

# **SCHALL, SCHWINGUNG UND STEGKONDUKTANZ DES CELLOS**

von

**Helmut Fleischer**

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

**Heft 2/10 der Reihe**

**Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**

**Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl**

**ISSN 1430-936X**



**Herausgeber:**

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

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

**Postanschrift:**

LRT 4 UniBwM  
85577 Neubiberg  
Deutschland

---

Fleischer, Helmut:  
Schall, Schwingung und Stegkonduktanz des Cellos  
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/10  
Neubiberg 2010  
**ISSN 1430-936X**

**Postanschrift des Verfassers:**

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

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



# SCHALL, SCHWINGUNG UND STEGKONDUKTANZ DES CELLOS

## **Zusammenfassung**

*Experimentelles Material über ein Cello, das mit zwei unterschiedlichen Stegen ausgerüstet werden konnte, ist zusammengetragen. Das akustische Ausgangssignal, das Eingangsverhalten am Steg und die Schwingungen des Korpus wurden untersucht.*

*In einem reflexionsarmen Raum spielte eine Person das Cello. Mit jedem Steg wurden drei aneinander anschließende C-Dur-Tonleitern auf DAT aufgenommen. Im ersten Schritt wurden die Schallsignale mittels des Programms VIPER hörbezogen analysiert, um einen Eindruck von den relevanten Spektralkomponenten zu erhalten. Wegen fehlender Übereinstimmung bei der Intonation erwies sich eine Unterscheidung zwischen den beiden Stegen als nicht möglich. Trotzdem konnte wertvolle Information über den hörrelevanten Gehalt der Schallsignale gewonnen werden. Der nächste Schritt bestand in einer FFT-Analyse derselben Signale. Eine Übersicht über die spektrale Charakteristik des Instruments wurde dadurch erzielt, dass die ersten sieben Noten in der Oktave C bis H analysiert und die Ergebnisse in ein Diagramm geschrieben wurden. In einem weiteren Experiment wurde der mechanische Eingang eines jeden Steges durch die Punktkonduktanz an den vier Saiten gekennzeichnet. Zum Abschluss wurden die mechanischen Schwingungen der Vorderseite des Instruments mittels Laser-Scanning-Vibrometrie untersucht. Für den Bereich tiefer Frequenzen bis 800 Hz ... 1000 Hz erwiesen sich in allen Messungen die Abweichungen, die auf die unterschiedlichen Stege zurückzuführen waren, als vernachlässigbar.*

*Die verschiedenen Ergebnisse wurden für diese tiefen Frequenzen miteinander verknüpft. Vergleiche zwischen den akustischen FFT-Spektren und der Stegkonduktanz zeigten hohe Übereinstimmung. In der Mehrzahl der Fälle fielen die Spitzen der FFT-Spektren mit Maxima der Konduktanz zusammen. Bemerkenswerterweise gibt es eine auffällige Diskrepanz um die Note a (220 Hz), die darauf hindeutet, dass die Saite den Korpus eher über den Hals als über den Steg zum Schwingen anregt. Der Vergleich der Korpuschwingungen mit der Stegkonduktanz lieferte ähnliche Ergebnisse: Jede Konduktanz-Spitze ist mit einer Schwingung der Vorderseite des Instruments verknüpft. Umgekehrt gibt es aber auch Schwingungen, die sich nicht in der Stegkonduktanz zeigen. Wiederum wurde eine auffällige Ausnahme in der Nähe von 220 Hz gefunden, wo das Instrument offensichtlich nicht über den Steg, sondern über den Hals angeregt wird. Abschließend werden einige Aspekte der Spielbarkeit, vor allem in Hinblick auf den Wolfston, diskutiert.*

*In der Gesamtschau lässt sich aussagen, dass die Konduktanz, insbesondere wie sie am Steg parallel zur Decke gemessen wird, weitgehende und tiefe Einsicht in das Verhalten eines Streichinstruments liefert. Jedoch hat die Saite Kontakt mit dem Instrument an zwei Punkten. Es gibt starke Hinweise darauf, dass der Steg der wichtigere Ort für die Anregung von Korpuschwingungen ist. Es sollte jedoch nicht aus den Augen verloren werden, dass es noch einen anderen Kontaktpunkt gibt.*

# SOUND, VIBRATION AND BRIDGE CONDUCTANCE OF THE CELLO

## *Summary*

*Experimental material concerning a cello, equipped alternatively with one of two different bridges, is compiled. The acoustic output signal, the input behaviour at the bridge, and the vibrations of the body were investigated.*

*In an anechoic chamber, a person played the cello. Using each bridge, three subsequent C major scales were recorded on DAT. In the first step, the acoustic signals were analyzed by means of the aurally-related software VIPER to get an impression of the relevant spectral components. Due to intonation mismatch, discrimination between the two bridges proved as not possible. Nevertheless, valuable information on the auditory content of the acoustic signals could be obtained. The next step consisted in an FFT analysis of the same signals. An overview on the spectral characteristic of the instrument was gained by analyzing the first seven notes in the octave C through H and plotting the results in one diagram. In a further experiment, the mechanical input of each bridge was characterized by the driving point conductance at the four strings. Finally, the mechanical vibrations of the front of the instrument were investigated using Laser Scanning Vibrometry. For the low frequency range up to 800 Hz ... 1000 Hz, the deviations due to the different bridges proved as negligible in all measurements.*

*The various results were interlooped for those low frequencies. Comparisons of the acoustic FFT spectra to the bridge conductance revealed high conformity. In the majority of cases, the peaks of the FFT spectra corresponded to maxima of the conductance. Remarkably, there is a striking discrepancy around the note a (220 Hz) indicating that the string excites the body to vibrate via the neck rather than via the bridge. The comparison of the body vibrations to the bridge conductance yielded similar results: Each conductance peak is related to a vibration of the instrument's front. Vice versa, there are vibrations which do not show up in the neck conductance. Again a distinctive exception was found around 220 Hz, where the instrument is obviously excited not via the bridge but via the neck. Finally, some few aspects of playability, particularly in terms of the wolf tone, are discussed.*

*In summary, the conductance, especially as measured at the bridge in parallel to the top plate, yields wide and deep insight into the behaviour of a stringed instrument. However, the string is in contact to the instrument at two points. There is strong evidence that the bridge is the more important location for the excitation of body vibrations. It should be kept in mind, however, that there is still another contact point.*

# INHALT

## VORWORT DES VERFASSERS

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MESSUNGEN AM CELLO .....</b>	<b>3</b>
2.1. Schwingungen .....	3
2.2. Konduktanz .....	5
2.3. Schallsignal .....	7
2.3.1. Gespielte Tonleitern .....	7
2.3.2. FFT-Analyse.....	8
2.3.3. Gehörbezogene Analyse.....	8
2.4. Zusammenfassende Bemerkung.....	10
<b>3. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE DER SCHALLSIGNALS.....</b>	<b>11</b>
3.1. Tonleitern, gespielt mit dem neuartigen Premio-Steg.....	11
3.1.1. Auswahl der untersuchten Klänge.....	11
3.1.2. Noten der zweiten Oktave .....	15
3.1.3. Noten der dritten Oktave .....	17
3.1.4. Noten der vierten Oktave .....	19
3.2. Vergleiche zwischen den beiden Stegen .....	21
3.3. Zusammenfassende Bemerkung.....	27
<b>4. UNTERSUCHUNG DER SCHALLSIGNALS MITTELS FOURIER-TRANSFORMATION .....</b>	<b>29</b>
4.1. Grundfrequenzen der aufgenommenen Klänge.....	29
4.2. Schallsignale der leer gespielten Saiten .....	30
4.2.1. Der Premio-Steg.....	30
4.2.2. Der traditionelle Steg .....	32
4.2.3. Unterschiede und Gemeinsamkeiten .....	33
4.3. Summarische Auswertung mehrerer Klänge.....	33
4.3.1. Die vier leer gespielten Saiten.....	33
4.3.2. Aufsteigende C-Dur-Tonleiter .....	34
4.4. Auswertung von sieben Klängen der zweiten Oktave .....	37
4.4.1. Schalldruck-Frequenz-Spektren .....	37
4.4.2. Schallpegel-Frequenz-Spektren .....	39
4.5. Zusammenfassende Bemerkung.....	42
<b>5. KONDUKTANZ AM STEG .....</b>	<b>43</b>
5.1. Ergebnisse von Messungen an den beiden Stegen .....	43
5.1.1. Konduktanz am Auflagepunkt der C-Saite .....	44
5.1.2. Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite .....	45
5.1.3. Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite .....	46

5.1.4.	Konduktanz am Auflagepunkt der a-Saite .....	47
5.2.	Unterschiede und Gemeinsamkeiten .....	48
5.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	49
<b>6.</b>	<b>STEGKONDUKTANZ UND SCHALLSPEKTRUM .....</b>	<b>50</b>
6.1.	Vergleiche für Frequenzen bis 1000 Hz.....	50
6.1.1.	Sämtliche Noten, gespielt auf allen Saiten .....	51
6.1.2.	Diskantnoten, gespielt auf der a-Saite.....	53
6.2.	Bewegung des Instrumentenkörpers bei tiefen Frequenzen.....	53
6.2.1.	Cello mit traditionellem Steg .....	53
6.2.2.	Cello mit Premio-Steg .....	58
6.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	60
<b>7.</b>	<b>KONDUKTANZ UND KORPUSSCHWINGUNGEN .....</b>	<b>61</b>
7.1.	Maxima der Stegkonduktanz und zugehörige Schwingungen .....	61
7.2.	Schwingungen, die sich in der Stegkonduktanz widerspiegeln .....	65
7.3.	Schwingungen, die sich nicht in der Stegkonduktanz widerspiegeln .....	70
7.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	72
<b>8.</b>	<b>KONDUKTANZ UND ASPEKTE DER SPIELBARKEIT .....</b>	<b>73</b>
8.1.	Stegkonduktanz und Anregung des Korpus .....	73
8.2.	Der Wolfston .....	75
8.2.1.	Phänomen und Gegenmaßnahmen .....	75
8.2.2.	Zusammenhang mit der gemessenen Stegkonduktanz.....	76
8.2.3.	Theoretische Abschätzung .....	77
8.2.4.	Mögliche zusätzliche Ursachen.....	77
8.3.	Einige weitere Aspekte.....	80
8.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	81
<b>9.</b>	<b>ABSCHLIESSENDE DISKUSSION .....</b>	<b>82</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>90</b>

## VORWORT

Vor Ihnen liegt der 24. Band der Reihe „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“, die Hugo Fastl von der Technischen Universität München und der Autor seit dem Jahr 1996 gemeinsam herausgeben. Nach menschlichem Ermessen wird er der letzte sein. In den vergangenen fünfzehn Jahren haben verschiedene Autoren über ihre Untersuchungen auf dem Gebiet der Musikalischen Akustik berichtet. Physikalische und psychoakustische Aspekte von so unterschiedlichen Instrumenten wie Elektrobass, Gong, Tabla oder – wie im vorliegenden Band – Violoncello sind behandelt worden.

Die wissenschaftliche Beschäftigung damit, wie Musikinstrumente funktionieren und wie ihre Klänge wahrgenommen und empfunden werden, verspricht keine finanziellen Reichtümer. Der Musikinstrumentenbau im deutschsprachigen Raum ist handwerklich, höchstens mittelständisch geprägt. Der Markt ist sehr überschaubar. Namhafte Etats für Forschung und Entwicklung, wie sie in der Raumfahrttechnik oder im Automobilbau zur Verfügung stehen, gibt es nicht. Warum auch? Schließlich weiß man ja größtenteils seit vielen Jahrhunderten, wie ein Instrument zu bauen ist.

Die Herstellung eines Instruments ist arbeitsintensiv. Arbeitszeit und Arbeitskraft sind hierzulande teuer. Die Gewinnspannen sind vergleichsweise gering. Vom Musikinstrumentenmacher wird daher ein gerüttelt Maß an Idealismus und Liebe zu seinem Beruf erwartet. Von einem Leben in Reichtum braucht er nicht zu träumen. Dies gilt in ähnlichem Maße für den Wissenschaftler, der sich mit der Physik der Musikinstrumente beschäftigt. Was kann es also für Gründe geben, trotzdem Musikalische Akustik zu betreiben?

Es sind mehrere. Die Kenntnisse des Instrumentenmachers sind Handwerkswissen. Dieses kann schnell veralten, wenn neue Fertigungsverfahren eingeführt werden müssen, um Kosten zu sparen, wenn das für Xylophon-Stäbe bisher eingesetzte Tropenholz nicht mehr zur Verfügung steht, wenn Elfenbein für Klaviertasten nicht mehr erhältlich ist usw. Auch entstehen heute noch neue Instrumententypen. Das letzte Jahrhundert hat die *Steel Drum* und die elektrische Gitarre hervorgebracht. Dann kann es sinnvoll und notwendig sein, physikalische Hintergründe und Abläufe zu erfassen. Außerdem gibt es erfreulicherweise immer wieder Handwerkskünstler, die den Wissenstand ihrer Zunft erweitern wollen. Im Gegensatz zu früher, als *Trial and Error* die übliche Methode war, stehen heutzutage Verfahren der Messtechnik und Computersimulation zur Verfügung, die man dazu nutzen kann, ein Ziel sehr viel schneller und direkter zu erreichen.

Die Unterstützung von Instrumentenmachern ist jedoch bei Weitem nicht der einzige Beweggrund, sich damit zu befassen, wie ein Musikinstrument den Willen des Komponisten über den Musiker in die Hörempfindung umsetzt. Beispielsweise stellt eine Geige ein Wunder an Leichtbau dar. Der Ingenieur kann in ihr das Ergebnis Jahrhunderte langer Evolution in Hinsicht auf Stabilität und Schwingfreudigkeit bei möglichst geringer Masse erkennen. Sie wiegt kein Pfund, hält den Zug von vier straff gespannten Saiten aus und ist in der Lage, ohne Verstärkung in einem Konzertsaal mehrere Tausend Zuhörer mit Schall zu versorgen. Zu untersuchen, wie diese konträren Zielsetzungen erreicht worden sind, ist spannend, und moderne Mess- und Rechenverfahren auf solch ein Instrument anzuwenden, macht einfach Freude.

München, im März 2010

Helmut Fleischer



# 1. EINLEITUNG



*Abb. 1.1. Cello der Firma Goldfuss.*

Das Violoncello, dessen Foto Abb. 1 wiedergibt, ist mit einem Zeitaufwand von 800 Stunden handwerklich gefertigt worden. Vor einiger Zeit hatte die Geigenbauwerkstatt Goldfuss aus Regensburg dieses hochwertige Instrument dem Institut für Mechanik für eine kurze Spanne überlassen. Damit hatte sich die Gelegenheit ergeben, verschiedenartige Messungen vorzunehmen. Über die Schwingungen des Instrumentenkörpers, die dabei untersucht worden

waren, ist im Band 2/09 dieser Reihe (Fleischer 2009a) berichtet worden. Thema des Bandes 3/09 (Fleischer 2009b) war die komplexe Admittanz, gemessen an zwei unterschiedlichen Stegen. Der eine Steg (links in Abb. 1.2) ist von traditioneller Bauart. Der andere (rechts in Abb. 1.2) stellt eine patentierte Neuentwicklung der Firma Goldfuss dar, die unter der Bezeichnung Premio vertrieben wird.

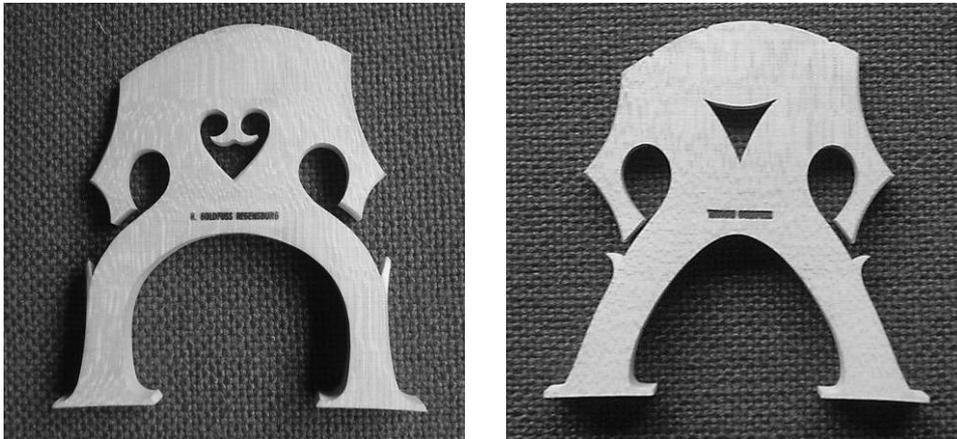


Abb. 1.2. Die beiden Stege; links: traditionell; rechts: Premio (neuartig).

Anlässlich eines Aufenthaltes von zwei Meistern aus der Werkstatt Goldfuss war es möglich, im reflexionsarmen Raum des Instituts Schallaufnahmen anzufertigen. Dabei war wechselseitig der alte oder der neue Steg in das Instrument eingesetzt. Jarczyk hat im Jahr 2007 damit begonnen, im Rahmen einer Studienarbeit diese Schalle gehörgerecht zu analysieren. Unter Einbindung dieser ersten Untersuchungen wird im vorliegenden Band versucht, Beziehungen zwischen Schallsignal, Stegadmittanz und Schwingung des Instrumentenkörpers aufzuspüren und zu interpretieren.

Das Cello gehört zur Instrumentenfamilie der Chordophone (Hornbostel und Sachs 1914), Unterabteilung Streichinstrumente. Bei diesen Instrumenten sind die Funktionen der Erzeugung des musikalischen Signals und seiner Umwandlung in Luftschall getrennt. Die gestrichene Saite führt erzwungene Schwingungen aus und wirkt somit als Signalgenerator. Sie ist so gut wie nicht in der Lage, selbst Schall abzustrahlen. Diese Aufgabe übernimmt der Korpus. Er wird über die beiden Auflagepunkte der Saite zum Mitschwingen gebracht. Hierbei wird allgemein dem Steg eine größere Bedeutung zugemessen als dem Hals. Ob dies in vollem Umfang zutrifft, wird im vorliegenden Beitrag untersucht.

Zunächst wird das Schallsignal in seine Teiltöne zerlegt. Mit Hilfe einer gehörbezogenen Analyse werden die informationstragenden Anteile extrahiert (siehe Kapitel 2 und 3). Möglicherweise lassen sich damit Unterschiede aufspüren, die auf den jeweils verwendeten Steg zurückzuführen sind. An die „gehörliche“ schließt sich eine „objektive“ Analyse (Kapitel 4) an. Sie soll Aufschluss darüber geben, bei welchen Frequenzen das Instrument Schall abzugeben in der Lage ist und bei welchen nicht. Neben diesem akustischen enthält der Bericht auch einen schwingungstechnischen Teil. Im Kapitel 5 wird der Realteil der Admittanz, die Konduktanz, am Auflagepunkt der Saiten auf dem Steg untersucht. Die Ergebnisse werden im Kapitel 6 den Schallspektren gegenüber gestellt. Danach werden im Kapitel 7 die Maxima der Stegkonduktanz mit den Schwingungen des Korpus verknüpft. Schließlich werden im Kapitel 8 noch bestimmte Aspekte der Spielbarkeit untersucht.

## 2. MESSUNGEN AM CELLO

Am Cello und mit dem Cello wurden verschiedenartige experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Prinzip, Aufbau und Durchführung der jeweiligen Messung werden im Folgenden näher erläutert.

### 2.1. Schwingungen

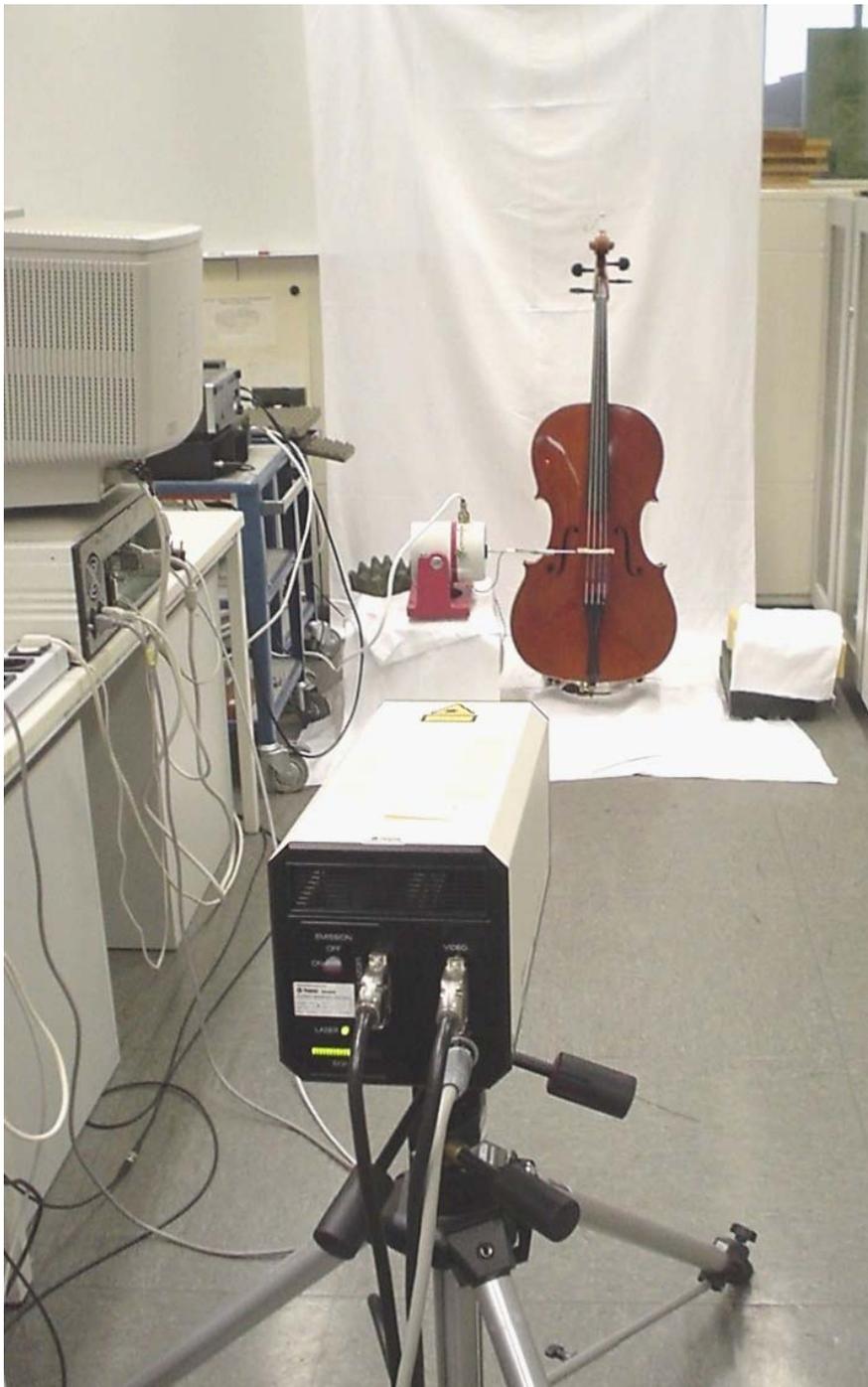


Abb. 2.1. Schwingungsmessung am Cello mit dem Laser-Vibrometer.

Im Band 2/2009 der Reihe „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ (Fleischer 2009a) ist ausführlich beschrieben, wie die Schwingungen der Ober- bzw. Vorderseite des Instruments gemessen wurden. Dabei interessierten primär Biegeschwingungen, die zur Abstrahlung von Schall führen. Sie wurden mit dem institutseigenen Scanning-Vibrometer, hergestellt und geliefert von der Firma Polytec, gemessen. In Abb. 2.1 ist der wesentliche Teil des Versuchsaufbaus dargestellt. Im Hintergrund steht das Cello in einem Instrumentenständer, wie er im Handel erhältlich ist. Links daneben ist der elektrodynamische Schwingerreger zu erkennen, der über einen Ausleger den Steg von der Seite her zum Schwingen bringt. Vorn im Bild sieht man den Messkopf des Vibrometers, der den Laser, die Galvo-Spiegel für die gezielte Ablenkung des Laserstrahls sowie die Videokamera enthält.

Der Messkopf ist zentraler Bestandteil des computergesteuerten Vibrometer-Systems der Firma Polytec (PSV). Ein Laserstrahl wird auf Punkte eines Messgitters gelenkt, das der Versuchsleiter anhand eines Videobildes vorgegeben und auf dem Untersuchungsobjekt platziert hat. Das Gitter umfasste mehr als 600 Messpunkte. Aus der Dopplerverschiebung der Frequenz des reflektierten gegenüber dem originalen Laserlicht kann auf die Schwinggeschwindigkeit der Oberfläche geschlossen werden, ohne die Oberfläche berühren zu müssen. Auf diese Weise erhält man Aufschluss über diejenige Komponente der Schwinggeschwindigkeit, welche dieselbe Richtung wie der Laserstrahl hat. Da Decke, Kopf und Griffbrett des Cellos gekrümmt sind, wurde nicht immer ganz exakt, aber doch weitgehend die wandnormale Komponente der Bewegung erfasst.

Das Cello wurde mit einem elektrodynamischen Schwingerreger LDS V404 in Bewegung versetzt. Um die Anregung des Cellos über den Bogen hinsichtlich der Richtung nachzubilden, war der Schwingerreger parallel zur Decke orientiert und griff über ein Verlängerungsstück am Steg an. Die Erregerkraft wurde mit einem Kraftaufnehmer B&K 8203 gemessen, der unmittelbar am Steg positioniert war. Angesteuert wurde der Schwingerreger über einen Verstärker mit einem Pseudo-Rauschsignal. Dieses stammte aus dem PSV-Mess-System und enthielt alle relevanten Spektralkomponenten bis 800 Hz.

Aus der Eingangsgröße (der Kraft am Steg) und der Ausgangsgröße (der Schwinggeschwindigkeit am jeweiligen Messpunkt) wurde mittels *Fast Fourier Transformation* (FFT) für jeden Punkt als Übertragungsfunktion eine Transfer-Admittanz bestimmt. Durch Mittelung sämtlicher Punkt-Übertragungsfunktionen ergab sich eine Gesamt-Übertragungsfunktion. Abb. 2.2 zeigt ein Beispiel für das Cello mit dem traditionellen Steg.

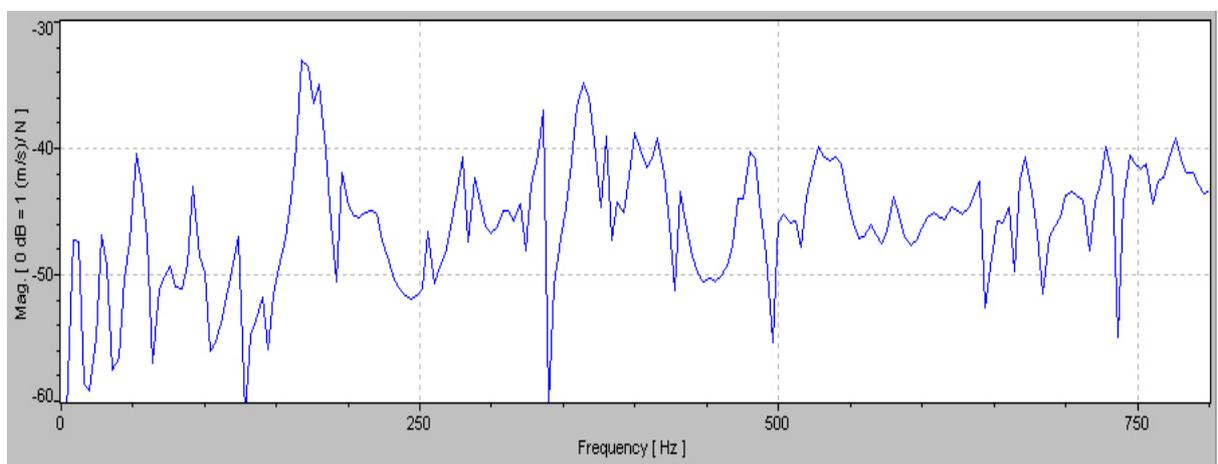


Abb. 2.2. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion.

Die Maxima können als Indikatoren für Eigenschwingungen angesehen werden. Zugehörige Bewegungsmuster, die man für die ausgewählten „charakteristischen Frequenzen“ erhält, wurden auf unterschiedliche Weise visualisiert. Sie werden als „charakteristische Betriebschwingungsformen“, manchmal auch ohne das Adjektiv, bezeichnet. Sie stellen nicht *a priori* Eigenmoden im engeren Sinne dar, wie sie sich als Resultat einer Modalanalyse ergeben. Es kann jedoch angenommen werden, dass im günstigen Falle Eigenmoden den charakteristischen Betriebschwingungsformen weitgehend gleich sind. Am Beispiel einer Geige konnte nachgewiesen werden (Fleischer 2009a und 2010a), dass die Eigenformen in aller Regel eine Untermenge der charakteristischen Betriebschwingungsformen darstellen. Nicht jede charakteristische Betriebschwingung ist eine Eigenmode, aber praktisch jede Eigenmode findet sich als charakteristische Betriebschwingung wieder.

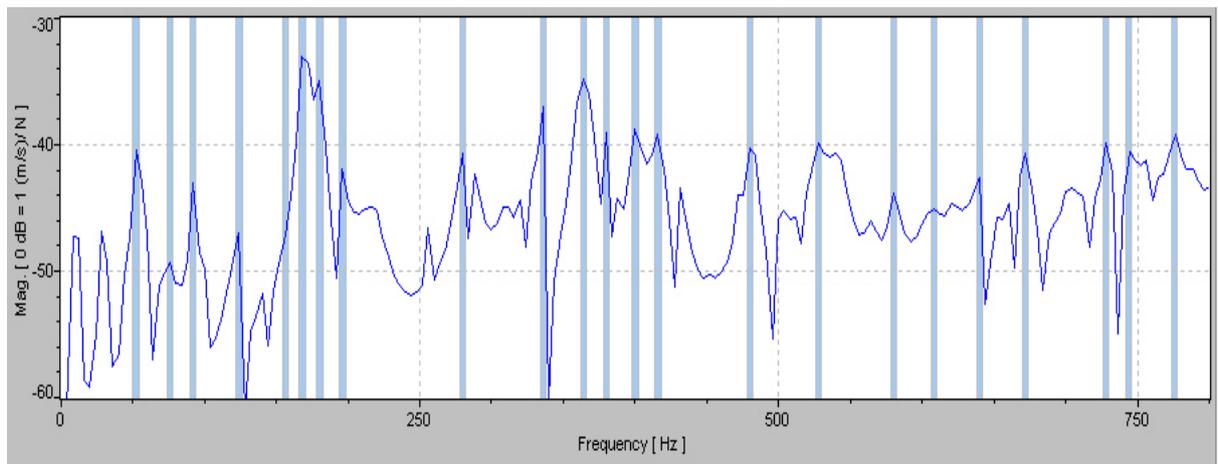


Abb. 2.3. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion; die Frequenzen, für welche die Betriebschwingungsformen dargestellt werden sollen, sind markiert.

Die Abb. 2.2 und 2.3 geben die Gesamt-Übertragungsfunktion ohne bzw. mit den Bändern wieder, bei denen die Betriebschwingungsformen dargestellt werden sollten. Bei der Messung wurde neben der Lagerung des Instruments (*in situ* bzw. in einem Gitarrenständer ruhend) auch die Richtung (normal bzw. tangential) variiert, in welcher der Steg angeregt wurde. Fleischer (2009a) hat zahlreiche Ergebnisse von Messungen mit den beiden Stegen zusammen gestellt. Im vorliegenden Bericht werden Schwingungen gezeigt, die sich auf das Instrument beziehen, das im Gitarrenständer gelagert und tangential, d.h. parallel zur Decke, angeregt war. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Stegen haben sich für Frequenzen unterhalb von 800 Hz nicht gezeigt; dieser Bereich wird im Folgenden primär betrachtet.

## 2.2. Konduktanz

Die Admittanz am Steg wurde mit einer Messapparatur bestimmt, deren Kernstück ein Impedanzmesskopf Brüel & Kjaer 8001 war. Abb. 2.4 zeigt ihn zusammen mit dem Schwingerreger B&K 4810. Die beiden Kabel deuten darauf hin, dass sich in einem Gehäuse zwei Aufnehmer befinden. Neben einem Kraftsensor ist im Messkopf auch ein Bewegungssensor eingebaut. Die Kabel führen zu zwei Ladungsverstärkern B&K 2635. Für die Messung am Steg war in das Gewinde am oberen zugespitzten Ende als Verlängerung ein Stift eingeschraubt.

*Abb. 2.4. Schwingerreger mit aufgeschraubtem Impedanzmesskopf.*



Um an den Auflagepunkten der Saiten messen zu können, wurde eine etwa 6 cm lange Tastspitze vorgesetzt. Abb. 2.5 zeigt diese Situation. Dies führte dazu, dass dann der vordere Teil des Messkopfes samt Verlängerung eine Masse von einigen Gramm aufwies. Für die Messung resultiert daraus ein Fehler, der möglicherweise nicht zu tolerieren ist. Mittels einer elektrischen Massenkompensationseinheit B&K 5565 wurde der Einfluss der Masse des Verlängerungsstücks sowie der Masse des Messkopfes, die zwischen Sensor und Messobjekt mitbewegt wird, minimiert.



*Abb. 2.5. Admittanz-Messung in tangentialer Richtung mit Verlängerungsstück, hier am Auflagepunkt der G-Saite auf dem Premio-Steg.*

Es wurde ein Analysator vom Typ Ono Sokki CF-5210 verwendet. Neben vielfältigen Möglichkeiten der Auswertung und Darstellung bietet dieses Gerät auch eine Auswahl an Anregungssignalen, die auf die Analyseparameter angepasst sind. Es wurde ein Pseudo-Rauschen verwendet, das Spektralanteile genau bei den gewählten Analysefrequenzen enthält und einen minimalen Spitzenfaktor aufweist. Dieses Rauschsignal wurde über den Leistungsverstärker B&K 2706 in den Mini-Shaker B&K 4810 eingespeist. Es erwies sich als ausreichend, über zehn Messungen zu mitteln. Für die Experimente, deren Ergebnisse in diesem Bericht aufgeführt sind, wurden Frequenzen zwischen 0 Hz und 1000 Hz betrachtet. In der vorliegenden Arbeit ist stets der Realteil der Admittanz, die Konduktanz, wiedergegeben. Diese ergibt sich aus der Kraft und der In-Phase-Komponente der Schwinggeschwindigkeit. Näheres findet sich in Abschnitt 2.1 von Fleischer (2009b).

## 2.3. Schallsignal

Neben dem Verhalten des Instrumentenkörpers wurde auch das Schallsignal untersucht, das ein Spieler auf dem Cello erzeugt. Einer der Instrumentenbaumeister übernahm im reflexionsarmen Raum des Instituts die Aufgabe, einige Töne auf dem Instrument zu spielen.

### 2.3.1. Gespielte Tonleitern

Das Schallsignal, dessen Analyse im vorliegenden Bericht beschrieben wird, wurde in 3 m Abstand vor dem Cello zweispurig auf *Digital Audio Tape* aufgenommen. Der Spieler wurde gebeten, zunächst die vier leeren Saiten anzuspielden und dann eine Tonleiter aufwärts und daran anschließend abwärts zu spielen. Im ersten Durchgang war der Premio-Steg, im zweiten der traditionelle Steg eingesetzt. Weitere Anweisungen wurden ihm nicht gegeben. Jarczyk (2007) hat die Stereo-Aufnahmen, die dabei entstanden sind, in zwei Serien von Mono-Aufnahmen im wav.-Format umgewandelt. Er hat sich dafür entschieden, die „rote Spur“ weiter zu verarbeiten, da hierin mehr Teiltöne zu erkennen waren.

Bezüglich des Auf- oder Abwärtsspielens der Tonleiter schreibt Jarczyk (2007), der selbst Cello spielt, auf Seite 7: „Die Tonleiter besteht aus vier leeren Saiten, auf jeder Saite werden in der ersten Lage jeweils drei Griffe gemacht: erster Finger (Zeigefinger), zweiter (Mittelfinger) bzw. je nach Saite dritter Finger (Ringfinger) und vierter Finger (kleiner Finger). In der Aufwärtsbewegung muss der Bezugspunkt auf der Saite durch den ersten Finger, in der Abwärtsbewegung durch den vierten Finger gefunden werden. Die anderen Töne können nach Festlegen dieses Bezugspunktes dann relativ leicht gespielt werden. Während der vorzunehmende Wechsel von der ersten in die vierte Lage durch einen Bezugspunkt für den Daumen am Beginn des Korpus erleichtert wird, muss der Wechsel in der Abwärtsbewegung von der vierten in die erste Lage völlig ohne Bezugspunkt durchgeführt werden; hier ist die Erfahrung des Interpreten mitsamt Einspielen, Lockerung, usw. von Bedeutung. Je nach Bewegungsrichtung der Tonleiter können für einen Ton also unterschiedliche Spiel-Bedingungen herrschen.“

Daraus geht hervor, dass mit Unterschieden zwischen den Schallsignalen der aufsteigenden und der absteigenden Tonleiter zu rechnen ist. Darüber hinaus spielen der Ort und die Art eine Rolle, wo und wie der Bogen die Saite streicht. Auf Seite 8 schreibt Jarczyk dazu: „Auch die Art des Strichs übt einen großen Einfluss aus. Der Cellist unterscheidet dabei zwischen Aufstrich und Abstrich. Je nachdem, wo sich der Bogen auf der Saite befindet, findet eine unterschiedliche Druckeinwirkung auf die Saite statt. Es ist dabei beispielsweise schwerer, einen

Ton mit dem Aufstrich anzuregen.“ Da dem Spieler volle Freiheit gelassen wurde, ist es im Nachhinein nicht mehr möglich, Unterscheidungen in Hinsicht auf den Ort und die Richtung des Anstreichens zu treffen.

### 2.3.2. FFT-Analyse

Für diese „objektive“ Untersuchung des Teiltongehaltes der Celloklänge wurde, ebenso wie für die Messung der Konduktanz, der Analysator Ono Sokki CF-5210 verwendet. Er wurde im einkanaligen Modus betrieben. Das Schallsignal wurde vom *Digital Audio Tape* in den Speicher des Analysators überspielt und dort der Schnellen Fourier-Transformation unterworfen. Es wurde jeweils ein stationärer Teil ausgewählt, in dem sich das Spektrum so gut wie nicht änderte, und der Betrag des Spektrums mit einem hp-Plotter als Papierdokument ausgegeben. In einigen wenigen Fällen wurden Frequenzen zwischen 0 Hz und 5000 Hz, meist jedoch nur bis 1000 Hz betrachtet.

### 2.3.3. Gehörbezogene Analyse

Eine grundlegend andere Vorgehensweise liegt vor, wenn die Einzelklänge des Cellos mittels der Analyse-Software VIPER (*VI*sual *PER*ception of *A*udio *S*ignals) der Firma Cortex Electronic, Regensburg, untersucht wurden. Dieses Programmpaket macht es möglich, Schalle „gehörgerecht“ zu analysieren. Die Analyse beruht auf Erkenntnissen von Zwicker und Feldtkeller (1967) sowie Fastl und Zwicker (2007). Hinsichtlich der Verarbeitung musikalischer Klänge basiert es auf den Überlegungen, die Terhardt (1998) zusammen gefasst hat. Valenzuela (1999) hat die zu Grunde liegenden Ideen, ihre eigene Implementierung in ein ähnliches Programmpaket sowie Anwendungen auf musikalische Schalle ausführlich im Band 1/99 der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ behandelt.

Es wurde der VIPER *PerceptualXplorer* in Versionen von 1.1 bis 2.12 verwendet. Der erste Schritt besteht in einer Analyse des Schallsignals, die mit der Fourier-Zeit-Transformation nach Terhardt (1998) vergleichbar ist. Das Ergebnis wird als „Auditorisches Spektrogramm“ (*Auditory Spectrogram*) bezeichnet. Bis zu 600 Frequenzkanäle sind verfügbar und die Zeitauflösung reicht bis zu 1 ms. Der nächste Schritt nach der gehöradäquaten Frequenzanalyse ist die Extraktion von „Frequenzkonturen“ (*Frequency Contours*), die der von Valenzuela (1999) beschriebenen Konturierung entspricht. Es entsteht ein Diagramm, das mit dem Teilton-Zeit-Muster nach Terhardt (1998) vergleichbar ist. Eine Möglichkeit der Weiterverarbeitung besteht darin, mit der Funktion *Frequency Tracks* länger anhaltende Teiltöne aufzufinden und von kurzzeitigen, perkussiven Schallanteilen zu trennen. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 2.6 gezeigt: Die Zeit läuft nach rechts. Die Abszisse ist links mit der Tonheit in Bark und rechts mit der zugehörigen Frequenz in Kilohertz geteilt. Es ist der Bereich bis 22 Bark bzw. 10 kHz dargestellt. Der Pegel ist in Farben kodiert. Dunkles Rot bedeutet einen hohen, helles Blau einen niedrigeren und Weiß einen sehr geringen Pegel.

Abb. 2.6 gibt in dieser Darstellung einen kurzen Ausschnitt aus dem Klang E in der ersten Oktave (Grundfrequenz 82 Hz) wieder. Nach rechts ist die Zeit von 900 ms bis 1100 ms, nach oben sind die Tonheit (ein am Hören orientierte Maßzahl) sowie die Frequenz (ihr physikalisches Pendant) aufgetragen. Es sind zahlreiche Signalanteile mit geringen Pegeln zu erkennen, die blau eingefärbt sind und sich nur wenig über den weißen Bereich erheben. Am Rande sei angemerkt, dass bei dieser tiefen Note der Grundton im Schallsignal nicht nachweisbar ist.

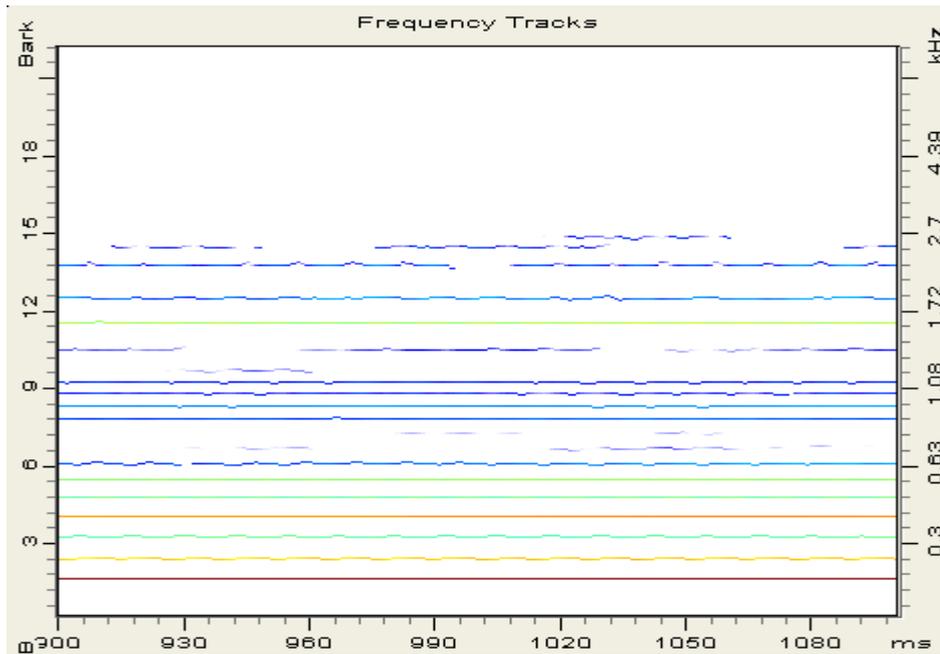


Abb. 2.6. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Klanges E, gespielt auf dem Cello mit dem traditionellen Steg, ermittelt mit VIPER.

In Abb. 2.6 sind zahlreiche Spektralkomponenten zu erkennen. Aufgrund der Teilung der Skale in Bark ist nur schwer zu ersehen, dass deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der (hier allerdings nicht erkennbaren) Grundfrequenz sind. Es ist bekannt, dass diese noch Darstellung mehr Information enthält, als für das Hören relevant ist. Dies wird beim Vergleich mit Abb. 2.7 deutlich. Zusätzlich zur ursprünglichen Analyse, deren Ergebnis Abb. 2.6 wiedergibt, ist in Abb. 2.7 die Funktion *Nonlinear Masking* gewählt. Damit wird der spektralen Verdeckung (Zwicker und Feldtkeller 1967, Fastl und Zwicker 2007) Rechnung getragen.

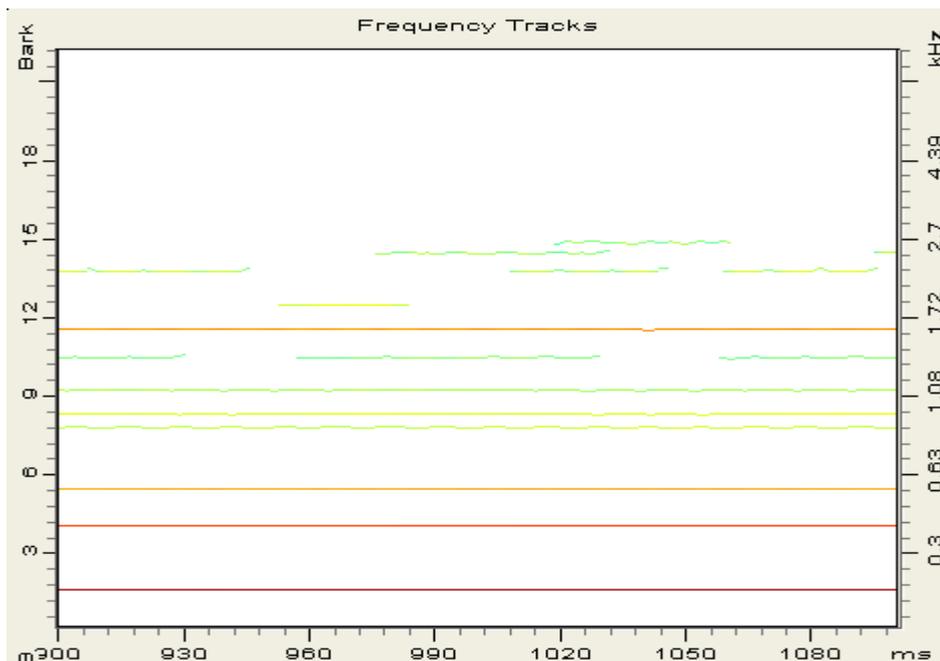


Abb. 2.7. Frequenzspuren (Frequency Tracks) des Klanges E, gespielt auf dem Cello mit dem traditionellen Steg, ermittelt mit VIPER unter Berücksichtigung der Maskierung.

Der Vergleich von Abb. 2.7 mit 2.6 zeigt, dass die meisten der Signalanteile mit geringem Pegel nun nicht mehr dargestellt sind, da sie maskiert bzw. verdeckt werden. Dadurch wirkt das Bild deutlich „bereinigt“. Mehrere schwache Teiltöne sind infolge der Maskierung unhörbar geworden; sie sind nicht mehr visualisiert. Diese „Bereinigung“ erfolgt nicht willkürlich, sondern auf der Basis psychoakustischer Erkenntnisse. Anders als die Bezeichnung „Nicht-linear“ suggeriert, ist eine Pegelabhängigkeit der Maskierungswirkung in VIPER allerdings nicht nachgebildet. Trotzdem darf darauf vertraut werden, dass in Abb. 2.7 gegenüber Abb. 2.6 nur solche Information weggelassen wurde, die für das Hören unerheblich ist. Oder anders ausgedrückt: Abb. 2.7 enthält diejenige akustische Information, welche für das Hören tatsächlich relevant ist. Im Folgenden werden ausnahmslos *Frequency Tracks*, bei denen die Maskierung berücksichtigt ist, verwendet. Sie werden dazu herangezogen, die stationären Teile der einzelnen Klänge zu untersuchen.

## 2.4. Zusammenfassende Bemerkung

Einem glücklichen Umstand und dem Entgegenkommen der Geigenbauwerkstatt Goldfuss ist es zu verdanken, dass mannigfache Messungen an ein und demselben Cello durchgeführt werden konnten, das mit zwei unterschiedlichen Stegen versehen war. Bei allen bisherigen Untersuchungen (Fleischer 2009a, 2009b, 2010) haben sich unterhalb von etwa 800 Hz keine großen Unterschiede gezeigt, die auf den jeweils eingesetzten Steg zurückzuführen wären. Stehen die bauartbedingten Einflüsse der Stege im Mittelpunkt des Interesses, sollten Frequenzen oberhalb von etwa 800 Hz betrachtet werden. Gelegenheit dazu besteht derzeit nicht mehr.

Da jedoch zahlreiche unterschiedliche Messungen im Bereich bis 1000 Hz durchgeführt worden sind, wird die Möglichkeit genutzt, diese Ergebnisse miteinander zu verknüpfen und nach Gemeinsamkeiten zu suchen, die beiden Stegen zu eigen sind. Dies soll im Weiteren versucht werden.

### 3. GEHÖRBEZOGENE ANALYSE DER SCHALLSIGNALLE

Als sich aus Anlass von Fernsehaufnahmen die beiden Meister aus der Werkstatt Goldfuss im Institut für Mechanik aufhielten, konnten im reflexionsarmen Raum Schallaufnahmen angefertigt werden. Einer der Instrumentenbauer spielte eine auf- und eine absteigende Tonleiter auf dem Cello. Das eine Mal war der neuartige Premio-Steg, das andere Mal der konventionelle Steg eingesetzt. Jarczyk (2007) hat diese Schalle mit Hilfe der Analyse-Software VIPER der Firma Cortex Electronic, Regensburg, analysiert. Einige seiner Ergebnisse sind im vorliegenden Kapitel zusammen gestellt.

#### 3.1. Tonleitern, gespielt mit dem neuartigen Premio-Steg

##### 3.1.1. Auswahl der untersuchten Klänge

Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 geschildert, saß der Spieler mit dem Cello im reflexionsarmen Raum des Instituts für Mechanik und spielte die vier Saiten zunächst leer an. Danach intonierte er eine Tonleiter über alle vier Saiten, zunächst in ansteigender und dann in absteigender Folge. Tab. 3.I gibt Noten und die zugehörigen nominalen Frequenzen an, wenn der Kammerton a' der Frequenz 440 Hz entspricht. Das Schallsignal, in 3 m Abstand vor dem Cello auf Digital Audio Tape aufgenommen, wurde mittels VIPER analysiert; vgl. Abschnitt 2.3.3. Da dem Spieler volle Freiheit gelassen wurde, ist es im Nachhinein nicht mehr möglich, Unterscheidungen in Hinsicht auf den Ort und die Richtung des Anstrichs zu treffen.

Tab. 3.I. Noten und nominale Grundfrequenzen einer C-Dur-Tonleiter

Note	C	D	E	F	G	A	H
Grundfrequenz in Hz	65	73	82	87	98	110	123
Note	c	d	e	f	g	a	h
Grundfrequenz in Hz	131	147	165	175	196	220	247
Note	c'	d'	e'	f'	g'	a'	h'
Grundfrequenz in Hz	268	294	330	349	392	440	494

Da die Intonation teilweise nachgebessert worden war und Hintergrundgeräusche auftraten, wurden die jeweils besten Schallsignale ausgesucht. Als Beispiel zeigt Abb. 3.1 in einer Zusammenstellung zwei Klänge aus der aufsteigenden Tonleiter, die für gut befunden wurden. In Abb. 3.2 sind aus der absteigenden Tonleiter fünf Klänge ausgewählt, die ein länger anhaltendes, stabiles Spektrum ausbilden. Diese sieben Klänge wurden zu einer Tabelle zusammengestellt. Damit auch nachträglich noch zu erkennen ist, zu welcher Sequenz das Diagramm

Note	<i>Frequency Tracks mit Maskierung</i>	Note	<i>Frequency Tracks mit Maskierung</i>
C 65,00 Hz		G 96,875 Hz	
D 73,75 Hz		A 109,375 Hz	
E 82,50 Hz		H 123,75 Hz	
F 86,875 Hz			

Abb. 3.1. Klänge des Cellos in der zweiten Oktave mit dem Premio-Steg bei aufsteigender Tonleiter (↑).

gehört, wird für die aufsteigende Tonleiter im Folgenden das Symbol  $\uparrow$ , für die absteigende das Symbol  $\downarrow$  verwendet.

Wenn man die Schallsignale mittels FFT untersucht (vgl. das folgende Kapitel), dann zeigt sich, dass die wahre Intonation von der nominalen abweicht. Die Klänge des Cellos haben etwas andere Grundfrequenzen, als in Tab. 3.I vermerkt ist. Wie in Abschnitt 2.3.1 ausgeführt, kann unterschiedlicher Fingersatz zu leichten Frequenzabweichungen führen. Dies führt in manchen Fällen dazu, dass die Frequenzen in der aufsteigenden Tonleiter nicht vollständig mit denen in der absteigenden zusammenfallen. In der zweiten Oktave wurden Unterschiede dieser Art nicht festgestellt. In der dritten und vierten Oktave treten solche Abweichungen jedoch sehr wohl auf. Dabei ist zu bedenken, dass die Auflösung bei der FFT-Analyse 0,625 Hz betrug. Zudem sollte berücksichtigt werden, dass bei der FFT die Frequenzwerte in gleichen Abständen auf einer *l i n e a r e n* Skale verteilt sind, während es der Tonhöhenwahrnehmung eher entsprechen würde, sie *äquidistant* auf einer *l o g a r i t h m i s c h e n* Skale anzuordnen.

Es sind Frequenzspuren unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung angegeben. Die waagrechten Linien, wie sie in den folgenden Diagrammen zu sehen sind, stehen für stationäre Teiltöne. Die Abszisse ist links mit der Tonheit bis 22 Bark und rechts mit der zugehörigen Frequenz bis 10 kHz geteilt. Der Pegel ist in Farben so kodiert, dass dunkles Rot für einen hohen, helles Blau für einen geringeren und Weiß für einen sehr niedrigen Pegel steht. Nach rechts läuft die Zeit in einer Spanne von 0,2 s. Manche Teiltöne ändern periodisch die Farbe (Beispiel: Note D) oder sind unterbrochen (Beispiel: Note F); dies deutet auf eine Modulation der Amplitude hin. Zeigen sie Ausschläge nach oben oder unten (Beispiel: Note G), dann liegt eine Modulation der Frequenz vor.

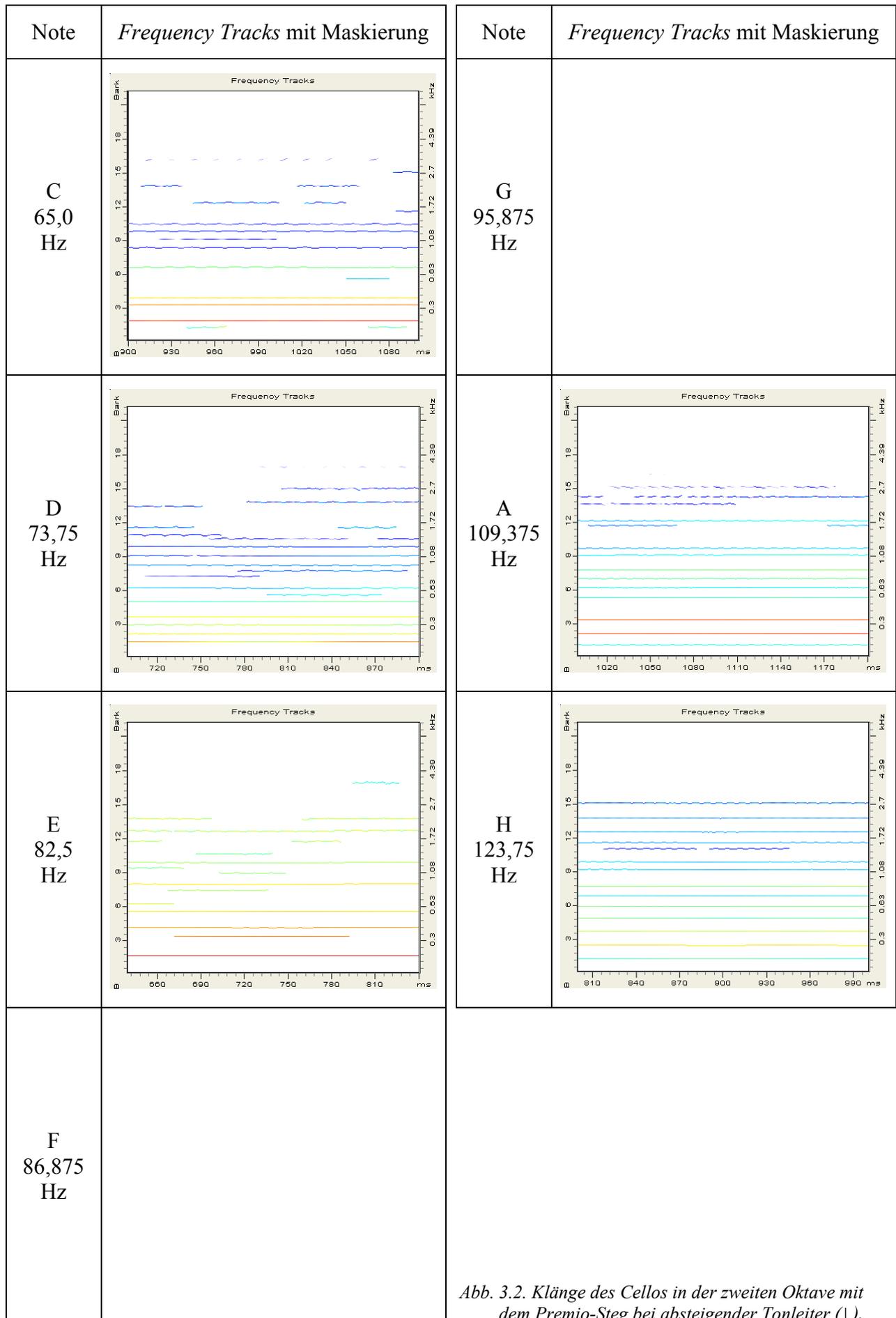


Abb. 3.2. Klänge des Cellos in der zweiten Oktave mit dem Premio-Steg bei absteigender Tonleiter (↓).

### 3.1.2. Noten der zweiten Oktave

Die zweite Oktave wird durch groß geschriebene Buchstaben gekennzeichnet. In Tab. 3.II sind die tatsächlichen Grundfrequenzen der angegebenen Noten zusammen gestellt. Es zeigt sich, dass der Spieler innerhalb der Auflösung von 0,625 Hz die gleichen Grundfrequenzen intoniert hat, unabhängig davon, ob er die Tonleiter aufsteigend oder abfallend spielte. Abb. 3.3 zeigt die endgültige Auswahl der sieben Klänge, die auf die beschriebene Art ausgewählt wurden.

*Tab. 3.II. Noten und wahre Grundfrequenzen in Hz der zweiten Oktave einer C-Dur-Tonleiter, aufsteigend bzw. absteigend gespielt mit dem Premio-Steg*

Note	C	D	E	F	G	A	H
aufsteigend	65,0	73,75	82,5	86,875	96,875	109,375	123,75
absteigend	65,0	73,75	82,5	86,875	96,875	109,375	123,75

Bei den Klängen der ersten Spalte von Abb. 3.3 ist der Grundton nicht zu erkennen. Darin zeigt sich die wohlbekanntete Tatsache, dass sehr tieffrequente Schwingungen der Saite zwar erzeugt, vom Korpus aber nicht oder nur sehr schwach abgestrahlt werden können. In den ganz tiefen Lagen des Cellos fehlt den Klängen der Grundton bzw. er prägt sich so schwach aus, dass er verdeckt wird. Das Gehör muss ihn als „Virtuelle Tonhöhe“ (Terhardt 1998) rekonstruieren. Die drei Klänge der rechten Spalte von Abb. 3.3 weisen einen schwachen Grundton auf. Da er in den Frequenzspuren erkennbar ist, ist damit zu rechnen, dass er zur Hörwahrnehmung beiträgt. Gemäß Abb. 3.3 reichen die wichtigen Teiltöne bis zu einer Frequenz von etwa 2,7 kHz.

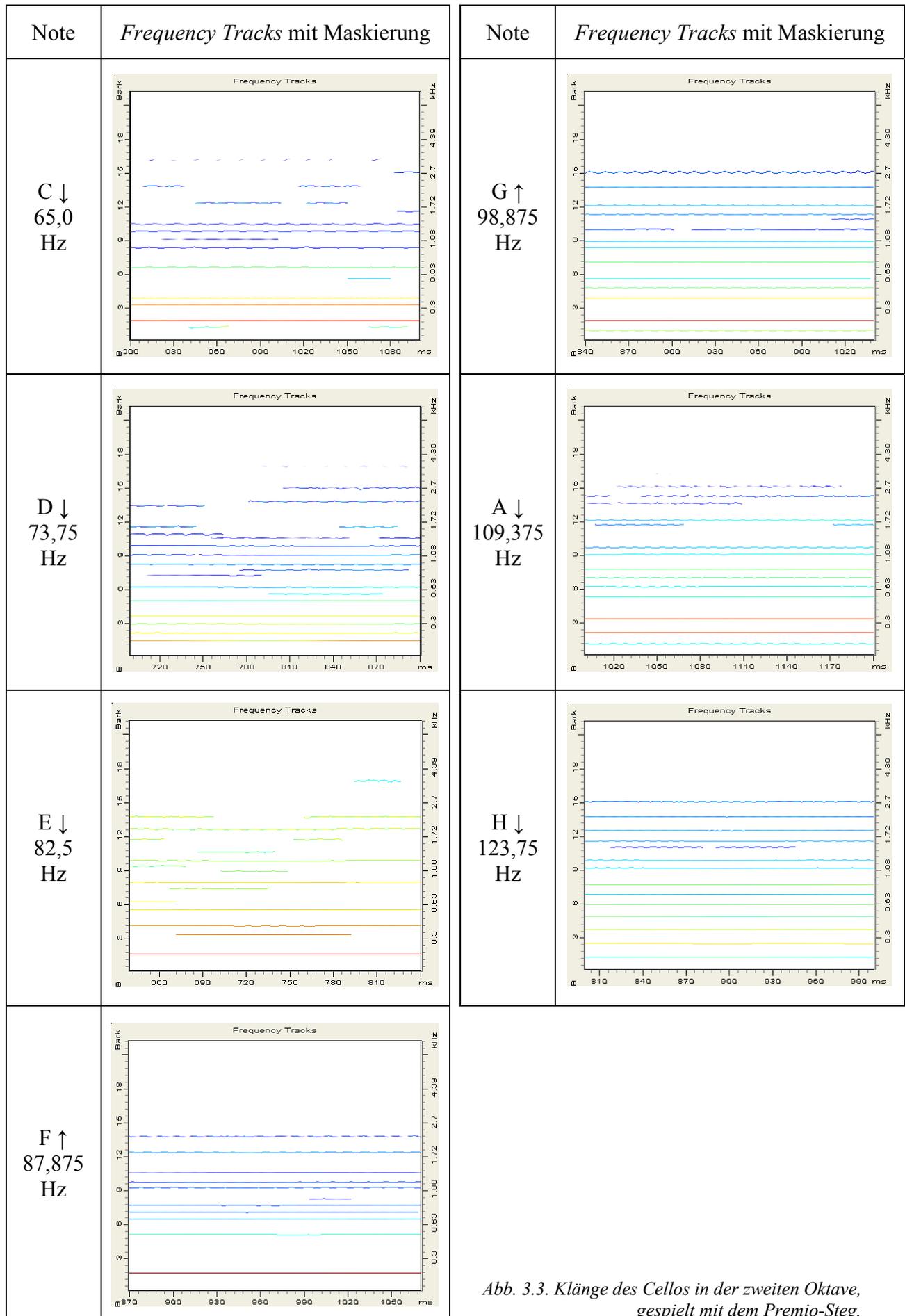


Abb. 3.3. Klänge des Cellos in der zweiten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg.

### 3.1.3. Noten der dritten Oktave

Tab. 3.III gibt die nominalen Grundfrequenzen der Noten der dritten Oktave (kleine Buchstaben) wieder. Abb. 3.4 zeigt die endgültige Zusammenstellung der sieben Klänge. Bei einigen gegriffenen Noten weichen die Grundfrequenzen beim Aufwärts- bzw. Abwärtsspielen der Tonleiter etwas voneinander ab. Die größte Diskrepanz tritt bei der Note f auf; sie beträgt 2,5 Hz oder 1,4 Prozent. Zum Vergleich: Ein Halbtonschritt entspricht 5,9 Prozent.

*Tab. 3.III. Noten und wahre Grundfrequenzen in Hz der dritten Oktave einer C-Dur-Tonleiter, aufsteigend bzw. absteigend gespielt mit dem Premio-Steg*

Note	c	d	e	f	g	a	h
aufsteigend	130,625	145,625	163,125	173,125	194,375	219,375	248,75
absteigend	130,0	145,625	163,75	175,625	195,625	219,375	248,75

Bei allen Klängen zeichnet sich nun der Grundton deutlich ab. Allerdings ist bei einigen Klängen zu beobachten, dass in der gewählten Darstellung der eine oder andere höherfrequente Teilton nicht mehr zu erkennen ist. Beispiele sind die Noten e und f in Abb. 3.4. Wahrnehmbare Teiltöne können Frequenzen bis etwa 5 kHz erreichen.

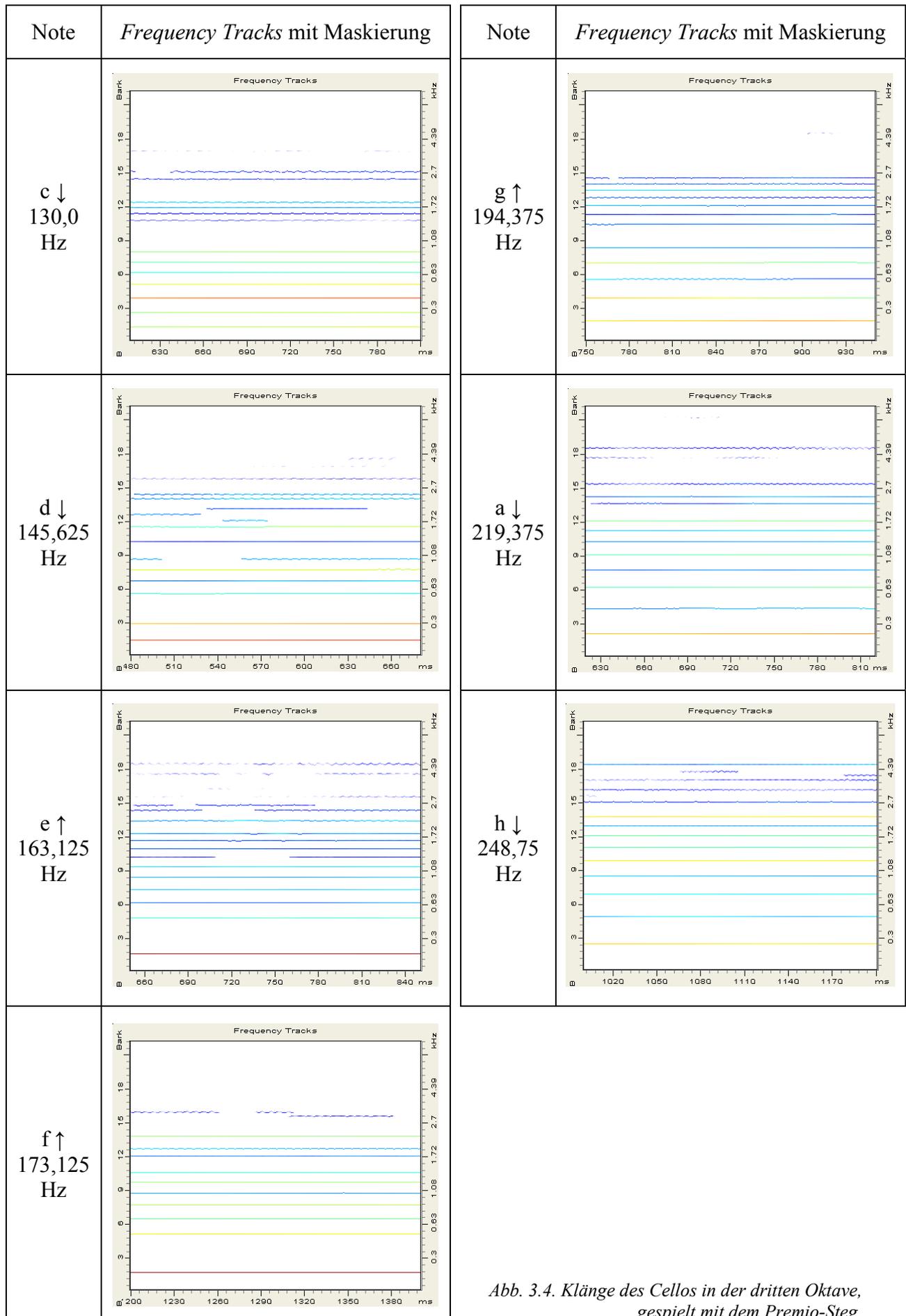


Abb. 3.4. Klänge des Cellos in der dritten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg.

### 3.1.4. Noten der vierten Oktave

In Tab. 3.IV sind die nominalen Grundfrequenzen der Noten der vierten (eingestrichenen) Oktave vermerkt. Die Tonleiter reichte bis g'; die Noten a' und h' waren nicht mehr enthalten. Auch hier hängen die Grundfrequenzen in manchen Fällen davon ab, ob die Tonleiter aufwärts oder abwärts gespielt wird. Bei der Note e' beträgt der Frequenzunterschied 2,5 Hz oder 0,8 Prozent; etwa 6 Prozent käme einem Halbtonschritt gleich.

*Tab. 3.IV. Noten und wahre Grundfrequenzen in Hz der vierten Oktave einer C-Dur-Tonleiter, aufsteigend bzw. absteigend gespielt mit dem Premio-Steg*

Note	c'	d'	e'	f'	g'
aufsteigend	261,875	293,125	325,625	344,375	388,125
absteigend	261,875	294,375	328,125	345,625	388,125

Abb. 3.5 zeigt die Frequenzspuren der verbleibenden fünf Klänge. Es ist zu erkennen, wie mit zunehmender Grundfrequenz die einzelnen Teiltöne immer weiter auseinanderrücken. Die höchsten Teiltöne sind bei Frequenzen bis über 6 kHz zu beobachten.

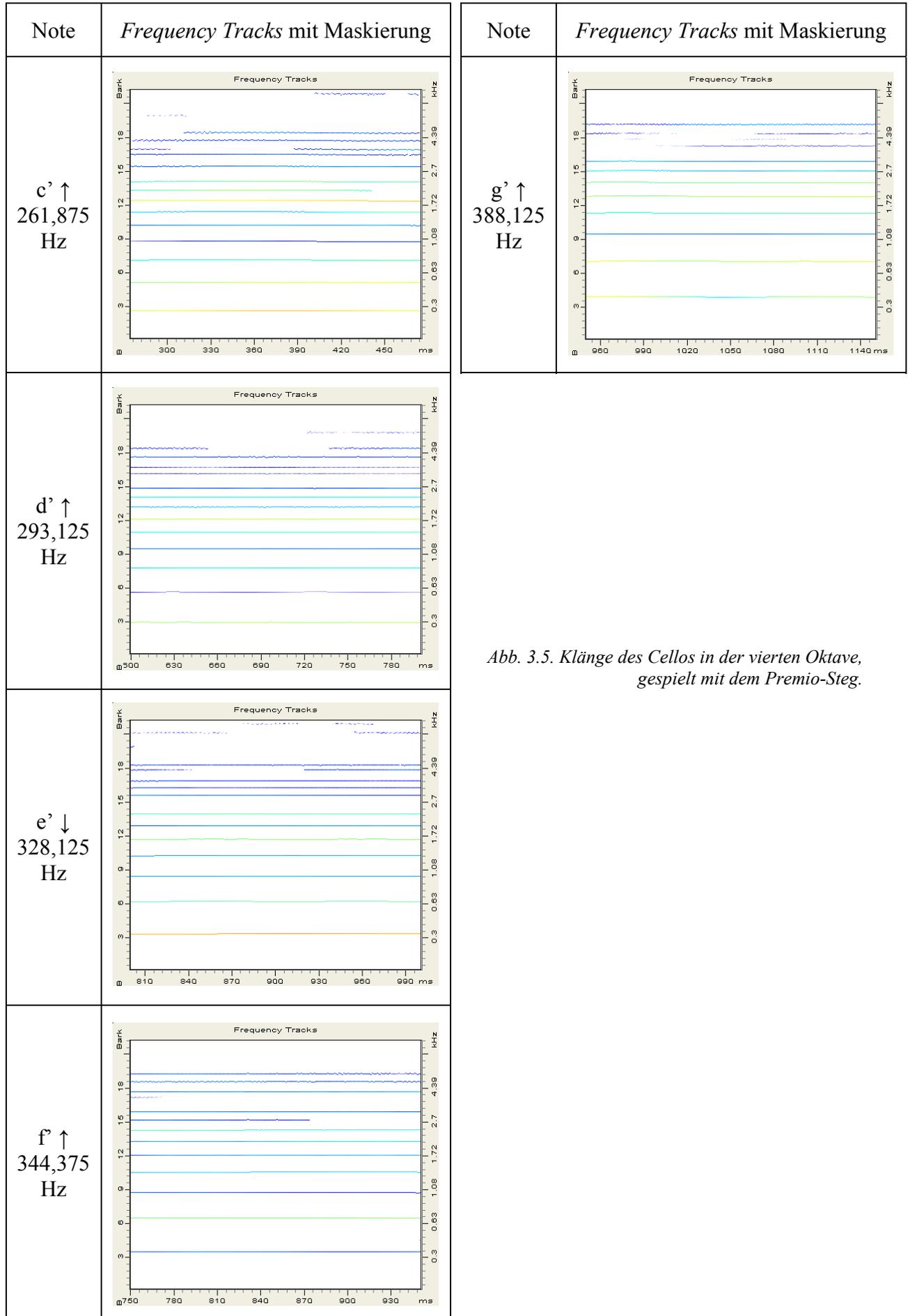


Abb. 3.5. Klänge des Cellos in der vierten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg.

## 3.2. Vergleiche zwischen den beiden Stegen

In allen Diagrammen dieses Kapitels sind Frequenzspuren unter Berücksichtigung der spektralen Maskierung angegeben. Wie in den Abschnitten 2.3.3 und 3.1.1 ausgeführt, läuft die Zeit nach rechts. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass an der Abszisse in einer gehörig gerechten Teilung links die Tonheit in Bark und rechts – entsprechend verzerrt - die zugehörige Frequenz in Kilohertz aufgetragen ist. Der Pegel ist in Farben umgesetzt, so dass dunkles Rot einem hohen, helles Blau einem niedrigeren und Weiß einem sehr geringen Wert entspricht. Die waagrechten Linien stehen für stationäre Teiltöne.

Eine detaillierte FFT-Analyse der Klänge, die mit den beiden Stegen gespielt worden waren, hat unterschiedliche Grundfrequenzen ergeben. Nicht nur beim Auf- bzw. Abwärtsspielen der Tonleiter, sondern nach dem Wechsel des Steges differierten die Klänge hinsichtlich der Frequenz. In den folgenden Zusammenstellungen sind stets die tatsächlichen Grundfrequenzen vermerkt, wie sie die FFT-Analyse mit einer Auflösung von 0,625 Hz ergeben hat.

In den Abb. 3.6 bis 3.8 sind die ausgewählten Frequenzspuren, die sich für die Noten der C-Dur-Tonleiter ergeben, für die beiden Stege nebeneinander angeordnet. Die spektrale Maskierung ist berücksichtigt. Am Pfeil neben dem Buchstaben, der die Note kennzeichnet, lässt sich ablesen, ob es sich um die aufsteigende oder die abfallende Reihe handelt. Die Grundfrequenz eines jeden Klanges, bestimmt mit Hilfe der FFT, ist angegeben. Die linke Spalte gilt für den Fall, dass der Premio-Steg in das Cello eingebaut war. Die rechte bezieht sich auf den traditionellen Steg. Die Frequenzspuren sind in den beiden Spalten so nebeneinander angeordnet, dass die Klänge, die zu denselben Noten gehören, direkt miteinander verglichen werden können.

Die Abb. 3.6.a und b enthalten die Klänge der zweiten Oktave. In einigen Fällen sind die Diagramme sehr ähnlich; Beispiele sind die Noten D und G. Bei den anderen Noten sind mehr (Note C) oder weniger (Note F) große Unterschiede zu erkennen. Unabhängig davon, welcher Steg eingesetzt war, ist bei den Klängen von Abb. 3.6.a der Grundton nicht zu erkennen. Erst in den Klängen von Abb. 3.6.b zeigt sich ein schwacher Grundton. Wenn sich Unterschiede ersehen lassen, dann treten sie vor allem bei hohen Frequenzen bis etwa 2,7 kHz auf.

In den Abb. 3.7.a und b sind die Ergebnisse für die dritte Oktave zusammen gestellt. Deutlich ist zu ersehen, wie sich die Spektren zu höheren Frequenzen hin verschieben. Oberhalb von 5 kHz lassen sich so gut wie keine Teiltöne mehr nachweisen.

Die Abb. 3.8.a und b zeigen die Frequenzspuren der verbleibenden fünf Klänge der vierten Oktave. Die einzelnen Teiltöne haben sich nun so weit auseinander gezogen, dass sie deutlich voneinander zu unterscheiden sind. Wahrnehmbare Teiltöne zeigen sich nunmehr bis zu Frequenzen von etwa 6 kHz.

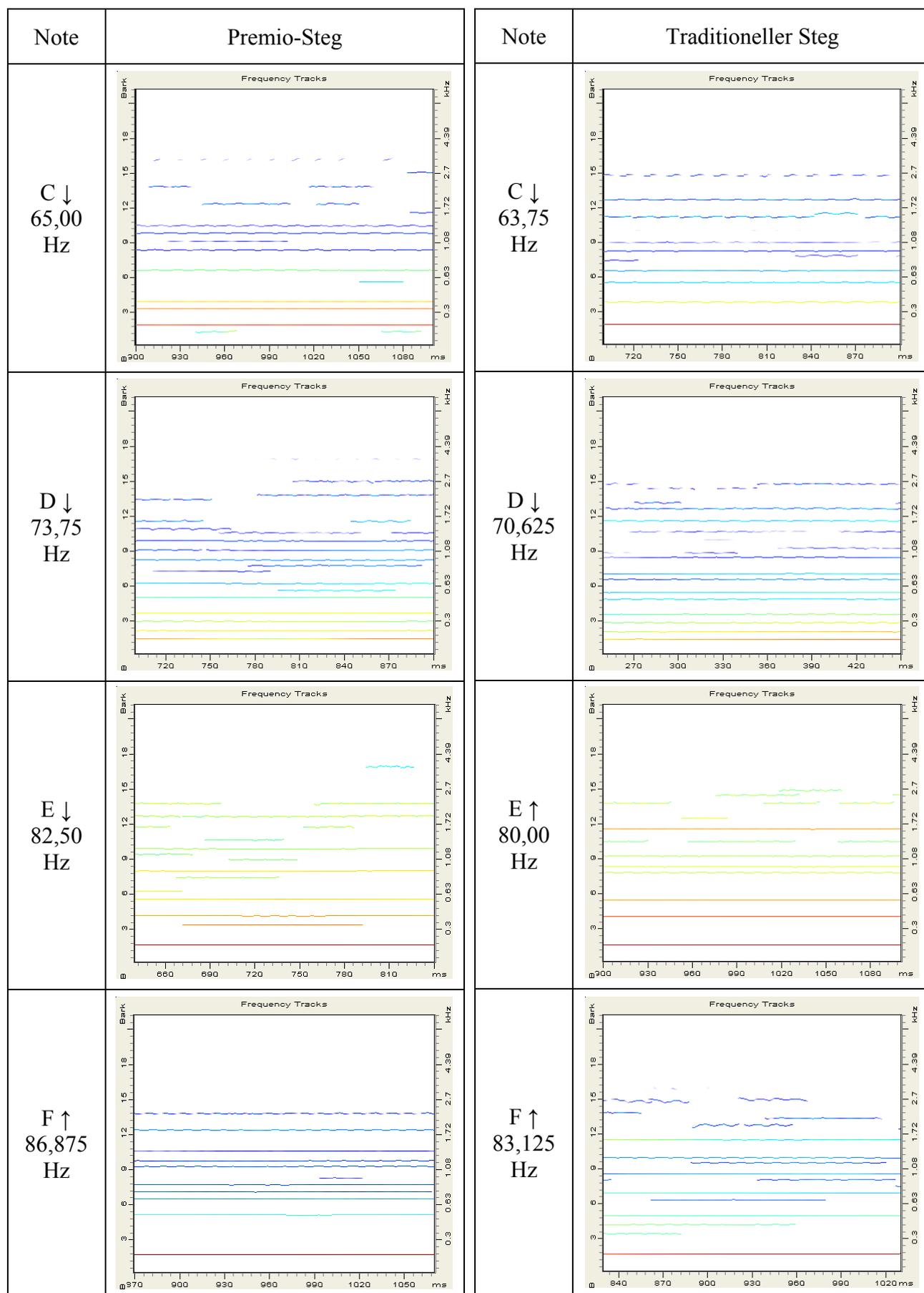


Abb. 3.6.a. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der zweiten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

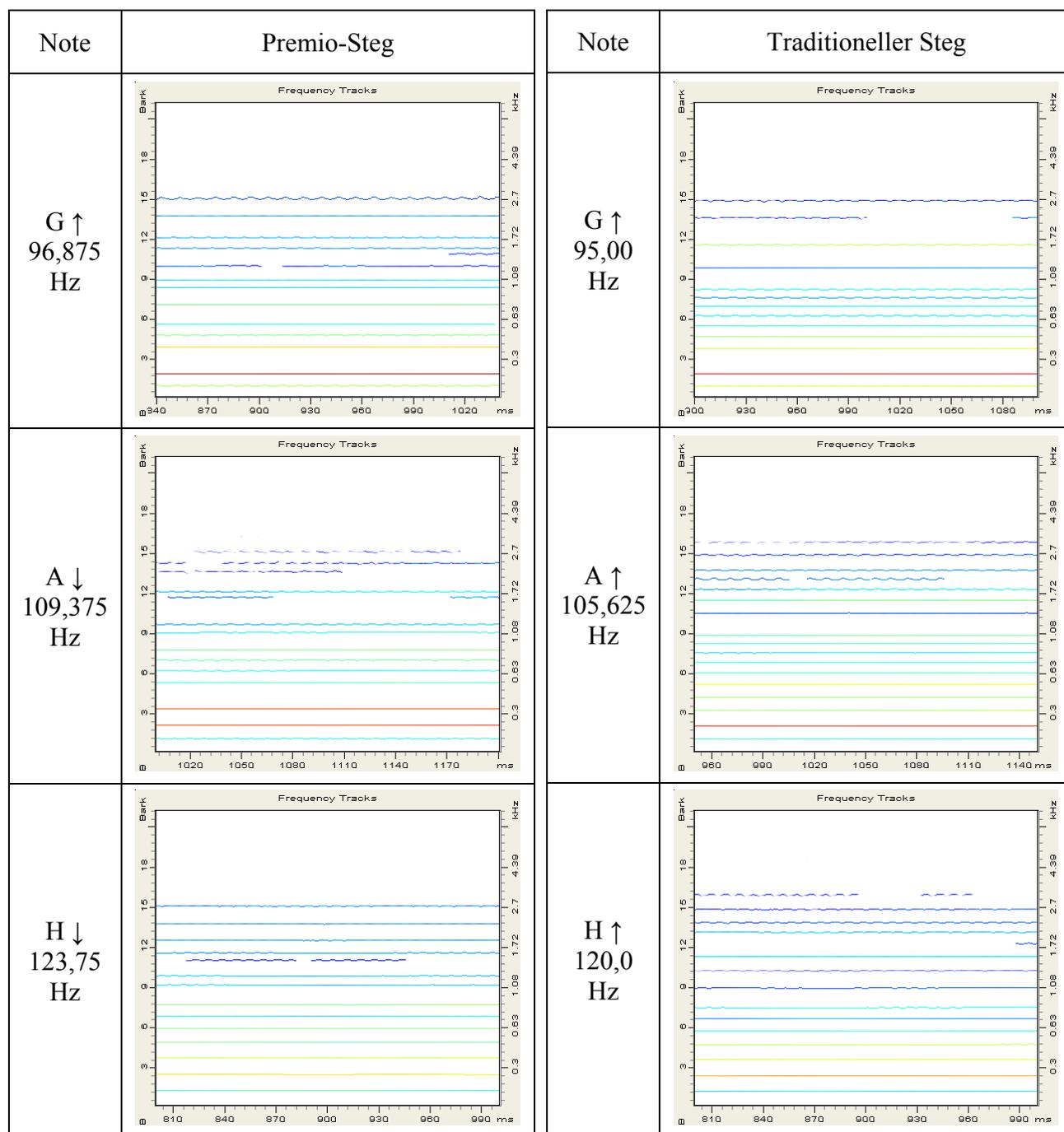


Abb. 3.6.b. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der zweiten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

Der Vergleich der eingefügten Zahlenwerte in den beiden Spalten von Abb. 3.6.a und b zeigt, dass die Grundfrequenzen der Klänge systematisch verschoben sind. Während sie beim Premio-Steg (linke Spalte) nahe bei den nominalen Werten (siehe Tab. 3.I) liegen, sind sie stets kleiner, nachdem der Steg ausgewechselt worden ist. Der vorliegenden Aufgabenstellung wäre dies prinzipiell nicht weiter abträglich. Jedoch treten Abweichungen zwischen den Klängen, gespielt mit den beiden Stegen, auf. Diese wachsen von 1,25 Hz bis auf 3,75 Hz an. Das beinhaltet, dass Unterschiede in den Frequenzspur-Diagrammen nicht allein auf den jeweils verwendeten Steg zurückgeführt werden können. Möglicherweise rühren sie auch von einem jeweils anderen Raster von Frequenzen her, an dem der Frequenzgang des untersuchten Systems „abgetastet“ wird.

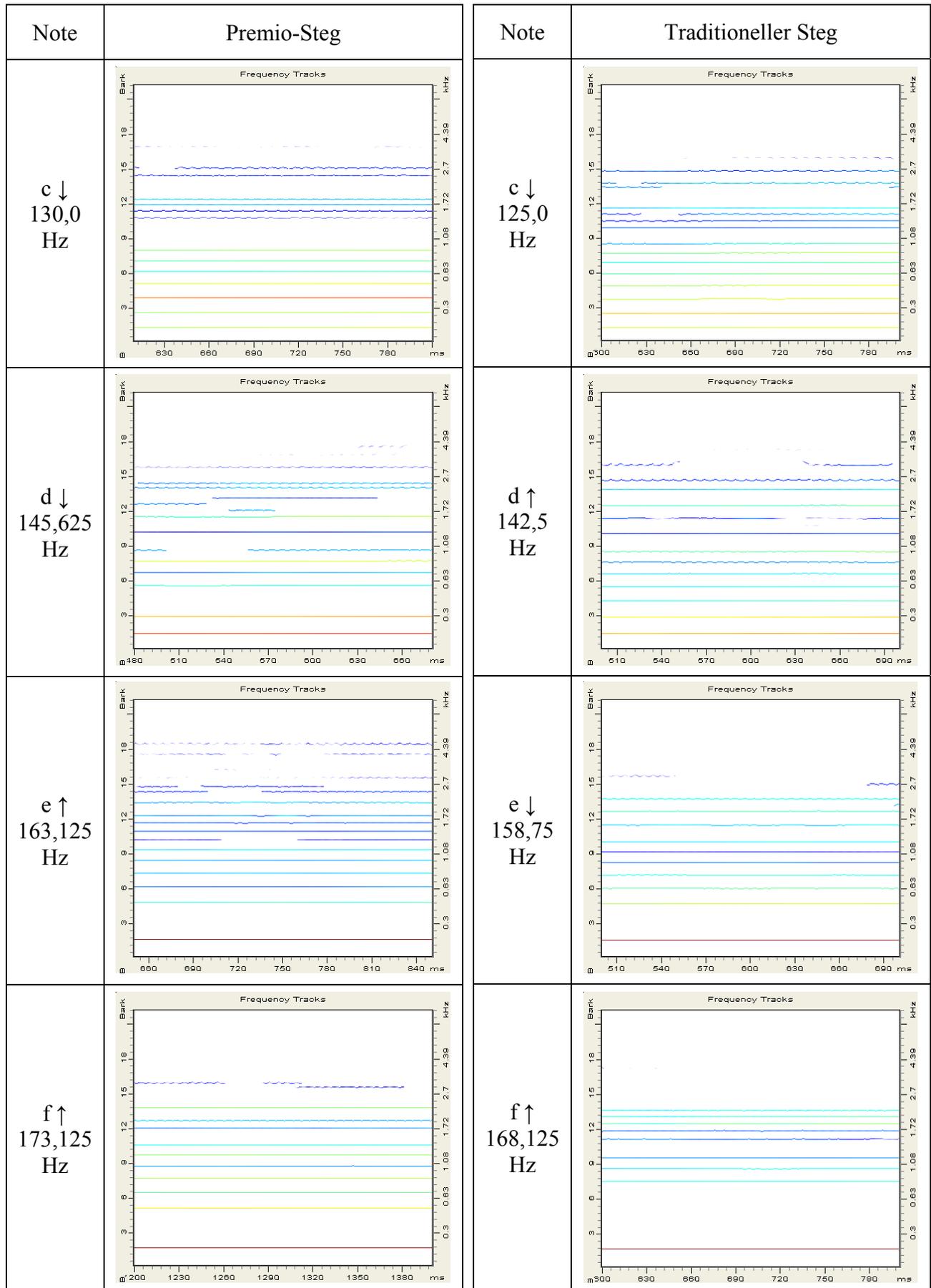


Abb. 3.7.a. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der dritten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

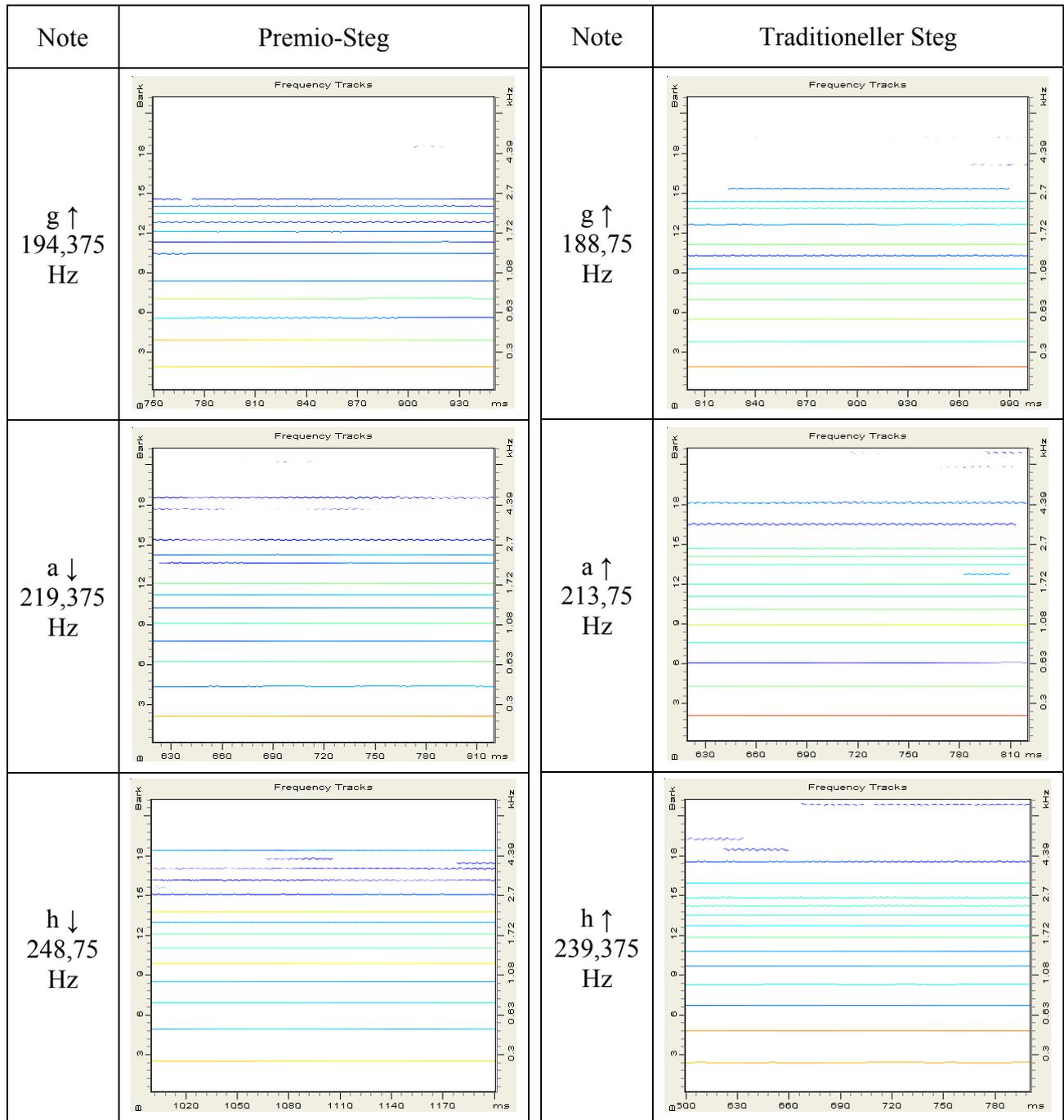


Abb. 3.7.b. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der dritten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

Alle Klänge der dritten Oktave (Abb. 3.7.a und b) enthalten den Grundton. Große Ähnlichkeiten zwischen zusammengehörigen Klängen sind nicht zu erkennen. Es ist zu beobachten, dass bei manchen Klängen einzelne niederfrequente Teiltöne fehlen. Ein Beispiel ist der zweite Teilton bei der Note e. Bei der Note f kann auch der dritte Teilton fehlen, wenn der traditionelle Steg eingesetzt ist. Unterschiede zeigen sich häufig bei hohen Frequenzen im Kilohertz-Bereich. Auch in dieser Oktave sind die Grundfrequenzen vergleichbarer Klänge nicht gleich. Beim traditionellen Steg (rechte Spalte) sind sie stets kleiner, als wenn der Premio-Steg eingebaut war. Bei der Note h beträgt die Differenz mehr als 9 Hz. Auch in der dritten Oktave ist damit zu rechnen, dass beobachtete Unterschiede nicht ausschließlich auf den Steg, sondern auch auf ein andersartiges Raster von Frequenzen zurückzuführen sind.

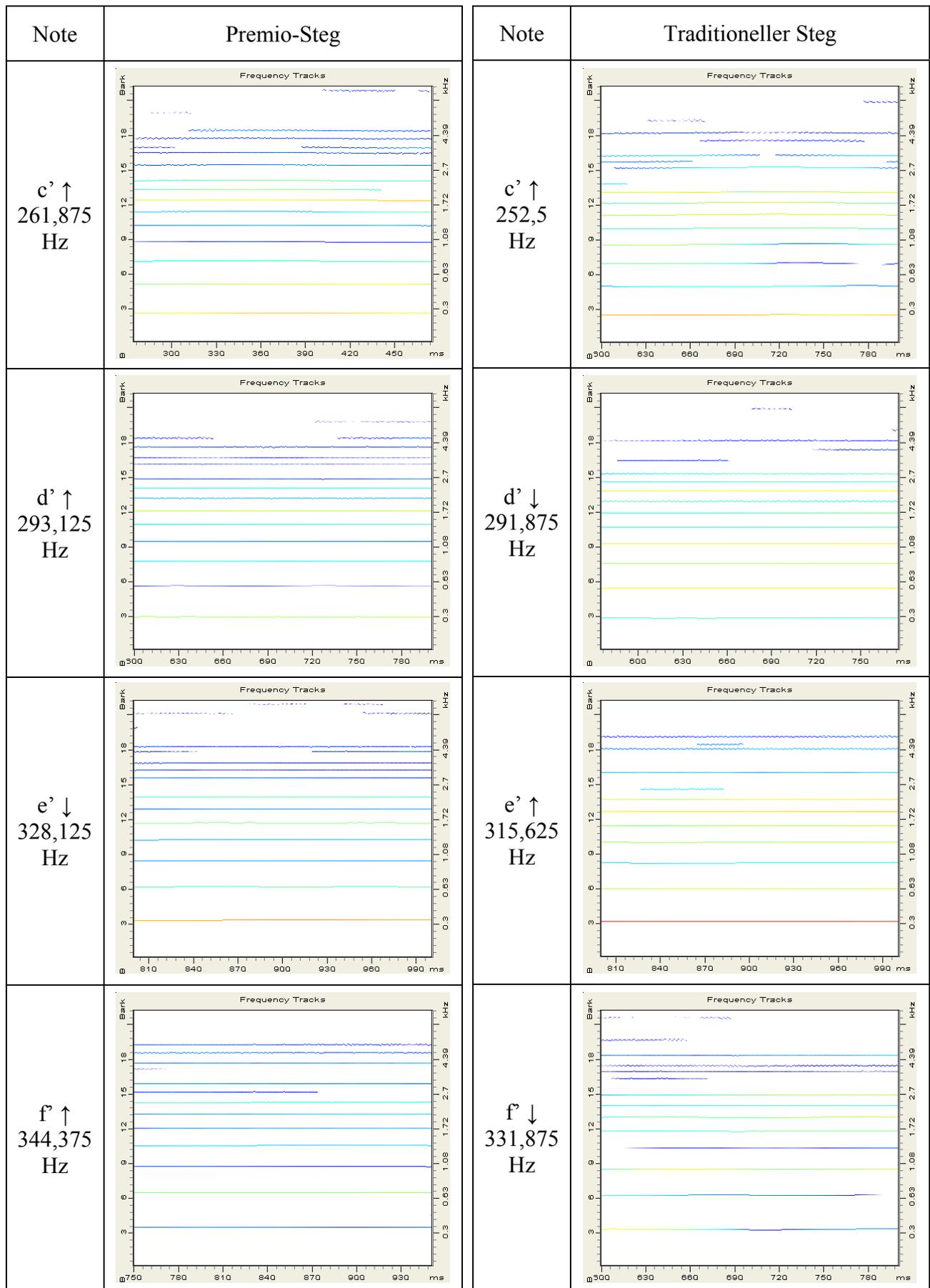


Abb. 3.8.a. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der vierten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

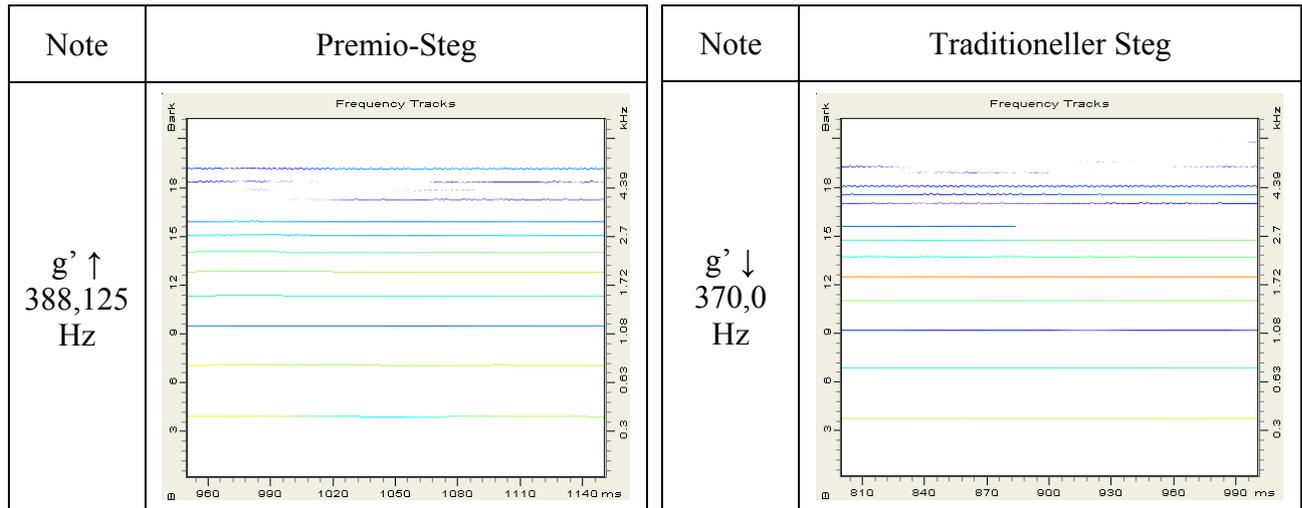


Abb. 3.8.b. Frequenzspuren (Frequency Tracks) der Noten der vierten Oktave, gespielt mit dem Premio-Steg (links) bzw. mit dem traditionellen Steg (rechts).

Die Abb. 3.8.a und b geben die Frequenzspuren der verbleibenden Klänge der vierten Oktave wieder. Die Tendenz, dass mit zunehmender Grundfrequenz die einzelnen Teiltöne immer weiter auseinanderrücken, prägt sich immer deutlicher aus. Gleichzeitig nimmt die Anzahl wahrnehmbarer Teiltöne immer weiter ab. Im Bereich tiefer Frequenzen ähneln sich die Diagramme. Ab etwa 1 kHz differieren sie mehr oder weniger. Auch in den fünf Klängen der Abb. 3.8.a und b weichen die Grundfrequenzen vergleichbarer Noten voneinander ab. Wiederum sind sie beim traditionellen Steg (rechte Spalte) kleiner als beim Premio-Steg. Die Differenz kann bis zu mehr als 18 Hz betragen. Somit ist auch bei den Frequenzspuren der vierten Oktave damit zu rechnen, dass Unterschiede von einem andersartigen Raster von Teilfrequenzen herrühren können. Somit sind sie kein eindeutiges Indiz für differierendes Übertragungsverhalten der beiden Stege

### 3.3. Zusammenfassende Bemerkung

Die Intention der beschriebenen Untersuchungen war es ursprünglich, nach Unterschieden zu suchen, die auf den jeweils eingesetzten Steg zurückzuführen sind. Dazu wurde das Schallsignal analysiert, das ein und derselbe Spieler mit ein und demselben Bogen auf ein und demselben Cello hervorgerufen hat. Offenkundige Änderung zwischen zwei Durchgängen war, dass das eine Mal der neuartige Premio-Steg, das andere Mal ein traditioneller Steg eingesetzt war. Um die Auswertung auf wirklich relevante Merkmale zu beschränken, wurden die aufgenommenen Klänge einer gehörgerechten Analyse unterworfen.

Allerdings hat sich gezeigt, dass es nicht ausschließlich dabei blieb, dass das Instrument durch das Auswechseln des Steges verändert wurde. Eine nähere Betrachtung hat ergeben, dass das Instrument etwas tiefer gestimmt wurde, nachdem der Steg ausgewechselt worden war. Zwar blieben die Unterschiede immer kleiner als ein Halbton, jedoch haben sie bewirkt, dass die Anregungssignale nicht dieselben Frequenzen hatten. Das System Cello wurde demnach mit harmonischen Signalen beaufschlagt, deren Grundfrequenzen differiert haben. Im *Worst Case* der Note  $g'$  wurden die Grundfrequenzen 370 Hz (traditioneller Steg) bzw. 388 Hz (Premio-Steg) gemessen. Die zehnten Teiltöne dieser Klänge haben die Frequenzen 3700 Hz bzw. 3880 Hz. Aus diesem Beispiel geht hervor, dass der Übertragungsfrequenzgang des Instru-

ments mit dem (vermeintlich gleichen) Klang unter Umständen bei deutlich anderen Frequenzen „abgetastet“ worden ist. Unterschiede in den Schallsignalen rühren demnach nicht ausschließlich daher, dass der Steg das System verändert hat, sondern können auch durch die unterschiedlichen Anregungssignale bedingt sein. Dazu kommt noch, dass Intonationsunterschiede auftreten können, wenn die Tonleiter aufwärts oder abwärts gespielt wird. Da auch in Hinsicht auf das Anstreichen keine Vorgaben gemacht worden sind, lässt sich der angestrebte Zweck nicht vollständig erfüllen. Mit den vorliegenden Schallaufzeichnungen kann das eigentliche Ziel des Vergleichs somit nicht im gewünschten Maße erreicht werden.

Dennoch war das prinzipielle Vorgehen richtig. Als Lehre kann gezogen werden, dass bei zukünftigen Untersuchungen jeglicher Zeitdruck vermieden werden sollte. Äußerst akkurates Stimmen und sorgfältige, reproduzierbare Intonation sollten gewährleistet sein. Unterschiede in den Eingangssignalen müssten minimiert werden, so dass eine wohl definierte, gut reproduzierbare Anregung des Instruments gewährleistet ist. Es wäre zweckmäßig, gegebenenfalls eine instrumentelle Anstreichvorrichtung zu verwenden. Dann - und nur dann - dürfte eine Messung der beschriebenen Art Einblick in Unterschiede geben, die einzig und allein auf den Steg zurückzuführen sind.

Auch wenn die beschriebenen Untersuchungen ihren ursprünglichen Zweck nicht in vollem Umfang erfüllt haben, lassen sie doch einige Aussagen zu. Sie haben beispielsweise aufgezeigt, dass bei Weitem nicht alle physikalisch nachweisbaren Schallkomponenten für das Hören von Bedeutung sind. Sie haben auch deutlich gemacht, wie lückenhaft das Teiltonmuster eines Celloklanges sein kann. Unterhalb von etwa 100 Hz (Note G) ist der Grundton entweder gar nicht oder nur äußerst schwach enthalten. Während dieser Effekt „breitbandig“ ist, stellen sich andere Erscheinungen sehr „schmalbandig“ dar. So fehlt bei der Note f der zweite Teilton, wenn die Grundfrequenz 172 Hz ist. Ist die Grundfrequenz 5 Hz kleiner und der andere Steg eingesetzt, dann fehlen im Klang darüber hinaus auch der dritte und der vierte Teilton.

Beobachtungen dieser Art lassen es sinnvoll erscheinen, die Schallsignale weiter zu untersuchen. Dazu wurden die vorliegenden Aufnahmen „objektiv“ analysiert und einer Schnellen Fourier-Transformation (FFT) unterzogen. Diese Studien sind der Gegenstand des nächsten Kapitels.

## 4. UNTERSUCHUNG DER SCHALLSIGNALLE MITTELS FOURIER-TRANSFORMATION

Das vorhergehende Kapitel hat gezeigt, dass die aufgezeichneten Schallsignale gewisse Rückschlüsse auf das Übertragungs- und Abstrahlverhalten des Cellos zulassen. Zusätzlich zur „gehörbezogenen“ Analyse, die sich am menschlichen Hören orientiert, wurden die Schalle „objektiv“ mittels Schneller Fourier-Transformation untersucht. Näheres zur Methode und Instrumentierung findet sich in Abschnitt 2.3. Die Ergebnisse wurden auf verschiedene Arten dargestellt.

### 4.1. Grundfrequenzen der aufgenommenen Klänge

Im vorigen Kapitel war darauf hingewiesen worden, dass häufig die gespielten Noten andere als die nominalen Grundfrequenzen hatten. Die tatsächlichen Grundfrequenzen sind in den Tab. 4.I und 4.II zusammengestellt. Einige dieser Angaben haben sich bereits in Kapitel 3 gefunden.

*Tab. 4.I. Noten und wahre Grundfrequenzen in Hz der C-Dur-Tonleiter, aufsteigend bzw. absteigend gespielt mit dem Premio-Steg*

Noten der 2. Okt.	<b>C</b>	D	E	F	<b>G</b>	A	H
aufsteigend	<b>65,0</b>	73,75	82,5	86,875	<b>96,875</b>	109,375	123,75
absteigend	<b>65,0</b>	73,75	82,5	86,875	<b>96,875</b>	109,375	123,75

Noten der 3. Okt.	c	<b>d</b>	e	f	g	<b>a</b>	h
aufsteigend	130,625	<b>145,625</b>	163,125	173,125	194,375	<b>219,375</b>	248,75
absteigend	130,0	<b>145,625</b>	163,75	175,625	195,625	<b>219,375</b>	248,75

Noten der 4. Okt.	c'	d'	E'	f'	g'
aufsteigend	261,875	293,125	325,625	344,375	388,125
absteigend	261,875	294,375	328,125	345,625	388,125

Die Frequenzwerte von Tab. 4.I beziehen sich auf das Cello mit eingebautem Premio-Steg. Wenn die Tonleiter aufsteigend gespielt wurde, wichen die Grundfrequenzen in manchen Griffpositionen von denen ab, die sich bei absteigender Reihenfolge ergaben. Wurde eine Saite „leer“ gespielt, d.h. ohne dass sie mit einem Finger der linken Hand durch Pressen gegen das Griffbrett verkürzt wurde, ergaben sich solche Unterschiede naturgemäß nicht. Die Bezeichnungen und Frequenzen der ungegriffenen Klänge sind fett gedruckt.

Um den anderen Steg einzusetzen, mussten die Geigenbauer die Saiten entspannen. Nachdem der Premio-Steg gegen den traditionellen Steg ausgewechselt worden war, wurde das Instru-

ment aufs Neue gestimmt. Dies geschah unter Zeitdruck mit der Folge, dass das Cello danach zwar „in sich“ richtig, jedoch etwa einen Viertelton zu tief gestimmt war; vgl. Tab. 4.II. Dass dadurch direkte Vergleiche der Klänge erschwert wurden, da die Spektren der Klänge nun gegeneinander versetzt und gespreizt waren, ist in Abschnitt 3.3 besprochen worden. Der Versatz der Teilfrequenzen, wie er in geringerem Ausmaß auch beim Aufwärts- und Abwärts-spielen der Tonleiter zu beobachten war, könnte aber auch Vorteile bieten. Dies wäre der Fall, wenn die Absicht verfolgt wird, einen Übertragungs-Frequenzgang möglichst lückenlos abzutasten. In Tab. 4.II sind für die Messung mit dem traditionellen Steg die Grundfrequenzen aufgeführt; wiederum sind die leer gespielten Saiten durch Fettdruck hervorgehoben.

*Tab. 4.II. Noten und wahre Grundfrequenzen in Hz der C-Dur-Tonleiter, aufsteigend bzw. absteigend gespielt mit dem traditionellen Steg*

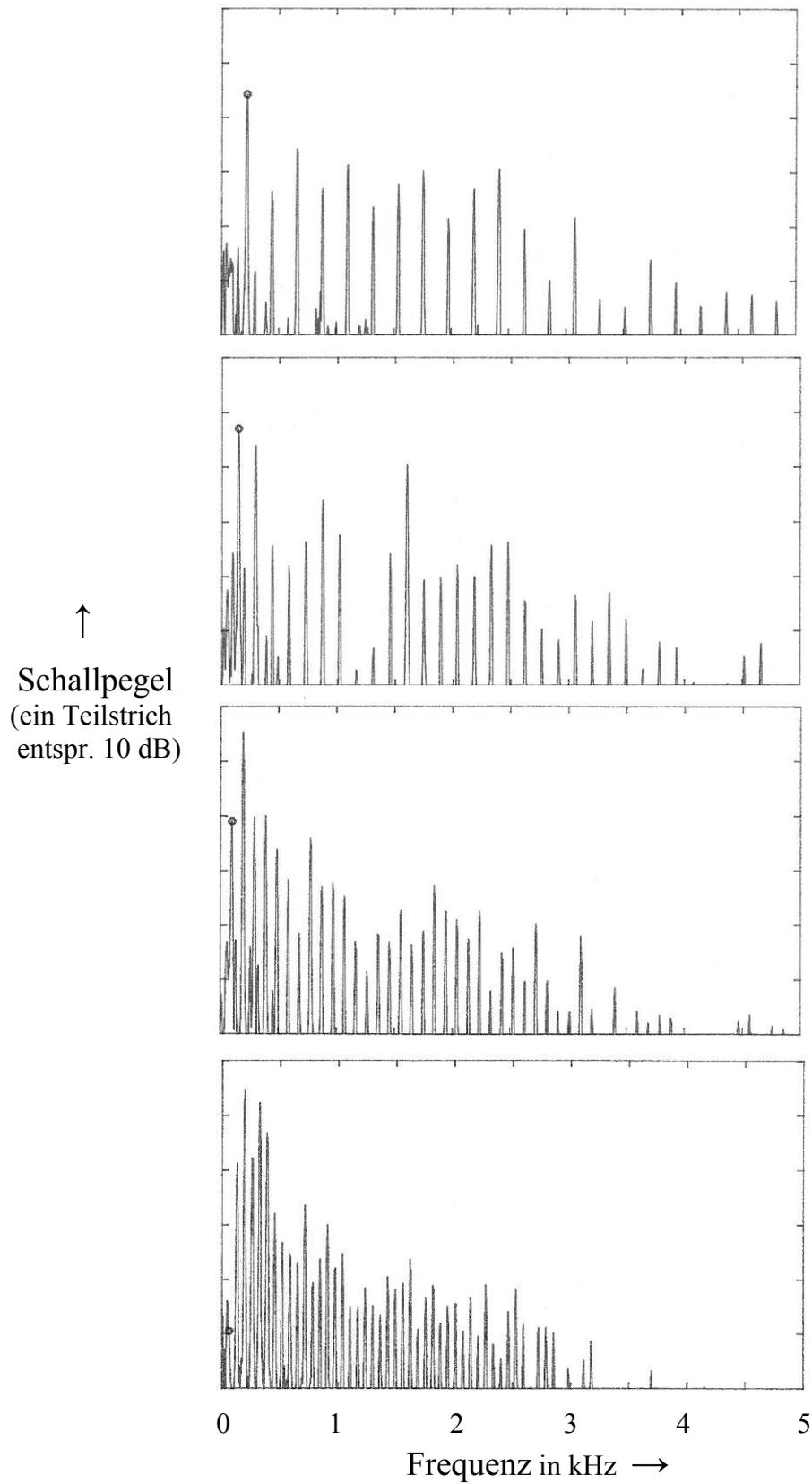
Noten der 2. Okt.	<b>C</b>	D	E	F	<b>G</b>	A	H
aufsteigend	<b>63,75</b>	70,625	80,0	83,125	<b>95,0</b>	105,625	120,0
absteigend	<b>63,75</b>	70,625	80,625	84,375	<b>95,0</b>	105,625	120,625
Noten der 3. Okt.	c	<b>d</b>	e	f	g	<b>a</b>	h
aufsteigend	123,75	<b>142,5</b>	158,75	168,125	188,75	<b>213,75</b>	239,375
absteigend	125,0	<b>142,5</b>	158,75	168,75	188,125	<b>213,75</b>	237,5
Noten der 4. Okt.	c'	d'	E'	f'	g'		
aufsteigend	252,5	281,25	315,625	331,875	370,625		
absteigend	251,875	281,875	313,75	331,875	370,0		

## 4.2. Schallsignale der leer gespielten Saiten

Vor dem Spielen der Tonleiter strich der Instrumentenbauer die vier Saiten an, ohne sie zu greifen. Die Grundfrequenzen der Noten C, G, d und a können den Tab. 4.I und 4.II entnommen werden. In den Spektren von Abb. 4.1 sind die zugehörigen Grundtöne durch einen aufgesetzten Markierungspunkt hervorgehoben.

### 4.2.1. Der Premio-Steg

Für die vier Saiten samt Premio-Steg erhält man die Spektren von Abb. 4.1. Nach oben ist der Pegel mit einer Dynamik von 60 dB (entsprechend dem Verhältnis 1000:1 zwischen dem größten und dem kleinsten dargestellten Schalldruckwert) aufgetragen. Die Teilung der Ordinate entspricht 10 dB. Nach rechts läuft die Frequenz von 0 Hz bis 5000 Hz mit Teilstrichen in Abständen von 500 Hz. Die Diagramme sind so angeordnet, dass sich unten die tiefen und oben die hohen Noten finden. Abb. 4.2 des nächsten Abschnitts ergibt sich, wenn der Premio-Steg entnommen und in das Instrument stattdessen der traditionelle Steg eingebaut ist.



*Abb. 4.1. Klänge der vier ungegriffenen Saiten; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der Schallpegel in einem Bereich von 60 dB über der Frequenz aufgetragen.  
Von oben nach unten: a-, d-, G- und C-Saite.*

### 4.2.2. Der traditionelle Steg

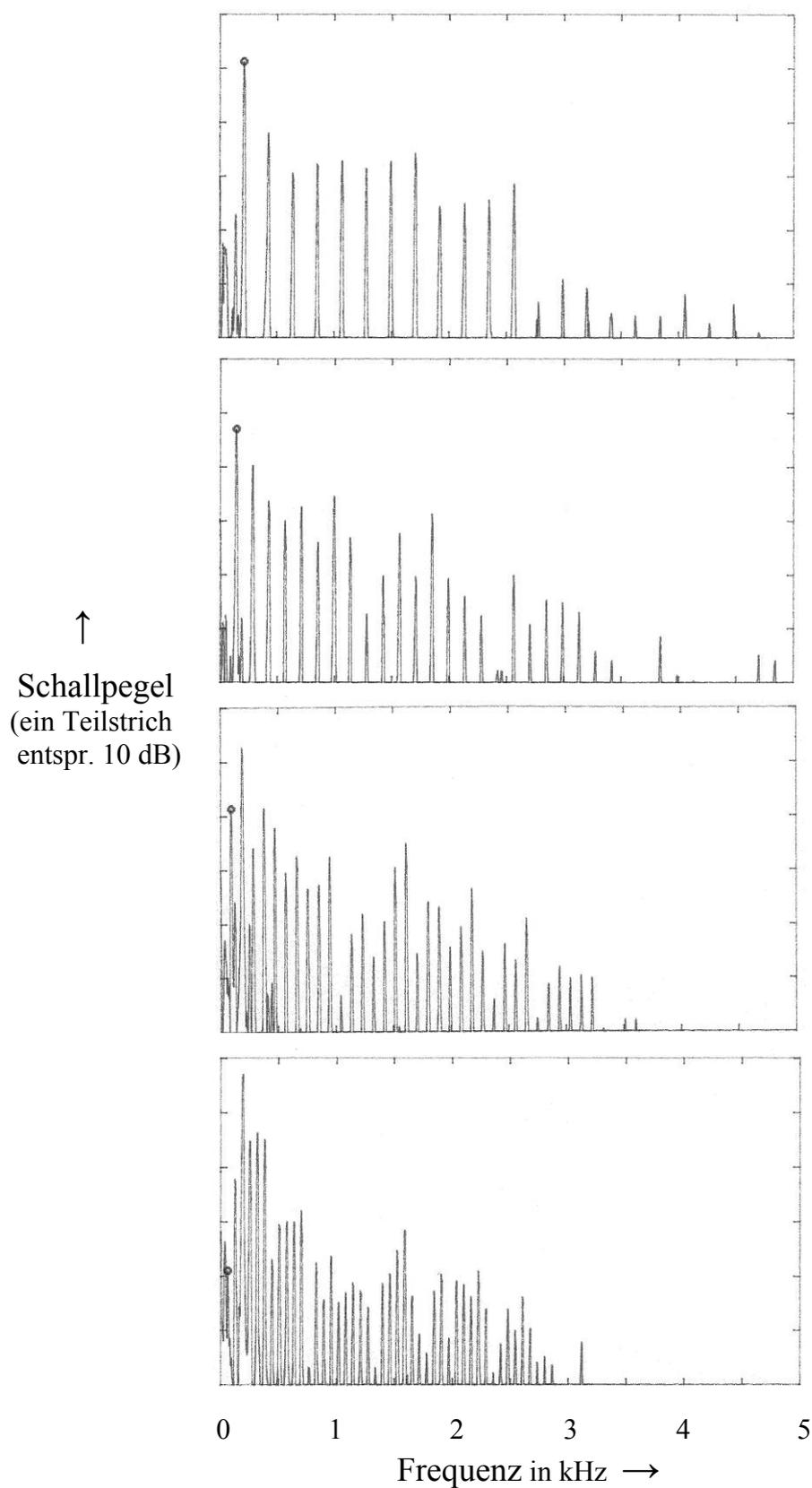


Abb. 4.2. Klänge der vier ungegriffenen Saiten; eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der Schallpegel in einem Bereich von 60 dB über der Frequenz aufgetragen. Von oben nach unten: a-, d-, G- und C-Saite.

### 4.2.3. Unterschiede und Gemeinsamkeiten

Die Diagramme der Abb. 4.1 und 4.2 sind insofern an der mathematisch motivierten Signalanalyse orientiert, als die Frequenzskala an der Abszisse linear geteilt ist und die Abtastwerte auf dieser linearen Skala gleiche Abstände haben. An der Ordinate ist der Pegel angetragen, der dem Hören besser angepasst ist als der Schalldruck. Im Gegensatz zu den Diagrammen von Kapitel 3 ist die spektrale Verdeckung hier naturgemäß nicht berücksichtigt. Dies zeigt sich in der großen Zahl von Teiltönen. Es werden sehr viel mehr Spektralkomponenten sichtbar, als für das Hören relevant ist. So zählt man für die a-Saite des Premio-Steges (Abb. 4.1 oben) 22 Teiltöne; für das Hören sind davon gemäß Abb. 3.7.b höchstens zwölf von Belang.

Andererseits geben die Spektren der Abb. 4.1 und 4.2 sehr anschaulich die Struktur eines harmonischen Klanges wieder. Dieser besteht aus einem (manchmal nur sehr schwachen; siehe die unteren Diagramme) Grundton und zahlreichen weiteren Teiltönen. Deren Frequenzen sind exakt ganzzahlige Vielfache der jeweiligen Grundfrequenzen, die sich in den Tab. 4.I und 4.II finden. Die Abb. 4.1 und 4.2 machen auch deutlich, dass die Schallsignale eine Art Formant-Charakteristik aufweisen. Der Pegel der Teiltöne fällt mit wachsender Frequenz nicht gleichförmig ab. Vielmehr bilden sich Täler und Berge aus. Möglicherweise offenbaren sich hierin Unterschiede zwischen den beiden Stegen. Die Abb. 4.1 und 4.2 lassen erkennen, dass sich unterschiedliche Formanten vor allem oberhalb von etwa 1 kHz ausbilden.

In den folgenden Abschnitten wird jedoch bevorzugt der tieffrequente Bereich untersucht. Damit soll der Anschluss an frühere Untersuchungen hergestellt werden, in denen die Schwingungen (Fleischer 2009a) des Cellos und die Stegadmittanz (Fleischer 2009b) untersucht worden sind. Dabei war das Hauptaugenmerk auf Frequenzen bis 1000 Hz gerichtet. Aus diesem Grund werden die weiteren Untersuchungen auf den Bereich zwischen der Grundfrequenz der C-Saite und höchstens 1000 Hz konzentriert.

## 4.3. Summarische Auswertung mehrerer Klänge

Um Merkmale der Schalle hervorzuheben, die weniger auf das Signal der Saite, sondern vielmehr auf das System Steg/Korpus zurückzuführen sind, wurden mehrere Spektren in ein Diagramm geschrieben. Am Beispiel des Premio-Steges wurden verschiedene Varianten erprobt.

### 4.3.1. Die vier leer gespielten Saiten

Für Frequenzen bis 1000 Hz sind vier Spektren zu einem Diagramm zusammen gefasst. Sie beziehen sich auf die vier ungegriffenen Saiten und umfassen die Noten C (gemäß Tab. 4.I: Grundfrequenz 65,0 Hz), G (96,875 Hz), d (145,625 Hz) und a (219,375 Hz).

In Abb. 4.3 ist an der Ordinate – wie auch in den Abb. 4.1 und 4.2 – der Schalldruckpegel in einer Spanne von 60 dB aufgetragen. Da ein Vergleich mit der Konduktanz am Steg (Fleischer 2009b) angestrebt wird, ist der Bereich der Frequenzen auf 1000 Hz beschränkt. In diesem Bereich zeigen sich beim Klang

- der Note C maximal fünfzehn Teiltöne,
- der Note G maximal zehn Teiltöne,
- der Note d maximal sechs Teiltöne und
- der Note a maximal vier Teiltöne.

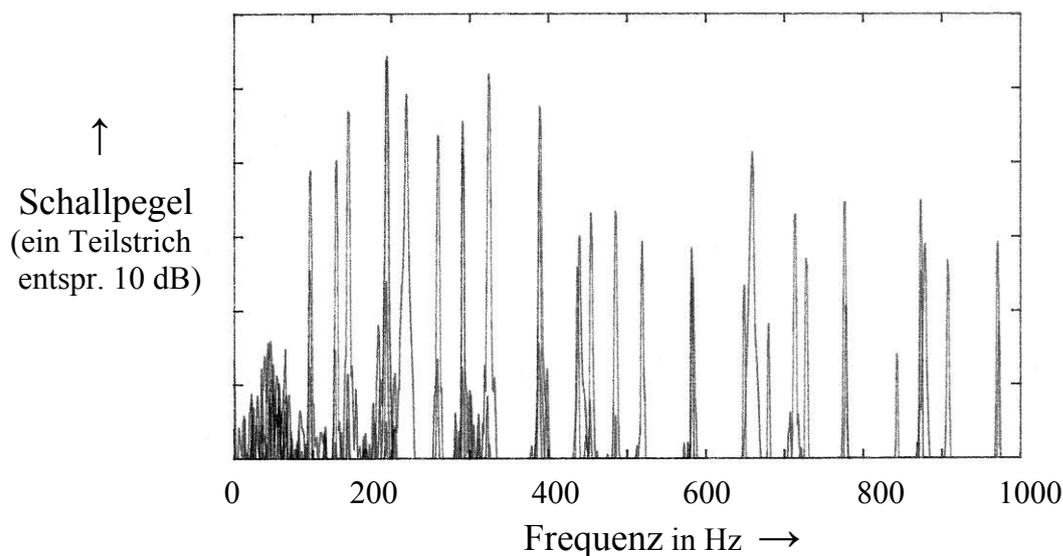


Abb. 4.3. Klänge der vier leeren Saiten; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

Um den Vergleich mit Messkurven der Konduktanz weiter zu vereinfachen, wurde zusätzlich auf der Ordinate die lineare Größe aufgetragen. Abb. 4.4 zeigt den Schalldruck, normiert auf einen geeigneten Bezugswert, in Abhängigkeit von der Frequenz. Es ist derselbe Sachverhalt wie in Abb. 4.3 dargestellt. Beide Diagramme erscheinen etwas „schwach besetzt“. Die Methode verspricht Erfolg; jedoch ist anzustreben, mehr als nur vier Klänge zu betrachten.

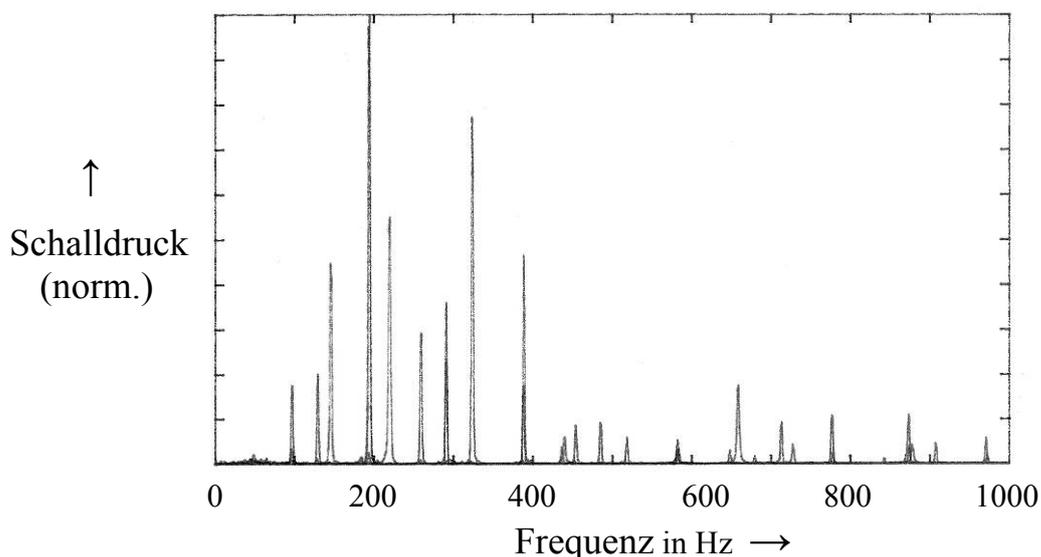


Abb. 4.4. Klänge der vier leeren Saiten; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

### 4.3.2. Aufsteigende C-Dur-Tonleiter

In den Abb. 4.5 und 4.6 ist in doppelt-linearer Darstellung der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen. Abb. 4.5 gilt für sämtliche neunzehn Klänge der aufsteigenden Tonleiter; vgl. Tab. 4.I. Im Vergleich zu Abb. 4.4 ist das Diagramm nun erkennbar dichter besetzt.

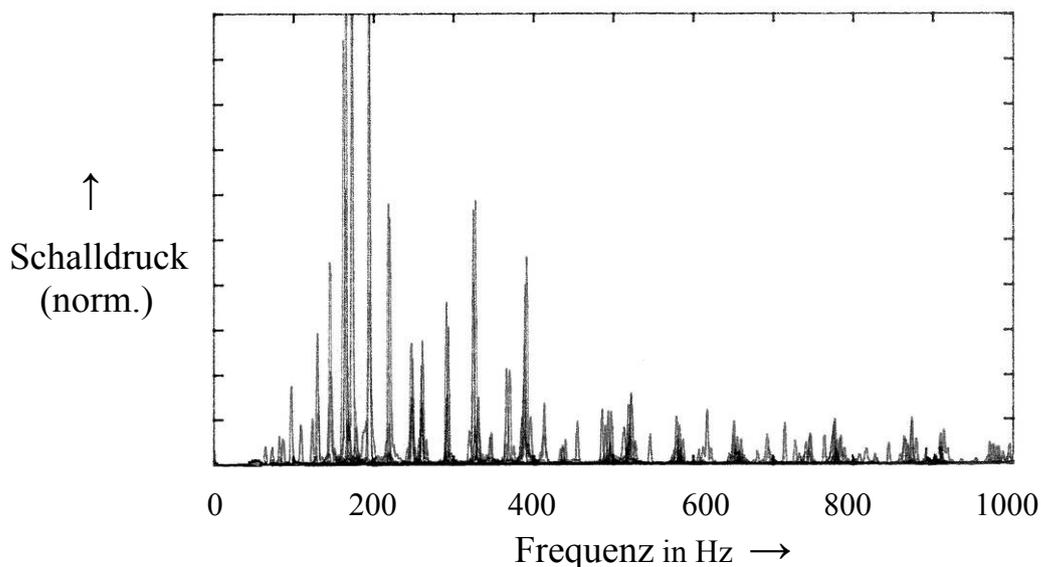


Abb. 4.5. Sämtliche neunzehn Klänge; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Tab. 4.I hat deutlich gemacht, dass die Grundfrequenzen der Noten in der dritten Oktave nicht nur theoretisch, sondern auch in der Praxis doppelt so groß sind wie die in der zweiten Oktave. Diejenigen in der vierten Oktave sind viermal so groß. Das bedeutet: Wird eine Note eine Oktave höher gespielt, dann liegen ihre Teiltöne auf der Frequenzachse dort, wo auch Teiltöne der tiefer gespielten Note liegen. Der Übertragungs-Frequenzgang des Instruments wird demnach bei solchen Frequenzen „abgetastet“, die auch im Spektrum des tieferen Klanges enthalten sind, nur beim höheren Klang eben weniger dicht. Sollen Unterschiede, die von

- nicht ganz reiner Stimmung oder Intonation,
- anderer Lage der Endpunkte der Saite auf Griffbrett und Steg und
- anderer Verteilung der Amplituden im Anregungsspektrum

herrühren, dabei außer Betracht bleiben, so deutet alles darauf hin, dass die Anzahl der Klänge verringert werden kann, ohne dass ein großer Verlust an Information zu erwarten wäre.

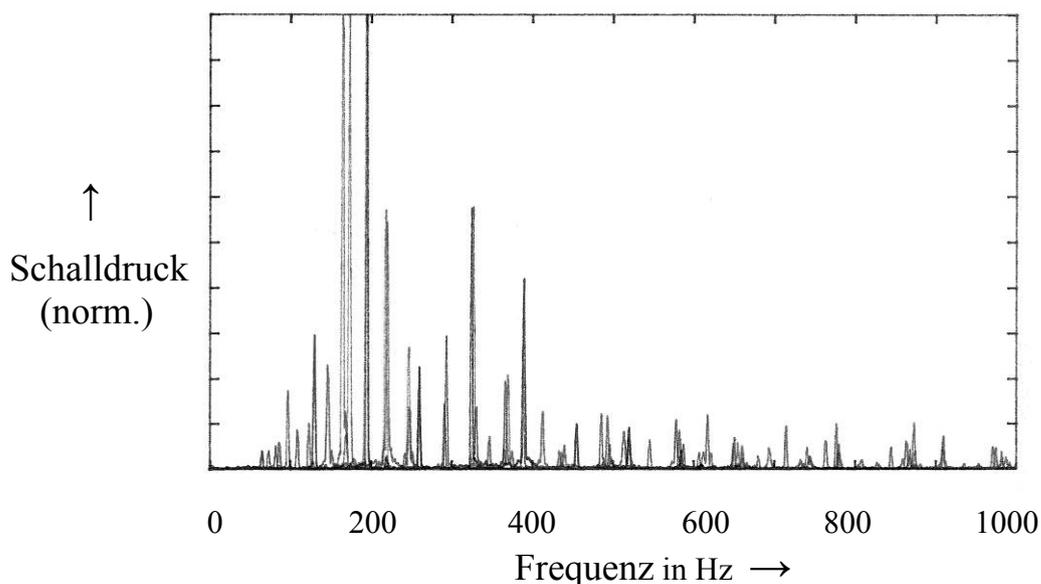
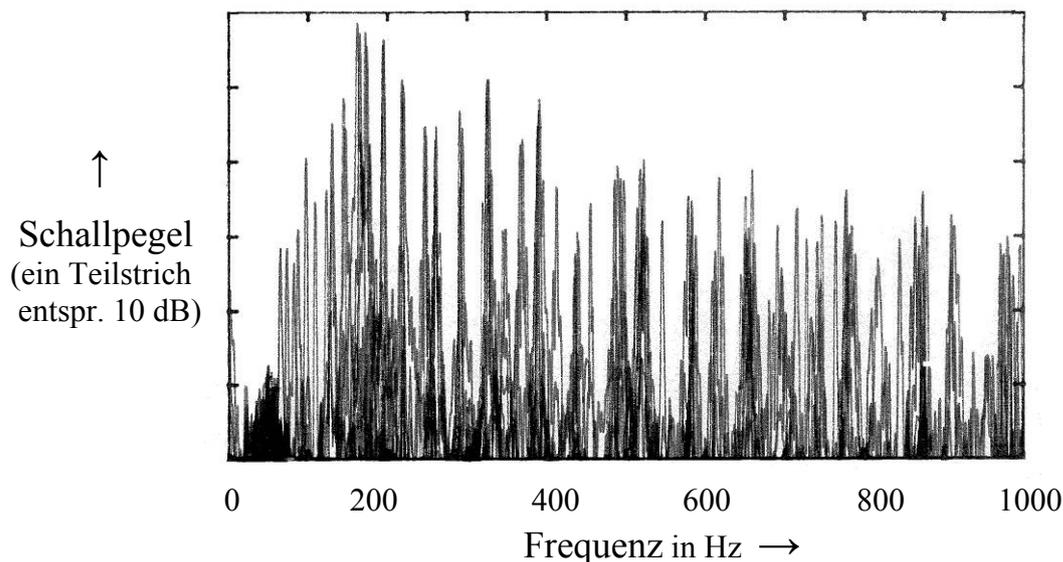


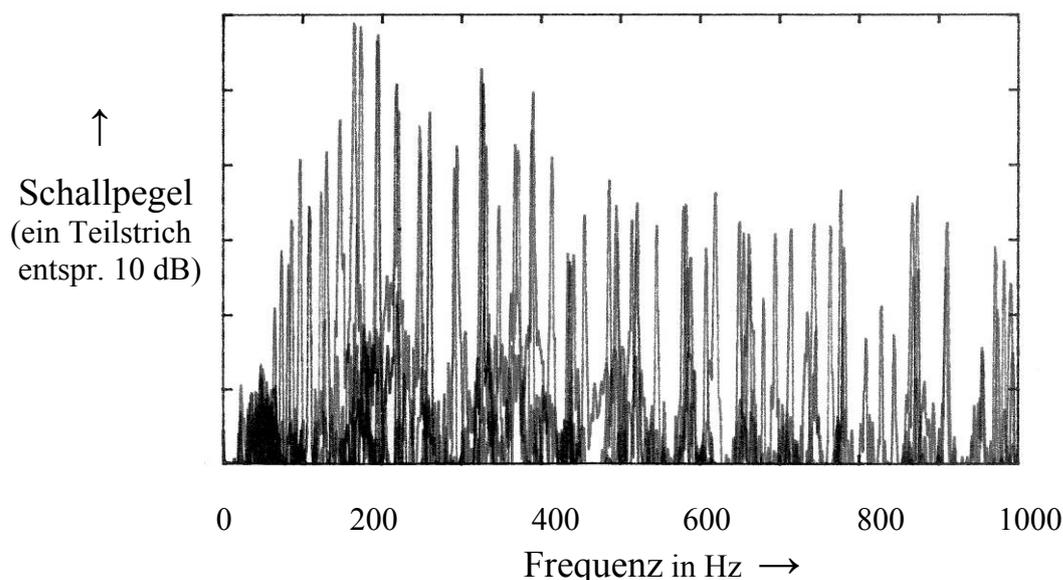
Abb. 4.6. Sieben Klänge der zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Abb. 4.6 bezieht sich auf die sieben Klänge der zweiten Oktave; vgl. Tab. 4.I. Der Vergleich mit Abb. 4.5 zeigt große Ähnlichkeit. Die große Zeitersparnis bei der Beschränkung auf die Noten einer Oktave wiegt auf, dass bei höheren Frequenzen geringfügig weniger Messwerte auftauchen. Ist an der Ordinate nicht der Schallpegel, sondern - wie in den Abb. 4.5 und 4.6 - der Schalldruck aufgetragen, sind die Unterschiede kaum zu erkennen.



*Abb. 4.7. Sämtliche neunzehn Klänge; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.*

Die oben genannten Unterschiede in den Anregungssignalen, insbesondere diejenigen infolge unreiner Intonation, werden vor allem bei hohen Frequenzen sichtbar. Die Abb. 4.4 bis 4.6 haben gezeigt, dass die hochfrequenten Schallanteile wesentlich kleinere Amplituden als die tieffrequenten haben, so dass sie im linearen Maßstab nur schwer zu erkennen sind. Wird an der Ordinate allerdings die logarithmische Größe, d.h. der Pegel aufgetragen, dann stellen sich auch schwächere Teiltöne deutlich dar. Die Abb. 4.7 und 4.8 belegen dies.



*Abb. 4.8. Sieben Klänge der zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.*

In Abb. 4.7 sind die Schallpegel-Frequenz-Spektren aller Klänge der gesamten aufsteigenden Tonleiter übereinander geschrieben. Der Pegelbereich von 60 dB entspricht dem Verhältnis 1000:1. Auch hier zeigt der Vergleich, dass in Abb. 4.8 die wesentliche Information von Abb. 4.7 enthalten ist. Da mit dem deutlich höheren Messaufwand kein nennenswerter Zuwachs an Erkenntnis verbunden ist, deutet sich auch hier an, dass es ausreicht, die Klänge der zweiten Oktave auszuwerten. Dies wird im folgenden Abschnitt praktiziert.

## 4.4. Auswertung von sieben Klängen der zweiten Oktave

Im Weiteren werden die Spektren der sieben Noten C bis H in ein gemeinsames Diagramm geschrieben. Für die Normierung wurde ein anderer Bezugswert als im vorhergehenden Abschnitt verwendet, jedoch für alle Diagramme des Abschnitts 4.4 einheitlich beibehalten. Neben dem aufsteigenden Teil der Tonleiter wurde nun auch der absteigende Teil ausgewertet.

### 4.4.1. Schalldruck-Frequenz-Spektren

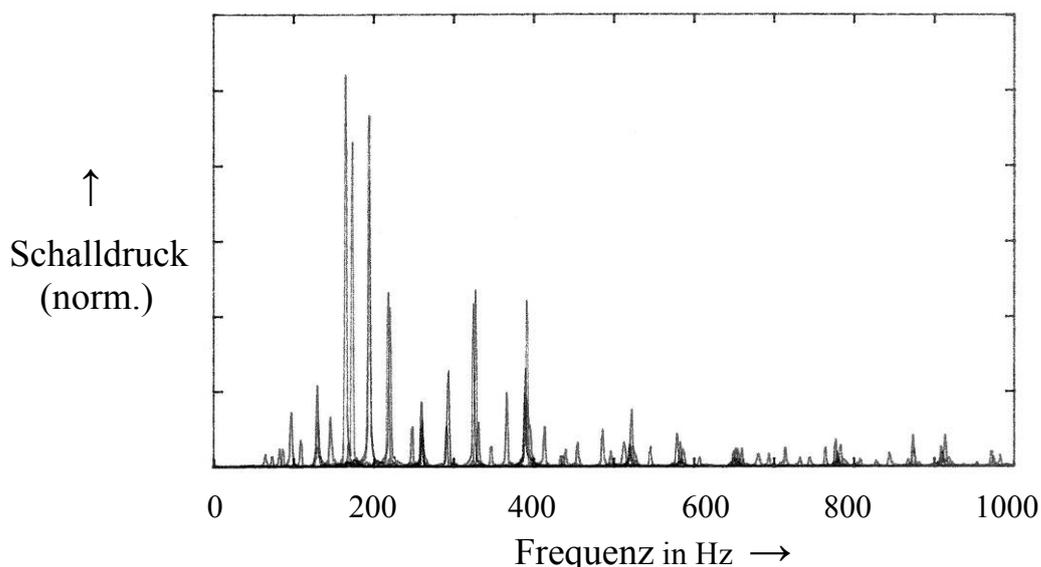


Abb. 4.9. Sieben Klänge der aufsteigenden zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Die Abb. 4.9 und 4.10 beziehen sich auf das Cello mit dem neuartigen Premio-Steg. In Hinsicht auf die Frequenzen hat der Spieler die Tonleiter abwärts nicht anders intoniert als aufwärts. Tab. 4.I besagt, dass die Grundfrequenzen der Noten identisch sind. Trotzdem zeigen sich in den Abb. 4.9 und 4.10 einige Unterschiede. Diese betreffen nicht die Frequenzen, bei denen Teiltöne auftreten, sondern deren Amplituden. Besonders fällt auf, dass die Teiltöne knapp unterhalb von 200 Hz sich verschieden stark ausbilden. Lässt der Spieler die Tonleiter ansteigen, ergibt sich Abb. 4.9. Die starken Teiltöne erreichen das 0,6- bis 0,8-Fache des Bezugswertes. Spielt er sie abwärts, erhält man Abb. 4.10. Dort sind zwei dieser Teiltöne größer als der Bezugswert, auf den der Schalldruck normiert wurde.

Die Erklärung dafür ist, dass der Spieler gleiche Noten offenbar nicht exakt gleich intoniert hat. Möglicherweise hat er den Bogendruck, die Anstreichstelle, die Streichrichtung o.ä. geändert, so dass das anregende Saitensignal zwar Teilschwingungen gleicher Frequenz, nicht

aber gleicher Amplitude enthielt. Das Cello stellt ein lineares System dar. Wird die Amplitude eines Teilsignals am Eingang halbiert, so halbiert sich auch das zugehörige Schallsignal am Ausgang. Im vorliegenden Fall wurde ein und dasselbe System ganz offensichtlich mit unterschiedlichen Eingangssignalen beaufschlagt. Folgerichtig hat dies auch unterschiedliche Ausgangssignale zur Folge. Daraus folgt, dass die Ergebnisse des vorliegenden Kapitels hinsichtlich der Amplituden mit der gebotenen Vorsicht interpretiert werden sollten.

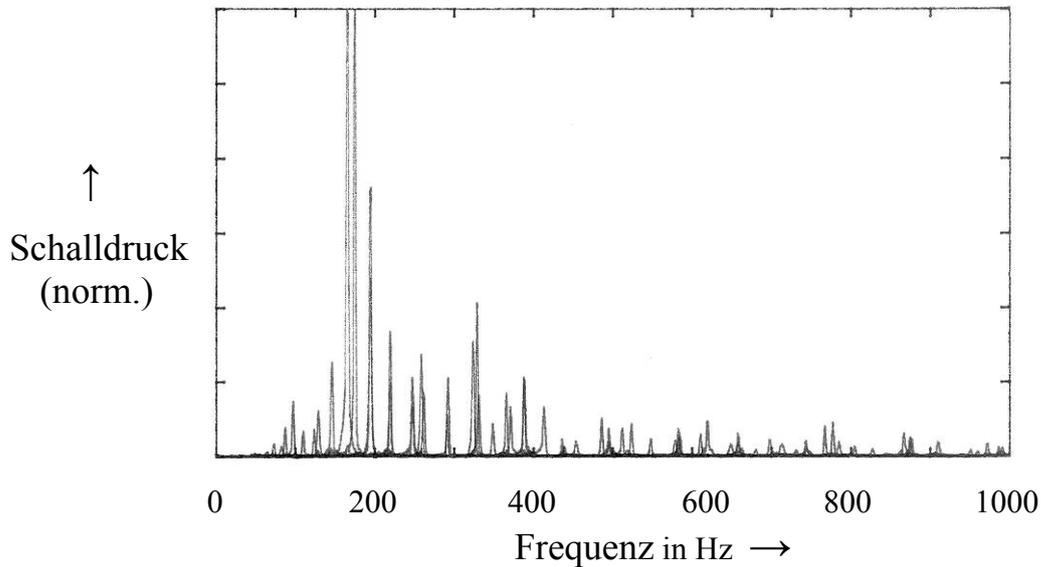


Abb. 4.10. Sieben Klänge der absteigenden zweiten Oktave (H bis C); eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Die Abb. 4.11 und 4.12 haben sich mit den Klängen ergeben, die aufgezeichnet wurden, nachdem in das Cello der traditionelle Steg eingesetzt worden war. Abb. 4.11 bezieht sich auf die aufsteigende, Abb. 4.12 auf die absteigende Tonleiter. Hinsichtlich der Frequenzen, bei denen sich Teiltöne ausbilden, ähneln sich die beiden Diagramme stark. Wie Tab. 4.II lehrt, hat der Spieler die Frequenzen beim Auf- bzw. Abwärtsspielen der Tonleiter nicht vollständig, aber doch weitgehend reproduziert. Jedoch zeigen sich auch hier Abweichungen in den Amplituden, mit denen sich die Teiltöne ausbilden. Die Diskrepanzen sind von einer ähnlichen Größenordnung wie beim Premio-Steg (Abb. 4.9 und 4.10).

Ein Vergleich der vier Diagramme (Abb. 4.9 bis 4.12) dieses Abschnitts ergibt, dass zumindest in den Schalldruck-Frequenz-Spektren die Unterschiede zwischen auf- und abwärts gespielter Tonleiter nicht größer und nicht kleiner sind, als zwischen den beiden Stegen. Demnach erweist sich die FFT-Analyse der gespielten Klänge als nicht aussagekräftig genug, um vergleichsweise kleine Modifikationen am Instrument – wie z.B. das Einbringen eines anderen Steges – bewerten zu können.

Es ist geplant, die Schallspektren mit der Stegkonduktanz zu vergleichen. Deshalb ist an der Ordinate, ebenso wie bei den vorliegenden Konduktanz-Diagrammen (Fleischer 2009b), eine lineare Größe aufgetragen. Dies führt dazu, dass zahlreiche Spektralanteile kaum mehr zu erkennen sind. Abschließend sollte daher noch überprüft werden, ob sich eine Darstellung des Schallpegels, der das logarithmische Maß für den Schalldruck ist, möglicherweise besser eignet.

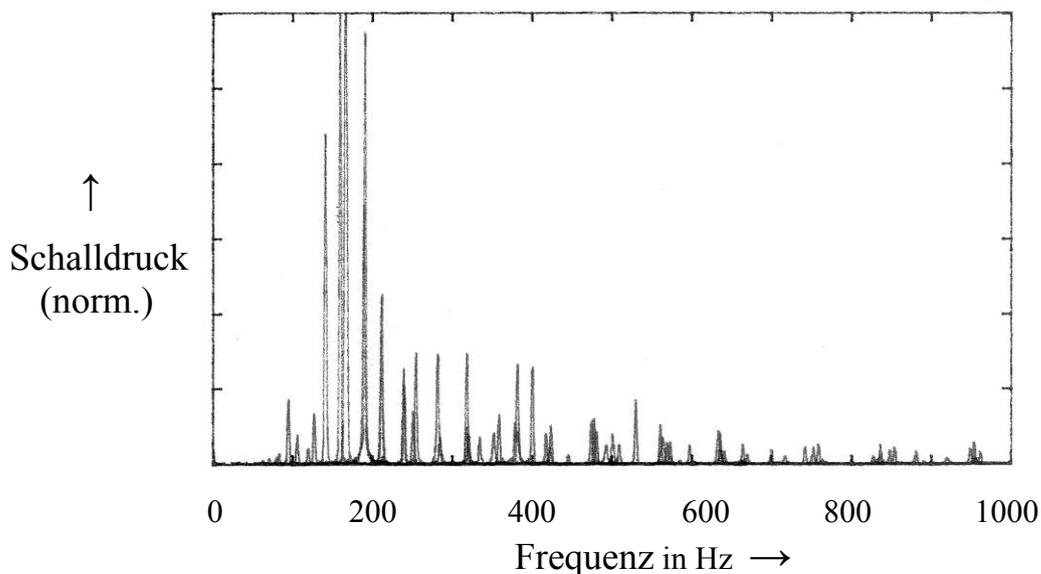


Abb. 4.11. Sieben Klänge der aufsteigenden zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

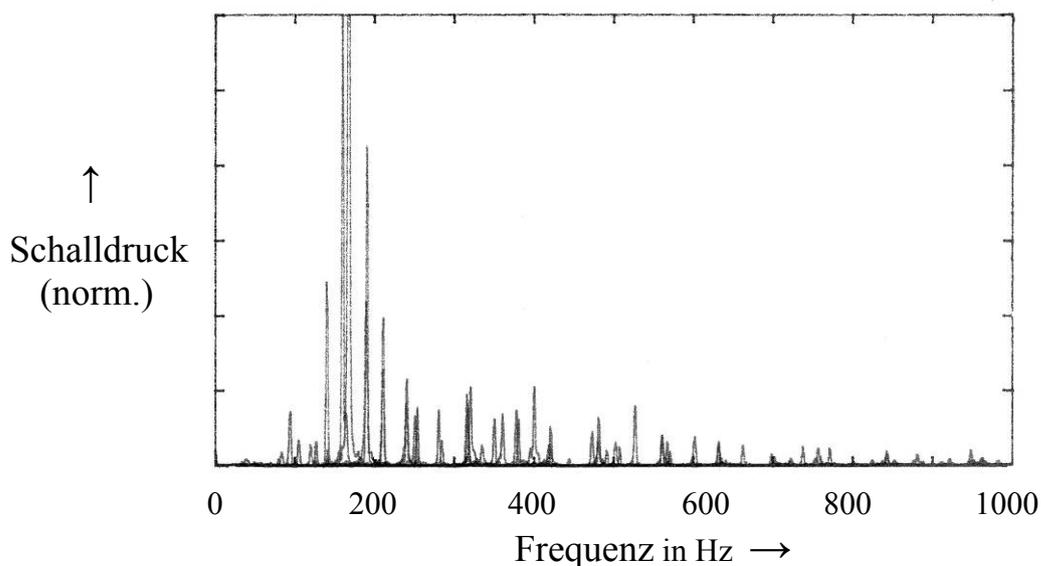


Abb. 4.12. Sieben Klänge der absteigenden zweiten Oktave (H bis C); eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

#### 4.4.2. Schallpegel-Frequenz-Spektren

Die folgenden Abb. 4.13 bis 4.16 geben den Schallpegel in Abhängigkeit von der Frequenz wieder. Die Dynamik ist einheitlich 40 dB entsprechend dem Verhältnis 100:1. Zwar ist der Sachverhalt derselbe wie in den Abb. 4.9. bis 4.12; infolge der Logarithmierung werden jedoch die stärksten Schallanteile weniger hervorgehoben und die schwächeren Teiltöne deutlicher sichtbar. Aus der Psychoakustik ist bekannt, dass sich in Hinsicht auf das Hören der Pegel als Messgröße besser eignet als der Schalldruck.

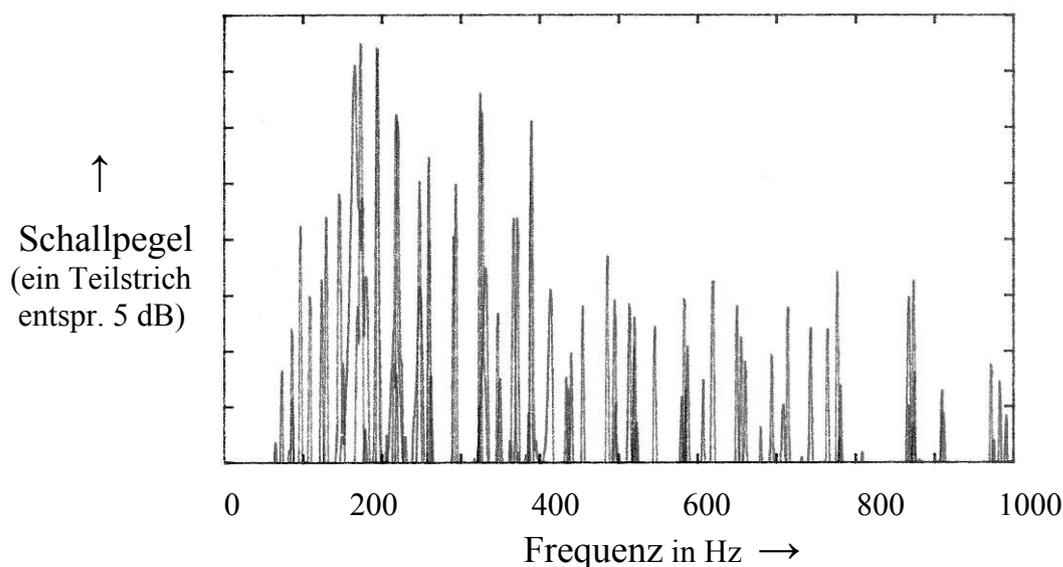


Abb. 4.13. Sieben Klänge der aufsteigenden zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

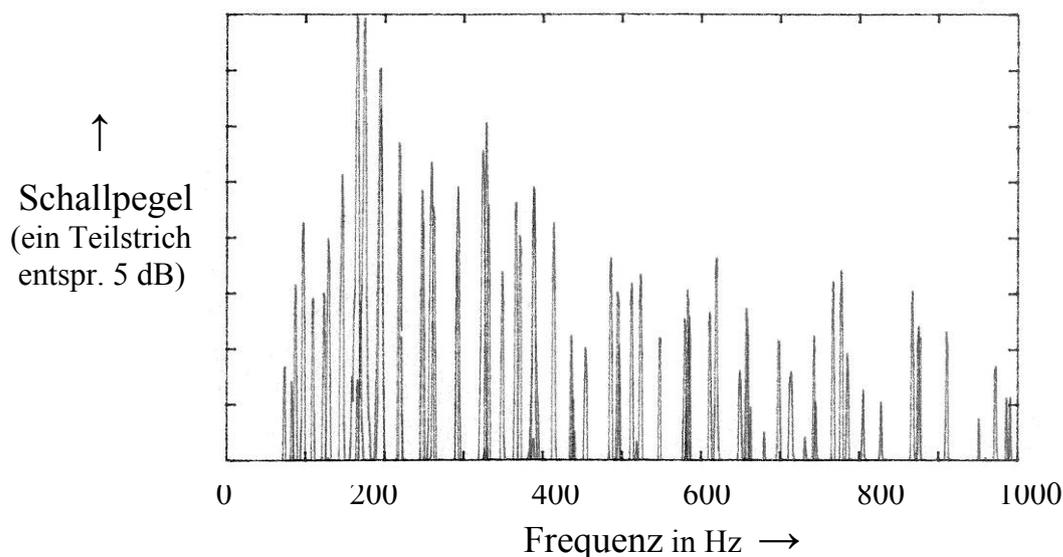


Abb. 4.14. Sieben Klänge der absteigenden zweiten Oktave (H bis C); eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

Die beiden Abb. 4.13 und 4.14 geben die Schallpegel-Spektren der Noten der zweiten Oktave für den Fall wieder, dass der neuartige Premio-Steg eingesetzt ist. Rein optisch unterscheiden sich die beiden Diagramme nur unwesentlich voneinander. Beide weisen ausgeprägte Hauptmaxima knapp unterhalb von 200 Hz auf. Die Frequenzen, bei denen Teiltöne auftreten, stimmen überein. Die Amplituden unterscheiden sich zum Teil. Durch die Kompression, die das Logarithmieren bewirkt, prägen sich die Abweichungen aber nicht so deutlich aus wie in den Abb. 4.9 und 4.10.

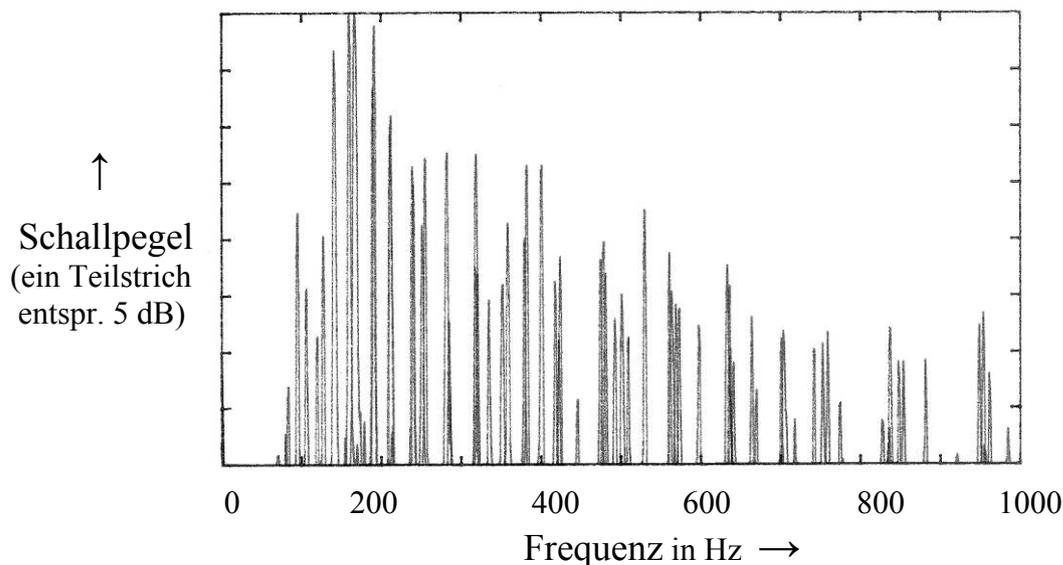


Abb. 4.15. Sieben Klänge der aufsteigenden zweiten Oktave (C bis H); eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

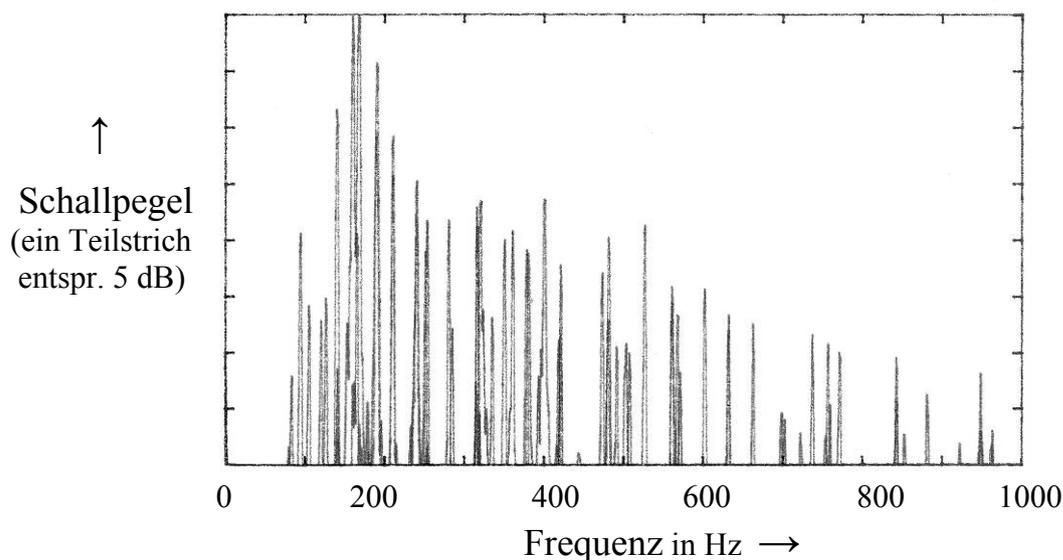


Abb. 4.16. Sieben Klänge der absteigenden zweiten Oktave (H bis C); eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

Die oben getroffenen Aussagen gelten auch für die Abb. 4.15 und 4.16. Beim traditionellen Steg waren die Saiten etwas tiefer gestimmt als beim vorher betrachteten Premio-Steg. Demnach wird der Übertragungs-Frequenzgang des Systems an anderen Stellen abgetastet. Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen für den Premio-Steg wird dadurch erschwert bzw. unmöglich gemacht. Insgesamt zeigt sich eine große Ähnlichkeit zwischen den Abb. 4.13 bis 4.16. Lediglich bei sehr hohen Frequenzen oberhalb von etwa 800 Hz sind erwähnenswerte Abweichungen zu beobachten. Es verfestigt sich die Beobachtung, dass mit Unterschieden zwischen den beiden Stegen weniger bei tiefen, als vielmehr im Bereich der höheren Frequenzen zu rechnen ist.

## 4.5. Zusammenfassende Bemerkung

Zunächst liegt kein Gedanke näher, als ein Musikinstrument anhand seines Endprodukts, nämlich des musikalischen Schalles, zu untersuchen. Dazu wurde das akustische Signal analysiert, im vorigen Kapitel „gehörbezogen“, im vorliegenden Kapitel „objektiv“ mittels FFT. Die Klänge, die auf den leeren Saiten gespielt werden, liefern ein etwas „schwach besetztes“ Spektrum. Es ist anzustreben, mehr als nur vier Klänge zu betrachten. Es hat sich als erfolgversprechend erwiesen, die sieben Noten der zweiten Oktave der diatonischen Tonleiter von C bis H zu analysieren.

Aus dem Ausgangssignal auf die Eigenschaften des Systems und insbesondere auf Eigenheiten des jeweils eingesetzten Steges zu schließen, kann aber nur gelingen, wenn man das Eingangssignal im Einzelfall kennt bzw. wenn das Eingangssignal stets dasselbe ist. Dies war im vorliegenden Fall offenkundig nicht der Fall. Die Varianz, die vom Spieler ausgeht, hat sich als zu groß erwiesen. Eine mögliche Abhilfe könnte darin bestehen, eine praxisnahe mechanische Anstreichvorrichtung zu verwenden, um die Saiten zum Schwingen zu bringen. Eine andere Möglichkeit wäre, das Instrument mit einem elektro-mechanischen Schwingerreger am Steg anzuregen und den dadurch erzeugten Schalldruck zu messen, was in einigen Laboratorien tatsächlich praktiziert wird.

Eine weniger umfassende Methode ist, am Steg anzuregen, die Bewegung des Steges zu messen und ins Verhältnis zur anregenden Kraft zu setzen. Mit dieser Messung der Stegadmittanz bzw. -konduktanz könnten einige Nachteile der hier praktizierten Methode vermieden werden: So kann das Anregungssignal in weiten Grenzen gewählt werden. Es könnte ein Gleitsinus, eine Maximalfolge, ein echtes Rauschen oder – wie bei den eigenen Experimenten verwendet – ein periodisches Rauschen sein. Da ständig der Quotient von Ausgangs- und Eingangssignal gebildet wird, entfällt die Notwendigkeit, das Eingangssignal konstant zu halten.

Mehreren Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass nur gemessen wird, was in das Instrument hinein gehen kann. Was davon tatsächlich als Schall herauskommt, bleibt noch offen. Darüber hinaus wird auch nur untersucht, was in einer Richtung und an einer Stelle in das Instrument eingebracht werden kann. Sinnvollerweise werden dafür die Richtung und der Ort gewählt, an dem eine Saite den Korpus vorwiegend zum Schwingen bringt. Dabei sollte allerdings nicht vergessen werden, dass eine Saite an *zwei* Punkten Kontakt mit dem Instrumentenkörper hat. Ob unter diesem Aspekt die Stegkonduktanz „die ganze Wahrheit“ umfasst, soll im nächsten Kapitel durch Vergleiche überprüft werden. Aus den Beobachtungen bei den Klangspektren am Beginn dieses Kapitels folgt ein abschließender Hinweis: Mit Blick auf Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Stegformen erscheint es angebracht, zukünftig den „Formanten“ bei Frequenzen oberhalb von 1000 Hz mehr Aufmerksamkeit zu schenken.

## 5. KONDUKTANZ AM STEG

Wie die Messungen, deren Ergebnisse im vorliegenden Kapitel besprochen werden, durchgeführt wurden, ist in Abschnitt 2.2 beschrieben. In einem früheren Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik (Fleischer 2009b) wurde das dabei angewandte Vorgehen als Methode II bezeichnet. Die Admittanz wurde parallel zur Decke des Cellos gemessen. Ihr Realteil, die Konduktanz, berechnet sich aus der Eingangskraft und derjenigen Komponente der Schwinggeschwindigkeit, die in gleicher Phase wie die anregende Kraft ist.

Herangezogen werden dazu Ergebnisse eigener Messungen an den beiden Stegen des Cellos. Der Frequenzbereich war dabei auf 1000 Hz beschränkt. Bereits bei der Interpretation der betreffenden Experimente hatte sich herausgeschält, dass sich die Stege bei diesen relativ tiefen Frequenzen nur unwesentlich unterscheiden. Erwähnenswerte Unterschiede sind erst bei höheren Frequenzen zu erwarten.

### 5.1. Ergebnisse von Messungen an den beiden Stegen

In den folgenden Abbildungen sind Ergebnisse einander gegenübergestellt, die am Auflagepunkt der jeweils genannten Saite ermittelt wurden. Das untere Diagramm gilt für den Fall, dass das Cello mit dem neuartigen Premio-Steg versehen war. Das obere Diagramm bezieht sich auf den Fall, dass unter sonst gleichen Bedingungen der traditionelle Steg eingesetzt war. Ein Unterschied beim Messen bestand in der Frequenzauflösung. Aus Zeitgründen war bei der Messung am traditionellen Steg die Auflösung weniger fein und betrug 1,25 Hz anstelle von 0,625 Hz wie beim Premio-Steg. Im Übrigen können die Ergebnisse für die beiden Stege direkt miteinander verglichen werden. Dargestellt ist ausnahmslos der Realteil der Admittanz, die Konduktanz, als Funktion der Frequenz. Durch eine rote Linie ist jeweils markiert, mit welchen Frequenzen die Saite schwingen kann.

### 5.1.1. Konduktanz am Auflagepunkt der C-Saite

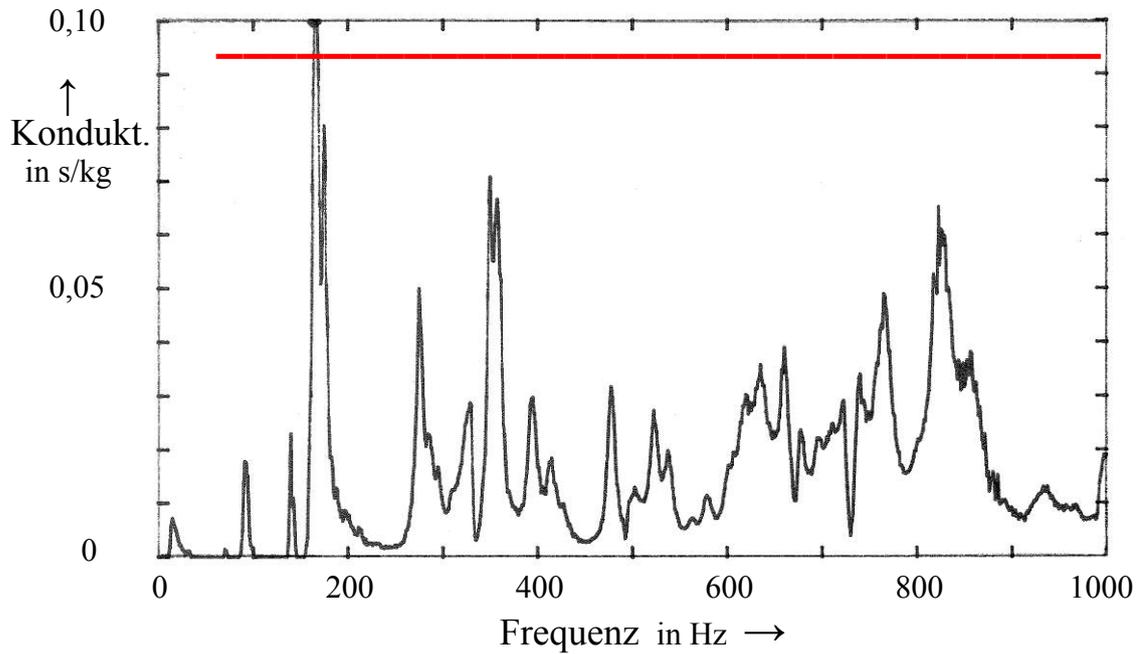


Abb. 5.1.a. Konduktanz am traditionellen Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der C-Saite ist rot markiert.

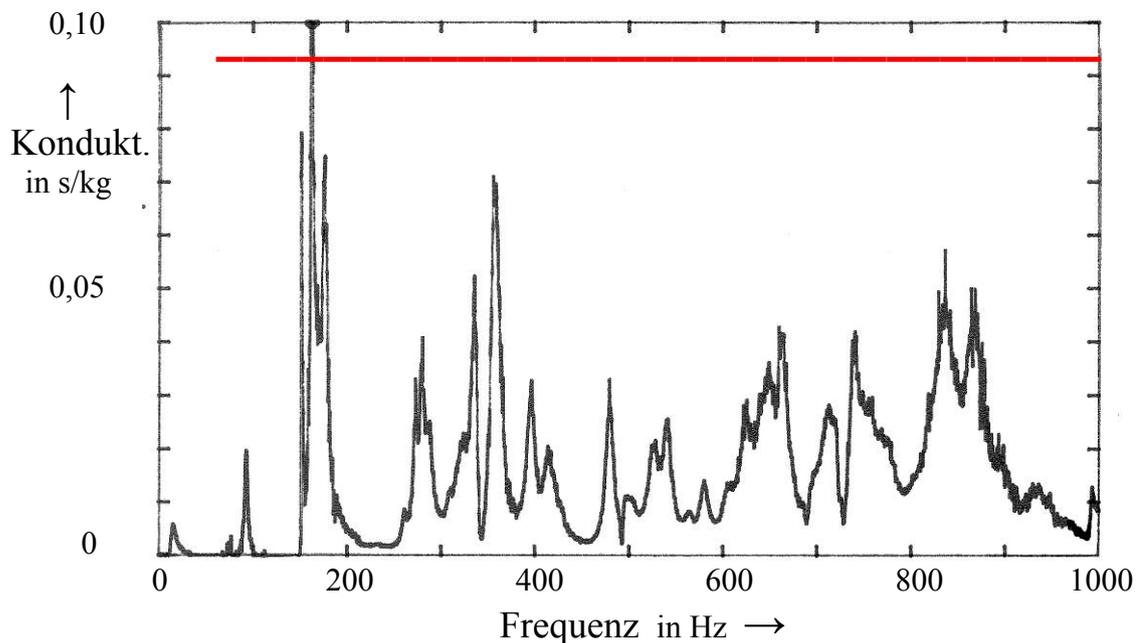


Abb. 5.1.b. Konduktanz am Premio-Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der C-Saite ist rot markiert.

Der tiefste Ton, den die C-Saite hervorruft, wenn sie leer gespielt wird, hat die Grundfrequenz 65 Hz. Beim traditionellen Steg (Abb. 5.1.a) tritt das Hauptmaximum (markiert durch einen schwarzen Punkt) bei 165 Hz auf. Die maximale Konduktanz ist 0,121 s/kg und damit etwas größer als im unteren Diagramm. Beim Premio-Steg (Abb. 5.1.b) beträgt sie 0,111 s/kg; das Maximum findet sich bei 163,75 Hz. In Anbetracht der unterschiedlichen Frequenzauflösung

erscheinen diese Diskrepanzen nicht sehr aussagekräftig. Der weitere Verlauf ist für beide Stege ähnlich. Erst bei höheren Frequenzen sind erwähnenswerte Unterschiede zu vermerken.

### 5.1.2. Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite

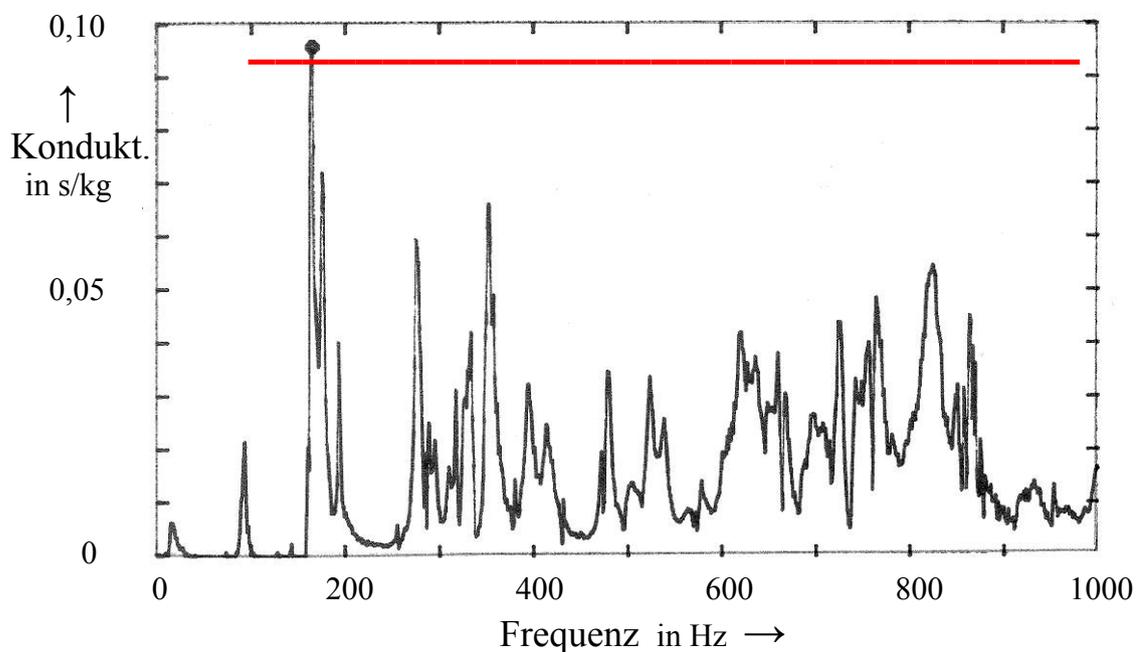


Abb. 5.2.a. Konduktanz am traditionellen Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der G-Saite ist rot markiert.

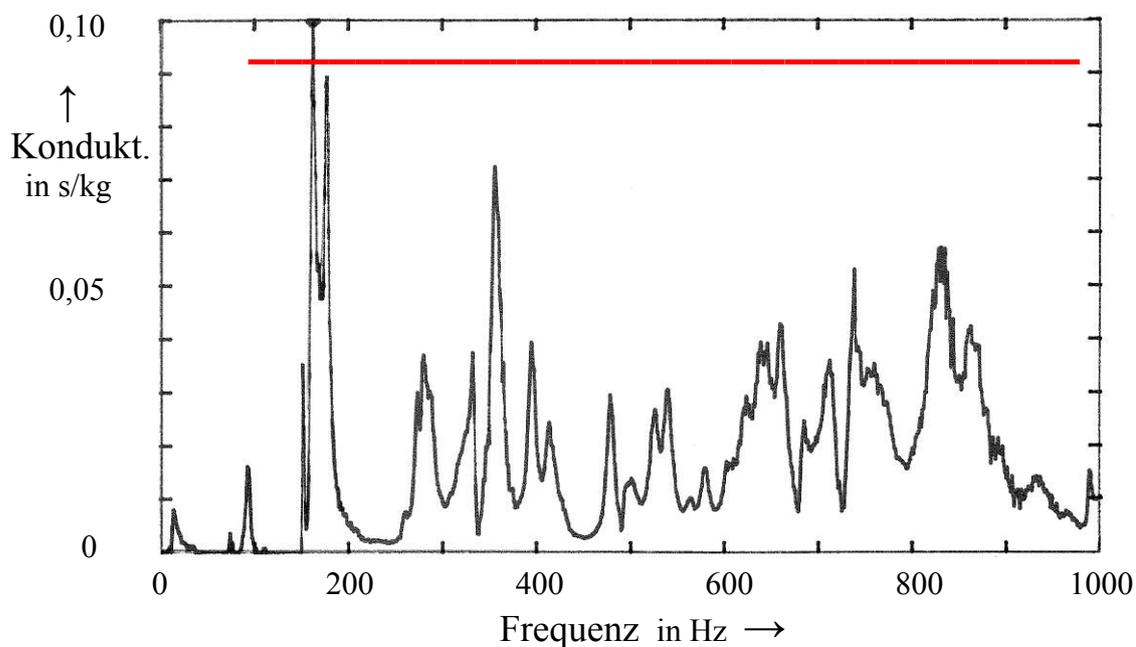


Abb. 5.2.b. Konduktanz am Premio-Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der G-Saite ist rot markiert.

Die leer gespielte G-Saite hat die Grundfrequenz 98 Hz. Ist das Cello mit dem traditionellen Steg (Abb. 5.2.a) versehen, stellt sich für die Konduktanz der Maximalwert 0,096 s/kg bei 165 Hz ein. Am Premio-Steg (Abb. 5.2.b) misst man 0,106 s/kg bei 162,5 Hz. Die zugehörigen Frequenzen weichen um 2,5 Hz voneinander ab. Im Bereich der ersten Maxima sind gewisse Diskrepanzen in der Höhe der Spitzen zu erkennen. Mit der feineren Frequenzauflösung (unten) ergibt sich ein etwas größerer Wert als mit der gröberen Auflösung (oben).

### 5.1.3. Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite

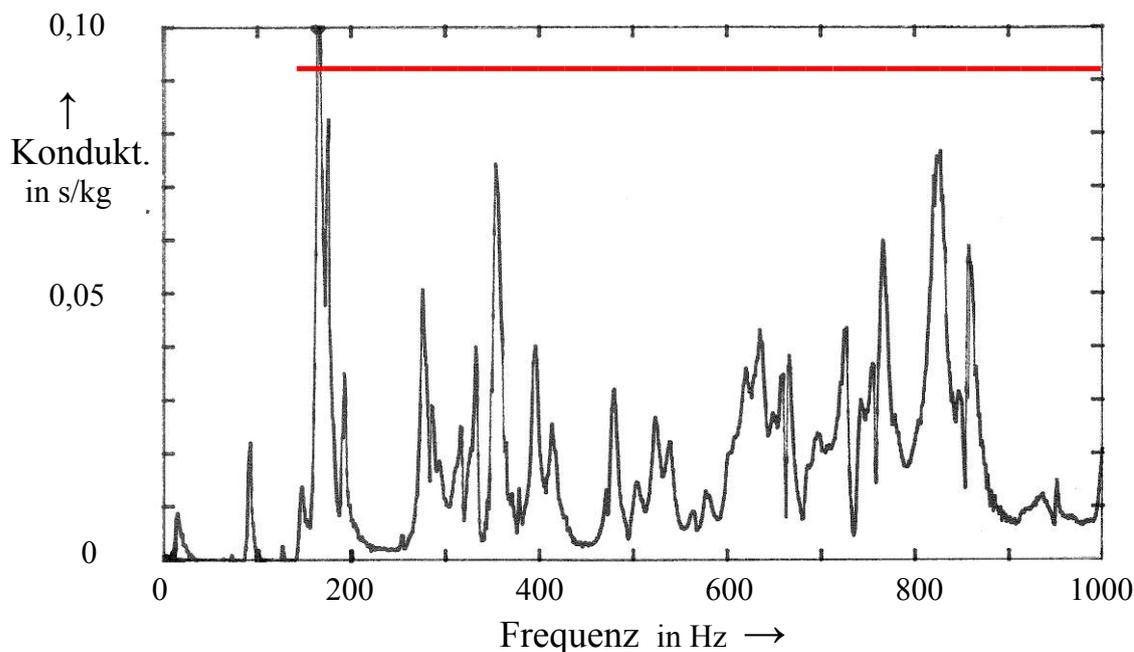


Abb. 5.3.a. Konduktanz am traditionellen Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der d-Saite ist rot markiert.

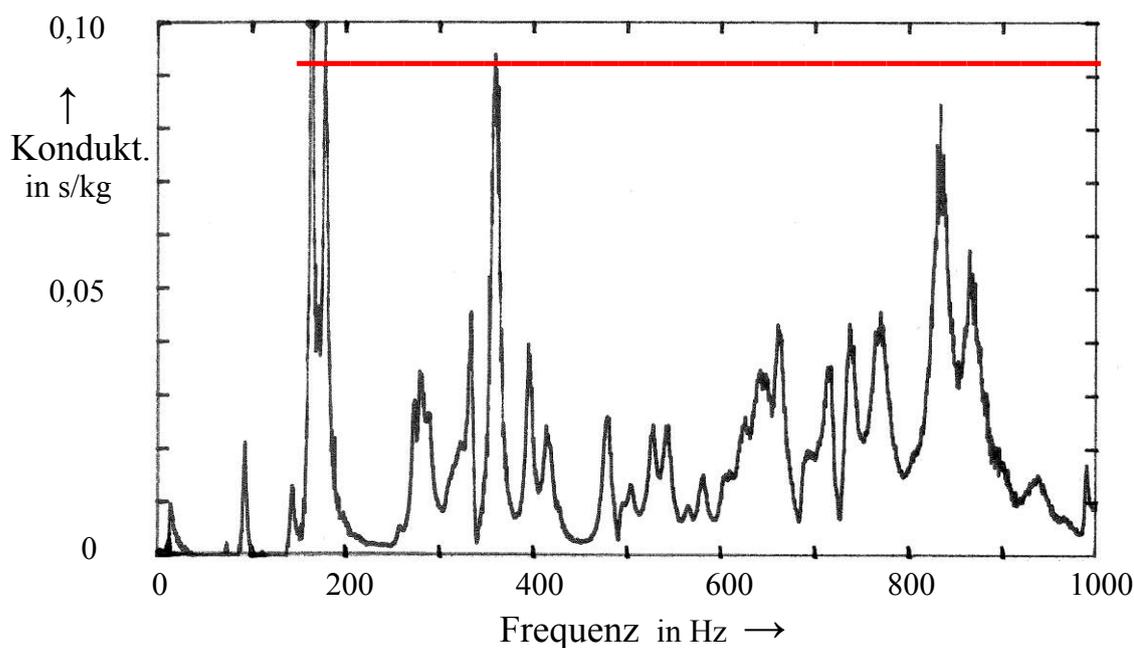


Abb. 5.3.b. Konduktanz am Premio-Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der d-Saite ist rot markiert.

Die tiefste Frequenz der leeren d-Saite ist 147 Hz. Wenn der traditionelle Steg (Abb. 5.3.a) eingesetzt ist, misst man bei 165 Hz den Maximalwert 0,129 s/kg. Ist stattdessen der Premio-Steg (Abb. 5.3.b) eingebaut, erhält man 0,111 s/kg bei 163,75 Hz. Die Frequenzen differieren um 1,25 Hz, was den Rahmen der unterschiedlichen Frequenzauflösung nur wenig überschreitet. Wie bei allen Messungen dieser Art sind im Bereich der ersten Maxima Diskrepanzen in der Höhe der Spitzen zu erkennen.

#### 5.1.4. Konduktanz am Auflagepunkt der a-Saite

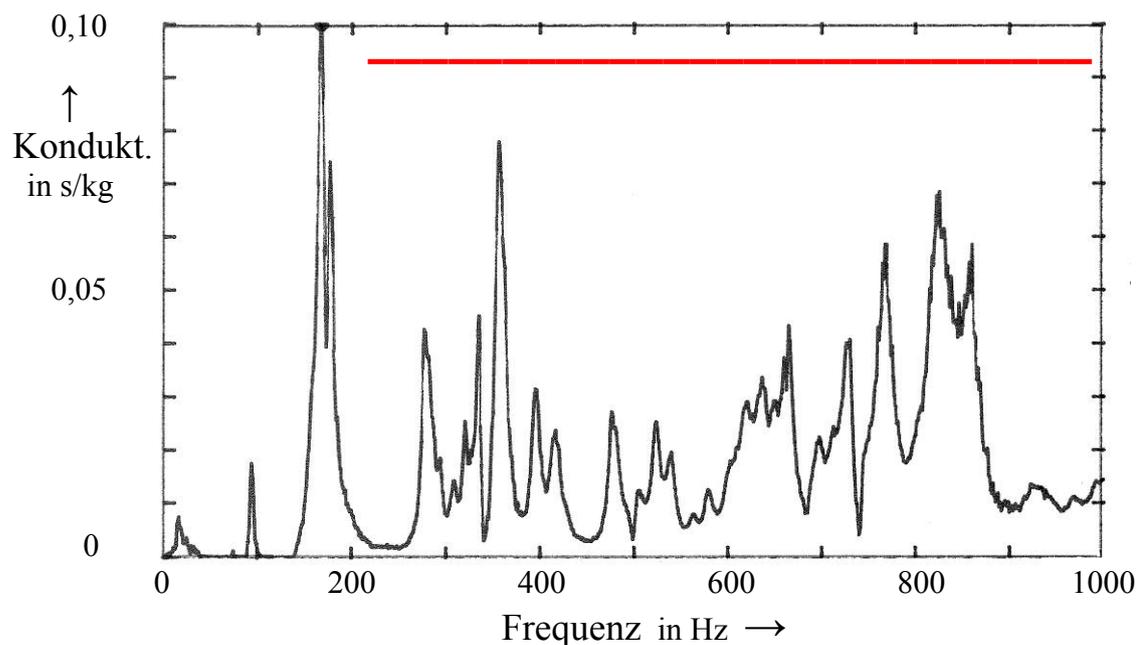


Abb. 5.4.a. Konduktanz am traditionellen Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der a-Saite ist rot markiert.

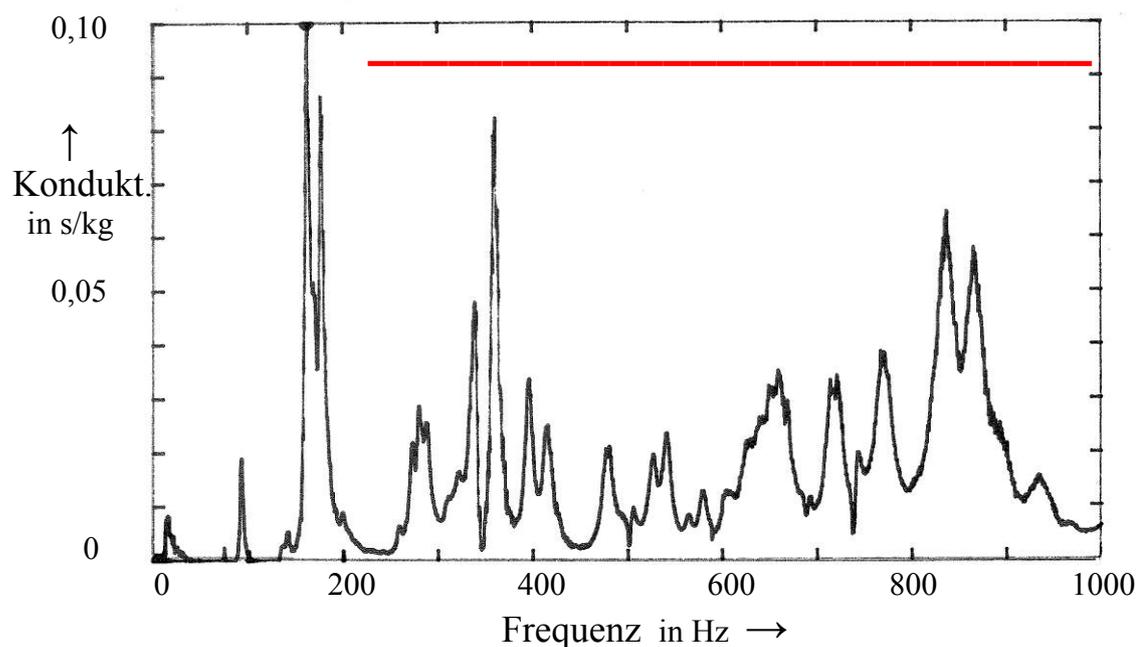


Abb. 5.4.b. Konduktanz am Premio-Steg in Abhängigkeit von der Frequenz; der Frequenzbereich der a-Saite ist rot markiert.

Wie der rote Balken andeutet, schwingt die a-Saite mit Frequenzen mit 220 Hz und höher. Aussagen über das Hauptmaximum der Konduktanz sind in diesem Fall daher eher akademischer Natur. Dieses liegt für den Steg A (Abb. 5.4.a) bei 167,5 Hz, für den Premio-Steg (Abb. 5.4.b) bei 162,5 Hz. Beim traditionellen Steg erreicht die Konduktanz den Wert 0,109 s/kg. Beim Premio-Steg ist der Maximalwert 0,115 s/kg. Dieser geringe Unterschied lässt sich mit der Frequenzauflösung begründen. Bei hohen Frequenzen erscheint die Konduktanz des traditionellen Steges im Mittel geringfügig größer als die des Premio-Steges.

Während die Hauptmaxima bei den Saiten C, G und d eine wichtige Rolle spielen, sind sie für die a-Saite ohne praktischen Belang. Wie die rote Markierung in Abb. 5.4.a und b andeutet, liegt die tiefste Schwingung dieser Saite oberhalb des Hauptmaximums. Im Bereich der Grundtöne der leer oder in der tiefen Lage gespielten Saite ist die Stegkonduktanz sehr klein und beginnt erst ab etwa 250 Hz wieder anzusteigen.

## 5.2. Unterschiede und Gemeinsamkeiten

In den Maxima der Konduktanz spiegeln sich „charakteristische Betriebsschwingungen“ wider. Dies wird in Kapitel 7 erneut belegt werden. Wenn die Frequenz der Anregung mit einer „charakteristischen Frequenz“ übereinstimmt, findet Resonanz statt. Beim Vergleich der Frequenzen, bei denen die Konduktanz maximal ist, zeigt sich, dass hierbei offenbar mehrere Schwingungen beteiligt sind, die miteinander verwandt sind. Diese bilden sich dann in jeweils unterschiedlichem Maße aus. Frühere Messungen (Fleischer 2009a) im Bereich des Hauptmaximums haben ergeben, dass bei senkrechter Anregung am stärksten eine Schwingungsform bei etwa 180 Hz oder etwas mehr angeregt wird. In einigen wenigen Fällen wurde auch eine Form bei 170 Hz oder etwas mehr angefacht. Die hier gemessenen Frequenzen für die Hauptmaxima liegen zwischen 162,5 Hz und 167,5 Hz und damit minimal tiefer als die Werte, die sich bei der Schwingungsmessung ergeben haben. Festzuhalten bleibt, dass im Bereich der Note e in der dritten Oktave die Decke besonders schwingfreudig auf Anregung am Steg reagiert.

Sehr kleine Abweichungen der gemessenen Frequenzen sollten nicht als signifikant eingestuft werden. Einige Frequenzwerte, die für die beiden Stege ermittelt wurden, unterscheiden sich jedoch etwas deutlicher. Der größte Unterschied zwischen den beiden Stegen manifestiert sich bei der a-Saite; er beträgt 5 Hz. Er bleibt jedoch folgenlos, da die zugehörige Frequenz unterhalb des Bereiches der a-Saite liegt. Diskrepanzen waren auch in Bezug auf die gemessenen Höchstwerte zu beobachten. Dies kann zum Teil damit erklärt werden, dass bei den Messungen die Frequenz unterschiedlich fein aufgelöst worden war.

In den Diagrammen der Abb. 5.1 bis 5.4 war unterhalb des Hauptmaximums bei beiden Stegen regelmäßig ein Nebenmaximum zu erkennen. Dieses bildete sich bei etwas weniger als 100 Hz aus. Die Vermutung liegt nahe, dass eine Korpussschwingung zwischen 92 Hz und 94 Hz angeregt wird; vgl. Fleischer (2009a). Träfe dies zu, so könnte – allerdings nur sehr schmalbandig – Energie auch unterhalb des Hauptmaximums in den Korpus fließen und möglicherweise abgestrahlt werden. Ein Vergleich mit den gemessenen Schallspektren wird darüber Aufschluss geben.

In ihrem weiteren Verlauf weisen die Konduktanz-Frequenzgänge der beiden Stege zahlreiche Unterschiede im Detail auf. Die Frequenzen, für welche die Konduktanz groß wird, stimmen bei beiden Stegen weitgehend überein. Jedoch unterscheiden sie sich teilweise in Hinsicht auf die Zahlenwerte, die maximal erreicht werden. Für den Spielbetrieb hat dies zur Folge, dass

der Energiefluss von der Saite in den Instrumentenkörper bei jedem Steg in einer etwas andere Weise von der Frequenz abhängt. Ebenso zeichnet sich ab, dass die Abweichungen für Frequenzen oberhalb von etwa 800 Hz größer werden. Demzufolge kann gemutmaßt werden, dass die Klangfarbe der Cello-Klänge anders wird, wenn ein anderer Steg eingesetzt ist. Allerdings deuten die gehörbezogene Analyse von Abschnitt 3.2 und die FFT-Analyse von Abschnitt 4.2 darauf hin, dass die größeren Unterschiede oberhalb des Frequenzbereiches auftreten, in dem die Konduktanz gemessen worden ist.

### **5.3. Zusammenfassende Bemerkung**

Solange vorausgesetzt werden kann, dass der Steg das hauptsächliche „Eingangstor“ des Korpus für Schwingungsenergie ist, liegt der folgende Zusammenhang vor: Das Linienspektrum der Kraft, das die Saite „anliefert“, wird nach Maßgabe der Konduktanz in Bewegungen des Steges umgesetzt, die wiederum Bewegungen des Korpus hervorrufen. Voraussetzung dafür, dass der Korpus Energie ins Schallfeld abstrahlen kann, ist dann eine von Null verschiedene Stegkonduktanz. Nur wenn die Schwinggeschwindigkeit am Steg in Phase mit der Saitenkraft ist, fließt Energie irreversibel in den Instrumentenkörper und kann von dort in das Schallfeld abgegeben werden. Danach ist die Konduktanz, gemessen an denjenigen Punkten, an denen die Saiten am Steg aufliegen, von hoher Aussagekraft.

Im untersuchten Bereich sind die Frequenzen, bei denen die Konduktanz groß wird, für beide Stege weitgehend identisch. Die Zahlenwerte, die dabei erreicht werden, unterscheiden sich dagegen zum Teil. Dies kann Auswirkungen für den Spielbetrieb haben. Der Steg übt eine Filterwirkung aus, die je nach Bauart unterschiedlich ist. Grundsätzlich ist jedem Steg ein andersartiges Durchlassverhalten zu eigen. Da der Steg den Energiefluss von der gestrichenen Saite in den Instrumentenkörper wesentlich prägt, beeinflusst er die spektrale Balance der Celloklänge. Demzufolge wird die spektrale Verteilung der Teiltöne in gewissem Umfang davon abhängen, welcher Steg eingesetzt ist. Auf diese Weise kann der Steg Einfluss auf die Klangfarbe der Cello-Klänge nehmen. In welchem Ausmaß dies tatsächlich geschieht, wird im nächsten Kapitel näher untersucht.

## 6. STEGKONDUKTANZ UND SCHALLSPEKTRUM

Die FFT-Spektren der Schallsignale, die in Kapitel 4 zusammen gestellt sind, werden mit den Frequenzgängen der Konduktanz, die sich in Kapitel 5 finden, verknüpft. Es wird nach Zusammenhängen gesucht.

### 6.1. Vergleiche für Frequenzen bis 1000 Hz

Der Auflagepunkt der Saite auf dem Steg stellt ein „Eingangstor“ für Schwingungsenergie dar. Die Konduktanz besagt, bei welcher Frequenz in welchem Ausmaß Energie an der betrachteten Stelle und Richtung in den Instrumentenkörper einfließen kann. Da über die Amplituden der Teilschwingungen nichts bekannt ist, lassen sich auch keine Aussagen über die Amplituden des Schallsignals machen. Jedoch sind sehr wohl Aussagen über die Frequenzen möglich, für die der Steg „durchlässig“ ist.

Die Saite hat aber auch noch ein weiteres Ende, das Kontakt zum Instrumentenkörper hat. Dieses andere Ende befindet sich am Sattel, sofern die Saite leer gespielt wird. Wird die Saite gegriffen, dann liegt sie dort am Griffbrett auf, wo sie der Finger niederpresst. Der Erfahrungen mit akustischen Gitarren zufolge (Fleischer 1997) gibt es sehr wohl aber auch Korpus-schwingungen, die am Hals angeregt werden können. Dies lässt sich phänomenologisch leicht überprüfen, wenn man ein breitbandiges Signal, beispielsweise ein Rauschen, in einen Schwingerreger einspeist. Drückt man den Schwingerreger gegen den Steg, entsteht aus den abgestrahlten Spektralanteilen ein Geräusch. Hält man dann den Schwingerreger an den Hals, entsteht mit anderer Klangfarbe ein Geräusch, das nicht wesentlich leiser als das vorherige ist. Ganz offensichtlich kann Schwingungsenergie demnach auch am kopfseitigen Ende einer Saite in den Instrumentenkörper fließen.

Im folgenden Abschnitt sind Diagramme, die in anderem Zusammenhang bereits präsentiert worden sind, einander gegenüber gestellt. Kapitel 5 ist die Konduktanz entnommen. Aus Kapitel 4 stammen einige der Schallspektren. Es wird jeweils der Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 1000 Hz betrachtet.

### 6.1.1. Sämtliche Noten, gespielt auf allen Saiten

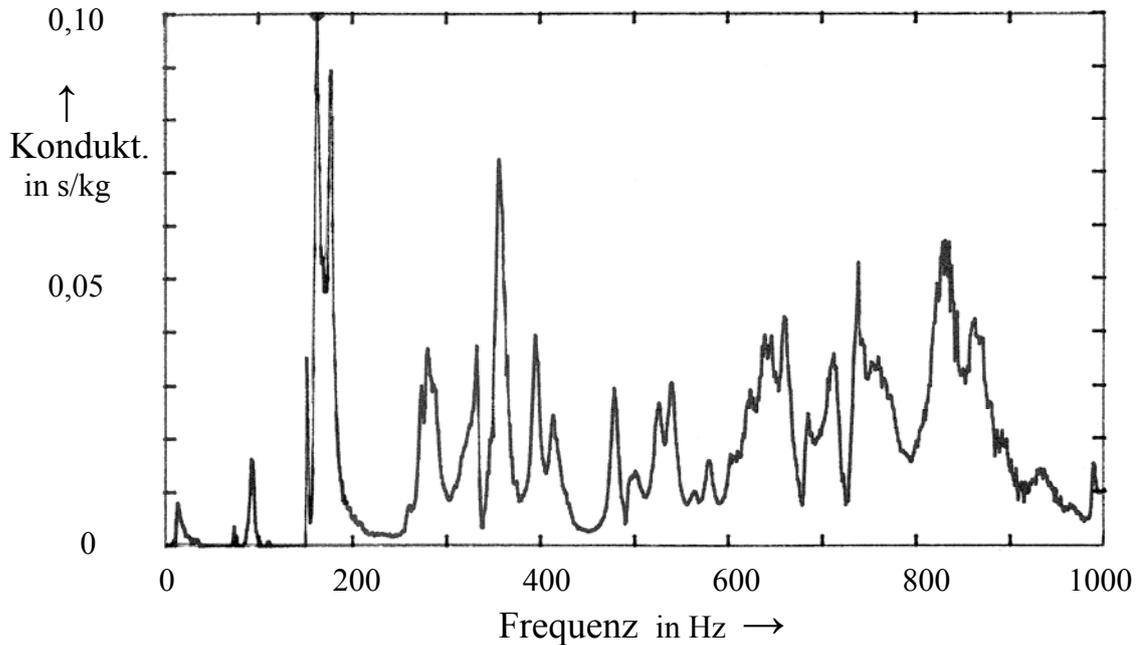


Abb. 6.1.a. Konduktanz an der G-Saite des Premio-Steges in Abhängigkeit von der Frequenz.

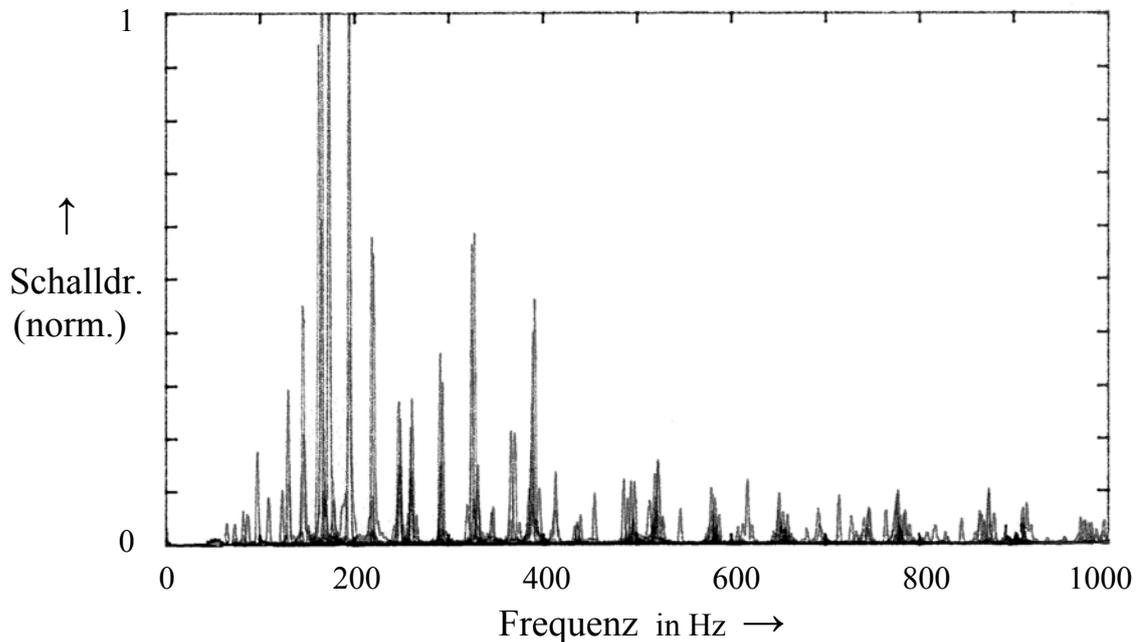


Abb. 6.1.b. Sämtliche neunzehn Klänge der Tonleiter; eingebaut ist der Premio-Steg.  
Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Abb. 6.1.a entspricht Abb. 5.2.b und bezieht sich auf den Auflagepunkt der G-Saite. Darunter ist als Abb. 6.1.b das Schallspektrum von Abb. 4.5 angeordnet. Es ist die Summe der Spektren aller Noten C bis g' der aufsteigenden Tonleiter, gespielt mit dem Premio-Steg. Eine Verwandtschaft zeigt sich in mehrfacher Hinsicht. So sind in beiden Diagrammen Hauptmaxima etwas unterhalb von 200 Hz zu erkennen. Zu höheren Frequenzen hin werden die Schalldruck-Amplituden immer kleiner. Dies hat vornehmlich den Grund, dass die Teilschwingungen der anregenden Saitensignale mit wachsender Frequenz schwächer werden.

Das Konduktanz-Diagramm Abb. 6.1.a der G-Saite des Premio-Steges ist auf dieser Seite noch einmal dargestellt. Darunter ist als Abb. 6.1.c das Schallpegel-Frequenz-Spektrum aller Klänge der aufsteigenden Tonleiter (siehe auch Abb. 4.7) eingefügt. Der Schallpegel entsteht durch Logarithmieren aus dem Schalldruck. Dadurch werden im unteren Diagramm schwache Spektralanteile mehr hervorgehoben. Hierbei wird ganz deutlich, dass es einige Frequenzen gibt, bei denen die Stegkonduktanz praktisch Null ist, aber trotzdem Schall abgestrahlt wird. Es sind dies insbesondere die Bereiche zwischen etwa 100 Hz und 150 Hz sowie zwischen 200 Hz und 250 Hz, was auch für die übrigen drei Saiten gilt. Um diesen Befund abzusichern wurde insbesondere der Bereich etwas oberhalb von 200 Hz noch einmal genauer untersucht.

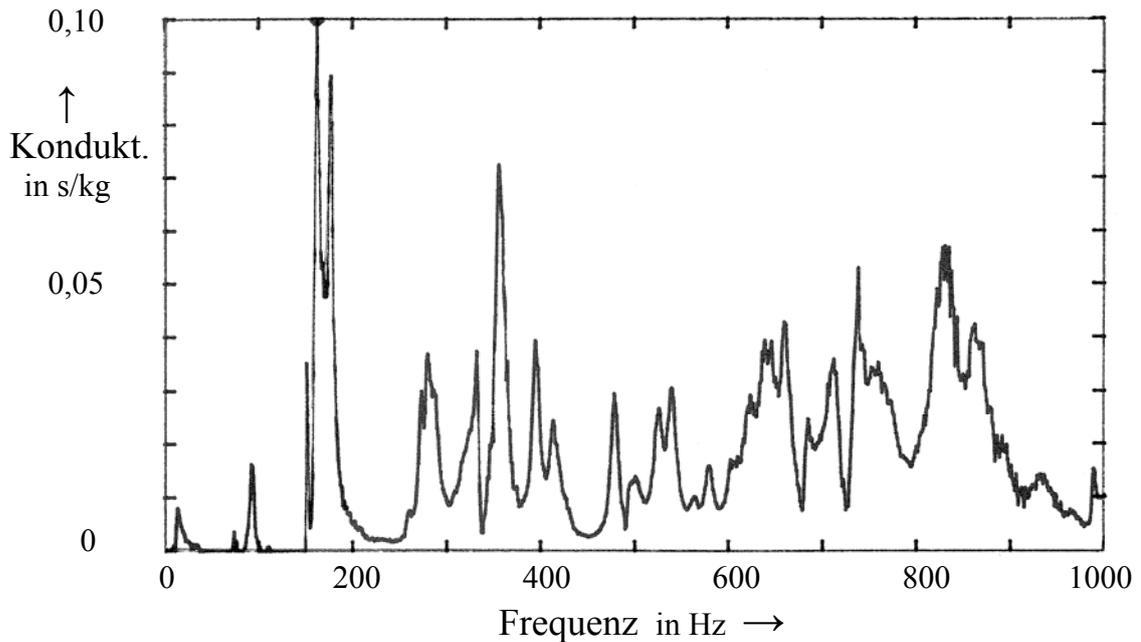


Abb. 6.1.a. Konduktanz an der G-Saite des Premio-Steges in Abhängigkeit von der Frequenz.

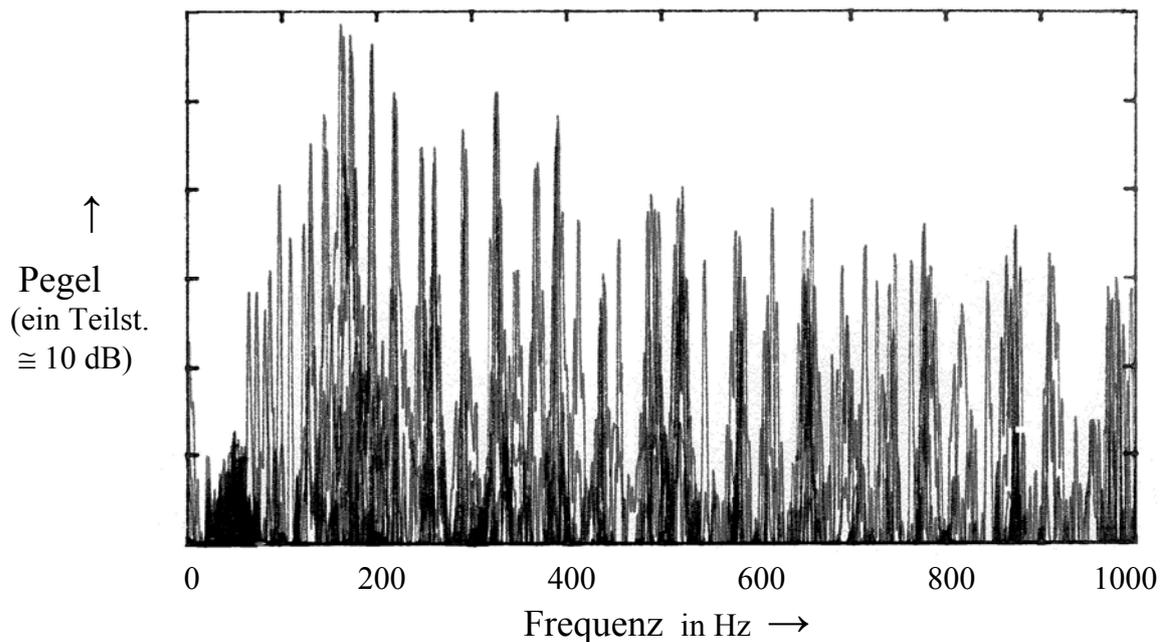


Abb. 6.1.c. Sämtliche neunzehn Klänge der Tonleiter; eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen.

### 6.1.2. Diskantnoten, gespielt auf der a-Saite

Abb. 6.2.a zeigt die Konduktanz am Auflagepunkt der höchsten Diskantsaite; vgl. auch Abb. 5.4.b. Auf dieser Saite wurden sieben Klänge gespielt, deren Grundfrequenzen gemäß Tab. 4.I beim Aufwärtsspiel zwischen 218,375 Hz (Note a) und 388,125 Hz (Note g') lagen. Wurde die Tonleiter abwärts gespielt, waren die Frequenzen dieselben, manchmal auch geringfügig höher. Der Schalldruck, den die FFT-Analyse ergab, ist normiert in Abb. 6.2.b dargestellt.

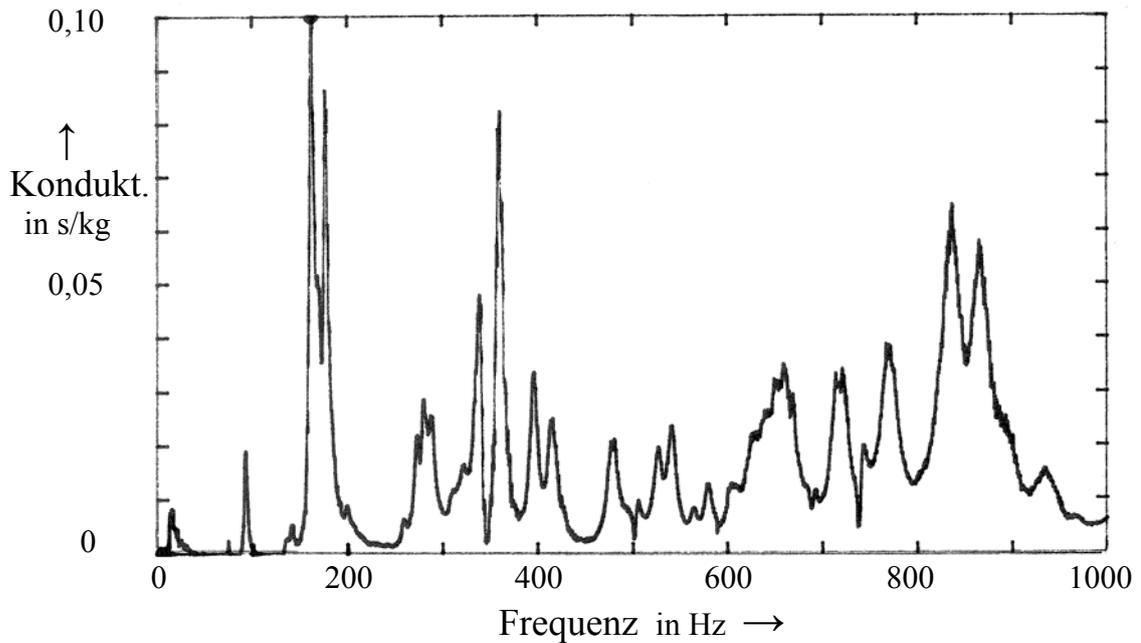


Abb. 6.2.a. Konduktanz an der a-Saite des Premio-Steges in Abhängigkeit von der Frequenz.

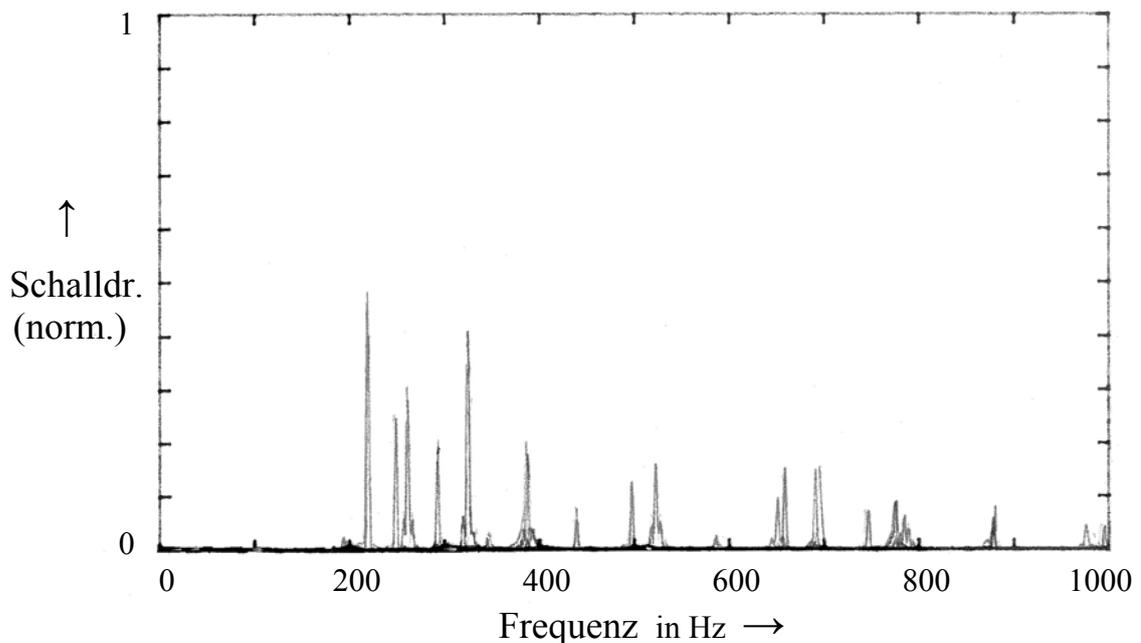


Abb. 6.2.b. Auf der a-Saite gespielte Klänge; eingebaut ist der Premio-Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Es erweist sich, dass Spektralanteile der Frequenzen 219,375 Hz und 248,75 Hz mit großen Amplituden abgestrahlt werden, obwohl die Stegkonduktanz bei diesen Frequenzen praktisch verschwindet. Die Diagramme der Konduktanz (z.B. Abb. 5.1 bis 5.4) sagen zwar aus, bei welchen Frequenzen Energie über den Steg in den Instrumentenkörper fließen kann. Offenbar ist dies aber nur „die halbe Wahrheit“. Alles deutet darauf hin, dass der andere Kontaktpunkt der Saite, der auf dem Griffbrett (wenn gegriffen) oder am Sattel (wenn leer gespielt) liegt, nicht aus den Augen verloren werden darf.

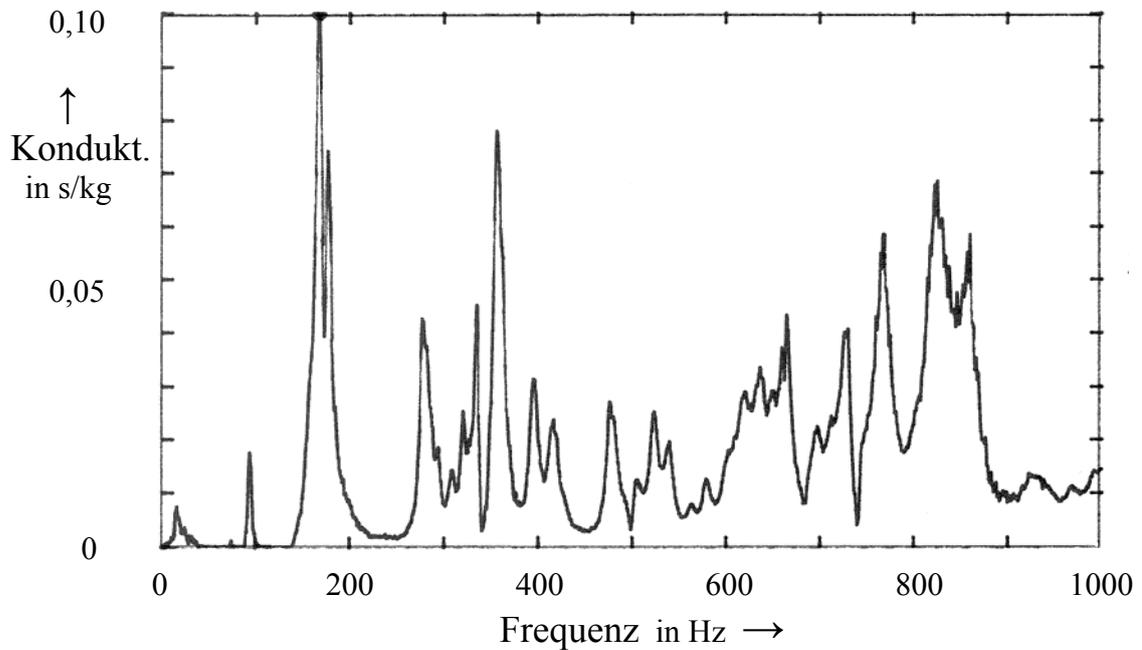


Abb. 6.3.a. Konduktanz an der a-Saite des traditionellen Steges in Abhängigkeit von der Frequenz.

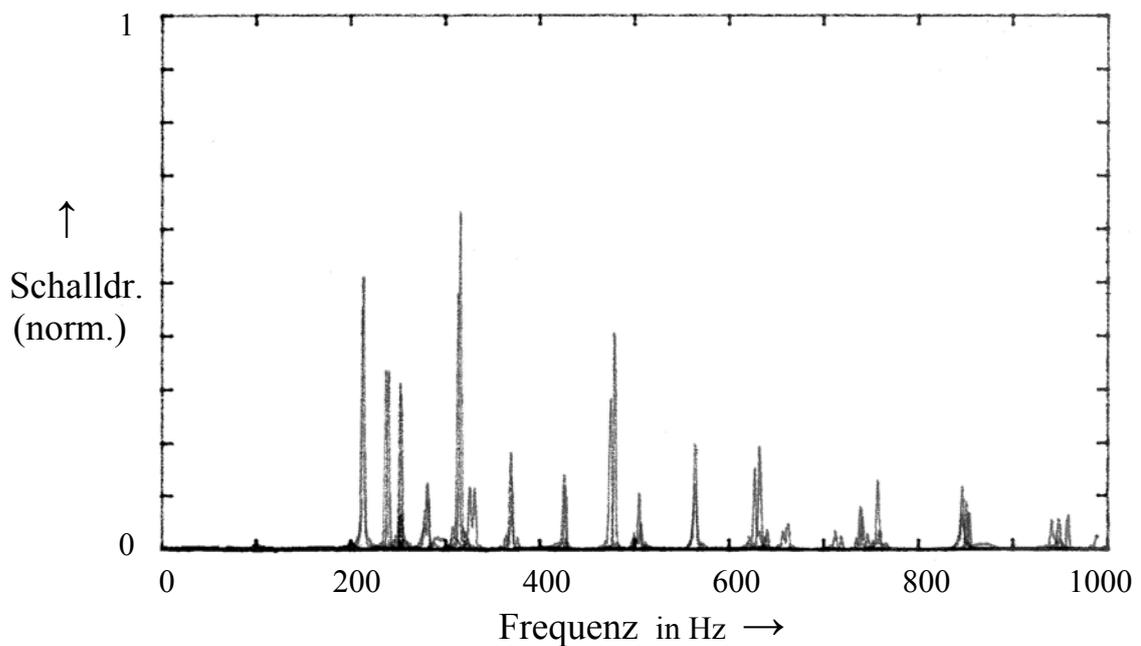


Abb. 6.3.b. Auf der a-Saite gespielte Klänge; eingebaut ist der traditionelle Steg. Es ist der normierte Schalldruck über der Frequenz aufgetragen.

Abb. 6.3 zeigt entsprechende Ergebnisse für den traditionellen Steg. Abb. 6.3.a gleicht Abb. 5.4.a. Die Grundfrequenzen der Klänge, die der Spieler auf der a-Saite intoniert hat, reichen gemäß Tab. 4.I von 213,5 Hz bis 370,625 Hz. Wird die Tonleiter abwärts gespielt, dann liegen sie in der Regel noch etwas tiefer. Der Vergleich bestätigt den obigen Befund: In demjenigen Frequenzbereich, in welchem die Stegkonduktanz nahezu verschwindet, bilden sich drei starke Grundtöne bei etwa 213 Hz, 238 Hz und 252 Hz aus. Ähnliche Erscheinungen lassen sich auch bei anderen, meist relativ tiefen Frequenzen beobachten. Ihre Ursache kann nur darin liegen, dass der Korpus nicht über den Steg, sondern über den Hals zum Schwingen gebracht wird.

## 6.2. Bewegung des Instrumentenkörpers bei tiefen Frequenzen

Offenbar gibt es Schwingungen des Korpus, denen bisher keine Beachtung geschenkt wurde, die jedoch im hier betrachteten Zusammenhang eine Rolle spielen. Um diese Frage zu klären, wurden vorliegende Daten von Vibrometer-Messungen am Cello (Fleischer 2009a) einer erneuten Auswertung unterzogen.

### 6.2.1. Cello mit traditionellem Steg

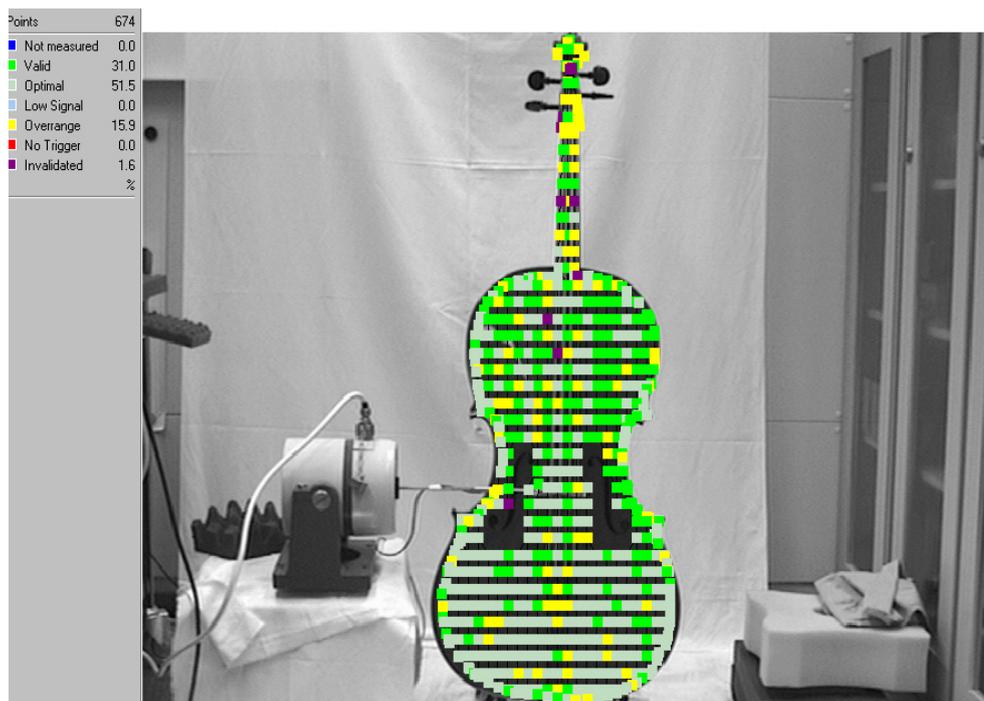


Abb. 6.4. Messung am Cello bei tangentialer Anregung am Premio-Steg

Wie Abb. 6.4 zeigt, wurde das Cello am Steg seitlich angeregt. Aus den Übertragungsfunktionen, die für die 674 Messpunkte gebildet wurden, ergibt sich die mittlere Kurve, die in den Experimenten bis 800 Hz bzw. 1000 Hz reichte. In Abb. 6.5 ist ein Ausschnitt von 40 Hz bis 560 Hz dargestellt. Beide Diagramme geben die gemittelte Übertragungsfunktion wieder. Im unteren Diagramm b sind zusätzlich die Bänder eingezeichnet, für die Schwingungsbilder dargestellt werden sollen. Von besonderem Interesse ist der Bereich zwischen 200 Hz und 250 Hz. Durch rote Pfeile sind in Abb. 6.5.b zwei relativ schwach ausgeprägte Nebenmaxima markiert, die bei der Auswertung (Fleischer 2009a) bisher noch nicht beachtet worden waren. Bei 215 Hz und 225 Hz wurde nunmehr je ein zusätzliches Band gelegt.

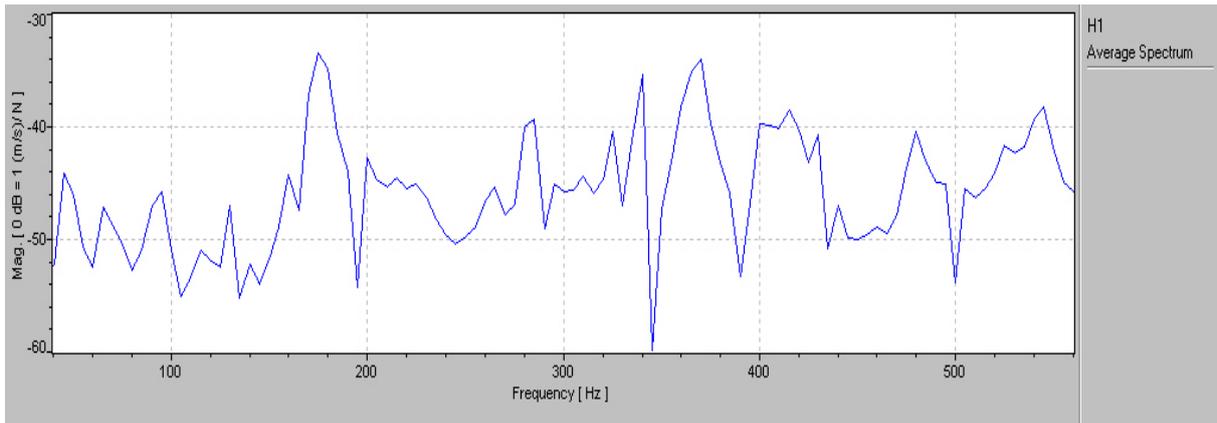


Abb. 6.5.a. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion zwischen 40 Hz und 560 Hz.

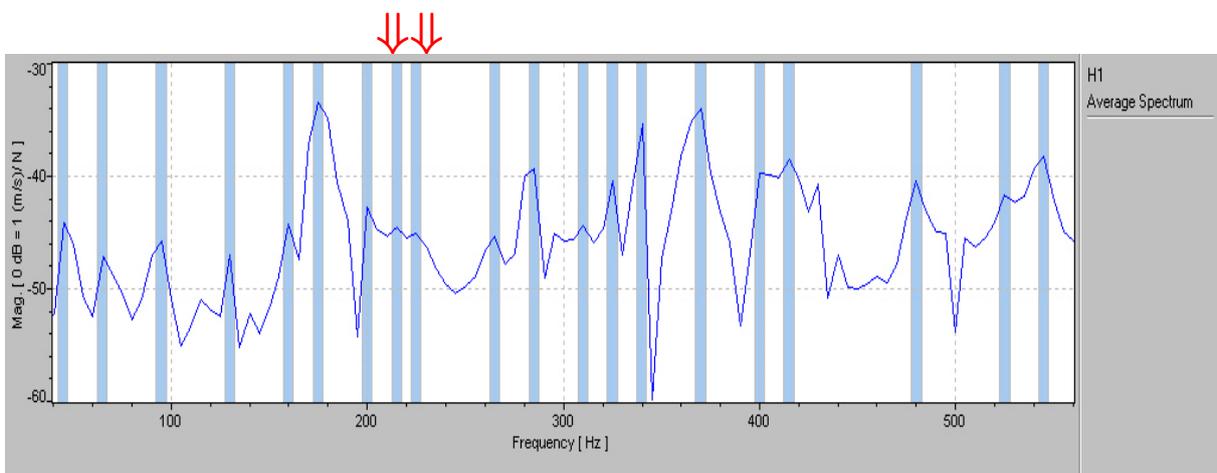


Abb. 6.5.b. Wie 6.5.a; es sind nun Bänder gewählt, für die Betriebsschwingungen dargestellt werden sollen.

Bei diesen Frequenzen ergeben sich die beiden Schwingungsformen, die in Abb. 6.6 dargestellt sind. Es sind nur marginale Unterschiede zu erkennen. In beiden Fällen verformt sich nicht nur die Decke, sondern auch der Hals des Cellos. Offensichtlich bezieht die Schwingung des Instrumentenkörpers den Hals mit ein. Die Form dieser Schwingung ist symmetrisch in Bezug auf die Mittellinie. Das bedeutet, dass sie durch eine Kraft am Steg, die parallel zur Decke wirkt, nur in geringem Maße angeregt werden wird. Sehr gut wird sie sich dagegen anregen lassen, wenn eine Kraft am Hals senkrecht zur Decke gerichtet ist. Dies dürfte der Mechanismus sein, der bewirkt, dass Saitenschwingungen um 220 Hz den Korpus in Resonanz versetzen mit der Folge, dass ein starker Teilton abgestrahlt wird.

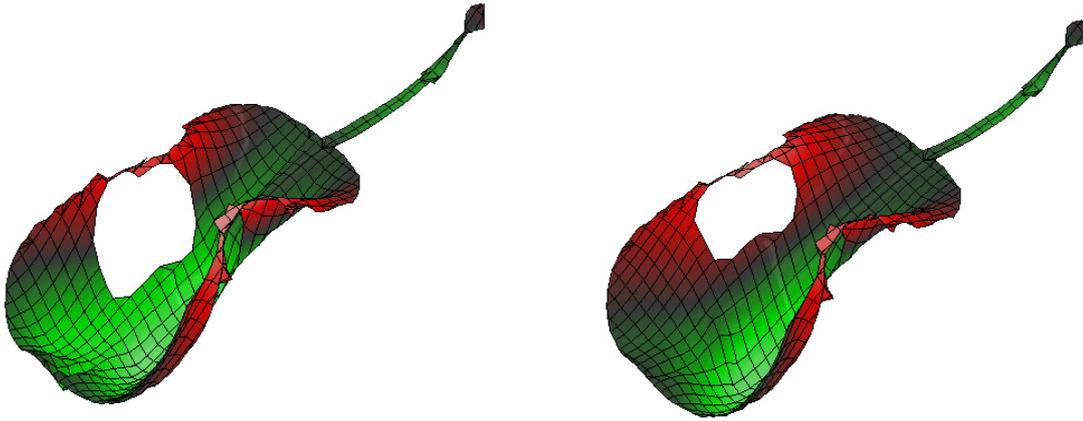


Abb. 6.6. Schwingungen des Cellos bei 215 Hz (links) und 225 Hz (rechts) bei tangentialer Anregung am traditionellen Steg.

In derselben Weise, wie sie in Abb. 6.4 zu erkennen ist, wurde in einer weiteren Messreihe das Cello am traditionellen Steg parallel zur Decke angeregt. Das Instrument war in der Zwischenzeit aus der Halterung entnommen und danach wieder neu positioniert worden, wodurch die Versuchsparameter geringfügig variiert waren.

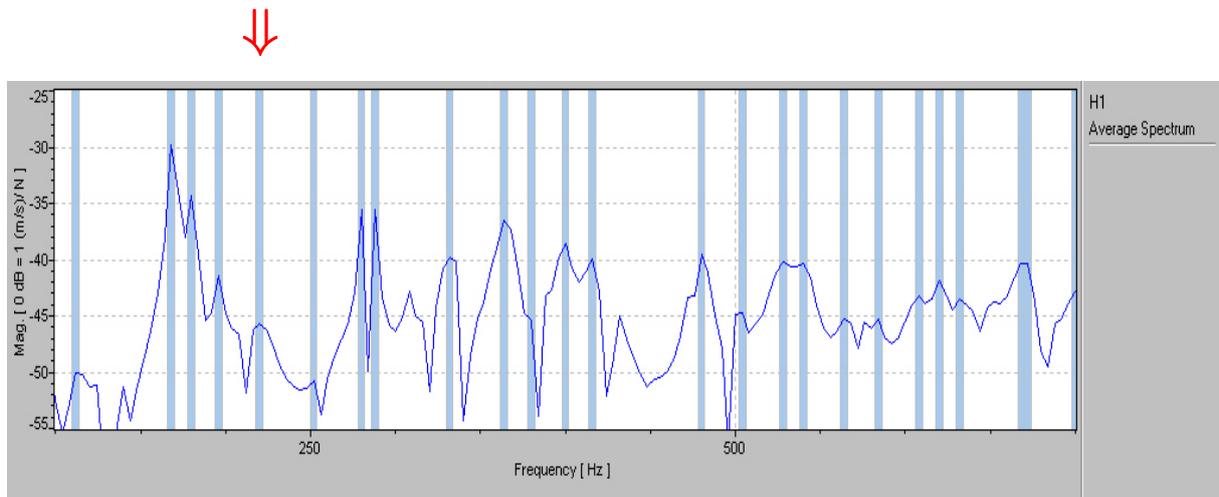


Abb. 6.7. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion zwischen 100 Hz und 700 Hz. Die Bänder stehen für die Frequenzen, für die Betriebsschwingungen dargestellt werden sollen.

Abb. 6.7 zeigt die Übertragungsfunktion, die sich bei diesem Durchgang ergeben hat. Es ist der Bereich von Frequenzen zwischen 100 Hz und 700 Hz wiedergegeben. Der rote Pfeil hebt das neu gewählte Band bei 216 Hz. Dafür ergibt sich die Schwingungsform, die Abb. 6.8 entnommen werden kann. Es ist eine Momentaufnahme in einer anderen Phase der Schwingung dargestellt, als dies in Abb. 6.6 der Fall war.

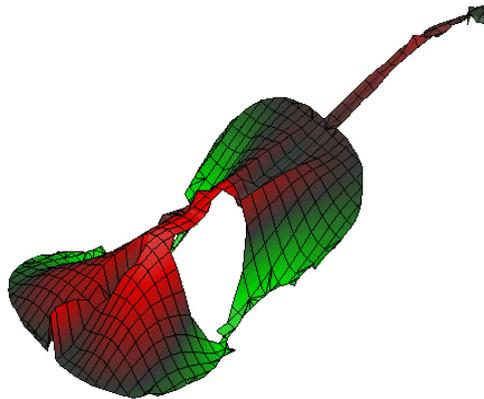


Abb. 6.8. Schwingung des Cellos bei 216 Hz bei tangentialer Anregung am traditionellen Steg.

Auch Abb. 6.8 macht deutlich, wie sich neben der Decke in ähnlichem Ausmaß der Hals des Cellos bewegt. Wie bereits in Abb. 6.6 erkennbar wurde, bezieht die Schwingung des Instrumentenkörpers den Hals ein. Um diesen Befund abzusichern, wurde auch eine Messung am Cello sorgfältig erneut ausgewertet, in das der Premio-Steg eingebaut war.

### 6.2.2. Cello mit Premio-Steg

Die Übertragungsfunktion dieser weiteren Messung bei tangentialer Anregung am neuartigen Steg findet sich in Abb. 6.9. Der rote Pfeil zeigt auf ein neues Band, das auf das Nebenmaximum der Übertragungsfunktion bei 217,5 Hz gelegt wurde. Dafür ergibt sich die Schwingungsform, die in Abb. 6.10 dargestellt ist.

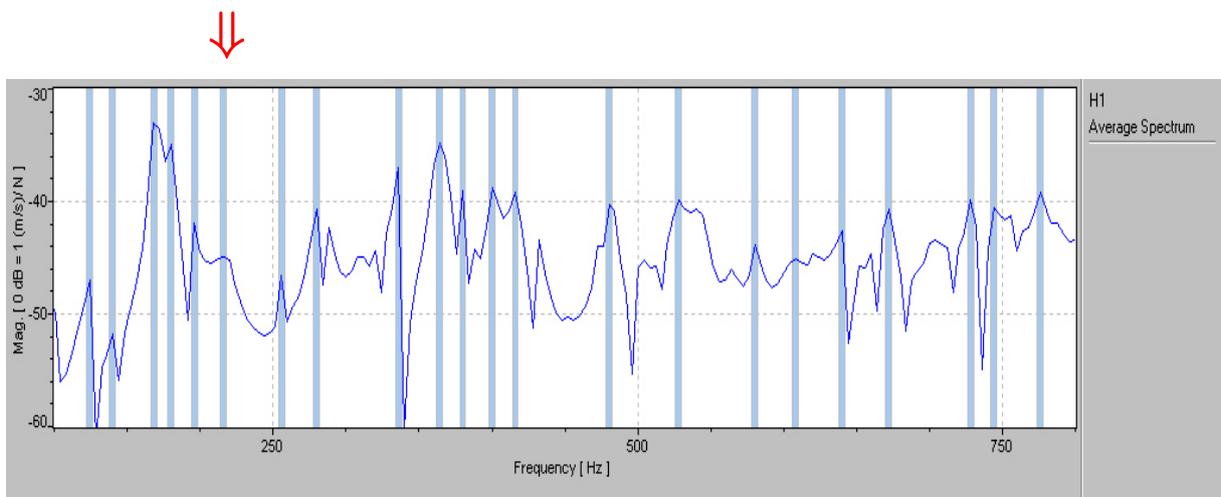
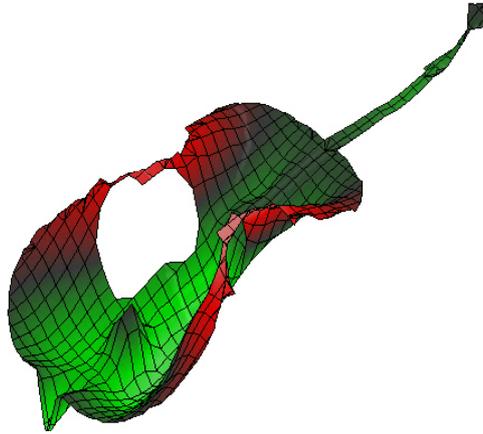
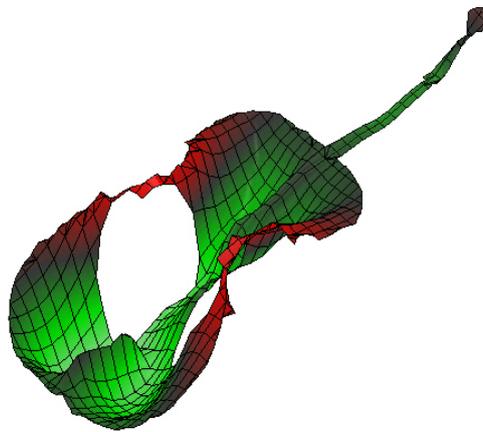


Abb. 6.9. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion zwischen 100 Hz und 800 Hz. Die Bänder stehen für die Frequenzen, für die Betriebsschwingungen dargestellt werden sollen.



*Abb. 6.10. Schwingung des Cellos bei 217,5 Hz bei tangentialer Anregung am Premio-Steg.*

Ergänzend ist in Abb. 6.11 eine Schwingung gezeigt, die bei 222 Hz nachgewiesen wurde. Sie bildet sich dann aus, wenn am Premio-Steg nicht wie in Abb. 6.4 parallel, sondern nunmehr senkrecht zur Decke angeregt wird. Ebenso wie die Schwingung von Abb. 6.10 ist sie spiegelsymmetrisch in Bezug auf die Mittellinie des Instruments.



*Abb. 6.11. Schwingung des Cellos bei 222 Hz bei Anregung am Premio-Steg in Normalenrichtung.*

Die Form der Betriebsschwingung, die sich bei etwa 220 Hz ausbildet, ist symmetrisch. Dies haben übereinstimmend die Untersuchungen ergeben, die in diesem Abschnitt geschildert sind und die auf die Schwingungsbilder in den Abb. 6.6, 6.8, 6.10 und 6.11 geführt haben. Das bedeutet, dass die Korpusschwingung um 220 Hz am Steg durch eine Kraft, die parallel zur Decke wirkt, nur in geringem Maße angeregt werden kann. Sehr gut wird diese Schwingung sich dagegen anregen lassen, wenn eine Kraft senkrecht zum Instrument wirkt. Alles deutet darauf hin, dass die Anregung am Hals in wesentlich höherem Maße gelingt, als am Steg. Dies dürfte der Mechanismus sein, der bewirkt, dass Saitenschwingungen mit 220 Hz den Korpus in Resonanz versetzen mit der Folge, dass ein starker Teilton abgestrahlt wird.

### 6.3. Zusammenfassende Bemerkung

Meist wird vereinfachend angenommen, dass das einzige „Eingangstor“ des Korpus für Schwingungsenergie der Steg ist. Diese Vereinfachung beinhaltet, dass das Linienspektrum der Wechselkraft, welche die Saite auf den Steg ausübt, nach Maßgabe der Konduktanz in Bewegungen des Steges umgesetzt wird. Diese wiederum rufen dann Bewegungen des Korpus hervor. Voraussetzung dafür, dass der Korpus Energie ins Schallfeld abstrahlen kann, wäre danach eine von Null verschiedene Stegkonduktanz. Sofern die Schwinggeschwindigkeit am Steg in Phase mit der Saitenkraft ist, könnte Energie irreversibel in den Instrumentenkörper fließen und von dort in das Schallfeld abgegeben werden.

Die Grundannahme, dass es in erster Linie der Steg ist, an dem die Saite den Instrumentenkörper zum Mitschwingen bringt, ist im Wesentlichen bestätigt worden. Bei denjenigen Frequenzen, bei denen die Saite am stegseitigen Auflagepunkt eine ausreichend große Konduktanz „sieht“, finden sich auch Spektralkomponenten im Schallsignal. Demnach ist die Konduktanz, gemessen an denjenigen Punkten, an denen die Saiten am Steg aufliegen, von hoher Aussagekraft.

Allerdings ist dies nicht „die ganze Wahrheit. Es darf nicht aus den Augen verloren werden, dass die Saite an *zwei* Punkten Kontakt mit dem Instrumentenkörper hat. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass die bisherige Annahme vom Steg als „Eingangstor“ erweitert werden muss. Zwar erfolgt die Schwingungsanregung zu einem großen Teil über den Steg, jedoch nicht ausschließlich. Ganz offensichtlich kann die Saite auch an ihrem oberen Ende, wo sie auf dem Griffbrett aufliegt, den Instrumentenkörper in Resonanz versetzen. Demzufolge sollte bei weiteren Schwingungsexperimenten nicht nur am Steg, sondern auch am Hals, und dies möglichst in verschiedenen Richtungen, angeregt werden.

Wenn in Zukunft Schwingungen des Korpus untersucht werden, sollte nicht ausschließlich am Steg, sondern zusätzlich auch am Hals angeregt werden. Ebenso sollte die Admittanz bzw. Konduktanz nicht nur am Steg, sondern auch auf dem Griffbrett gemessen werden. In welcher Richtung dies geschieht, müsste noch diskutiert werden. Bei Zupfinstrumenten wird diese Art von Messung bereits länger praktiziert (Fleischer 1998). Wo die Konduktanz von Null verschieden ist, kann Energie von der Saite in den Instrumentenkörper fließen. Bei Gitarren hat sich gezeigt, dass dies beileibe nicht nur am Steg möglich ist, sondern in ähnlich hohem Maße auch am Hals der Fall sein kann.

Naturgemäß steigt der Aufwand, wenn nicht nur an einem Punkt, sondern an sehr vielen Punkten gemessen werden muss. Es erscheint verständlich, zuallererst den Steg zu betrachten. Weiterführende Untersuchungen sollten jedoch das Griffbrett mit einbeziehen. Dem höheren Aufwand wird der Gewinn gegenüber stehen, dass ein weitgehend vollständiges Bild entsteht. Zum einen zeigt sich, mit welchen Frequenzen der Instrumentenkörper in welchem Ausmaß zum Mitschwingen gebracht werden kann. Zum Anderen wird erkennbar, an welchen Stellen dies gelingt.

## 7. KONDUKTANZ UND KORPUSSCHWINGUNGEN

Nachdem sich herausgestellt hat, dass das Verhalten des Instruments sich in mehrfacher Hinsicht in der Stegkonduktanz widerspiegelt, sollen abschließend Resultate von Schwingungsmessungen mit der gemessenen Konduktanz verknüpft werden. Alle bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass die Konduktanz-Verläufe, die sich für die beiden Stege ergeben haben, bei tiefen Frequenzen nicht sehr unterschiedlich sind. Dies erscheint plausibel. Zunächst fungiert der Steg als starres Hebelsystem und beginnt erst bei höheren Frequenzen, sich elastisch zu verformen und ein „Eigenleben“ zu entfalten. Die Frequenz, ab der mit bauartbedingten Unterschieden in der Stegkonduktanz gerechnet werden muss, kann den eigenen Beobachtungen zufolge mit 800 Hz abgeschätzt werden.

### 7.1. Maxima der Stegkonduktanz und zugehörige Schwingungen

In den Abb. 7.1 und 7.2 sind Ergebnisse der Konduktanz-Messungen zusammen gestellt. Abb. 7.1 bezieht sich auf den traditionellen Steg. Abb. 7.2 gibt den gleichen Sachverhalt für den Premio-Steg wieder. Bis etwa 800 Hz ähneln sich die Verläufe stark. Offenbar spielt es bei tiefen Frequenzen keine Rolle, welcher der beiden Stege eingesetzt ist. Maxima, die bei denselben bzw. bei ähnlichen Frequenzen auftreten, sind durch rote Ziffern gekennzeichnet. Im Betriebsbereich des Cellos wurden bis 800 Hz achtzehn mehr oder weniger ausgeprägte Spitzen lokalisiert.

In Abb. 7.3 sind tabellarisch diejenigen Schwingungsformen zusammen gestellt, die sich anhand der Frequenz diesen Maxima zuordnen lassen. Die roten Ziffern machen den Zusammenhang deutlich. Es ist eine Darstellung nach Art Chladni'scher Klangfiguren gewählt. Am besten stellt man sich ein Cello mit weißer Oberfläche dar, auf die blaue Körner gestreut sind. Wird das Instrument mit der angegebenen Frequenz angeregt, schwingt die Oberfläche stark. Die blauen Körner bewegen sich dort hin, wo sich das Instrument in Ruhe befindet. Somit stehen dunkle Stellen für Schwingungsknoten, helle für Schwingungsbäuche.

Die Schwingungsbilder sind meist nicht symmetrisch. Bei tiefen Frequenzen ab 92 Hz, was dem ersten Maximum der Stegkonduktanz entspricht, bewegt sich der linke, bassseitige Teil der Decke mehr als der rechte. Die Unsymmetrie bleibt bis etwa 400 Hz erhalten. Wie zu erwarten, unterteilt sich die Vorderseite umso feiner, je höher die Frequenz wird. Bei 778 Hz sind schließlich mehr als zehn Bereiche zu erkennen, von denen jeder sich in Gegenphase zu seinen unmittelbaren Nachbarn bewegt.

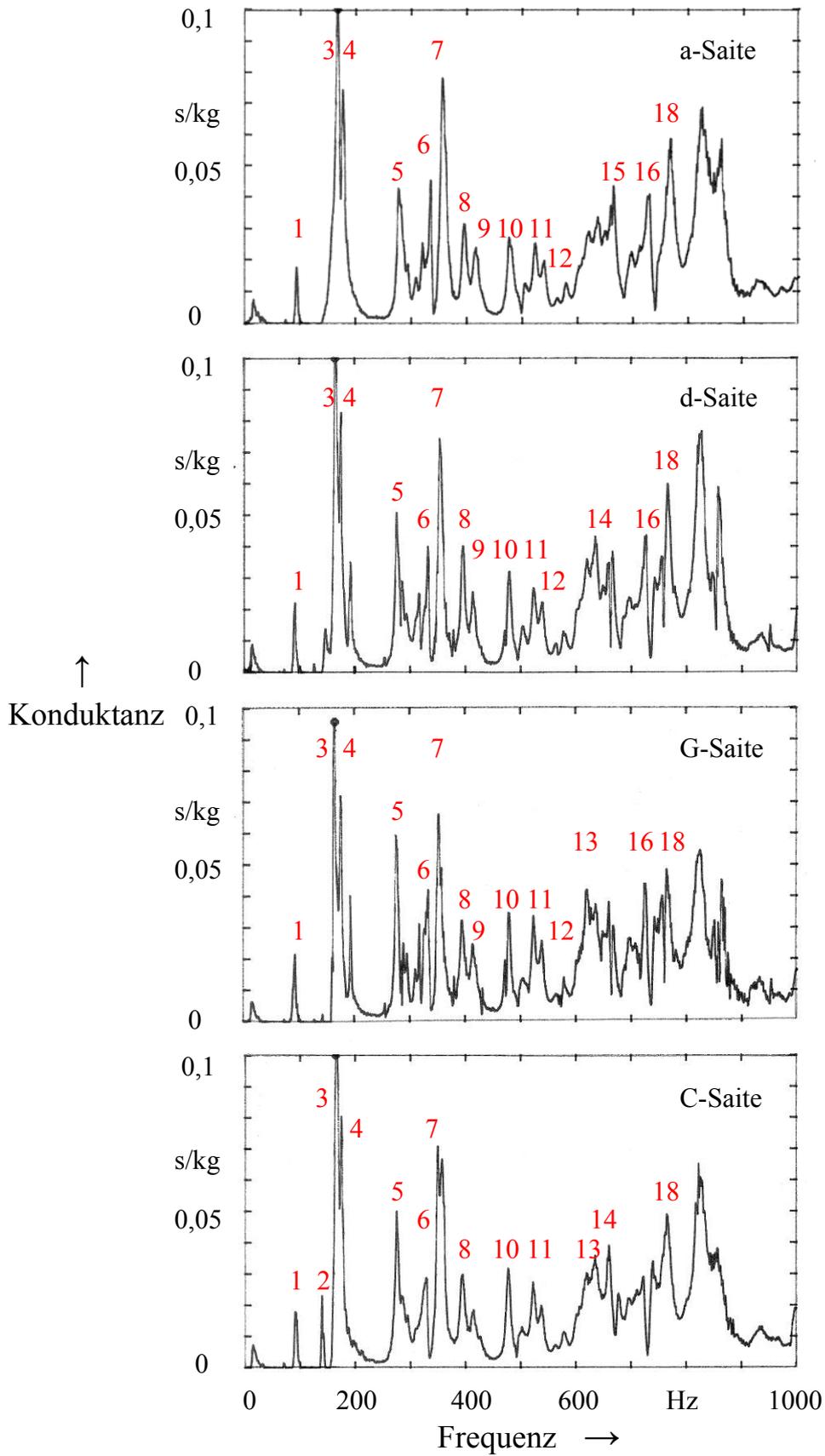


Abb. 7.1. Konduktanz an den Auflagepunkten der vier Saiten am traditionellen Steg als Funktion der Frequenz; die roten Ziffern kennzeichnen die Maxima.

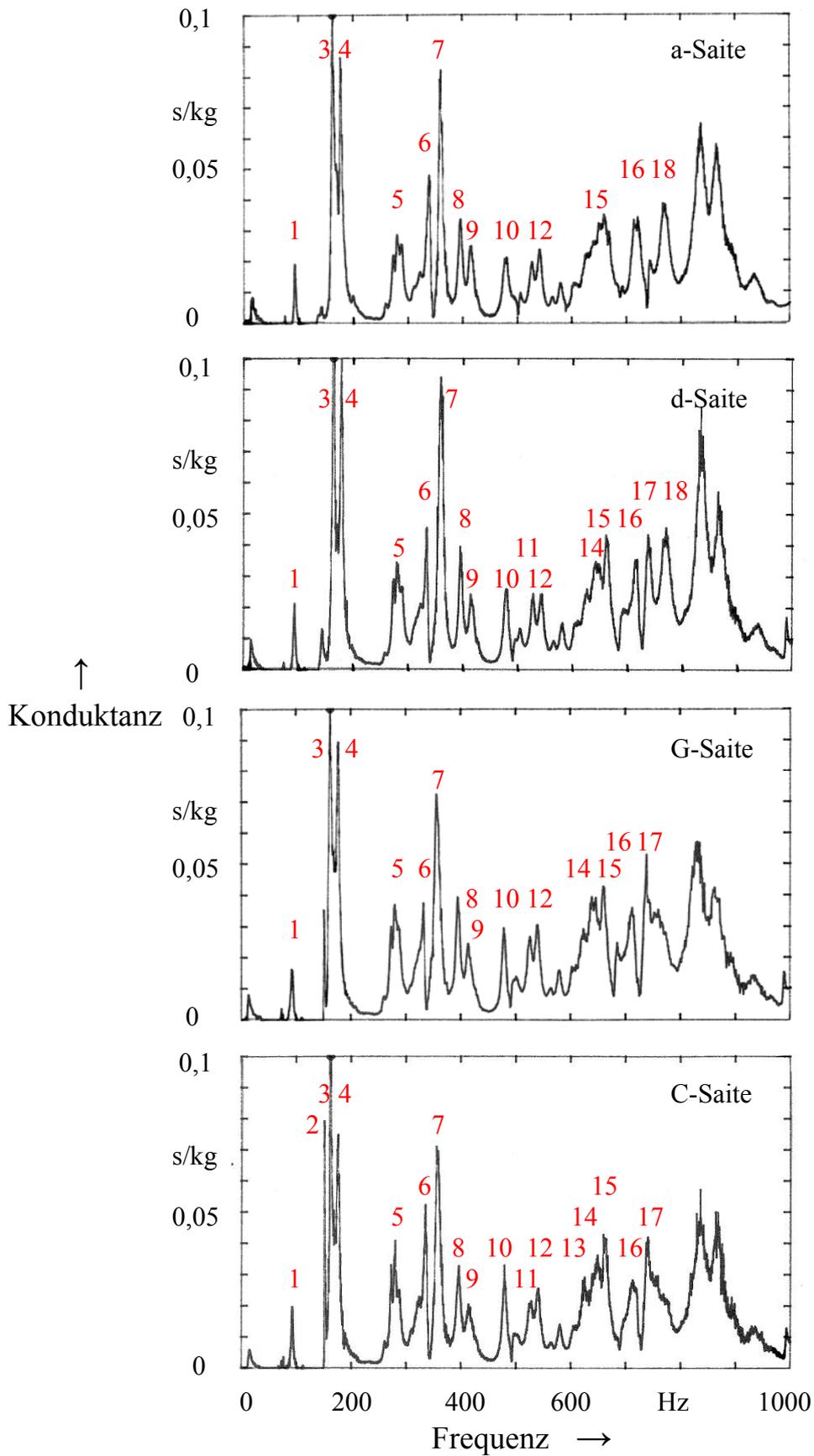


Abb. 7.2. Konduktanz an den Auflagepunkten der vier Saiten am Premio-Steg als Funktion der Frequenz; die roten Ziffern kennzeichnen die Maxima.

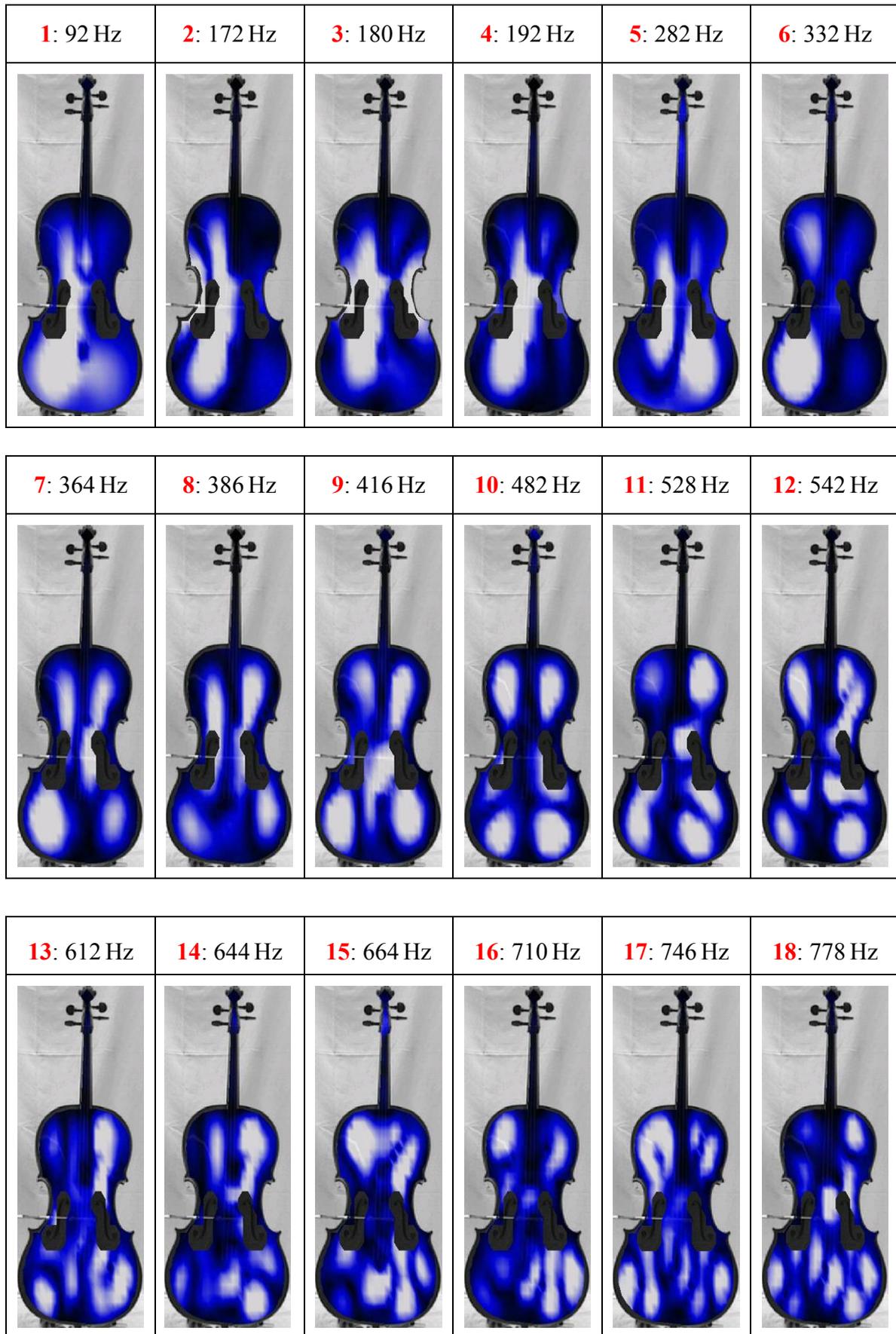


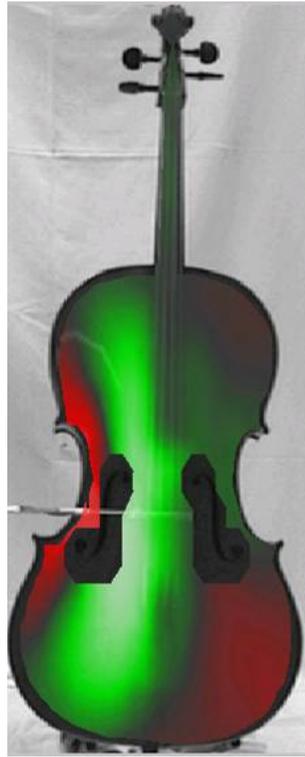
Abb. 7.3. Schwingungsformen und -frequenzen der Vorderseite des Cellos bei Anregung am Premio-Steg; dargestellt ist der Betrag nach Art Chladni'scher Klangfiguren.  
Die roten Ziffern beziehen sich auf die Abb. 7.1 und 7.2.

## **7.2. Schwingungen, die sich in der Stegkonduktanz widerspiegeln**

Der Sachverhalt, der bereits von Abb. 7.3 her bekannt ist, ist in der mehrseitigen Abb. 7.4 größer und auf andere Art wiedergegeben. Während Abb. 7.3 den Betrag zeigt, ist für die Darstellung der Schwingungsmuster nun der Augenblickswert gewählt. Die animierte Bewegung wird zu einem Zeitpunkt gestoppt, der dem Experimentator günstig erscheint. Die „eingefrorene“ Schwingung zeigt sich als Rot-Grün-Bild, das dem Video-Bild des Cellos überlagert ist. Rot besagt, dass sich die Oberfläche momentan nach außen bewegt; grün steht für Bewegung nach innen. Je heller die Farbe ist, desto stärker ist die Bewegung. Helle Bereiche charakterisieren Bäuche, dunkle Linien kennzeichnen Knoten der Schwingung.



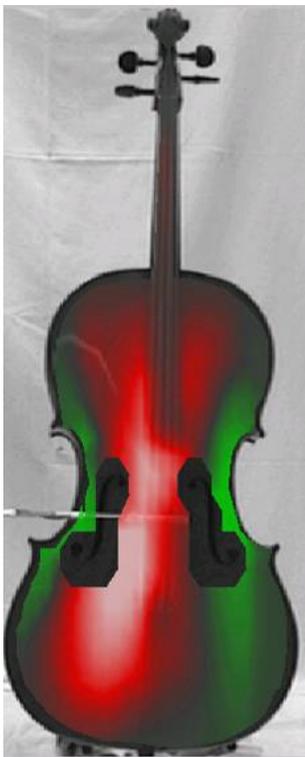
1: 92 Hz



2: 172 Hz



3: 180 Hz



4: 192 Hz



5: 282 Hz

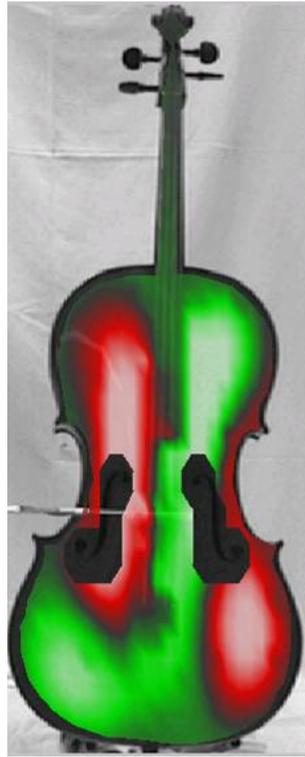


6: 332 Hz

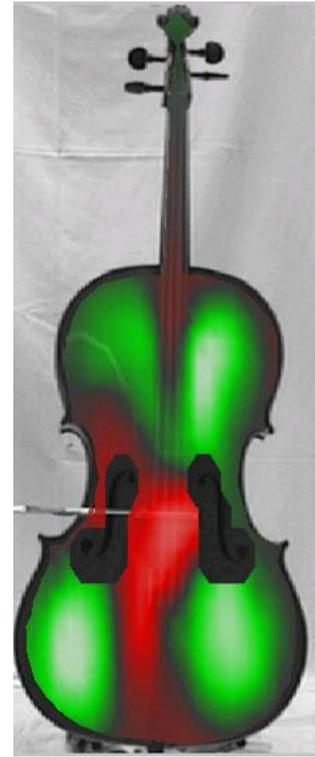
Abb. 7.4.a. Schwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung am Premio-Steg. Dargestellt ist der Augenblickswert der Schwingung. Die roten Nummern beziehen sich auf die Abb. 7.1 und 7.2.



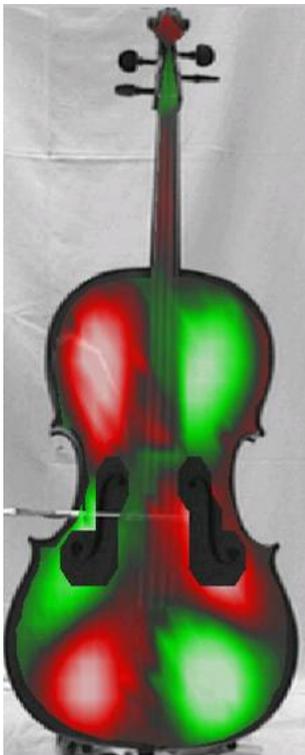
**7:** 364 Hz



**8:** 386 Hz



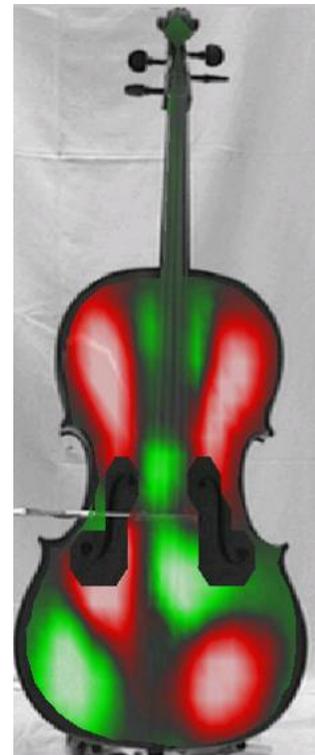
**9:** 416 Hz



**10:** 482 Hz

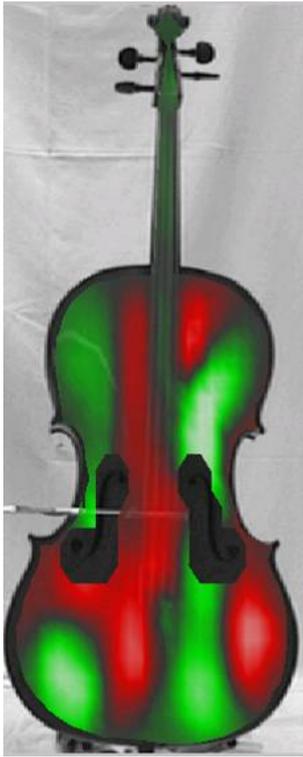
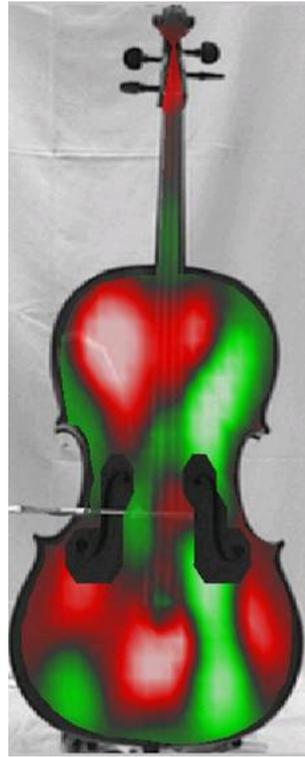
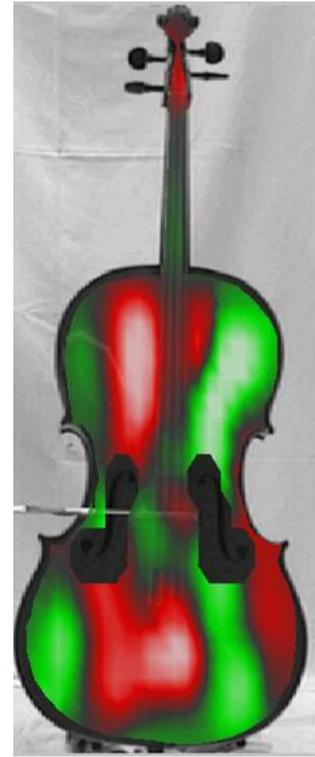
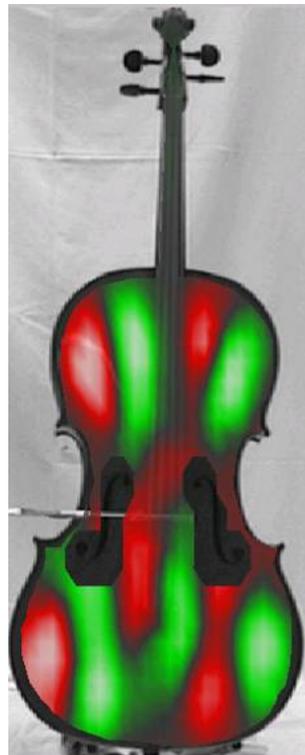


**11:** 528 Hz



**12:** 542 Hz

Abb. 7.4.b. Schwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung am Premio-Steg. Dargestellt ist der Augenblickswert der Schwingung. Die roten Nummern beziehen sich auf die Abb. 7.1 und 7.2.

**13:** 612 Hz**14:** 644 Hz**15:** 664 Hz**16:** 710 Hz**17:** 746 Hz**18:** 778 Hz

*Abb. 7.4.c. Schwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung am Premio-Steg. Dargestellt ist der Augenblickswert der Schwingung. Die roten Nummern beziehen sich auf die Abb. 7.1 und 7.2.*

Die gefundene Zuordnung dieser Schwingungsmuster zu den Maxima der Stegkonduktanz soll noch weiter vertieft werden. Als charakteristisches Beispiel ist die Konduktanz am Punkt herausgegriffen, an dem die G-Saite am Premio-Steg aufliegt. Aus Abb. 7.5 sind mehr Details als im stark verkleinerten dritten Teildiagramm von Abb. 7.1 zu ersehen. Jedem der Schwingungsbilder, die in Abb. 7.3 tabellarisch und in Abb. 7.4 detaillierter zusammen gestellt sind, ist in Abb. 7.5 eine mehr oder weniger ausgeprägte Spitze der Konduktanz am Steg zugeordnet.

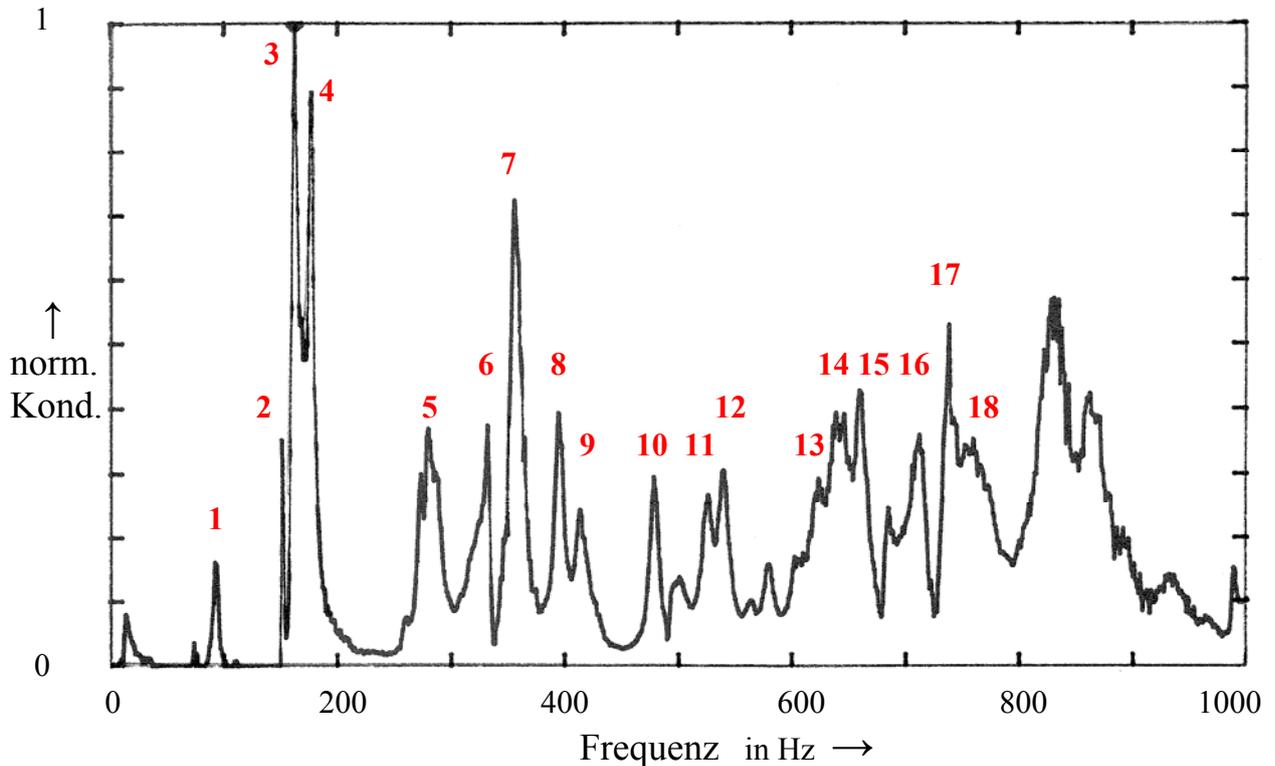


Abb. 7.5. Normierte Konduktanz, gemessen an der G-Saite am Premio-Steg als Funktion der Frequenz.

Die Maxima in Abb. 7.5 sind von unterschiedlicher Höhe. Welchen Wert die Konduktanz maximal annimmt, hängt damit zusammen, ob die jeweilige Schwingungsform in der Nähe des Steges einen Bauch oder einen Knoten ausbildet. Während Ersteres eine hohe „Schwingfreudigkeit“ zur Folge hat, führt Letzteres zu einem kleinen Wert der Konduktanz. Befindet sich der Steg genau in einem Knoten, ist die Konduktanz Null. Hierin spiegelt sich die wohlbekannt Tatsache wider, dass es nicht möglich ist, eine Schwingung im Knoten anzuregen. Darüber hinaus spielt eine große Rolle, wie effizient das Cello Schall erzeugen kann, wenn es in der betreffenden Form schwingt. In dieser Hinsicht ist auch das Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Abmessungen der schwingenden Bereiche von Bedeutung. Es wird umso mehr Schall abgestrahlt, je größer in Phase schwingende Bereiche im Vergleich zur Wellenlänge sind.

### 7.3. Schwingungen, die sich nicht in der Stegkonduktanz widerspiegeln

Die Betrachtungen des vorigen Abschnitts haben gezeigt, dass jedem lokalen Maximum der Konduktanz am Steg eine der beobachteten Schwingungsformen zugeordnet werden kann. Dies war zu erwarten und auch durch den Ort und die Art der Anregung verstärkt worden. Schließlich war das Cello bei der Messung der Schwingungen (parallel zur Decke) auf ganz ähnliche Weise am Steg angeregt worden, wie auch bei der Messung der Admittanz.

Ein Vergleich mit experimentellen Untersuchungen (Fleischer 2009a) hat diesen Zusammenhang im Grundsatz bestätigt: In der Konduktanz am Steg spiegeln sich Strukturschwingungen des Cellos wider. Die Erkenntnisse aus den Schwingungsmessungen haben es ermöglicht, Maxima der Admittanz bzw. der Konduktanz zu interpretieren. Umgekehrt jedoch scheinen nicht alle gemessenen Schwingungen für den Spielbetrieb relevant zu sein. Dies wird daran erkennbar, dass ursprünglich im Bereich bis 800 Hz insgesamt 27 Schwingungsformen nachgewiesen werden konnten. Als Spitzen in der Stegkonduktanz finden sich in diesem Bereich dagegen gemäß den Abb. 7.3 und 7.4 lediglich zwei Drittel davon, also 18 Schwingungen, wieder. So haben manche dieser Schwingungen offenkundig keine Bedeutung für die Funktion des Cellos als Musikinstrument.

Insbesondere die Überlegungen des Kapitels 6 haben jedoch darauf hingedeutet, dass es offenbar auch Schwingungen des Korpus gibt, die zwar keine Spuren in der Stegkonduktanz hinterlassen, aber trotzdem für die Abstrahlung von Schall von Belang sein können. Diese fin-

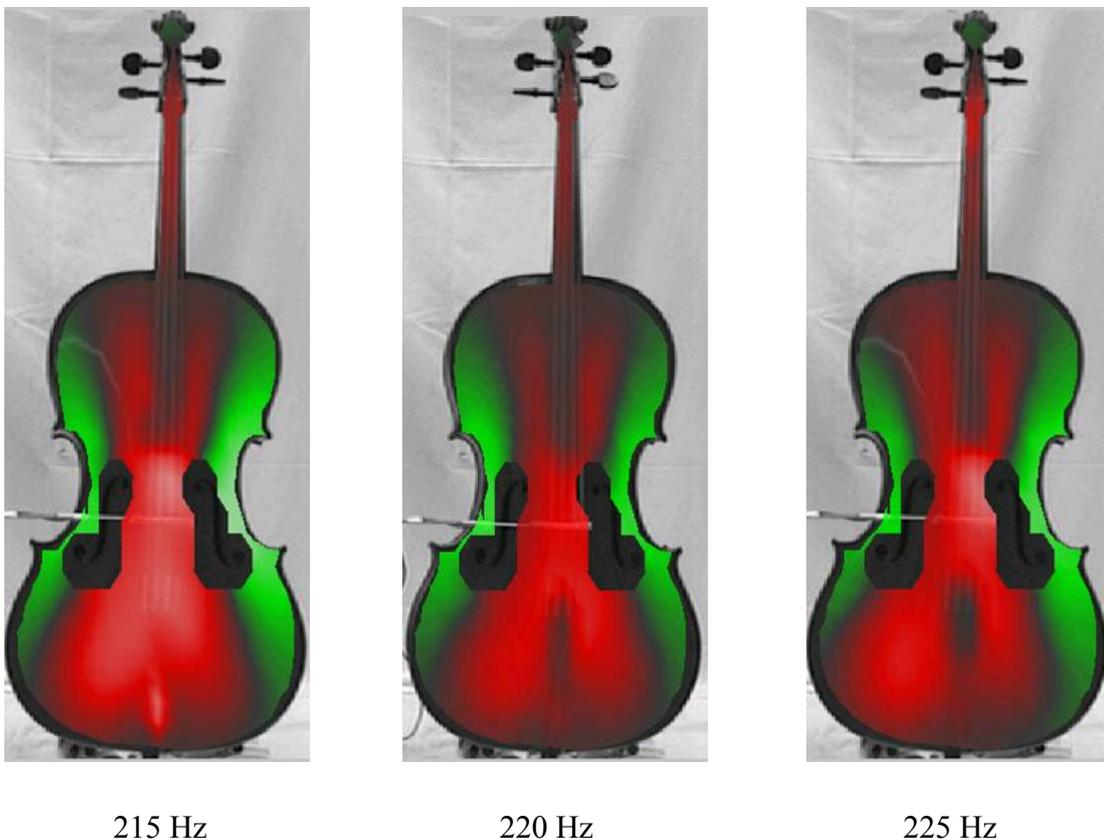


Abb. 7.6. Schwingungsformen des Cellos, die sich nicht in der Konduktanz am Steg widerspiegeln; Ergebnisse verschiedener Messungen bei tangentialer Anregung am traditionellen Steg.

den sich nicht in der Konduktanz wieder, solange in Streichrichtung, d.h. parallel zur Decke, gemessen wird. Es ist zu vermuten, dass sie eher nachzuweisen sind, wenn senkrecht zur Decke angeregt und gemessen wird. Dies ist die Richtung, in der die Saite hauptsächlich ausgelenkt wird, wenn der Spieler sie nicht streicht, sondern zupft. Hierzu liegen einige Ergebnisse vor; vgl. Fleischer (2009a).

Darüber hinaus ist denkbar, dass es Korpuschwingungen gibt, die nicht über den Steg, sondern vornehmlich über den Hals angeregt werden. Hierzu liegen keine gezielten eigenen Schwingungsuntersuchungen vor. Jedoch haben sich z.B. gemäß Kapitel 4 um die Note a im Schallsignal Komponenten gefunden, zu denen keine Entsprechung in der tangentialen Stegkonduktanz (Kapitel 6) aufzuspüren war. Exemplarisch sind hier einige Erscheinungsformen einer Schwingung im Bereich dieser Note (220 Hz) zusammen gestellt.

In Abb. 7.6 finden sich drei Spielarten einer Schwingung, die bereits im Abschnitt 6.2.1 behandelt worden ist, in der hier verwendeten *Color-Map*-Darstellung wieder. Es war der traditionelle Steg eingebaut. Die Schwingungsbilder gehen auf unterschiedliche Messreihen zurück. Zwischen 215 Hz und 225 Hz wurden drei sehr ähnliche Bewegungsmuster gefunden. Nahe der Mittellinie bewegt sich die Decke in Gegenphase zu zwei Streifen am Rand.

Eine Schwingung dieser Art wird sich nur sehr schwach ausprägen, wenn die Saitenkraft über den Steg im Sinne eines Drehmoments antimetrisch auf die Decke wirkt. Wie bereits in Abb. 6.6 zu erkennen war, bewegt sich jedoch nicht nur die Decke. Vielmehr bezieht die Schwingung des Instruments den Hals mit ein. Es ist zu vermuten, dass sie sich nicht nur am Steg anregen lässt. Vielmehr wird die Saite in der Lage sein, das Instrument auch über ihr halsseitiges Ende zum Mitschwingen zu bringen.



217,5 Hz (tangential)

222 Hz (normal)

Abb. 7.7. Schwingungsformen des Cellos mit Premio-Steg, die sich nicht in der Konduktanz widerspiegeln.

Erwartungsgemäß ist diese Erscheinung nicht auf den traditionellen Steg beschränkt. Sie lässt sich auch beim Premio-Steg beobachten. Abb. 7.7 gibt die beiden Schwingungsformen des Premio-Steges, die bereits im Abschnitt 6.2.2 behandelt worden sind, erneut wieder. Der Steg wurde in tangentialer (links) bzw. normaler Richtung (rechts) angeregt. Bezogen auf ihre Mittellinie unterteilt sich die Decke spiegelsymmetrisch. Sie schwingt in ihrem langgezogenen inneren Teil bis hin zum Kopf gegenphasig zu den beiden schmalen äußeren Teilen. Offensichtlich handelt sich um das gleiche Schwingungsmuster wie in Abb. 7.6. Es ist zu vermuten, dass ähnliche Beobachtungen auch bei höheren Frequenzen und anderen Schwingungsmustern zu machen sind.

#### **7.4. Zusammenfassende Bemerkung**

Hinweise auf den richtigen Stellenwert der beobachteten Schwingungen geben die Admittanz und insbesondere deren Realteil, die Konduktanz (Fleischer 2010b). Ist die Admittanz klein, wird der Korpus sich nur wenig bewegen. Ist die Konduktanz klein, kann nur wenig Schall abgestrahlt werden. Je größer im Betriebsbereich der betrachteten Saite die Konduktanz ist, von desto höherer Bedeutung ist die zugehörige Korpussschwingung. Demnach sind die Ergebnisse zur Konduktanz im Zusammenhang mit den Korpussschwingungen von weitreichender Bedeutung. Sie messen den Schwingungen, die bei Fleischer (2009a) besprochen wurden, ihre tatsächliche Wertigkeit zu.

Die Admittanz quantifiziert die Schwingfreudigkeit am Punkt der Messung in der Richtung der Messung. Am Steg des Cellos wurde sie bisher vor allem von Eggers (1991) und von Reinicke (Ergebnisse im Buch von Cremer 1981) gemessen. Sinnvollerweise wird sie dort bestimmt, wo die Saiten Kontakt mit dem Instrumentenkörper haben. Ist die Richtung so gewählt, wie es der hauptsächlichen Orientierung der Saitenschwingung entspricht, dann sind die Maxima Indikatoren für diejenigen Schwingungen, die für die Funktion des Instruments tatsächlich von Belang sind. Darüber hinaus ist der Realteil der Admittanz am Auflagepunkt (die hier betrachte Konduktanz) ein Maß dafür, welche Leistung die Saite in den Instrumentenkörper einbringen kann.

Dabei sollte bedacht werden, dass die Saite nicht nur an einem, sondern an *zwei* Punkten Kontakt mit dem Instrumentenkörper hat. Zwar wird allgemein dem Steg die höhere Bedeutung zugemessen, jedoch kann das Instrument auch am anderen Endpunkt, dem Sattel oder wo der Finger die Saite gegen das Griffbrett drückt, zum Schwingen gebracht werden. Es gibt Hinweise, dass dies in Einzelfällen von Bedeutung sein kann; ein markantes Beispiel war beim betrachteten Cello die Note a (220 Hz). Festzuhalten bleibt, dass die Konduktanz grundsätzlich, obwohl einfach zu messen, von hoher Aussagekraft ist. Sie am Steg in tangentialer Richtung zu bestimmen, ist ohne großen Aufwand möglich. Das Ergebnis der Messung liefert zwar nicht die absolut vollständige Information, bietet aber weitgehenden Einblick über die Fähigkeit eines Saiteninstrumentes, Schwingungsenergie aufzunehmen.

## 8. KONDUKTANZ UND ASPEKTE DER SPIELBARKEIT

Einige weitere Gesichtspunkte, die sich mit der Stegkonduktanz verknüpfen lassen, sollen kurz beleuchtet werden. Sie beziehen sich vor allem auf einen speziellen Aspekt der Spielbarkeit des Instruments, nämlich auf den Wolfston.

### 8.1. Stegkonduktanz und Anregung des Korpus

Bei einem Chordophon sind die Funktionen der Erzeugung des musikalischen Signals und seiner Umwandlung in Luftschall getrennt. Die Saite wird in aller Regel gestrichen und führt daraufhin erzwungene Schwingungen aus. Sie wirkt somit als Signalgenerator. Wegen ihrer geringen Querabmessungen ist sie so gut wie nicht in der Lage, selbst Schall abzustrahlen. Diese Aufgabe fällt dem Korpus zu. Er wird über die beiden Auflagepunkte der Saite zum Mitschwingen gebracht. Hierbei wird allgemein dem Steg eine größere Bedeutung zugemessen als dem Hals. Die Untersuchungen von Abschnitt 6.1 haben die Aussagekraft der Stegkonduktanz in Hinsicht auf die Abstrahlung von Schall im Grundsatz belegt. Im Laufe der Untersuchungen des vorhergehenden Kapitels haben sich jedoch die Hinweise verdichtet, dass daneben noch ein weiterer Übertragungsweg existiert. Dabei muss es sich um den oberen Endpunkt der Saite handeln. Es gibt einige Belege dafür, dass eine Saite den Korpus auch über das halsseitige Auflager zum Schwingen bringen kann; vgl. Abschnitt 6.2.

Ungeachtet der letztgenannten Hinweise wird im Folgenden zunächst angenommen, dass der Steg das hauptsächliche „Eingangstor“ ist, durch das Schwingungsenergie in den Korpus fließt. Die Wirkungskette ist bekannt: Das Kraftsignal, das von der Saite stammt, wird nach Maßgabe der Stegkonduktanz in Bewegungen des Steges umgesetzt, die wiederum Bewegungen des Korpus hervorrufen. Voraussetzung dafür, dass der Korpus Energie ins Schallfeld abstrahlen kann, ist somit eine von Null verschiedene Konduktanz. Nur wenn die Schwinggeschwindigkeit am Steg in Phase mit der Saitenkraft ist, fließt Energie unumkehrbar in den Instrumentenkörper und kann von dort in das Schallfeld abgegeben werden.

In Abb. 8.1 ist die Konduktanz an den Auflagepunkten der vier Saiten des traditionellen Steges, gemessen parallel zur Decke, dargestellt. Die Diagramme sind bereits aus Abschnitt 7.1 bekannt. Allen Messkurven ist gemeinsam, dass mehrere Frequenzbereiche existieren, in denen die Konduktanz besonders groß ist.

**Bereich I:** Die höchsten Werte nimmt die Konduktanz um 165 Hz an. Sie kann 0,1 s/kg erreichen oder sogar überschreiten und für alle Saiten mit Ausnahme der a-Saite von Bedeutung sein. Diese Gruppe von Extrema wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

**Bereich II:** Zwischen etwa 280 Hz und 400 Hz liegen mehrere lokale Maxima ähnlicher Höhe dicht beisammen. Die zugehörigen musikalischen Noten gehören zur eingestrichenen oder vierten Oktave. Die Konduktanz 0,06 s/kg kann erreicht und überschritten werden.

**Bereich III:** Zwischen etwa 620 Hz und 880 Hz sind weitere lokale Maxima ähnlicher Höhe dicht benachbart. Die entsprechenden musikalischen Noten liegen in der zweigestrichenen oder fünften Oktave. Die Konduktanz 0,05 s/kg kann erreicht und überschritten werden.

Die römischen Ziffern oben in Abb. 8.1 markieren diese Bereiche.

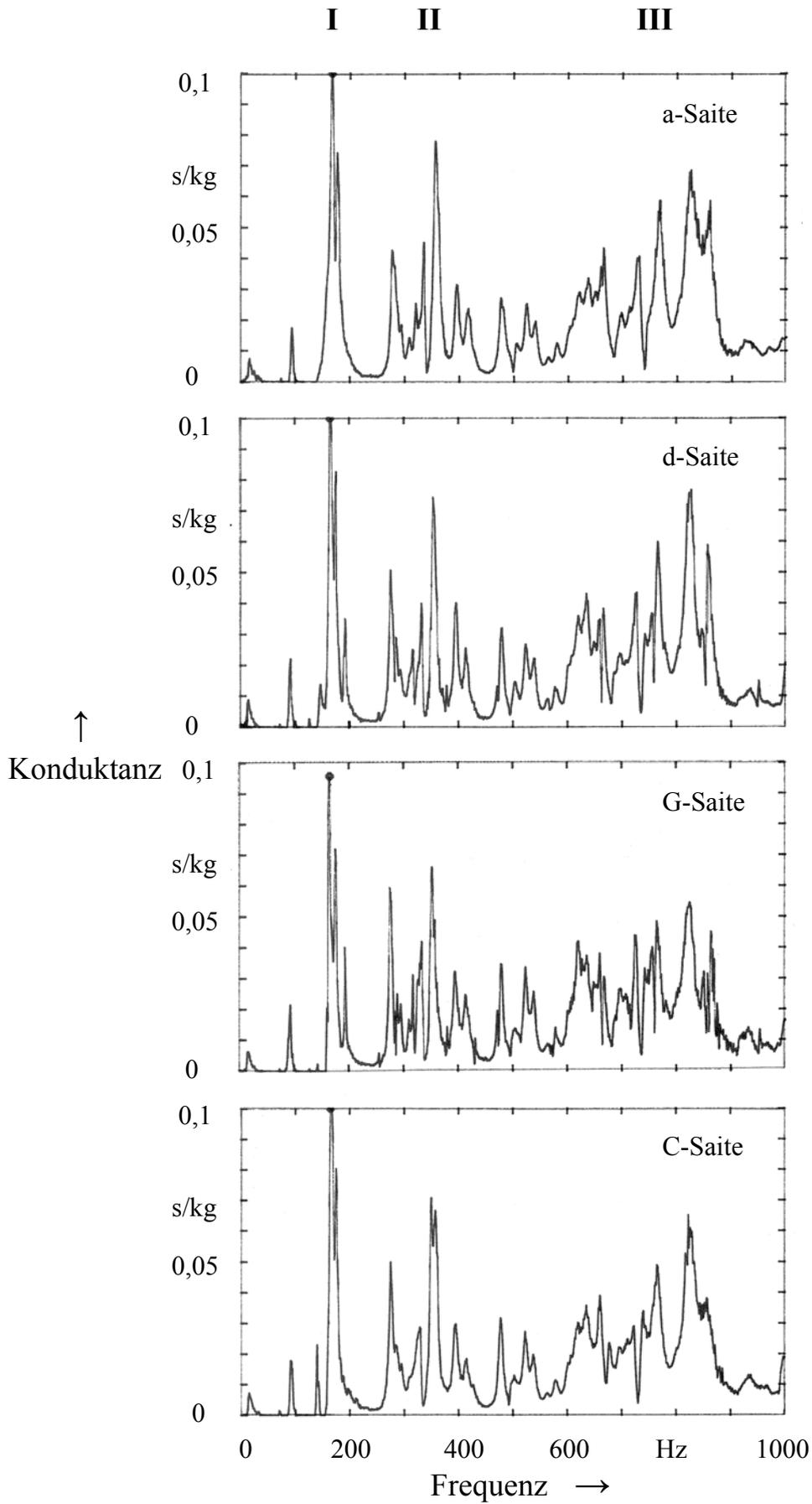


Abb. 8.1. Konduktanz an den Auflagepunkten der vier Saiten am traditionellen Steg als Funktion der Frequenz; die Bereiche hoher Konduktanz sind durch römische Ziffern gekennzeichnet.

Es ist zu erwarten, dass Teiltöne, die innerhalb der Bereiche I – III mit den Maxima koinzidieren, besonders gut abgestrahlt werden. Dass diese Vermutung begründet ist, haben die Vergleiche von Abschnitt 6.1 zwischen Schallspektrum und Konduktanz bestätigt. Die Anhebungen im Schallspektrum, die damit einhergehen, werden die Klangfarbe des Schallsignals prägen und damit für das Cello typisch sein. Es gibt Hinweise darauf, dass sich solche „Formanten“ auch bei höheren Frequenzen finden; vgl. Abschnitt 4.2.

Diese Betrachtung zeigt, dass die Stegkonduktanz Aussagen über die Fähigkeit des Instrumentenkörpers zulässt, Schwingungsenergie aufzunehmen. Dies ist notwendige Voraussetzung dafür, Energie ins Schallfeld abzugeben. Die Konduktanz ermöglicht es, die Aufnahmefähigkeit des Korpus isoliert zu betrachten und ist damit unabhängig vom Anstrich, den Saiten usw. Was bisher für die Stegkonduktanz nachgewiesen worden ist, lässt sich sinngemäß auf den anderen Kontaktpunkt der Saite erweitern. Die Konduktanz, gemessen an den Auflagepunkten der Saiten, stellt somit ein leistungsfähiges Werkzeug dar, mit dem der Instrumentenbauer die Eigenschaften seiner Erzeugnisse objektbezogen untersuchen und dokumentieren kann.

## **8.2. Der Wolfston**

Die Konduktanz am Steg lässt nicht nur Schlüsse auf die Abstrahlbarkeit von Tönen zu. Vielmehr kann sie auch dazu beitragen, bestimmte Aspekte der Spielbarkeit des Instruments zu verstehen. Eine Erscheinung, die als typisch für das Cello betrachtet werden kann, ist der Wolfston (bzw. Wolf-Ton).

### **8.2.1. Phänomen und Gegenmaßnahmen**

Der Wolfston tritt bei Streichinstrumenten, insbesondere beim Cello, auf. Cremer (1981) bezeichnet ihn als „pathologischen“ Streichvorgang. Seine Ursache sieht man üblicherweise darin, dass sich zwei Schwingungen überlagern, die von der Saite bzw. vom Korpus dominiert werden. Zu bestimmten Zeitpunkten ist die Überlagerung konstruktiv, zu anderen destruktiv. Es entsteht eine Schwebung. Diese Schwebung lässt den Celloklang „schnarren“, „flattern“ oder „heulen“. Letzteres assoziiert man mit den Lauten, die ein Wolf von sich gibt. Man spricht daher vom Wolfston oder sagt einfach kurz: „Das Cello hat einen Wolf“.

Cremer (1981) beschreibt die Entstehung des Wolfstones damit, dass die Grundfrequenz einer Saite mit der Frequenz einer sehr schwach gedämpften Eigenschwingung des Korpus zusammenfällt. In solch einem Fall ist es schlecht möglich, das Instrument zu Schwingungen mit konstanter Amplitude anzuregen. Man beobachtet vielmehr ein periodisches Schwanken der Amplitude mit einer Frequenz von einigen Hertz. Dieser Effekt tritt meist dann auf, wenn die d-Saite (Grundfrequenz 147 Hz) leer gespielt oder in den tiefen Lagen gegriffen wird. Die Schwingungen, die durch das Anstreichen der Saiten erzeugt werden, überlagern sich dann mit Eigenschwingungen des Instrumentenkörpers ähnlicher Frequenz, was zu der beschriebenen Erscheinung führen kann.

Der Wolfston ist somit die Folge einer Wechselwirkung zwischen einer Saitenschwingung und einer Korpuschwingung. Es entsteht eine Schwebung der beiden dicht benachbarten Eigenschwingungen des gekoppelten Systems Saite-Korpus. Der Wolfston tritt dann zwischen den Frequenzen dieser Korpusresonanz und der Grundfrequenz der Saite auf. Eine gebräuchliche Vorstellung ist, dass die schwach gedämpfte Korpusresonanz der angestrichenen Saite

Energie entzieht. Dies geschieht intermittierend und führt zu einem schnarrenden Klangeindruck. Naturgemäß ist diese Erscheinung unerwünscht und der Spieler trachtet danach, sie zu vermeiden. Eine – beim Spielen schlecht praktikable - Gegenmaßnahme kann beispielsweise darin bestehen, die betreffende Korpusresonanz durch Auflegen der Hand auf die Decke zu dämpfen. Häufig werden kleine Masse-Feder-Systeme am Instrument befestigt, die als Tilger wirken. Möglich ist auch das Aufbringen von Zusatzmassen, was die Korpusresonanz in der Frequenz verschiebt. Das Aufbringen von Objekten mit dämpfender Wirkung soll dafür sorgen, dass die maximal erreichbaren Amplituden der Korpuschwingung verringert werden.

### 8.2.2. Zusammenhang mit der gemessenen Stegkonduktanz

Bei der folgenden Betrachtung wird vorausgesetzt, dass die Schwingung der Saite nicht über das kopfseitige Ende, sondern über den Steg mit einer Schwingung des Korpus gekoppelt ist. Schwache Dämpfung der Korpuschwingung bedeutet, dass die Stegkonduktanz schmalbandig sehr große Werte annimmt. Da es sich dabei um eine Schwingung handeln muss, deren Frequenz in der Nähe von 145 Hz liegt, kommt hierfür das erste Hauptmaximum der Konduktanz (Bereich I in Abb. 8.1) in Betracht.

Die vergleichende Messung von Abb. 8.2 bezieht sich auf die C-Saite. Im Prinzip wäre es sinnvoller gewesen, am Auflagepunkt der d-Saite zu messen. Abb. 8.1 ist zu entnehmen, dass sich im betrachteten Frequenzbereich jedoch keine wesentlich anderen Erkenntnisse ergeben würden.

Das jeweilige Hauptmaximum ist durch den Markerpunkt gekennzeichnet. Im Beispiel von Abb. 8.2.a wurde am Steg zunächst bei 165 Hz, was der Note e entspricht, die maximale Konduktanz  $G = 0,121 \text{ s/kg}$  gemessen; vgl. auch Abb. 5.1.a. Bei einer weiteren Messung legte der Experimentator nach den Anweisungen des Geigenbaumeisters an der „Wolfsstelle“ die Hand auf die Decke. Dieser dämpfende Kontakt führte zu den Veränderungen im Frequenzgang der Konduktanz, die sich im Vergleich von Abb. 8.2.b mit dem oberen Diagramm zeigen. Am deutlichsten ist zu erkennen, dass im unteren Diagramm von Abb. 8.2 der Höchstwert nun lediglich noch  $0,082 \text{ s/kg}$  beträgt. Der Maximalwert tritt zwar bei derselben Frequenz auf, reduziert sich infolge des dämpfenden Einflusses der Hand jedoch deutlich. Oberhalb von etwa 400 Hz ist kein wesentlicher Einfluss der Zusatzdämpfung mehr zu sehen.

Alles deutet darauf hin, dass in diesem Zusammenhang das Hauptmaximum bei 165 Hz von größter Bedeutung ist. In ihm spiegelt sich das Schwingungsbild wider, das eingefügt ist. Es zeichnet sich durch eine starke Ausbauchung der Decke aus, die durch das Auflegen der Hand offenbar in der Amplitude reduziert worden ist.

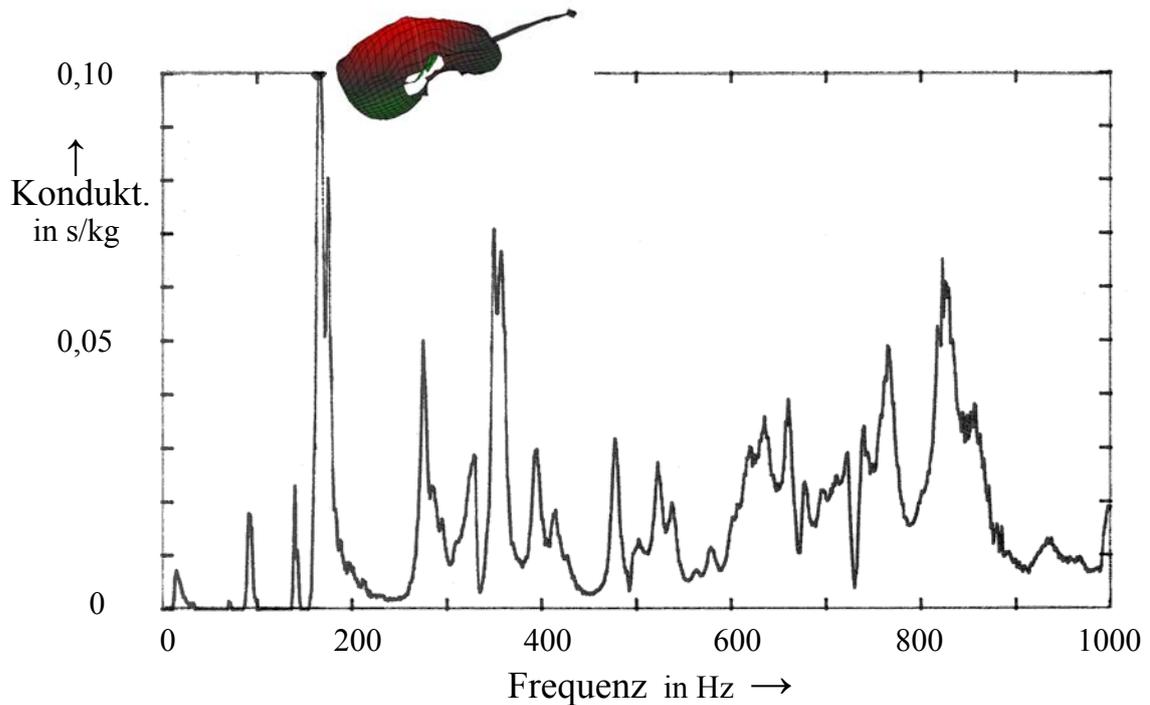


Abb. 8.2. a. Konduktanz des traditionellen Steges in tangentialer Richtung als Funktion der Frequenz am Auflagepunkt der C-Saite. Eingefügt ist die zum Hauptmaximum gehörende Korpussschwingung.

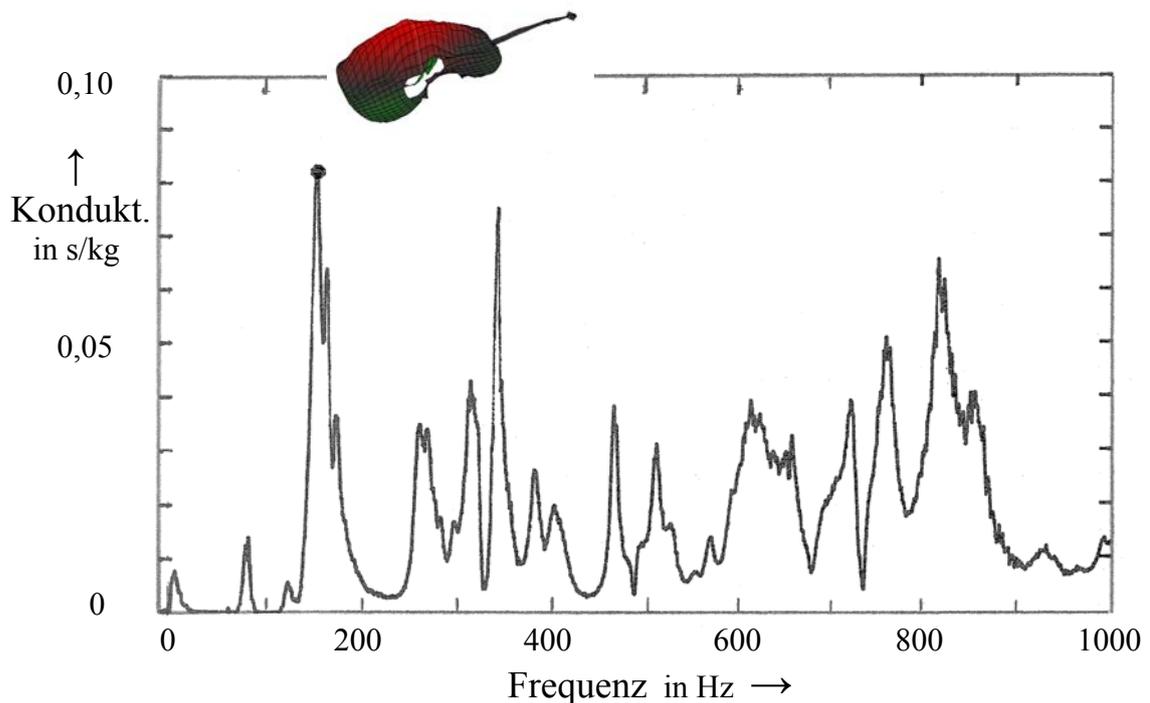


Abb. 8.2. b. Konduktanz des traditionellen Steges in tangentialer Richtung als Funktion der Frequenz am Auflagepunkt der C-Saite. Die Hand liegt auf der „Wolfsstelle“. Eingefügt ist die zum Hauptmaximum gehörende Korpussschwingung.

### 8.2.3. Theoretische Abschätzung

Bei der Eigenfrequenz der Korpussschwingung ist die Admittanz reell. Allen bisherigen Beobachtungen zufolge kann die Stegkonduktanz dann Werte von mehr als 0,1 s/kg annehmen,

was einer Impedanz von weniger als 10 kg/s entspricht. Cremer (1981) sieht die Voraussetzung für das Entstehen des Wolfstones darin, dass die Stegimpedanz nicht mehr groß im Vergleich zur Kennimpedanz der Saite ist. In welchem Maße dies zutrifft, soll anhand der nachfolgenden Abschätzung überprüft werden.

Bekanntlich errechnet sich die Kennimpedanz einer Saite (Index str für *string*) gemäß

$$Z_{\text{str}} = \mu c = S/c = (\mu S)^{-1/2} \quad ; \quad (1)$$

hierein ist

$\mu$  die Masse pro Längeneinheit,

$S$  die Spannkraft und

$c = (S/\mu)^{1/2}$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Transversalwellen auf der Saite.

Die Grundfrequenz einer Saite der Länge  $l$  ist

$$f = c/(2l) \quad . \quad (2)$$

Für die leere d-Saite ist  $f_{\text{leer}} = 145$  Hz und  $l_{\text{leer}} = 0,69$  m. Damit ergibt die Auflösung von Gl. (2) die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c \approx 200$  m/s. Die Spannkraft einer d-Saite ist etwa  $S \approx 150$  N. Mit diesen Zahlenwerten erhält man aus Gl. (1)

$$Z_{\text{str}} = 150 \text{ N}/(200 \text{ ms}^{-1}) \approx 0,75 \text{ kg/s} \quad . \quad (3)$$

Dieser Wert erscheint realistisch. Er liegt etwas unterhalb des Bereiches von 1 ... 2 kg/s, wie er gemäß Fleischer (2005) für die Saiten von Elektrobässen typisch ist. Die Kennadmittanz der Saite ist dann

$$Y_{\text{str}} = 1/Z_{\text{str}} \approx 1,3 \text{ s/kg} \quad . \quad (4)$$

Dieser Wert ist etwa zehnmal so groß wie die maximale Stegkonduktanz gemäß Abb. 8.2.a.

Ausgedrückt in Impedanzen bedeutet dies das Folgende: Die Kennimpedanz der Saite beträgt  $Z_{\text{str}} \approx 0,75$  kg/s; die minimale Stegimpedanz ist  $Z = 1/G \approx 8,2$  kg/s. Damit ist die Stegimpedanz immer noch deutlich größer als die Kennimpedanz der Saite. Ob der Faktor zehn, den die eigenen Messungen ergeben, für die Erklärung des Wolfstones ausreicht, kann nicht abschließend beurteilt werden. Jedoch liegt der Schluss sehr nahe, dass das Hauptmaximum der Stegkonduktanz um 165 Hz die Erklärung für das Entstehen des Wolfstones in den tiefen Lagen der d-Saite liefert.

#### 8.2.4. Mögliche zusätzliche Ursachen

In diesem Zusammenhang sollte geprüft werden, ob nicht auch eine Anregung des Korpus über den Hals denkbar wäre, wie sie für Gitarren von Fleischer (1997) beschrieben worden ist. Hinweise auf diesen zweiten Übertragungsweg haben sich schon in den Abschnitten 6.2 und 7.3 gezeigt. In Abb. 8.3 sind zwei Schwingungsbilder des Cellos dargestellt, die diese Annahme plausibel erscheinen lassen. Die linke Schwingungsform bildet sich aus, wenn die Frequenz der Anregung 124 Hz ist. Sie ist durch extreme Biegung des Halses charakterisiert. Die rechts abgebildete Schwingung tritt bei derjenigen Frequenz auf, bei welcher auch die Konduktanz am Steg ihr Maximum erreicht.

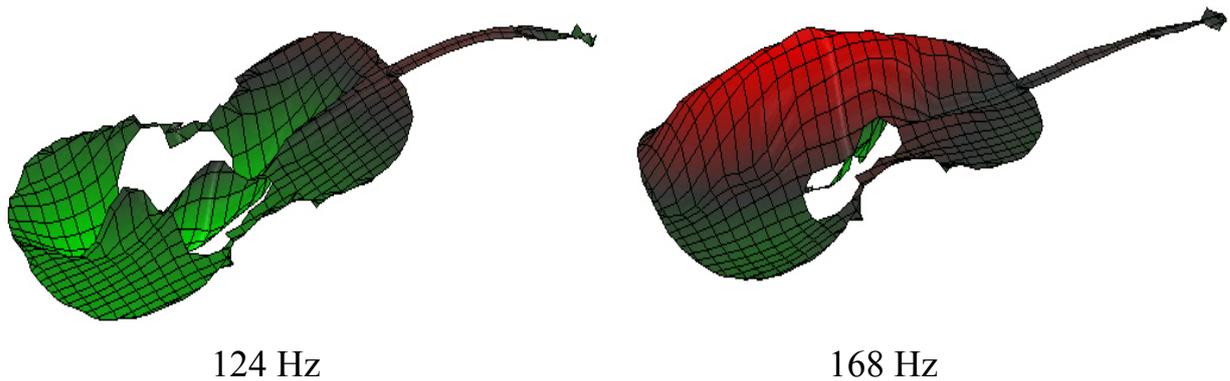


Abb. 8.3. Korpuschwingung des Cellos bei tangentialer Anregung am traditionellen Steg  
links: bei 124 Hz und rechts: bei 168 Hz.

Im rechten Schwingungsbild verformt sich der Hals weniger als die Decke. Diese Aussage bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Normalenrichtung, das heißt auf die Bewegung des Halses senkrecht zur Decke. Dies ist die Komponente, die mit der Laser-Messung erfasst worden ist. Über eine mögliche Seitwärtsbewegung des Halses, das heißt in der Ebene der Decke, lässt diese Messung keine Aussagen zu.

Die Schwingung von Kopf, Hals und Griffbrett im linken Bild von Abb. 8.3 kann mit dem mechanischen Modell des Balkens nachgebildet werden. Aus der Theorie der Biegeschwingung des Balkens ist bekannt, wie die Frequenzen von den Abmessungen abhängen. Sofern der Querschnitt Rechteckform hat, ist die Frequenz einer Schwingung proportional zur Dicke, d.h. zur Abmessung des Querschnitts in Schwingungsrichtung. Ist die Frequenz einer bestimmten Schwingung des Halses in einer Raumrichtung bekannt, kann abgeschätzt werden, bei welcher Frequenz eine vergleichbare Biegeschwingung in der dazu senkrechten Raumrichtung auftreten wird. Hier interessiert insbesondere eine Form ähnlich wie sie im linken Bild von Abb. 8.3 zu sehen ist, nunmehr aber nicht senkrecht, sondern parallel zur Decke. Deren Frequenz wird etwa um das Verhältnis von Breite zu Dicke des Halses größer als 124 Hz sein. Ist der Hals des Cellos um ein Drittel breiter als dick, dann dürfte eine ausgeprägte Biegeschwingung des Halses vom Typ, wie sie in Abb. 8.3 links dargestellt ist, bei  $1,33 \cdot 124$  Hz, also bei etwa 165 Hz, auftreten.

Es erscheint daher nicht ausgeschlossen, dass nicht nur der Steg, sondern auch der Hals in der Nähe der Wolfs-Frequenz Schwingungen mit großen Amplituden ausführen. Entsprechende Messungen sollten durchgeführt werden. Dabei könnte zum einen die Schwingung in Quer-richtung untersucht werden; zum anderen könnte in dieser Richtung auch die Admittanz bzw. Konduktanz gemessen werden. In früheren eigenen Untersuchungen an elektrischen Gitarren ist die „laterale“ Halskonduktanz bereits gemessen worden; vgl. Abschnitt 5.4 in Fleischer (2001). Dies sollte auch beim Cello geschehen, wobei das Hauptaugenmerk auf den Bereich der Wolfs-Frequenz zu richten wäre.

Dass bei Streichinstrumenten der Hals und das Griffbrett ein reges „Eigenleben“ führen, haben mehrere Untersuchungen gezeigt, deren bevorzugtes Objekt allerdings nicht das Cello, sondern die Violine war. So hat Knott (1987) Schwingungsberechnungen mit dem Finite-Elemente-Programm MSC/NASTRAN durchgeführt. Eine Kurzfassung findet sich im Sammelband *Research Papers in Violin Acoustics: 1975 – 1993 Band I* von C. Hutchins. Marshall

(1985) hat mittels Modalanalyse experimentell nachgewiesen, dass der Hals der Violine neben Biegung aus der Ebene heraus (*vertical bending*) auch Torsion ausführt. Zu prinzipiell vergleichbaren Ergebnissen kommen Day und Jansson (1993). Die seitliche Bewegung des Halses, das heißt in der Ebene der Decke, wurde bisher allerdings offenbar noch nicht untersucht.

Naturgemäß sind bei der Violine die zugehörigen Frequenzen größer als beim Cello. Eine Gegenüberstellung (Fleischer 2009a) hat gezeigt, dass vergleichbare Biegeschwingungen beim Cello für Frequenzen zu erwarten sind, die entsprechend dem Faktor 0,32 ... 0,48 kleiner sind als bei der Violine. Damit lassen sich die (sehr zahlreichen) Ergebnisse für die Violine auf die (äußerst spärlichen) Resultate für das Cello transponieren. Festzuhalten bleibt, dass das System Hals/Griffbrett bei der Violine Schwingungen verschiedenster Art ausführt. Nichts spricht dagegen und alles dafür, dass sich beim Cello für Frequenzen von etwas weniger als der Hälfte derjenigen, welche an der Geige gemessen worden sind, vergleichbare Schwingungen ausbilden.

Wie bereits die Überlegungen des vorigen Kapitels, so liefert auch das Phänomen Wolfston Hinweise darauf, dass die frequenzabhängige Beweglichkeit von Hals und Griffbrett näher untersucht werden sollten. Dabei empfiehlt es sich, nicht nur die Amplituden im Auge zu behalten, sondern die Gesamtschau zu wahren. Es wäre auch interessant zu wissen, in welchen Phasenbeziehungen die Teile des Instrumentenkörpers sich dort bewegen, wo sie Kontakt mit der Saite haben.

### 8.3. Einige weitere Aspekte

Die Klangfarbe ist kennzeichnend für ein Instrument. Dass die Konduktanz am Steg beschreibt, welche Spektralanteile von der Saite in den Korpus eingebracht werden können, hat sich in Kapitel 6 erwiesen. Zum Teil werden sich diese Anteile in Schall umwandeln und mit ihrer spektralen Verteilung die Klangfarbe bestimmen. Darüber hinaus haben sich Hinweise ergeben, dass bestimmte Schwingungen auch über Griffbrett und Hals in den Korpus eingebracht werden können.

Für den Spieler von großer Wichtigkeit ist die Ansprache seines Instruments. Ihn interessiert, dass der Vorgang seines Anstreichens möglichst schnell in den stationären Zustand übergeht, in dem die Saite mit der gewünschten Frequenz schwingt und ihrerseits die periodische Zufuhr von Energie durch den Bogen steuert. Dass hierfür isolierte hohe und steile Maxima in der Konduktanz von Vorteil sind, darf bezweifelt werden. Stimmt die Frequenz einer Saitenschwingung mit der Frequenz eines solchen Maximums überein, fließt viel Energie in den Korpus und kann abgestrahlt werden. Der Klang wird laut sein und lange nachklingen. In Hinsicht auf das Einschwingen kann vermutet werden, dass es auch lange dauern wird, bis sich eine stationäre Bewegung des Korpus eingestellt hat. Im Extremfall treten unerwünschte Erscheinungen der Art auf, wie sie zum oben beschriebenen Wolfston führen. Auch hierbei erscheint naheliegend, dass nicht nur die Konduktanz am Steg, sondern auch die am Hals von Bedeutung ist.

In diesem Zusammenhang deutet sich ein Zielkonflikt an. Es darf begründet vermutet werden, dass ein sehr lautes Cello nicht bei allen Noten gleich gut anspricht. Im Sinne des einen Kriteriums soll die Konduktanz hoch (und damit schmalbandig) sein, im Sinne des anderen eher ausgeglichen, breitbandig und damit zwangsläufig geringer.

Ein weiterer, nichtakustischer Effekt ist, dass sich Schwingungen des Instrumentenkörpers möglicherweise taktil bemerkbar machen. Manche Spieler von Streichinstrumenten berichten, dass sie mit der linken Hand das Instrument vibrieren und auf das Anstreichen „antworten“ fühlen. Wie schwingfreudig das Griffbrett an welcher Stelle bei welcher Frequenz ist, zeigt sich in der Konduktanz, gemessen entlang der Saitenlinien. Wird der Torsion von Griffbrett und Hals keine große Bedeutung zugemessen, bietet sich eine Messung entlang der Mittellinie an. Um ein möglichst vollständiges Bild zu erhalten, sollte der Aufwand nicht gescheut werden, neben dem *vertical bending* auch das *horizontal bending* zu betrachten.

Welche Merkmale, die ein Cello leichter spielbar machen, für wichtig erachtet werden, lässt sich nur im Dialog mit Spielern beurteilen. Dass einige davon sich in der Konduktanz widerspiegeln, kann als belegt gelten. Ebenso hat sich gezeigt, dass ein Großteil der relevanten Information in der Stegkonduktanz enthalten ist. Den restlichen Anteil liefert die Konduktanz, die mit größerem Aufwand und geringerem Gewinn an zusätzlicher Erkenntnis auf dem Griffbrett gemessen werden kann. Dabei wird nicht – wie bei der Scanning-Vibrometrie – flächig, sondern an einzelnen Punkten gemessen. Durch diese „Verringerung der Dimension“ führt die Messung der Konduktanz relativ rasch und mit überschaubarem Geräteaufwand zu sehr aussagekräftigen Resultaten.

#### **8.4. Zusammenfassende Bemerkung**

Die Konduktanz, ermittelt an denjenigen Stellen, an welchen die Saiten Kontakt zum Instrumentenkörper haben, hat sich wiederum als aussagekräftige Messgröße erwiesen. Sie wurde am Steg an den vier Auflagepunkten der Saiten gemessen. Diese Messung liefert einen Großteil der Information. Jedoch lassen sich manche Beobachtungen nur dann erklären, wenn auch das andere Ende der Saiten mit in die Betrachtung einbezogen wird.

Die Hypothese, dass die Saite den Korpus ausschließlich über den Steg zum Schwingen bringt, muss demnach erweitert werden. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass eine nennenswerte Anregung auch über den Hals möglich ist. Die Diskussion, die von Fleischer (2009b) in Hinsicht auf die Orientierung des Messkopfes am Steg geführt wurde, muss für den Hals erneut geführt werden. Um weitere Feinheiten zu ergründen, sollte auch überlegt werden, ob möglicherweise die beiden Auflagepunkte der Saite nicht isoliert, sondern im Zusammenhang miteinander betrachtet werden sollten.

Als eine charakteristische Eigenheit des Cellos wurde der Wolfston besprochen. Er kann in Verbindung mit dem Hauptmaximum der Konduktanz gebracht werden. Möglicherweise spielt dabei auch eine Rolle, dass manche Korpuschwingungen von einer heftigen Bewegung des Halses/Griffbretts begleitet sind. Diese Erscheinungen spielen sich bei tiefen Frequenzen ab. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich die formantenähnlichen Anhebungen, welche die Klangfarbe bestimmen, bei höheren Frequenzen als 1 kHz zu finden sind. Es empfiehlt sich deshalb, bei künftigen Untersuchungen auch den Bereich oberhalb von 1 kHz zu betrachten. Möglicherweise finden sich dann Abweichungen in Korpuschwingung und Konduktanz, die auf die unterschiedlichen Stege zurückzuführen sind und sich deutlicher ausprägen, als dies im Bereich tiefer Frequenzen zu beobachten war.

## 9. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Die Beurteilung eines Musikinstruments ist ein extrem weites Feld. Dies gilt in besonders hohem Maße für Streichinstrumente wie das Cello. Ganz wesentlich für die Bewertung eines Cellos ist, woher es stammt, wer es gebaut hat und wann es entstanden ist. Damit wird ein eventueller Wert als Antiquität oder Spekulationsobjekt erfasst, was sich einer physikalischen Betrachtung naturgemäß vollständig entzieht.

Eher objektivierbare Kriterien für die Bewertung sind die Ansprache und die Modulierbarkeit. Das Instrument soll den Spieler in die Lage versetzen, ein Schallsignal zu erzeugen, dessen Klangfarbe, Tragfähigkeit, Lautstärke und Ausgeglichenheit den Anforderungen und Vorstellungen des Musikers entspricht. Ein wesentlicher – wenn nicht überhaupt der wesentlichste - Aspekt für die Bewertung ist, was der Spieler selbst wahrnimmt. Er - und nicht der weit entfernt sitzende Zuhörer - entscheidet über die Auswahl und den Kauf eines bestimmten Instruments. Dabei sollte allerdings klar sein, dass das Schallsignal, das er hört, sich von dem unterscheiden wird, was beim Zuhörer ankommt.

Für den Spieler ist weiterhin von großer Wichtigkeit, wie sein Instrument anspricht. Ihn interessiert, dass der Vorgang seines Anstreichens möglichst schnell in den stationären Zustand übergeht, in dem die Saite mit der gewünschten Frequenz schwingt und die periodische Zufuhr von Energie durch den Bogen steuert. Neben der Ansprache spielt auch die Modulierbarkeit des Klanges eine Rolle, den der Spieler seinen Vorstellungen entsprechend formen will. Neben akustisch/musikalischen Kriterien existieren noch weitere. Dass sich das Instrument gut handhaben lässt, ist eine Grundvoraussetzung für meisterhaftes Spielen. Geometrische Abmessungen, Gewicht usw. des Cellos sind seit Jahrhunderten optimiert und können vom Musikinstrumentenmacher den jeweiligen körperlichen Gegebenheiten des Spielers angepasst werden.

Alle bisher genannten Kriterien beziehen den Spieler mit ein. Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war sehr viel enger gefasst. Es sollten Messungen gefunden und durchgeführt werden, die möglichst nur das Instrument betreffen und sowohl von der Interaktion mit einem Spieler wie auch von der Beurteilung durch einen Spieler unabhängig sind. Es war von vornherein klar, dass nur wenige ausgewählte Aspekte untersucht werden konnten. „Objektbezogen“ wurden hierzu die Konduktanz am Steg sowie die Schwingungen der Vorderseite des Instruments untersucht; „signalbezogen“ wurden musikalische Klänge analysiert, die mit dem Instrument erzeugt worden waren. In der vorliegenden Studie wurde der Versuch unternommen, einige der gewonnenen Erkenntnisse nicht isoliert zu betrachten, sondern miteinander zu verknüpfen.

Bei einem Chordophon sind die Funktionen der Erzeugung des musikalischen Signals und seiner Umwandlung in Luftschall getrennt. Die Saite wird in aller Regel gestrichen, und führt dann erzwungene Schwingungen aus. Sie wirkt somit als Signalgenerator. Selbst ist sie so gut wie nicht in der Lage, Schall abzustrahlen. Diese Aufgabe fällt dem Korpus zu. Er wird über die beiden Auflagepunkte der Saite zum Mitschwingen gebracht.

Aus der Sicht der Mechanik stellt der Korpus eines Streichinstruments einen äußerst komplexen Schwinger mit ausgeprägter Fluid-Struktur-Interaktion dar. Soll sein Schwingungsverhalten untersucht werden, sind auch im Zeitalter des Computers Experimente unerlässlich. Dank eines glücklichen Umstandes war es möglich, an einem Meisterinstrument der Geigen-

bauwerkstatt Goldfuss aus Regensburg eine Reihe von Messungen durchzuführen. Es stand ein Cello zur Verfügung, das mit zwei unterschiedlichen Stegen versehen werden konnte. Bei allen bisherigen Auswertungen dieser Untersuchungen (Fleischer 2009a, 2009b, 2010b) hatten sich unterhalb von etwa 800 Hz keine großen Unterschiede gezeigt, die auf den jeweils verwendeten Steg zurückzuführen wären. Stehen die bauartbedingten Einflüsse der Stege im Mittelpunkt des Interesses, sollten deshalb Frequenzen oberhalb von 800 Hz bis 1000 Hz betrachtet werden.

Im vorliegenden Band sollten weniger irgendwelche Unterschiede, sondern vielmehr Zusammenhänge zwischen den vorliegenden Messgrößen eruiert werden. Da zahlreiche Messungen im Bereich bis 1000 Hz durchgeführt worden sind, wurde die Möglichkeit genutzt, diese Ergebnisse miteinander zu verknüpfen und nach Gemeinsamkeiten zu suchen, die dem Cello zu eigen sind, unabhängig davon, mit welchem Steg es beim Messen bestückt war.

Im reflexionsarmen Raum spielte einer der Geigenbaumeister C-Dur-Tonleitern auf- und abwärts. Die Klänge wurden auf Digital Audio Tape aufgenommen und auf zweierlei Weise untersucht. Zuerst wurden die Schallsignale mit der gehörbezogenen Software VIPER analysiert. Die Intention war ursprünglich, nach Unterschieden zu suchen, die auf den jeweils eingesetzten Steg zurückzuführen sind. Dazu wurden Klänge analysiert, die ein und derselbe Spieler mit ein und demselben Bogen auf ein und demselben Cello hervorgerufen hat. Offenkundige Änderung zwischen zwei Durchgängen war, dass das eine Mal der neuartige Premio-Steg, das andere Mal ein traditioneller Steg eingesetzt war. Die Auswertung sollte auf diejenigen Merkmale beschränkt sein, die für das Hören wirklich relevant sind.

Im Verlauf der Vergleiche hat sich allerdings gezeigt, dass die fundamentale Grundannahme nicht zu halten war: Es war nicht gewährleistet, dass das Instrument ausschließlich durch das Auswechseln des Steges verändert wurde. Eine nähere Betrachtung hat ergeben, dass nach dem Auswechseln des Steges das Instrument etwas tiefer gestimmt worden war. Zwar blieben die Unterschiede gering, jedoch haben sie bewirkt, dass die Anregungssignale nicht dieselben Frequenzen hatten. Das System, dessen Übertragungsverhalten analysiert werden sollte, wurde demnach durch Signale beaufschlagt, deren Grundfrequenzen differiert haben. Dies hatte zur Folge, dass der Übertragungsfrequenzgang des Instruments bei unter Umständen deutlich anderen Frequenzen „abgetastet“ wurde. Differenzen in den gemessenen Schallsignalen waren demnach nicht ausschließlich darauf zurück zu führen, dass der Steg das System verändert hat, sondern waren möglicherweise auch den unterschiedlichen Anregungssignale geschuldet. Darüber hinaus traten offenbar auch Intonationsnuancen auf, die vor allem dann zu beobachten waren, wenn die Tonleiter aufwärts bzw. abwärts gespielt wurde. Da dem Spieler auch in Hinsicht auf das Anstreichen freie Hand gelassen worden war, ließ sich das angestrebte Ziel nicht vollständig erreichen: Mit den vorliegenden Schallaufzeichnungen erwies sich ein Vergleich zwischen den beiden Stegen als nicht möglich.

Gleichwohl war das prinzipielle Vorgehen richtig. Da bei der gehörbezogenen Analyse die spektrale Verdeckung berücksichtigt ist, reduziert sich die Anzahl der verbleibenden Spektralkomponenten deutlich. Nicht jeder Teilton, der physikalisch nachweisbar ist, ist auch für das Hören von Bedeutung und braucht weiterhin betrachtet zu werden. Die Lehre aus den eigenen Erfahrungen war, dass bei zukünftigen Untersuchungen Wert auf äußerst akkurates Stimmen und sorgfältige, reproduzierbare Intonation gelegt werden sollte. Unterschiede in den Eingangssignalen müssen in Zukunft so weit minimiert werden, dass eine definierte und reproduzierbare Anregung des Instruments gewährleistet ist. Dann – und nur dann – dürfte eine Messung der beschriebenen Art Einblick in Unterschiede geben, die einzig und allein auf den Steg zurückzuführen sind.

Auch wenn diese psychoakustisch motivierten Untersuchungen ihren ursprünglichen Zweck nicht in vollem Umfang erfüllt haben, so ließen sie doch einige Aussagen zu. Sie haben den Blick auf diejenigen Schallkomponenten gerichtet, die für die Hörwahrnehmung relevant sind. Sie haben auch deutlich gemacht, wie lückenhaft das Teiltonmuster eines Celloklanges sein kann. Bei den tiefen Noten ist der Grundton entweder gar nicht oder nur äußerst schwach enthalten. Daneben waren auch Erscheinungen der Art zu beobachten, dass einzelne höherfrequente Teiltöne fehlen können. Unter Umständen kann eine geringfügig verschobene Stimmung dazu führen, dass dies nicht mehr der Fall ist oder aber dass auch noch weitere Lücken im Spektrum auftreten.

Beobachtungen dieser Art haben es sinnvoll erscheinen lassen, die Schallsignale weiter zu untersuchen. Dazu wurden die vorliegenden Aufnahmen „objektiv“ analysiert und einer Schnellen Fourier-Transformation unterzogen. Diese mathematisch/physikalisch motivierte Analyse lieferte Ergebnisse, die adäquat auf einer linearen Frequenzskala darzustellen sind. Um einen Überblick über das gesamte Übertragungsverhalten zu erlangen, wurden die Spektren mehrerer Klänge in ein Diagramm geschrieben. Die Klänge, die auf den leeren Saiten gespielt wurden, wiesen ein etwas „schwach besetztes“ Spektrum auf. Es versprach mehr Erfolg, die sieben tiefsten Noten der Tonleiter von C bis H zu analysieren und die Spektren gemeinsam darzustellen. Zwar konnte auch damit eine Unterscheidung zwischen den beiden Stegen nicht gelingen; aufschlussreiche Verknüpfungen mit anderen Ergebnissen zeichneten sich jedoch ab.

Aus dem Ausgangssignal auf die Eigenschaften des Systems und beispielsweise auf Eigenheiten des jeweils eingesetzten Steges zu schließen, kann aber nur gelingen, wenn man das Eingangssignal im Einzelfall kennt bzw. wenn das Eingangssignal bei allen Messdurchgängen stets dasselbe ist. Dies war bei den Schallexperimenten offenkundig nicht der Fall. Die Varianz, die vom Spieler ausging bzw. auf leichte Unterschiede in der Stimmung zurückzuführen war, hat sich als zu groß erwiesen. Eine mögliche Abhilfe könnte darin bestehen, das Instrument mit einem elektro-mechanischen Schwingerreger am Steg anzuregen, die eingeleitete Wechselkraft zu messen und den dadurch erzeugten Schalldruck zu messen. Dies wird in einigen Laboratorien tatsächlich praktiziert.

Eine weniger umfassende, aber gleichwohl effektive Methode ist, mit einem synthetischen Signal am Steg anzuregen, die Bewegung des Steges zu messen und ins Verhältnis zur anregenden Wechselkraft zu setzen. Mit dieser Messung der Stegadmittanz bzw. -konduktanz wurden zahlreiche Nachteile der bei den Schallmessungen praktizierten Methode vermieden: Das Anregungssignal konnte innerhalb weiten Grenzen gewählt werden und beispielweise – wie bei den eigenen Experimenten – ein periodisches Rauschen geeigneter Beschaffenheit sein. Da stets aktuell der Quotient von Ausgangs- und Eingangssignal gebildet wird, entfällt die Notwendigkeit, das Eingangssignal konstant zu halten. Ein Bild vom Eingangsverhalten des Instruments am Messpunkt formte sich.

Mehreren Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass die Konduktanz lediglich ein Maß dafür ist, was in das Instrument hinein gehen kann. Was davon tatsächlich als Schall herauskommt, bleibt offen. Darüber hinaus wird auch nur untersucht, was in einer Richtung und an einer Stelle in das Instrument eingebracht werden kann. Sinnvollerweise werden dafür die Richtung und der Ort gewählt, an dem eine Saite den Korpus vorwiegend zum Schwingen bringt. Dies ist zweifellos der Steg. Darüber sollte allerdings nicht vergessen werden, dass eine jede Saite an zwei Punkten Kontakt mit dem Instrumentenkörper hat.

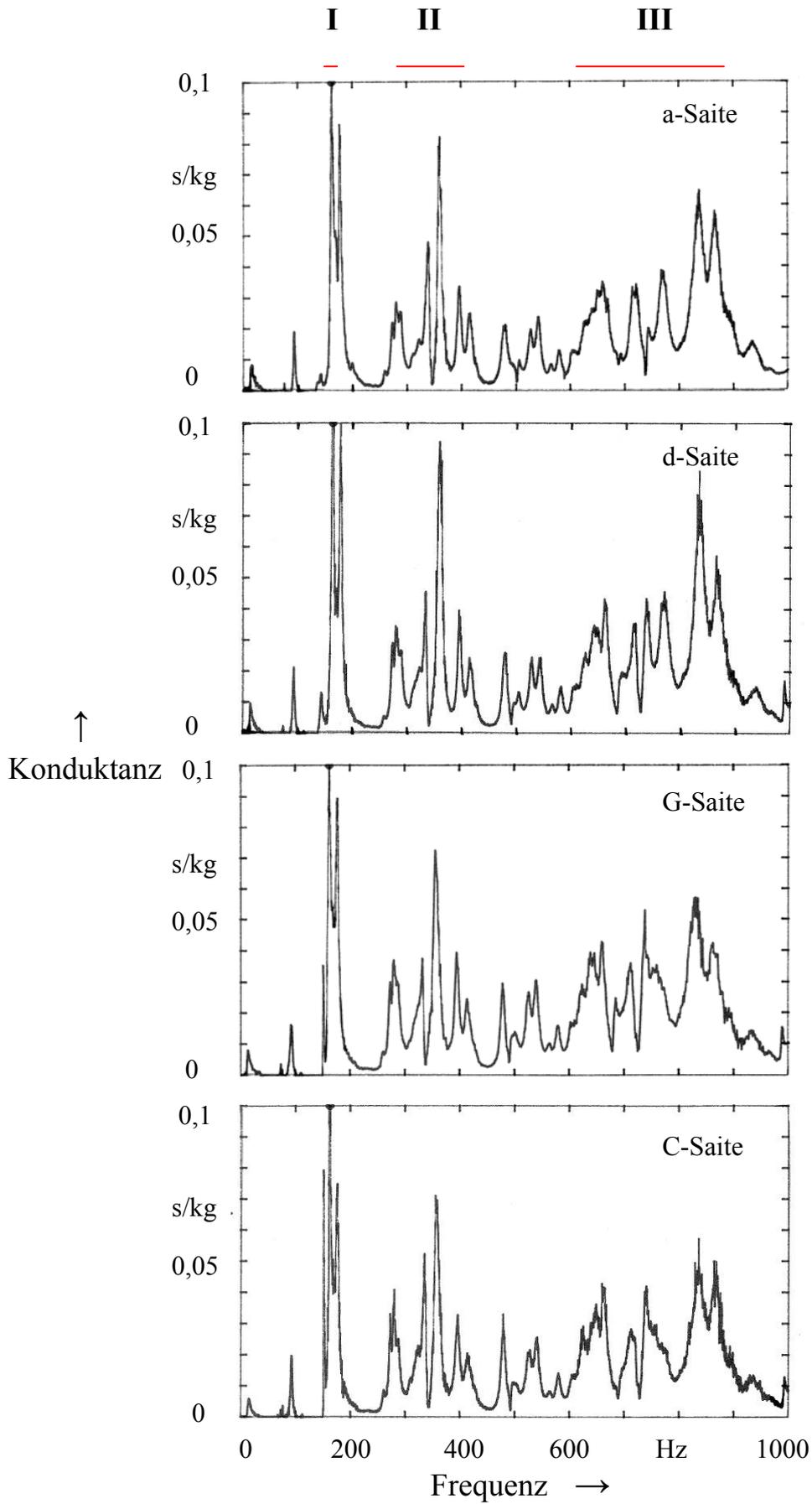


Abb. 8.1. Konduktanz an den Auflagepunkten der vier Saiten am Premio-Steg als Funktion der Frequenz; die Bereiche hoher Konduktanz sind durch römische Ziffern gekennzeichnet.

Alle bisherigen Untersuchungen haben belegt, dass der Steg zwar nicht das alleinige, aber doch das wichtigere der beiden „Eingangstore“ des Korpus für Schwingungsenergie ist. In den eigenen Studien wurde die Stegkonduktanz an den Auflagepunkten aller vier Saiten bestimmt. Exemplarisch sind in Abb. 9.1 die Ergebnisse für die vier Saiten des Premio-Steges, gemessen in tangentialer Richtung, dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 8.1 am Beispiel des traditionellen Steges ausgeführt, zeigen alle Messkurven Gemeinsamkeiten. In mehreren Bereichen, die in Abb. 9.1 markiert und bezeichnet sind, wird die Konduktanz besonders groß. Da dies bei beiden Stegen gleichermaßen zu beobachten war, kann gefolgert werden, dass im betrachteten Frequenzbereich die Konduktanz weniger die Eigenheiten des Steges, als vielmehr Gegebenheiten des Korpus widerspiegelt.

Bereich I: Die höchsten Werte mit häufig mehr als 0,1 s/kg nimmt die Stegkonduktanz in der Nähe der Frequenz 165 Hz an.

Bereich II: Zwischen etwa 280 Hz und 400 Hz liegen mehrere lokale Maxima, die bis zu Werten von 0,09 s/kg reichen können, dicht beisammen.

Bereich III: Zwischen etwa 620 Hz und 880 Hz sind weitere lokale Maxima ähnlicher Höhe benachbart. Die Konduktanz 0,05 s/kg wird erreicht und auch überschritten.

Es ist zu erwarten, dass Teiltöne, die innerhalb der Bereiche I bis III liegen, besonders gut abgestrahlt werden. Die Anhebung im akustischen Spektrum, die damit verbunden ist, ähnelt „Formanten“, wie sie aus der Sprachakustik bekannt sind. Die Vermutung ist begründet, dass sie die Klangfarbe des Schallsignals prägen werden. Es ist von Bedeutung, wo sie liegen und wie sie sich ausprägen. Ob sie als eine Art Fingerabdruck für das untersuchte Instrument typisch oder allen Celli zu eigen sind, kann erst durch Messungen an weiteren Instrumenten geklärt werden. Die bisherigen Untersuchungen der Schallsignale lassen erwarten, dass sich solche Formanten nicht nur unterhalb von 1000 Hz, sondern auch bei höheren Frequenzen ausprägen werden.

Die Konduktanz lässt Aussagen über die Fähigkeit des Instrumentenkörpers zu, am Messpunkt Schwingungsenergie aufzunehmen. Diese Fähigkeit ist Grundvoraussetzung dafür, Energie ins Schallfeld abzugeben. Die Konduktanz macht es möglich, die Aufnahmefähigkeit des Korpus isoliert und somit beispielsweise unabhängig von den Saiten und deren Einfluss zu betrachten. Die Konduktanz, gemessen an den Auflagepunkten der Saiten, stellt damit ein leistungsfähiges Werkzeug dar, mit dem der Instrumentenmacher die Eigenschaften seiner Erzeugnisse objektbezogen untersuchen und dokumentieren kann. So könnten Konduktanzmessungen etwa dazu beitragen, den Stimmstock optimal zu positionieren.

Solange vorausgesetzt werden kann, dass der Steg das hauptsächliche „Eingangstor“ des Korpus für Schwingungsenergie ist, liegt der folgende Zusammenhang vor: Die Wechselkraft, welche die Saite auf den Steg ausübt, wird nach Maßgabe der Konduktanz in gleichfrequente Bewegungen des Steges und des Korpus umgesetzt. Voraussetzung dafür, dass der Korpus Energie ins Schallfeld abstrahlen kann, ist eine von Null verschiedene Stegkonduktanz. Nur dann, wenn die Schwinggeschwindigkeit am Steg in Phase mit der Saitenkraft ist, fließt Energie irreversibel in den Instrumentenkörper und kann von dort in das Schallfeld abgegeben werden. Danach ist die gemessene Konduktanz von hoher Aussagekraft in Hinsicht auf die Energie, die das Instrument über den Steg aufnehmen kann.

Die vergleichenden Untersuchungen zur Konduktanz an den beiden Stegen haben folgende Einblicke ergeben: Die Frequenzen, bei denen die Konduktanz groß wird, waren für beide Stege weitgehend identisch. Die Zahlenwerte, die dabei erreicht wurden, unterschieden sich zum Teil, was möglicherweise gewisse Auswirkungen auf den Spielbetrieb hat. Offensichtlich übt der Steg eine Filterwirkung aus, die je nach Bauart unterschiedlich sein kann. Grundsätz-

lich ist jedem andersartigen Steg ein andersartiges Durchlassverhalten zu eigen. Da der Steg somit den Energiefluss von der gestrichenen Saite in den Instrumentenkörper prägt, beeinflusst er die spektrale Balance der Celloklänge. Demzufolge wird die spektrale Verteilung der Teiltöne in gewissem Umfang davon abhängen, welcher Steg eingesetzt ist. Auf diese Weise nimmt der Steg Einfluss auf die Klangfarbe der Cello-Klänge. Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass im untersuchten Frequenzbereich bis 1000 Hz keine Diskrepanzen in erwähnenswertem Ausmaß nachzuweisen waren.

Im nächsten Kapitel wurden Vergleiche der Konduktanz mit den akustischen FFT-Spektren durchgeführt. Die Arbeitshypothese war, dass die Stegkonduktanz diejenige Übertragungsfunktion ist, welche das Linienspektrum der Wechselkraft auf den Steg in ein Linienspektrum der Bewegung des Steges umsetzt. Die Bewegungen des Steges rufen ihrerseits dann Bewegungen des Korpus hervor. Notwendige Voraussetzung dafür, dass der Korpus Schall abstrahlen kann, wäre danach eine von Null verschiedene Konduktanz. Nur dann könnte Energie über den Steg irreversibel in den Instrumentenkörper fließen und von dort - zumindest zum Teil - in das Schallfeld abgegeben werden.

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen haben die Hypothese, dass es in erster Linie der Steg ist, über den die Saite den Instrumentenkörper zum Mitschwingen bringt, in ihren Grundzügen bestätigt. Bei denjenigen Frequenzen, bei denen die Saite am stegseitigen Auflagepunkt eine ausreichend große Konduktanz „sieht“, lassen sich auch Spektralkomponenten im Schallsignal nachweisen. Demzufolge ist die Konduktanz, gemessen an denjenigen Punkten, an denen die Saiten am Steg aufliegen, von hoher Aussagekraft.

Ob unter diesem Aspekt die Stegkonduktanz „die ganze Wahrheit“ erfasst, wurde durch weitere Vergleiche mit den Details der FFT-Spektren überprüft. Dabei zeigte sich, dass im Schallspektrum auch Teiltöne nachzuweisen waren, zu denen es in der Stegkonduktanz keine Entsprechung gibt. Folglich ist die bisherige Hypothese vom Steg als alleinigem „Eingangstor“ nicht in vollem Umfang haltbar. Sie muss erweitert werden. Zukünftig muss berücksichtigt werden, dass die Saite an *zwei* Punkten Kontakt mit dem Instrumentenkörper hat. Zwar erfolgt ein ganz erheblicher Teil der Schwingungsanregung über den Steg. Es gibt jedoch deutliche Belege dafür, dass die Saite auch über ihr oberes Ende, wo sie am Griffbrett aufliegt, den Hals und damit den Instrumentenkörper in Resonanz versetzen kann.

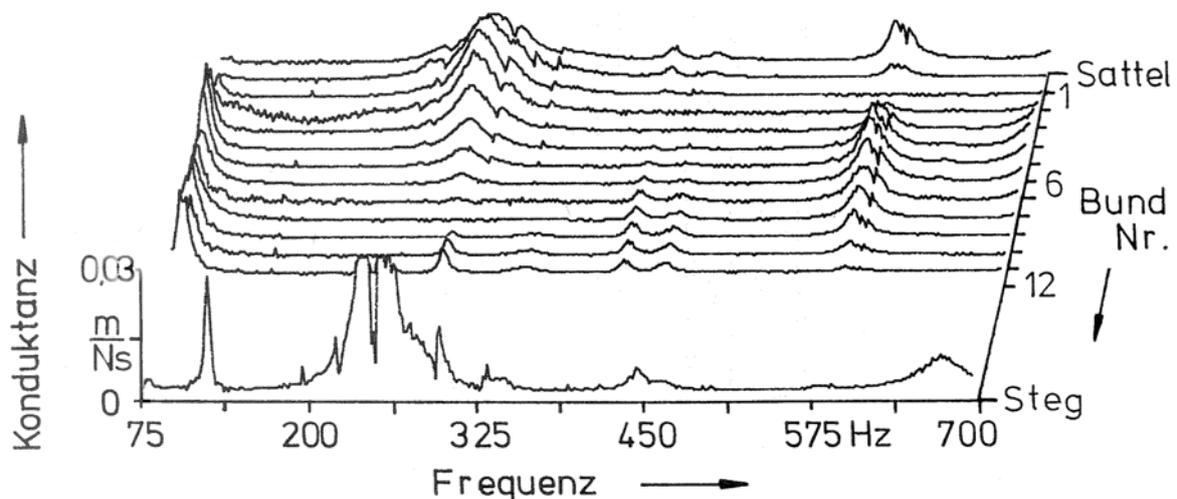


Abb. 9.2. Konduktanz auf dem Hals und am Steg (jeweils Mitte) einer akustischen Gitarre.

Wenn in Zukunft die Admittanz bzw. Konduktanz gemessen wird, sollte dies nicht nur am Steg, sondern nach Möglichkeit auch auf dem Griffbrett geschehen. In welche Richtung der Messkopf zu orientieren wäre, müsste noch diskutiert werden. Bei Zupfinstrumenten wird diese Art von Messung bereits länger praktiziert. Abb. 9.2 (siehe Fleischer 1998) gibt ein Beispiel dafür, wie Frequenzgänge der Konduktanz bei einem anderen Saiteninstrument aussehen. Messobjekt war eine akustische Gitarre mit Nylonsaiten. Die Konduktanz ist in der Mitte des - sehr niedrigen - Steges senkrecht zur Decke gemessen worden (untere Kurve). Bei einem Streichinstrument - mit hohem Steg - ist die tangentiale Richtung vorzuziehen. Das obere Konduktanz-, „Gebirge“ geht auf Messungen am Sattel und an den ersten zwölf Bündeln auf der Mittellinie des Halses zurück. Wo die Konduktanz von Null verschieden ist, kann Energie in den Instrumentenkörper eingebracht werden. Das Beispiel der Gitarre zeigt, dass dies beileibe nicht nur am Steg, sondern in ähnlichem Maße auch am Hals gelingen kann.

Es dürfte einleuchten, dass der Aufwand steigt, wenn nicht nur an einem Punkt, sondern entlang einer Linie an zahlreichen Punkten gemessen werden muss. Dem steht der Gewinn gegenüber, dass ein umfassendes Bild entsteht. Zum einen zeigt sich, mit welchen Frequenzen der Instrumentenkörper in welchem Ausmaß zum Mitschwingen gebracht werden kann. Zum anderen wird nun erkennbar, an welchen Stellen das Griffbrett besonders „schwingfreudig“ reagiert und sich in der Lage zeigt, Energie aufzunehmen.

Es sei noch einmal daran erinnert, dass der Betrag der Admittanz die Schwingfreudigkeit am Punkt der Messung in der Richtung der Messung quantifiziert. Die Admittanz wird dann maximal, wenn Masse- und Steifigkeitseinflüsse der Struktur sich gegenseitig kompensieren. Es wirkt lediglich noch die Dämpfung, deren wesentlicher Anteil die akustische Strahlungsdämpfung ist. Die Maxima der Admittanz stimmen mit denen der hier betrachteten Konduktanz überein. Sie stellen Indikatoren für diejenigen Schwingungen dar, die für die Funktion des Instruments tatsächlich von Belang sind. Bereits vorliegende Resultate von Schwingungsmessungen mit einem Laser-Scanning-Vibrometer (Fleischer 2009a) wurden im Lichte der Ergebnisse zur Konduktanz neu bewertet. Das Kriterium für den richtigen Stellenwert der beobachteten Schwingungen lieferten die Maxima. Je größer die Konduktanz ist, desto höheres Gewicht kommt der betreffenden Korpussschwingung zu. Demnach sind die Ergebnisse zur Konduktanz im Zusammenhang mit den Schwingungen von weit reichender Bedeutung. Sie messen den beobachteten Korpussschwingungen im Betriebsbereich der betrachteten Saite ihre tatsächliche Wertigkeit zu. Durch Vergleich mit den Maxima der Stegkonduktanz anhand der Frequenzen konnten im Bereich bis 800 Hz insgesamt achtzehn Schwingungsformen identifiziert werden, denen für die musikalische Funktion des Instruments Bedeutung zukommt. Dies sind nicht alle, jedoch die Mehrzahl der Schwingungen, die bei tangentialer Anregung am Steg nachzuweisen waren.

Auch bei dieser Verknüpfung mit den Schwingungen wurden bevorzugt die stegseitigen Auflager der Saiten betrachtet. Folgerichtig griff bei der Schwingungsmessung der Schwingerreger am Steg an. Verschiedene Hinweise, beispielsweise aus der Analyse des Schallsignals, haben aber darauf hingedeutet, dass in gewissen Fällen eine Anregung am Hals oder auf dem Griffbrett möglich sein wird. Das Beispiel der Gitarre in Abb. 9.2 lässt vermuten, dass dies bei manchen Frequenzen am Hals sogar effektiver als am Steg gelingen kann. Die nähere Betrachtung der Schwingungsbilder macht deutlich, dass der Hals dann sehr starke Bewegungen ausführt. Im Umkehrschluss folgt, dass die betreffenden Korpussschwingungen am Hals auch besonders leicht anzuregen sein werden.

So deuten sämtliche neuen Erkenntnisse darauf hin, dass die bisherige Vorstellung erweitert werden muss: Es gibt ein zweites „Eingangstor“ für Schwingungsenergie am oberen Saitenende. Zwar ist nach wie vor dem Steg die höhere Bedeutung zuzumessen; die Saite kann das

Instrument jedoch auch am anderen Endpunkt, dem Sattel oder wo der Finger die Saite gegen das Griffbrett drückt, zum Schwingen bringen. Auch die Auswertung der Korpuschwingungen hat einige Hinweise darauf ergeben, dass dies in Einzelfällen sehr wohl von Bedeutung ist. Es sollte zur Kenntnis genommen werden, dass eine nennenswerte Anregung grundsätzlich auch über den Hals möglich und in einigen Fällen auch tatsächlich gegeben ist. Obwohl die Konduktanz, gemessen am Steg an den vier Auflagepunkten der Saiten, einen Großteil der Information liefert, lassen sich einige Beobachtungen nur dann erklären, wenn auch der andere Endpunkt der Saite mit einbezogen wird. All diese Beobachtungen bestätigen die oben formulierte Empfehlung, die Konduktanz in Zukunft nicht nur am Steg, sondern auch auf dem Griffbrett zu messen. Ebenso sollte, wenn die Schwingungen des Korpus untersucht werden, nicht ausschließlich am Steg, sondern zusätzlich auch am Hals angeregt werden.

Die Konduktanz am Steg zu messen, ist ohne großen Aufwand möglich. Nachweislich liefert das Ergebnis dieser Messung zwar nicht den absolut vollständigen, aber doch einen weitgehenden Einblick in die Fähigkeit eines Saiteninstruments, Schwingungsenergie aufzunehmen. So war eine starke Korrelation zwischen dem Hauptmaximum der Stegkonduktanz und dem Wolfston zu finden, der als typisch für das Cello gilt. Wie der Wolfston spielen sich auch weitere Erscheinungen bei tiefen Frequenzen ab. Im hier untersuchten Bereich bis etwa 1 kHz konnten viele aussagekräftige Phänomene, jedoch so gut wie keine Unterschiede zwischen den beiden Stegen nachgewiesen werden. Es ist zu vermuten, dass formantenähnliche Anhebungen, die auf die unterschiedlichen Stege zurückzuführen sind und Unterschiede in der Klangfarbe hervorrufen können, bei höheren Frequenzen zu finden sind. Bei künftigen Untersuchungen sollte deshalb auch der Bereich oberhalb von 1 kHz betrachtet werden.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass von den hier ermittelten Messgrößen die Konduktanz von hoher Aussagekraft und gleichzeitig einfach zu bestimmen ist. Sie stellt ein Maß dafür dar, ob und wie viel Energie bei welcher Frequenz in den Korpus eingebracht werden kann. Ob diese Energie - was Sinn eines Musikinstruments ist - ins Schallfeld abgegeben oder durch Dämpfung im Material des Korpus, in den unterschiedlichen Kontaktstellen o.ä. in Wärme umgesetzt wird, lässt sich nicht *a priori* beurteilen. Jedoch lässt sich aussagen, dass das Instrument nur dann Schall abgeben kann, wenn Energie von der Saite in den Korpus fließt und die Konduktanz am Steg von Null verschieden ist.

Dies gilt für beide Punkte, an denen die Saite Kontakt mit dem Korpus hat und an denen Schwingungsenergie in den Korpus eingebracht werden kann. Dass der Korpus auch über das halsseitige Ende zum Schwingen gebracht werden kann, lässt sich leicht mit einem Schwingerreger demonstrieren. Dieser wird mit einem Rauschsignal betrieben und in Kontakt zum Instrument gebracht. Geschieht dies am Steg, ist ein lautes breitbandiges Geräusch zu hören. Wird der Erreger beispielsweise am Sattel gegen den Hals gedrückt, ertönt ebenfalls ein Geräusch, das eine andere Klangfärbung hat und etwas leiser, aber durchaus wahrnehmbar ist. Was mit dem Schwingerreger gelingt, ist auch mit den Wechselkräften an beiden Enden einer Saite möglich. Welche Rolle dabei die Phasenbeziehungen zwischen den Enden der Saite am Steg bzw. am Griffbrett spielen, ist eine weitere interessante Frage aus dem faszinierenden Gebiet der Musikinstrumente.

*Der Autor dankt dem Geigenbauer Thomas Goldfuss für die Möglichkeit, an seinem Meisterinstrument physikalische Messungen durchführen zu können. Frau Dipl.-Ing. Claudia Bordus hat sich dankenswerterweise um den Druck auch dieses Bandes gekümmert. Besonderer Dank gilt der Ehefrau des Autors, die - wie schon so häufig - mit äußerster Langmut das Manuskript geduldig gegengelesen hat.*

## LITERATUR

- Cremer, L., Die Physik der Geige. Hirzel, Stuttgart 1981.
- Day, R.K., Jansson, E.V., Vibration modes of neck, scroll and fingerboard. *Catgut Acoustical Society J.* (1993). 2, Nr. 4 Serie II, 11 – 14.
- Eggers, F., Mechanical impedance measurements around the violoncello. *Acustica* 74 (1991), 264 – 270.
- Fastl, H., Zwicker, E., *Psychoacoustics*. 3. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg 2007.
- Fleischer, H., Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 01/97. Hrsg. F.A. Emmerling und A.H. Heinen, UniBw München, Neubiberg 1997.
- Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/01. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2001.
- Fleischer, H., Schwingungen eines Cellos. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/09. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2009a.
- Fleischer, H., Admittanzmessungen an einem Cello. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 3/09. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2009b.
- Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an der Violine. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/10. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2010a.
- Fleischer, H., Stegadmittanz und Deckenschwingungen eines Cellos. In: Fortschritte der Akustik (DAGA '10), DEGA, Berlin 2010b, angenommen.
- Hornbostel, E.M.v.; Sachs, C.: Systematik der Musikinstrumente. *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (1914).
- Hutchins, C.M. (Hrsg.), *Research Papers in Violin Acoustics: 1975 – 1993 Band I und II*. Herausgegeben im Juli 1996 von der Acoustical Society of America.
- Jarczyk, J.C., Analyse von Celloklängen. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2007.
- Knott, G.A., A modal analysis of the violin using MSC/NASTRAN and PATRAN. Doctoral thesis 1987. In: *Research Papers in Violin Acoustics: 1975 – 1993 Band I*, 507 - 550. Herausgegeben im Juli 1996 von der Acoustical Society of America.
- Marshall, K.D., Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Amer.* 77 (2) (1985), 695 – 709.
- Terhardt, E., *Akustische Kommunikation*. Springer, Berlin 1998.
- Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/99. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 1999.
- Zwicker, E., Feldtkeller, R., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, 2. Aufl. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

In der Reihe

## **Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik**

sind bisher erschienen:

- Heft 1/96      Fleischer, H. und Zwicker, T., DEAD SPOTS. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren.
- Heft 1/97      Fleischer, H., Glockenschwingungen.
- Heft 1/98      Fleischer, H., Schwingungen akustischer Gitarren.
- Heft 1/99      Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten.
- Heft 2/99      Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. I. Structural Vibrations (in Englisch).
- Heft 1/00      Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. II. Diagnosis (in Englisch).
- Heft 2/00      Varsányi, A., Zur Akustik des javanischen *gong ageng*.
- Heft 3/00      Krump, G., Der akustische Nachton. Beschreibung und Funktionsschema.
- Heft 1/01      Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an Gongs.
- Heft 2/01      Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren.
- Heft 1/02      Fleischer, H., Nichtlinearität bei Gongs: Analyse des Schallsignals.
- Heft 2/02      Fleischer, H., Gehörbezogene Analyse von Gongklängen.
- Heft 1/03      Fleischer, H., Schwingungs- und Schalluntersuchungen an der indischen Tabla.
- Heft 1/04      Fleischer, H., Schwingung und Schall eines Hackbretts.
- Heft 1/05      Fleischer, H., Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen.
- Heft 1/06      Fleischer, H., Korpussschwingungen einer Elektrogitarre.
- Heft 1/07      Fleischer, H., Hörversuche mit Glockenklängen.
- Heft 1/08      Fleischer, H., Fell, Kessel und Gestell der Orchesterpauke.
- Heft 2/08      Fleischer, H., Physikalische und gehörbezogene Analyse von Paukenklängen.
- Heft 1/09      Fleischer, H., Mechanische Untersuchungen an Nylonsaiten für Gitarren.
- Heft 2/09      Fleischer, H., Schwingungen eines Cellos.
- Heft 3/09      Fleischer, H., Admittanzmessungen an einem Cello.
- Heft 1/10      Fleischer, H., Schwingungsuntersuchungen an der Violine.

Anfragen richten Sie bitte an

Helmut Fleischer  
LRT 4 UniBwM  
D-85577 Neubiberg

oder

[helmut.fleischer@unibw.de](mailto:helmut.fleischer@unibw.de)