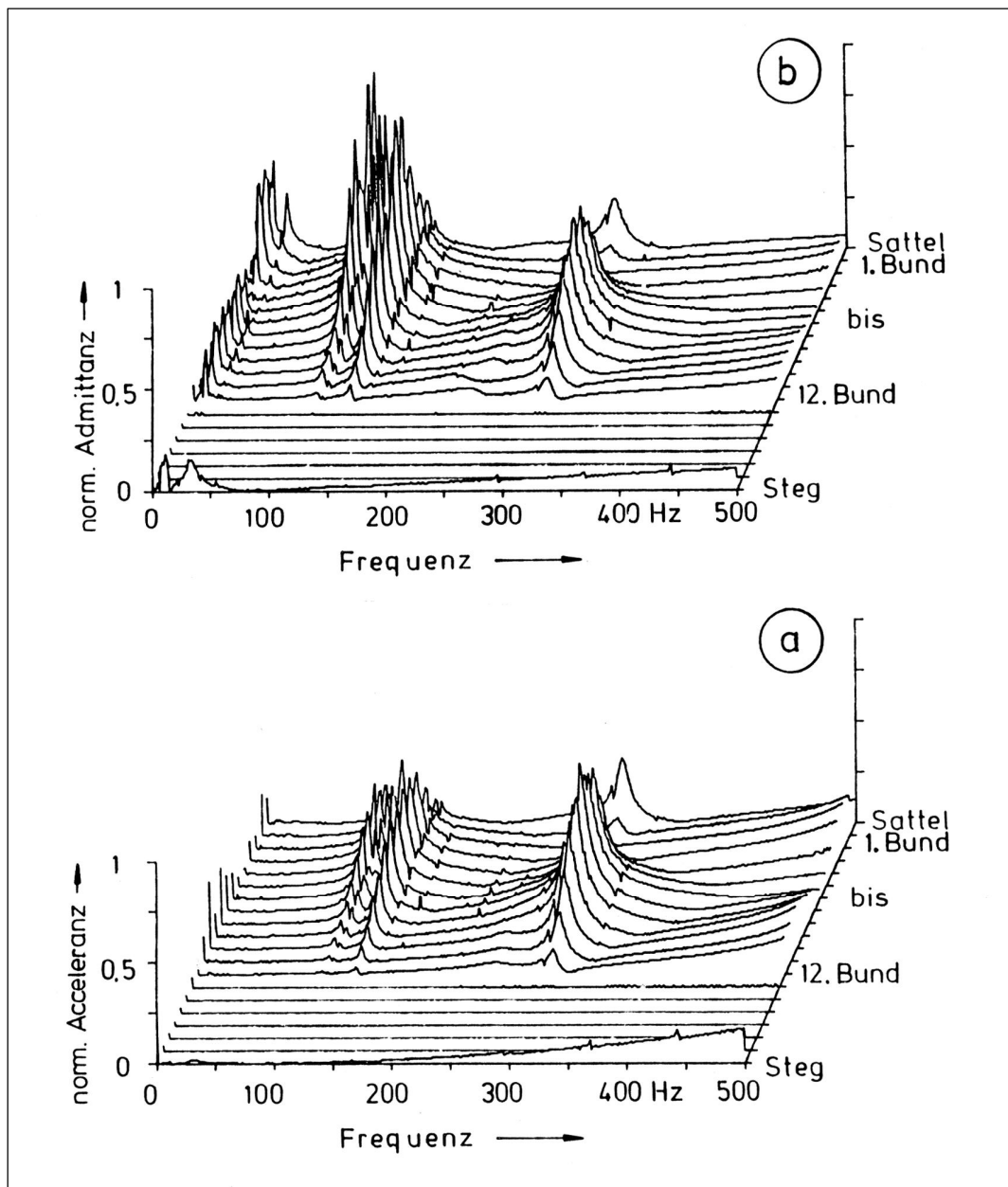


Fig. 34. a) Normierter Betrag der Acceleranz und
b) normierter Betrag der mechanischen Admittanz (Mobilität)
für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg.

Das Beispiel von Fig. 34 bezieht sich auf den Action Bass. Im Teildiagramm a ist die Acceleranz aufgetragen, die sich direkt aus der gemessenen Schwingbeschleunigung und der gemessenen Wechselkraft ergibt. Darüber ist derselbe Sachverhalt als Admittanz oder Mobilität dargestellt, die man nach Abschnitt 5.2.2 dadurch erhält, dass man vor der Quotientenbildung die Beschleunigung integriert und somit die Schnelle erhält. Beide Diagramme lassen dieselben Charakteristiken erkennen. Der Vergleich macht den wohlbekannten Sachverhalt deutlich, dass die zeitliche Integration der Schwingungsgröße einer Division durch eine frequenzproportionale Größe entspricht. Im oberen Diagramm sind deshalb im tieffrequenten Bereich die Maxima stärker ausgeprägt als im unteren Diagramm. Beide Diagramme sind prinzipiell gleichwertig. Da die leistungsbildenden Feldgrößen Schnelle und Kraft durch die Admittanz miteinander verknüpft sind, erscheint für die anschließenden Reihenuntersuchungen das obere Diagramm insgesamt vorteilhafter.

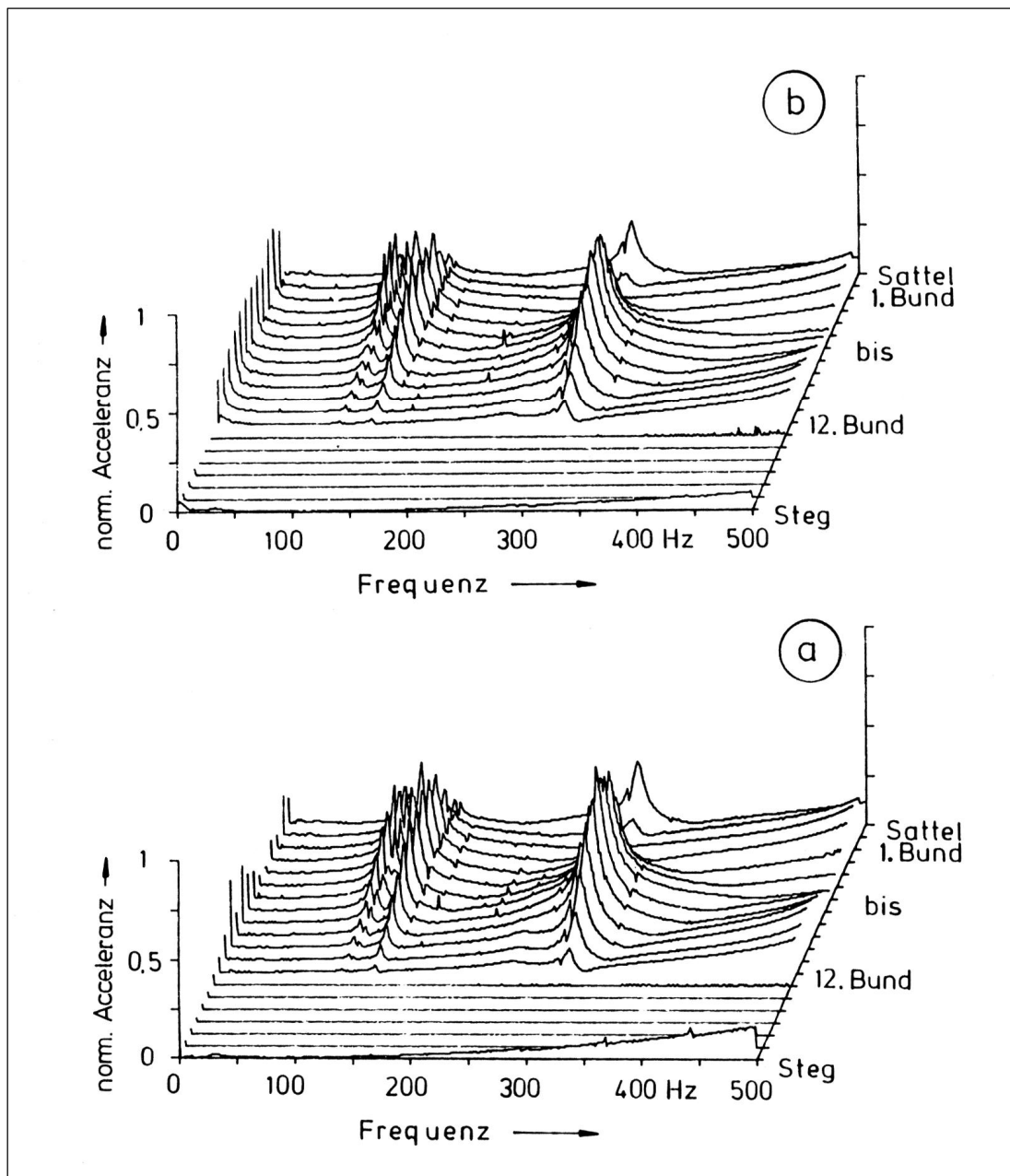


Fig. 35. Normierter Betrag der Acceleranz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel, an den ersten zwölf Bündlen und am Steg.
a) Die Masse des Aufnehmers ist nicht kompensiert.
b) Die Masse des Aufnehmers ist kompensiert.

Der Impedanzmesskopf enthält neben dem Kraftaufnehmer auch einen Beschleunigungsaufnehmer. Aus der Sicht der Strukturmechanik zählt dessen Masse zum Messobjekt. Ist die Masse des Messobjektes selbst gering, können Verfälschungen auftreten, die das zulässige Maß unter Umständen übersteigen. Der Betrieb des Impedanzmesskopfes im Leerlauf stellt dabei den Extremfall dar: Obwohl das Messobjekt selbst keine Masse hat, misst der Kraftaufnehmer die Wechselkraft, die dazu benötigt wird, die Masse des Beschleunigungsaufnehmers in Bewegung zu versetzen.

Anders als bei Laser-Messungen [7, 9 und 18] besteht somit beim hier verwendeten Verfahren, bedingt durch die Aufnehmermasse, die Gefahr von Fehlmessungen. Um zu überprüfen, in welchem Ausmaß das Messobjekt durch den Messaufnehmer verändert wird, wurde eine vergleichende Messung durchgeführt. Zum verwendeten Impedanzmesskopf existiert eine Massenkompensationseinheit vom selben Hersteller. Dabei handelt es sich um eine passive Schaltung, die es ermöglicht, den verfälschenden Teil der Masse des Messkopfes und der angeschraubten Messspitze zu kompensieren. Erstere beträgt beim Impedanzmesskopf Brüel & Kjaer 8001 nach Herstellerangaben etwa 1 g; die Masse der Messspitze ist etwa halb so groß.

Das untere Teildiagramm a von Fig. 35 wurde - wie alle bisherigen Diagramme - ohne gesonderte Massenkompensation bestimmt. Im oberen Teildiagramm b ist der Einfluss der Masse mit Hilfe der Massenkompensationseinheit Brüel & Kjaer 5565 minimiert. Damit die Kompensation gelingt, müssen bestimmte Phasenbeziehungen der Signale vorliegen. Im Ladungsverstärker darf deshalb keine zeitliche Integration vorgenommen werden, d.h. es darf nur die Schwingbeschleunigung, nicht jedoch die Schnelle, ausgegeben werden.

Erwähnenswerte Unterschiede zeigen sich lediglich in den Absolutwerten der Acceleranz, auf die im vorliegenden Zusammenhang jedoch nicht eingegangen werden soll. Bezüglich des Frequenzverlaufes treten zwischen den Ergebnissen der Messung mit bzw. ohne Massenkompensation keine Unterschiede auf, die über die bei mechanischen Messungen übliche Größenordnung hinausgehen. Eine Kompensation erscheint zwar wünschenswert; offenbar ist jedoch die effektive Masse des Gitarrenhalses so groß im Vergleich zu derjenigen des Impedanzmesskopfes, dass sich eine Kompensation als nicht zwingend notwendig erweist. Der geringe Verlust an Genauigkeit, der aus der nicht-kompensierten Aufnehmermasse resultiert, wird wettgemacht durch den Vorteil, dass die Schwingungsgröße bereits im Ladungsverstärker integriert werden kann.

5.4. Einfluss der Messrichtung

Bevor Reihenmessungen durchgeführt werden, ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Richtung, in der gemessen wird, auf das Messergebnis hat. Sämtliche bisher besprochenen Messungen zur Erfassung mechanischer Schwingungen beziehen sich auf die Richtung senkrecht zum Griffbrett. Die Gitarre bzw. Bassgitarre kann sich jedoch nicht nur aus der Ebene Korpus-Griffbrett heraus, sondern auch in den beiden anderen Raumrichtungen bewegen.

Eine Abschätzung anhand eines Balken-Stab-Modelles lässt erwarten, dass die Gitarre in Längsrichtung des Halses wesentlich "steifer" sein wird als in Querrichtung, d.h. Schwingungsmoden werden bei vergleichsweise hohen Frequenzen auftreten. Solche Schwingungen haben überwiegend longitudinalen Charakter und werden beim üblichen Spielbetrieb kaum angeregt. Demgegenüber dominieren Schwingungen mit überwiegend transversalem Charakter. Die Bewegung des Halses kann dabei Komponenten sowohl senkrecht zum Griffbrett als auch quer dazu aufweisen.

Um einen Eindruck davon zu gewinnen, welche Unterschiede sich in den beiden Raumrichtungen ergeben, wurde eine entsprechende Messung durchgeführt. Zum einen wurde wie gewohnt die Admittanz senkrecht zum Griffbrett bestimmt. Der untersuchte Elektrobass liegt dabei auf vier Lagen dünnen Schaumstoffs. Schwingerreger und Impedanzmesskopf sind so positioniert, wie dies in Fig. 23 dargestellt ist. Zum anderen wurde der Bass auf seine Schmalseite gestellt, so dass der Hals parallel zum Messtisch weist, und am Korpus gegen Umfallen gesichert. Schwingerreger und Impedanzmesskopf greifen nun seitlich am Hals in Richtung der Bundeinlagen an, was sich im Beispiel bis zum 14. Bund durchführen lässt. Repräsentative Ergebnisse sind in Fig. 36 zusammengestellt.

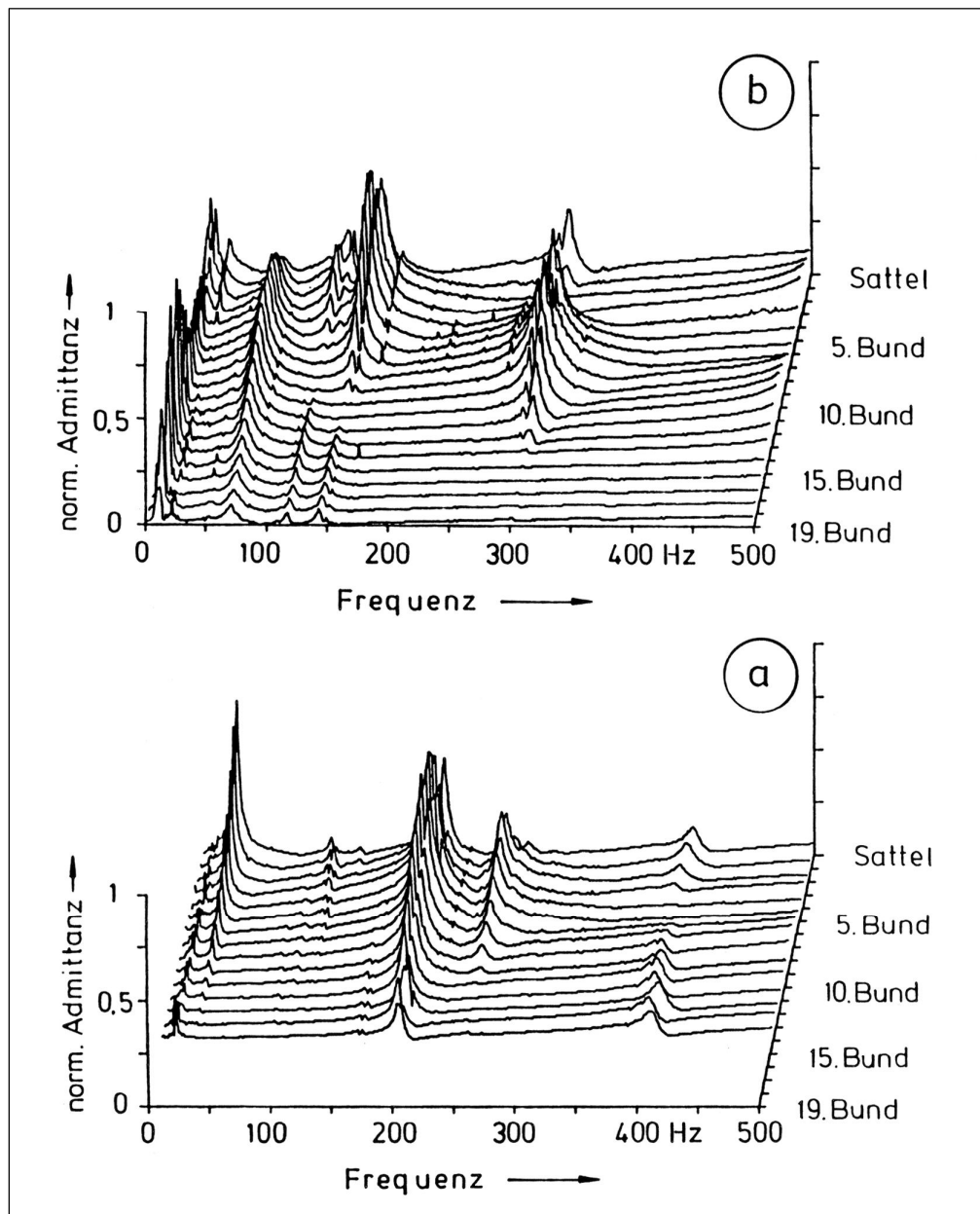


Fig. 36. Normierter Betrag der Admittanz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel und an den Bünden bei Anregung und Messung
a) quer zum Griffbrett bzw.
b) senkrecht zum Griffbrett.

Das obere Teildiagramm b bezieht sich auf Biegeschwingungen des Halses senkrecht zum Griffbrett, wie sie bisher immer untersucht worden waren. Das untere Teildiagramm a gilt für Biegeschwingun-

gen in der Ebene Korpus-Griffbrett, die mit auf der Seite stehendem Bass gemessen wurden. Der Maßstab ist jeweils derselbe. Mögliche Starrkörperbewegungen unterhalb von 41 Hz können außer Betracht bleiben, da sie für Saitenklänge nicht relevant sind. Ein Vergleich bestätigt die Erwartung, dass sich der Hals in den beiden Raumrichtungen unterschiedlich verhält. Senkrecht zum Griffbrett (oberes Teildiagramm b) ist der Hals an bestimmten Stellen besonders nachgiebig bei etwa 70 Hz, zwischen 100 Hz und 150 Hz sowie bei etwa 300 Hz. In der anderen Richtung, also in der Ebene des Griffbretts, erweist er sich als steifer. Sehr nachgiebig kann der Hals bei etwa 200 Hz sowie bei etwa 250 Hz sein.

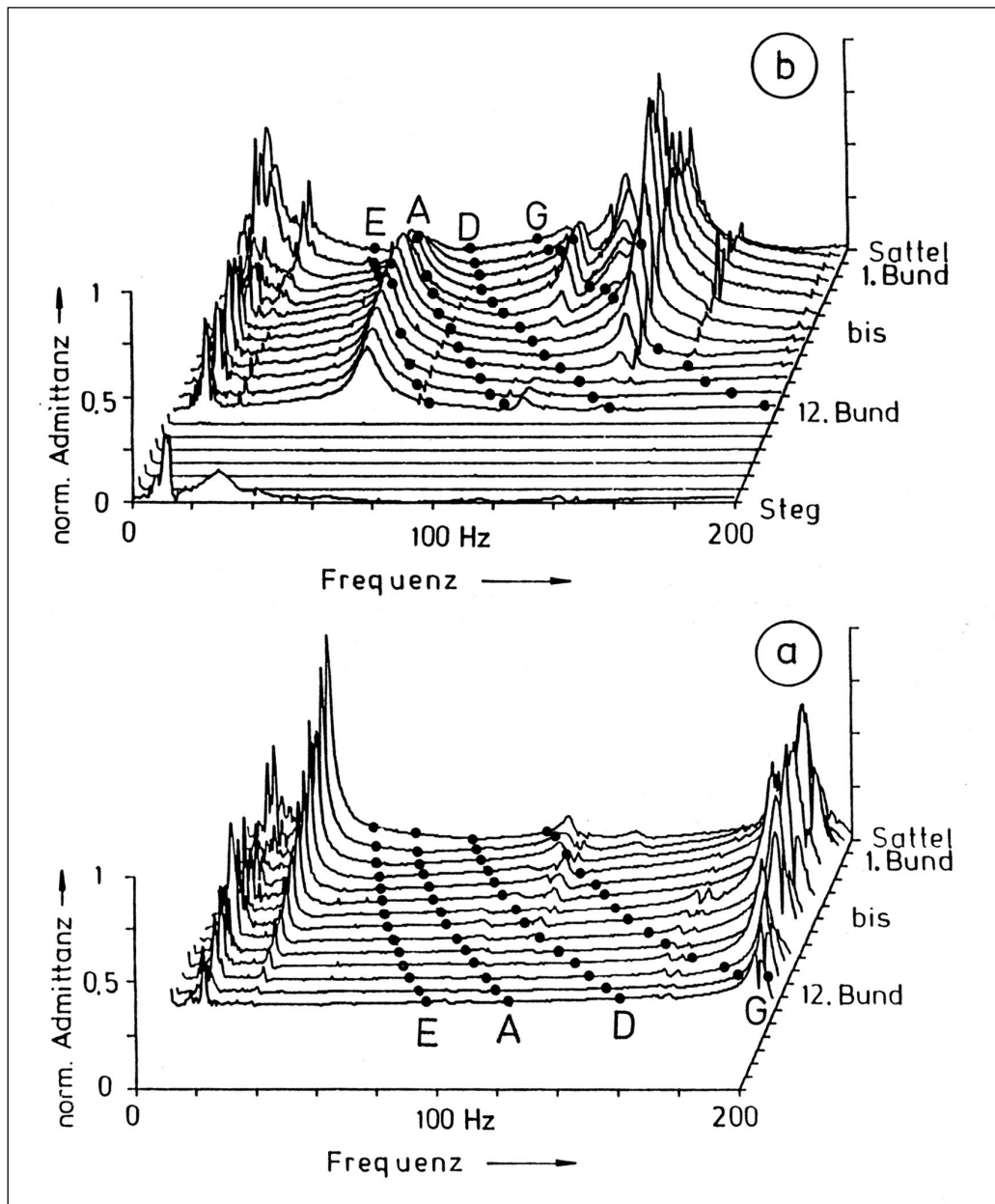


Fig. 37. Normierter Betrag der Admittanz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel und an den ersten zwölf Bünden bei Anregung und Messung

a) quer zum Griffbrett bzw.

b) senkrecht zum Griffbrett.

Die Punkte repräsentieren die Grundfrequenzen der zugehörigen Saitenklänge.

An dieser Stelle soll zum ersten Mal eine Interpretation der Messergebnisse im Hinblick auf Dead Spots geliefert werden. Dabei sei vorausgesetzt, dass das Abklingen des Saitenklanges wesentlich durch das Abklingen des Grundtones bestimmt wird. Für die folgende Betrachtung sind in Fig. 37 die Grundfrequenzen der Saitenklänge markiert, die von der betreffenden Saite am jeweiligen Bund hervorgerufen werden. Aufgetragen sind Frequenzen von 0 Hz bis 200 Hz.

Aus der vorderen Kurve im oberen Teildiagramm b ist zu ersehen, dass die mechanische Admittanz des Steges vergleichsweise klein ist. Da der Steg somit relativ unbeweglich ist, kann das untere Auflager der Saite als weitgehend starr betrachtet werden. Dies träfe in weitem Maße auch für das obere Auflager der Saite zu, sofern die Admittanz des Halses quer zum Griffbrett ausschlaggebend wäre. Wie Fig. 37 a erkennen lässt, liegen praktisch alle eingezeichneten Punkte in Tälern des Admittanz-Gebirges. Dies bedeutet, dass die oberen Auflager für die Grundsicherungen der Saiten, die leer gespielt oder an den ersten zwölf Bünden gegriffen werden, in Querrichtung weitgehend starr sind. In der Richtung senkrecht zum Griffbrett (oberes Teildiagramm b) trifft dies jedoch keineswegs zu. Solange sich das obere Auflager der Saite am Sattel befindet, ist es nur wenig beweglich. Sobald die eingezeichneten Punkte jedoch nicht mehr in den Tälern des Admittanz-Gebirges liegen, ist die Saite an ihrem oberen Ende mehr oder weniger nachgiebig aufgelagert. Mit Verlusten im Auflager ist zu rechnen, Dead Spots sind zu erwarten. Insbesondere wenn die Saiten nicht mehr leer gespielt werden, sondern etwa zwischen dem 1. und 10. Bund (E- und A-Saite) oder dem 3. bis 8. Bund (G-Saite) gegriffen werden, muss mit Dead Spots gerechnet werden. Lediglich für die D-Saite sind keine eklatanten Einflüsse zu erwarten.

Der Gitarrist oder Bassist kann die Saiten seines Instruments auf ganz unterschiedliche Art in Bewegung versetzen. Er kann dies mit dem Daumen, den Fingern oder mit einem Plektrum tut. Auch höchst ungewöhnliche Spielweisen, wie etwa mit den Schneidezähnen, sind schon bekannt geworden. Im Allgemeinen werden sich die Saiten anfänglich sowohl parallel als auch senkrecht zum Griffbrett bewegen. Die Diagramme der Fig. 36 und 37 belegen, dass die Nachgiebigkeit des Halses stark richtungsabhängig ist. Sie lassen erwarten, dass die Parallelkomponente der Saitenschwingung in aller Regel länger als deren Normalkomponente anhalten wird. Die Ursachen von Dead Spots sind folglich weniger im Verhalten des Halses in der Ebene Korpus/Hals zu suchen. Vielmehr werden die beobachteten Dead Spots ihre Ursache vor allem in Biege- und Torsionsschwingungen haben, bei denen Teile des Halses sich aus der Ebene Korpus/Hals heraus bewegen. Bewegungen dieser Art werden erfasst durch Diagramme wie Fig. 37 b und Fig. 38 b, bei denen Anregung sowie Messung senkrecht zum Griffbrett erfolgen. Die im Weiteren zusammengestellten Messdiagramme wurden allesamt auf diese Weise ermittelt.

5.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Im vorliegenden Kapitel sind Vorversuche beschrieben, in denen das Werkzeug bereitgestellt und erprobt worden ist, das bei den folgenden Untersuchungen an den Instrumenten benutzt werden soll. Für jeden möglichen Endpunkt einer Saite sind als dynamische Größe die Wechselkraft sowie eine kinematische bzw. Schwingungsgröße zu bestimmen. Diese beiden Größen müssen zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Als der Vorstellung förderlich hat es sich erwiesen, nicht die Kraft auf eine Schwingungsgröße zu beziehen, sondern umgekehrt zu verfahren. Demzufolge werden im Weiteren keine mechanischen Impedanzen, sondern vielmehr Quotienten vom Charakter einer Admittanz gemessen und dargestellt.

Probeweise wurden die Schwingungsgrößen

- Beschleunigung, die direkt gemessen wird,
- Schnelle, die durch einfache Integration daraus entsteht bzw.
- Auslenkung, die durch zweimalige Integration der Beschleunigung gebildet wird,

ins Verhältnis zur anregenden Kraft gesetzt. Auf diese Weise erhält man durch Quotientenbildung im Spektralbereich die

- Acceleranz,
- Admittanz oder Mobilität bzw.
- dynamische Nachgiebigkeit.

Davon wird die mechanische Admittanz ausgewählt. Sie ist der Quotient aus der Schnelle, die aus der gemessenen Beschleunigung durch Integration über die Zeit im Ladungsverstärker gebildet wird, und der am selben Ort in derselben Richtung gemessenen Kraft. Das zu untersuchende Instrument wird über einen kleinen Schwingerreger mit einem Rauschsignal angeregt. Beide Messgrößen werden gleichzeitig erfasst und einem Zweikanal-FFT-Analysator zugeführt, der daraus die Übertragungsfunktion bildet. Deren Betrag wird normiert und als Funktion der Frequenz dargestellt. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass wesentliche Erscheinungen im tieffrequenten Frequenzbereich auftreten. Derzeit erscheint daher die Beschränkung auf den Frequenzbereich bis 500 Hz sinnvoll.

Messungen in zwei Richtungen quer zur Halsachse haben erwiesen, dass der Hals sowohl senkrecht zum Griffbrett als auch tangential nachgibt. Aus der Ebene des Korpus heraus treten diese Erscheinungen bereits bei tieferen Frequenzen auf, als dies bei Bewegungen in der Ebene des Korpus der Fall ist. Aus diesem Grunde wird die Messspitze des Impedanzmesskopfes senkrecht auf das Griffbrett gerichtet. In manchen Fällen erweist es sich dabei als schwierig, direkt auf der metallenen Bundeinlage zu messen. Vergleichende Experimente zeigen, dass es zulässig ist, ersatzweise unmittelbar neben der Bundeinlage direkt auf dem Griffbrett zu messen. Im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche wird die laterale Abhängigkeit des mechanischen Verhaltens nicht berücksichtigt; vielmehr wird stets jeweils nur eine Messung in der Mitte des Halses durchgeführt. Ausführlichere Untersuchungen sollten jedoch auch Messungen an seitlich versetzten Orten beinhalten.

Weitere Versuche wurden zum Einfluss der Aufnehmermasse, die prinzipiell das Messergebnis verfälschen kann, durchgeführt. Offenbar ist bei Solid-Body-Instrumenten die effektive Masse des Aufnehmers im Vergleich zur effektiven Masse der zu untersuchenden Objekte so klein, dass auf eine Massenkompensation verzichtet werden kann.

Fig. 38 zeigt zwei Diagramme, in denen die Admittanz für den Sattel und 19 der 22 Bünde (Gibson Explorer, unteres Teildiagramm a) bzw. für den Sattel und sämtliche 18 Bünde (Travelling Wilbury TW 500, oberes Teildiagramm b) wiedergegeben ist. Ebenso wie in Fig. 36 b erkennt man, dass sich die auffallendsten Erscheinungen jeweils im oberen Teil des Halses ausprägen. Offenbar ist der Hals im Bereich des Sattels und der daran anschließenden Bünde, d.h. in den tiefen Lagen, am nachgiebigsten. In den hohen Lagen, d.h. in der Nähe des Korpus, ist der Hals erwartungsgemäß weniger nachgiebig. Im Sinne einer Reduktion der Information wird deshalb im Weiteren meist darauf verzichtet, oberhalb des 13. Bundes zu messen. Bis zum 12. Bund lässt sich für jede Saite der Bereich einer Oktave erfassen. Wie bereits in den Fig. 34 und 35 praktiziert, wird die Admittanz am Sattel und an den Bünden 1 bis 12 gemessen und dargestellt. Zum Vergleich wird ganz im Vordergrund zusätzlich die Admittanz des Steges mit erfasst. Damit liegt die Art und Weise fest, in der die Ergebnisse im Weiteren dargestellt werden.

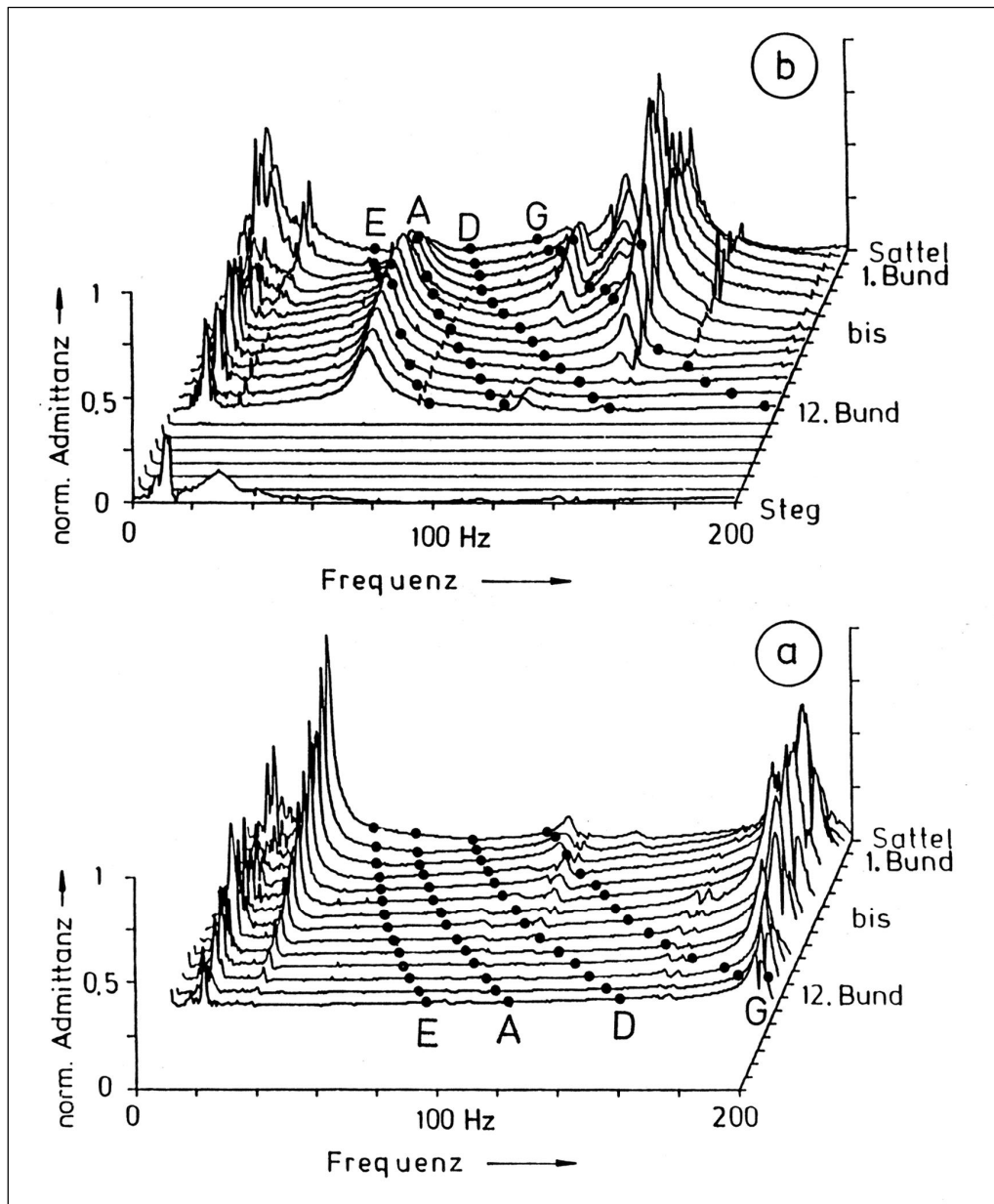


Fig. 38. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel und an den Bünden als Funktion der Frequenz
 a) für die elektrische Gitarre Gibson Explorer bzw.
 b) für die elektrische Gitarre Travelling Wilbury TW 500.

Eine Frage ist noch nicht endgültig gelöst. Sie betrifft die Lagerung des Gitarrenkorpus bei der Messung, die derjenigen beim Spielen möglichst nahe kommen soll. Bei der Messung kann sich das Kopfende des Halses frei bewegen; der Korpus muss - mit oder ohne Zwischenlage - auf dem Messtisch aufliegen. Vergleichende Experimente haben gezeigt, dass verschiedenartige Zwischenlagen unterschiedliche Admittanzverläufe zur Folge haben können. Solange nicht endgültig geklärt ist, welche Lagerungsart die realen Bedingungen am Körper des Spielers am besten nachbildet, werden zwischen Korpus und Messtisch vier Lagen dünnen Schaumstoffs gelegt. Auf diese Weise sind die Messdiagramme entstanden, die im folgenden Kapitel zusammengestellt sind.

6. GEMESSENE HALS- UND STEGADMITTANZEN

Für die Schwingung der Saite und für deren Abklingen ist von grundlegender Bedeutung, wie sich die Auflager an den beiden Enden verhalten. Dabei interessiert insbesondere das Verhalten des Halses. Dieses wird durch die Admittanz, gemessen in der Mitte unmittelbar neben den Bundeinlagen in Richtung senkrecht zum Griffbrett, gekennzeichnet. Die Admittanz wird am Sattel, an den Bündlen 1 bis 12 und zusätzlich auch am Steg bestimmt. Entsprechende Diagramme, die solche Messergebnisse bei Normierung auf etwa 0,04 s/kg enthalten, sind im vorliegenden Kapitel zusammengestellt. Auf Seite 84 dieses Berichtes 1/96 "Dead Spots" findet sich eine Vorlage, mit der sich eine Folie herstellen lässt. Für den E-Bass sowie für die Gitarre sind in derselben Darstellung die Frequenzen der Grundtöne markiert, welche die angegebene Saite hervorruft, wenn sie am entsprechenden Bund gegriffen wird. Auf die Messdiagramme gelegt, erleichtert diese Folie die Interpretation der dargestellten Ergebnisse.

6.1. Admittanzen von Elektrobässen

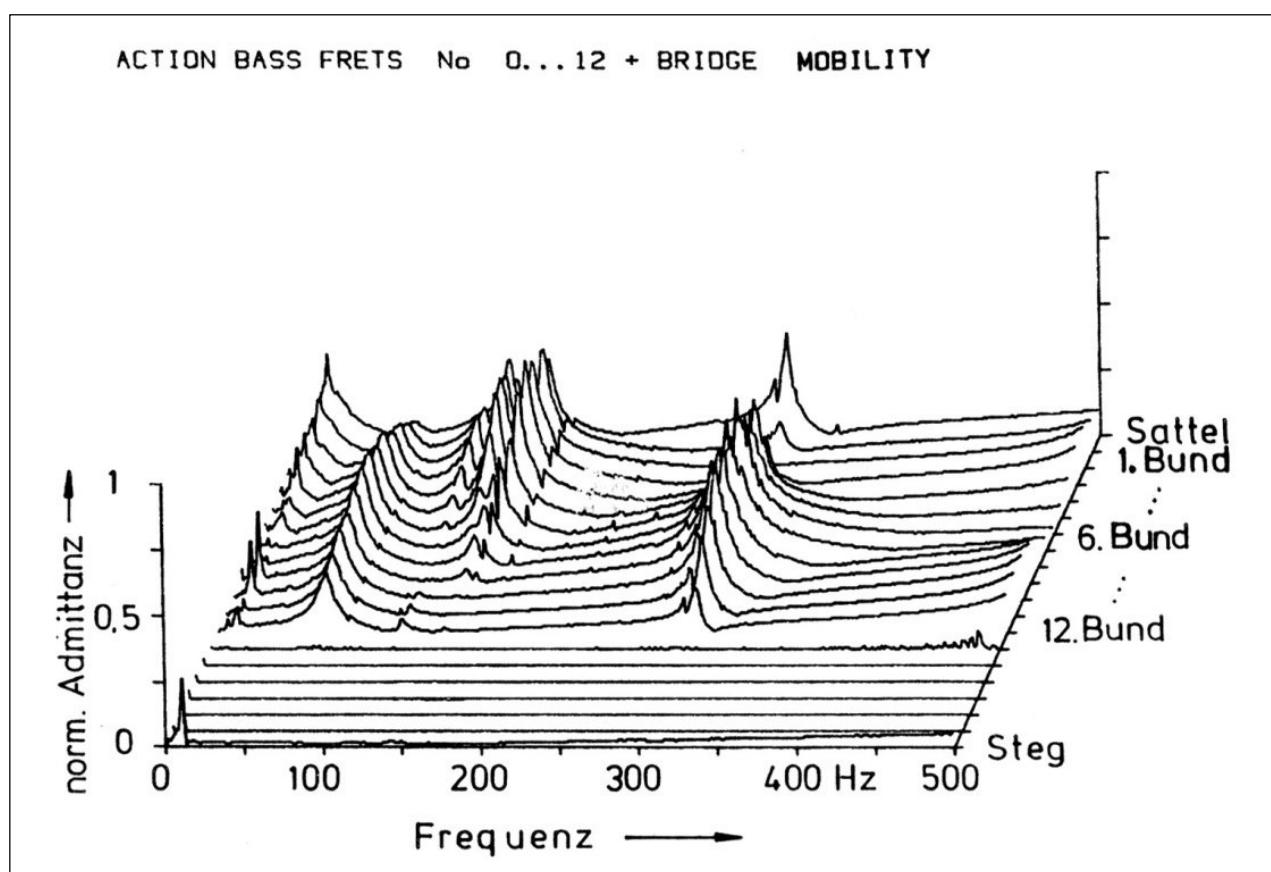


Fig. 39. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bündlen und am Steg als Funktion der Frequenz für den Elektrobass Action Bass.

In Fig. 39 und in sämtlichen anderen Diagrammen erweist sich die Admittanz des Steges (unten im Bild) stets als sehr klein im Vergleich zur Admittanz an den Bündeln des Halses. Die Vorstellung ist daher wohlbegründet, dass die Ursache für Dead bzw. Live Spots in der Halsadmittanz, d.h. in der Randbedingung am anderen Ende der Saite zu suchen ist. Dead Spots werden dadurch verursacht, dass die Saite an ihrem oberen Ende, d.h. am jeweiligen Bund des Halses, ein mehr oder weniger nachgiebiges und verlustbehaftetes Auflager vorfindet; sie sind mit einer großen Halsadmittanz verknüpft. Werden im Folgenden die Diagramme interpretiert, so geschieht dies mit Blick auf Dead Spots dadurch, dass mittels der Schablone nach Punkten gefahndet wird, die auf "Bergen" des Admittanz-"Gebirges" liegen. Live Spots korrespondieren demgegenüber mit einer sehr geringen Halsadmittanz. Sinngemäß lassen sie sich dadurch auffinden, dass man die Diagramme mittels der Schablone daraufhin überprüft, ob Saitengrundfrequenzen mit "Tälern" übereinstimmen.

Die Fig. 39 und 40 repräsentieren Ergebnisse von Messungen an den beiden Bassgitarren. Die Admittanz-Gebirge ähneln sich. So erkennt man etwa zwischen 50 Hz und 70 Hz "Höhen-rücken", deren Maximum in der Nähe des 7. Bundes liegt. Ein Vergleich mit den Schwingungsmoden von Fig. 11 zeigt, dass sich hierin offenbar eine Biegeschwingung des Halses widerspiegelt, die beim Action Bass im Bereich von 69 Hz auftritt. Ein Blick in Fig. 12 lässt erkennen, dass beim Peavey Dyna Bass zwei ähnliche Biegeschwingungen bei 50 Hz und 60 Hz auftreten, was die Ursache für die entsprechenden Doppelspitzen in Fig. 40 sein könnte. Die beim Experimentieren gemachten Erfahrungen lehren, dass die Frequenzlage und die Ausgeprägtheit dieses Höhenzuges in gewissem Maße davon abhängen, wie der Korpus auf dem Messtisch gelagert ist; siehe hierzu Abschnitt 5.3.2. Legt man die beiliegende Schablone auf Fig. 39 bzw. Fig. 40, so erkennt man, dass dieser erste Höhenzug im Wesentlichen die Grundtöne der Klänge beeinflussen wird, die in den tiefen und mittleren Lagen der E- und der A-Saite sowie in den tiefen Lagen der D-Saite gespielt werden.

Ein ganz ausgeprägter, zerklüfteter Höhenzug ist zwischen etwa 100 Hz und 150 Hz zu beobachten. Bei beiden Elektrobässen weist er am 10. Bund (Action Bass, Fig. 39) bzw. am 8. Bund (Peavey Dyna Bass, Fig. 40) ein Tal auf. Diese Orte dürften den Knoten der entsprechenden Schwingungsformen in Fig. 11 bzw. 12 zugeordnet sein. Ein Schwingungsbauch ist dort zwischen dem etwa 2. und 4. Bund zu beobachten. In den Fig. 39 und 40 äußert sich dies als Gipfel. Bei beiden Elektrobässen treten mehrere (beim Action Bass z.B. drei) Spitzen bei eng benachbarten Frequenzen auf, die sich im Admittanz-Gebirge als Grate ausbilden. Für diesen Frequenzbereich hat die Modalanalyse (Fig. 11 und 12) mehrere Schwingungsmuster von ähnlicher Form ergeben. Mittels der Schablone lässt sich aus den Fig. 39 und 40 ablesen, dass ein Einfluss vor allem auf die Grundtöne der Klänge zu erwarten ist, die auf der G-Saite gespielt werden. Im selben Frequenzbereich lassen die Schwingungsbilder neben Biegung auch Torsion des Halses erkennen. Demzufolge ist hierbei damit zu rechnen, dass die Admittanz von der lateralen Messposition abhängig sein wird.

Bei etwa 300 Hz ist eine weitere "Bergkette" zu erkennen, die ein Minimum am 2. Bund und ein weiteres oberhalb des 12. Bundes aufweist. Der Hals schwingt im entsprechenden Frequenzbereich dergestalt, dass er an diesen beiden Stellen Knoten ausbildet; dazwischen treten Schwingungsbäuche auf. Das Auflegen der Schablone macht deutlich, dass die Saitenklänge so tiefe Grundfrequenzen haben, dass sich diese Schwingungsform nicht auf die Grundtöne auswirkt. Es ist jedoch zu vermuten, dass höhere Harmonische der Saitenklänge, deren Frequenzen bei 300 Hz liegen, beeinflusst werden. Dies dürfte keine ausgeprägten Auswirkungen auf die Nachklingzeit des Gesamtklages, könnte jedoch die Klangfarbe beeinflussen.

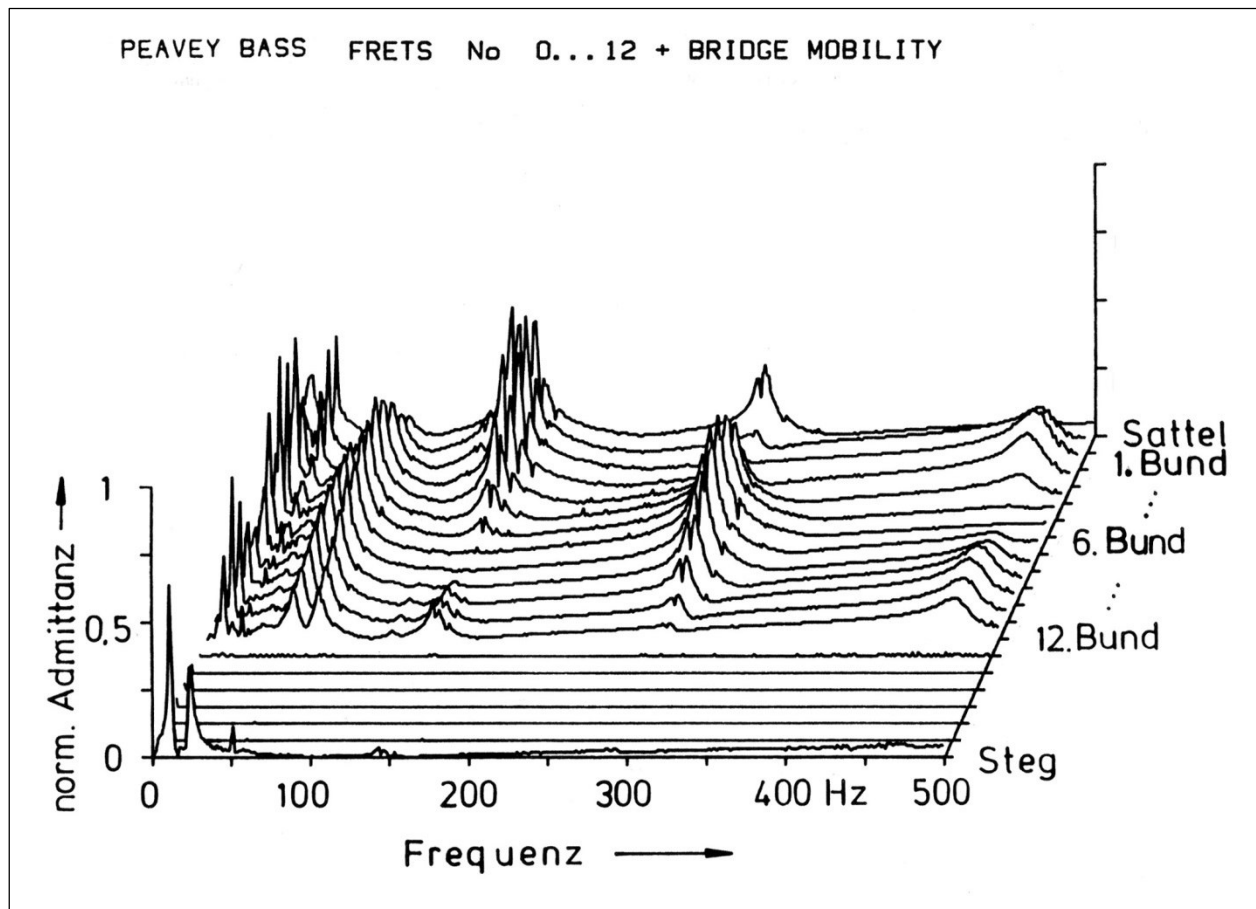


Fig. 40. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg als Funktion der Frequenz für den Elektrobass Peavey Dyna Bass.

6.2. Admittanzen von Elektrogitarren

Wie bereits bei den bisherigen Messungen zu erkennen war, ist auch in sämtlichen Diagrammen der Fig. 41 bis 44 die Admittanz des Steges (unten im Bild) stets sehr viel kleiner als die Admittanz des Halses. Gemeinsam ist den Ergebnisse für alle Gitarren darüber hinaus, dass etwa zwischen 80 Hz und 100 Hz ein "Höhenrücken" erkennbar ist, der ein Minimum in der Nähe des Sattels und ein flaches Maximum etwa am 10. Bund hat. Genaue Frequenzlage und Ausprägung dieses Höhenrückens hängen offenbar in gewissem Maße von der Lagerung der Gitarre auf dem Steintisch - bzw. am Körper des Spielers - ab. Ein Einfluss ist auf diejenigen Saitenklänge zu erwarten, die beim Anzupfen der E-Basssaite in den tiefen Lagen entstehen.

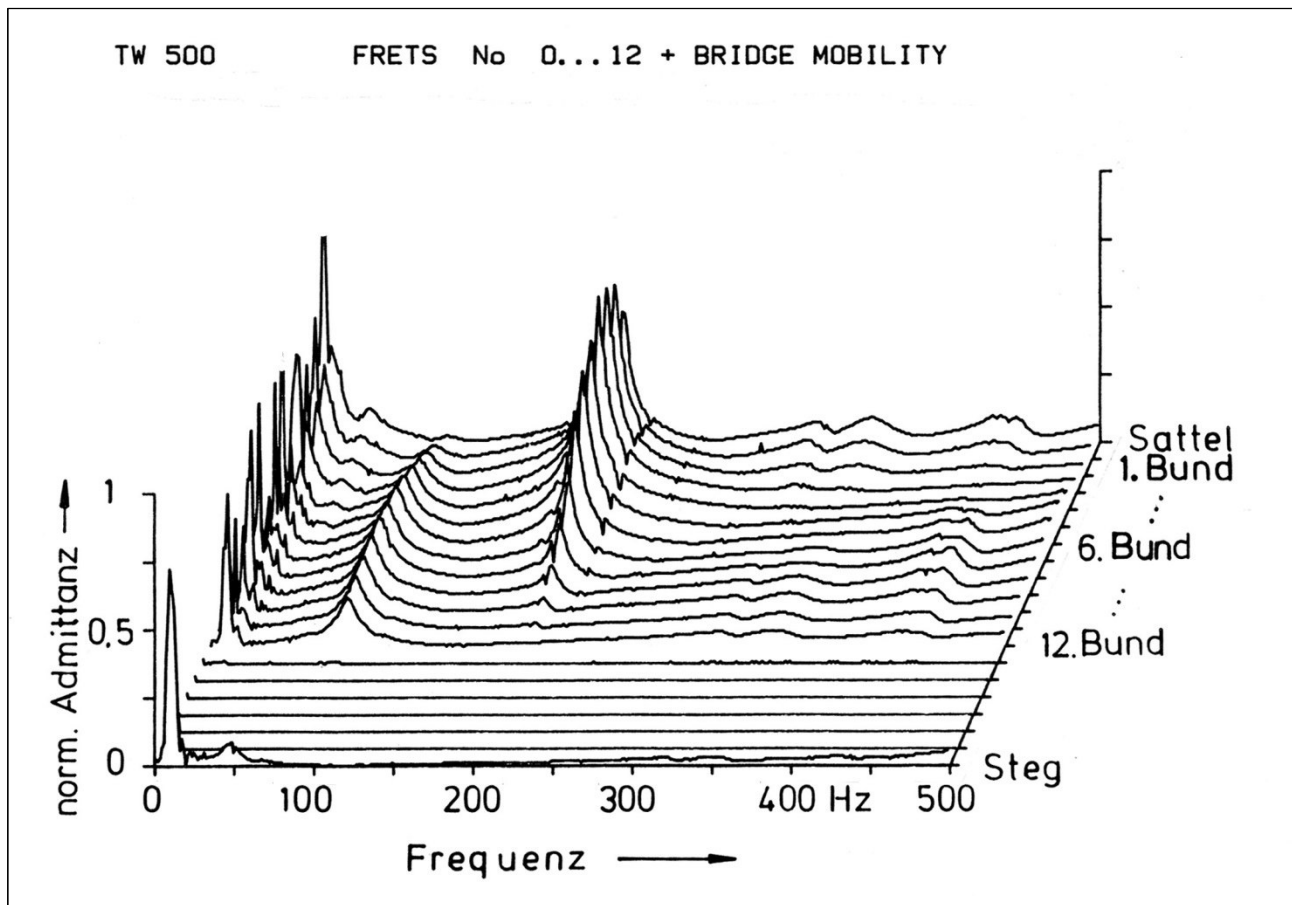


Fig. 41. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg als Funktion der Frequenz für die elektrische Gitarre Travelling Wilbury TW 500.

Ein sehr übersichtliches Admittanz-Gebirge ergibt sich gemäß Fig. 41 für die Gitarre Travelling Wilbury TW 500. Neben dem Höhenrücken bei etwa 90 Hz, der die ganz tiefen Lagen der E-Basssaite beeinflussen wird, ist lediglich eine wesentliche Erhebung bei etwa 200 Hz zu erkennen. Bei dieser Frequenz nimmt die Admittanz ihre größten Werte bei den Bünden mit den kleinen Nummern an. Während der Hals damit im Bereich des Sattels sehr nachgiebig ist, ist er in der Nähe des 12. Bundes praktisch starr. Wenn man die entsprechende Schablone auflegt, wird deutlich, dass daraus vor allem eine Beeinflussung der A-Saite in den hohen Lagen, der D-Saite in den tieferen und der G-Saite in den ganz tiefen Lagen resultieren wird. Die weiteren Hügel erscheinen so "sanft", dass ihnen kein dramatischer Einfluss zuzumessen ist.

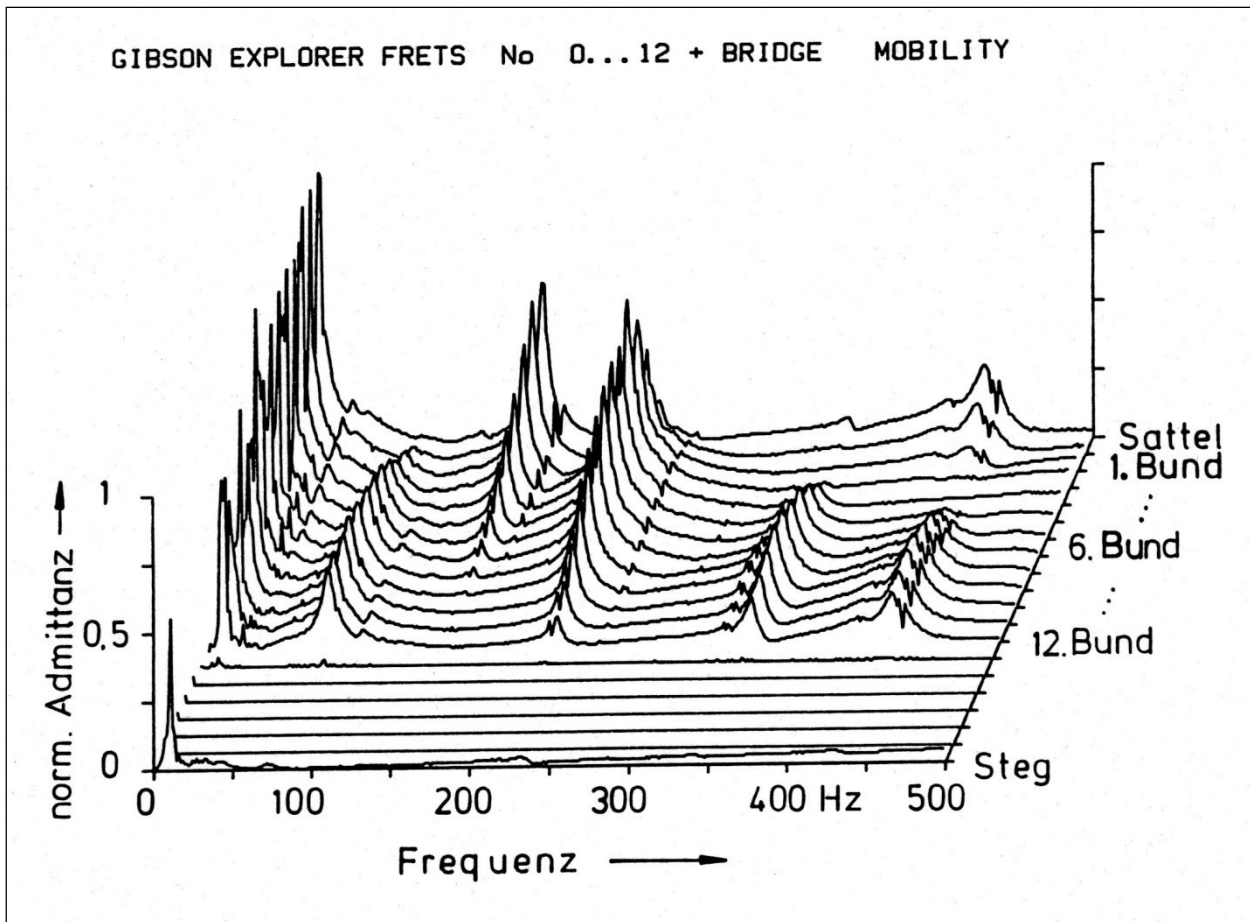


Fig. 42. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg als Funktion der Frequenz für die elektrische Gitarre Gibson Explorer.

In Fig. 42 stellt sich die Admittanz für die Gibson Explorer als ein Gebirge dar, das stärker strukturiert und zerklüftet ist als bei der vorher betrachteten Gitarre. Ein erster, flacher Höhenrücken ist bei etwa 80 Hz zu beobachten. Er wird die tiefen Lagen der E-Basssaite beeinflussen. Ein weiterer tritt bei etwa 150 Hz auf; sein stark ausgeprägtes Maximum liegt in der Nähe des Sattels. Einflüsse auf die mittleren Lagen der A-Saite und die tiefen Lagen der D-Saite sind zu erwarten. In ähnlicher Höhe prägt sich ein weiterer Höhenrücken bei etwas mehr als 200 Hz aus. Er dürfte die Ursache für Dead Spots in den tiefen Lagen der G-Saite und mittleren Lagen der D-Saite sein. Ein flacher Höhenrücken bei etwa 340 Hz könnte beispielsweise für die hohen Lagen der G-Saite von Bedeutung sein. Auf die hohen Lagen der H-Saite wiederum dürfte sich die Bergkette bei etwa 430 Hz auswirken.

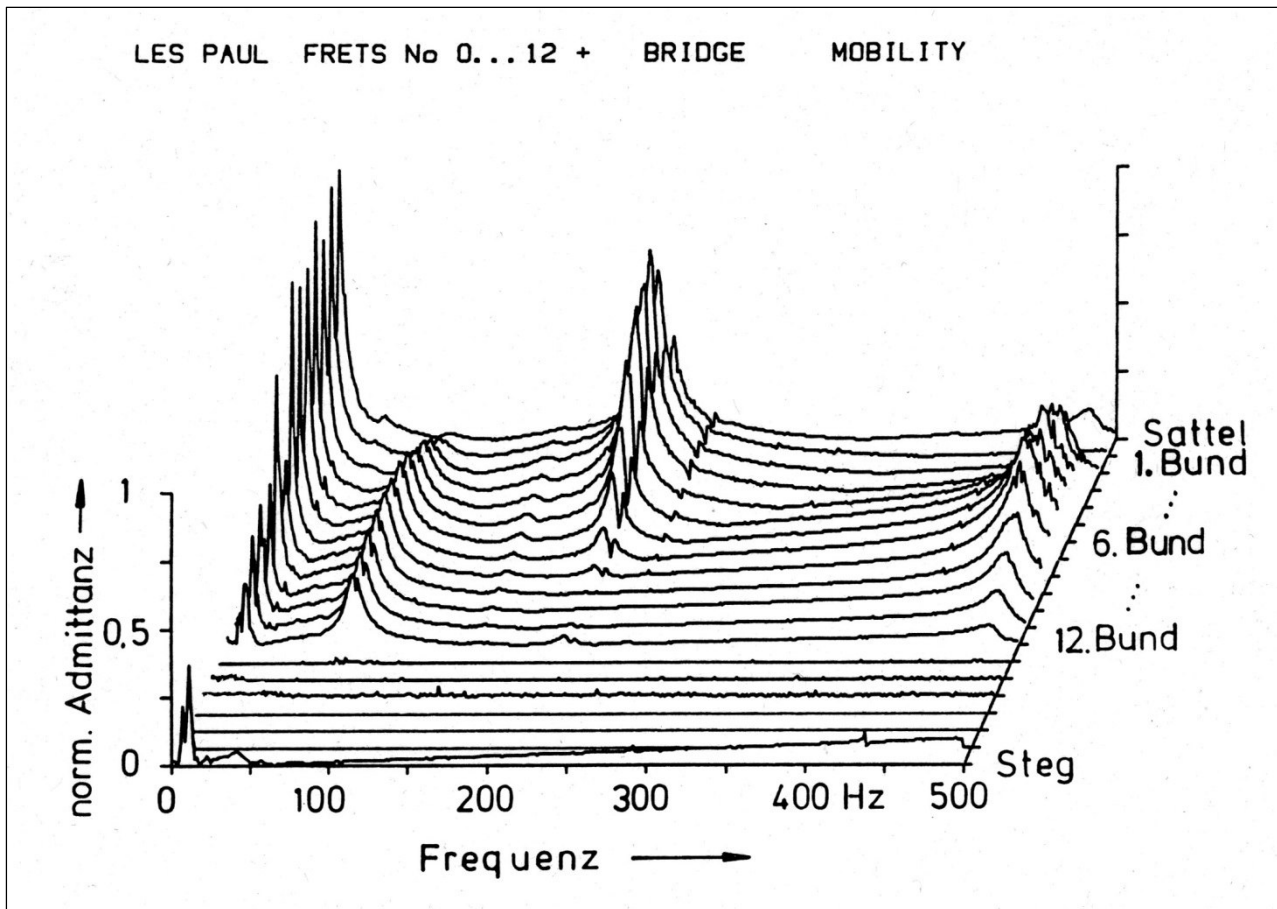


Fig. 43. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg als Funktion der Frequenz für die elektrische Gitarre Gibson Les Paul.

Obwohl die Gitarre Les Paul ähnlich konstruiert ist wie die Explorer vom selben Hersteller, zeigt Fig. 43 einige Unterschiede zu Fig. 42. Das vorliegende Admittanz-Gebirge ist deutlich weniger strukturiert als das eben betrachtete. Übereinstimmung liegt beim ersten Höhenrücken (etwa 80 Hz) vor, der am Sattel ein Minimum aufweist. Dasselbe gilt für den großen Höhenrücken bei etwa 200 Hz, der anstelle des einen Grates hier jedoch zwei eng benachbarte Grate aufweist. Einige der in Fig. 42 beobachteten Höhenrücken (340 Hz sowie 430 Hz) treten bei der Les Paul nicht auf. Derjenige bei etwa 200 Hz deutet sich zwar an, ist jedoch nur ganz schwach ausgeprägt. Stattdessen zeigt sich bei etwa 470 Hz eine Bergkette mit Minima beim 1. sowie oberhalb des 12. Bundes und einem Maximum in der Nähe des 3. Bundes.

Wie die Fig. 20 und 21 erkennen lassen, stimmen die Les Paul und die Explorer in einigen typischen Dead Spots überein. Legt man die Schablone auf Fig. 43, so wird ersichtlich, dass bei der Les Paul beispielsweise im Bereich der A-Saite kein nennenswerter Einfluss des Halses zu erwarten ist. Folgerichtig zeigt die Les Paul gleichmäßigere Abklingzeiten der A-Saite als die Explorer. Die hohe E-Saite weist dagegen einen Dead Spot am 6. oder 7. Bund auf, während die Saitenklänge der Explorer in diesem Bereich sehr gleichförmig abklingen.

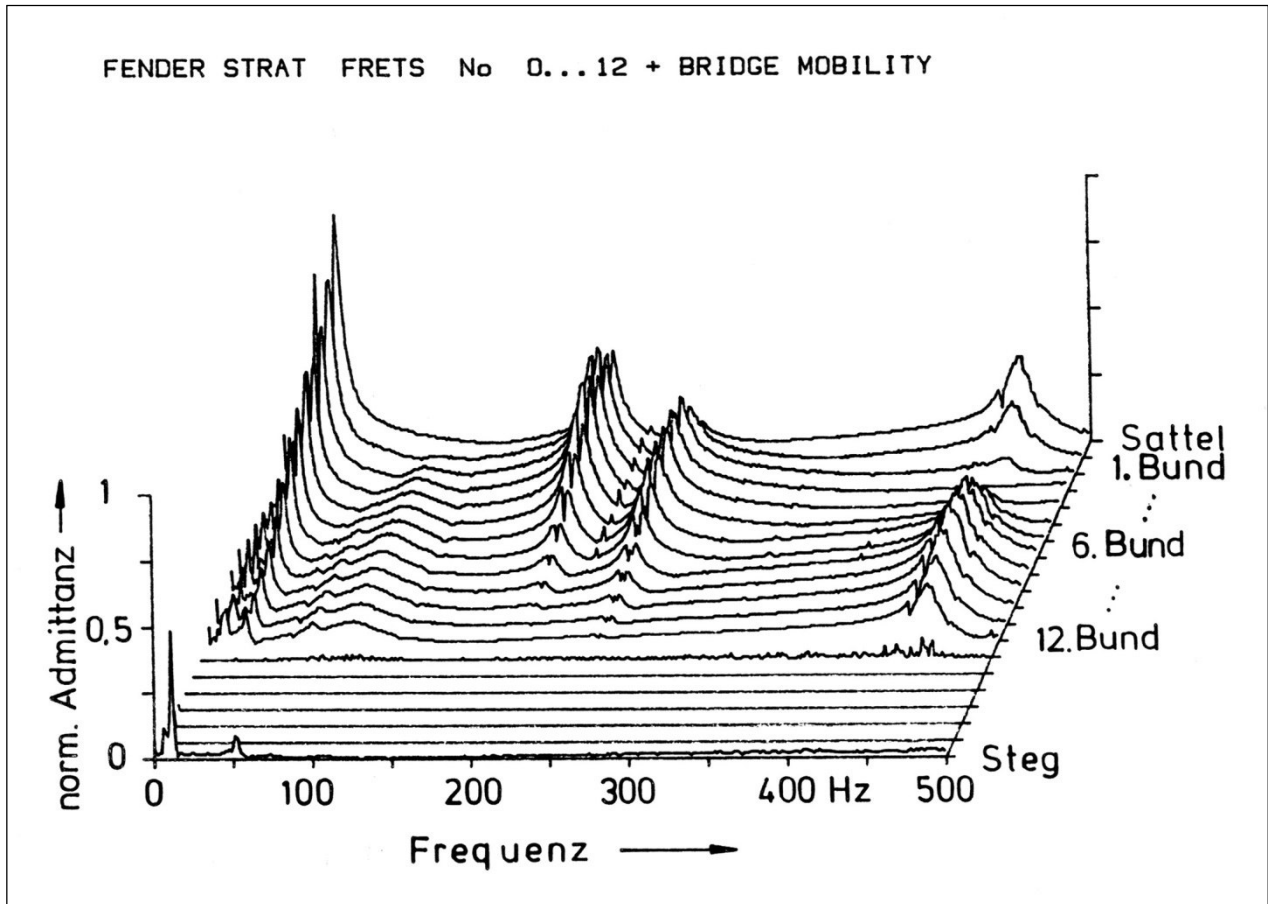


Fig. 44. Normierter Betrag der Admittanz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg als Funktion der Frequenz für die elektrische Gitarre Fender Stratocaster.

Die Stratocaster von Fender ist grundlegend anders konstruiert als die beiden vorher betrachteten Gibson-Gitarren. Demzufolge findet man ein deutlich andersartiges Admittanzgebirge vor. Der erste Höhenrücken ist wesentlich flacher als bisher beobachtet. Dies könnte damit zusammenhängen, dass der Hals mit dem Korpus hier nicht verleimt, sondern verschraubt ist. Bei rund 200 Hz prägt sich ein Höhenrücken mit zwei Graten aus, dessen Maximum am oberen Ende des Halses in der Nähe des Sattels liegt. Für die G-Saite sind daher Dead Spots in den tiefen Lagen, für die D-Saite in den mittleren Lagen und für die A-Saite in den hohen Lagen zu erwarten. Ein bisher noch nicht beobachteter Höhenrücken tritt bei etwa 250 Hz auf; er wird sich vor allem in den tiefen Lagen der H-Saite und am 5. Bund der G-Saite auswirken. Eine Bergkette mit zwei Gipfeln zeigt sich bei circa 450 Hz. Sie dürfte die H-Saite in den hohen Lagen sowie die hohe E-Saite etwa beim 5. Bund beeinflussen.

6.3. Zusammenfassende Bemerkungen

Die Messungen zeigen, dass die Admittanz in starkem Maße von der Frequenz und vom Ort abhängig ist. Ein Vergleich zwischen den Messkurven für den Steg einerseits und den Sattel bzw. den Hals andererseits macht deutlich, dass die Admittanz am Steg insgesamt wesentlich kleiner ist als diejenige an den unterschiedlichen Bünden des Halses. Während der Steg demnach vergleichsweise starr

ist, gibt der Hals unter bestimmten Bedingungen durchaus nach. Wenn Frequenz und Anregungsort dazu geeignet sind, kann die Saite den Hals zum Mitschwingen anregen. Die Folge ist, dass mechanische Energie aus der Saite abfließt und sich im Hals letztlich in Wärme umwandelt. Aus der Sicht der Saite bedeutet dies eine zusätzliche Dämpfung. Diese bewirkt, dass die Saitenschwingung rascher abnimmt, als dies bei einem unbeweglichen Auflager der Fall wäre. Für das Abklingen des Saitenklanges wird deswegen die Randbedingung am oberen Ende der Saite, ausgedrückt als Halsadmittanz am betreffenden Bund, eine ganz wesentliche Rolle spielen.

Im Interesse einer einheitlichen Darstellung wurde für alle Diagramme dieselbe Normierung der Ordinate und derselbe Frequenzbereich gewählt. Der Bereich von 0 Hz bis 500 Hz ist dabei als ein gewisser Kompromiss zu sehen. Interessiert man sich lediglich für das Ausschwingen der Grundtöne, reicht bei Elektrobässen auch der etwa halb so große Frequenzbereich bis 200 Hz oder 250 Hz aus. Bei Gitarren könnten dagegen auch Frequenzen über 500 Hz von Interesse sein. Die dargestellte Admittanz, gemessen in der Mitte des Griffbretts in senkrechter Richtung, berücksichtigt die Einflüsse von Biegeschwingungen des Halses und enthält damit einen Großteil der relevanten Information. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass es bei manchen Frequenzen angebracht sein könnte, darüber hinaus auch außermittig, d.h. bei den hohen und den tiefen Saiten, zu messen. Auswirkungen der Torsion des Halses, die bisher unberücksichtigt bleiben, könnten damit zusätzlich erfasst werden.

In der Gesamtschau erweist sich die Punktadmittanz als geeignete Kenngröße. Dead Spots sind dabei mit einer besonders großen Admittanz, Live Spots dagegen mit einer besonders kleinen Admittanz verknüpft. Die gewählte Art der Darstellung, in der neben dem Sattel auch die ersten zwölf Bünde enthalten sind, beinhaltet die wesentliche Information. Sie erweist sich als platzsparend und trotzdem aussagekräftig. In Verbindung mit der zugehörigen transparenten Schablone ermöglicht sie es, schnelle und treffsichere Vorhersagen über das Ausschwingverhalten von Saitenklangen zu machen.

7. ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN NACHKLINGEN UND ADMITTANZ

Im vorliegenden Kapitel soll aufgezeigt werden, wie die gemessene Admittanz, die das Schwingungsverhalten des Halses kennzeichnet, mit dem Abklingen der Saitenschwingung verknüpft ist. Dazu werden konkrete Messwerte herangezogen. Für jedes untersuchte Instrument wird ein repräsentativer Dead Spot herausgegriffen; dieser ist im Folgenden durch einen ausgefüllten Kreis veranschaulicht. Auf derselben Saite wird ein höherer Bund gesucht, an dem die Nachklingzeit länger ist, obwohl sie aufgrund der höheren Lage eigentlich kürzer sein sollte. In aller Regel handelt es sich dabei um einen Live Spot; ein ausgefülltes Quadrat kennzeichnet ihn. Diese Paarung wird dargestellt im

- Pegel-Frequenz-Zeit-Wasserfalldiagramm,
- Nachklingzeit-Bund-Diagramm sowie
- Admittanz-Diagramm.

Die beobachteten Unterschiede bezüglich Dead Spot - Live Spot werden diskutiert, die Zusammenhänge zwischen den Messergebnissen erläutert.

7.1. Saitenklänge und Halsadmittanzen bei Elektrobässen

Das erste Fallbeispiel in Fig. 45 bezieht sich auf die G-Saite des Action Bass. Im linken unteren Teildiagramm ist der entsprechende Ausschnitt von Fig. 15 eingefügt, der die Nachklingzeit T_{30} für die unterschiedlichen Bünde wiedergibt. Man erkennt, dass die G-Saite besonders rasch ausschwingt, wenn sie am 3. Bund gegriffen wird. Offenkundig liegt hier ein Dead Spot vor, der durch den Kreis gekennzeichnet ist. Im Normalfall wäre zu erwarten, dass die Saitenschwingung umso kürzer andauert, je höher die Nummer des Bundes ist, an dem gegriffen wird. Entgegen dieser Erwartung erweist sich für den 10. Bund die Nachklingdauer jedoch um etwa ein Drittel größer als für den 3. Bund. Das Quadrat markiert somit einen Live Spot.

Wie beispielsweise die in Fig. 5 dokumentierten Messungen gezeigt haben, wird im Normalfall das Nachklingen des Gesamtklantes wesentlich vom Nachklingen des Grundtones bestimmt. Die zwei Wasserfalldiagramme im oberen Teil von Fig. 45 zeigen, dass die Amplituden entsprechender höherer Teiltöne der Saitenklänge in beiden Fällen ähnlich rasch abnehmen. Ein deutlicher Unterschied ist jedoch beim ersten Teilton, dem Grundton, zu erkennen. Man ersieht, dass der Grundton am 10. Bund (rechts oben) wesentlich länger anhält als die höheren Teiltöne; dies ist im Einklang mit der allgemeinen Erwartung. Im Gegensatz dazu ist dem Teildiagramm links oben zu entnehmen, dass am 3. Bund entgegen der Erwartung der Grundton wesentlich rascher als am 10. Bund abklingt; seine Amplitude nimmt sogar etwas schneller ab als die des zweiten Teiltones. Damit wird offenkundig, dass ein Dead Spot durch eine außergewöhnlich rasche Abnahme der Amplitude des Grundtones gekennzeichnet ist. Das Abklingen des Gesamtklantes wird in diesem Fall nicht mehr durch den Grundton, sondern durch höhere Harmonische bestimmt.

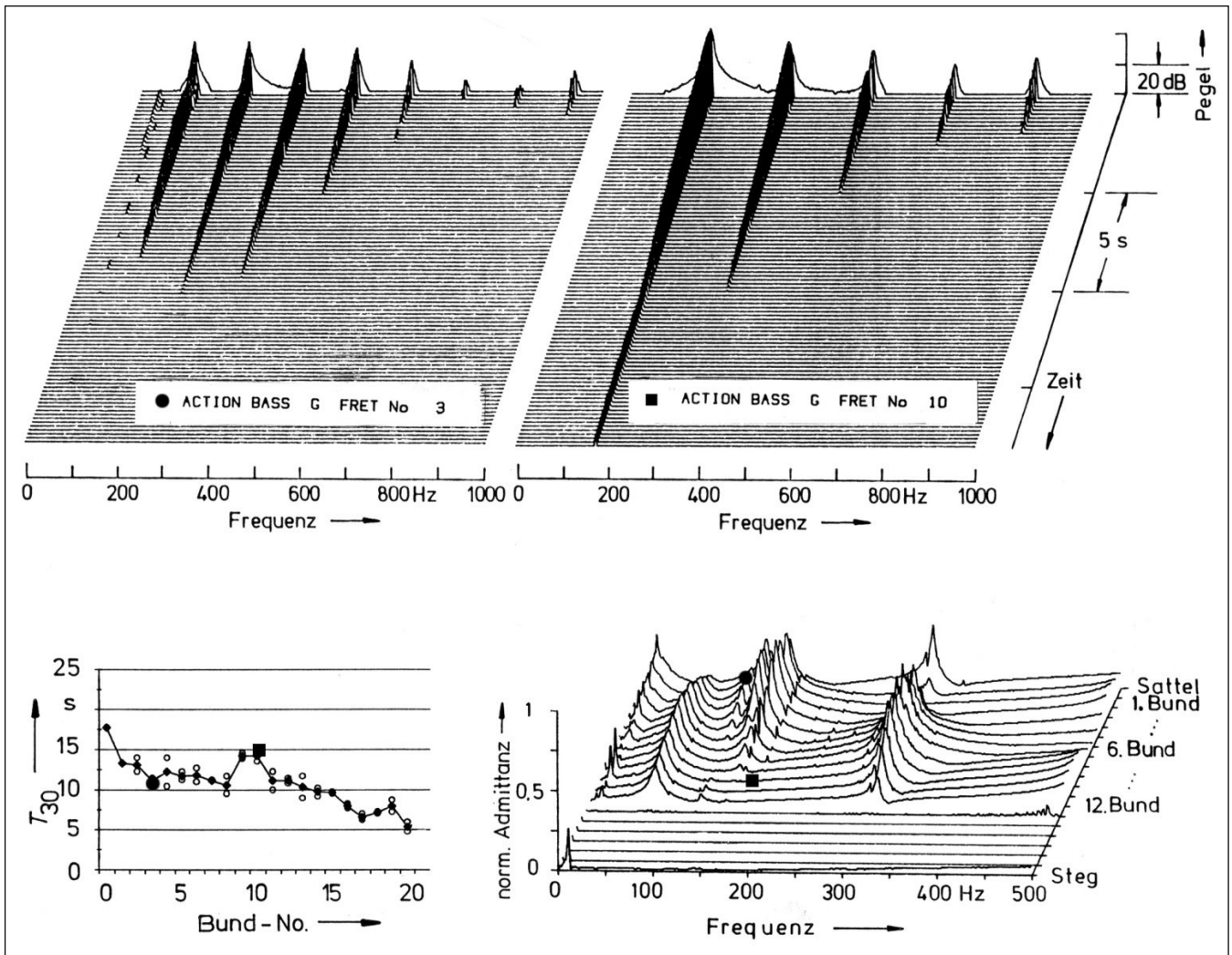


Fig. 45. Elektrobass Action Bass.

Oben: von der G-Saite am 3. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 10. Bund (Live Spot; rechts) erzeugte Saitenklänge.

Unten: Nachklingzeiten der G-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Das Admittanz-Diagramm in Fig. 45 rechts unten (siehe auch Fig. 37 b) zeigt den Grund für die Unterschiede im Ausschwingverhalten. Das Quadrat markiert die Frequenz des Grundtones am 10. Bund. Die Admittanz ist sehr klein, was besagt, dass die Saite an ihrem oberen Ende für die Grundschwingung ein festes Auflager vorfindet. Wie der Kreis im selben Diagramm erkennen lässt, ist am 3. Bund die Admittanz für die Grundschwingung vergleichsweise groß. Die Randlagerung am oberen Ende der Saite ist für die Grundschwingung relativ nachgiebig und verlustbehaftet. Die Konsequenz ist, dass die zugehörige Teilschwingung der Saite Energie an den Hals abgibt und somit nicht so lange anhält, wie dies bei einem unnachgiebigen Randlager der Fall wäre. Der Grundton des Saitenklanges klingt folglich außergewöhnlich rasch ab.

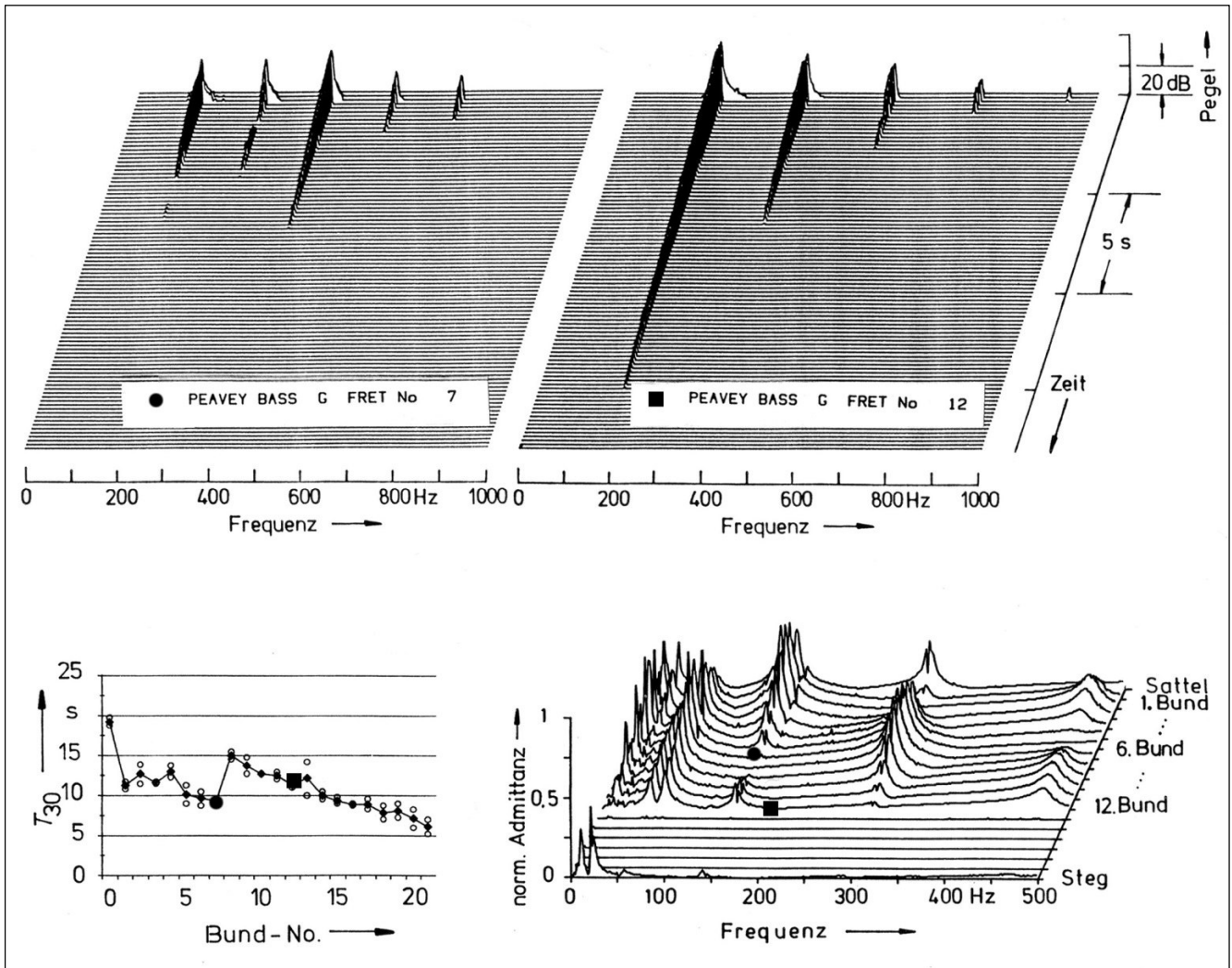


Fig. 46. Elektrobass Peavey Dyna Bass.

Oben: von der G-Saite am 7. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 12. Bund (rechts) erzeugte Saitenklänge.
 Unten: Nachklingzeiten der G-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Beim Peavey Dyna Bass (Fig. 46) wurde ebenfalls an der G-Saite gemessen. Wie das Teildiagramm links unten erkennen lässt, ist die Nachklingzeit der Saitenklänge am 7. Bund (Kreis) deutlich kürzer als am höheren 12. Bund (Quadrat). Betrachtet man in den Wasserfalldiagrammen das Abklingen der einzelnen Teiltöne, so erkennt man wiederum bezüglich des Grundtones deutliche Unterschiede. Entgegen der Erwartung nimmt die Grundschiwingung der Saite am 7. Bund wesentlich rascher ab als am 12. Bund, was die unterschiedlichen Nachklingzeiten der Gesamtklänge erklärt. Der Kreis im Admittanzdiagramm markiert die Grundfrequenz des Klanges, der am 7. Bund entsteht; er liegt im Bereich eines Höhenrückens. Die Admittanz ist dort erkennbar höher als bei dem Quadrat, das für den am 12. Bund erzeugten Grundton steht.

7.2. Saitenklänge und Halsadmittanzen bei Elektrogitarren

Die Messungen, die in Abschnitt 4.4 dokumentiert sind, haben nachgewiesen, dass Dead Spots nicht nur bei Elektrobässen, sondern ebenso auch bei elektrischen Gitarren auftreten. In Fig. 47 sind entsprechende Messdiagramme zusammengestellt, die für die Travelling Wilbury TW 500 gewonnen wurden. Das Nachklingzeitdiagramm links unten lässt für die D-Saite einen Dead Spot am 5. Bund (Kreis) und einen Live Spot am 9. Bund (Quadrat) erkennen. Wiederum zeigen die Wasserfall-diagramme im oberen Teil die größten Unterschiede in Bezug auf die Abnahme des Grundtones. Erwartungsgemäß wird das Nachklingen des Gesamtklangles am 9. Bund vom Grundton dominiert. Dagegen wird das Nachklingen am 5. Bund (links oben) im Wesentlichen vom zweiten Teilton bestimmt, dessen Pegel zwar langsamer als der des ersten Teiltones, insgesamt jedoch verhältnismäßig rasch abfällt.

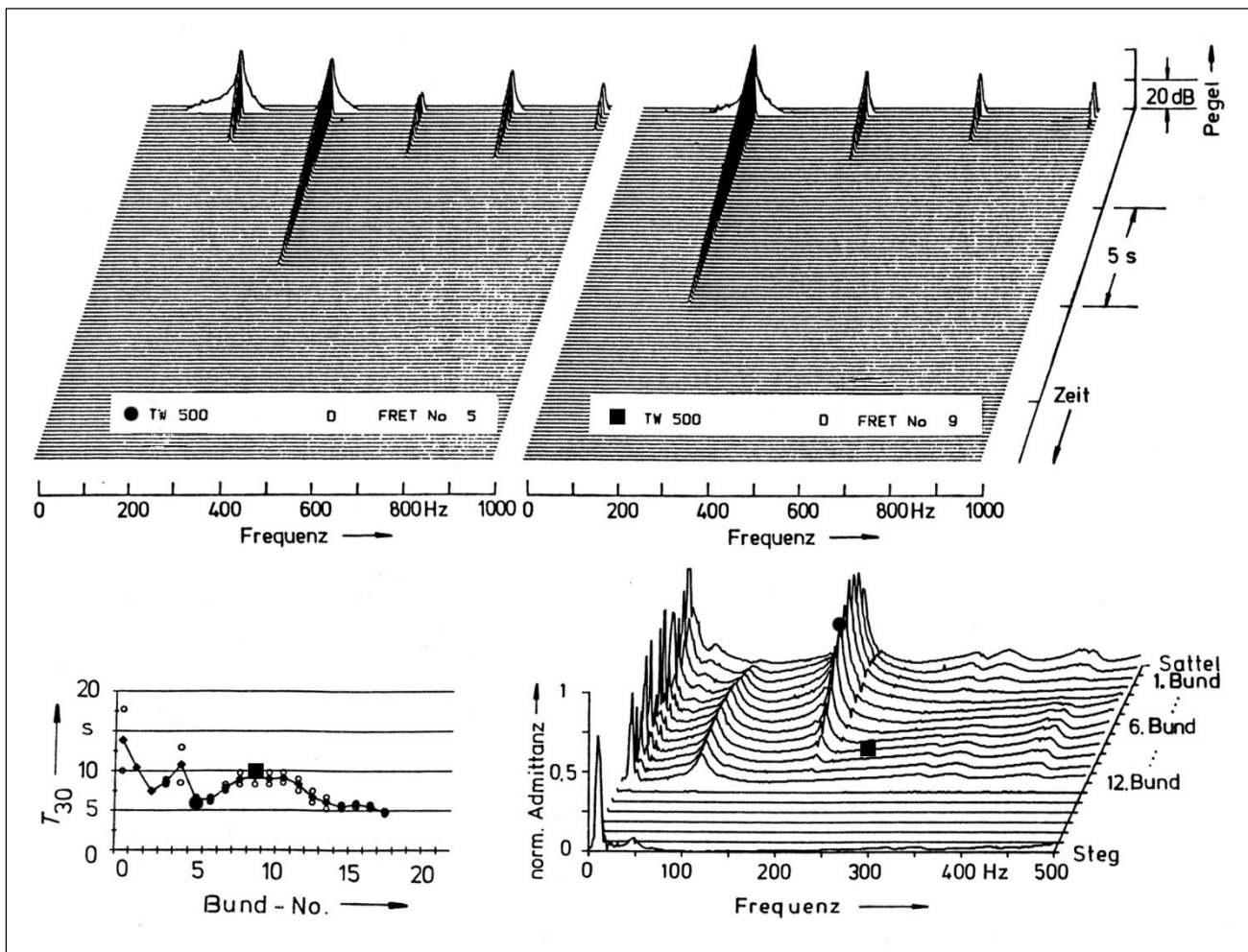


Fig. 47. Elektrogitarre Travelling Wilbury TW 500.

Oben: von der D-Saite am 5. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 9. Bund (Live Spot; rechts) erzeugte Saitenklänge.

Unten: Nachklingzeiten der D-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Das Diagramm rechts unten in Fig. 47 zeigt in ungewöhnlich deutlicher Ausprägung, welche unterschiedlichen Admittanzen die D-Saite an ihrem oberen Ende vorfindet, je nachdem ob sie am 5. Bund (Kreis) oder am 9. Bund (Quadrat) gegriffen wird. Der Kreis liegt auf dem Kamm eines Höhenrückens; hier ist der Hals sehr nachgiebig. Das obere Auflager der Saite ist somit für die Grund-

schwingung weit weniger starr, als wenn die Saite am 9. Bund gegriffen wird. Für diesen Fall lässt die Lage des Quadrates dagegen eine sehr kleine Admittanz erwarten. Das bedeutet, dass die Grundschwingung der Saite dann nicht nur an ihrem unteren, sondern auch am oberen Ende ein praktisch unbewegliches Auflager vorfindet.

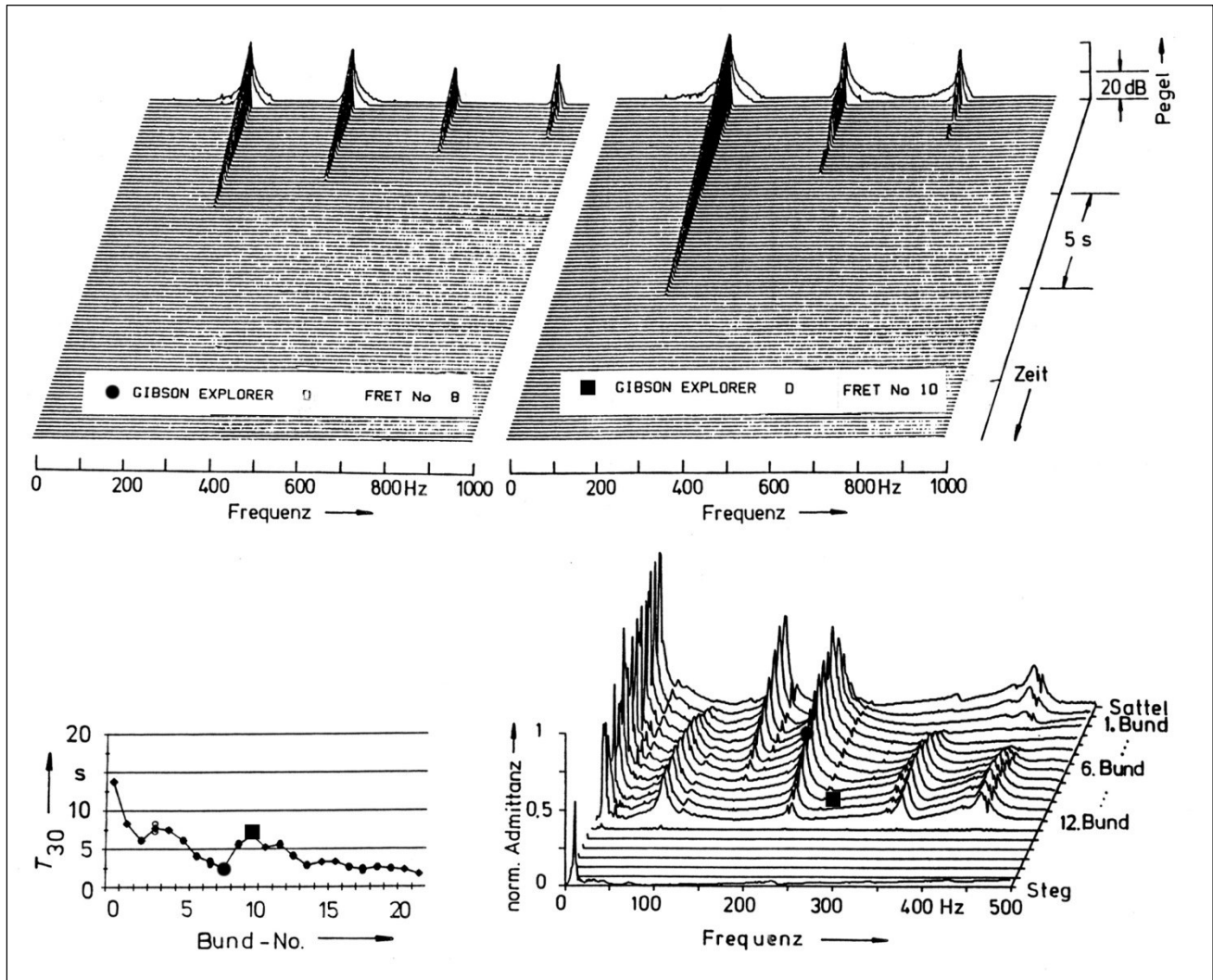


Fig. 48. Elektrogitarre Gibson Explorer.

Oben: von der D-Saite am 8. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 10. Bund (Live Spot; rechts) erzeugte Saitenklänge.

Unten: Nachklingzeiten der D-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Auch bei der Gibson Explorer (Fig. 48) wurde an der D-Saite gemessen. Das Nachklingzeitdiagramm links unten lässt einen Dead Spot (Kreis) am 8. Bund und nur zwei Bündel höher einen Live Spot (Quadrat) erkennen. Wiederum wird die Ursache in den darüber angeordneten Wasserfalldiagrammen offenkundig: Die Grundschwingung der Saite hält am 8. Bund bei weitem nicht so lange an wie am 10. Bund. Wie das Admittanzdiagramm rechts unten zeigt, findet die Grundschwingung der Saite am 8. Bund eine sehr hohe Admittanz vor. Am 10. Bund ist die Admittanz bei der Grundfrequenz dagegen wesentlich kleiner.

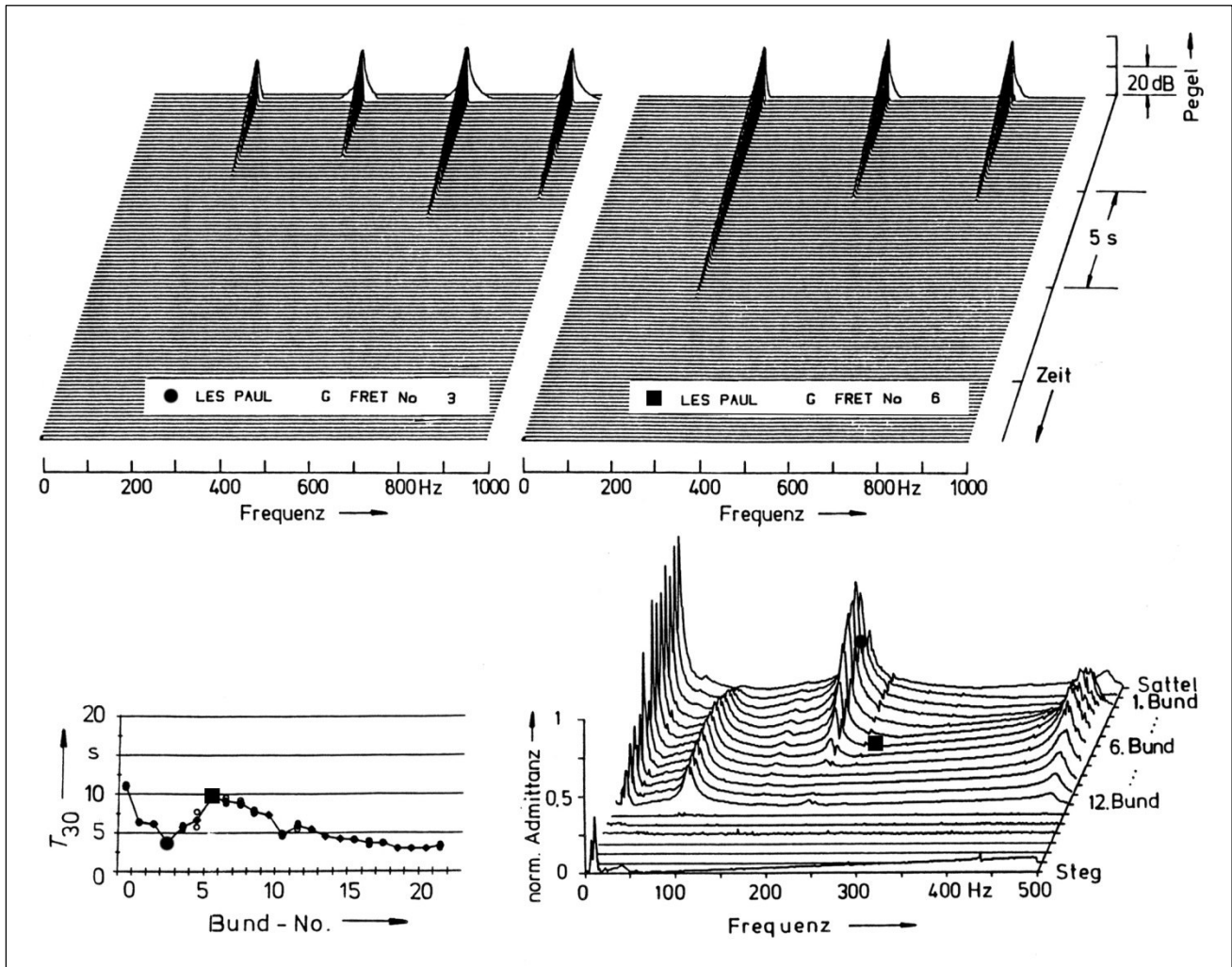


Fig. 49. Elektrogitarre Gibson Les Paul.

Oben: von der G-Saite am 3. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 6. Bund (Live Spot; rechts) erzeugte Saitenklänge.
 Unten: Nachklingzeiten der G-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Das Nachklingzeitdiagramm der Gibson Les Paul weist für die G-Saite (Fig. 49 links unten) einen Dead Spot am 3. und einen Live Spot am 6. Bund aus, die wiederum durch einen Kreis bzw. durch ein Quadrat markiert sind. Wie bei allen bisher betrachteten Paarungen zeigen die darüber dargestellten Wasserfalldiagramme deutliche Unterschiede im Abklingen der Grundschwingung. Das Diagramm rechts unten macht die entsprechenden Unterschiede in der Admittanz am oberen Ende der Saite deutlich. Der Kreis, der den Dead Spot symbolisiert, liegt auf einem der beiden Grate des deutlich ausgeprägten Höhenzuges. Verglichen damit ist am Live Spot, repräsentiert durch das Quadrat, die Admittanz dagegen erwartungsgemäß sehr klein.

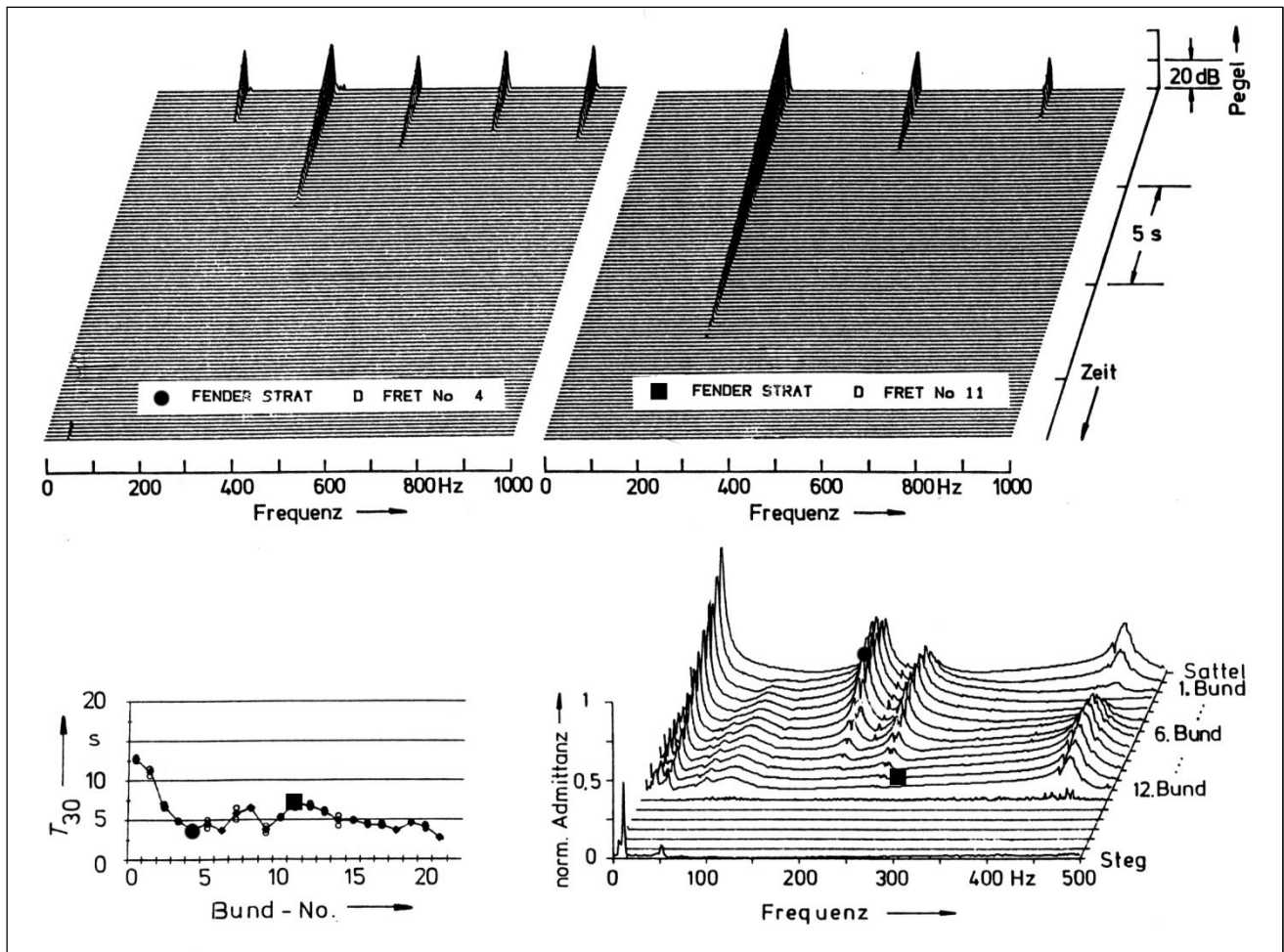


Fig. 50. Elektrogitarre Fender Stratocaster.

Oben: von der D-Saite am 4. Bund (Dead Spot; links) bzw. am 11. Bund (Live Spot; rechts) erzeugte Saitenklänge.
 Unten: Nachklingzeiten der D-Saite (links) bzw. Admittanz des Halses an den unterschiedlichen Bünden (rechts).

Für die Fender Stratocaster wurde als Beispiel die D-Saite herausgegriffen; siehe hierzu Fig. 50. Ein Dead Spot tritt am 4. Bund auf. Der zugehörige Kreis im Admittanzgebirge liegt direkt auf dem Höhenrücken. Der Live Spot am 11. Bund (Quadrat) korrespondiert dagegen mit einer sehr kleinen Admittanz. Wiederum machen die Diagramme im oberen Teil deutlich, dass die höheren Harmonischen für das Ausschwingen im Normalfall von untergeordneter Bedeutung sind. Die unterschiedlichen Admittanzen wirken sich dadurch auf das Sustain aus, dass sie zu unterschiedlich langem Ausschwingen des Grundtones führen.

8. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

In der vorliegenden Studie wurden zwei Elektrobässe und vier elektrische Elektrogitarren mit Blick auf Dead Spots untersucht. Solche Punkte auf dem Hals - bzw. aus der Sicht des Musikers: auf dem Griffbrett - des Instruments zeichnen sich durch schlechtes Sustain aus. Die zugehörigen Saitenklänge tragen nicht, sondern klingen sehr rasch ab; sie wirken tot.

Um Dead Spots objektiv erfassen zu können, wurde zunächst das Ausschwingverhalten der Saitenklänge systematisch untersucht. Dazu wurde eine Saite nach der anderen leer - d.h. unverkürzt auf der gesamten Länge zwischen Sattel und Steg schwingend - sowie an den Bündlen gegriffen - und somit verkürzt - angeregt. Ihr Ausschwingen wurde auf einem Pegel-Zeit-Diagramm festgehalten. Aus den aufgezeichneten Abklingkurven der gesamten Saitenklänge lässt sich für jede Saite und jeden Bund die Nachklingzeit bestimmen, innerhalb welcher der Gesamtpegel um eine vorzugebende Differenz abgefallen ist. Als praxismgerechte Pegeldifferenz wurde 30 dB gewählt. In aller Regel beobachtet man, dass die Nachklingzeit mit steigender Bund-Nummer stetig abnimmt; oder anders ausgedrückt: je kürzer der schwingende Teil der Saite ist, desto rascher klingt die Saitenschwingung im Normalfall ab.

Sicherlich beeinflusst die Saite selbst die absolute Größe der Nachklingzeit. Jeder Gitarrist weiß, dass neue Saiten nicht nur anders klingen als alte, sondern meist auch länger nachschwingen. Dieser Einfluss wurde nicht untersucht. Deshalb wurden auch nicht die absoluten Nachklingzeiten, sondern vielmehr deren Relationen ausgewertet. Dabei zeigen sich neben Live Spots, die durch besonders langes Nachklingen charakterisiert sind, ganz deutlich auch Dead Spots. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass eine Saite erkennbar rascher ausschwingt, als dies der Fall ist, wenn sie unter sonst gleichen Bedingungen an einem höheren Bund gegriffen wird. In der vorliegenden Untersuchung konnten Dead Spots nicht nur - wie auch in [12 und 17] beschrieben - bei Elektrobässen, sondern auch bei elektrischen Gitarren nachgewiesen werden. Bei der Analyse des Ausschwingens der einzelnen Teiltöne ist ersichtlich, dass dabei dem Grundton des Saitenklanges die dominierende Rolle zukommt: In aller Regel ist ein Dead Spot dadurch gekennzeichnet, dass die Grundschiwingung besonders rasch abklingt.

Dead Spots haben ihre Ursache darin, dass der Hals des Instruments kein starrer Körper, sondern selbst ein Kontinuumsschwinger ist. Während bei den hier untersuchten Instrumenten der Steg für die Saite ein weitgehend unnachgiebiges Auflager bildet, ist die Saite am oberen Ende unter Umständen durchaus nachgiebig gelagert. Der Hals entfaltet innerhalb des Frequenzbereiches, den die Grundtöne der Saitenklänge umfassen, ein reges "Eigenleben", d.h. bei entsprechender Anregung kann er selbst Schwingungen ausführen. Dieser Effekt prägt sich am stärksten aus, wenn das obere Auflager der Saite mit einem Schwingungsbauch des Halses zusammenfällt. Die mechanische Energie, die in der schwingenden Saite enthalten ist, dient dann zu einem erheblichen Teil dazu, den Hals zum Mitschwingen zu bringen. Dieser Anteil der Energie ist für die Saitenschwingung - und damit für das Nutzsignal, das der Tonabnehmer ins Elektrische überführt - verloren. Der Saitenklang wird unter solchen Umständen weniger lang anhalten, als dies bei einem festen oberen Auflager der Fall wäre.

Jedoch beeinflusst nicht jede Schwingungsform des Halses die Saitenschwingung, d.h. nicht jede Halsschiwingung wirkt sich zwangsläufig auch beschleunigend auf das Abklingen des Saitensignals aus. Vielmehr wird die Saite den Hals nur dann zum Mitschwingen bringen, wenn nicht nur die Frequenz, sondern auch der Ort der Anregung dafür geeignet ist. Liegt das obere Ende der Saite auf

einem Bund, an dem sich der Knoten einer Halsschwingung befindet, so verhält sich der Hals dort starr. Er kann nicht auf die Saite zurückwirken und ihr Energie entziehen; die Saite wird sehr lange nachschwingen. Hat das obere Saitenende dagegen außerhalb eines Schwingungsknotens, d.h. in der Nähe eines Bauches einer Halsschwingung, Kontakt mit dem Hals, bestehen vom Ort her die Voraussetzungen für eine Beeinflussung der Saitenschwingung. Als weitere Voraussetzung muss erfüllt sein, dass eine Schwingungsfrequenz der Saite - im betrachteten Zusammenhang vornehmlich die Grundfrequenz - hinreichend mit einer Eigenfrequenz des Halses übereinstimmt. Treffen beide Voraussetzungen zu, dann wird die Saite den Hals tatsächlich zum Mitschwingen anregen, was auf Kosten der "Lebensdauer" ihrer eigenen Schwingung geht.

Eine Modalanalyse (siehe z.B. [9 bis 12 und 18]) von Korpus und Hals einer Gitarre ist aufwendig und langwierig. Ihre Ergebnisse entfalten sich erst in der Animation ihre volle Aussagekraft. Eine einfachere Messmethode, deren Ergebnisse hinsichtlich der Aufgabenstellung direkter interpretiert werden können, ist daher anzustreben. Die eigenen Untersuchungen haben ergeben, dass hierfür die Messung der mechanischen Admittanz gut geeignet ist. Ein kleiner elektrodynamischer Schwingerreger regt den Hals an denjenigen Stellen, an denen die Saite aufliegen kann, mit einem Rauschsignal an. Ein Impedanzmesskopf misst die anregende Wechselkraft und als Antwort des Halses die Schwingbeschleunigung, aus der durch Integration im Zeitbereich die Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) bestimmt wird. Aus diesen beiden Signalen berechnet ein Zweikanal-FFT-Analysator die mechanische Admittanz.

Es erweist sich als sinnvoll, Frequenzgänge der Admittanz für den Sattel und die interessierenden Bünde in ein gemeinsames Diagramm zu schreiben, in dem sie sich wie ein Gebirge darstellen. Den eigenen Erfahrungen zufolge ist die wesentliche Information in einer Zusammenstellung enthalten, welche die Admittanz am Sattel und an den ersten zwölf Bünden wiedergibt. Zum Vergleich ist zusätzlich auch die Admittanz am Steg, d.h. am unteren Ende der Saite, aufgenommen. In aller Regel erweist sich die Stegadmittanz als klein im Vergleich zur Admittanz am Hals. Damit liegt fest, dass die Ursachen der Dead Spots am oberen Ende der Saite zu suchen sind.

Für jedes der untersuchten Instrumente liegt nun ein Admittanzdiagramm im selben Maßstab vor. Zu dessen leichter Interpretation dienen die beiliegenden transparenten Schablonen. In diesen sind die Grundfrequenzen der Klänge markiert, die von den Saiten am betreffenden Bund erzeugt werden. Man legt die Schablone auf das Admittanzgebirge und erhält somit ein Bild von der Größe der Admittanz, die der Hals für die Saite am jeweiligen Bund darstellt. Erwünscht ist eine möglichst kleine Admittanz für die in der Schablone markierten Stellen und Frequenzen. Je höher die Admittanz an einer Markierung ist, desto nachgiebiger ist der Hals an diesem Bund für die Grundschiwingung der Saite, desto rascher wird diese abklingen, und desto mehr wird sich ein Dead Spot ausprägen. Fällt ein solcher Markierungspunkt gar mit einem Gipfel im Admittanzgebirge zusammen, wird der Grundton extrem rasch abklingen. An solch einem besonders ausgeprägten Dead Spot wird das Nachklingen des Saitenklanges letztlich nicht mehr durch den Grundton, sondern durch höhere Harmonische bestimmt.

Im Kapitel 6 ist für jedes Instrument jeweils ein Admittanzgebirge angegeben. Aus Gründen der Vereinfachung wurde dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass sich der Hals wie ein Biegebalken bewegt. Es liegt nahe, diese Diagramme dadurch zu ermitteln, dass auf der Mittellinie des Griffbretts gemessen wird. Wie sich in Abschnitt 5.3.1 bereits angedeutet hat, ist diese Beschränkung nicht in jedem Fall gerechtfertigt. Zum Abschluss soll abgeschätzt werden, in welchem Maße die Admittanz in lateraler Richtung variieren kann. Fig. 51 zeigt am Beispiel eines Elektrobasses, mit welchen Abweichungen zu rechnen ist, wenn die gleiche Messung an denselben Bünden, jedoch jeweils nach der Seite versetzt durchgeführt wird. Das untere Teildiagramm a entsteht, wenn außerhalb der Mitte

mehr in Richtung der tieferen Saiten gemessen wird. Das mittlere Teildiagramm b entspricht der bisher allgemein geübten Praxis, in der Bundmitte zu messen. Im oberen Teildiagramm c ist der Messort aus der Mitte zu den höheren Saiten hin verschoben.

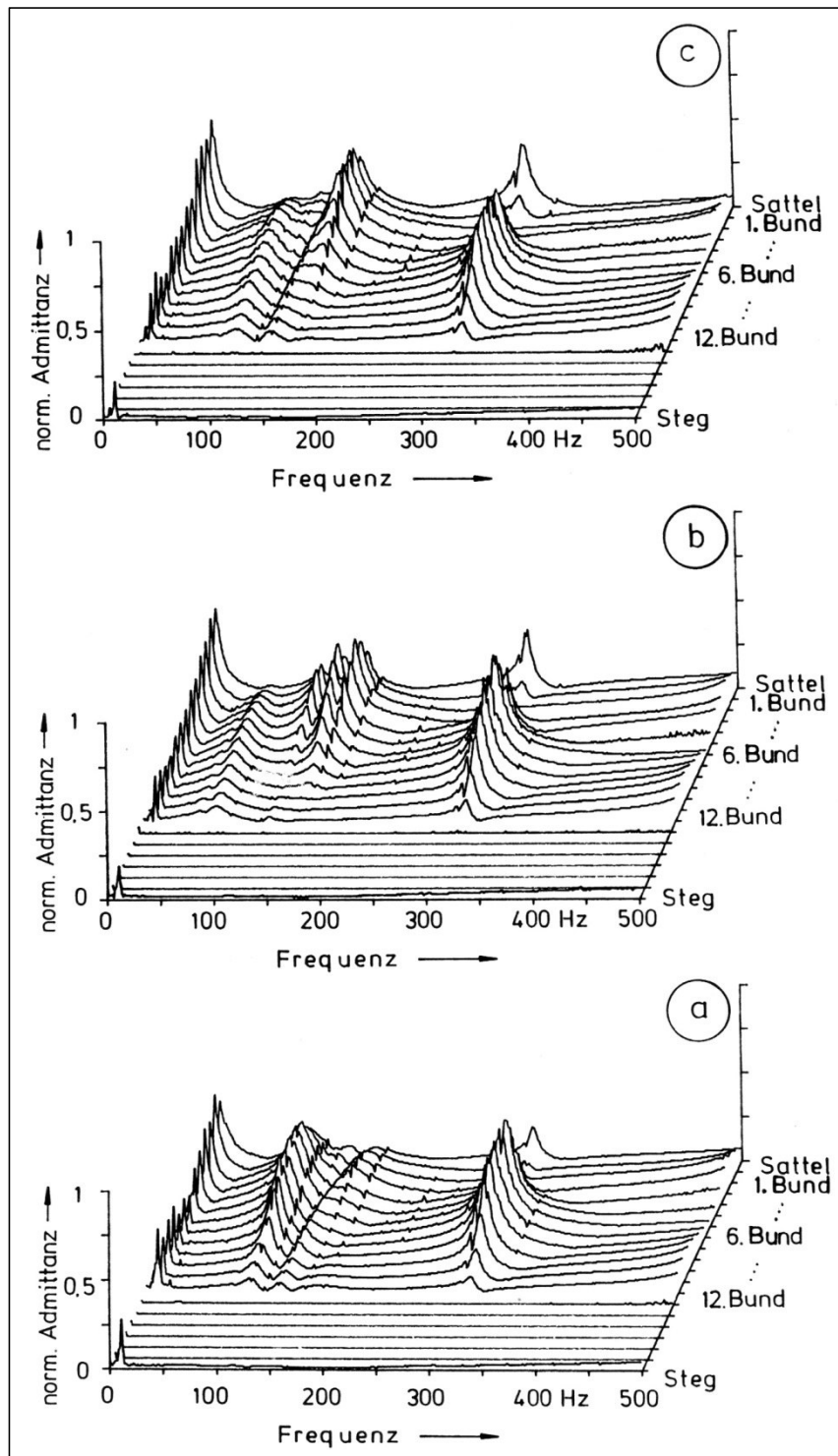


Fig. 51. Normierter Betrag der Admittanz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg. Gemessen wird
 a) zwischen der E- und der A-Saite,
 b) zwischen der A- und der D-Saite,
 c) zwischen der D- und der G-Saite.

Ein Vergleich der Diagramme in Fig. 51 zeigt, dass die Admittanzgebirge oberhalb von etwa 175 Hz praktisch übereinstimmen. Unterhalb davon werden allerdings Unterschiede deutlich. Die vier Höhenrücken, die bei tieferen Frequenzen im Teildiagramm b auftreten, zeigen sich in den anderen beiden Teildiagrammen in der Frequenz etwas verschoben und prägen sich teilweise mehr, teilweise auch weniger aus. Zum Teil verschmelzen sie auch miteinander. Sich den Hals idealisierend als Biegebalken vorzustellen, ist offenbar nicht bei allen Frequenzen ganz zutreffend. Wie bereits die Schwingungsbilder in Fig. 11 erkennen lassen, kann die Torsion des Halses eine zusätzliche Rolle spielen. Die bisher praktizierte Messung auf der Mittellinie des Halses ist dann besonders aussagekräftig, wenn Dead Spots der mittleren Saiten interpretiert werden sollen. Im Hinblick auf detailliertere Betrachtungen sollte auch die Torsion des Halses mit erfasst werden. Für zukünftige Untersuchungen sind folglich auch außermittige Messungen in unmittelbarer Nähe der jeweils betrachteten Saite zu empfehlen.

Eine weitere Problematik ist darin begründet, dass die Lagerung bei den Messungen unterschiedlich ist. So wurde das jeweils untersuchte Instrument bei der Messung der Nachklingzeiten in Spielhaltung vor dem Körper getragen, wobei die linke Hand des Spielers die Saite niederdrückte. Bei der Messung der Admittanz war es dagegen auf einem Steintisch gelagert. Ursprünglich waren die beiden Autoren der übereinstimmenden Meinung, dass der harte Steintisch am besten dazu geeignet wäre, die Lagerungsbedingungen nachzubilden, die ein Instrument an Brust und Bauch der Autoren vorfindet. Im Laufe der Untersuchungen rückten sie unter dem Druck der Versuchsergebnisse jedoch allmählich von dieser Vorstellung ab, die offenbar zu stark idealisiert. Für die hier besprochenen Messungen legten sie immer Schaumstoff zwischen Tisch und Instrument. Frühere Vergleichsmessungen (vgl. Abschnitt 5.3.2) haben erkennen lassen, dass sich im Bereich tieferer Frequenzen unterschiedliche Ergebnisse bereits zeigen können, wenn mehr oder weniger dicker Schaumstoff zwischen Tisch und Korpus gelegt wird. Dieser Befund soll anhand eines Vergleiches der Diagramme von Fig. 52, die allesamt auf denselben Bezugswert normiert sind, noch einmal verifiziert werden.

In Fig. 52 a (unten) ist ein Admittanzgebirge dargestellt, wie es sich ergibt, wenn der Korpus des Instruments direkt auf den Steintisch gelegt wird. Das Resultat im mittleren Teildiagramm b erhält man dagegen, wenn zwei Lagen dünnen Schaumstoffs mit zwei Lagen einer Doppelfolie kombiniert werden, die in Kammern eingeschlossene Luft enthält. Fig. 52 c (oben) gibt Ergebnisse wieder, die sich auf vier Zwischenlagen dünnen Schaumstoffs beziehen; unter derselben Bedingung sind beispielsweise auch die Fig. 39 bis 44 entstanden. Bei höheren Frequenzen stimmen die Gebirge im Wesentlichen überein. Abweichungen werden dagegen im Bereich unterhalb von etwa 150 Hz deutlich. So prägen sich die Höhenzüge zwischen etwa 100 Hz und 140 Hz sehr unterschiedlich aus. Die Admittanz nimmt wesentlich höhere Werte an, wenn auf weiche und dämpfende Zwischenlagen verzichtet wird. Besonders auffällig ist der Einfluss des Zwischenlage auf den ersten Höhenrücken. Legt man die üblichen vier Lagen dünnen Schaumstoffs zwischen Steintisch und Instrument, tritt der erste Höhenrücken bei etwa 60 Hz auf. Wird die Luftkammer-Doppelfolie verwendet, verschiebt sich dieser Höhenrücken um 5 Hz bis 10 Hz nach unten und wird höher sowie steiler. Ruht das Instrument jedoch direkt auf dem Steintisch, deutet sich bei etwa 40 Hz ein flacher Höhenrücken nur noch schwach an. Die unterschiedlichen Zwischenlagen können danach sowohl Feder- wie auch Dämpfungscharakter in jeweils unterschiedlichem Ausmaß haben.

Die Randbedingung, die das Instrument an der Auflage des Korpus vorfindet, wirkt sich somit nachweislich auf das Admittanzgebirge aus. Insbesondere der Bereich der tiefen Frequenzen, der für Elektrobässe von Bedeutung ist, lässt deutliche Einflüsse erkennen. Demnach sind zukünftig vergleichende Messungen notwendig mit dem Ziel, diejenigen Lagerungsbedingungen aufzufinden, die dem Zustand beim Spielen am nächsten kommen.

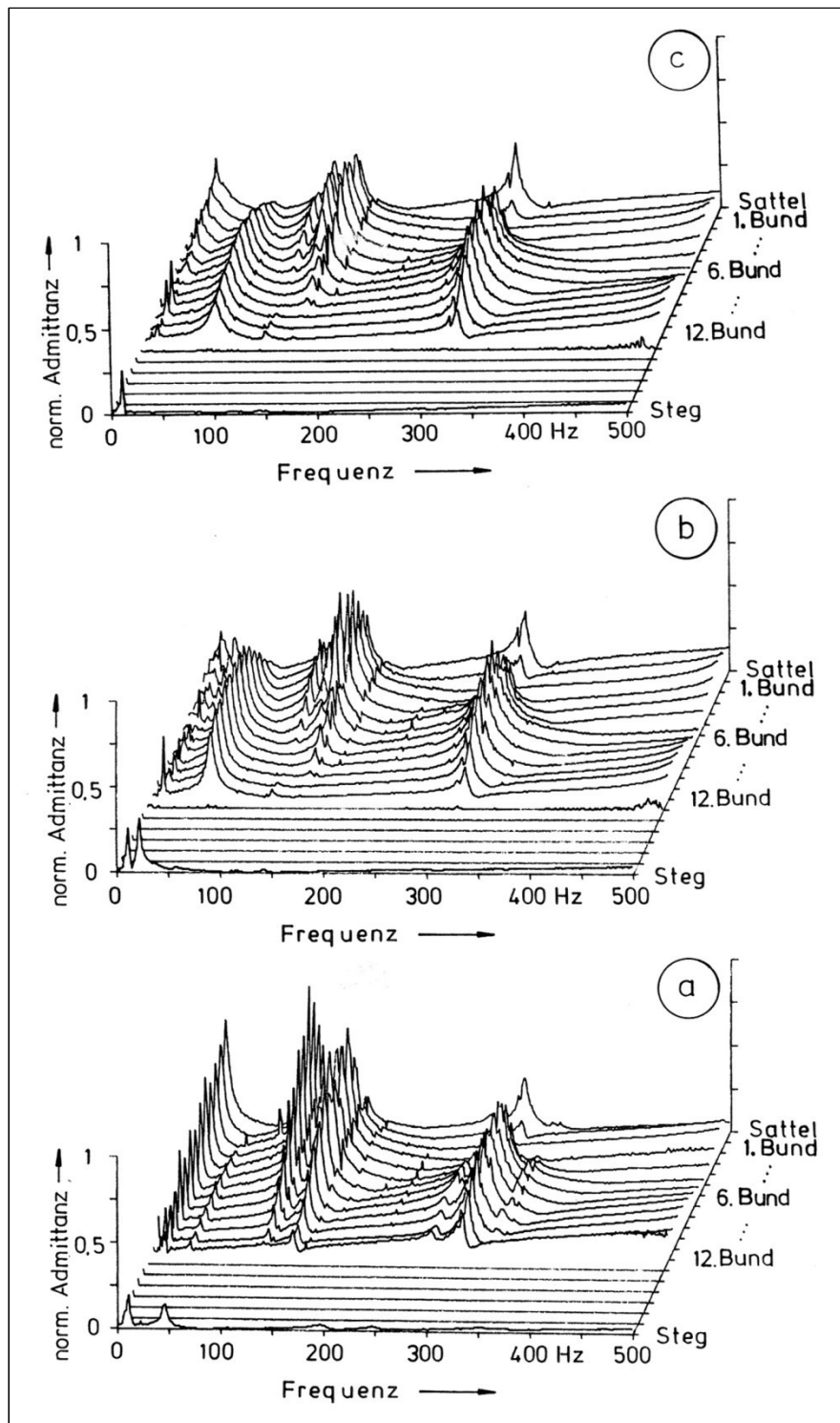


Fig. 52. Normierter Betrag der Admittanz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg.
 a) Der Korpus liegt ohne Zwischenlage auf dem Steintisch.
 b) Der Korpus ruht auf zwei Lagen dünnen Schaumstoffs und zwei Lagen Luftkammer-Doppelfolie.
 c) Der Korpus ruht auf vier Lagen dünnen Schaumstoffs.

Dabei wäre auch zu klären, welchen Einfluss die Hand, mit welcher der Spieler die Saiten greift, auf die Schwingungen des Halses ausübt. Um diesen Effekt abschätzen zu können, wurde eine weitere

orientierende Messung durchgeführt, deren Ergebnis in Fig. 53 dokumentiert ist. Der untersuchte Bass war mit zwischengelegten vier Lagen dünnen Schaumstoffs auf dem Steintisch gelagert. Lässt man den Hals frei schwingen, erhält man das in Fig. 53 b (oben) dargestellte Admittanzgebirge, das bereits von Fig. 39 her bekannt ist. Es ist im selben Maßstab normiert wie das Admittanzgebirge im unteren Teildiagramm a, bei dem eine Hand den Hals jeweils an demjenigen Bund umfasst, an dem gerade gemessen wird. Damit sollen die Verhältnisse nachgebildet werden, die beim Greifen der Saiten vorliegen.

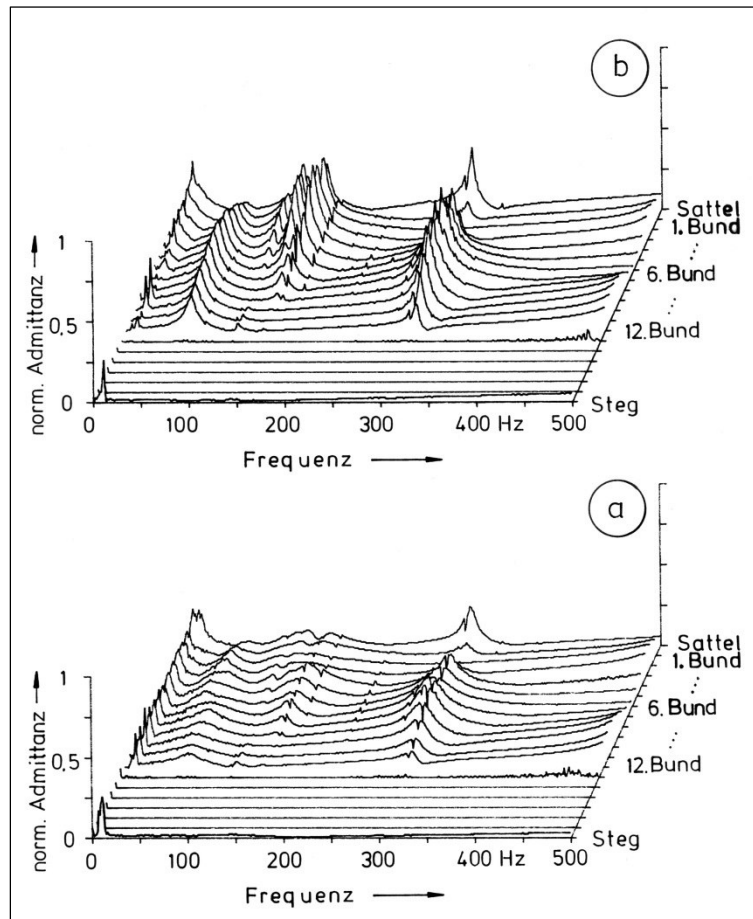


Fig. 53. Normierter Betrag der Admittanz für den Elektrobass Action Bass als Funktion der Frequenz am Sattel, an den ersten zwölf Bünden und am Steg.

- a) Der Korpus ruht auf vier Lagen dünnen Schaumstoffs; eine Hand hält den Hals am jeweiligen Bund.
 b) Der Korpus ruht auf vier Lagen dünnen Schaumstoffs; der Hals kann sich frei bewegen.

In beiden Admittanzgebirgen von Fig. 53 erkennt man dieselbe Charakteristik. Der Vergleich macht deutlich, dass sich im oberen Teildiagramm a (ohne Hand) die Höhenrücken und Bergzüge jedoch wesentlich deutlicher ausprägen als im unteren Teildiagramm b. Eine Verschiebung der Gipfel in Richtung der Frequenzachse wird dabei nicht beobachtet. Offenbar wirkt die Hand, die den Hals umfasst, im Wesentlichen als zusätzliche Dämpfung. Diese Dämpfung verkleinert die Amplituden und vergrößert die Halbwertsbreite der Schwingungen des Halses. Daraus folgt, dass die Messung ohne Hand im Vergleich zum normalen Spielbetrieb in gewisser Hinsicht - nämlich bezüglich der Höhe der Berge im Admittanzgebirge - "übertreibt"; der Hals erscheint nachgiebiger, als er beim Spielen tatsächlich ist. Andererseits "untertreibt" die Messung ohne Hand jedoch auch, und zwar in Bezug auf die Breite der Berge. Die Erhebungen sind im Spielbetrieb breiter, als sie sich in den Admittanz-

gebirgen darstellen, die unter Laborbedingungen ermittelt worden sind. Infolge dieser dämpfungsbedingten Verbreiterung wirken sich Schwingungen des Halses über einen weiteren Frequenzbereich auf Schwingungen der Saite aus, als dies aufgrund der Messungen auf dem Steintisch eigentlich zu erwarten wäre. Damit die Saite den Hals zum Mitschwingen bringen kann, müssen die zugehörigen Schwingungsfrequenzen nicht exakt übereinstimmen. Vielmehr ist eine Anregung bereits dann möglich, wenn die Grundfrequenz der Saite annähernd mit einer der Schwingungsfrequenzen des Halses übereinstimmt.

Dem derzeitigen Erkenntnisstand zufolge hängen die charakteristischen Frequenzen, bei denen der Hals besonders stark mitschwingt, nur sehr wenig davon ab, ob bei der Messung die Hand am Instrument ruht oder nicht. Jedoch ist der Frequenzbereich, innerhalb dessen die Saite den Hals zum Mitschwingen bringen kann, mit greifender Hand größer, als wenn der Hals sich völlig frei bewegen kann.

Damit bleibt festzuhalten:

- Beim Spielen dämpft die Hand, welche die Saiten greift, die Schwingungen des Halses. Dies ist bei der Messung der Admittanz bisher nicht berücksichtigt worden.
- Der Korpus findet höchstwahrscheinlich am Körper des Spielers etwas andersartige Randbedingungen als bei der Messung vor.
- Wegen der Beschränkung, nur auf der Mittellinie des Halses zu messen, spiegeln die Messergebnisse Biegeschwingungen des Halses, nicht jedoch Torsionschwingungen wider.

Die bisher durchgeführten Messungen sind demzufolge weder ganz wirklichkeitsgetreu, noch ganz vollständig. Trotzdem zeigen die Messergebnisse jedoch bereits jetzt eine so weitgehende Koinzidenz, dass ein eindeutiger Zusammenhang nachgewiesen ist: Live Spots sind mit einer sehr kleinen, Dead Spots dagegen mit einer großen Admittanz des Halses verknüpft.

Im derzeitigen Stadium ergeben sich bei Lagerung der Instrumente auf dem Messtisch, wie sie für die Ermittlung der Halsadmittanz gewählt wurde, etwas andere Resultate als für normale Spielhaltung, in der die Nachklingzeiten bestimmt wurden. Allein aus diesem Grund kann auch keine hundertprozentige Übereinstimmung der Resultate aus den verschiedenen vorliegenden Experimenten in jedem Detail erwartet werden. Um die Messbedingungen wirklichkeitsnäher zu gestalten, wird deshalb in nächster Zukunft zu untersuchen sein,

- ob entweder eine direkte Messung der Admittanz auch in Spielhaltung möglich ist, oder
- ob und in welchem Maße es gelingt, den Einfluss der Hand und den Kontakt zwischen Instrument und Körper des Spielers auf dem Messtisch ausreichend nachzubilden.

Darüber hinaus sollten die Schwingungen des Halses vollständig gemessen werden. Dazu ist die Admittanz zukünftig nicht nur längs der Mittellinie des Halses, sondern auch bei den tiefen und den hohen Saiten zu bestimmen.

Wenn die Bedingungen der Labormessungen denen beim realen Spielbetrieb noch besser angepasst sein werden und wenn darüber hinaus pro Instrument nicht nur ein Admittanzgebirge gemessen wird, sondern im Extremfall für jede Saite ein eigenes Diagramm vorliegt, wird die Erfassung des Schwingungsverhaltens wirklichkeitsnah und vollständig sein. Damit steht dann ein wirkungsvolles Werkzeug zur Verfügung, mit dem elektrische Gitarren und Bassgitarren hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens soweit optimiert werden können, dass Dead Spots eines Tages keine Rolle mehr spielen werden.

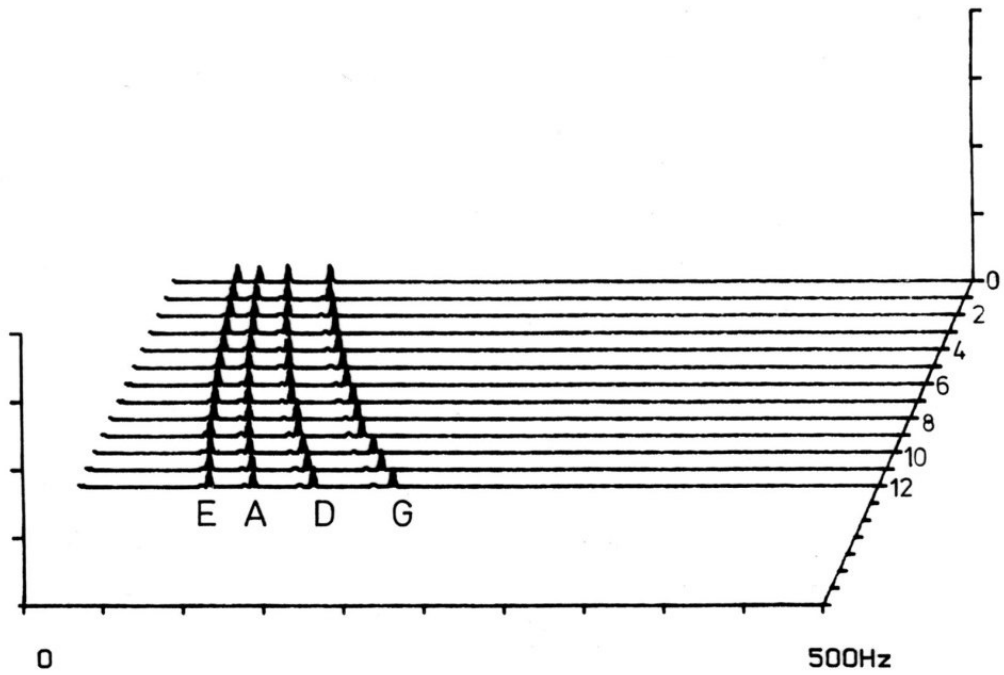
LITERATUR

- [1] Rieländer, M.M. (Herausgeber), Reallexikon der Akustik. E. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1982.
- [2] Fletcher, N.H. und Rossing, T.D., The physics of musical instruments. Insbes.: Kapitel 9: Guitars and lutes. Springer, New York 1991.
- [3] Meinel, E., Elektrogitarren. E. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1987.
- [4] May, U., Elektrische Saiteninstrumente in der populären Musik. Dissertation Universität Münster, Münster 1983.
- [5] Chladni, E.F.F., Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.
- [6] Meyer, J., Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen. E. Bochinsky, Frankfurt a. M. 1985.
- [7] Jansson, E.V., A study of acoustical and hologram interferometric measurements of top plate vibrations of a guitar. *Acustica* 25 (1971), 95 - 100.
- [8] Jovicic, O. und Jovicic, J., Le rôle des barres de raidissement de la table de résonance de la guitare: II. Leur effet sur les nodales de la table (étude holographique. *Acustica* 38 (1977), 180 - 185.
- [9] Kreuzig, S., Modalanalyse der Schwingungsformen von Gitarrenoberflächen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1994.
- [10] Fleischer, H., Modalanalyse und Schallfeldberechnung an Gitarren. Forschungsbericht 02/95 aus dem Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1995.
- [11] Ziegenhals, G., Optimierung von Gitarren mittels Modalanalyse. Bericht aus dem Institut für Musikinstrumentenbau Zwota, November 95, Zwota 1995.
- [12] Wogram, K., Schwingungsuntersuchungen an Musikinstrumenten. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '94), DPG-GmbH, Bad Honnef 1994, 53 - 64.
- [13] Fender Musical Instruments fine tunes guitar design. Artikel in *MSC World VI* (1996), Heft 1.
- [14] Ziegenhals, G., Objektive Beurteilung von E-Gitarren. Unveröffentlicht.
- [15] Kircher, A., Neue Hall- und Thon-Kunst. Ins Deutsche übersetzt von Agatho Carione. Arnold Heysen, Ellwangen 1684. Reprint Th. Schäfer, Hannover 1983.
- [16] Jansson, E. und Meinel, E., Zum Einfluss des Halses auf Schwingungen des Gitarrenkorpus. *Das Musikinstrument* 41 (1992), Heft 8, 48 -52.
- [17] Heise, U., Untersuchungen zur Ursache von Dead Spots an Bassgitarren. *Das Musikinstrument* 42 (1993), Heft 6/7, 112 - 115.
- [18] Garrelfs, M. und Schneiders, C., Schwingungsformen elektrischer Bassgitarren. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, Neubiberg 1995.
- [19] Jovicic, J., Analyse harmonique des tons produits de differentes manieres d'excitation de la corde de la guitare. *Acustica* 19 (1967/68), 103 - 107.
- [20] Schubert, P., Zum Schwingungs- und Abstrahlverhalten von Zupfinstrumenten. In: Beiheft 7 zu den Studien zur Aufführungspraxis und Interpretation der Musik des 18. Jahrhunderts, Michaelstein 1987, 8 - 23.
- [21] Fricke, J., Untersuchungen zum Anreißvorgang. In: Beiheft 7 zu den Studien zur Aufführungspraxis und Interpretation der Musik des 18. Jahrhunderts, Michaelstein 1987, 24 - 32.
- [22] de Dayans, H.G. und Behar, A., The quality of strings for guitars: An experimental study. *J. Sound and Vibr.* 64 (1979), Heft 3, 421 - 431 mit Comments von Hanson, R.J., *J. Sound and Vibr.* 64 (1983), Heft 2, 283 - 285.

- [23] Chaigne, A., Evaluation subjective des qualites sonores des cordes de guitare. *Acustica* 62 (1986), 16 - 29.
- [24] Wolf, D. und Müller, H., Normal vibration modes of stiff strings. *J. Acoust. Soc. Amer.* 44 (1968), Heft 4, 1093 - 1097.
- [25] Gough, C.E., The theory of string resonances on musical instruments. *Acustica* 49 (1981), 124 - 141.
- [26] Lieber, E., Vibrations of stretched strings. Modern theories. *Acustica - acta acustica* 82 (1996), Suppl. I, 187.
- [27] Pfaffelhuber, K., Das dynamische Verhalten der Geige an der Anstreichstelle und sein Einfluss auf das Klangsignal. Dissertation TU München, München 1993.

BASS FRETS No 0...12

H. Fleischer und T. Zwicker; DEAD SPOTS: Schablone für Elektrobaß



GUITAR FRETS No 0...12

H. Fleischer und T. Zwicker; DEAD SPOTS: Schablone für Gitarre

