

ADMITTANZMESSUNGEN AN EINEM CELLO

von

Helmut Fleischer

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

Heft 3/09 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:
Admittanzmessungen an einem Cello
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 3/09
Neubiberg 2009
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.

ADMITTANZMESSUNGEN AN EINEM CELLO

Zusammenfassung

Die mechanische Admittanz (Schwinggeschwindigkeit/Kraft), auch als „Schwingfreudigkeit“ bezeichnet, ist eine sehr aussagekräftige Kenngröße. Sie wurde am Steg eines hochwertigen Cellos an den Auflagepunkten der Saiten mittels eines B&K-Impedanzmesskopfes gemessen. Für die Anregung wurden ein B&K-Minishaker und Rauschsignale benützt. Die Erregerkraft und die zugehörige Beschleunigung wurden im Frequenzbereich mit einem FFT-Analysator von Ono Sokki verarbeitet. Der Imaginärteil (Suszeptanz), der Realteil (Konduktanz) und der Betrag (Admittanz) wurden bestimmt. Zwei Messmethoden wurden erprobt. Bei der einen wurde weißes Rauschen für die Anregung verwendet und auf eine Massekompensation verzichtet (Methode I). Bei der anderen (Methode II) wurde Gebrauch von einem angepassten periodischen Rauschen gemacht und die Kompensation der Masse des Aufnehmers vorgesehen. Die Ergebnisse stimmen brauchbar überein. Die weiteren Experimente wurden nach Methode II für Frequenzen bis 1 kHz durchgeführt.

Die Punkt-Admittanz wurde in normaler und tangentialer Richtung bestimmt, d.h. senkrecht und parallel zur Cello-Decke. Beide Orientierungen wurden untersucht. Insgesamt ist die „Schwingfreudigkeit“ des Steges in tangentialer Richtung höher als in Normalenrichtung. Da die tangentiale Anregung mit der Situation übereinstimmt, dass die Saite mit dem Bogen gespielt wird, wurde sie bevorzugt. Es ist anzunehmen, dass sie aussagekräftigere Ergebnisse liefert. Zwei unterschiedliche Stege wurden untersucht und die geringfügigen Unterschiede, die in der Konduktanz beobachtet wurden, werden diskutiert. Die charakteristischen Ergebnisse der Admittanzmessungen werden mit den Schwingungsmustern desselben Cellos in Verbindung gebracht, über die bereits früher berichtet worden war; vgl. Beiträge 2/09.

Die Studie beschränkt sich auf Messungen mechanischer Größen. Ein Versuch, die Verbindung mit Merkmalen des Schallsignals des gespielten Cellos herzustellen, ist für einen zukünftigen Bericht geplant.

ADMITTANCE MEASUREMENTS ON A CELLO

Summary

The mechanical admittance (velocity/force), also referred to as “vibration willingness”, is a most relevant parameter. It was measured at the bridge of a high-class cello at the contact points of the strings by means of a B&K impedance head. A B&K mini shaker and random signals were used for excitation. The excitation force and the corresponding acceleration were processed in the frequency domain by an Ono Sokki FFT analyzer. The imaginary part (susceptance), the real part (conductance) and the magnitude (admittance) were determined. Two measuring methods were tested. One was using a white noise excitation and disregarding mass compensation (method I). The other one (method II) made use of an apt periodic noise and providing compensation of the sensor mass. The results agree satisfactorily. The further experiments were carried out according to method II for frequencies up to 1 kHz.

The driving-point admittance was ascertained in normal and in tangential direction, i.e. perpendicular and parallel to the cello plate. Both orientations were investigated. On the whole, the “vibration willingness” of the bridge is higher in tangential rather than in normal direction. Since tangential excitation agrees with the situation of playing the cello by the bow, it was preferred. It can be supposed to yield more relevant results. Two different bridged were studied and the minor deviations, that were observed in the conductance, are discussed. The characteristic findings of the admittance experiments are interrelated with vibration patterns of the same cello as formerly reported; c.f. Beiträge 2/09.

The study is restricted to measurements of mechanical parameters. An attempt to refer to cues of the acoustic signal of the played cello is scheduled for a future report.

INHALT

VORWORT VON PROFESSOR DR.-ING. HUGO FASTL

1.	EINLEITUNG	1
2.	MESSUNG DER STEGADMITTANZ	6
2.1.	Die komplexe Punkt-Admittanz	6
2.2.	Experimentelle Bestimmung	8
2.2.1.	Messaufnehmer und Schwingerreger	8
2.2.2.	Messung ohne Massekompensation (Methode I)	8
2.2.3.	Messung mit Massekompensation (Methode II)	10
2.3.	Zusammenfassende Bemerkung	11
3.	ADMITTANZ AM STEG N, GEMESSEN NACH METHODE I	13
3.1.	Anregung senkrecht zum Steg	13
3.1.1.	Messanordnung	13
3.1.2.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	14
3.1.3.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	16
3.1.4.	Vergleich der Admittanzen an den Auflagepunkten sämtlicher Saiten	17
3.2.	Anregung parallel zur Decke	19
3.2.1.	Messanordnung	19
3.2.2.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	20
3.2.3.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	21
3.2.4.	Vergleich der Admittanzen an den Auflagepunkten sämtlicher Saiten	22
3.3.	Einfluss der Anregungsrichtung	23
3.4.	Zusammenfassende Bemerkung	26
4.	ADMITTANZ AM STEG N, GEMESSEN NACH METHODE II IN TANGENTIALER RICHTUNG	28
4.1.	Messanordnung	28
4.2.	Messergebnisse	29
4.2.1.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	30
4.2.2.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der G-Saite	31
4.2.3.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der d-Saite	32
4.2.4.	Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	33
4.3.	Vergleich mit anderen Ergebnissen	34
4.4.	Zusammenfassende Bemerkung	34
5.	KONDUKTANZ IN NORMALENRICHTUNG, GEMESSEN AN DEN STEGEN A UND N	36
5.1.	Anordnung bei der Messung nach Methode II	36
5.2.	Vergleich der Ergebnisse nach Methode I bzw. II für Steg N	37
5.2.1.	Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	37
5.2.2.	Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite	38
5.2.3.	Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite	39

5.2.4.	Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	40
5.2.5.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede	41
5.3.	Vergleich der Ergebnisse nach Methode II für die Stege A und N.....	42
5.3.1.	Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	43
5.3.2.	Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite	44
5.3.3.	Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite	45
5.3.4.	Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	46
5.3.5.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede	47
5.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	47
6.	KONDUKTANZEN DER STEGE A UND N, GEMESSEN IN TANGENTIALER RICHTUNG	49
6.1.	Messanordnung und Reproduzierbarkeit	49
6.2.	Vergleich der Ergebnisse nach Methode II für die Stege A und N.....	50
6.2.1.	Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite	51
6.2.2.	Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite	52
6.2.3.	Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite	53
6.2.4.	Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite	54
6.2.5.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede	55
6.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	56
7.	VERGLEICHE MIT ERGEBNISSEN AUS DER LITERATUR	58
7.1.	Impedanz am Steg des Cellos.....	58
7.2.	Admittanz am Steg des Cellos	60
7.3.	Impedanz am Steg der Geige	62
7.4.	Admittanz am Steg der Geige	63
7.5.	Zusammenfassende Bemerkung.....	66
8.	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN STEGADMITTANZ UND SCHWINGUNGSFORMEN	67
8.1.	Schwingungsmessungen am Cello	67
8.1.1.	Messungen mit dem Laser-Vibrometer	67
8.1.2.	Gemittelte Übertragungsfunktionen	69
8.1.3.	Vergleich zwischen Transfer-Admittanz und Punkt-Admittanz	71
8.2.	Sämtliche charakteristischen Betriebsschwingungen.....	73
8.3.	Relevante charakteristische Betriebsschwingungen.....	75
8.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	80
9.	ABSCHLUSSDISKUSSION	82
	LITERATUR	88

VORWORT

Während Helmut Fleischer in Band 2/09 der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik Korpus-schwingungen eines Cellos aus einer bayerischen Meisterwerkstatt beschrieben hat, behandelt er im vorliegenden Band Messungen am Steg dieses Instruments. Ausgangspunkt ist dabei die Admittanz, die auch als "Schwingfreudigkeit" bezeichnet werden kann, an den Auflagepunkten der Saiten. Die Anregung erfolgt mit einem Minishaker sowohl in normaler (senkrecht zu Cello-Decke) als auch in tangentialer Richtung (parallel zur Cello-Decke).

Für die tangentielle Richtung, die auch der üblichen Anregung der Saiten durch den Bogen entspricht, ist die Schwingfreudigkeit mehr als doppelt so groß wie in normaler Richtung, die eher der Anregung bei *pizzicato* entspricht. Um den Anschluss an bisherige, umfangreiche Messreihen zur Admittanz bei anderen Instrumenten herzustellen, verwendet Helmut Fleischer zunächst die bewährte Methode ohne Kompensation der Masse des Aufnehmers. Dies ist für einen kurzen, leichten Stift möglich, erschwert aber die Anregung der mittleren Saiten, insbesondere in der für die Praxis so wichtigen tangentialen Richtung. Abhilfe schafft hier ein Verlängerungsstück am Messkopf, dessen Masse jedoch kompensiert werden muss. Darüber hinaus wurde bei dieser Methode anstelle eines Weissen Rauschens ein periodisches Rauschen mit niedrigem Crestfaktor verwendet, das dem zu untersuchenden Frequenzbereich optimal angepasst war.

Beide Meßmethoden führen zu weitgehend übereinstimmenden Ergebnissen mit Hauptmaxima im Bereich von etwa 160 Hz bis 180 Hz. Helmut Fleischer weist deutlich darauf hin, dass geringfügige Abweichungen in den Frequenzen der Maxima nicht überbewertet werden sollten, da bei der Vielzahl dicht benachbarter Maxima bereits die gewählte Frequenzauflösung der Analyse zu unterschiedlichen Werten führen kann.

Helmut Fleischer kann sehr überzeugend zeigen, dass sich die Admittanz am Steg direkt in den Schwingungsformen der Decke des Cellos widerspiegelt, die bereits umfassend in Band 2/09 der „Beiträge“ dargestellt wurden. Besonders wichtig ist dabei die Beobachtung, dass sich nur etwa zwei Drittel der Schwingungsformen des Korpus als Spitzen in der Steg-Konduktanz wiederfinden. Dies ist als deutlicher Hinweis darauf zu werten, dass diversen Schwingungsformen des Korpus keine musikalische Bedeutung zukommt, da sie über den Steg nur ganz schwach angeregt werden.

Ein Vergleich mit Literaturergebnissen, in denen meist die Impedanz, also der Kehrwert der Admittanz, dargestellt ist, bestätigt Helmut Fleischers Messdaten. Darüber hinaus kann er deutliche Parallelen im Admittanzverlauf bei Geigen und bei Celli aufzeigen.

Der bei Geigen diskutierte "*bridge hill*", in dem sich Eigenschaften des Stegs widerspiegeln, kann aus den derzeit vorliegenden Messdaten bei Celli noch nicht abgeleitet werden. Es ist zu hoffen, dass Helmut Fleischer in zukünftigen Messungen den Frequenzbereich seiner Untersuchungen um etwa eine Oktave erhöht, damit auch für Celli der Einfluss unterschiedlicher Realisierungen des Stegs studiert werden kann.

München, im Juli 2009

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Gegenstand des vorliegenden Bandes der „Beiträge“ ist das Violoncello (siehe Abb. 1.1), im Folgenden kurz als Cello bezeichnet. Es gehört zur Gruppe der gestrichenen Chordophone (Hornbostel und Sachs 1914). Für eine tiefer gehende Beschäftigung mit seiner Geschichte, seiner Herkunft und der Spieltechnik sei die Lektüre entsprechender Standardwerke wie z.B. des Buches von Pape und Boettcher (2005) empfohlen. Einen raschen Überblick und weiter



Abb. 1.1. Das untersuchte Instrument.

führende Hinweise vermittelt der einschlägige Wikipedia-Eintrag (2009). Allgemeines zur Physik der Geigenfamilie sowie einige Ergebnisse von verschiedenartigen Messungen am

Cello finden sich im 10. Kapitel von Fletcher und Rossing (1998). Eine umfassende Arbeit mit Experimenten zum Schwingungsverhalten des Cellos stammt von Eggers (1959). Originalarbeiten mit dem Stand von 1993 sind in den beiden Sammelbänden „*Research Papers in Violin Acoustics: 1975 – 1993*“, herausgegeben von Hutchins (1996), zusammen gestellt.

Ein wesentlicher Bestandteil eines Streichinstruments ist der Steg, der die Schwingung der Saite an den Instrumentenkörper weiterleitet. Mit dem Steg, der hier im Mittelpunkt steht, hat sich bereits vor längerer Zeit Zimmermann (1967) analytisch beschäftigt. Kishi und Osanai (1991) haben die Methode der Finiten Elemente genutzt, um numerische Berechnungen am Steg des Cellos anzustellen. Eggers (1959) hat bereits vor 40 Jahren Korpussschwingungen des Cellos untersucht und in späteren Arbeiten (Eggers 1987 und 1991) auch experimentell die mechanische Admittanz bzw. Impedanz am Steg bestimmt.

Beim Spielen sitzt der Cellist und hält sein Instrument aufrecht zwischen den Beinen. Wie in Abb. 1.1 zu erkennen ist, stützt sich das Cello dann über einen Stachel gegen den Boden ab. Die vier Saiten werden mit einem Bogen gestrichen. Leer, d.h. wenn sie nicht durch Greifen verkürzt werden, sind sie auf die Noten C bzw. C₂ (Grundfrequenz 65 Hz), G bzw. G₂ (98 Hz), d bzw. D₃ (147 Hz) und a bzw. A₃ (220 Hz) gestimmt. Der normale Tonumfang des Instruments reicht somit vom großen C in der zweiten Oktave bis hin zur zweigestrichenen (bzw. fünften) Oktave. Die Grundfrequenzen der Töne umfassen eine Spanne von weniger als hundert Hertz bis zu etwa eintausend Herz und möglicherweise noch mehr.

Es gibt zwar eine große Zahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich mit der Violine bzw. Geige befassen, aber nur sehr wenige, deren Gegenstand das Cello ist. Man mag die Tatsache bedauern. Fletcher und Rossing (1998) haben aber darauf hingewiesen, dass eine gewisse Familienähnlichkeit zwischen Cello und Geige vorliegt. Angesichts dieses Faktums bleibt einem somit immer noch der Umweg, sich mit der „Physik der Geige“ (Cremer 1981) zu befassen und zu versuchen, vom kleineren auf das größere Instrument zu schließen. Auf diese Weise waren beispielsweise im Band 2/09 der „Beiträge“ (Fleischer 2009) Korpussschwingungen des Cellos mit solchen der Geige verglichen worden, die bei der doppelten bis dreifachen Frequenz zu beobachten waren.

Blickt man von vorn auf das Cello, ähneln sein Aussehen und sein Aufbau denen der Geige. Auf den ersten Blick mutet es wie eine Geige an, deren Abmessungen verdoppelt worden sind. Bei der Betrachtung von der Seite zeigt sich jedoch, dass das Cello keine rein maßstäbliche Vergrößerung der Geige darstellt: Seine Zargen sind im Verhältnis zu den übrigen Abmessungen deutlich höher. Obwohl beim hier untersuchten Instrument (Abb. 1.1) die Zargen ziemlich schmal ausgeführt sind, ist auch bei diesem Cello das Volumen der Luft im Korpus, verglichen mit einer Geige, überproportional groß. Allein aus diesem Grund sollte die Analogie zwischen Cello und Geige nicht allzu weit getrieben werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn Schwingungen der Luft im Hohlraum mit Schwingungen der Korpuswandungen zusammenwirken. Demnach besteht begründeter Anlass, das Cello nicht einfach als eine besonders große Geige zu betrachten, sondern unter dem Blickwinkel der Schwingungslehre und Akustik wissenschaftlich weiter zu untersuchen.

Das Cello, das Abb. 1.1 zeigt, hat ein mittelbayerischer Instrumentenbaumeister geschaffen. Dank seines freundlichen Entgegenkommens stand dieses Instrument dem Institut für Mechanik einige Tage zur Verfügung. In dieser Zeit konnten unter Anderem Schwingungsmessungen mit dem Laser-Vibrometer vorgenommen werden. Darüber ist ausführlich im vorhergehenden Band dieser Reihe (Fleischer 2009) berichtet worden. Einige weitere Untersuchungen werden im Folgenden präsentiert. Sie beziehen sich auf die Kontaktstellen zwischen den Saiten und dem Steg.

Abb. 1.2 lässt erkennen, wie die vier Saiten des Cellos am unteren Ende, bevor sie am Saitenhalter enden, über den Steg gespannt sind. Der Steg (unbehandeltes helles Hartholz, meist Ahorn) steht mit zwei Füßen auf der Decke (mit glänzender Lackschicht). Die gespannten Saiten drücken ihn gegen die Decke. Der Steg ist dasjenige Element, welches den Generator (die schwingende Saite) mit dem Schallstrahler (dem Korpus) verbindet. Die Auflagepunkte der vier Saiten stellen die Eingänge dar, über die Schwingungsenergie in den Abstrahlkörper eingeleitet wird. Wie „schwingfreudig“ sich das Instrument an diesen Punkten verhält, wird im Folgenden detailliert untersucht werden.



Abb. 1.2. Der Steg (Typ N), über den die Saiten geführt sind.

Aus Anlass von Fernsehaufnahmen war im Institut für kurze Zeit auch der Geigenbaumeister mit einem Meisterkollegen anwesend. Die beiden Instrumentenbauer haben eine Reihe von Untersuchungen am Instrument begleitet. Im Verlauf der Experimente haben sie fachgerecht den Steg ausgewechselt. Abb. 1.3 zeigt das Einfügen des neuen Steges. Im linken Bild ist zu sehen, wie die entspannten Saiten angehoben wurden und der Steg vom Typ A eingeschoben wurde. Im rechten Bild ist zu erkennen, wie seine genaue Position auf der Decke vermessen wurde. Es ist ein glücklicher Umstand, dass Messungen nun an ein und demselben Instrument mit zwei unterschiedlichen Stegen durchgeführt werden konnten.



Abb. 1.3. Die beiden Geigenbaumeister, wie sie den Steg vom Typ A einsetzen (links) und seine genaue Position vermessen (rechts).

Die beiden Stege, die nacheinander in das Cello eingesetzt waren, wiesen einige Unterschiede auf, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. Sie sind in den beiden Fotos von Abb. 1.4 mit der umgekehrten Blickrichtung wie in den Abb. 1.2 und 1.3 abgebildet. Man erkennt die Kerben, in denen die vier Saiten aufliegen. An den Auflagepunkten der tiefen Saiten (links in Abb. 1.2 bzw. rechts in Abb. 1.4) sind beide Stege etwas höher als auf der anderen Seite, über welche die Diskantsaiten geführt werden.

Zunächst war in das Cello der Steg vom Typ N (Abb. 1.4 links) eingesetzt. Wie weiter oben beschrieben, entnahmen die Geigenbaumeister nach einiger Zeit diesen Steg und setzten denjenigen vom Typ A (Abb. 1.4 rechts) ein. Mit dem Steg A wurden dann weitere Messungen durchgeführt. Dies hat ermöglicht, vergleichbare Messungen am selben Cello mit zwei unterschiedlichen Stegen (Typ A und Typ N) vorzunehmen. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass nicht nur das Cello, sondern auch beide Stege aus handwerklicher Fertigung stammen und von hoher Qualität sind. Es war nicht etwa der Autor, sondern es waren Fachleute, die das Auswechseln erledigten. Somit darf in allen Fällen vorausgesetzt werden, dass das untersuchte Instrument spielbereit und in einem fachgerechten Zustand war, der professionellen Ansprüchen genügt.

Vor und nach dem Stegwechsel spielte einer der Meister auf dem Instrument Tonfolgen, die im reflexionsarmen Raum auf DAT aufgenommen wurde. Einzelne Celloklänge wurde ausgewählt und anschließend analysiert (Jarczyk 2007). Auf diese Analysen wird in einem weite-

ren Bericht einzugehen sein. Im vorliegenden Band der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ soll über Ergebnisse zur mechanischen Admittanz berichtet werden, die an den beiden Stegen gemessen worden ist.



*Abb. 1.4. Die beiden Stege, die in das Instrument eingesetzt werden konnten;
links: Typ N; rechts: Typ A.*

Von den vielfältigen Messaufgaben, die im Zusammenhang mit dem Cello vorstellbar sind, wurden einige wenige herausgegriffen und bearbeitet. Im vorhergehenden Band 2/09 der „Beiträge“ sind Schwingungen des Korpus behandelt worden. Dabei stand die Decke, die in Abb. 1.1 durch ihre hochglänzende Oberfläche hervorsteht, im Vordergrund des Interesses. Dieser Band (Fleischer 2009) bietet eine umfassende Sammlung von Betriebsschwingungsformen der Vorderseite. Zudem erlaubt ein Vergleich mit ähnlichen Messungen an der Geige eine Aussage darüber, wie weit eine Analogie zwischen Cello und Geige in Hinsicht auf Schwingungsformen und –frequenzen tatsächlich reicht.

Im vorliegenden Bericht soll nun versucht werden, mit Hilfe geeigneter mechanischer Kennwerte am Steg zu studieren, wie die Übertragung von Schwingungsenergie von der Saite zum Korpus von der Frequenz abhängt. Dazu wird die Admittanz am Auflagepunkt der Saiten auf dem Steg gemessen. Ein vergleichbares Vorgehen wird beispielsweise auch im Violinen-Analysesystem VIAS des Instituts für Wiener Klangstil (VIAS 2009) praktiziert. Im Folgenden werden zunächst zwei unterschiedliche Messverfahren verglichen und letztlich einem der Vorzug gegeben. Danach wird die Richtung festgelegt, in der die Admittanz vorzugsweise bestimmt wird. Diverse Messreihen, die sich auf die beiden Stege beziehen, werden dargestellt. Die eigenen Ergebnisse werden mit den wenigen Resultaten, die sich in der Literatur finden, verglichen. Abschließend wird versucht, Beziehungen zwischen der gemessenen Admittanz und den Schwingungsformen herzustellen, die aus Band 2/09 bekannt sind.

2. MESSUNG DER STEGADMITTANZ

Für die Untersuchungen stand somit ein Meisterinstrument zur Verfügung, das dadurch modifiziert werden konnte, dass zwei verschiedenartige Stege eingesetzt wurden. Im Folgenden wird beleuchtet, wie „schwingfreudig“ sich das Instrument am korpusseitigen Auflager der Saiten verhält. Am Steg hat die Saite, unabhängig davon, ob sie leer gespielt oder gegriffen wird, stets am selben Ort Kontakt mit dem Instrument. Die mechanische Admittanz wurde dort gemessen, wo die Saiten aufliegen und ihre Schwingung über den Steg an den Korpus weitergeben. Eine mögliche Einleitung von Energie über den Hals wird nicht behandelt.

2.1. Die komplexe Punkt-Admittanz

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf harmonische Vorgänge mit der Kreisfrequenz ω . Die dynamische Größe ist eine Komponente

$$\underline{F} = \underline{\hat{F}} e^{i\omega t} \quad (1)$$

des Kraftvektors \underline{F} , t ist die Zeit und i die imaginäre Einheit. Die kinematische Größe ist eine Komponente

$$\underline{v} = \underline{\hat{v}} e^{i\omega t} \quad (2)$$

des Vektors der Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) \underline{v} . Das Symbol $\hat{}$ samt Unterstreichung kennzeichnet komplexe Spitzenwerte.

Die komplexe Punkt-Admittanz

$$\underline{Y} = G + iB \quad (3)$$

ist definiert als

$$\underline{Y} = \underline{\hat{v}} / \underline{\hat{F}} \quad (4)$$

Sie stellt den Quotienten der komplexen Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit \underline{v} und der Kraft \underline{F} dar. Im Gegensatz zur Transfer-Admittanz, wie sie bei der Bestimmung der Betriebschwingungsformen mittels Laser-Vibrometrie (Fleischer 2009) ermittelt wird, werden beide Größen am selben Punkt und in derselben Richtung gemessen. Der Betrag der Admittanz Y ist ein Maß für die „Schwingfreudigkeit“ einer Struktur an der betreffenden Stelle in der betreffenden Richtung. Ihr Realteil G wird als *K o n d u k t a n z*, ihr Imaginärteil B als *S u s z e p t a n z* bezeichnet.

Verhält sich die Instrumentenstruktur am Messpunkt wie ein viskoser Dämpfer, dann ist die Kraft \underline{F} mit der Geschwindigkeit \underline{v} gemäß

$$\underline{F} = r \underline{v} \quad (5)$$

über die Dämpfungskonstante r verknüpft (Kraftgesetz bei geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung). Kraft und Schwinggeschwindigkeit sind in Phase, die Admittanz

$$\underline{Y} = 1/r = G \quad (6)$$

ist dann rein reell und gleich der Konduktanz G .

Wirkt die Struktur am betrachteten Punkt wie eine Masse, dann gilt

$$\underline{\hat{F}} = m \underline{\hat{a}} \quad (7)$$

Die Masse m verknüpft die Kraft \underline{F} mit der Beschleunigung \underline{a} (Newton'sches Gesetz). Die Schwingbeschleunigung folgt aus der Schwinggeschwindigkeit durch Differentiation, was in komplexer Schreibweise einer Multiplikation mit $i\omega$ entspricht. Die Admittanz ist dann

$$\underline{Y} = -i \frac{1}{\omega m} = iB \quad (8)$$

d.h. rein negativ imaginär. Die Suszeptanz ist kleiner als Null.

Wirkt die Struktur dagegen wie eine Feder, dann verknüpft die Beziehung

$$\underline{\hat{F}} = c \underline{\hat{x}} \quad (9)$$

die Kraft \underline{F} mit dem Weg \underline{x} (Hooke'sches Gesetz). Der Schwingweg ergibt sich aus der Schwinggeschwindigkeit durch Integration. In komplexer Schreibweise entspricht dies einer Division durch $i\omega$ entspricht, was auf

$$\underline{Y} = i \frac{\omega}{c} = iB \quad (10)$$

führt. In diesem Fall ist die Admittanz rein positiv imaginär, die Suszeptanz größer als Null.

Im Folgenden wird die komplexe Admittanz an denjenigen Stellen gemessen, an denen die Saiten über den Steg geführt sind. Der Realteil dieser Admittanz, die Konduktanz G , ist immer positiv und ein Maß für die Leistung

$$P = \frac{1}{2} G \hat{F}^2 \quad (11)$$

die am Auflagepunkt der Saite irreversibel in den Steg eingebracht wird. Diese „Wirk“-Leistung ist von elementarer Bedeutung für die Funktion eines akustischen Instruments. Zwar kann sie zum Teil im Instrument in Wärme umgewandelt werden. Der Rest jedoch wird ins Schallfeld abgegeben. Eine von Null verschiedene Konduktanz ist notwendige Voraussetzung dafür, dass das Instrument seiner Aufgabe nachkommen und Schall abstrahlen kann.

Der Imaginärteil der Admittanz, die Suszeptanz B , kann beide Vorzeichen annehmen. Positives Vorzeichen besagt, dass der Steg sich wie eine Feder verhält; vgl. Gl. (10). Ist die Suszeptanz negativ, reagiert der Steg wie eine Masse; vgl. Gl. (8). In beiden Fällen entsteht ausschließlich „Blind“-Leistung, die in Form von potentieller bzw. kinetischer Energie zwischengespeichert, anschließend aber wieder zurückgegeben wird.

Resonanz kommt dadurch zustande, dass sich Masse- und Federeinflüsse kompensieren. Bei der betreffenden Frequenz verschwindet der Imaginärteil und die Admittanz ist rein reell. Ihr Betrag $Y = |\underline{Y}|$ ist dann gleich der Konduktanz G . Aus der „Sicht“ der Saite wirkt der Steg wie ein Dämpfer; vgl. Gl. (5).

2.2. Experimentelle Bestimmung

2.2.1. Messaufnehmer und Schwingerreger

Experimentell wurde die Admittanz mit einer Messapparatur bestimmt, deren Kernstück ein Impedanzmesskopf Brüel & Kjaer 8001 war. Abb. 2.1 zeigt ihn zusammen mit dem Schwingerreger Brüel & Kjaer 4810. Die zwei Kabel lassen erkennen, dass sich im Gehäuse des Messkopfes zwei Aufnehmer befinden. Neben einen Kraftsensor enthält der Messkopf auch einen Bewegungssensor. Für die Messung am Steg war in das Gewinde am oberen zugespitzten Ende ein kurzer bzw. auch ein langer Stift eingeschraubt. Um die Ergebnisse abzusichern, wurden zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet, die sich in einigen Details unterschieden.



Abb. 2.1. Schwingerreger mit aufgeschraubtem Impedanzmesskopf.

2.2.2. Messung ohne Massekompensation (Methode I)

Der erste Versuchsaufbau ist im Wesentlichen bereits im Zusammenhang mit früheren Untersuchungen (z.B. Fleischer 1997) ausführlich beschrieben worden. Er hat sich bereits bei zahlreichen Messreihen, z.B. an der E-Gitarre (Fleischer und Zwicker 1999), an der akustischen Gitarre (Fleischer 1997), am Hackbrett (Fleischer 2004) sowie am Elektrobass (Fleischer (2005), bewährt. Der Messkopf wurde von dem kleinen Schwingerreger (siehe Abb. 2.1), der über einen Leistungsverstärker mit einem Rauschsignal gespeist wurde, angetrieben. Dieses Signal stammte aus einem analogen Rauschgenerator Brüel & Kjaer 1405. Der Versuchsleiter hielt das Cello, dessen Stachel ausgefahren war, in Spielhaltung. Der Schwingerreger samt Messkopf konnte variabel positioniert werden. Dies versetzte den Versuchsleiter in die Lage, das Instrument an demjenigen Punkt, dessen Admittanz gemessen werden sollte, in der ge-

wünschten Richtung unter leichtem Druck in Kontakt mit dem Messkopf zu bringen. In Abb. 2.2 ist zu erkennen, wie der Stift am Ende des Impedanzmesskopfes gegen die hohe a-Saite drückt. Um die effektive Masse des Messkopfes nicht übermäßig zu erhöhen, wurde ein sehr kurzer Stift eingeschraubt. Kraft und Schwinggeschwindigkeit wurden in diesem Fall parallel zur Decke gemessen. In einer anderen Messreihe war der Messkopf so orientiert, dass senkrecht zum Steg gemessen wurde. Diese Situation kann Abb. 2.3 entnommen werden.



Abb. 2.2. Messung der Admittanz in tangentialer Richtung (parallel zur Decke), hier am Auflagepunkt der hohen a-Saite auf dem Steg N.

Aus dem Kraft- und dem Bewegungssignal wurde in einem Zweikanal-Analysator Ono Sokki CF-350 nach einer Fast Fourier Transformation (FFT) die komplexe Punkt-Admittanz berechnet. In diesem Bericht sind Ergebnisse zusammengestellt, bei denen Frequenzen meist zwischen 25 Hz und 500 Hz betrachtet wurden. Darin sind die Grundfrequenzen der Saitenschwingungen zwischen der leer gespielten (tiefen) C-Saite und der Note c'' (C5) eingeschlossen. In einigen Fällen wurde für Vergleichszwecke der Frequenzbereich 50 Hz bis 1000 Hz gewählt.

Bei früheren Experimenten an Elektrogitarren waren vor der Messung der Stegadmittanz die Saiten entfernt worden. Der Vergleich mit Messungen, bei denen die Saiten aufgezogen blieben, ergab keine grundlegenden Unterschiede. Daraus kann geschlossen werden, dass das Mitschwingen der Saiten keinen so großen Einfluss auf die Schwingungen des Instrumentenkörpers hat, dass daraus störende Auswirkungen auf die Ergebnisse der Admittanzmessungen resultieren würden. Es wurden deshalb auch keine Vorkehrungen getroffen, die Saiten in irgendeiner Weise zu bedämpfen. Sie blieben so gespannt, wie es der regulären Stimmung entspricht. Das Instrument befand sich somit stets in vollständigem, spielbereitem Zustand. Die Ergebnisse der Messungen nach dieser Methode I sind im folgenden Kapitel 3 zusammengefasst.



Abb. 2.3. Messung der Admittanz in Normalenrichtung (senkrecht zum Steg), hier am Auflagepunkt der hohen a-Saite auf dem Steg N.

2.2.3. Messung mit Massekompensation (Methode II)

Die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Vorgehensweise nach Methode I ist zwar bewährt, weist jedoch einige Unzulänglichkeiten auf. So sind die Möglichkeiten, die der relativ betagte Analysator Ono Sokki CF-350 für die Darstellung der Ergebnisse bietet, beschränkt. Die Messung dauerte ziemlich lang; es musste über 32 Durchgänge gemittelt werden, um eine befriedigende Signalqualität zu erreichen. Wie die Abb. 2.2 und 2.3 zeigen, sind bei tangentialer Messrichtung die Auflagepunkte der mittleren Saiten schwer zu erreichen. Es lag deshalb nahe, die Schraube am vorderen Ende des Impedanzmesskopfes zu verlängern. Der bewegte Teil des Messkopfes samt Verlängerung weist dann eine Masse von einigen Gramm auf, die größer als bei der Methode I ist. Daraus resultiert ein Fehler, der nun möglicherweise nicht mehr zu tolerieren ist. Es bestand daher begründeter Anlass, den Versuchsaufbau zu modifizieren und einige Verbesserungen vorzunehmen.

Auf den Messkopf war nun ein etwa 6 cm langes Rohr mit einer Spitze aufgesetzt, wie es in Abb. 2.4 zu erkennen ist. Mittels einer elektrischen Massekompensationseinheit Brüel & Kjaer 5565 wurde der Einfluss der Masse des Verlängerungsstücks sowie der Masse des Messkopfes, die zwischen Sensor und Messobjekt mitbewegt wird, minimiert. Dazu liegen schon Erfahrungen vor, da dies bereits bei früheren Messungen praktiziert worden war; vgl. Fleischer (1997, 2004 und 2005). Nach wie vor wurde der Messkopf samt Verlängerung von einem Mini-Shaker Brüel und Kjaer 4810 angetrieben.

Eine weitere Modifikation bestand darin, dass ein anderer Analysator vom Typ Ono Sokki CF-5210 verwendet wurde. Neben verbesserten Möglichkeiten der Darstellung und der Analyse kann dieses Gerät auch eine Vielfalt von Signalen liefern, die auf die Analyseparameter

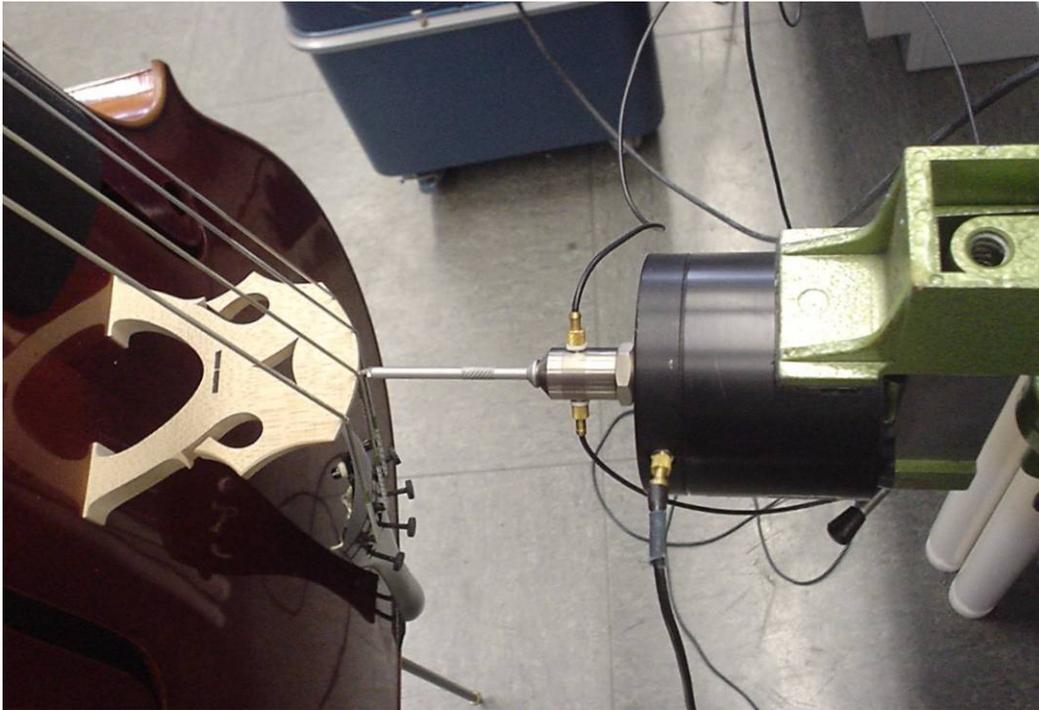


Abb. 2.4. Messung der Admittanz in Normalenrichtung mit Verlängerungsstück, hier am Auflagepunkt der G-Saite auf dem Steg N.

abgestimmt sind. Es wurde ein Pseudo-Rauschsignal gewählt, das Anteile genau bei den gewählten Analysefrequenzen enthält und einen minimalen Spitzenfaktor aufweist. Dieses Rauschsignal wurde in den Leistungsverstärker eingespeist. Es erwies sich als ausreichend, über zehn Messungen zu mitteln. Für die Experimente, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln dieses Berichts aufgeführt sind, wurden Frequenzen zwischen 0 Hz und 1000 Hz betrachtet. Damit dürfte der wichtigste Bereich von Grundfrequenzen der Saitenschwingungen abgedeckt sein. Der Rest des Versuchsaufbaus blieb unverändert. Messungen, die nach dieser Methode durchgeführt wurden, sind in den Kapiteln 4 bis 6 zusammen gestellt.

2.3. Zusammenfassende Bemerkung

Zwei Messaufbauten, die sich in einigen Punkten unterscheiden, standen für die folgenden Admittanzmessungen zur Verfügung. Die Messung nach der Methode I hat den Vorteil, sich bereits viele Jahre lang bewährt zu haben. Jedoch beinhaltet sie keine Massekompensation, dauert relativ lang und bietet nur eingeschränkte Möglichkeiten, die Ergebnisse darzustellen. Ihr größter Nachteil ist, dass auf dem vorderen Ende des Messkopfes nur eine kurze Verlängerungsschraube sitzt. Damit lässt sich die Admittanz gut messen, solange die Messrichtung senkrecht zum oberen Rand des Steges gewählt wird. Es bereitet jedoch Schwierigkeiten, um 90° verdreht, d.h. parallel zur Decke, zu messen. Da sich diese Ausrichtung am Spielbetrieb des Instruments orientiert, ist sie von besonderer Bedeutung. Deshalb musste nach einer verbesserten Möglichkeit der Messung gesucht werden.

In diesem Zusammenhang hat es sich als hilfreich erwiesen, eine Verlängerungsspitze aufzusetzen. Damit kann dann auch an schlecht zugänglichen Stellen, wie z.B. in der Nähe der beiden mittleren Saiten, gemessen werden. Allerdings ist nun die Masse, die zwischen Kraftmesselement im Messkopf und Messobjekt mitbewegt wird, größer. Das Objekt wird durch

den Messaufnehmer verändert und es besteht die Gefahr von Verfälschungen. Um diesen Messfehler zu minimieren, wurde eine Massekompensationseinheit eingesetzt. Darüber hinaus wurde ein modernerer Analysator verwendet. Dieser verfügt über eine interne Signalquelle und bietet zudem verbesserte Präsentationsmöglichkeiten. Die Mehrzahl der Messungen wurde nach dieser Methode II durchgeführt.

3. ADMITTANZ AM STEG N, GEMESSEN NACH METHODE I

Mit der altbewährten Methode I wurden Admittanzen am Steg des Cellos gemessen, wobei der Messort variiert wurde. Zudem wurde der Messkopf unterschiedlich orientiert. Dadurch sollte eruiert werden, wie sich die Messrichtung auf die Ergebnisse auswirkt. Die Untersuchungen beziehen sich ausnahmslos auf den Steg vom Typ N (siehe Abb. 1.4 links).

3.1. Anregung senkrecht zum Steg

3.1.1. Messanordnung

Als erstes wurde der Frage nachgegangen, in welche Richtung der Messkopf orientiert werden sollte. Über Messungen an einem anderen Chordophon, der Gitarre, liegen am Institut für Mechanik bereits umfangreiche Erfahrungen vor. Die akustische Gitarre hat einen niedrigen Steg, der üblicherweise flächig mit der Decke verleimt oder verschraubt ist. Die Komponente der Saitenschwingung, welche die Decke primär zu Biegebewegungen und zur Schallabstrahlung anregt, ist diejenige senkrecht zum Steg bzw. zur Decke. Die wichtigste Anregung des Gitarrenkörpers erfolgt somit durch die wandnormale Saitenkraft am Steg. Auf einen weiteren möglichen Anregungsmechanismus, der am halsseitigen Ende wirken kann (Fleischer 1997), soll hier nicht eingegangen werden.



Abb. 3.1. Messung der Admittanz in Normalenrichtung (senkrecht auf dem Steg N) am Auflagepunkt der hohen a-Saite.

Bei den Messungen, die im vorliegenden Abschnitt präsentiert werden, war der kurze Stift in den Messkopf eingeschraubt; auf Massekompensation wurde verzichtet. Der Stift war so orientiert, dass die Admittanz senkrecht zum oberen Rand des Steges gemessen wurde. Vernachlässigt man, dass der Steg am Rand stärker als die Decke gekrümmt ist, dann wurde in dieser Messung im Wesentlichen die Schwingfreudigkeit am Auflagepunkt der Saite senkrecht zur Decke bestimmt. Abb. 3.1 zeigt die Versuchsanordnung. Damit wurden die Ergebnisse erzielt, die in den Abb. 3.2 bis 3.4 zusammen gestellt sind.

3.1.2. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

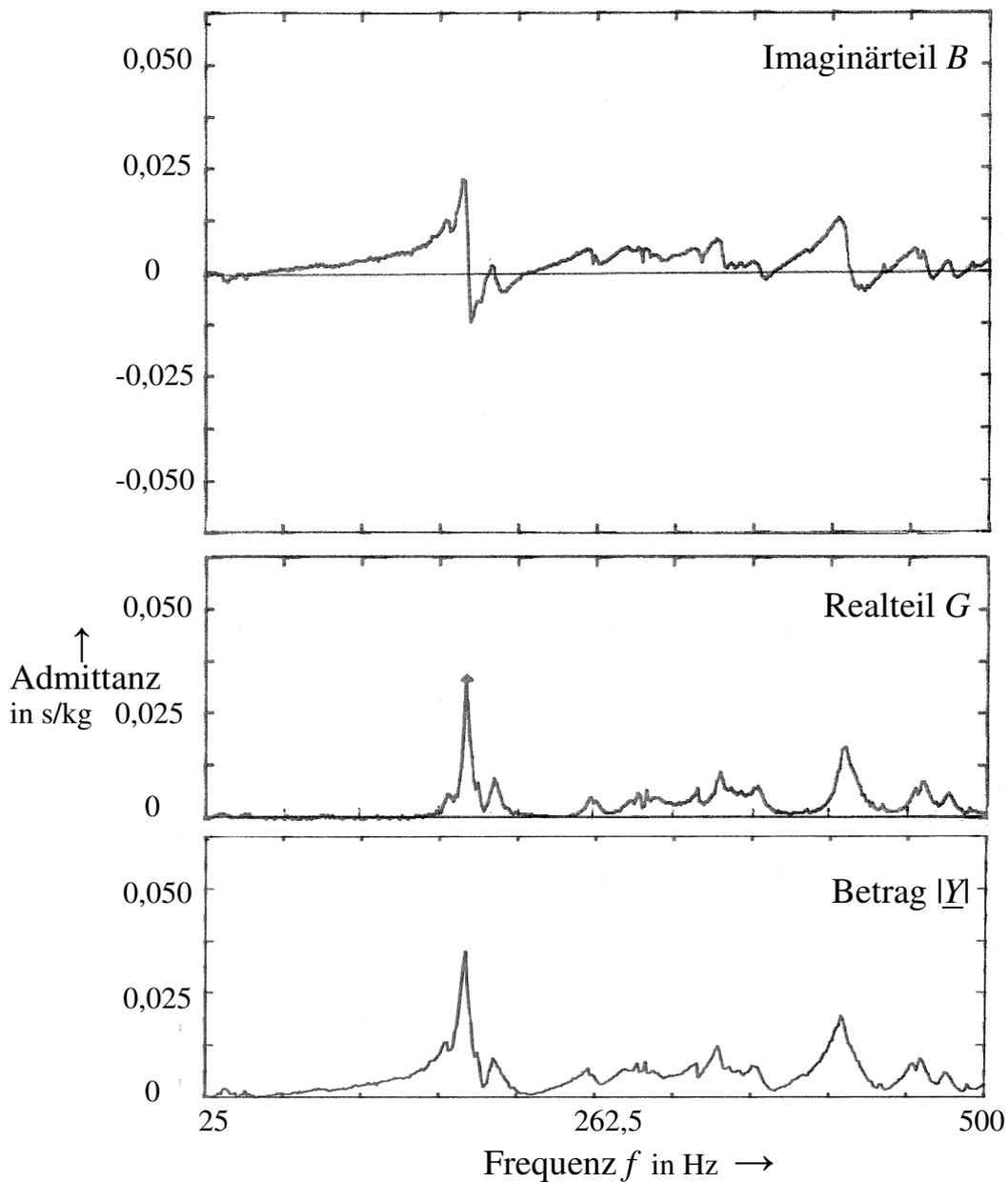


Abb. 3.2. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Das Einzelergebnis, das Abb. 3.2 zeigt, soll exemplarisch besprochen werden. Am Auflagepunkt der tiefen C-Saite wurde die komplexe Admittanz senkrecht zum oberen Rand des Steges gemessen. Im unteren Diagramm ist die "Schwingfreudigkeit" des Steges an diesem Messpunkt pauschal durch den Betrag der Admittanz gekennzeichnet. Man erkennt ein ausgeprägtes Hauptmaxima bei etwas mehr als 180 Hz. Die Admittanz erreicht dort 0,034 m/(Ns) bzw. 0,034 s/kg. Ein weiteres Maximum liegt bei etwa 420 Hz und erreicht circa 0,015 s/kg. Somit kann für die erstgenannte Frequenz bei Anregung mit der Kraft 1 N die Schwinggeschwindigkeit einen Wert von bis zu 34 mm/s erreichen. Der Realteil (Konduktanz G ; mittleres Diagramm) lässt erkennen, wie groß der In-Phase-Anteil der Schwinggeschwindigkeit ist. Im Falle der Resonanz wird die Admittanz maximal und ist rein reell. Gemäß Gl. (6) ist der Realteil G gleich dem Kehrwert der Dämpfungskonstante, die hier etwa $r = 30$ kg/s beträgt.

Während die Konduktanz naturgemäß stets größer als Null sein muss, kann die Suszeptanz B (oberes Diagramm) beide Vorzeichen annehmen. Dies besagt, dass die Schwinggeschwindigkeit der anregenden Kraft um 90° voreilen oder auch um 90° nacheilen kann. Ist der Imaginärteil positiv (Suszeptanz größer als Null), dominieren am Messpunkt die Federeigenschaften. Bei negativem Imaginärteil (Suszeptanz kleiner als Null) „sieht“ die Saite am Auflagepunkt dagegen eine Masse. Resonanz ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Feder- und Masseeigenschaften gegenseitig kompensieren. Im Resonanzfall verschwindet die Suszeptanz ($B = 0$); die Admittanz ist dann rein reell und gleich der Konduktanz ($\underline{Y} = G$). Dies ist im untersuchten Frequenzbereich mehrfach der Fall und deutet darauf hin, dass der Korpus viele Eigenschwingungen ausführt, die vom Steg her angeregt werden können.

3.1.3. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

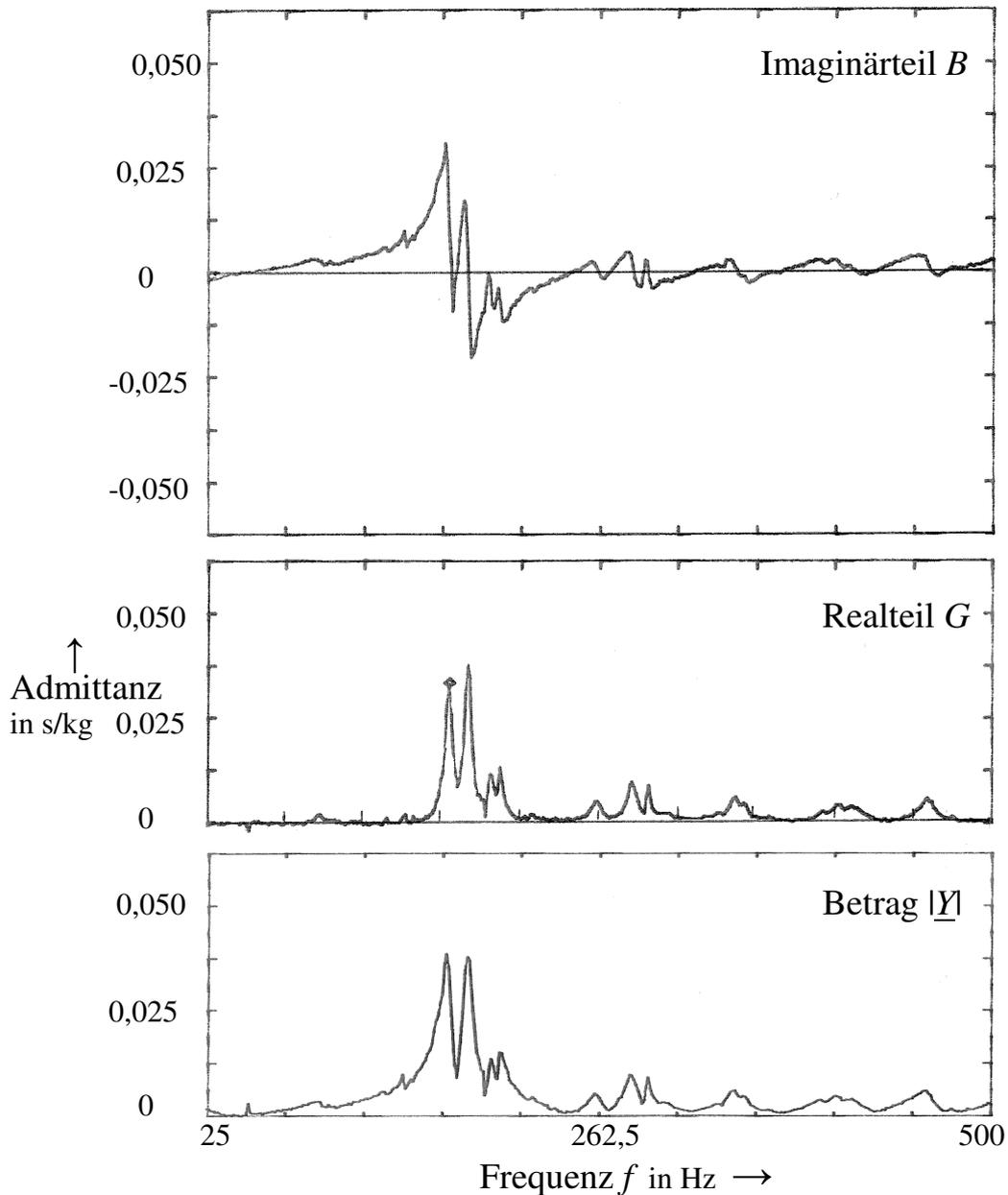


Abb. 3.3. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Die Admittanz am Auflagepunkt der a-Saite (Abb. 3.3) ähnelt derjenigen an der C-Saite (Abb. 3.2). Zusätzlich zu dem Maximum bei 183,75 Hz ist nun ein weiteres Maximum bei etwa 171 Hz getreten, das sich in ähnlicher Höhe ausprägt. Dagegen ragt die Anhebung bei etwa 420 Hz nicht mehr heraus. Auch hier ist wieder zu beobachten, dass der Betrag der Admittanz (unten) im Mittel größere Zahlenwerte aufweist, in seinem globalen Verlauf sich jedoch nicht sehr wesentlich von der Konduktanz unterscheidet. Insbesondere die Maxima, bei denen die Konduktanz verschwindet, prägen sich im Realteil gleichermaßen wie im Betrag aus.

3.1.4. Vergleich der Admittanzen an den Auflagepunkten sämtlicher Saiten

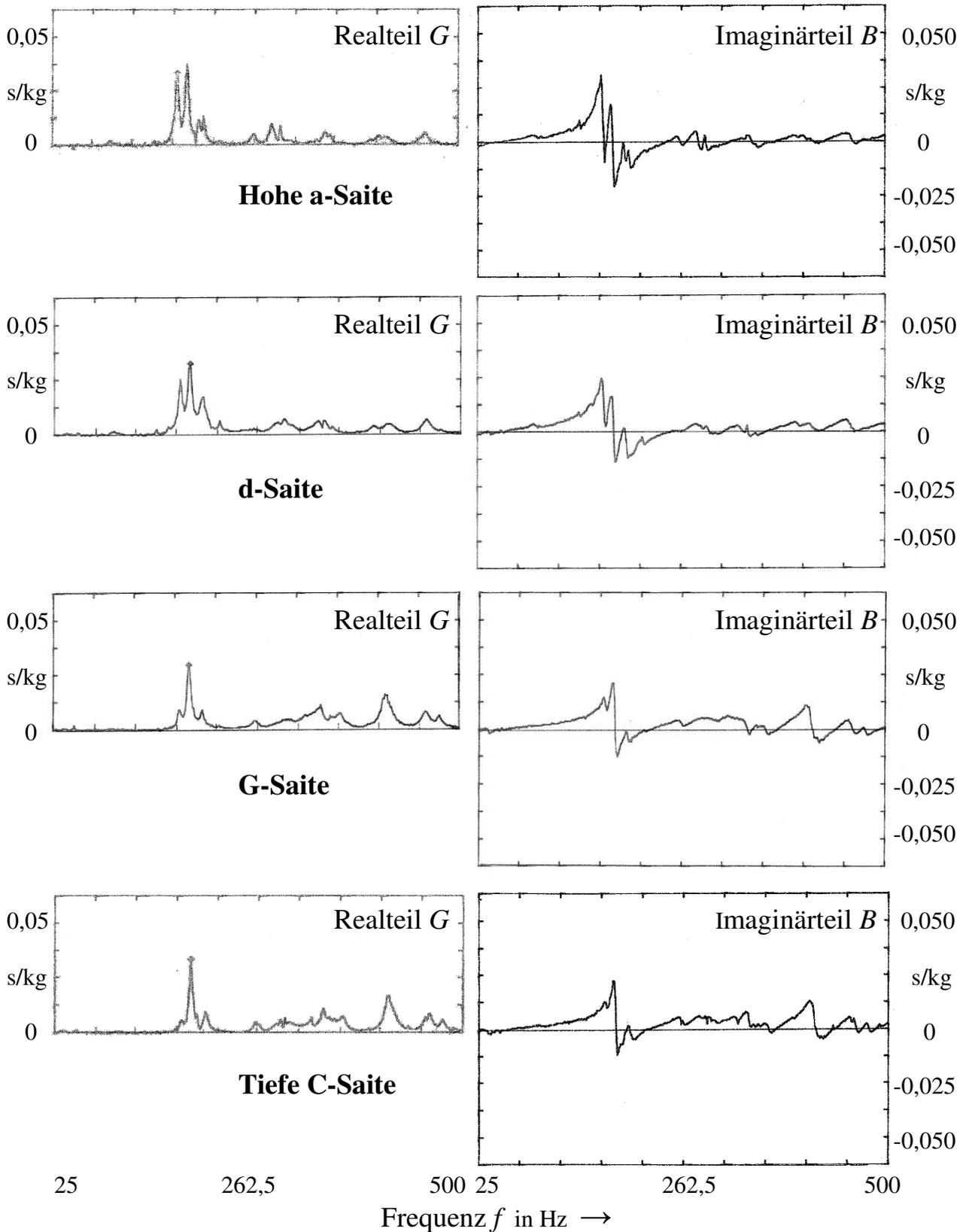


Abb. 3.4. Realteil G (links) und Imaginärteil B (rechts) der Admittanz an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten (a-Saite oben, C-Saite unten), gemessen in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

In Abb. 3.4 sind die komplexen Admittanzen für die Auflagepunkte aller vier Saiten zusammen gestellt. Im Realteil (links: Konduktanz) bzw. im Imaginärteil (rechts: Suszeptanz) zeigen sich jeweils Gemeinsamkeiten. Es sind jedoch auch Unterschiede im Detail zu erkennen. So deuten sich bei etwa 170 Hz bis 180 Hz Resonanzen an. Diese prägen sich als Maxima in der Konduktanz bzw. als Nulldurchgänge in der Suszeptanz aus. Bei den tiefen Saiten ist im Wesentlichen nur eine Resonanz, bei den hohen sind dagegen bis zu drei Resonanzen zu erkennen. Das Maximum bei etwa 420 Hz prägt sich dann deutlich aus, wenn an den tiefen Saiten gemessen wird. An den Auflagepunkten der beiden hohen Saiten tritt sie praktisch nicht mehr in Erscheinung.

Die Diagramme in der rechten Spalte von Abb. 3.4 geben Aufschluss darüber, ob, bei welchen Frequenzen und in welchem Maße der Korpus Blindleistung aufnehmen kann. Diese Leistung wird in Form von potentieller Energie („Feder-Verhalten“) bzw. kinetischer Energie („Masse-Verhalten“) im Instrumentenkörper samt eingeschlossener und umgebender Luft zwischengespeichert. Bereits nach kürzester Zeit wird sie wieder abgegeben und an den Erreger zurückgeliefert. Von unmittelbarer Aussagekraft in Hinsicht auf die Funktion des Musikinstruments sind die Diagramme in der linken Spalte. Gemäß Gl. (11) ist die Konduktanz ein direktes Maß dafür, in welchem Maße das Instrument in der Lage ist, Leistung aufzunehmen. Die Kurven besagen, dass das Cello bei sehr tiefen Frequenzen praktisch keine Leistung aufnimmt. Demnach kann es bei tiefen Frequenzen so gut wie keinen Schall abstrahlen. Erst oberhalb von etwa 150 Hz ist eine Aneinanderreihung von zahlreichen Resonanzen zu erkennen. Dies schafft die Voraussetzung dafür, dass der Steg in erwähnenswertem Maße Energie irreversibel aufnehmen und an den Korpus weiterleiten kann, der sie dann möglicherweise ins Schallfeld abgibt.

Die Überlegungen und Messungen des vorliegenden Abschnitts beziehen sich auf Anregung durch eine Kraft, die in Normalenrichtung wirkt. Es ist zu vermuten, dass diese Orientierung nicht den Gegebenheiten bei einem Streichinstrument entspricht. Daher wird im nächsten Abschnitt die Anregung in tangentialer Richtung untersucht.

3.2. Anregung parallel zur Decke

3.2.1. Messanordnung

Im Vergleich zu Zupfinstrumenten haben gestrichene Chordophone wie das Cello einen sehr viel höheren Steg, dessen „Füße“ an zwei eng begrenzten Gebieten der Decke aufliegen. Der Korpus erscheint zwar spiegelsymmetrisch, jedoch ist die Decke durch den außermittig eingeleimten Bassbalken gezielt asymmetrisch gemacht. Außerdem klemmt der Stimmstock so zwischen Decke und Boden, dass auch er die Symmetrie stört. Die Saite wird durch den Bogen, der parallel zur Decke geführt ist, in erzwungene Schwingungen versetzt. Der primäre Mechanismus, durch den der asymmetrische Korpus zum Mitschwingen gebracht wird, ist die Anregung durch ein Kräftepaar, das auf die Decke wirkt. Durch die tangentialen Saitenkraft am Steg, multipliziert mit dem Hebelarm des Steges, kommt ein Moment zustande.



Abb. 3.5. Messung der Admittanz in tangentialer Richtung (parallel zur Decke des Steges N) am Auflagepunkt der hohen a-Saite.

Naturgemäß rufen unterschiedliche Orte und Richtungen der Anregung unterschiedliche Reaktionen des Instrumentenkörpers hervor. Bereits Reinecke und Cremer (1970) haben dies bei Schwingungsmessungen beobachtet und beschrieben. Es erscheint deshalb sinnvoll, bei den Admittanzmessungen den realen Anregungsmechanismus besser nachzubilden. Im vorliegenden Abschnitt ist eine entsprechende Messung beschrieben. Hierbei war der Schwingerreger um 90° gedreht worden und der Impedanzmesskopf so bestückt und orientiert, wie es Abb. 3.5 zu entnehmen ist. Das eingeschraubte Verlängerungsstück sorgte für den Kontakt mit dem Steg, der nach wie vor vom Typ N war. Angeregt und gemessen wurde nun in tangentialer Richtung, d.h. parallel zur Decke.

3.2.2. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

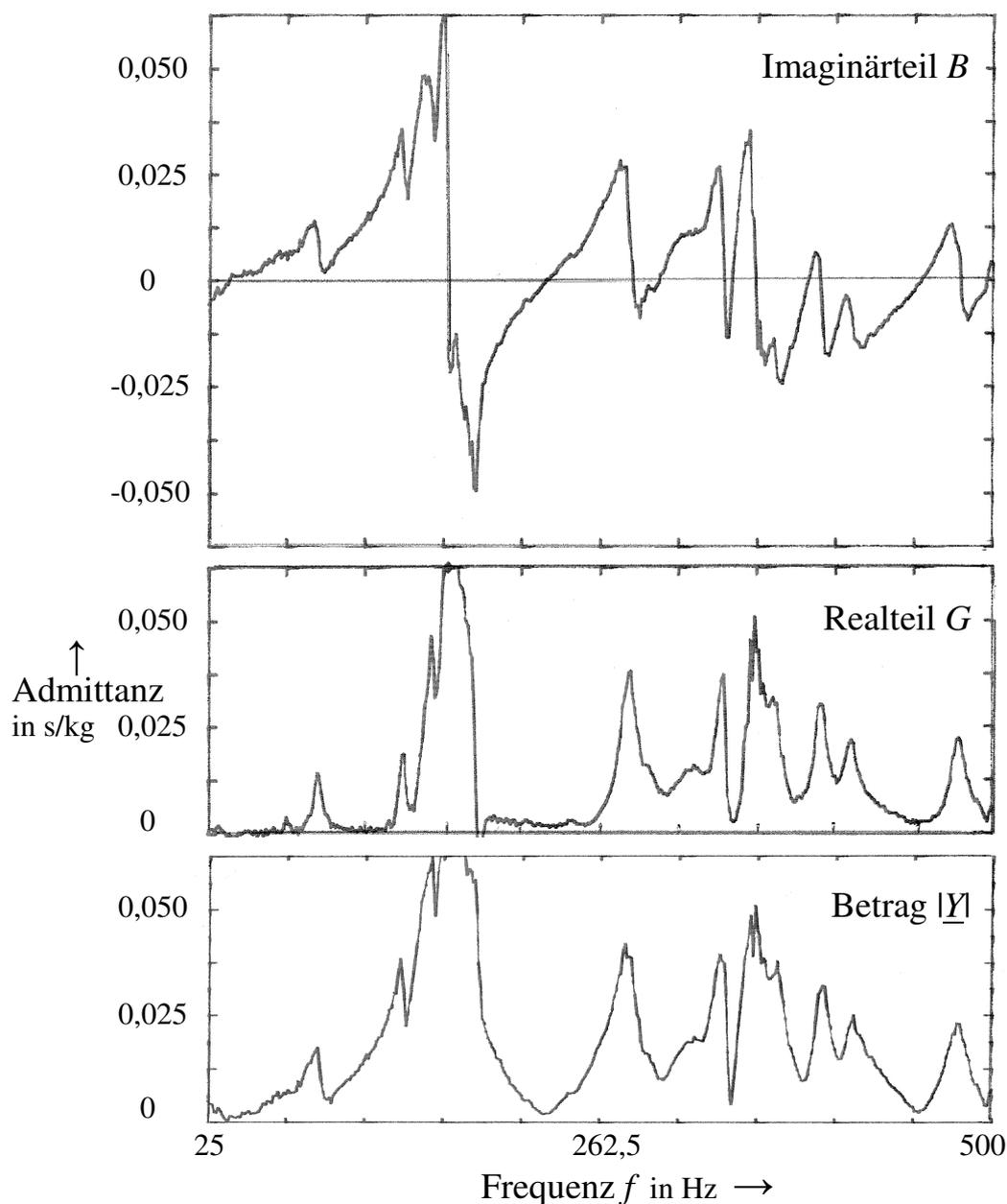


Abb. 3.6. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Abb. 3.6 zeigt die komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite, gemessen parallel zur Decke des Cellos. Im unteren Diagramm, das den Betrag wiedergibt, erkennt man ein ausgeprägtes Hauptmaximum bei etwa 170 Hz. Die Admittanz erreicht dort 0,094 s/kg. Daneben sind zahlreiche weitere Maxima zu erkennen, was sich in der Konduktanz (Mitte) durch Höchstwerte und in der Suszeptanz (oben) in Nulldurchgängen ausdrückt. Bei der Frequenz 170 Hz hat die Anregungskraft 1 N eine Schwinggeschwindigkeit von annähernd 100 mm/s zur Folge. Der Realteil G (mittleres Diagramm) verläuft ähnlich wie der Betrag. Sämtliche Diagramme weisen deutlich höhere Werte auf, als sie bei senkrechter Anregung (Abschnitt 3.1) gemessen wurden. Alles deutet darauf hin, dass der Korpus viele Eigenschwingungen ausführt, die tangential besonders gut angeregt werden können. Eggers (1959) schreibt, dass es „schwerer“ fällt, am Steg senkrecht zur Decke anzuregen, als es in tangentialer Richtung ist.

3.2.3. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

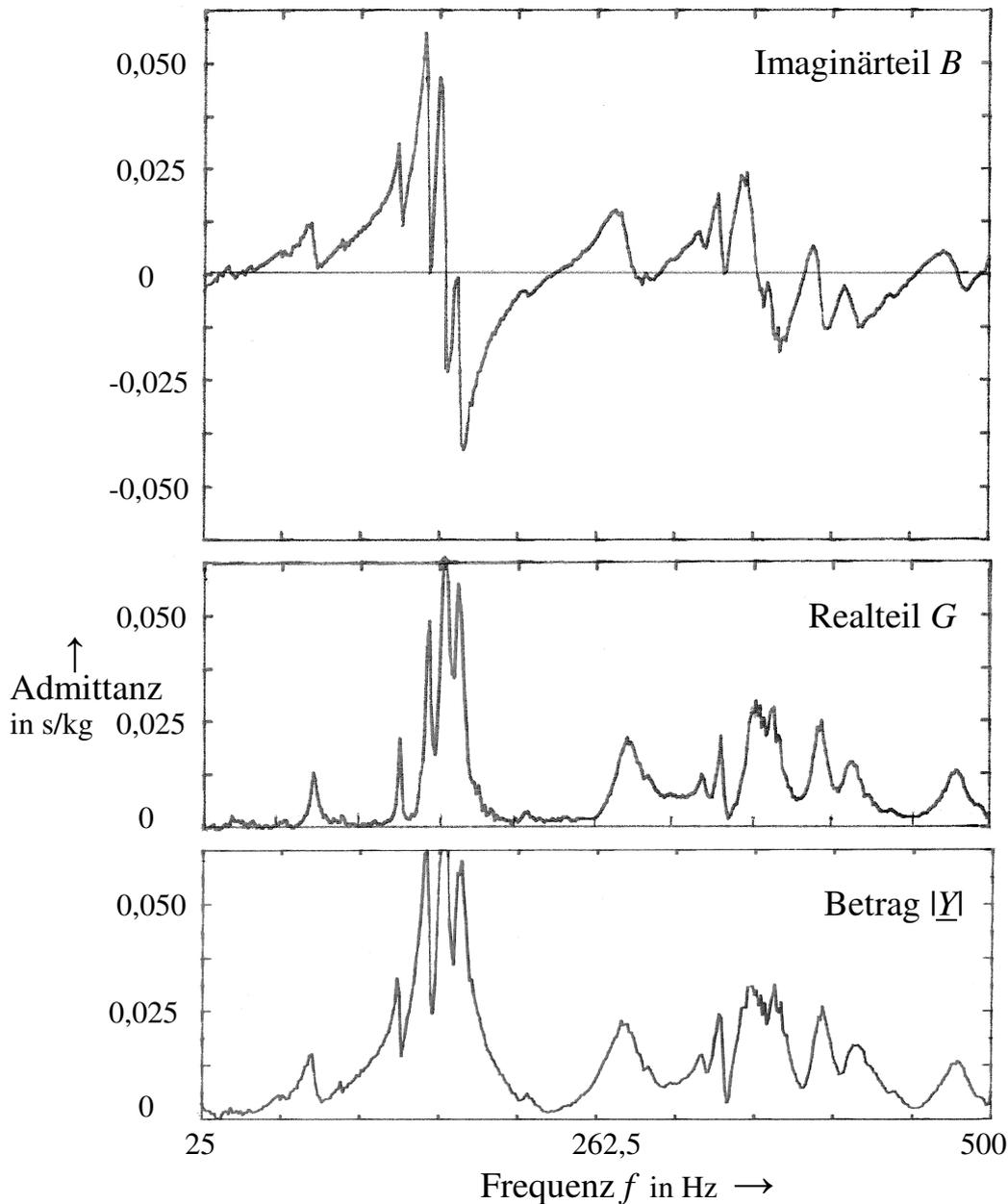


Abb. 3.7. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Die Ergebnisse von Abb. 3.7 für den Auflagepunkt der a-Saite bestätigen den globalen Eindruck: Bei tangentialer Anregung des Steges werden mehr Resonanzen angeregt, als wenn senkrecht zur Decke angeregt wird. Dies geschieht überdies in höherem Maße; grob geschätzt erreicht die Konduktanz bis zu dreimal so hohe Werte wie bei den Messungen von Abschnitt 3.1. So nimmt bei 170 Hz die Konduktanz den Wert 0,065 s/kg an. Auch hier besagen die Messkurven, dass das Cello bei sehr tiefen Frequenzen nicht in der Lage ist, Leistung über den Steg aufzunehmen. Allerdings liegt die Grenze bei tangentialer Anregung nicht ganz so hoch, wie es die Messung in Normalenrichtung ergeben hatte. Unterhalb von etwa 100 Hz kann das Instrument so gut wie keinen Schall abstrahlen. Oberhalb gewährleistet eine Aneinanderreihung von zahlreichen Resonanzen, dass der Steg in die Lage versetzt wird, Energie aufzunehmen und zumindest teilweise ins Schallfeld abzugeben.

3.2.4. Vergleich der Admittanzen an den Auflagepunkten sämtlicher Saiten

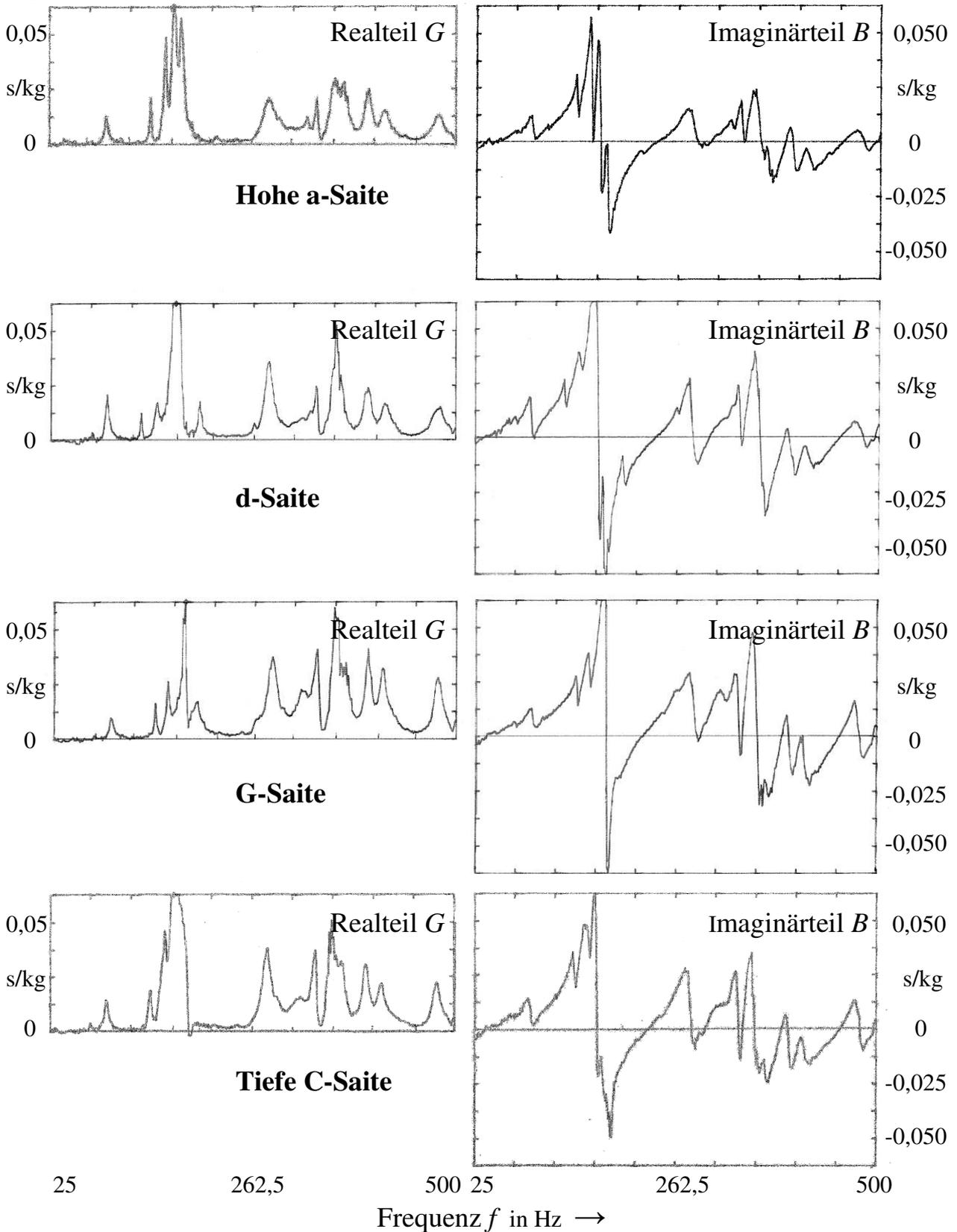


Abb. 3.8. Realteil G (links) und Imaginärteil B (rechts) der Admittanz an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten (a-Saite oben, C-Saite unten), gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Abb. 3.8 gibt die komplexen Admittanzen, gemessen an den Auflagepunkten sämtlicher Saiten, in der Gesamtschau wieder. In der Konduktanz (linke Spalte), ebenso wie in der Suszeptanz (rechte Spalte), zeigen sich jeweils Gemeinsamkeiten, jedoch auch gewisse Unterschiede für die einzelnen Saiten. Wiederum sind bei 170 Hz bis etwa 180 Hz starke Resonanzen zu erkennen. An den Auflagepunkten der tiefen Saiten prägt sich nur eine aus. Bei den hohen Saiten zeigen sich dagegen bis zu drei dicht benachbarte Spitzen.

Die Konduktanz in der linken Spalte ist gemäß Gl. (11) die wesentliche Kenngröße dafür, in welchem Maße das Instrument in der Lage ist, Leistung aufzunehmen. Sämtliche Kurven besagen, dass das Cello bei sehr tiefen Frequenzen für Leistung nicht aufnahmefähig ist. Unterhalb von etwa 100 Hz kann es deshalb Schall nur in äußerst geringem Maße oder gar nicht abstrahlen. Diese Erkenntnis ließ sich auch schon den Resultaten von Abschnitt 3.1 entnehmen. Bei Anregung in Normalenrichtung lag die Grenze jedoch bei einer Frequenz, die um etwa 50 Hz größer war. Zahlenmäßig erscheint dieser Unterschied gering, musikalisch kann er sich jedoch sehr wohl auswirken. Die Richtung, in der die Admittanz gemessen wird, scheint das Ergebnis in weiten Grenzen zu beeinflussen. Es ist daher angezeigt, die bisher vorliegenden Resultate einander gegenüber zu stellen und Vergleiche zu ziehen.

3.3. Einfluss der Anregungsrichtung

Der Betrag der Admittanz ist in Abb. 3.9 als Funktion der Frequenz dargestellt. Die linke Spalte bezieht sich auf die Messung senkrecht zum Steg, die rechte auf diejenige parallel zur Decke des Cellos. Unten sind die Ergebnisse für den Auflagepunkt der C-Saite, oben die Resultate für die a-Saite angeordnet. Das Diagramm für die normale Messung am Auflagepunkt der d-Saite war nicht mehr verfügbar. Frequenzen und Zahlenwerte, die das Hauptmaximum der Konduktanz kennzeichnen, sind in Tab. 3.I gesammelt. Die Frequenzauflösung war in beiden Fällen 1,25 Hz.

In Hinsicht auf die unterschiedlichen Messpositionen auf dem Steg lässt sich Folgendes aussagen: Etwa zwischen 170 Hz und 180 Hz bilden sich mehrere Maxima aus. Welches davon sich am deutlichsten ausprägt, hängt vom Ort der Anregung ab; dies war bereits in Abb. 3.4 zu erkennen. Es ist zu beobachten, dass in aller Regel an den Auflagepunkten der tiefen Saiten weniger, an denen der hohen Saiten mehr lokale Maxima auftreten, die dicht beieinander liegen. Um einen Gesamtüberblick zu bekommen, empfiehlt es sich für zukünftige Messungen daher, an den Auflagepunkt sämtlicher Saiten zu messen. Lediglich an einem Auflagepunkt zu messen und daraus auf die Admittanz an den anderen Punkten zu schließen, reicht offensichtlich nicht aus.

Bezüglich der unterschiedlichen Richtungen, in denen gemessen wurde, bestätigen sich die bisher gemachten Beobachtungen: In tangentialer Richtung finden sich mehr Maxima als in Normalenrichtung und diese Maxima sind deutlich höher. Das mittlere Niveau der Admittanz beträgt bei Anregung senkrecht zum Steg weniger als 0,01 s/kg. Misst man dagegen parallel zur Decke und damit in derselben Richtung, in welcher der Bogen wirkt, findet man im Mittel etwa 0,02 s/kg bis 0,03 s/kg. Offenkundig erweist das Cello sich als wesentlich schwingfreudiger, wenn sein Steg nicht senkrecht, sondern parallel zur Decke angeregt wird. Wie Eggers (1959) schreibt: „Am ‚schwersten‘ ist die Anregung über den Steg normal zur Deckenfläche (Gleichtakterregung der beiden Stegfüße)“. Für den Zuwachs infolge paralleler Anregung lässt sich mindestens eine Verdoppelung abschätzen. Da die tangentielle Messrichtung dem Betrieb des Instruments näher kommt als die Normalenrichtung, kann sie als aussagekräftiger gelten. Sie sollte deshalb zukünftig immer berücksichtigt und bevorzugt angewandt werden.

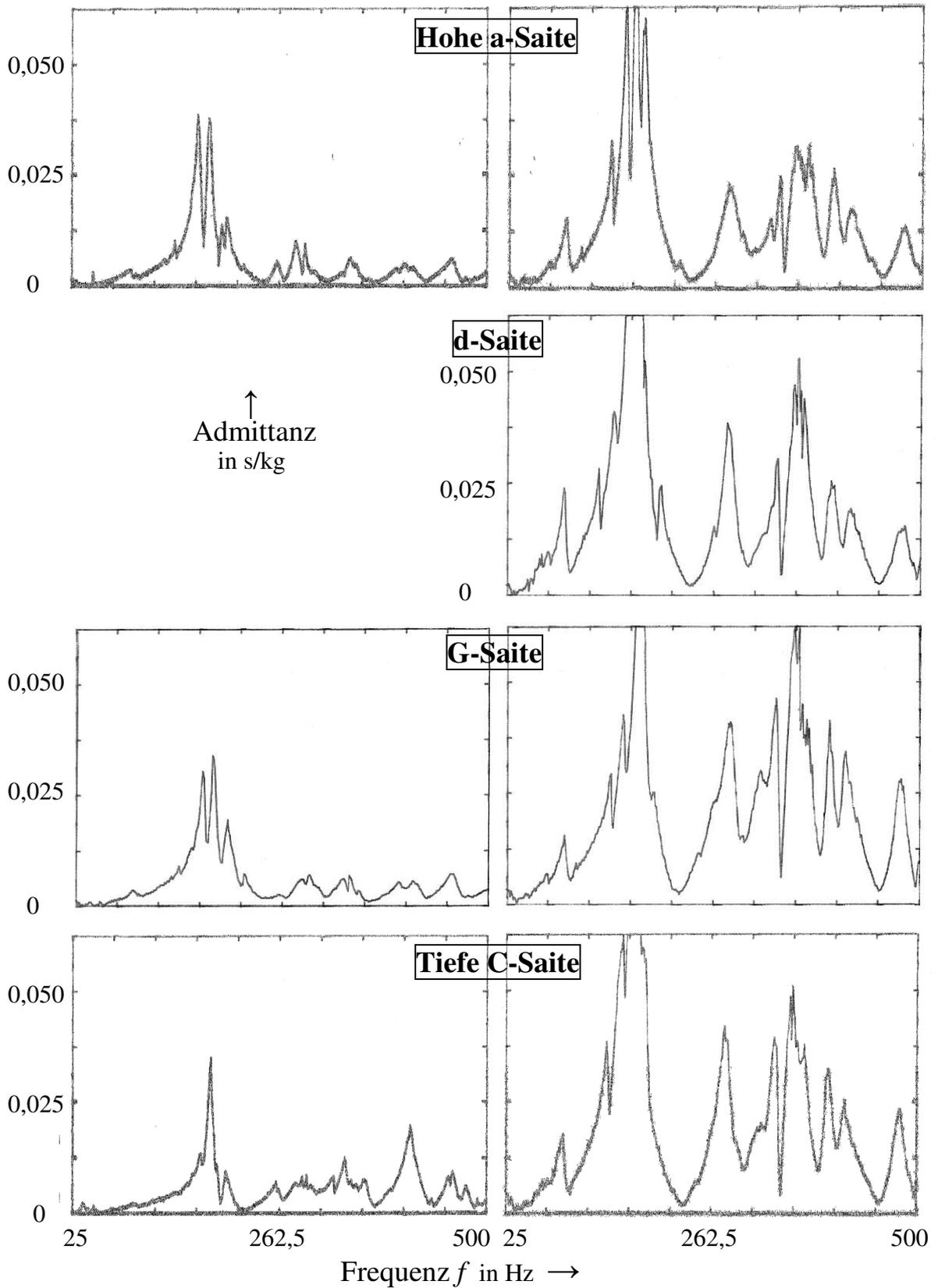


Abb. 3.9. Betrag der Admittanz Y an den Auflagepunkten der angegebenen Saiten (a -Saite oben, C -Saite unten) des Steges N , gemessen in Normalenrichtung (links) bzw. in tangentialer Richtung (rechts), als Funktion der Frequenz f .

Tab. 3.I. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen nach Methode I an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N. Es sind Ergebnisse für unterschiedliche Messrichtungen aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 verglichen

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
in Normalen- richtung	Frequenz	183,75 Hz	183,75 Hz	183,75 Hz	171,25 Hz
	Konduktanz	0,034 s/kg	0,031 s/kg	0,033 s/kg	0,035 s/kg
in tangentialer Richtung	Frequenz	170 Hz	180 Hz	171,25 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,094 s/kg	0,078 s/kg	0,085 s/kg	0,065 s/kg

Tab. 3.I enthält Angaben über das Hauptmaximum der Konduktanz und ermöglicht es, Zahlenwerte zu vergleichen. Bezüglich der Messposition auf dem Steg zeigt sich, dass das Hauptmaximum bei unterschiedlichen Frequenzen in unterschiedlicher Höhe auftreten kann. In noch stärkerem Maße hängt die Konduktanz von der Messrichtung ab. Die Maximalwerte sind deutlich höher, wenn der Steg nicht senkrecht, sondern parallel zur Decke angeregt wird. Tab. 3.I ist für die Spitzen zwischen 170 Hz und 183,75 Hz ein Zuwachs der Zahlenwerte um das 1,9- bis 2,8-Fache zu entnehmen. Die zugehörigen Frequenzen liegen zwischen denjenigen der Grundtöne der leeren d- und a-Saite. Für die drei tieferen Saiten könnten solche Unterschiede demzufolge von musikalischer Bedeutung sein.

Tab. 3.II. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen in tangentialer Richtung an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N. Es sind die Ergebnisse von zwei Messungen mit unterschiedlicher Auflösung verglichen

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Bandbr. 950 Hz (Aufl. 2,5 Hz)	Frequenz	182,5 Hz	180 Hz	182,5 Hz	180 Hz
	Konduktanz	0,039 s/kg	0,052 s/kg	0,056 s/kg	0,049 s/kg
Bandbr. 475 Hz (Aufl. 1,25 Hz)	Frequenz	170 Hz	180 Hz	171,25 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,094 s/kg	0,078 s/kg	0,085 s/kg	0,065 s/kg

In einer weiteren Tabelle 3.II lassen sich Ergebnisse für die tangentiale Messrichtung vergleichen, die nach Methode I mit unterschiedlichen Auflösungen gewonnen wurden. Bei der Messbandbreite 25 Hz bis 500 Hz, wie sie bei den hier beschriebenen Untersuchungen verwendet wurde, war die Frequenzauflösung 1,25 Hz (Tab. 3.II unten). In einer weiteren Messreihe wurde in einem Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1000 Hz gemessen. Da die Zahl der Abtastpunkte gleich blieb, war die Auflösung nun nur noch 2,5 Hz. Die somit ermittelten Resultate finden sich oben in Tab. 3.II. Es ist offenbar von der Frequenzauflösung abhängig, welches der zahlreichen lokalen Maxima das stärkste ist. Die Tendenz ist uneinheitlich. Äußerst klar ist hingegen zu erkennen, dass sich ein umso größerer Zahlenwert ergibt, je feiner die Frequenzauflösung ist.

Dies bestätigt sich auch in Tab. 3.III, die für die Messung in Normalenrichtung gilt. Ein Vergleich der Frequenzen zeigt, dass auch hier die Auflösung einen Einfluss darauf haben kann,

welches der lokalen Maxima sich am stärksten ausprägt. In Hinsicht auf die gemessenen Zahlenwerte ist wiederum die Tendenz zu erkennen, dass eine feinere Frequenzauflösung in aller Regel einen größeren Wert liefert.

Tab. 3.III. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen in Normalenrichtung an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N. Es sind die Ergebnisse von zwei Messungen mit unterschiedlicher Auflösung verglichen

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Bandbr. 950 Hz (Aufl. 2,5 Hz)	Frequenz	185 Hz	185 Hz	185 Hz	182,5 Hz
	Konduktanz	0,024 s/kg	0,026 s/kg	0,035 s/kg	0,032 s/kg
Bandbr. 475 Hz (Aufl. 1,25 Hz)	Frequenz	183,75 Hz	183,75 Hz	183,75 Hz	171,25 Hz
	Konduktanz	0,034 s/kg	0,031 s/kg	0,033 s/kg	0,035 s/kg

Die Tabellen machen deutlich, dass sowohl die Maximalwerte der Konduktanz als auch die zugehörigen Frequenzen von der Auflösung abhängen. Das lässt darauf schließen, dass die zu Grunde liegenden Resonanzen dicht benachbart bei leicht unterschiedlichen Frequenzen auftreten. Sie scheinen allesamt von hoher Güte zu sein bzw. geringe Halbwertsbreite aufzuweisen. Um diese Resonanzen zu „treffen“, ist bei der Analyse eine möglichst hohe Frequenzauflösung anzustreben. Da damit eine geringere Messbandbreite und/oder ein höherer Zeitaufwand verbunden sind, wird in jedem Einzelfall eine gesonderte Abwägung notwendig sein.

3.4. Zusammenfassende Bemerkung

Mit einer bewährten Messapparatur wurde die komplexe Admittanz als Funktion der Frequenz bis 500 Hz bestimmt. Von einer Kompensation der Masse von einigen wenigen Gramm, die oberhalb des Kraftmeselementes bewegt wird, wurde abgesehen. Es wurde an den Kontaktpunkten der vier Saiten mit einem Steg vom Typ N gemessen. Realteil (Konduktanz), Imaginärteil (Suszeptanz) und Betrag der komplexen Admittanz wurden bestimmt. Der Betrag kennzeichnet die Schwingfreudigkeit im allgemeinen Sinne. Die Suszeptanz gibt Auskunft darüber, ob der Steg wie eine Feder oder wie eine Masse reagiert. Die Konduktanz besagt, in welchem Maß der Steg Wirkleistung aufnehmen kann. Dies ist Voraussetzung dafür, dass das Cello Schall abstrahlen und somit seine Funktion als Musikinstrument ausüben kann.

Gewisse Abweichungen waren zwischen den Ergebnissen für die verschiedenen Auflagepunkte zu beobachten. Sehr deutliche Unterschiede zeigten sich dann, wenn die Admittanz nicht senkrecht zum oberen Rand des Steges, sondern parallel zur Decke gemessen wurde. Für die letztgenannte Messrichtung („tangential“) konnten mehr Maxima nachgewiesen werden. Dies ist in Übereinstimmung mit Beobachtungen von Fleischer (2009) bei Schwingungsmessungen am selben Cello. Insbesondere prägt sich bei etwa 100 Hz ein Maximum aus, das bei Anregung in Normalenrichtung so gut wie nicht zu erkennen war. Zudem waren die Zahlenwerte zwei- bis dreimal so groß. Demnach ist der Steg schwingfreudiger und kann mehr Leistung aufnehmen, wenn er nicht senkrecht, sondern in derjenigen Richtung angeregt wird, in welcher auch der Bogen üblicherweise streicht.

In den Maxima der Admittanz spiegeln sich „charakteristische Betriebsschwingungsformen“ wider, wie sie bei Fleischer (2009) in großer Zahl zusammengetragen sind. Die Anregung am Steg ruft diese Schwingungsformen hervor. Kommt die Frequenz der Anregung in die Nähe einer „charakteristischen Frequenz“, gerät der Korpus in Resonanz. Bei den Vibrometer-Untersuchungen (Fleischer 2009) war die Anzahl der Schwingungsformen größer, wenn nicht normal, sondern tangential angeregt wurde. Dass dabei auch deutlich höhere Amplituden auftreten, konnte damals noch nicht explizit nachgewiesen werden. Dies machen erst die Zahlenwerte der Admittanz und insbesondere der Konduktanz deutlich, wie sie den Messdiagrammen dieses Kapitels zu entnehmen sind.

4. ADMITTANZ AM STEG N, GEMESSEN NACH METHODE II IN TANGENTIALER RICHTUNG

4.1. Messanordnung

Komplexe Admittanzen wurden nach der Methode II gemessen. Als Messorte wurden die Auflagepunkte der vier Saiten am Steg gewählt. Abb. 4.1 gibt die Situation bei der Messung wieder. Der Messkopf war tangential orientiert, d.h. angeregt und gemessen wurde parallel zur Decke. Sämtliche Untersuchungen beziehen sich auf den Steg vom Typ N, den Abb. 4.1 zeigt.



Abb. 4.1. Messung der Admittanz in tangentialer Richtung (am Steg N parallel zur Decke), hier am Auflagepunkt der G-Saite.

Da die Anregung parallel zur Decke den Spielbetrieb besser nachahmt, als es die Anregung in Normalenrichtung (vg. Abschnitt 3.2) kann, wurde sie im Weiteren bevorzugt angewandt. Die Abb. 2.2 und 2.3 haben jedoch deutlich gemacht, dass bei dieser Messrichtung die Auflagepunkte der mittleren Saiten schwer zu erreichen sind. Um diesem Missstand abzuhelpfen, wurde die Schraube am vorderen Ende des Impedanzmesskopfes entnommen. Auf den Messkopf war nun ein hohles Verlängerungsstück mit einer Spitze aufgesetzt, wie es in Abb. 4.1 zu erkennen ist.

Dessen Masse sowie die Masse des Messkopfes, die zwischen Sensor und Messobjekt wirksam wird, wurde mit Hilfe einer elektrischen Massekompensationseinheit Brüel & Kjaer 5565

minimiert. Auch weiterhin wurde der Messkopf von einem Mini-Shaker Brüel & Kjaer 4810 angetrieben. Schwingerreger samt Halterung, Messkopf und Mess-Spitze sind in Abb. 4.1 abgebildet. Ebenso ist zu erkennen, wie Messeinrichtung und Cello zueinander positioniert waren. Im Beispiel wurde am Auflagepunkt der G-Saite gemessen. Eine Person hielt das Instrument so, dass die Mess-Spitze mit ausreichender Vorlast gegen den Steg drückt.

Wie bereits in Abschnitt 2.2 ausgeführt, wurde für diese Messreihe ein FFT-Analysator vom Typ Ono Sokki CF-5210 verwendet. Dieses Gerät bietet erweiterte Möglichkeiten der Darstellung und der Analyse. Zudem liefert es auch ein angepasstes Pseudo-Rauschsignal, das in den Leistungsverstärker eingespeist wurde. Um die Qualität der Messung zu erhöhen, wurde über 10 Messungen gemittelt. Als Frequenzbandbreite wurde 0 Hz und 1000 Hz gewählt, womit der Bereich der Grundfrequenzen der wesentlichen Saitenschwingungen abgedeckt war.

4.2. Messergebnisse

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse von Admittanzmessungen nach der oben beschriebenen Methode II zusammen gestellt. Sie beziehen sich ausschließlich auf den Steg N und die tangentielle Richtung.

4.2.1. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

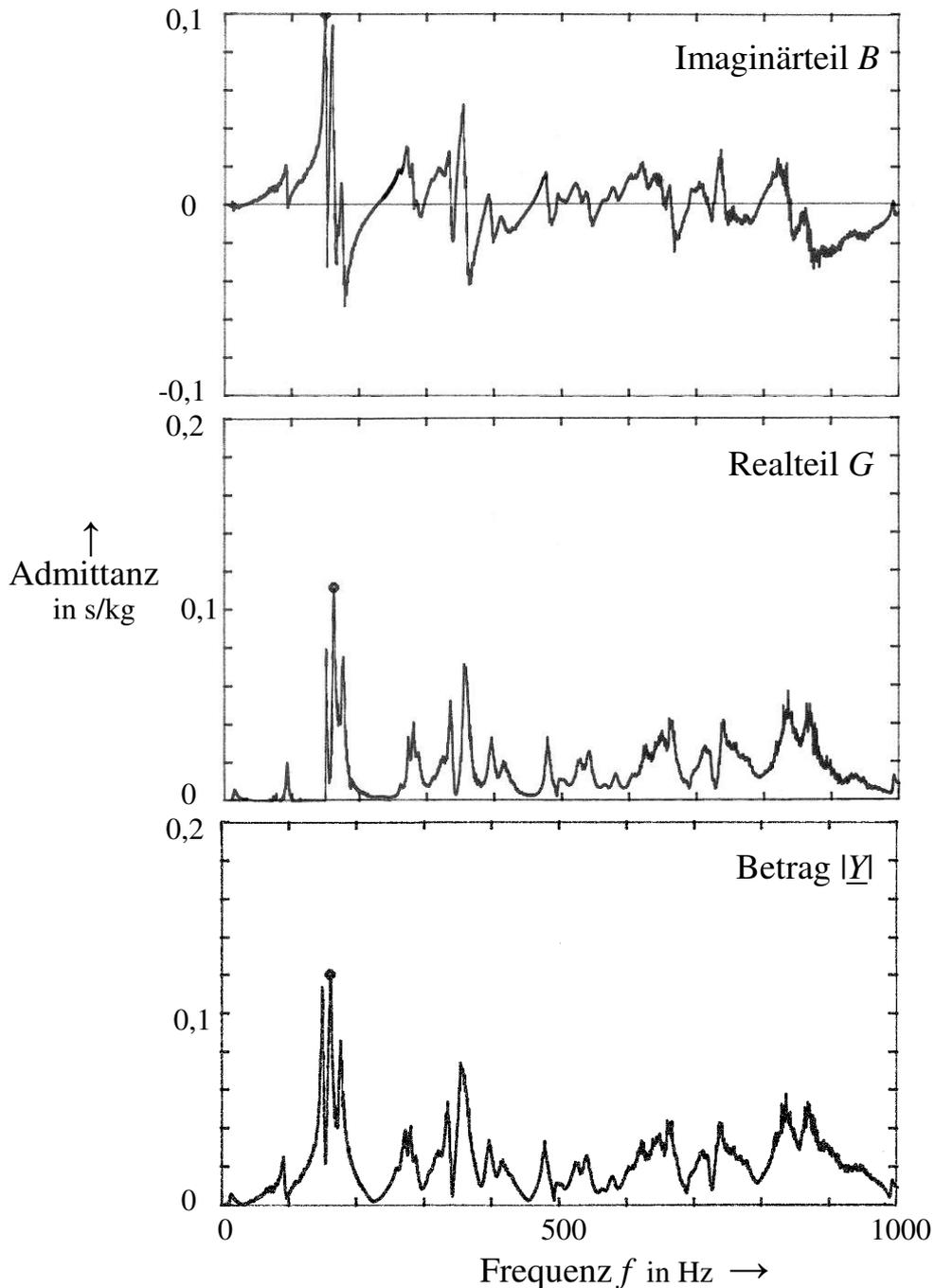


Abb. 4.2. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Die Messung nach Methode II liefert am Auflagepunkt der C-Saite die Admittanz nach Abb. 4.2. Im Realteil (Mitte) und im Betrag (unten) erkennt man eine Folge von lokalen Maxima, die den untersuchten Frequenzbereich ab etwa 250 Hz weitgehend füllen. Den Maxima im Realteil entsprechen Nulldurchgänge im Imaginärteil (oben). Die Konduktanz nimmt den Maximalwert 0,111 s/kg an. Dieser ist durch den Marker (schwarzer Punkt) gekennzeichnet und stellt sich bei 162,5 Hz ein. In unmittelbarer Nähe finden sich zwei weitere Maxima von ähnlicher Höhe.

4.2.2. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der G-Saite

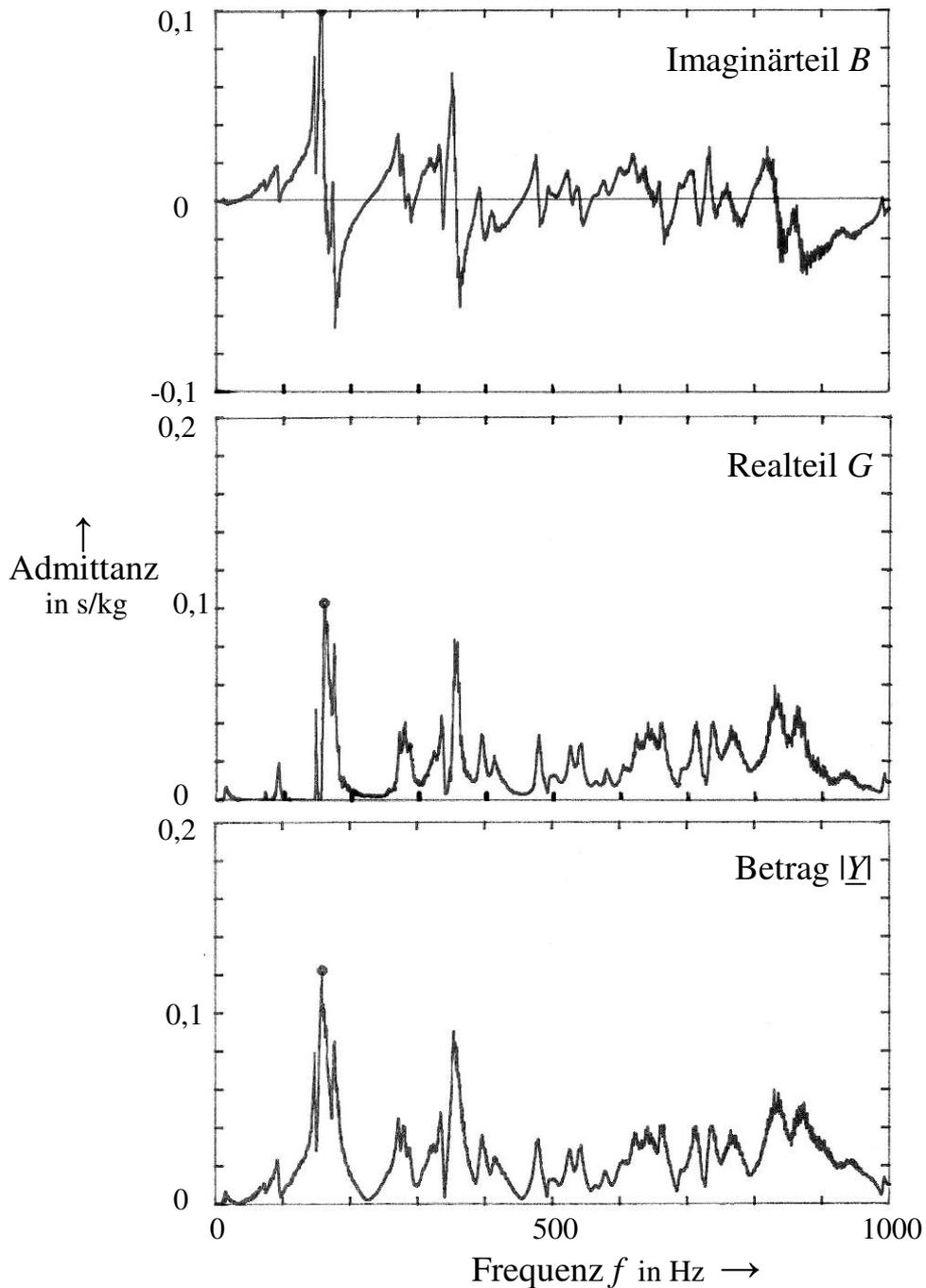


Abb. 4.3. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz Y , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Abb. 4.3 gibt die komplexe Admittanz am Auflagepunkt der G-Saite wieder. Der Maximalwert der Konduktanz (Mitte) ist $0,103 \text{ s/kg}$ bei $160,625 \text{ Hz}$. Wiederum zeigen sich in unmittelbarer Nähe zwei ähnlich hohe Maxima. Ab etwa 250 Hz reihen sich die Maxima dann dicht an dicht. Hier wie in den anderen Messdiagrammen zeigt sich, dass der Marker bei der Konduktanz und beim Betrag den Höchstwert anzeigt. Bei der Suszeptanz (Oben) müsste er dann im Nulldurchgang liegen. Offenbar ist die Auflösung nicht groß genug, und der Marker zeigt in aller Regel die größte positive Suszeptanz an. Der Messwert bei der nächst höheren („gerasterten“) Frequenz hat dann bereits ein negatives Vorzeichen.

4.2.3. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der d-Saite

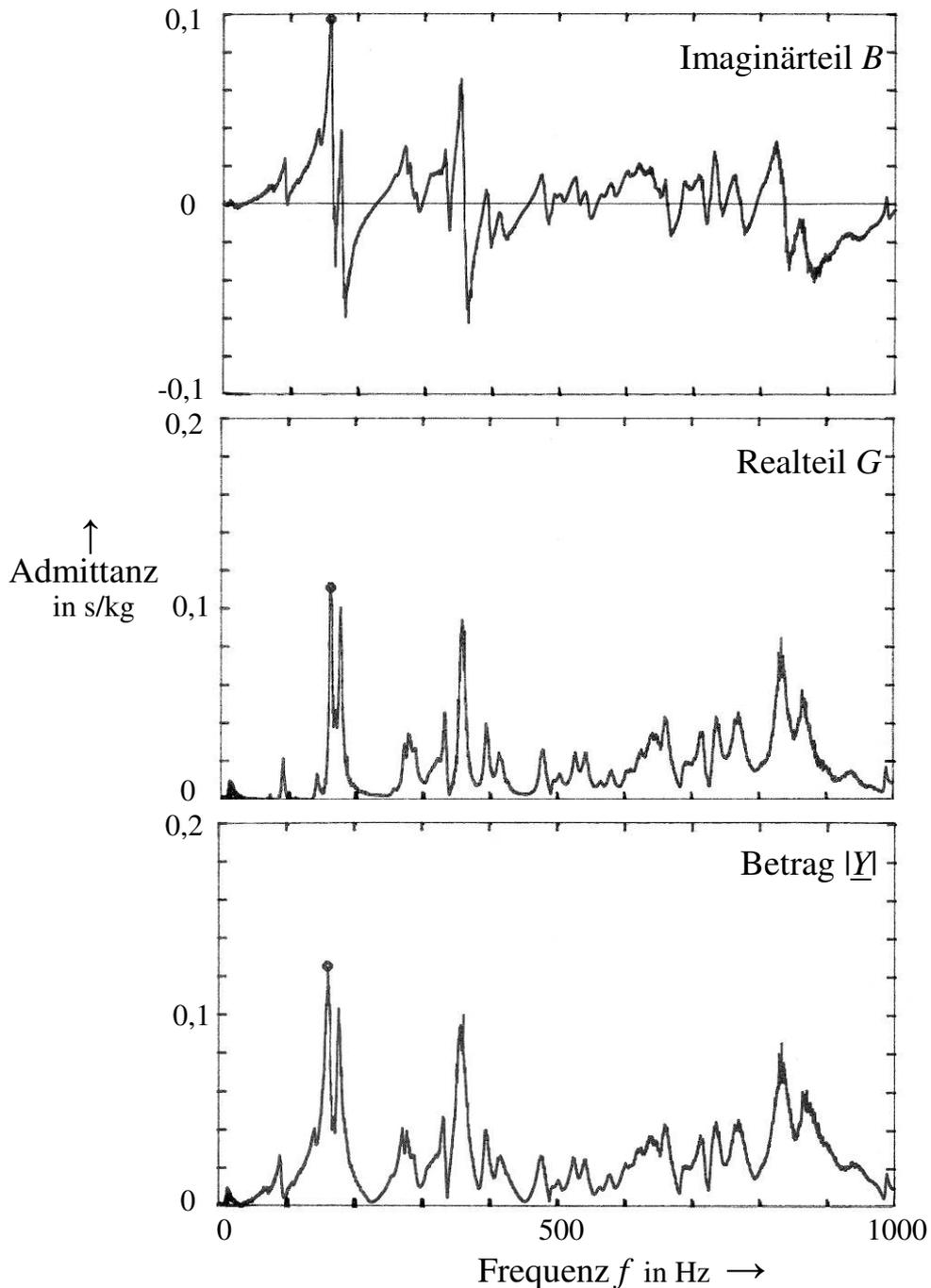


Abb. 4.4. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Am Auflagepunkt der d-Saite ist die Admittanz wie in Abb. 4.4 dargestellt. Es zeigt sich im Realteil (Mitte) eine Reihe von zahlreichen lokalen Maxima, im Imaginärteil (oben) eine entsprechende Folge von Nulldurchgängen. Die Konduktanz weist bei 163,125 Hz den größten Wert 0,111 s/kg auf. In der Nähe, bei einer etwas höheren Frequenz, existiert nun noch ein weiteres Maximum.

4.2.4. Komplexe Admittanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

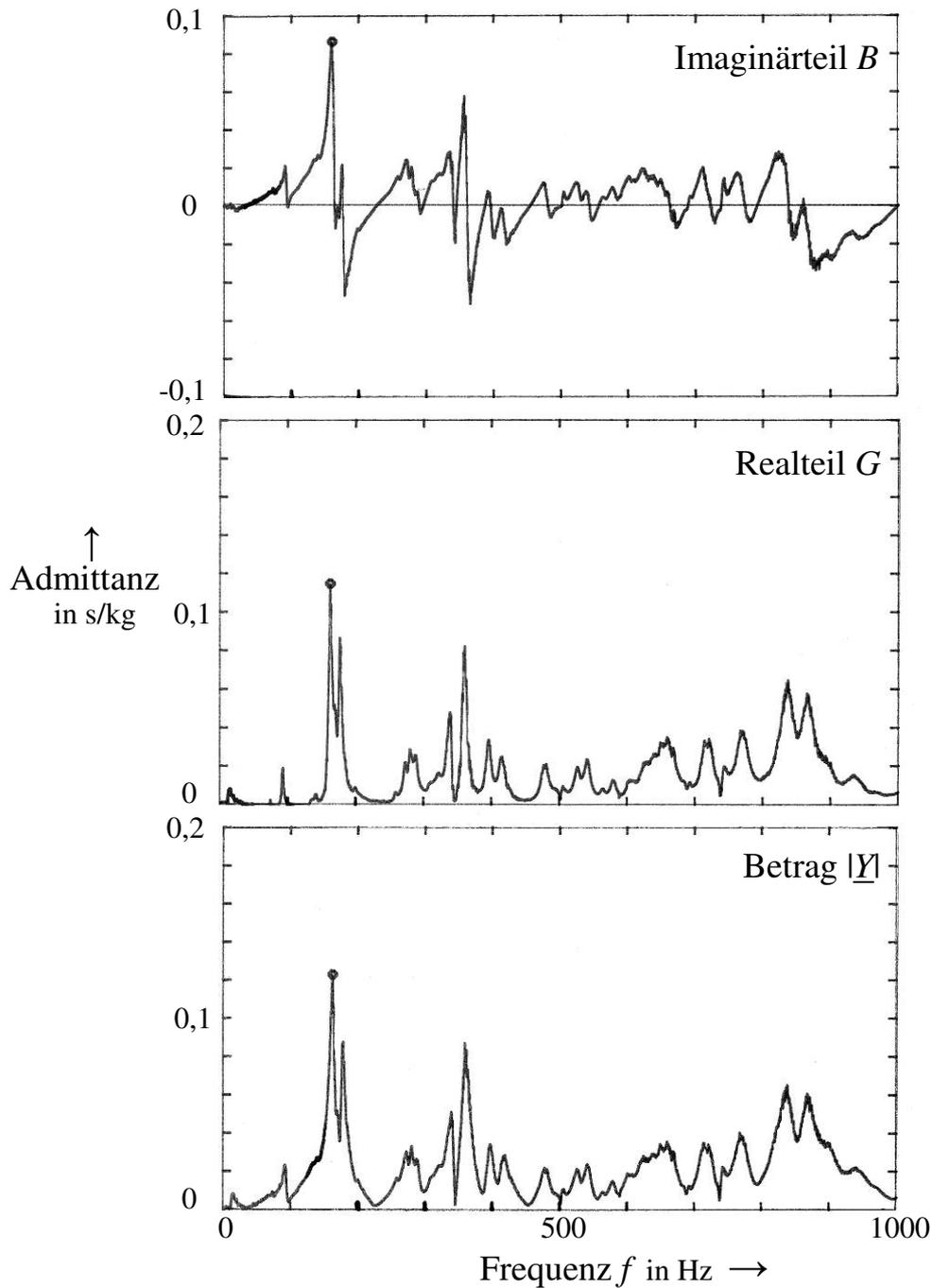


Abb. 4.5. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Wo die hohe a-Saite auf dem Steg aufliegt, ergibt die Messung die Admittanz nach Abb. 4.5. Auch hier reiht sich Maximum an Maximum, d.h. Resonanz an Resonanz. Zahlreiche weitere Spitzen der Konduktanz (Mitte) sowie Nullstellen der Suszeptanz (oben) sind zu erkennen. Der Realteil erreicht bei 162,5 Hz den Maximalwert 0,115 s/kg. Bei einer geringfügig höheren Frequenz bildet sich noch ein weiteres Maximum von ähnlicher Höhe aus.

4.3. Vergleich mit anderen Ergebnissen

Die Resultate von zwei unterschiedlichen Messungen sind in Tab. 4.I zusammen gestellt. Beide beziehen sich auf den Steg N und bei beiden war der Messkopf parallel zur Decke orientiert. Bei den Experimenten nach Methode I (vgl. Kapitel 3) war weißes Rauschen als Testsignal verwendet und auf eine Massekompensation verzichtet worden. Bei der Messbandbreite 25 Hz bis 500 Hz war die Frequenzauflösung 1,25 Hz (Tab. 4.1 oben). Wurde nach Methode II (Pseudo-Rauschen, Massekompensation, Tab. 4.I unten) gemessen, dann war die Frequenzauflösung in aller Regel – wie in Tab. 4.I unten – 0,625 Hz. In einigen Fällen, auf die dann gesondert hingewiesen wird, betrug sie 1,25 Hz.

Tab. 4.I. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen in tangentialer Richtung an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N. Es sind die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Messungen verglichen

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Methode I (Aufl. 1,25 Hz)	Frequenz	170 Hz	180 Hz	171,25 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,094 s/kg	0,078 s/kg	0,085 s/kg	0,065 s/kg
Methode II (Aufl. 0,625 Hz)	Frequenz	162,5 Hz	160,625 Hz	163,75 Hz	162,5 Hz
	Konduktanz	0,111 s/kg	0,103 s/kg	0,111 s/kg	0,115 s/kg

Bei tiefen Frequenzen, zwischen etwa 160 Hz und 180 Hz, existieren mehrere lokale Maxima. Diese sind teilweise von sehr hoher Güte. Welches davon sich bei der Messung als das größte abbildet, hängt offenbar von mehreren Faktoren ab. Eine Tendenz ist insofern zu erkennen, dass Methode II die kleineren Frequenzwerte liefert. Möglicherweise war nicht die gesamte Masse, die sich zwischen Kraftmesselement und Steg befand, vollständig kompensiert worden. Wahrscheinlicher ist, dass kleine Änderungen im Kontakt zwischen Messkopf und Steg bewirken, dass entweder die eine oder die andere Admittanz-Spitze sich stärker ausprägt. Einen Einfluss könnte auch die Richtung spielen, die sich bei Methode II leichter und besser einstellen lässt als bei Methode I, in beiden Fällen aber sicherlich nicht vollständig reproduziert werden kann. Die größte Bedeutung dürfte aber der Frequenzauflösung zukommen. Auch bei Methode II ist sie noch so grob, dass der Nulldurchgang der Suszeptanz, der mit dem Maximum der Konduktanz einher geht, sich nicht in einem Messwert abbildet. Es ist zu vermuten, dass auch nicht jedes Maximum ganz exakt in seiner vollen Ausprägung getroffen und vermessen werden konnte. So scheint es auch von der Frequenzauflösung abzuhängen, welches der zahlreichen lokalen Maxima zum Hauptmaximum wird. In aller Regel gilt jedoch, dass der gemessene Konduktanz-Wert umso größer ist, je dichter die Abtastpunkte auf der Frequenzachse liegen.

4.4. Zusammenfassende Bemerkung

Wie sich bereits im vorhergehenden Kapitel angedeutet hatte, hängt die Schwingfreudigkeit des Steges in starkem Maße von der Richtung ab, in der sie gemessen wird. Wenn der Steg auf die Decke gedrückt und von ihr weggezogen wird (Anregung und Messung in Normalenrichtung), dann ist er weniger schwingfreudig, als wenn er um die Längsachse des Instruments

zum Kippen gebracht wird (Anregung und Messung in tangentialer Richtung). Die Untersuchungen nach Methode II haben dies bestätigt. Die tangentiale Anregung entspricht weitgehend derjenigen, wie sie beim Anstreichen der Saite mit dem Bogen vorliegt.

Die experimentelle Praxis hat gezeigt, dass die Methode II gegenüber der Methode I (Kapitel 3) deutliche Vorteile bringt. Mit der höheren Frequenzauflösung können Maxima genauer lokalisiert werden. Insbesondere lässt sich die Tastspitze, die nun auf dem Messkopf sitzt, besser an den Messpunkten positionieren. Immer dann, wenn in tangentialer Richtung zu messen ist, wird der Methode II der Vorzug zu geben sein.

5. KONDUKTANZ IN NORMALENRICHTUNG, GEMESSEN AN DEN STEGEN A UND N

Ziel der Untersuchungen war es zunächst, die Ergebnisse der Messungen mit und ohne Massekompensation (Methode II bzw. I) miteinander zu vergleichen und damit abzusichern. Unter der Voraussetzung, dass die Resultate hinreichend übereinstimmen, sollte dann für die künftigen Untersuchungen einer der beiden Methoden der Vorzug gegeben werden. Nach der Klärung der Methodik wären dann die Konduktanzen der Stege N und A zu bestimmen und die Ergebnisse einander gegenüber zu stellen.

5.1. Anordnung bei der Messung nach Methode II



Abb. 5.1. Messung der Stegadmittanz in Normalenrichtung am Auflagepunkt der G-Saite des Steges N.

Abb. 5.1 bezieht sich auf die Messung am Steg N und zeigt das Rohr mit der Spitze, das in das vordere Ende des Messkopfes eingeschraubt war. Der Messkopf wurde vom Mini-Shaker Brüel & Kjaer 4810 angetrieben, der rechts im Bild zu sehen ist. Es wurde eine elektrische Massekompensationseinheit Brüel & Kjaer 5565 verwendet. Damit sollte der Einfluss der Masse derjenigen Bauteile, die sich zwischen Sensor und Messobjekt befinden, minimiert werden. Eine weitere Abwandlung gegenüber den Experimenten nach Methode I bestand darin, dass nun ein Analysator Ono Sokki CF-5210 zur Anwendung kam. Für die Anregung lieferte dieser Analysator ein angepasstes Pseudo-Rauschen, das über den Leistungsverstärker in den Mini-Shaker eingespeist wurde. Abgesehen von der Messrichtung entsprach der Versuchsaufbau demjenigen, welcher in Abschnitt 4.1 beschrieben ist.

5.2. Vergleich der Ergebnisse nach Methode I bzw. II für Steg N

Es werden die Konduktanzen einander gegenüber gestellt, die am selben Objekt mit unterschiedlichen Versuchsanordnungen gewonnen wurden. Nach Methode I wurde der Bereich zwischen 50 Hz und 1000 Hz untersucht, nach Methode II Frequenzen zwischen 0 Hz und 1000 Hz. Die Diagramme sind in ihrer Größe so aneinander angepasst, dass ein direkter Vergleich möglich ist. Es war der Steg vom Typ N eingesetzt; siehe Abb. 5.1. Da die Massekompensation den Einfluss der Masse zwischen Messelementen und dem Instrument verringern sollte, wäre eine Verschiebung der Frequenzen zu erwarten. Diese Masse macht das Messobjekt „schwerer“. Wäre sie von Belang, so würde sie die Resonanzfrequenzen verringern. Danach würden die Maxima der Konduktanz, gemessen mit Methode I, bei etwas kleineren Frequenzen auftreten als mit Methode II.

5.2.1. Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

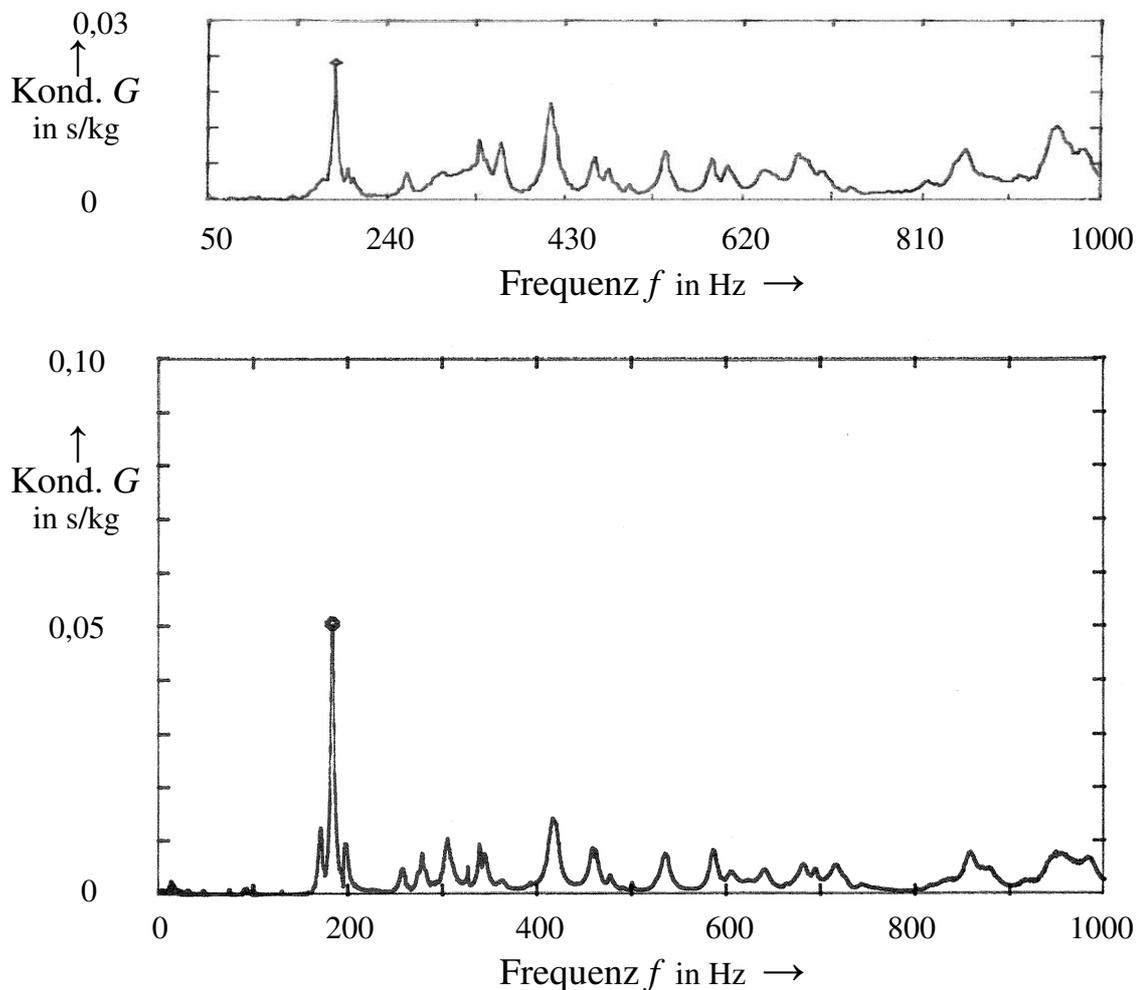


Abb. 5.2. Konduktanz G in Normalenrichtung des Steges N am Auflagepunkt der tiefen C-Saite als Funktion der Frequenz f , gemessen nach Methode I (oben) bzw. nach Methode II (unten).

Abb. 5.2 bezieht sich auf den Auflagepunkt der tiefsten, der C-Saite. Die Messung nach Methode I (oben) ergibt die maximale Konduktanz 0,024 s/kg bei 185 Hz. Eine vorherige

Messung (vgl. die Abb. 3.2 und 3.4) mit der Bandbreite 500 Hz hatte 0,034 s/kg bei 183,75 Hz ergeben. Eine Verdoppelung der Gesamt-Bandbreite hat bei sonst gleichen Parametern eine halb so feine Frequenzauflösung zur Folge. Der Abstand zwischen zwei Frequenzwerten ist dann nicht mehr 1,25 Hz, sondern 2,5 Hz. In aller Regel bewirkt dies, dass bei Resonanzen hoher Güte, wie sie hier vorliegen, das Maximum weniger genau lokalisiert wird. Dies gilt nicht nur in Hinsicht auf Frequenz, sondern ergibt meist auch einen kleineren Höchstwert.

Bei den Messungen nach Methode II war bei 1000 Hz Bandbreite die Frequenzauflösung 0,625 Hz. Das untere Diagramm von Abb. 5.2 zeigt ein Hauptmaximum mit 0,50 s/kg bei 183,75 Hz. Erwartungsgemäß ist dieser Wert etwas größer als das Resultat einer Messung nach Methode I bei der Frequenzauflösung 1,25 Hz (vgl. Tab. 3.I). Dies ist in erster Linie der höheren Frequenzauflösung geschuldet, hängt aber möglicherweise auch damit zusammen, dass das Testsignal der diskreten Analyse besser angepasst ist und Spektralanteile genau bei den Analysefrequenzen enthält. Auch könnte das effektivere Mitteln über zehn Zyklen des Pseudo-Rauschens den höheren Messwert erklären.

5.2.2. Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite

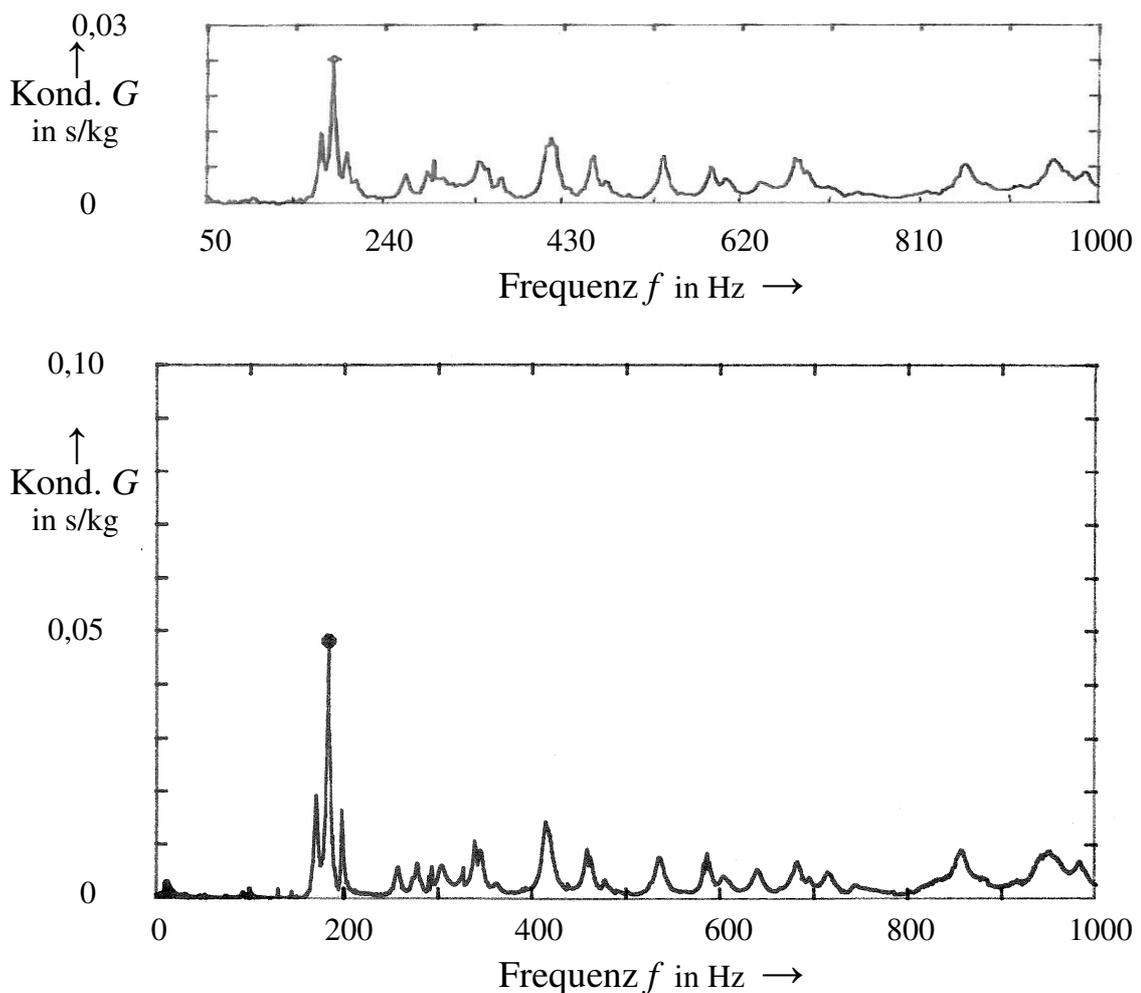


Abb. 5.3. Konduktanz G in Normalenrichtung des Steges N am Auflagepunkt der G--Saite als Funktion der Frequenz f , gemessen nach Methode I (oben) bzw. nach Methode II (unten).

Für den Auflagepunkt der G-Saite liefert Methode I gemäß dem oberen Diagramm von Abb. 5.3 den Maximalwert 0,026 s/kg bei 185 Hz. Für die Messbandbreite 500 Hz (Abb. 3.4 und Tab. 3.I) hatte sich als Maximum 0,031 s/kg bei 183,75 Hz ergeben. Die feiner auflösende Messung nach Methode II führt mit 0,48 s/kg bei 183,75 Hz zur selben Frequenz, erwartungsgemäß aber zu einem größeren Höchstwert.

5.2.3. Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite

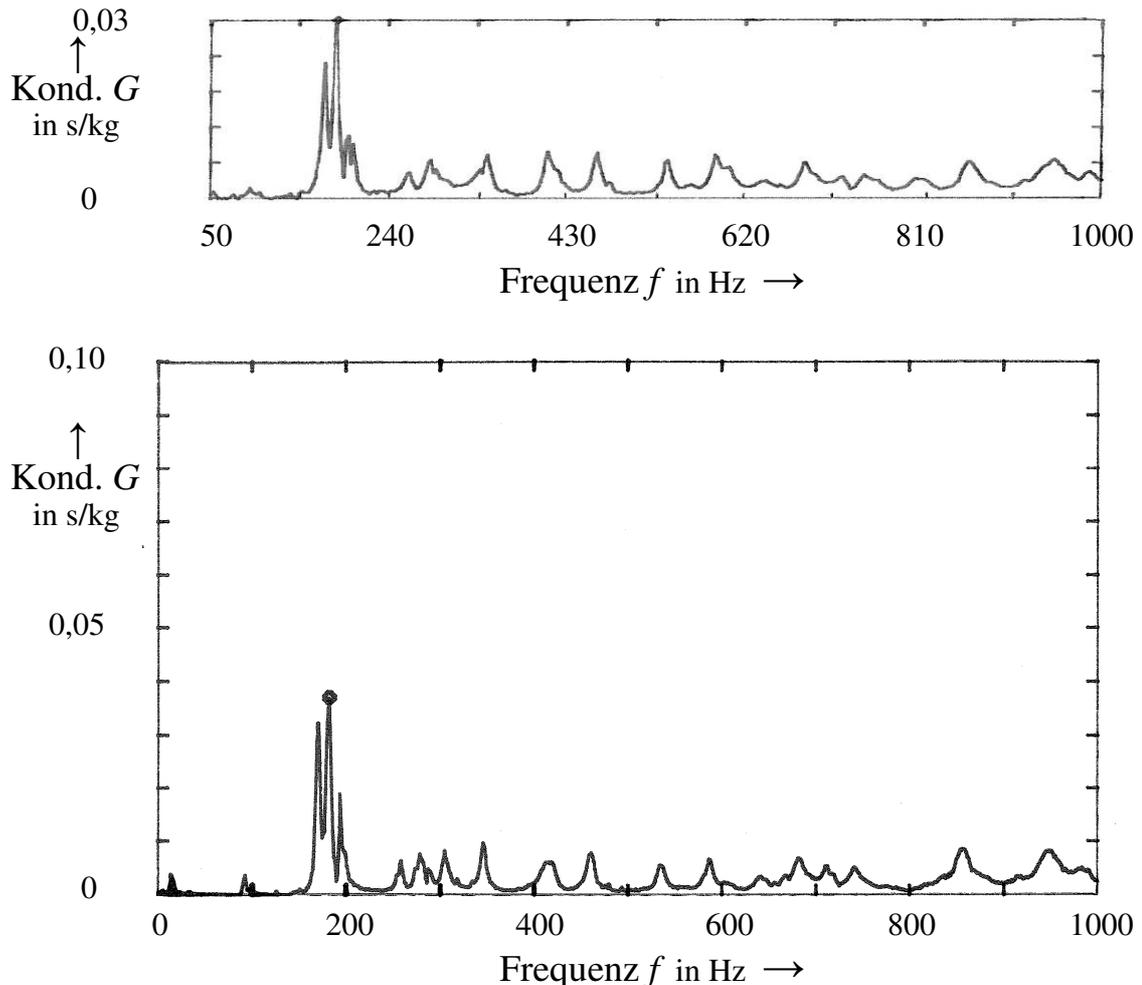


Abb. 5.4. Konduktanz G in Normalenrichtung des Steges N am Auflagepunkt der d -Saite als Funktion der Frequenz f , gemessen nach Methode I (oben) bzw. nach Methode II (unten).

Abb. 5.4 gilt für die d -Saite. Wo diese Saite auf dem Steg N aufliegt, misst man nach Methode I für das Hauptmaximum die Konduktanz 0,035 s/kg bei 185 Hz. Wird die Gesamtbandbreite auf 500 Hz verringert (Abb. 3.4) und die Frequenzauflösung damit entsprechend verfeinert, erhält man mit 0,033 s/kg bei 183,75 Hz praktisch das gleiche Ergebnis. Methode II liefert 0,37 s/kg bei 182,5 Hz und somit hinsichtlich des Spitzenwerts nahezu dieselbe Zahl. Dass sich eine geringfügig kleinere Frequenz ergibt, könnte damit zusammen hängen, dass sich unterhalb des Hauptmaximums eine weitere Spitze ausbildet. Welche von den Spitzen sich stärker ausprägt, hängt stark vom Ort und von der Ausrichtung der Mess-Spitze ab. Dies zeigt sich auch im nächsten Diagrammpaar.

5.2.4. Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

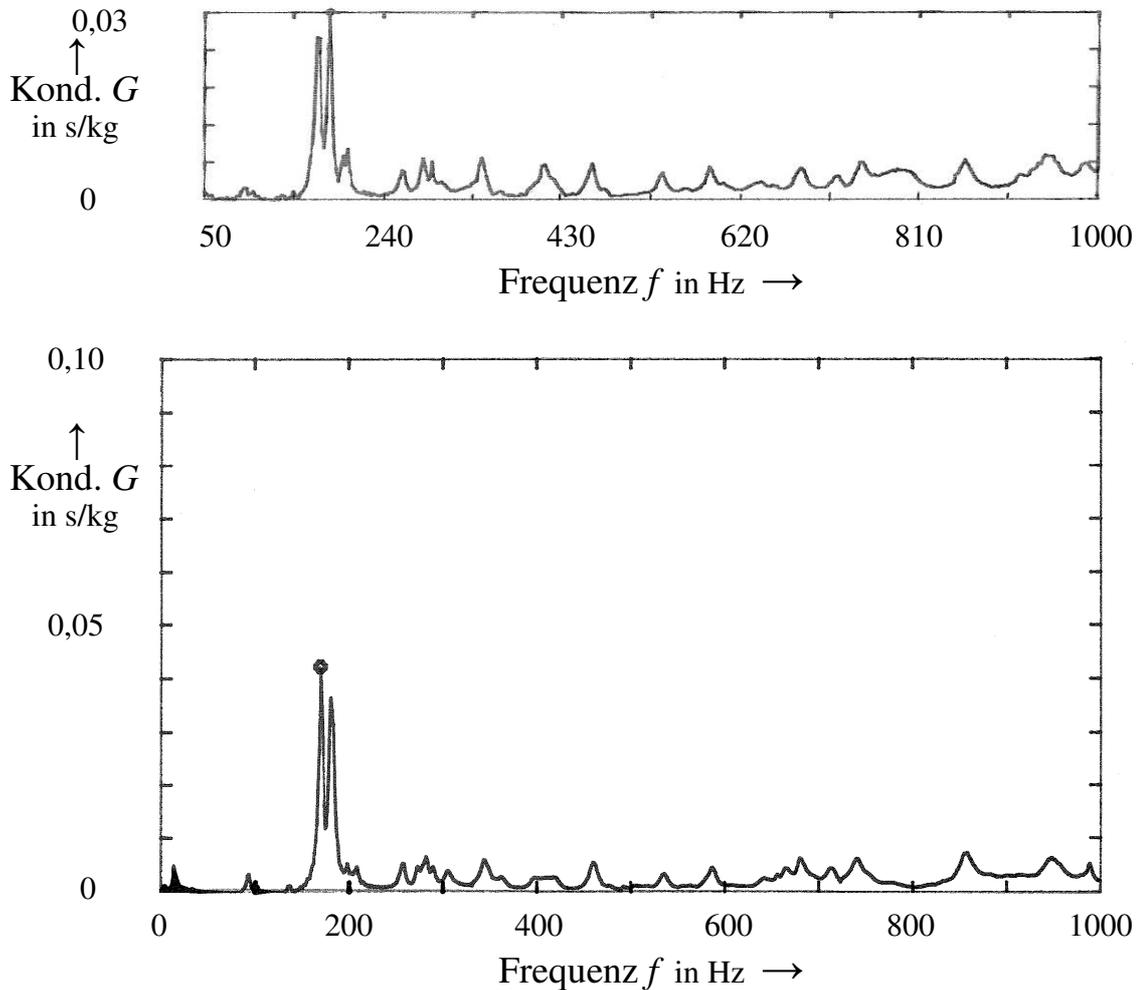


Abb. 5.5. Konduktanz G in Normalenrichtung des Steges N am Auflagepunkt der hohen a -Saite als Funktion der Frequenz f , gemessen nach Methode I (oben) bzw. nach Methode II unten).

Am Auflagepunkt der höchsten Saite zeigen sich zwei dicht benachbarte Spitzen. Dem oberen Diagramm von Abb. 5.5 entnimmt man $0,032 \text{ s/kg}$ bei $182,5 \text{ Hz}$. Die Messung mit der Gesamtbandbreite 500 Hz war nicht eindeutig. Eine Messung (Abb. 3.3 und 3.4) hatte $0,035 \text{ s/kg}$ bei $171,25 \text{ Hz}$, eine weitere $0,038 \text{ s/kg}$ bei $183,75 \text{ Hz}$ ergeben. Ähnlich wie beim Vergleich mit dem Ergebnis der Methode II ($0,42 \text{ s/kg}$ bei 170 Hz) zeigt sich, dass es nicht einfach ist, im Bereich des Hauptmaximums die Ergebnisse zu reproduzieren. Es existieren mindestens zwei ähnlich ausgeprägte Maxima im Abstand von etwas mehr als 10 Hz . Welches davon sich als das größere erweist, ist sehr empfindlich gegenüber den Gegebenheiten beim Messvorgang. Offenbar genügen bereits minimale Änderungen im Kontakt des Messkopfes mit dem Steg, um entweder die eine oder die andere Spitze stärker hervorzurufen.

5.2.5. Gemeinsamkeiten

Bei der linearen Unterteilung der Ordinate, wie sie in allen vorliegenden Diagrammen gewählt wurde, treten die Spitzen zwischen 170 Hz und 190 Hz besonders deutlich hervor. Genau diese Maxima erweisen sich jedoch als sehr anfällig gegenüber kleinen Unterschieden beim Messen. Im übrigen Frequenzbereich zeigen die Messdiagramme große Ähnlichkeit. Das allgemeine Niveau der Konduktanz ist jeweils unterhalb von 0,01 s/kg. Dies geht gleichermaßen aus allen Diagrammen der Abb. 5.2 bis 5.5 hervor. Diesen Abbildungen sind die Frequenzen und Zahlenwerte des Hauptmaximums entnommen und in Tab. 5.I zusammengestellt. Resultate einer weiteren Messung nach Methode I mit verfeinerter Frequenzauflösung waren bereits in Tab. 3.III zu finden. Insgesamt zeigen die Vergleiche weitgehende Übereinstimmung. In Hinsicht auf die Zahlenwerte der Konduktanz, die maximal erreicht werden, sind Abweichungen zu beobachten, die sich mit der unterschiedlich feinen Frequenzauflösung erklären lassen. Darüber hinaus findet hin und wieder - wie bei der a-Saite - ein Springen von einem Maximum zu einem benachbarten, ähnlich hohen Maximum statt.

Tab. 5.I. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen nach den Methoden I und II in Normalenrichtung an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Methode I (Aufl. 2,5 Hz)	Frequenz	185 Hz	185 Hz	185 Hz	182,5 Hz
	Konduktanz	0,024 s/kg	0,026 s/kg	0,035 s/kg	0,032 s/kg
Methode II (Aufl. 0,625 Hz)	Frequenz	183,75 Hz	183,75 Hz	182,5 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,050 s/kg	0,048 s/kg	0,037 s/kg	0,042 s/kg

Wenn die Masse des Aufnehmers eine Rolle spielt, dann müsste die Methode I (ohne Massekompensation) kleinere Frequenzwerte als die Methode II ergeben, bei der die Aufnehmermasse kompensiert ist. Eine entsprechende Verringerung der Resonanzfrequenzen, die bei einem großen Einfluss der bewegten Aufnehmermasse zu erwarten wäre, ist in Tab. 5.I nicht zu beobachten. Wenn überhaupt eine Tendenz aufscheint, dann eher die umgekehrte: In aller Regel sind die nach Methode I gemessenen Frequenzen sogar minimal größer als diejenigen nach Methode II. Die Massekompensation ist theoretisch zu empfehlen, praktisch hat sie sich hier jedoch nicht ausgewirkt.

Für das Hauptmaximum der Konduktanz hat die Methode II regelmäßig die größeren Werte geliefert. Dies hat seinen Grund darin, dass die Frequenzauflösung bei dieser Methode viermal feiner ist als bei den hier präsentierten Ergebnissen der Methode I. Je feiner aufgelöst wird, desto höher wird der gemessene Konduktanz-Wert sein. Dies hatten bereits frühere Vergleiche, z.B. in Tab. 3.III, belegt.

Angesichts der Unterschiede in Hinsicht auf Mess-Spitze, Analysator, Messsignal und Massekompensation halten sich die beobachteten Diskrepanzen in Grenzen. Die Ergebnisse der beiden Methoden differieren nicht übermäßig. Es hat sich jedoch als wesentlich einfacher erwiesen, die längere Tastspitze zu handhaben. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel zeigt sich die Methode II im Vorteil. Da sie Resultate liefert, die im Wesentlichen mit denen nach Methode I übereinstimmen, wird sie zukünftig ausschließlich verwendet werden.

5.3. Vergleich der Ergebnisse nach Methode II für die Stege N und A

Die Methode II (mit langer Mess-Spitze, Massekompensation, Pseudo-Rauschen, 1000 Hz Messbandbreite, Analysator Ono Sokki CF-5210) wurde verwendet, um auf die inzwischen bekannte Art die Konduktanz zu messen. Das Cello war nicht mehr durchgängig mit dem Steg N, sondern zeitweise mit dem Steg A versehen; vgl. Abb. 5.6. Da für die diesbezüglichen Messungen nur begrenzte Zeit zur Verfügung stand, konnte der Frequenzbereich nicht so fein abgetastet werden. Somit war bei der Messung am Steg A die Auflösung weniger detailliert und betrug lediglich 1,25 Hz. Die Fotografie zeigt, dass der Messkopf nach wie vor senkrecht zur Oberfläche des Steges orientiert war.



Abb. 5.6. Messung der Stegadmittanz in Normalenrichtung am Auflagepunkt der d-Saite des Steges A.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse von zwei Messreihen einander gegenüber gestellt. Nach Methode II wurde am Auflagepunkt der genannten Saite zum Einen dann gemessen, wenn der Steg N eingesetzt war (unteres Diagramm; vgl. auch die unteren Diagramme der Abb. 5.2 bis 5.5). Das Diagramm darüber gilt für den Fall, dass unter sonst gleichen Bedingungen das Cello zum Anderen mit dem Steg A versehen war. Der einzige Unterschied in den Messparametern war, dass bei der Messung am Steg N die Auflösung 0,625 Hz, bei derjenigen am Steg A dagegen nur 1,25 Hz war. Unter Beachtung dieser Tatsache lassen sich in der Gegenüberstellung die Ergebnisse für die beiden Stege direkt miteinander vergleichen.

5.3.1. Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

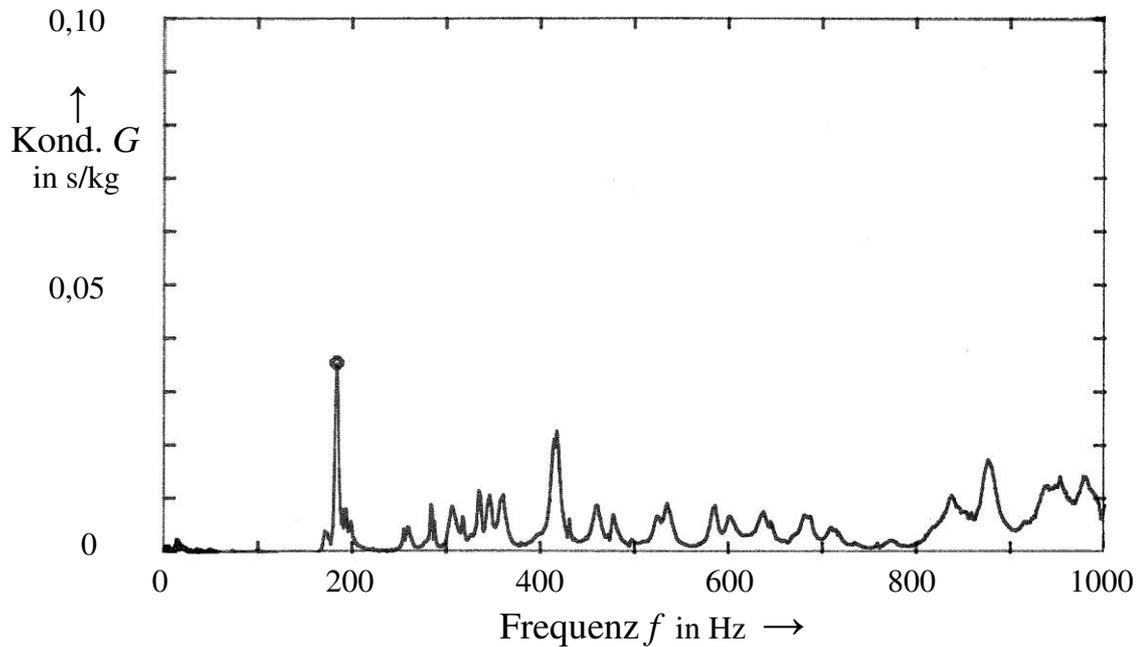


Abb. 5.7.a. Konduktanz G , gemessen in Normalenrichtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

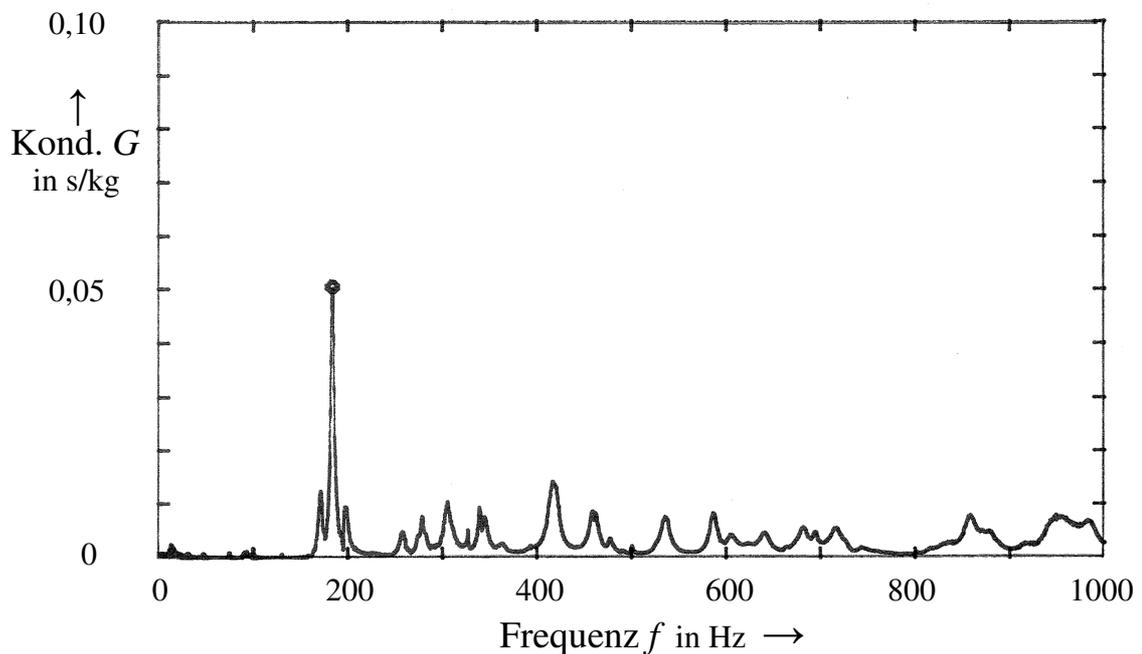


Abb. 5.7.b. Konduktanz G , gemessen in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Für beide Stege tritt das Hauptmaximum bei 183,75 Hz auf. Ist der Steg A (Abb. 5.7.a) eingesetzt, ist die maximale Konduktanz 0,035 s/kg . Sie ist damit etwas kleiner als im unteren Diagramm; beim Steg N (Abb. 5.7.b) ist sie 0,050 s/kg . Angesichts der unterschiedlichen Frequenzauflösung erscheint diese Diskrepanz nicht sehr aussagekräftig. Bei höheren Frequenzen sind dagegen etwas unterschiedliche Verläufe zu beobachten.

5.3.2. Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite

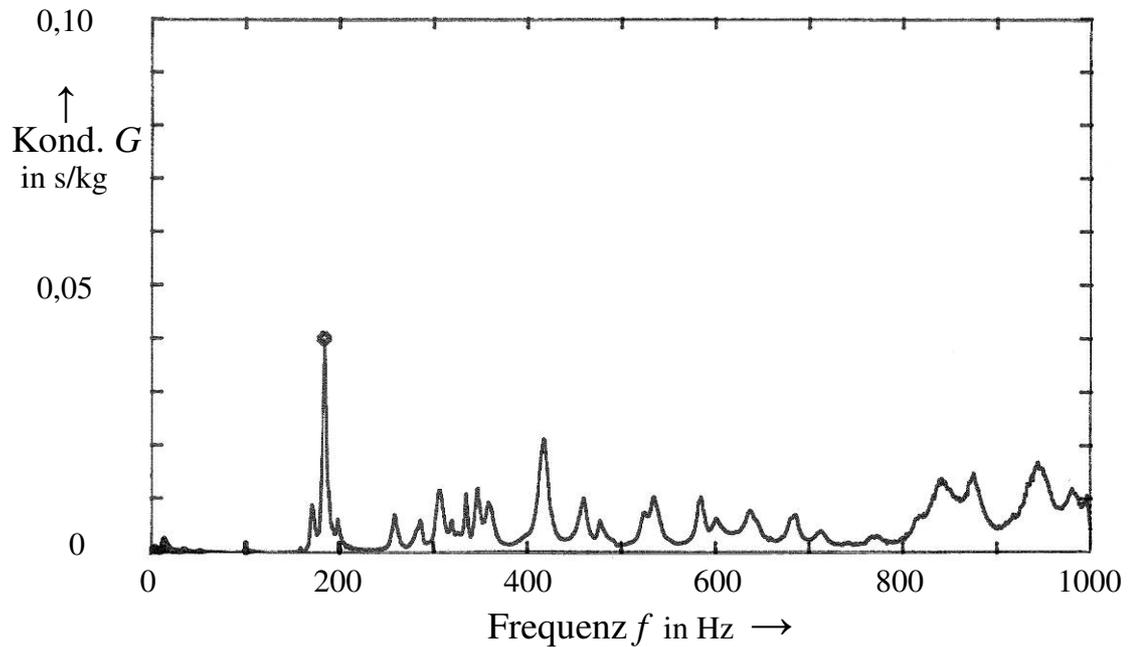


Abb. 5.8.a. Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

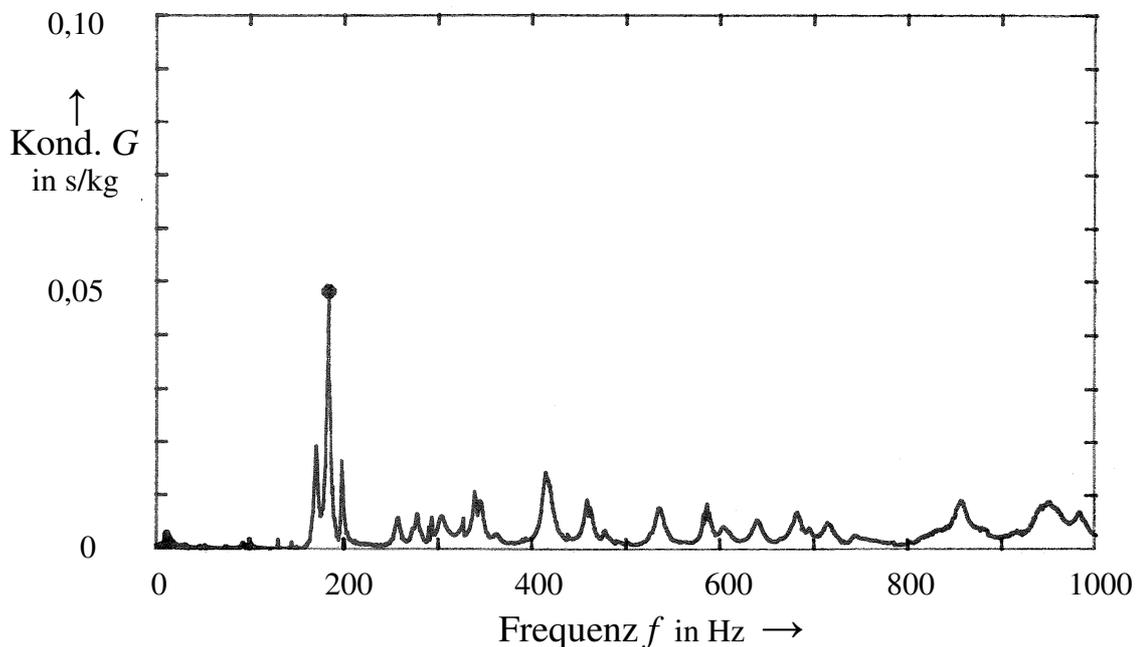


Abb. 5.8.b. Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Das Hauptmaximum liegt für beide Stege bei 183,75 Hz. Beim Steg A (Abb. 5.8.a) erreicht es den Wert 0,040 s/kg . Beim Steg N (Abb. 5.8.b) ist die maximale Konduktanz 0,048 s/kg . Sie hat damit einen geringfügig höheren Wert, was wiederum mit der feineren Frequenzauflösung begründet werden kann. Bei hohen Frequenzen ist die Konduktanz des Steges A im Mittel etwas größer als die des Steges N.

5.3.3. Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite

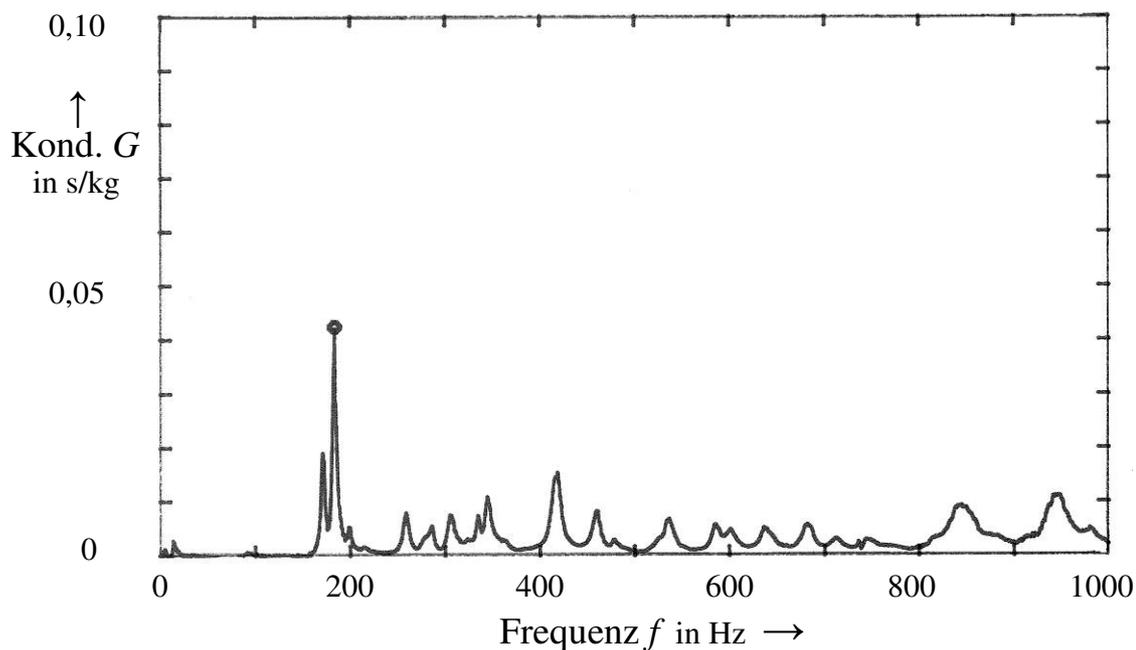


Abb. 5.9.a. Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

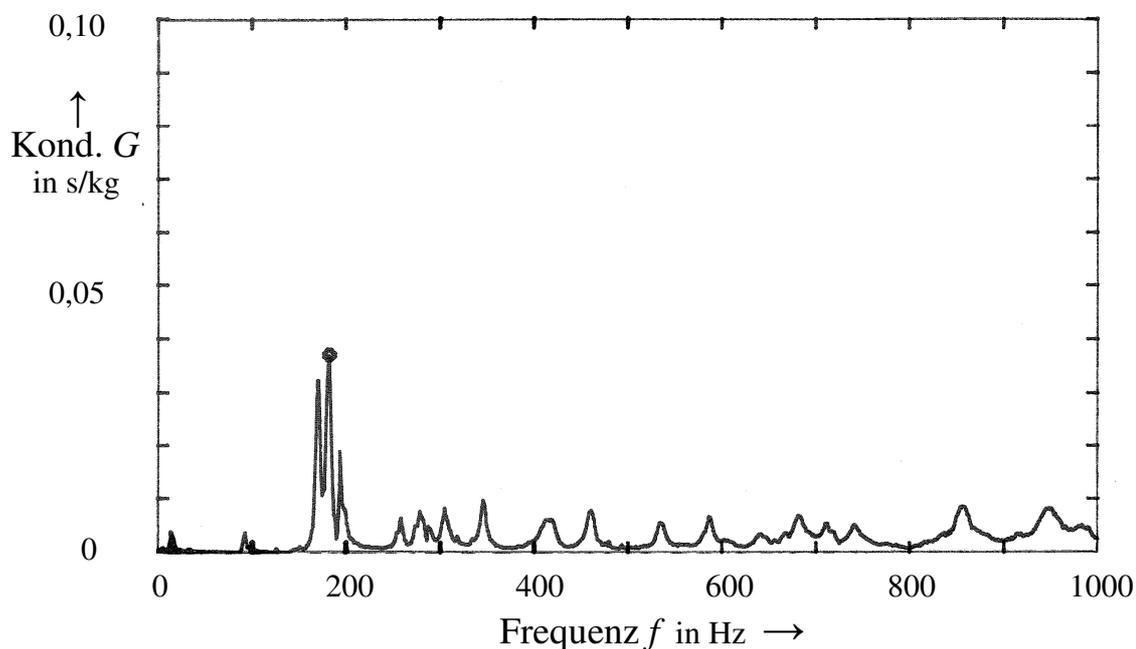


Abb. 5.9.b. Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Ist das Cello mit dem Steg A (Abb. 5.9.a) versehen, ergibt sich der Maximalwert 0,042 s/kg bei 183,75 Hz. Mit dem Steg N (Abb. 5.9.b) misst man dagegen 0,037 s/kg bei 182,5 Hz. Nicht zu erwarten war, dass sich mit der feineren Frequenzauflösung (unten) ein kleinerer Konduktanz-Wert ergibt als bei der gröberen Auflösung (oben). Die Abweichung ist jedoch gering und die Frequenzen stimmen im Wesentlichen überein. Im Bereich der ersten Maxima sind gewisse Diskrepanzen in der relativen Höhe der Spitzen zu erkennen.

5.3.4. Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

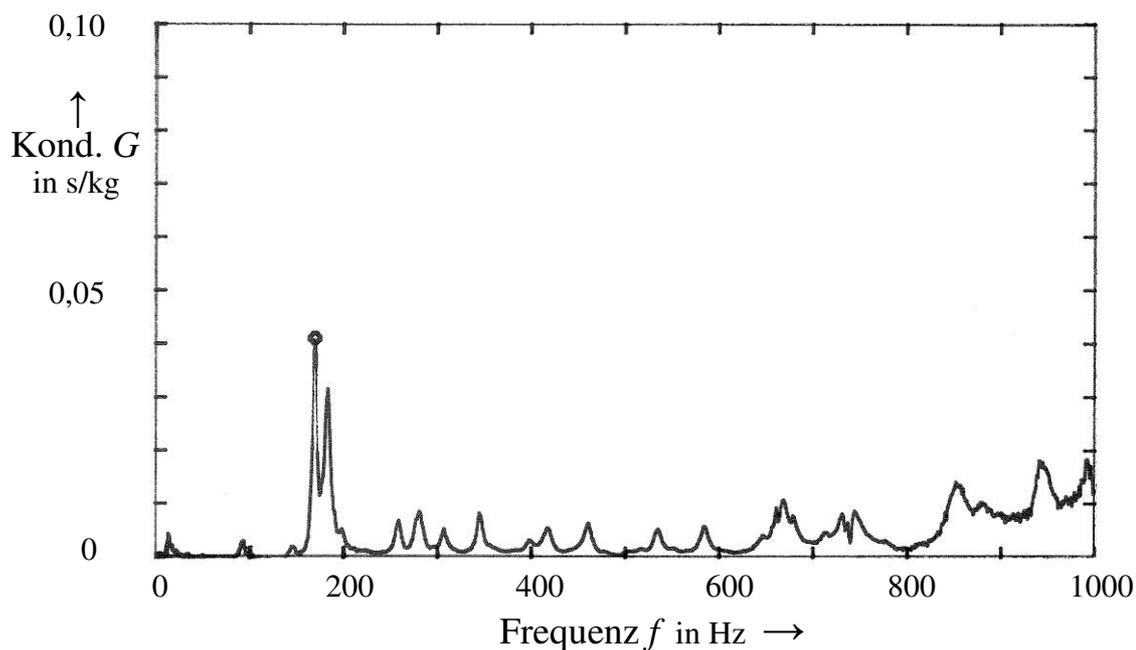


Abb. 5.10.a . Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

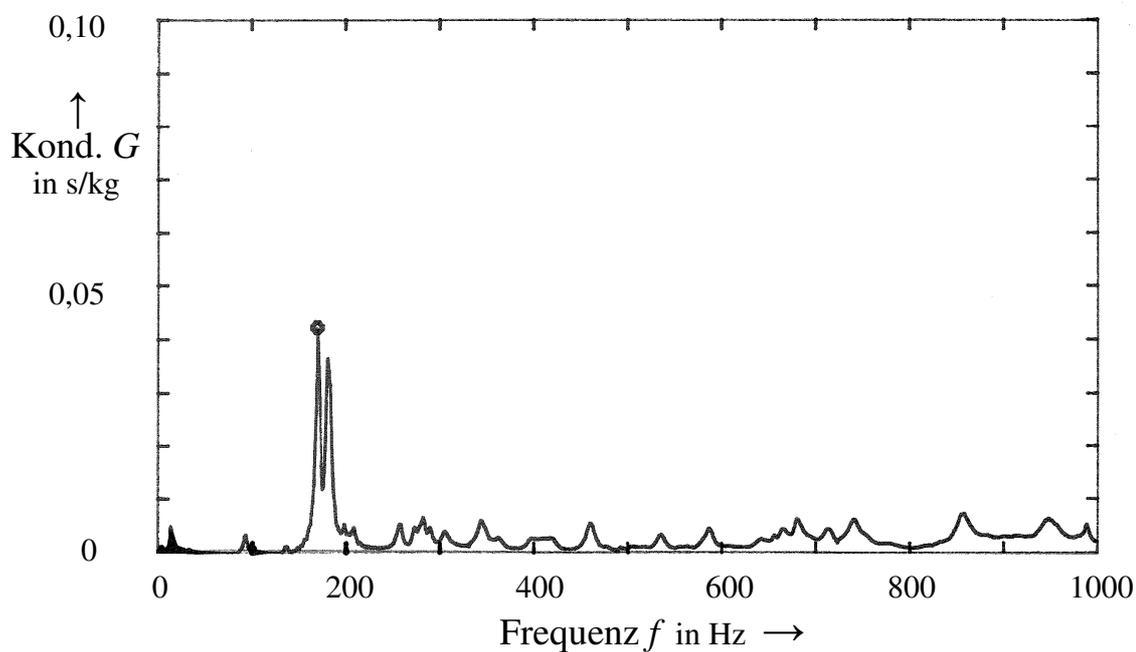


Abb. 5.10.b. Konduktanz G in Normalenrichtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Wenn im Cello der Steg A (Abb. 5.10.a) sitzt, ist die maximale Konduktanz 0,041 s/kg bei 170 Hz. Mit 0,042 s/kg bei 170 Hz bietet der Steg N (Abb. 5.10.b) nahezu identische Werte. Wie bei den anderen Messungen dieses Abschnitts zeigen sich breitbandige Unterschiede vor allem bei hohen Frequenzen ab etwa 600 Hz.

5.3.5. Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die Messergebnisse zum Hauptmaximum der Konduktanz, gemessen jeweils senkrecht zum Steg, sind in Tab. 5.II zusammen gestellt. Es sind keine markanten Abweichungen zu erkennen. Die kleinen Unterschiede lassen sich mit der unterschiedlichen Frequenzauflösung erklären.

Tab. 5.II. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen nach Methode II in Normalenrichtung an den Auflagepunkten der vier Saiten der Stege A und N

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Steg A (Aufl. 1,25 Hz)	Frequenz	183,75 Hz	183,75 Hz	183,75 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,035 s/kg	0,040 s/kg	0,042 s/kg	0,041 s/kg
Steg N (Aufl. 0,625 Hz)	Frequenz	183,75 Hz	183,75 Hz	182,5 Hz	170 Hz
	Konduktanz	0,050 s/kg	0,048 s/kg	0,037 s/kg	0,042 s/kg

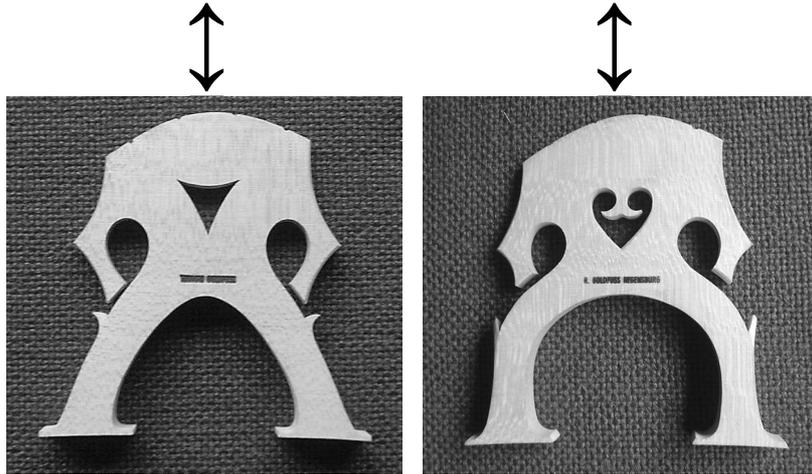
Erwähnenswerte Abweichungen in den Konduktanzen der beiden Stege zeigen sich erst bei höheren Frequenzen. Sie prägen sich am stärksten oberhalb von etwa 800 Hz aus. Ob sie sich reproduzieren lassen und somit Aussagekraft haben, muss sich erst anhand der weiteren Messungen zeigen, bei denen die Konduktanz in tangentialer Richtung bestimmt wurde.

5.4. Zusammenfassende Bemerkung

Im vorliegenden Kapitel wurde die Konduktanz senkrecht zum Steg bestimmt, wobei zunächst die Methodik geklärt werden sollte. Die bewährte Methode I lieferte keine wesentlich anderen Resultate als die neuere Methode II. Bei Messungen nach der Letzteren war auf den Messkopf eine längere Tastspitze aufgesetzt und deshalb die bewegte Masse etwas größer. Um mögliche Verfälschungen zu minimieren, wurde mit Massekompensation gearbeitet. Die Ergebnisse stimmten im Rahmen der unterschiedlichen Frequenzauflösung überein. Somit bestand kein Anlass, die Methode II, die einige Vorteile in Hinsicht auf Handhabbarkeit und Dokumentation bietet, nicht anzuwenden.

Nach der Methode II wurden Konduktanzen der Stege N und A ermittelt und einander gegenüber gestellt. Abb. 5.11 zeigt die beiden Stege. Die Pfeile kennzeichnen die Orientierung, mit der Kraft und Schnelle gemessen wurden. In Hinsicht auf die Höhe und die Lage des Hauptmaximums der Konduktanz waren keine signifikanten Abweichungen zu erkennen. Lediglich bei höheren Frequenzen waren die Messwerte des Steges A im Allgemeinen etwas größer als die des Steges N.

Für die Belastungs- und Messrichtung, die in Abb. 5.11 durch Pfeile angedeutet ist, sind die folgenden Aussagen möglich. In Hinsicht auf das Übertragungsverhalten lassen die Beobachtungen den Schluss zu, dass im betrachteten Frequenzbereich die beiden Stege sich nur unwesentlich unterscheiden. Dies gilt insbesondere für tiefe Frequenzen. Erwähnenswerte Unterschiede zeigen sich allenfalls bei höheren Frequenzen oberhalb von etwa 800 Hz. Entsprechende Messungen müssen nun noch in tangentialer Richtung durchgeführt werden.



*Abb. 5.11. Die beiden Stege; links: Typ N; rechts: Typ A.
Die Pfeile zeigen die Normalenrichtung, in der die Konduktanz gemessen wurde.*

Mit dem kurzen Gewindestift, der bei Messungen nach der Methode I verwendet wurde, hatte es sich als schwierig erwiesen, die mittleren Saiten in tangentialer Richtung anzuregen. Die vorgesezte Verlängerung mit der Spitze macht die Positionierung des Mess-Tasters wesentlich leichter und besser reproduzierbar. Insofern ist Methode II im Vorteil, insbesondere wenn tangential zu messen war. Dies war ein wesentlicher Grund, sie bei den Messungen des nächsten Kapitels alleinig anzuwenden.

6. KONDUKTANZEN DER STEGE A UND N, GEMESSEN IN TANGENTIALER RICHTUNG

Die Messungen des vorliegenden Kapitels wurden ausschließlich nach Methode II (verlängerte Tastspitze, Massekompensation, Pseudo-Rauschen; Multi-Purpose FFT Analyzer Ono Sokki CF-5210) durchgeführt. An den Stegen A und N wurde die Konduktanz parallel zur Decke des Cellos gemessen.

6.1. Messanordnung und Reproduzierbarkeit

Abb. 6.1 gibt den Schwingerreger und den Messkopf wieder und lässt erkennen, wie die Tastspitze an den Auflagepunkt der jeweiligen Saite angesetzt wurde. Der übrige Messaufbau ist derselbe wie im vorherigen Kapitel.



Abb. 6.1. Messung der Stegadmittanz in tangentialer Richtung am Auflagepunkt der G-Saite des Steges N.

Es wurde an den Auflagepunkten der vier Saiten gemessen. Das vorgesetzte Verlängerungsstück machte es leichter, an die beiden inneren Saiten zu gelangen. Das Foto zeigt die Anordnung für die Messung an den beiden tiefen Saiten. Wenn der Messkopf an die beiden hohen Saiten angesetzt werden sollte, wurde das Cello um 180 Grad gedreht.

In Tab. 6.I sind die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Messdurchgängen am Steg N verglichen. Die Messparameter waren unverändert; insbesondere betrug in beiden Fällen die Frequenzauflösung 0,625 Hz. Der erste Durchgang fand im Zusammenhang mit der Bestimmung der komplexen Admittanz (Real-, Imaginärteil und Betrag) statt; vgl. Kapitel 4. Ein zweiter Durchgang ein paar Tagen später führte zu den Diagrammen dieses Kapitels; hierbei wurde

lediglich die Konduktanz (Realteil) bestimmt. Der Vergleich soll einen Eindruck davon vermitteln, wie gut sich die Messwerte reproduzieren lassen.

Tab. 6.I. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen in tangentialer Richtung an den Auflagepunkten der vier Saiten des Steges N

Stelle Messung		Tiefe C-Saite	G-Saite	d-Saite	Hohe a-Saite
Durchgang 1	Frequenz	162,5 Hz	160,625 Hz	163,125 Hz	162,5 Hz
	Konduktanz	0,111 s/kg	0,103 s/kg	0,111 s/kg	0,115 s/kg
Durchgang 2	Frequenz	163,75 Hz	162,5 Hz	163,75 Hz	162,5 Hz
	Konduktanz	0,111 s/kg	0,106 s/kg	0,111 s/kg	0,115 s/kg

Wie bereits in den vorherigen Tabellen dient das Hauptmaximum als Kriterium. In Hinsicht auf die Zahlenwerte der Konduktanz stimmen die Ergebnisse der beiden Durchgänge hervorragend überein. Die Frequenzen, bei denen das Hauptmaximum auftrat, differieren jedoch teilweise etwas. Bei beiden Messungen betrug die Auflösung, d.h. der Abstand zwischen zwei benachbarten Frequenzwerten, 0,625 Hz. Tab. 6.I besagt, dass die Maxima um das Dreifache (G-Saite), Doppelte (C-Saite) bzw. Einfache (d-Saite) dieses Abstandes auseinander liegen. Bei der a-Saite stimmen die gemessenen Frequenzen sogar exakt überein. Mechanische Schwinger und ganz besonders Musikinstrumente neigen dazu, ihre Eigenschaften infolge von Umgebungseinflüssen (Temperatur, Feuchtigkeit) zu ändern. Zudem können sich auch kleine Unterschiede in den Randbedingungen auf das Schwingungsverhalten auswirken.

Angesichts der Variabilität, die bei der Messung mechanischer Schwingungen immer wieder zu beobachten ist, kann auch mit Blick auf die Frequenzen die Reproduzierbarkeit als brauchbar bezeichnet werden. Jedoch sollten Diskrepanzen in den Messkurven nicht dazu herangezogen werden, auf Unterschiede in der musikalischen Funktion des Instruments zu schließen, solange sie diese Größe nicht überschreiten.

6.2. Vergleich der Ergebnisse nach Methode II für die Stege N und A

In den folgenden Abbildungen sind Ergebnisse einander gegenübergestellt, die nach Methode II am Auflagepunkt der entsprechenden Saite ermittelt wurden. Das untere Diagramm gilt für den Fall, dass in das Cello der Steg N eingesetzt war. Das obere Diagramm bezieht sich darauf, dass unter sonst gleichen Bedingungen der Steg A eingebaut war. Ein Unterschied beim Messen bestand in der Frequenzauflösung. Aus Zeitgründen war bei der Messung am Steg A die Auflösung weniger fein und betrug 1,25 Hz anstelle von 0,625 Hz wie beim Steg N. Ansonsten können die Ergebnisse für die beiden Stege direkt miteinander verglichen werden.

6.2.1. Konduktanz am Auflagepunkt der tiefen C-Saite

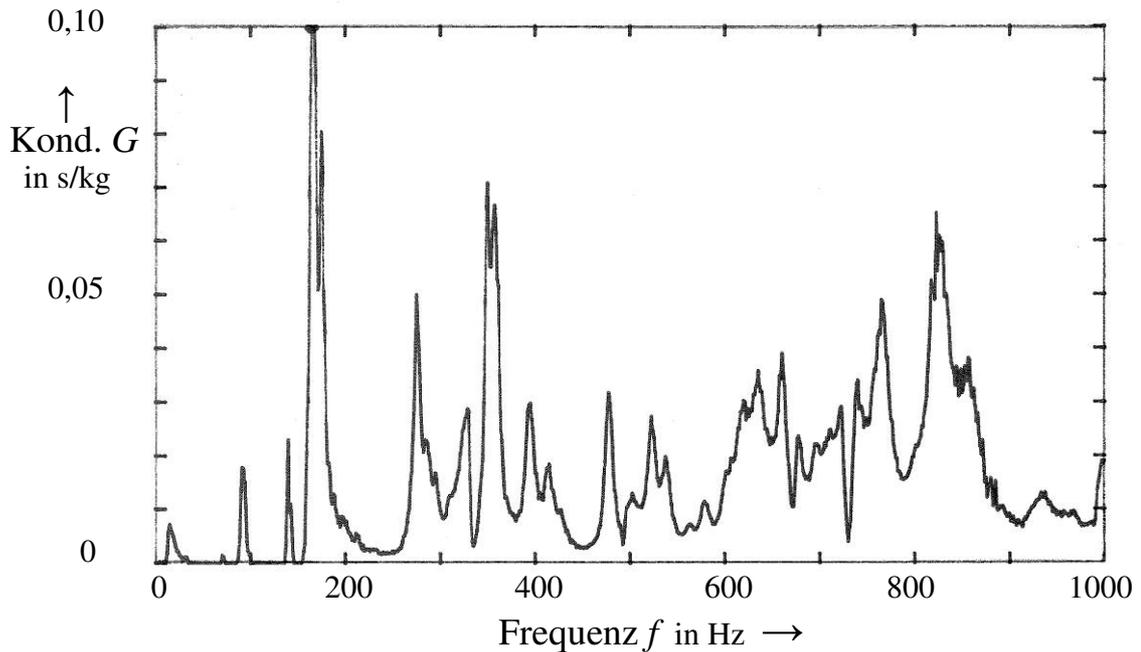


Abb. 6.2.a. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

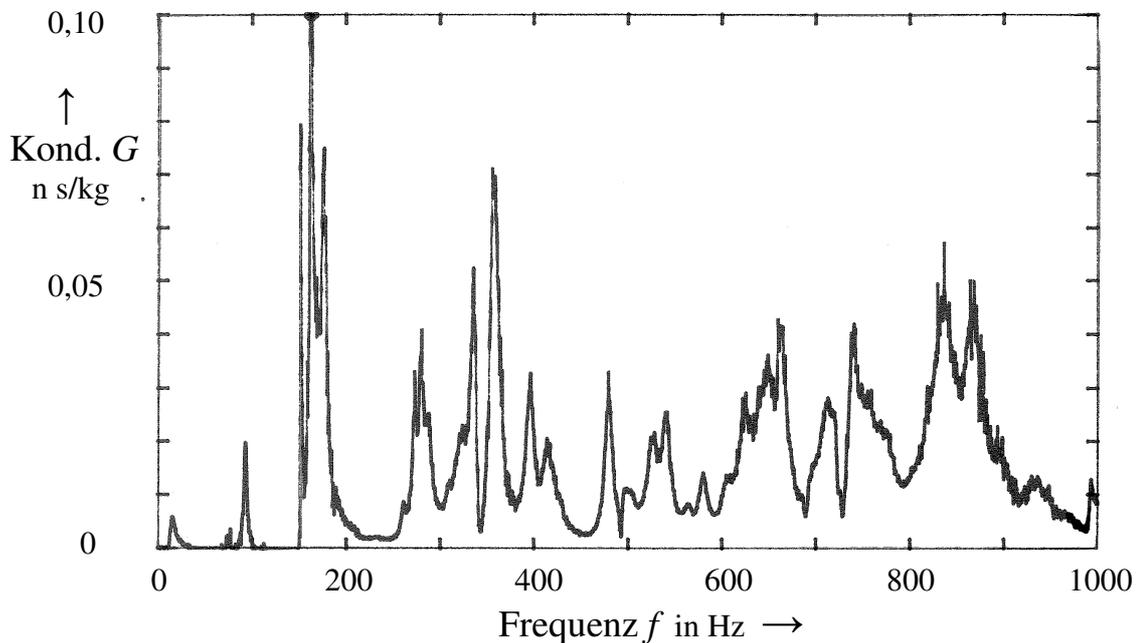


Abb. 6.2.b. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Bei Steg A (Abb. 6.2.a) tritt das Hauptmaximum bei 165 Hz auf. Die maximale Konduktanz ist 0,121 s/kg und damit etwas größer als im unteren Diagramm. Beim Steg N (Abb. 6.2.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. Allerdings sind im Detail, insbesondere bei höheren Frequenzen, gewisse Unterschiede zu vermerken.

6.2.2. Konduktanz am Auflagepunkt der G-Saite

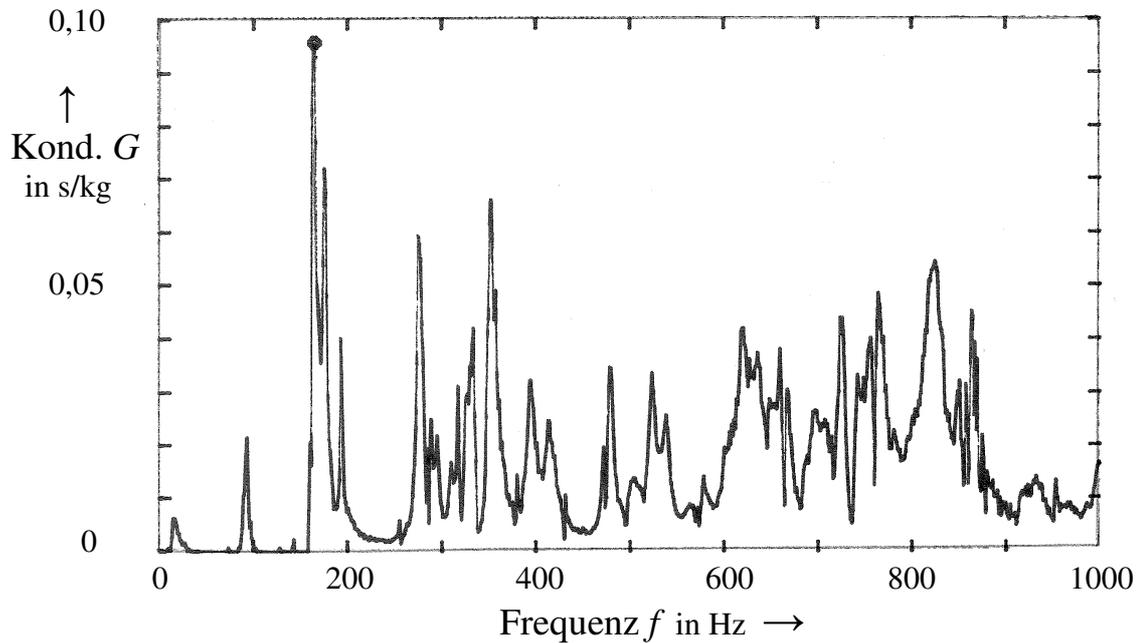


Abb. 6.3.a. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

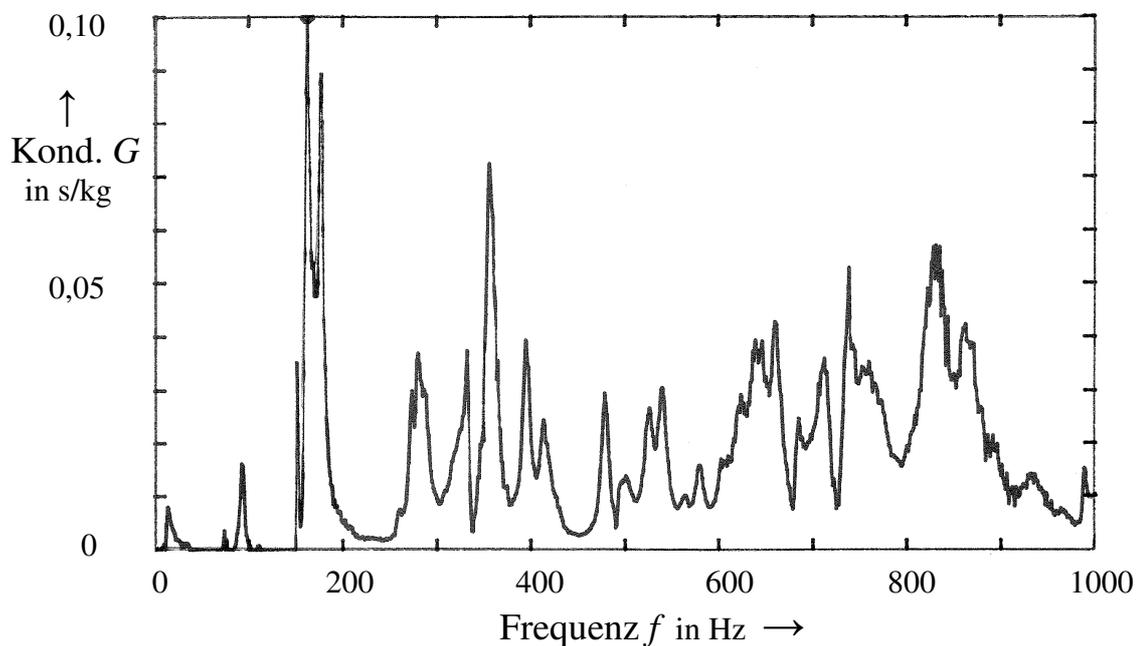


Abb. 6.3.b. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Ist das Cello mit dem Steg A (Abb. 6.3.a) versehen, ergibt sich der Maximalwert 0,096 s/kg bei 165 Hz. Mit dem Steg N (Abb. 6.3.b) misst man dagegen 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. Wie nicht anders zu erwarten war, ergibt sich mit der feineren Frequenzauflösung (unten) ein etwas größerer Wert für die Konduktanz als bei der gröberen Auflösung (oben).

6.2.3. Konduktanz am Auflagepunkt der d-Saite

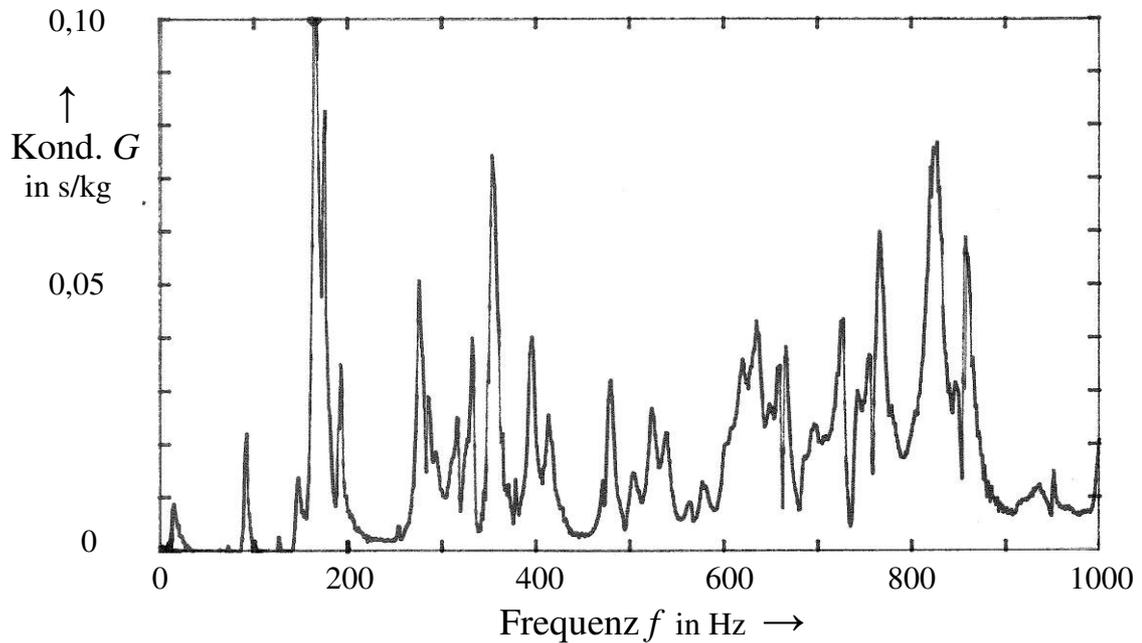


Abb. 6.4.a. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

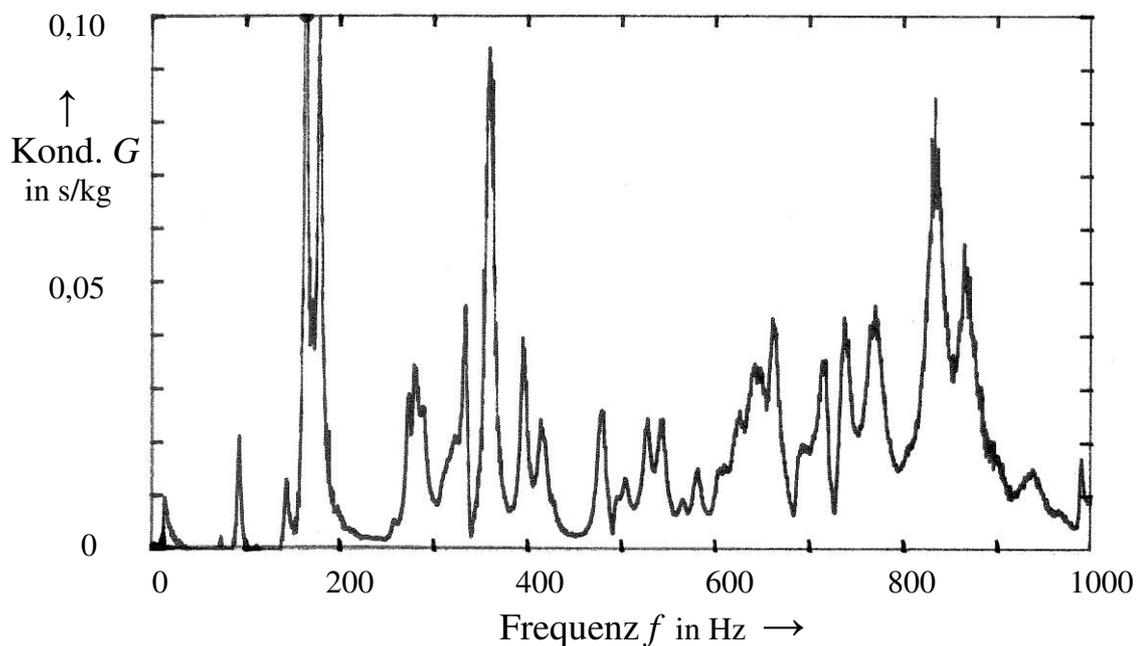


Abb. 6.4.b. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Wenn in das Cello der Steg A (Abb. 6.4.a) eingesetzt ist, ergibt sich bei 165 Hz der Maximalwert 0,129 s/kg . Am Steg N (Abb. 6.4.b) misst 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. Im Bereich der ersten Maxima sind Diskrepanzen in der Höhe der Spitzen zu erkennen. Dass sich mit der feineren Frequenzrastrerung (unten) eine kleinere Konduktanz ergibt als bei der gröberen Auflösung (oben), war hierbei nicht zu erwarten.

6.2.4. Konduktanz am Auflagepunkt der hohen a-Saite

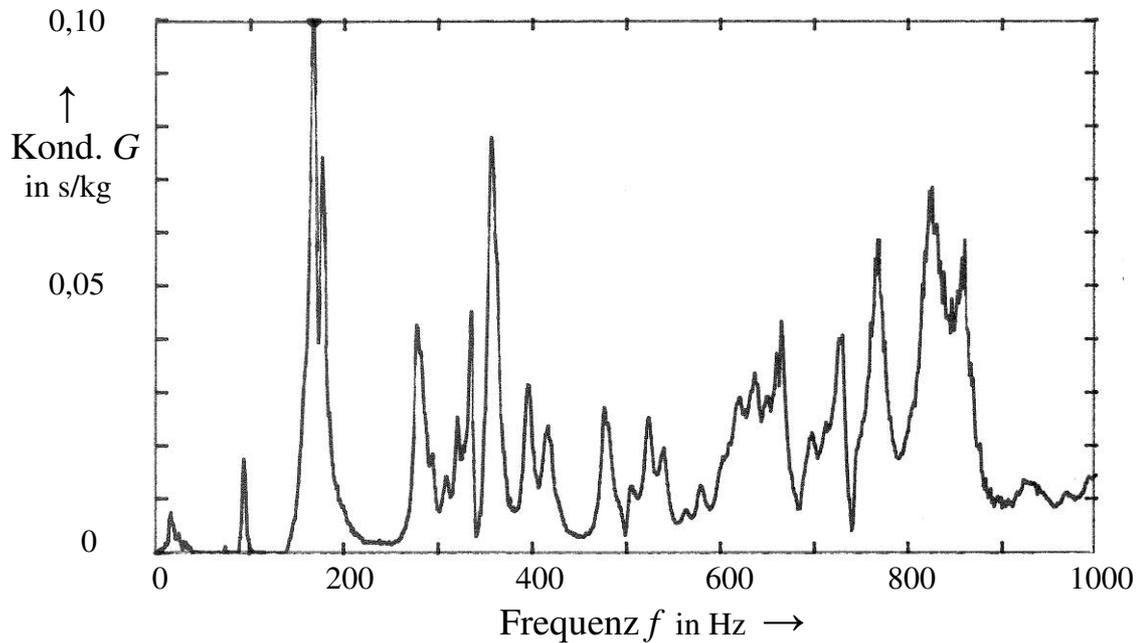


Abb. 6.5.a. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg A als Funktion der Frequenz f .

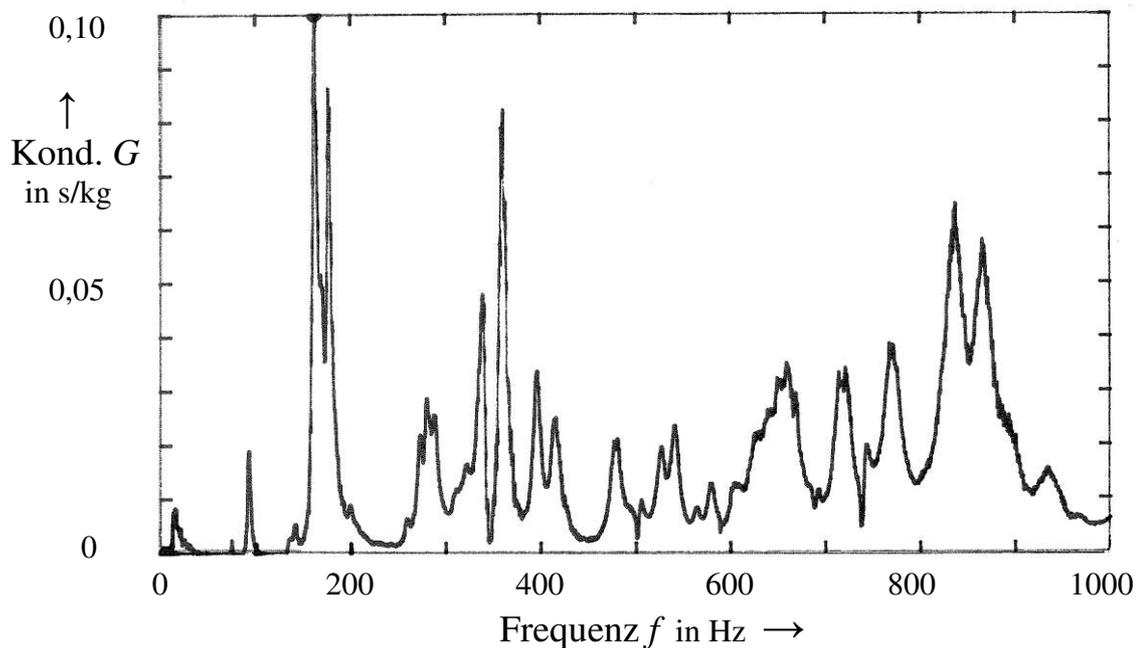


Abb. 6.5.b. Konduktanz G in tangentialer Richtung am Steg N als Funktion der Frequenz f .

Das Hauptmaximum liegt für den Steg A (Abb. 6.5.a) bei 167,5 Hz, für den Steg N (Abb. 6.5.b) bei 162,5 Hz. Mit 5 Hz ist die Diskrepanz zu groß, als dass sie mit der unterschiedlichen Frequenzauflösung erklärt werden könnte. Beim Steg A erreicht die Konduktanz den Wert 0,109 s/kg . Beim Steg N ist der Maximalwert 0,115 s/kg . Dieser geringe Unterschied lässt sich mit der Frequenzauflösung begründen. Bei hohen Frequenzen erscheint die Konduktanz des Steges A im Mittel geringfügig höher als die des Steges N.

6.2.5. Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die Ergebnisse in Bezug auf das Hauptmaximum der Konduktanz sind in Tab. 6.II zusammengefasst. In diesem Maximum spiegelt sich eine „charakteristische Betriebsschwingungsform“ wider. Stimmt die Frequenz der Anregung mit einer „charakteristischen Frequenz“ überein, findet Resonanz statt. Dass sich hierbei die Schwingungen in unterschiedlichem Maße ausbilden, zeigt sich beim Vergleich der Frequenzen, bei denen die Konduktanz maximal ist. Frühere Messungen (Fleischer 2009) besagen, 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 Frequenzen in Tab. 6.II liegen zwischen 162,5 Hz und 167,5 Hz und damit etwas tiefer als die obigen Werte. Wird die Richtung der Messung geändert, dann erreicht die Konduktanz bereits bei einer kleineren Frequenz ihren Höchstwert. Möglicherweise wird eine andere der zahlreichen eng benachbarten Schwingungsformen angeregt. Denkbar wäre auch, dass die Masse des Steges sich in stärkerem Maße auswirkt, wenn der Steg „kippt“, als wenn es sich translatorisch bewegt. Auf jeden Fall bleibt festzuhalten, dass im Bereich der Note e bzw. E3 der Steg – und höchstwahrscheinlich ebenso die Decke – besonders schwingfreudig auf tangentielle Anregung reagieren.

Tab. 6.II. Frequenz und Höchstwert des Hauptmaximums der Konduktanz, gemessen nach Methode II in tangentialer Richtung an den Auflagepunkten der vier Saiten der Stege A und N; in der Kopfzeile sind die Grundfrequenzen der Saitenschwingungen (Celloklänge) angegeben

Stelle Messung		Tiefe C-Saite ($f \geq 65$ Hz)	G-Saite ($f \geq 98$ Hz)	d-Saite ($f \geq 147$ Hz)	Hohe a-Saite ($f \geq 220$ Hz)
Steg A (Aufl. 1,25 Hz)	Frequenz	165 Hz	165 Hz	165 Hz	167,5 Hz
	Konduktanz	0,121 s/kg	0,096 s/kg	0,129 s/kg	0,109 s/kg
Steg N (Aufl. 0,625 Hz)	Frequenz	163,75 Hz	162,5 Hz	163,75 Hz	162,5 Hz
	Konduktanz	0,111 s/kg	0,106 s/kg	0,111 s/kg	0,115 s/kg

Bei der Reproduzierbarkeitsmessung (Tab. 6.I) hatte sich eine höchste Abweichung um den dreifachen Auflösungsabstand ($3 \cdot 0,625$ Hz = 1,875 Hz) gezeigt. Sehr kleine Abweichungen sollten deshalb als nicht signifikant eingestuft werden. Um beurteilen zu können, ob sich der physikalische Unterschied überhaupt im Spielbetrieb auswirken wird, sind in der Kopfzeile von Tab. 6.II die Grundfrequenzen der leer gespielten Saiten angegeben. Dabei zeigt sich beispielsweise, dass der Unterschied der Frequenz des Hauptmaximums der Konduktanz für den Spielbetrieb der a-Saite keine Bedeutung haben wird. Dieses Maximum liegt unterhalb des Bereiches $f \geq 220$ Hz von Grundfrequenzen, den die a-Saite „bedient“.

Gemessen an den Ergebnissen der Reproduzierbarkeitsmessung unterscheiden sich die Frequenzwerte von Tab. 6.II, die für die beiden Stege ermittelt wurden, etwas deutlicher. Der größte Unterschied zwischen den beiden Stegen manifestiert sich bei der a-Saite. Er beträgt 5 Hz, was etwa einem viertel Ganzton entspricht. Nach den obigen Überlegungen bleibt er jedoch folgenlos, da die zugehörige Frequenz unterhalb des Bereiches der a-Saite liegt. Diskrepanzen waren auch in Bezug auf die gemessenen Höchstwerte zu beobachten. Da bei der entsprechenden Messung die Frequenz feiner aufgelöst worden war, wären die größeren Konduktanzen eigentlich für den Steg N zu erwarten gewesen. Bei zwei Saiten (G und a) trifft dies auch tatsächlich zu. Bei den beiden anderen (C und d) ist das Gegenteil der Fall. Sämtli-

chen Höchstwerten von Tab. 6.II ist gemeinsam, dass sie über 0,1 s/kg und damit deutlich oberhalb der Zahlenwerte von Tab. 5. II liegen. Sie sind damit allesamt erheblich größer als bei der Messung in Normalenrichtung, bei der höchstens die Hälfte dieses Wertes erreicht worden ist.

In den Diagrammen der Abb. 6.2 bis 6.5 war unterhalb des Hauptmaximums bei beiden Stegen regelmäßig ein Nebenmaximum zu erkennen. Dieses bildete sich bei etwas weniger als 100 Hz aus. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, dass die leere G-Saite (Grundfrequenz 98 Hz) mitschwingt und Energie aufnimmt. Dies erscheint wenig wahrscheinlich, da sich die anderen Saiten bei den Frequenzen 65 Hz, 147 Hz bzw. 220 Hz in der Konduktanz nicht abbilden. Die Vermutung liegt näher, dass eine Korpuschwingung zwischen 92 Hz und 94 Hz angeregt wird; vgl. Fleischer (2009). Eggers (1959) ordnet sie einer „Hohlraumresonanz“ zu. Somit könnte möglicherweise – allerdings nur äußerst schmalbandig – Energie auch unterhalb der Hauptresonanz in den Korpus fließen und möglicherweise abgestrahlt werden.

In ihrem weiteren Verlauf weisen die Frequenzgänge der Konduktanz der Stege A und N zahlreiche Unterschiede im Detail auf, die sich nicht durch Ein-Zahl-Werte ausdrücken lassen. Ein Vergleich zeigt, dass die Frequenzen, für welche die Konduktanz groß wird, bei beiden Stegen weitgehend übereinstimmen. Jedoch unterscheiden sie sich in Hinsicht auf die Zahlenwerte, die maximal erreicht werden, teilweise deutlich. 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. Demzufolge kann gemutmaßt werden, dass die Klangfarbe der Cello-Klänge anders wird, wenn ein anderer Steg eingesetzt ist.

6.3. Zusammenfassende Bemerkung

In den Messungen des vorliegenden Kapitels wurde die Konduktanz parallel zur Decke des Cellos bestimmt. Abb. 6.6 verdeutlicht die Messrichtung und zeigt die beiden Stege A und N, die wechselweise eingebaut waren. Um einen Eindruck von der Reproduzierbarkeit zu bekommen, wurden zunächst Ergebnisse von zwei Messungen mit gleichen Versuchsparametern am selben Steg miteinander verglichen, die in einem Abstand von mehreren Tagen durchgeführt worden waren. Die Zahlenwerte der Konduktanz stimmten bei beiden Durchgängen sehr gut überein. Die Frequenzwerte differierten teilweise etwas. Im Mittel lagen die Maxima um das Ein- bis Zweifache des Abstandes benachbarter Frequenzwerte, der 0,625 Hz betrug, aus-

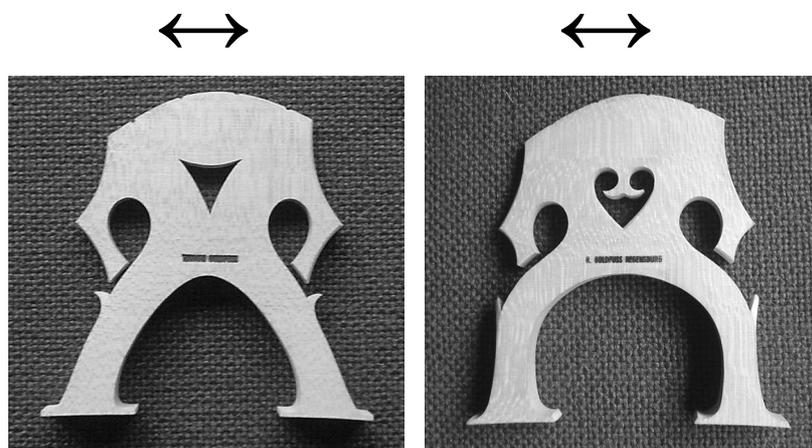


Abb. 6.6. Die beiden Stege; links: Typ N; rechts: Typ A.
Die Pfeile zeigen die tangentielle Richtung, in der die Konduktanz gemessen wurde.

einander. Damit kann auch mit Blick auf die Frequenzen die Reproduzierbarkeit als brauchbar bezeichnet werden. Abweichungen der genannten Größenordnung sollten als nicht signifikant eingestuft werden.

Die beiden Stege zeigen hinsichtlich des Hauptmaximums der Konduktanz beim Vergleich der Frequenzen gewisse Unterschiede. Gemessen am Steg A scheint der Steg N bei etwas tieferen Frequenzen „schwingfreudig“ und somit aufnahmefähig für Leistung zu sein. Dies könnte für die Abstrahlung des Schalles, den die beiden tiefen Saiten erzeugen, von Interesse sein.

Beim Vergleich der beiden Stege wurden größere Abweichungen der Konduktanz-Frequenzgänge oberhalb der Hauptmaxima beobachtet. Diese Unterschiede sind vielfältig, lassen sich jedoch nicht durch Ein-Zahl-Werte kennzeichnen. Die Frequenzen, bei denen die Konduktanz groß wird, sind für beide Stege weitgehend identisch. Die Zahlenwerte, die dabei erreicht werden, unterscheiden sich dagegen zum Teil deutlich. Dies hat Auswirkungen für den Spielbetrieb. Der Steg übt eine Filterwirkung aus, die je nach Ausführung unterschiedlich ist. Jedem Steg ist ein andersartiges Durchlassverhalten zu eigen. Da der Steg den Energiefluss von der gestrichenen Saite in den Instrumentenkörper prägt, beeinflusst er die spektrale Balance der Celloklänge. Demzufolge wird die relative Stärke 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.

7. VERGLEICHE MIT ERGEBNISSEN AUS DER LITERATUR

In den eigenen Untersuchungen sind zunächst die Ergebnisse von zwei leicht unterschiedlichen Messungen (Methode II bzw. I) miteinander verglichen worden. Die Übereinstimmung hat sich als brauchbar erwiesen. Um die eigenen Resultate weiter abzusichern und zu interpretieren, werden im Folgenden Angaben aus der Literatur betrachtet. Dies ist nur in eingeschränktem Maße möglich. Im Vergleich zur Geige hat das Cello als Objekt physikalischer Untersuchungen bisher wesentlich weniger Beachtung erfahren. Finden sich Experimente, dann wird zudem anstelle der Admittanz, wie sie hier verwendet wird, häufig deren Kehrwert, die Impedanz, angegeben.

7.1. Impedanz am Steg des Cellos

Bereits eingangs war darauf hingewiesen worden, dass zum Schwingungsverhalten des Cellos noch nicht sehr viel veröffentlicht worden ist. Von der Theorie her kommend hat sich Zimmermann (1967) mit dem Steg von Streichinstrumenten befasst. Einige experimentelle Untersuchungen sind in den Monographien von Cremer (1981) sowie von Fletcher und Rossing (1998) zusammen gestellt.

Eine frühe Originalarbeit zum Cello stammt von Eggers (1959). Eggers hat Schwingungen von Decke und Boden des Cellos mit einer kapazitiven Sonde untersucht. Darüber hinaus hat er die mechanische Impedanz an mehreren Stellen des Cellos gemessen. Eines seiner Ergebnisse ist in Abb. 7.1 wiedergegeben.

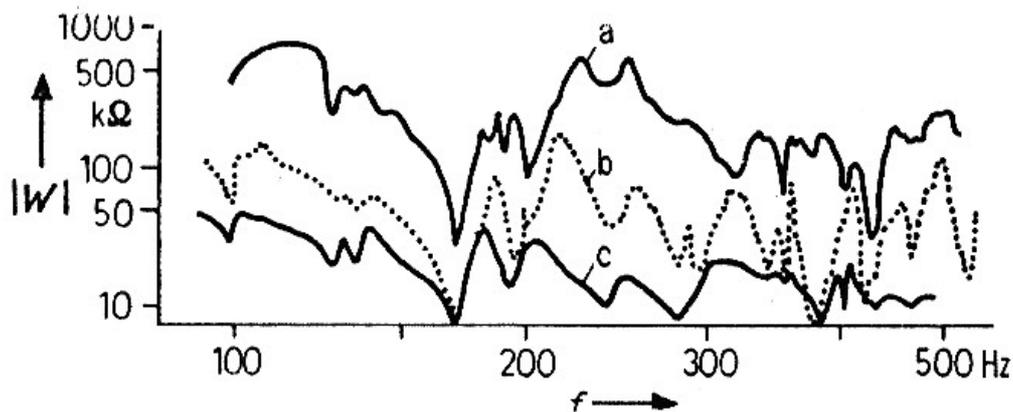


Abb. 7.1. Betrag der mechanischen Impedanz am Steg nach Eggers (1959)
 a) bei Anregung in Normalenrichtung in der Mitte,
 b) bei tangentialer Anregung in der Mitte und
 c) bei tangentialer Anregung der G-Saite in 1 cm Abstand vom Steg.

Die Messkurven a und b beziehen sich auf die Normalenrichtung bzw. auf tangentiale Anregung. Nach Eggers (1959) ist die Anregung am Steg normal zur Deckenfläche am „schwersten“ (Gleichtakterregung der beiden StegfüÙe). Bei Anregung in Normalenrichtung ist die Impedanz im Mittel etwa zwei- bis fünfmal größer als bei Anregung in tangentialer Richtung.

Dies stimmt mit eigenen Beobachtungen im Wesentlichen überein, dass die Admittanz in Normalenrichtung deutlich kleiner ist, als wenn tangential angeregt und gemessen wird (vgl. beispielsweise Abschnitt 3.3). Auch zeigen die Messkurven, dass die Hauptresonanzen sich an jedem Messpunkt abbilden. In Abb. 7.1 entspricht 1Ω der Impedanz $0,001 \text{ kg/s}$ bzw. der Admittanz 1000 s/kg . Für das Hauptminimum der Impedanz bei etwa 170 Hz kann aus Abb. 7.1 abgelesen werden, dass die Admittanz die Werte $0,02 \text{ s/kg}$ bei normaler und $0,1 \text{ s/kg}$ bei tangentialer Anregung annimmt.

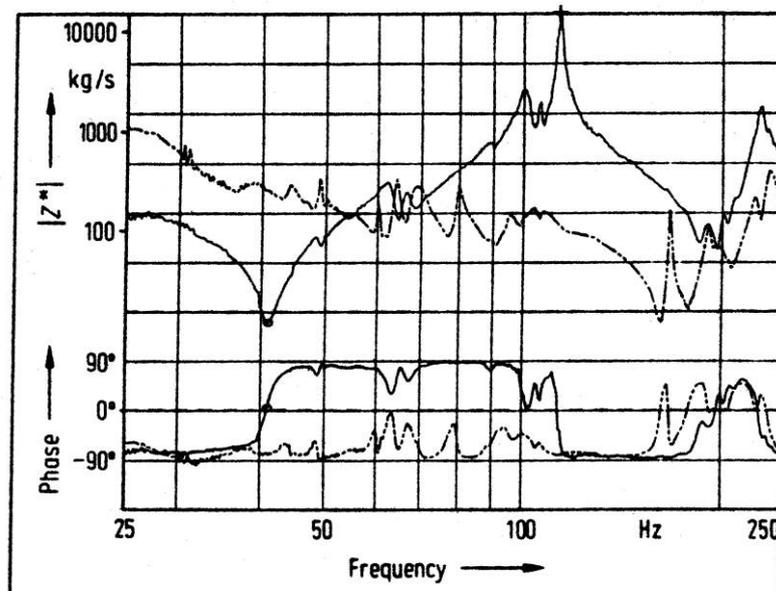


Abb. 7.2. Betrag und Phase der komplexen Impedanz bei tangentialer Anregung an den Auflagepunkten der hohen a-Saite am Steg (unterbrochen) bzw. am Sattel (durchgezogen) nach Eggers (1991).

Eine spätere einschlägige Originalarbeit von Eggers datiert aus dem Jahr 1991. In Abb. 7.2 ist die Impedanz am Steg eines Cellos angegeben. Wie in vielen Diagrammen dieser Art sind die Achsen logarithmisch unterteilt. Eggers (1991) betont, dass es wichtig sei, den Realteil und den Imaginärteil der Impedanz (bzw. ihres Kehrwerts, der Admittanz) zu messen. Er sieht dies im Zusammenhang mit Anti-Wolfston-Vorrichtungen, Dämpfern usw. Durch weiche Lagerung des Instruments an drei Stellen hat er versucht, die natürlichen Randbedingungen beim Spielen nachzubilden. Shaker und Messkopf waren die gleichen wie bei den eigenen Untersuchungen. Für die Kompensation der Masse (ca. $2,5 \text{ g}$) verwendete Eggers (1991) eine selbstgebaute Schaltung mit drei Operationsverstärkern. Die Analyse erfolgte mit einem Netzwerkanalysator. Das Messsignal war ein Sweep-Sinus.

Knapp unterhalb von 200 Hz zeigt die Stegimpedanz (unterbrochene Kurve in Abb. 7.2) zwei Minima mit etwas mehr als 10 kg/s . Dies entspricht einer Admittanz von etwas weniger als $0,1 \text{ s/kg}$. Diese Größenordnung stimmt mit eigenen Ergebnissen, z.B. in Kapitel 6, überein. Wie sich das Instrument am anderen Auflagepunkt der Saite verhält, wurde in den eigenen Experimenten nicht untersucht. Die Ergebnisse von Egger deuten darauf hin, dass die Impedanz am Sattel (durchgezogene Kurve in Abb. 7.2) die gleiche Größe haben kann wie am Steg. Diese Erkenntnis bestätigt eigene Beobachtungen, die z.B. an der akustischen Gitarre gemacht wurden (Fleischer 1997). Den Steg als einzigen Weg für den Fluss von Schwingungsenergie von der Saite zum Korpus zu betrachten, greift in manchen Fällen zu kurz. Die vereinfachende Vorstellung, dass die Saite zwar am Steg ein bewegliches Auflager vorfinden kann, am kopfseitigen Ende jedoch stets festgehalten ist, trifft somit nicht in allen Fällen zu.

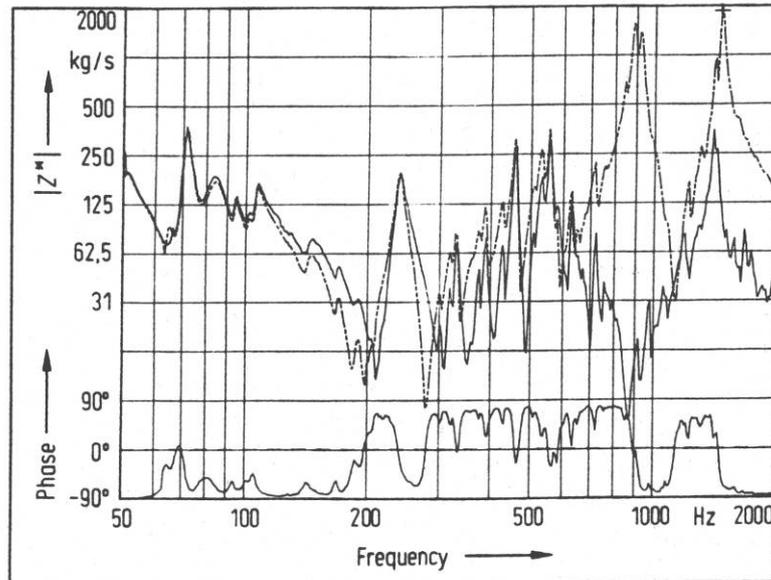


Abb. 7.3. Komplexe Stegimpedanz (Betrag und Phase) am Auflagepunkt der tiefen C-Saite bei transversaler Anregung ohne (durchgezogen) bzw. mit (unterbrochen) Dämpfer nach Eggers (1991).

Ein weiteres Messergebnis von Eggers (1991) findet sich in Abb. 7.3. Beide Achsen sind logarithmisch unterteilt. Um den Einfluss eines „Dämpfers“ (*sordino*) der Masse 12 g zu demonstrieren, hat Eggers zwei Messungen im Frequenzbereich bis 2 kHz zusammengestellt. Der „Dämpfer“ verschiebt die Resonanz von etwa 200 Hz zu einer tieferen Frequenz hin. Jedoch behält die Impedanz ihr Minimum von etwas mehr als 10 kg/s, was einem Maximum der Admittanz von etwas weniger als 0,1 s/kg entspricht, bei. Der „Dämpfer“ verschiebt lediglich dieses Minimum auf der Frequenzachse und wirkt ausschließlich als Zusatzmasse. Eine Vergrößerung der Dämpfungswirkung, die sich als Zunahme der Impedanz bzw. als Abnahme der Admittanz äußern würde, ist dagegen nicht zu beobachten. Dramatische Veränderungen infolge der Zusatzmasse zeigen sich dagegen zwischen 600 Hz und 2 kHz.

Bei anderen Untersuchungen von Eggers (1987) lag das Cello seitlich auf der Zarge. Die Impedanzwerte schwanken zwischen etwa 30 kg/s und 2000 kg/s. Dies entspricht Admittanzen zwischen 0,0005 s/kg und 0,033 s/kg. Auch der Vergleich mit diesen Zahlenwerten lässt die eigenen Ergebnisse plausibel erscheinen.

7.2. Admittanz am Steg des Cellos

Angaben zur Admittanz am Steg des Cellos finden sich in zwei Artikeln von Eggers (1987 und 1991). Der früheren dieser Arbeiten (Eggers 1987) ist Abb. 7.4 entnommen. Sie zeigt Realteil (unten) und Imaginärteil (oben) der Stegadmittanz. Die Ordinate scheint logarithmisch, die Abszisse linear geteilt zu sein. Die durchgezogene Kurve steht für den Betrieb des Cellos ohne, die unterbrochen Kurve für den Betrieb mit „Dämpfer“ („*con sordino*“). Ohne „Dämpfer“ tritt das Hauptmaximum der Konduktanz bei 177,5 Hz auf und hat den Wert 0,05 s/kg. Mit „Dämpfer“ ist es zu etwas tieferen Frequenzen hin verschoben. Dies entspricht den Beobachtungen von Abb. 7.3. Das Ergebnis von Eggers (1987) zeigt etwa halb so große Zahlenwerte wie die eigenen Resultate. Bezüglich der Frequenz, bei der das Hauptmaximum auftritt, herrscht weitgehende Übereinstimmung.

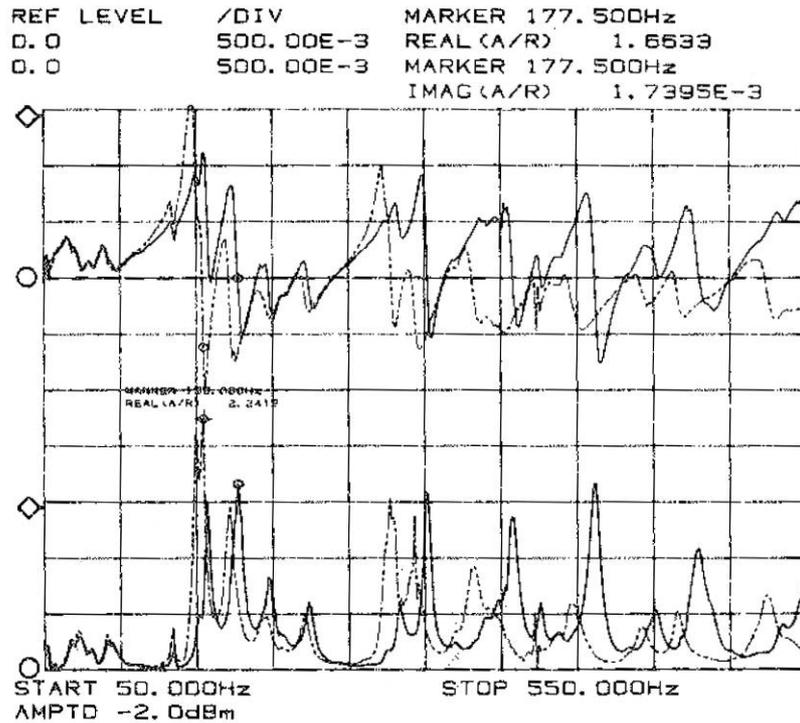


Abb. 7.4. Komplexe Stegadmittanz (Realteil unten und Imaginärteil oben) am Auflagepunkt der hohen *a*-Saite bei transversaler Anregung ohne (durchgezogen) bzw. mit (unterbrochen) Dämpfer nach Eggers (1987).

Etwas andere Zahlenwerte finden sich in der jüngeren Arbeit. Abb. 7.5 dient nach Eggers (1991 S. 267) als Beispiel für eine „wolf resonance“. Dargestellt ist der Frequenzbereich zwischen 130 Hz und 330 Hz; die Skalen sind linear unterteilt. Als Maximalwert für die Konduktanz ist 0,0079 s/kg angegeben. Die Beobachtung, dass unterhalb von 200 Hz zwei (und manchmal auch mehr) Maxima dicht benachbart sind, stimmt mit den eigenen Ergebnissen, beispielsweise in Abb. 3.3, Abb. 4.5, Abb. 4.10 und insbesondere Abb. 6.2, überein. Jedoch haben die eigenen Messungen für tangentialer Anregung immer deutlich größere Zahlenwerte

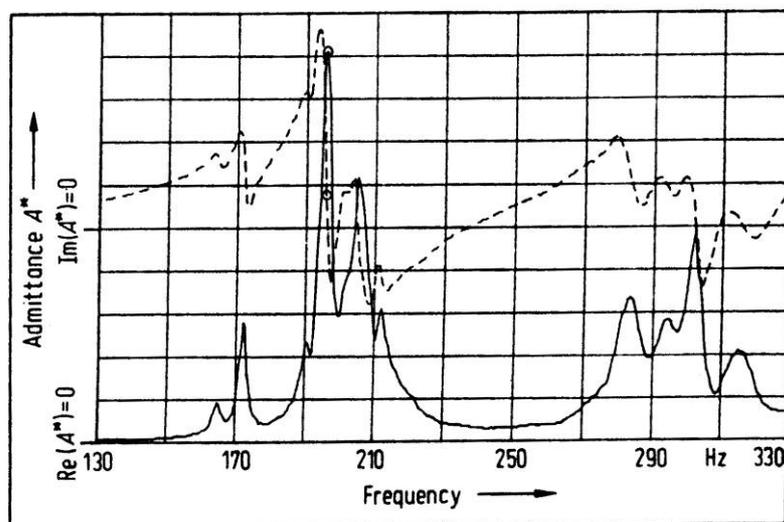


Abb. 7.5. Realteil (Konduktanz; durchgezogen) und Imaginärteil (Suszeptanz; unterbrochen) der Stegadmittanz am Auflagepunkt der tiefen *C*-Saite bei transversaler Anregung nach Eggers (1991).

ergeben. Die von Eggers (1991) genannten Werte sind etwa um den Faktor 10 kleiner als die eigenen Resultate.

Die Vergleiche dieses und des vorhergehenden Abschnitts haben ergeben, dass die Zahlenwerte von Eggers (1987 und 1991) in aller Regel kleiner sind als die eigenen. Die Diskrepanzen treten vor allem bei äußerst schmalbandigen Resonanzen zutage. Da die eigenen Untersuchungen gezeigt haben, dass insbesondere die Maximalwerte von der Messmethode, der Auflösung und vom Anregungssignal abhängen können, sollte diesen Abweichungen kein allzu großes Gewicht beigemessen werden. Hinsichtlich der Frequenzen stimmen die Messwerte gut miteinander überein.

Festzuhalten bleibt, dass Eggers (1959, 1987 und 1991) schon sehr früh die Bedeutung von Impedanz- bzw. Admittanzmessungen erkannt hat. Einige seiner Erkenntnisse (Eggers 1987, S. 698) sind beispielsweise, dass Admittanz-Kurven vom Ort und der Richtung der Anregung abhängen. Darüber hinaus spielt die Halterung des Korpus eine Rolle. Auch stellt er fest, dass das Herunterstimmen von Saiten (hier um eine große Terz) nur geringe Änderungen im Impedanzbetrag zur Folge hat. Demnach haben die Saiten, obwohl selbst schwingungsfähige Systeme mit äußerst geringer Dämpfung, keinen allzu großen Einfluss auf die Stegimpedanz oder –admittanz. Bei den eigenen Untersuchungen wurden die Saiten deshalb stets in gestimmtem Zustand auf dem Instrument belassen, das dadurch unter der gleichen mechanischen Spannung wie beim Spielen stand. In einer ganzen Reihe von Punkten lässt sich somit Übereinstimmung der eigenen Beobachtungen und Schlussfolgerungen mit denen von Eggers (1959, 1987 und 1991) feststellen.

7.3. Impedanz am Steg der Geige

Ungleich häufiger als das Cello ist die Violine Gegenstand naturwissenschaftlicher Studien. Wiederum seien die Bücher von Cremer (1981), von Fletcher und Rossing (1998) sowie die Dissertation von Pfaffelhuber (1993) genannt. Bei Fleischer (2009) war gezeigt worden, dass die Geige hinsichtlich ihrer Korpuschwingungen eng mit dem Cello verwandt ist. Vergleichbare Schwingungen des Cellos wurden beim 0,32- bis 0,48-Fachen der Frequenz beobachtet, die bei der Geige gemessen wurde. Umgekehrt bedeutet dies, dass markante Anhebungen der Admittanz der Geige bei einer 2,1- bis 3,1-mal so großen Frequenz zu erwarten sind wie beim Cello.

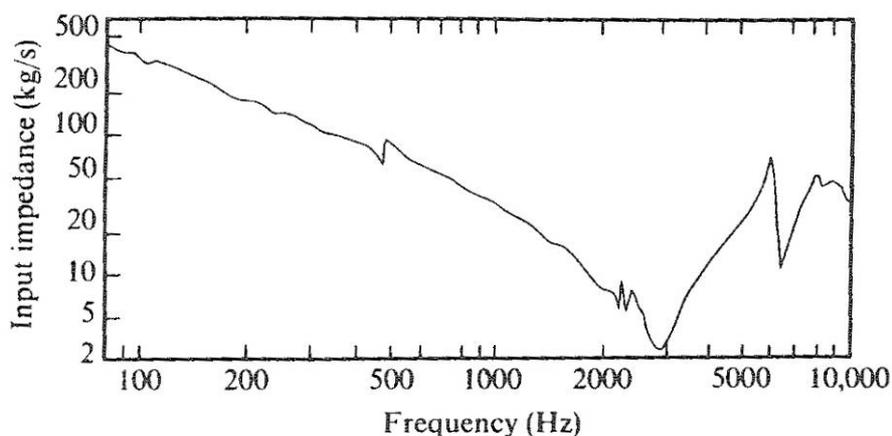


Abb. 7.6. Punkt-Impedanz eines Violin-Steges
nach Reinecke (1973), entnommen aus Fletcher und Rossing (1998).

Eine Originalarbeit, auf die sich Fletcher und Rossing (1998) beziehen, stammt von Reinecke (1973). Dort ist die Impedanz am Steg einer Geige angegeben. In Abb. 7.6 sind beide Achsen logarithmisch geteilt. Zwischen 200 Hz und 3 kHz nimmt die Impedanz ohne allzu große Schwankungen von etwa 200 kg/s bis auf etwa 2,5 kg/s ab. Dies entspricht einem weitgehend stetigen Anstieg der Stegadmittanz von etwa 0,005 s/kg auf 0,4 s/kg. Ein lokales Minimum zeigt sich bei etwa 500 Hz. Dies dürfte mit dem Maximum der Admittanz korrespondieren, das für das Cello bei 165 Hz oder etwas höher zu beobachten war. Die minimale Impedanz von etwa 50 kg/s, die bei dieser Frequenz gemessen wurde, entspricht einer maximalen Admittanz von 0,02 s/kg. Zahlenwerte dieser Größenordnung hatten sich bei Anregung des Cello-Steges in Normalenrichtung ergeben. Ein stetiger Anstieg der Admittanz, wie er der Abnahme der Impedanz in Abb. 7.6 entsprechen würde, war beim Cello allerdings nicht zu beobachten.

7.4. Admittanz am Steg der Geige

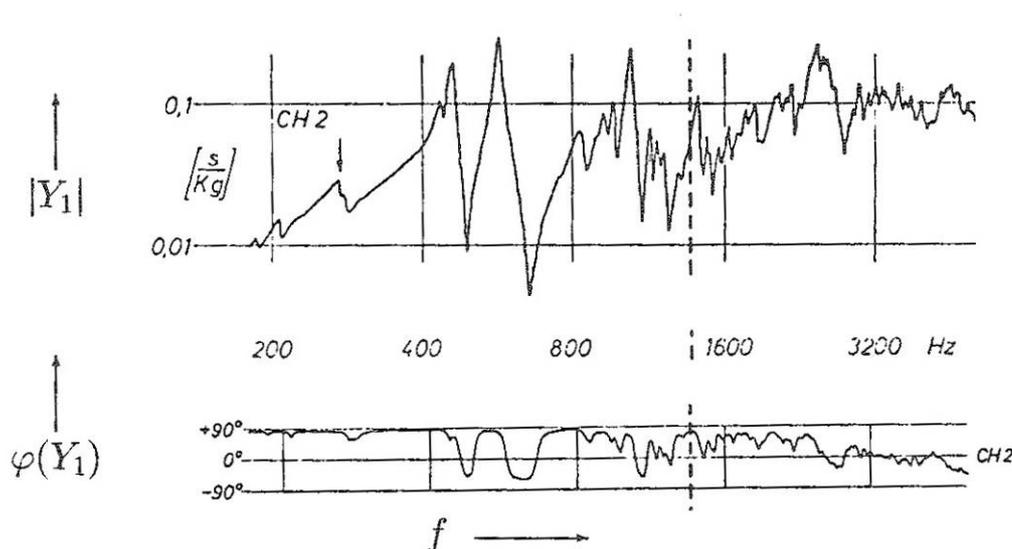


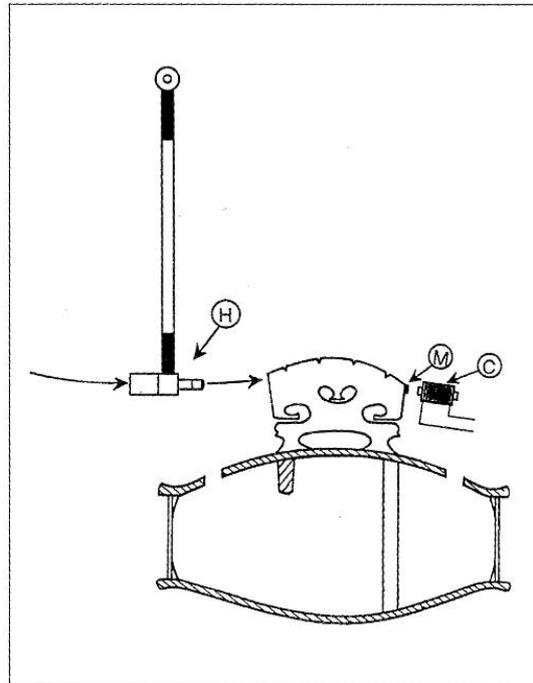
Abb. 7.7. Betrag und Phase der komplexen Stegadmittanz, gemessen bei tangentialer Anregung nach Beldie (1975), entnommen aus Pfaffelhuber (1993).

Direkte Angaben zur Admittanz am Geigensteg finden sich beispielsweise bei Pfaffelhuber (1993), der die Admittanz modelliert und sich dabei auf Experimente von Beldie (1975) bezogen hat. Gemäß Abb. 7.7 unterteilt sich die Frequenzachse (logarithmisch geteilt) in mehrere Bereiche. Im unteren Bereich äußert sich zunächst bei etwa 300 Hz die Helmholtz-Resonanz des Geigen-Korpus. Im selben Bereich sind um 500 Hz zwei deutliche Minima zu beobachten. Das tiefere wird einer Eigenschwingung der Decke, das etwas höhere einer Mode des gesamten Korpus zugeordnet. Getrennt durch ein ausgeprägtes Minimum schließt sich ein weiterer Bereich an. Dieser ist durch ein starkes und mehrere kleinere Maxima gekennzeichnet, in denen sich auch Hohlraumresonanzen widerspiegeln. Der anschließende Bereich zeigt eine Folge von zahlreichen Spitzen, die immer dichter aufeinander folgen und in denen verschiedenartige Schwingungen ihren Ausdruck finden. Es ist zu vermuten, dass ab etwa 2 kHz der Steg ein „Eigenleben“ entfaltet und die Admittanz beeinflusst.

Für das Cello könnte dies bedeuten, dass sich Unterschiede zwischen den Stegen in der Admittanz bestenfalls oberhalb von etwa 700 Hz abbilden würden. Möglicherweise ist die obere Frequenzgrenze, die bei den eigenen Messungen 1 kHz betrug, zu niedrig gewählt, um Unter-

schiede zwischen den Stegen A und N sichtbar werden zu lassen. Die Maxima bei 500 Hz dürften denen entsprechen, die beim Cello zwischen 165 Hz und etwa 185 Hz zu beobachten waren. In Abb. 7.7 überschreitet die maximale Admittanz 0,1 s/kg. Zahlenwerte dieser Größenordnung hatten sich bei Anregung des Cello-Steges in tangentialer Richtung ergeben.

Abb. 7.8. Messvorrichtung zur Ermittlung der Transfer-Admittanz am Steg der Geige nach Jansson (1997).



Jüngere Angaben zur Admittanz am Geigensteg finden sich beispielsweise bei Jansson (1997): Abb. 7.8 gibt seine Versuchsanordnung, mit der er die Admittanz bestimmt hat, wieder. Der Hammer (links in Abb. 7.8) bringt eine Kraft auf, die an einer Seite des Steges gemessen wird. Am anderen Ende wird berührungsfrei die Schwinggeschwindigkeit bestimmt. Die anregende Kraft (links, aufgebracht durch den pendelnden Hammer) und die Schwinggeschwindigkeit (rechts, erfasst mit dem magnetischen Aufnehmer) wurden an zwei unterschiedlichen Punkten gemessen. Solange sich der Steg in Querrichtung starr verhält, stimmt diese Messgröße mit einer tangential gemessenen Punkt-Admittanz überein. Sobald sich der Steg in Querrichtung als Kontinuum verhält, handelt es sich um eine Transfer-Admittanz.

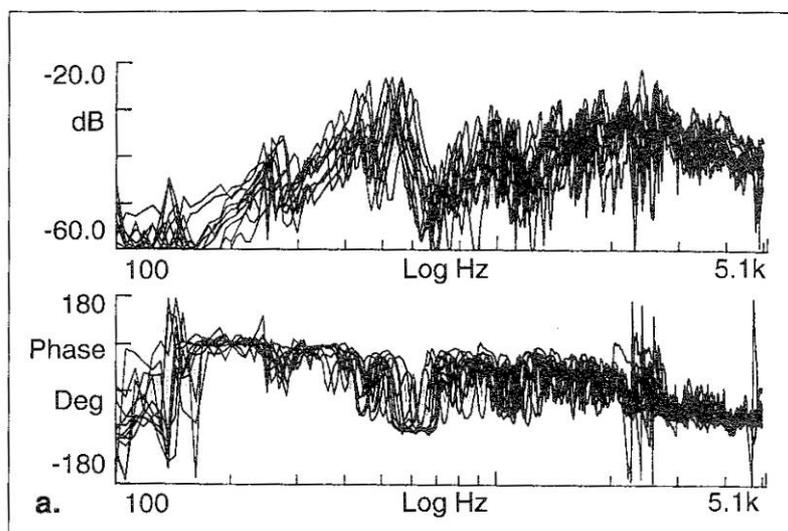


Abb. 7.9. Betrag und Phase der Transfer-Admittanz, gemessen an den Stegen von zehn hochwertigen Geigen, nach Jansson (1997).

Vereinfachend wird im Folgenden unterstellt, dass der Steg in Querrichtung starr sei. Das Messergebnis kommt dann einer Punkt-Admittanz gleich, wie sie in den eigenen Experimenten bestimmt wurde. Diese Admittanz, die Jansson (1997) angibt, ist in Abb. 7.9 nach Betrag und Phase aufgetragen. Die Kurven gehen auf Messungen an zehn Geigen zurück. Die Abszissen, und beim Betrag (oben) auch die Ordinate, sind logarithmisch unterteilt. Der Pegel -20 dB entspricht 0,2 s/kg. Dieser Wert wird praktisch nie erreicht, so dass die Admittanz immer unterhalb von 0,2 s/kg bleibt. Dies ist dieselbe Größenordnung wie bei den eigenen Messungen am Cello-Steg in tangentialer Richtung.

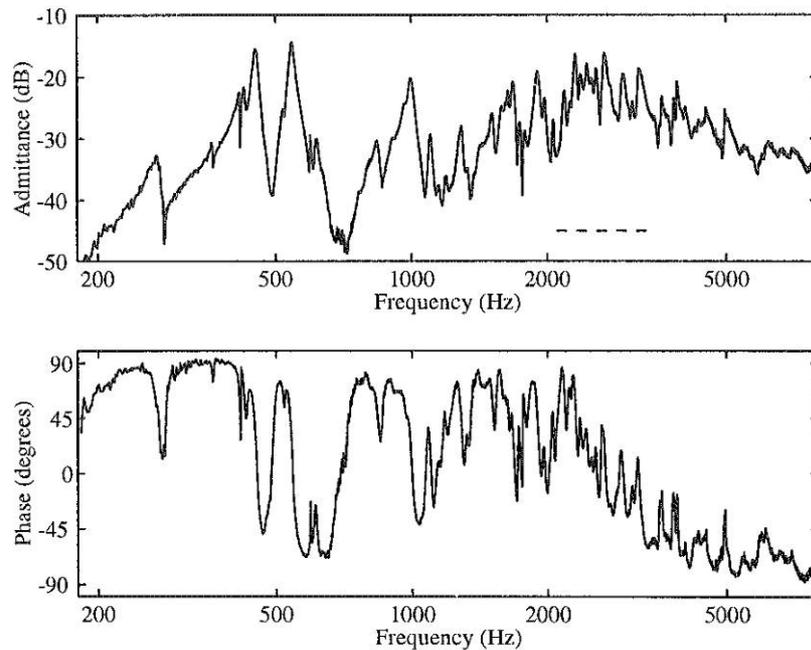


Abb. 7.10. Betrag und Phase der komplexen Admittanz bei tangentialer Anregung am Steg nach Woodhouse (2005); gestrichelt ist der „bridge hill“ markiert.

Abb. 7.10 zeigt ein weiteres Ergebnis nach Woodhouse (2005). Oben ist der Admittanz-Pegel auf 1 s/kg normiert. Demnach kann die Admittanz Maximalwerte von etwas mehr als 0,1 s/kg erreichen. Von vergleichbarer Größe sind auch die Zahlenwerte, die eigene Messungen am Steg des Cellos ergeben haben.

Der „*bridge hill*“, wie ihn Woodhouse (2005) einer Anregung von Janson folgend bezeichnet, liegt bei der Violine im Bereich von 2 kHz bis 3 kHz. Seine Frequenzlage ist in Abb. 7.10 durch Strichelung markiert. Wie bereits erwähnt, lassen sich die Ergebnisse für die Geige mit denen des Cellos verknüpfen. Eigene Untersuchungen (Fleischer 2009) haben gezeigt, dass vergleichbare Schwingungen des Cello-Korpus beim 0,32- bis 0,48-Fachen der Frequenz auftreten, für die sie an der Geige beobachtet werden. Das bedeutet, dass der *bridge hill* beim Cello etwa zwischen 640 Hz und 1500 Hz zu erwarten sein könnte. Für den Vergleich von Cello-Stegen würde dies bedeuten, dass am besten bis 2 kHz gemessen werden sollte. In dieser Hinsicht ist die obere Frequenzgrenze von 1 kHz, wie sie für die eigenen Messungen gewählt wurde, zu niedrig angesetzt. Den Untersuchungen von Woodhouse (2005) zufolge wäre mit aussagekräftigen Unterschieden zwischen den Stegen A und N höchstens im oberen Drittel des untersuchten Frequenzbereiches, wahrscheinlich aber erst bei noch höheren Frequenzen zu rechnen.

7.5. Zusammenfassende Bemerkung

Die eigenen Ergebnisse wurden mit Angaben verglichen, die in der Literatur zur Impedanz bzw. Admittanz am Steg verfügbar sind. Da zum Cello nur wenige Daten vorliegen, wurde auch die Geige herangezogen. Für das Cello zeigen sich Gemeinsamkeiten in Hinsicht auf die Frequenzcharakteristik ab. Bezüglich der Zahlenwerte ist die Übereinstimmung nicht in allen Fällen gut. Die absoluten Werte von Eggers (1987 und 1991) sind in aller Regel kleiner als die eigenen. Die Unterschiede werden am deutlichsten bei äußerst schmalbandigen Resonanzen. Diese Abweichungen sind jedoch meist nicht so eklatant, dass ihnen allzu hohes Gewicht beigemessen werden sollte. Hinsichtlich der Größenordnung der Admittanz, vor allem aber auch in Bezug auf die Frequenzen, stimmen die Messwerte im Großen und Ganzen überein.

Was bei allen bisherigen akustischen und mechanischen Untersuchungen bereits festgestellt wurde, trifft auch auf die Messungen am Steg zu: Für die Violine sind ungleich mehr Studien dokumentiert als für das Cello. Um trotzdem vergleichen zu können, ist die Frequenzachse zu modifizieren. Es ist zu berücksichtigen, dass verwandte Schwingungen des Cellos beim 0,32- bis 0,48-Fachen der Frequenz auftreten, für die sie bei der Geige zu beobachten sind (Fleischer 2009). Bei den Admittanzen lassen sich dann deutliche Gemeinsamkeiten in Hinsicht auf Frequenzgänge und Maximalwerte feststellen. Für den Vergleich der Stege A und N zeichnet sich dabei allerdings ab, dass der hier untersuchte Frequenzbereich etwas zu klein ist. Der *bridge hill*, für den Unterschiede zu erwarten wären, die sich auf die beiden Stege zurückführen lassen, liegt beim Cello etwa zwischen 640 Hz und 1500 Hz. Für die eigenen Messungen war die obere Frequenzgrenze 1 kHz gewählt worden. Es ist zu erwarten, dass sich Unterschiede zwischen den Stegen A und N bestenfalls im oberen Drittel des untersuchten Frequenzbandes, möglicherweise auch erst bei höheren Frequenzen ausprägen werden.

Für Vergleiche dieser Art wäre demnach zu empfehlen, bei weiterführenden Experimenten mit einer doppelt so großen Bandbreite zu messen. Zudem wäre zu überlegen, die Admittanz bzw. Konduktanz auf einer anderen Skala darzustellen. Da Schlüsse darauf gezogen werden sollen, in welchem Maße das Cello die Schwingungen seiner Saiten in hörbaren Schall umsetzen kann, wäre es sinnvoll, in Anpassung an die Eigenschaften des Gehörs die Ordinate zukünftig logarithmisch zu unterteilen.

8. ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN STEGADMITTANZ UND SCHWINGUNGSFORMEN

In der Admittanz am Steg spiegeln sich die Schwingungen der Decke wider, wie sie bereits ausführlich untersucht worden sind; vgl. Fleischer (2009). Um Beziehungen sichtbar zu machen, sind einige einschlägige Ergebnisse von Schwingungsmessungen hier noch einmal zusammen gestellt.

8.1. Schwingungsmessungen am Cello

8.1.1. Messung mit dem Laser-Vibrometer

Abb. 8.1. Aufbau für die Schwingungsmessung am Cello mit dem Laser-Vibrometer; am Steg wird in tangentialer Richtung angeregt.



Untersucht wurden die Schwingungen der Ober- bzw. Vorderseite des Instruments. Das primäre Interesse galt Biegeschwingungen, die zur Abstrahlung von Schall führen. Gemessen

wurden sie mit dem institutseigenen Scanning-Vibrometer. Abb. 8.1 zeigt den wesentlichen Teil des Versuchsaufbaus. Im Hintergrund steht das Cello in einem Instrumentenständer. Links daneben sieht man den elektrodynamischen Schwingerreger, der über einen Ausleger den Steg zum Schwingen bringt. Im Beispiel ist die Anregung parallel zur Oberfläche gerichtet. Vorn im Bild ist der Messkopf des Vibrometers der Firma Polytec zu erkennen.

Der Messkopf, das wesentliche Element des computergesteuerten Messsystems, enthält den Laser, die Galvo-Spiegel für die Ablenkung des Laserstrahls sowie eine Videokamera. Er sendet einen Laserstrahl aus und lenkt ihn auf Punkte eines Messgitters, 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 am Messpunkt geschlossen werden. Ohne das Instrument berühren zu müssen, erhält man Aufschluss über die Komponente der Schwinggeschwindigkeit in Richtung des Laserstrahls. Auf diese Weise wurde die wandnormale Komponente der Bewegung erfasst.

Abb. 8.2. Schwingungsmessung am Cello; am Steg wird in Normalenrichtung angeregt.



Abb. 8.2 zeigt, wie das Cello mit einem elektrodynamischen Schwingerreger LDS V404 angeregt wurde. Der Schwingerreger griff über ein Verlängerungsstück am Steg an. In Abb. 8.1 geschieht dies parallel zur Decke (tangentielle Richtung) und in Abb. 8.2 senkrecht zur Decke (Normalenrichtung). Die Erregerkraft wurde mit einem Kraftaufnehmer gemessen, der un-

mittelbar am Steg positioniert war. Angesteuert wurde der Schwingerreger über einen Verstärker mit einem Pseudo-Rauschsignal, das alle Spektralkomponenten bis 800 Hz (in einigen wenigen Fällen auch bis 1600 Hz) enthielt

Die Eingangsgröße war die Kraft am Steg, die Ausgangsgröße die Schwinggeschwindigkeit am jeweiligen Messpunkt. Aus diesen beiden Größen wurde für jeden Punkt mittels *Fast Fourier Transformation* (FFT) eine Übertragungsfunktion bestimmt. Diese stellt eine Transfer-Admittanz dar und unterscheidet sich damit von der Punkt-Admittanz, wie sie bisher betrachtet worden ist. Durch Mittelung sämtlicher Punkt-Übertragungsfunktionen ergab sich eine Gesamt-Übertragungsfunktion. Deren Maxima können als Indikatoren für Eigenformen und Eigenfrequenzen angesehen werden. Die zugehörigen Bewegungsmuster, die man für diese „charakteristischen Frequenzen“ erhält, werden hier vorwiegend in der Darstellungsart *Color Map* visualisiert. Das gemessene Schwingungsbild ist über das schwarz-weiße Videobild des Cellos gelegt. Die gemessenen Schwingungsmuster werden als „charakteristische Betriebs-schwingungsformen“, manchmal auch ohne das Adjektiv, bezeichnet. Sie stellen nicht *a priori* Eigenmoden dar, wie sie sich als Resultat einer Modalanalyse ergeben. Es kann jedoch angenommen werden, dass im günstigen Falle Eigenmoden den charakteristischen Betriebs-schwingungen weitgehend gleichen. Am Beispiel einer Geige ist von Fleischer (2009) gezeigt worden, dass in aller Regel die Eigenformen eine Untermenge der charakteristischen Betriebs-schwingungsformen darstellen.

8.1.2. Gemittelte Übertragungsfunktionen

Um abschätzen zu können, welchen Einfluss die Anregungsrichtung und die Randbedingungen auf die Schwingungen des Korpus ausüben, sind in Abb. 8.3 die Ergebnisse von vier unterschiedlichen Schwingungsmessungen zusammen gestellt. Primär interessiert der Frequenzbereich, in dem die Grundtöne des Cellos liegen. Deshalb werden zunächst Frequenzen zwischen 65 Hz und 800 Hz betrachtet. Dies entspricht den Grundtönen in der zweiten bis hin zur fünften Oktave. Die entsprechenden Gesamt-Übertragungsfunktionen können direkt miteinander verglichen werden. Dabei ist auch hierbei zu beachten, dass bei der diskreten Fourier-Analyse die Frequenzen „gerastert“ sind und die Frequenzauflösung nicht immer dieselbe war. In den Diagrammen b und c betrug der Abstand zwischen den Analysepunkten 2 Hz, in den beiden anderen 4 Hz. Bei den Punkt-Admittanzen, die mit unterschiedlichen Frequenzauflösungen ermittelt wurden, hat sich gezeigt, dass diese das Ergebnis beeinflussen kann. Um einen Einblick in Schwingungen bei höheren Frequenzen zu geben, werden auch einige Ergebnisse einer weiteren Messung eingefügt, bei der die Bandbreite 1600 Hz und die Auflösung 4 Hz waren. Anhand der Maxima dieser Gesamt-Übertragungsfunktionen legte der Experimentator diejenigen Frequenzen fest, für die Schwingungsbilder dargestellt wurden.

Die Diagramme von Abb. 8.3 zeigen Unterschiede im Detail, jedoch auch ausgeprägte Gemeinsamkeiten. Die Tendenz lässt sich vereinfacht wie folgt ausdrücken:

- Wenn das Instrument am Körper gehalten wird (Diagramm a; „*in situ*“), prägen sich weniger Maxima und damit weniger charakteristische Betriebs-schwingungen aus, als wenn das Instrument im Ständer gelagert ist (Diagramm b).
- Bei Anregung in Normalenrichtung (Diagramm b) prägen sich weniger charakteristische Betriebs-schwingungen aus, als wenn der Steg tangential, d.h. parallel zur Decke, angeregt wird (Diagramm c).
- Für tangentielle Anregung des Steges N (Diagramm c) ergibt sich keine wesentlich andere Messkurve als für tangentielle Anregung des Steges A (Diagramm d).

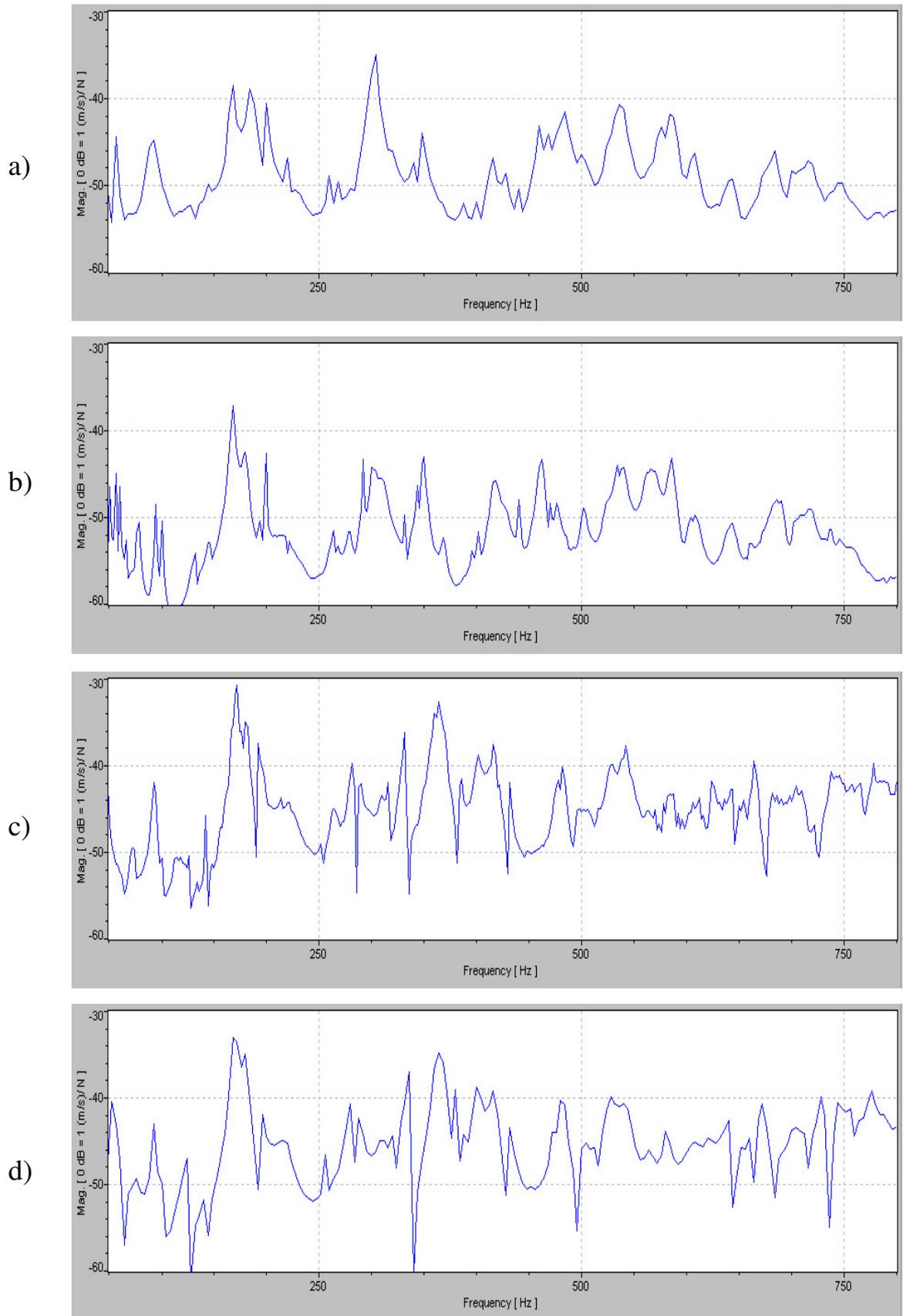


Abb. 8.3. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion
 a) bei Anregung am Steg N in Normalenrichtung, gemessen in situ;
 b) bei Anregung am Steg N in Normalenrichtung und Lagerung im Instrumentenständer;
 c) bei Anregung am Steg N in tangentialer Richtung und Lagerung im Instrumentenständer und
 d) bei Anregung am Steg A in tangentialer Richtung und Lagerung im Instrumentenständer.

8.1.3. Vergleich zwischen Transfer-Admittanz und Punkt-Admittanz

Die Sachverhalte, die hier miteinander verglichen werden, sind relativ unterschiedlich. Vollständige Übereinstimmung der Messergebnisse kann somit nicht erwartet werden. Trotzdem soll überprüft werden, ob möglicherweise qualitative Verwandtschaft zu erkennen ist und Gemeinsamkeiten sichtbar werden.

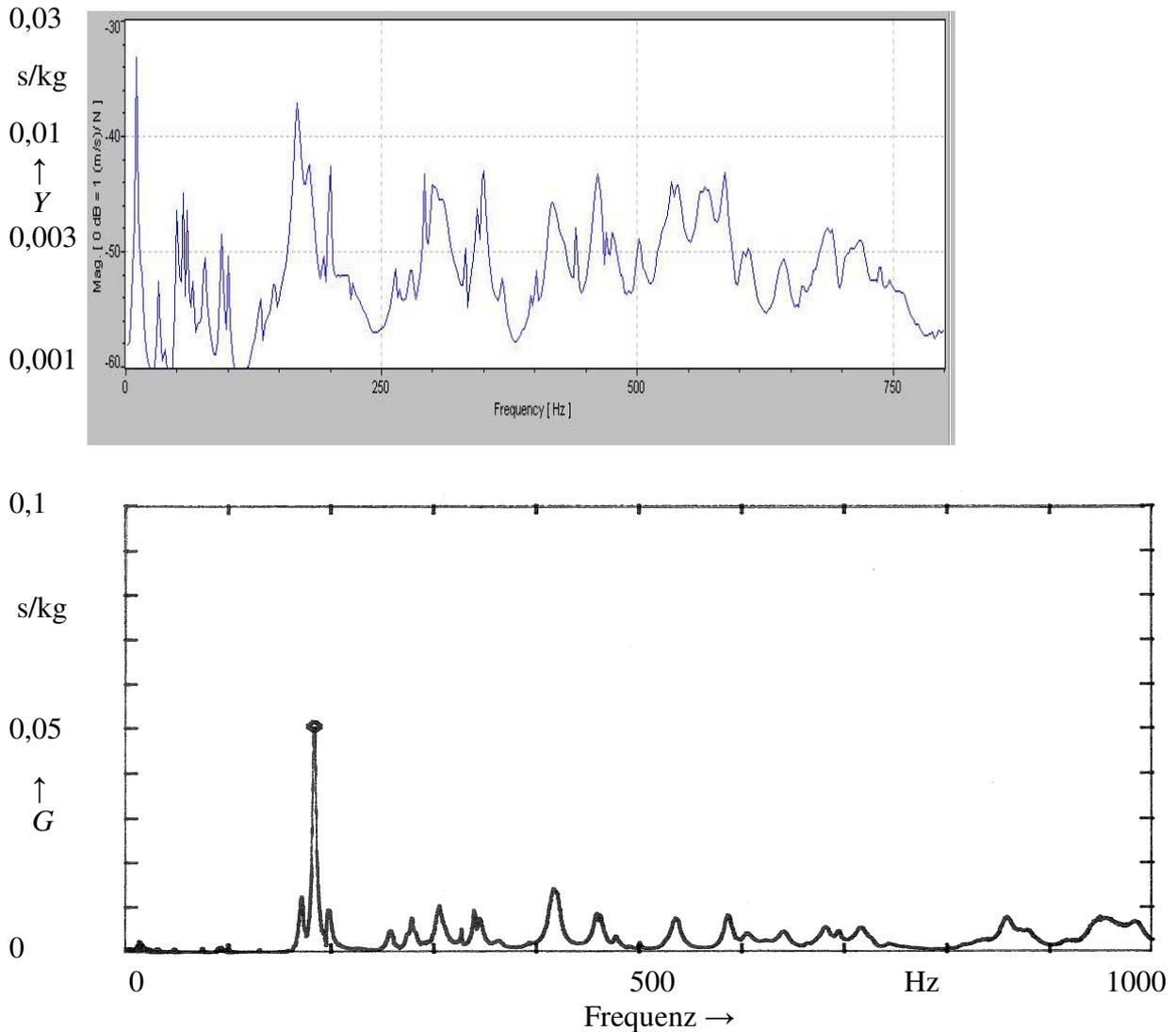


Abb. 8.4. Das Cello wird nahe der tiefen C-Saite am Steg N in Normalenrichtung angeregt.
 Oben: Über alle Messpunkte gemittelte Transfer-Admittanz (Vibrometer-Messung);
 unten: Punkt-Konduktanz am Anregungspunkt.

Bei der Suche nach gemeinsamen Merkmalen erscheint es naheliegend, gemittelte Übertragungsfunktionen der Vibrometer-Messung mit der Punkt-Admittanz am Steg zu vergleichen. Die beiden Messkurven in Abb. 8.4 beziehen sich auf Anregung in Normalenrichtung am Auflagepunkt der C-Saite; vgl. die Abb. 8.2 und 5.1. Die Frequenzachse ist in beiden Fällen linear geteilt. Im unteren Diagramm ist die Punkt-Konduktanz (Realteil der Punkt-Admittanz, deren Betrag als Messkurve nicht vorliegt) ebenfalls auf einer linearen Skala aufgetragen. Im Gegensatz dazu ist die gemittelte Transfer-Admittanz (oberes Diagramm) im Pegelmaß dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte der Admittanz sind an der Ordinate angetragen.

Das obere Diagramm liefert ein gemittelt Maß für die transversale Bewegung der gesamten Vorderseite des Cellos bei Anregung am Steg. Somit beschreibt es die „mittlere Schwingfreudigkeit“ der Decke, des Griffbretts usw. Das untere Diagramm steht dagegen für die „punktuelle Schwingfreudigkeit“ am stegseitigen Kontaktpunkt der C-Saite. Im oberen Diagramm sind demzufolge kleinere Zahlenwerte zu erwarten als im unteren. Dies trifft auch tatsächlich zu. Die Transfer-Admittanz (Abb. 8.4 oben) beträgt im Mittel etwa 0,003 s/kg; ihr Höchstwert ist 0,014 s/kg. Der Höchstwert der Punkt-Konduktanz (Abb. 8.4 unten) ist 0,05 s/kg und das mittlere Niveau kann mit 0,005 s/kg abgeschätzt werden. Gewisse Gemeinsamkeiten zeigen sich insbesondere in Hinsicht auf die Frequenzen, bei denen lokale Maxima auftreten. Das Hauptmaximum findet sich in beiden Diagrammen bei etwa 180 Hz. Die Messkurven würden sich optisch mehr ähneln, wenn beide Ordinaten gleichermaßen logarithmisch oder linear geteilt wären. Wäre im oberen Diagramm nicht die gemittelte Transfer-Admittanz, sondern die Konduktanz des Messpunktes an der Anregungsstelle dargestellt, dürfte zudem die Messkurve mit der Punkt-Konduktanz des unteren Diagramms in höherem Maße übereinstimmen.

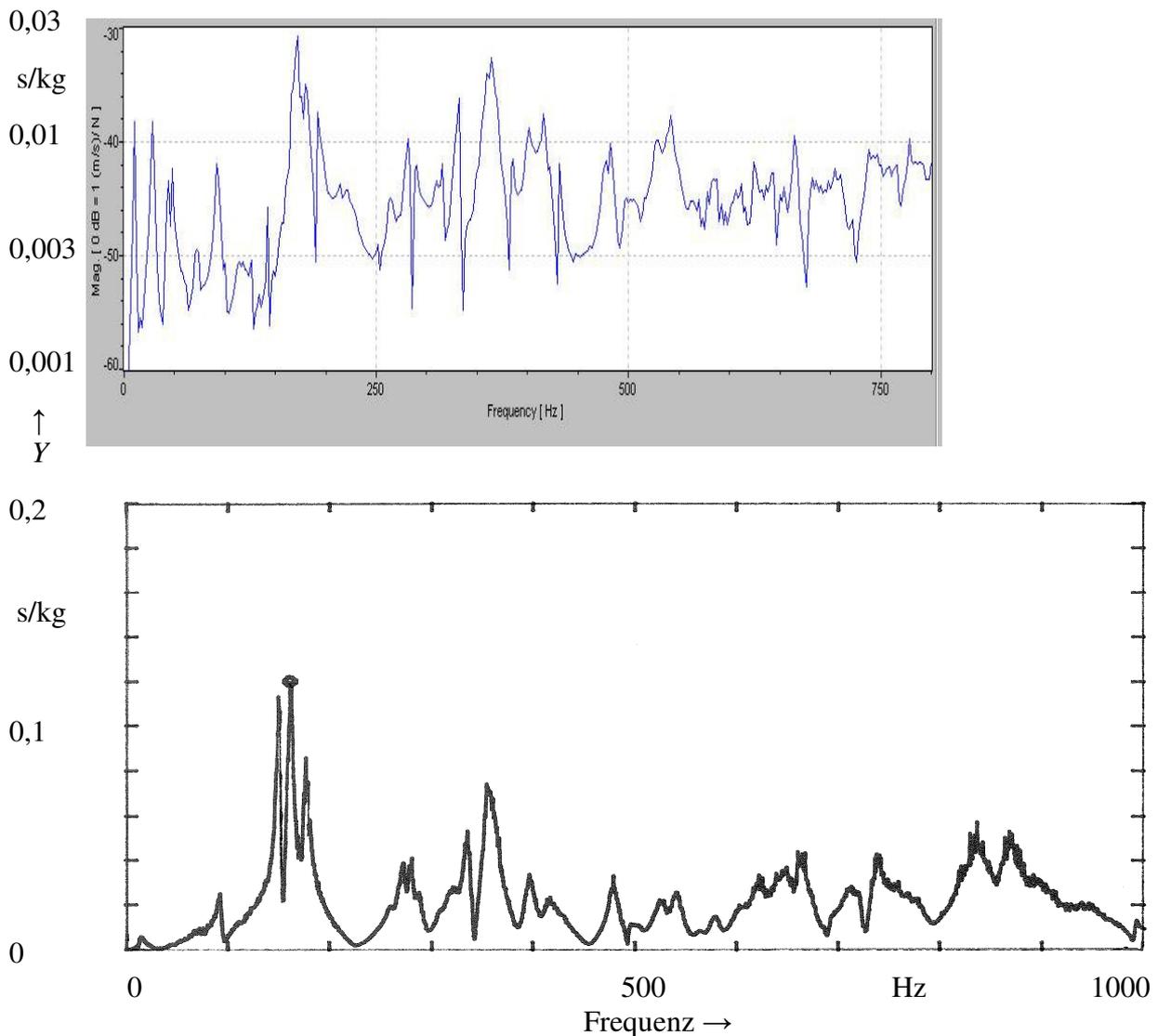


Abb. 8.5. Das Cello wird nahe der tiefen C-Saite am Steg N in tangentialer Richtung angeregt.
 Oben: Über alle Messpunkte gemittelte Transfer-Admittanz (Vibrometer-Messung);
 unten: Punkt-Admittanz am Anregungspunkt.

Abb. 8.5 bezieht sich auf die Anregung am Auflagepunkt der C-Saite mit einer Kraft, die parallel zur Decke gerichtet ist. Die Bewegung, mit der das Instrument antwortet, wird in unterschiedlichen Richtungen gemessen. Das untere Diagramm bezieht sich auf die Bewegung des Steges in der Richtung der Kraft, d.h. ebenfalls in tangentialer Richtung. Im oberen Diagramm haben Kraft und Bewegung unterschiedliche Richtungen, da die Schwingung des Instrumentenkörpers aus seiner „Ebene“ heraus gemessen wurde. In beiden Diagrammen ist der Betrag der Admittanz dargestellt, oben logarithmisch, unten linear. Die Transfer-Admittanz (oben) hat ein mittleres Niveau von etwa 0,005 s/kg. Die Punkt-Admittanz am Steg, gemessen parallel zur Decke, ist mit etwa 0,03 s/kg erwartungsgemäß deutlich größer. Die Hauptmaxima liegen bei 172 Hz bzw. 10 Hz tiefer als im vorher betrachteten Fall und erreichen etwa 0,03 s/kg (oben) bzw. 0,11 s/kg (unten). Der Faktor drei bis vier, der zwischen der Transfer-Admittanz und der Punkt-Admittanz liegt, kann damit erklärt werden, dass im ersten Fall ein Mittelwert, im zweiten offenbar der Maximalwert erfasst wird. Als positiv ist zu vermerken, dass die zugehörigen Frequenzen exakt übereinstimmen. Auch im weiteren Verlauf der Kurven sind qualitative Ähnlichkeiten zu erkennen.

Unterhalb des Hauptmaximums fallen sowohl in Abb. 8.4 wie auch in Abb. 8.5 größere Abweichungen auf. Eine Spitze bei etwa 100 Hz prägt sich bei tangentialer Anregung (Abb. 8.5) in beiden Messkurven aus. Darüber hinaus sind in der Transfer-Admittanz regelmäßig weitere Spitzen zu erkennen, die sich in der Punkt-Konduktanz nicht gezeigt haben. Am Steg ist die Punkt-Konduktanz bei normaler Anregung (Abb. 8.4), in etwas geringerem Maße auch diejenige bei tangentialer Anregung (Abb. 8.5), sehr klein. Dies kann mit den unterschiedlichen Randbedingungen bei den Experimenten zusammenhängen. Um die Transfer-Admittanz zu messen, wurde das Cello im Gitarrenständer gelagert. Die Messung der Punkt-Impedanz erfolgte *in situ*, d.h. das Cello wurde am Körper gehalten. Dies reduziert nach den Beobachtungen des Kapitels 7 in Fleischer (2009) die Zahl und die Amplitude der Schwingungsformen. Einige der tieffrequenten Schwingungen sind Starrkörpermoden, die Knoten bevorzugt in der Nähe des Steges auszubilden. Dies bedeutet, dass bei tiefen Frequenzen der Steg wesentlich weniger schwingfreudig als beispielsweise der Hals oder der restliche Korpus ist.

Die Transfer-Admittanz, gemittelt über die gesamte Oberfläche, und die Punkt-Admittanz, gemessen am Steg, spiegeln verschiedenartige Sachverhalte wider und sind nur entfernt miteinander verwandt. Obwohl vollständige Übereinstimmung der Messkurven deshalb nicht erwartet werden kann, sind trotzdem in einigen Punkten Gemeinsamkeiten zu beobachten. Dies kann als weitere Bestätigung der vorliegenden experimentellen Ergebnisse gewertet werden.

8.2. Sämtliche charakteristischen Betriebsschwingungen

Die Punkt-Admittanz am Steg ist ein Maß dafür, in welchem Maße eine Saite am unteren Auflagepunkt die einzelnen Schwingungsformen des Instrumentenkörpers anregen kann. In Abb. 8.6 sind die charakteristischen Schwingungsformen, die von Fleischer (2009) für tangentialer Anregung und Lagerung des Cellos im Instrumentenständer gemessen worden sind, zusammen getragen. Die charakteristischen Frequenzen, bei denen sich diese Formen am stärksten ausprägen, sind jeweils hinzugefügt. Im Bereich der Grundfrequenzen der Celloklänge von 65 Hz bis 800 Hz waren 27 Betriebsschwingungen nachzuweisen. Fleischer (2009) hat bereits darauf hingewiesen, dass nicht alle davon als Eigenmoden einzustufen sind; vielmehr treten auch Mischformen auf. Die unterschiedlichen Farben in Abb. 8.6 charakterisieren das Vorzeichen. Helle Bereiche stehen für Schwingungsbäuche, dunkle Linien für Schwingungsknoten.

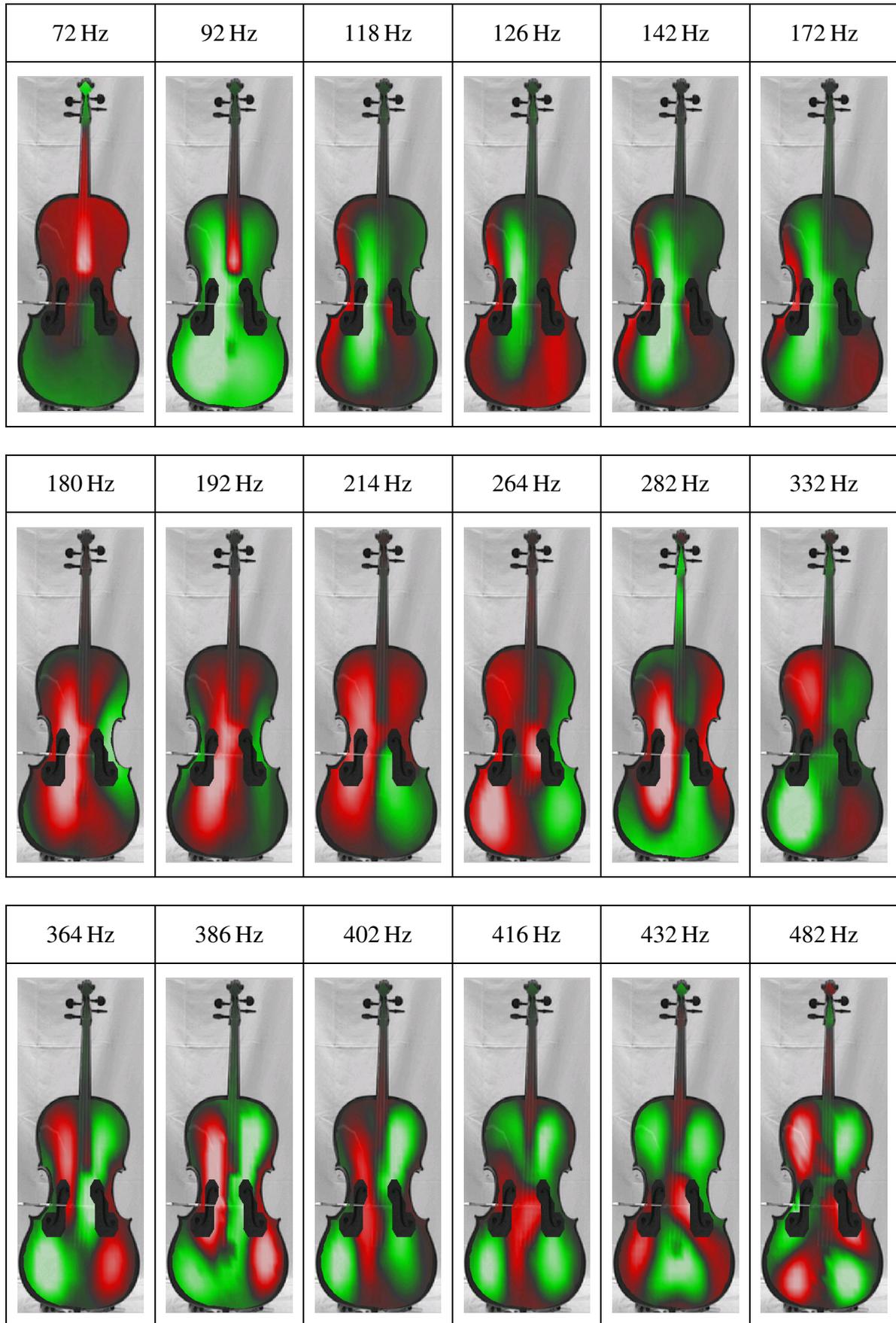


Abb. 8.6.a. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N. Dargestellt ist der Momentanwert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen.

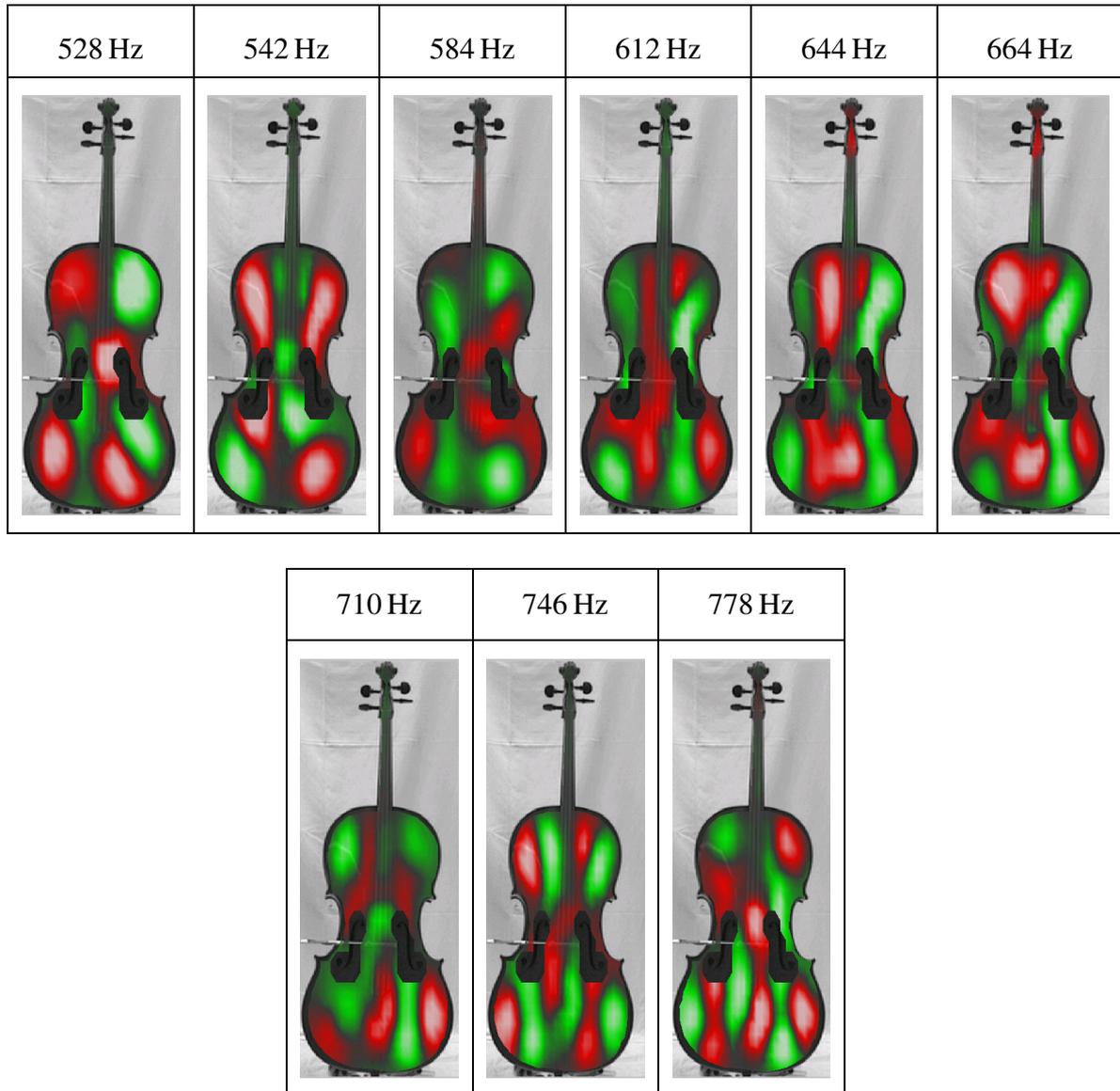


Abb. 8.6.b. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N . Dargestellt ist der Momentanwert; rot steht für positives, grün für negatives Vorzeichen.

Die Überlegungen des vorangehenden Abschnittes haben gezeigt, dass nicht alle dieser Schwingungsformen auch Spuren in der Stegadmittanz hinterlassen. Deshalb ist im nächsten Abschnitt eine gezielte Auswahl getroffen.

8.3. Relevante charakteristische Betriebsschwingungen

In Abb. 8.7 ist die Stegkonduktanz für tangentialer Anregung dargestellt; vgl. Abb. 6.2.b. Die Ordinate reicht von 0 s/kg bis 0,1 s/kg. Die Maxima sind mit Ziffern versehen. Jede Ziffer kennzeichnet eine Schwingung, deren Frequenz der Frequenz des betrachteten Maximums am nächsten kommt. In Abb. 8.8 sind diejenigen charakteristischen Schwingungsformen, welche sich in der Konduktanz abbilden, samt den zugehörigen Frequenzen wiedergegeben. In der Chladni-Darstellung stehen helle Bereiche für Schwingungsbäuche, dunkle Linien für Schwingungsknoten. Die Ziffer weist der Schwingungsform ihren Platz in Abb. 8.7 zu.

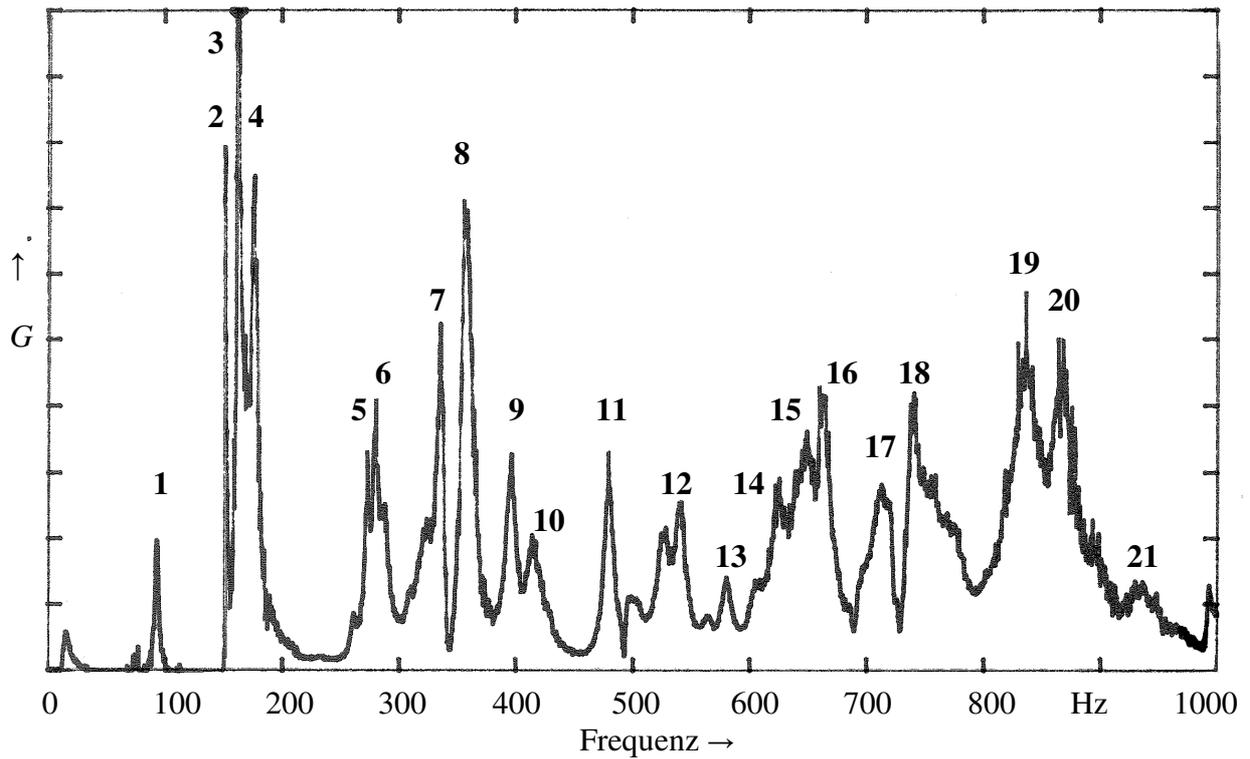


Abb. 8.7. Punkt-Konduktanz, gemessen in tangentialer Richtung am Steg N am Auflagepunkt der C-Saite.



1 (92 Hz)



2 (172 Hz)



3 (180 Hz)

Abb. 8.8.a. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N. Dargestellt ist der Betrag nach Art Chladni'scher Klangfiguren. Die Nummern beziehen sich auf Abb. 8.7.



4 (192 Hz)



5 (264 Hz)



6 (282 Hz)



7 (332 Hz)



8 (364 Hz)



9 (386 Hz)

Abb. 8.8.b. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N . Dargestellt ist der Betrag nach Art Chladni'scher Klangfiguren. Die Nummern beziehen sich auf Abb. 8.7.



10 (416 Hz)



11 (482 Hz)



12 (542 Hz)



13 (584 Hz)



14 (612 Hz)



15 (644 Hz)

Abb. 8.8.c. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N. Dargestellt ist der Betrag nach Art Chladni'scher Klangfiguren. Die Nummern beziehen sich auf Abb. 8.7.



16 (664 Hz)



17 (710 Hz)



18 (778 Hz)



19 (832 Hz)



20 (880 Hz)



21 (924 Hz)

Abb. 8.8.d. Charakteristische Betriebsschwingungen des Cellos bei tangentialer Anregung des Steges N. Dargestellt ist der Betrag nach Art Chladni'scher Klangfiguren. Die Nummern beziehen sich auf Abb. 8.7.

Die mehrseitige Abb. 8.8 enthält im Bereich bis 1 kHz insgesamt 21 Schwingungsformen, die nach Art Chladni'scher Klangfiguren veranschaulicht sind. Deren Interpretation wird gestützt durch die Vorstellung, dass blaue Körner auf die Oberfläche eines weißen Instruments aufgebracht seien. Wenn das Instrument besonders stark schwingt, entfernen sich die blauen Körner von den Schwingungsbäuchen; an den betreffenden Stellen wird die weiße Oberfläche sichtbar. An den Knoten ist das Instrument in Ruhe. Dort sammeln sich besonders viele Körner an und es prägen sich dunkle Linien aus. Anhand ihrer Frequenzen wurden die charakteristischen Betriebsschwingungen den Maxima der Konduktanz zugeordnet. Ebenso wie bei der Konduktanzmessung wurde bei der Ermittlung der Schwingungsformen am Steg N bei der C-Saite parallel zur Decke angeregt.

Die Konduktanz ist ein Maß dafür, 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 beurteilen. Jedoch lässt sich aussagen, dass das Instrument nur dann Schall abgeben kann, wenn Energie von der Saite in den Korpus fließt. Dass die Konduktanz am Steg (oder auch am Hals, was hier jedoch nicht weiter vertieft werden soll) von Null verschieden ist, stellt hierfür zwar keine hinreichende, aber eine notwendige Bedingung dar.

Die Maxima in Abb. 8.7 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 wohlbekannte Tatsache wider, dass es nicht möglich ist, eine Schwingung im Knoten anzuregen. Darüber hinaus spielt auch eine 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 gegenphasig schwingende Bereiche im Vergleich zur Wellenlänge sind, vgl. Fleischer (1984).

In Abb. 8.7 reihen sich die Maxima der Konduktanz dicht aneinander. Mehrere „Formantbereiche“ sind zu erkennen. Neben dem alles überragenden Hauptmaximum unterhalb von 200 Hz ist eine Anhebung um 350 Hz und dann wieder um 750 Hz zu beobachten. Übt die Saite auf den Steg eine Wechselkraft aus, die Komponenten mit diesen Frequenzen enthält, so wird der Korpus besonders leicht zum Schwingen gebracht. Mit der Anhebung der entsprechenden Komponenten im Schallsignal ist zu rechnen, was die Klangfarbe beeinflusst. Unterhalb von ca. 160 Hz ist die Steg-Konduktanz (mit einer Ausnahme bei 92 Hz) verschwindend gering. Offenbar ist das Instrument hier so gut wie nicht in der Lage, Energie aufzunehmen. Die logische Folge ist, dass die Saite bei tiefen Frequenzen zwar schwingen, der Korpus aber nichts abstrahlen kann. Dies bedeutet, dass Celloklänge in den tiefen Lagen praktisch keinen Grundton enthalten werden.

8.4. Zusammenfassende Bemerkung

Ein Vergleich mit experimentellen Untersuchungen (Fleischer 2009) ergibt, dass sich in der Admittanz am Steg die Strukturschwingungen des Cellos widerspiegeln. Die Erkenntnisse aus diesen Schwingungsmessungen ermöglichen es, Maxima der Admittanz bzw. der Konduktanz zu interpretieren. Dabei zeigt sich insbesondere, dass nicht alle gemessenen Schwingungen

für den Spielbetrieb relevant zu sein scheinen. Dies wird daran erkennbar, dass in Abb. 8.6 insgesamt 27 Schwingungsformen zwischen 72 Hz und 778 Hz zusammengestellt sind. Als Spitzen in der Steg-Konduktanz finden sich in diesem Bereich dagegen gemäß Abb. 8.8 lediglich zwei Drittel davon, also 18 Schwingungen, wieder.

In Band 2/09 der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik sind zahlreiche Schwingungsformen zusammen gestellt. Für die Funktion des Musikinstruments sind nicht alle in gleichem Maße relevant. Hinweise auf den richtigen Stellenwert geben die Admittanz und insbesondere die Konduktanz. Ist die Admittanz klein, wird der Korpus sich nur wenig bewegen. Ist die Konduktanz klein, wird 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 Admittanz, die in diesem Band zusammen gestellt sind, im Zusammenhang mit den Korpussschwingungen von weitreichender Bedeutung. Sie messen den Schwingungen, die im vorangegangenen Band besprochen wurden, ihre tatsächliche Wertigkeit zu.

9. ABSCHLUSSDISKUSSION

Im vorliegenden Bericht sind Messungen an einem hochwertigen, mit hohem Aufwand in einer Meisterwerkstatt gefertigten Cello dokumentiert. Das Instrument, das Abb. 9.1 zeigt, war in vollständigem, spielbarem Zustand. Für die Studie standen zwei unterschiedliche Stege zur Verfügung, die von Fachleuten in das Instrument eingesetzt worden waren.



Abb. 9.1. Das Cello in seinem Transportbehälter.

Beim Spielen streicht der Bogen die Saite und bringt sie zum Schwingen. Deren Schwingung kann sich an zwei Punkten auf den Korpus übertragen. Eine Möglichkeit besteht am oberen

Ende, wo der Finger die Saite gegen das Griffbrett presst bzw. – wenn die Saite leer gespielt wird – am Sattel. Der andere Punkt, an dem die Saite Kontakt mit dem Korpus hat, befindet sich am Steg. Im vorliegenden Bericht wurden die Kontaktstellen aller vier Saiten betrachtet. An den Stellen, an denen die Saiten aufliegen, wurde die mechanische Admittanz des Steges gemessen. Diese Größe ist definiert als das komplexe Verhältnis der Schwinggeschwindigkeit und der anregenden Kraft und wird über der Frequenz aufgetragen. Sie kennzeichnet somit die frequenzabhängige „Schwingfreudigkeit“ des Steges am Messpunkt. Bei diesen Experimenten stand der Bereich der Grundfrequenzen der Cello-Klänge im Mittelpunkt des Interesses. Meist wurden Frequenzen bis 1 kHz untersucht. Es gibt keine Gründe, die gegen, jedoch mehrere, die für eine Erweiterung dieses Frequenzbereiches sprechen.

Um die Admittanz zu messen, wurde der Steg mit einem elektrodynamischen Schwingerreger in Vibration versetzt. Die Kraft, mit der angeregt wurde, sowie die Bewegung, mit welcher der Steg reagierte, wurden mit einem Impedanzmesskopf gemessen. Unter Verwendung von zwei Versuchseinrichtungen, die sich in einigen Merkmalen unterschieden, wurden vergleichende Messungen durchgeführt. Damit wurde eingangs die Methodik geklärt. Die weiteren Ergebnisse wurden mit einer Versuchsapparatur ermittelt, die im Bericht als Methode II bezeichnet wird. Deren „*Front End*“ ist aus Abb. 9.2 zu ersehen.

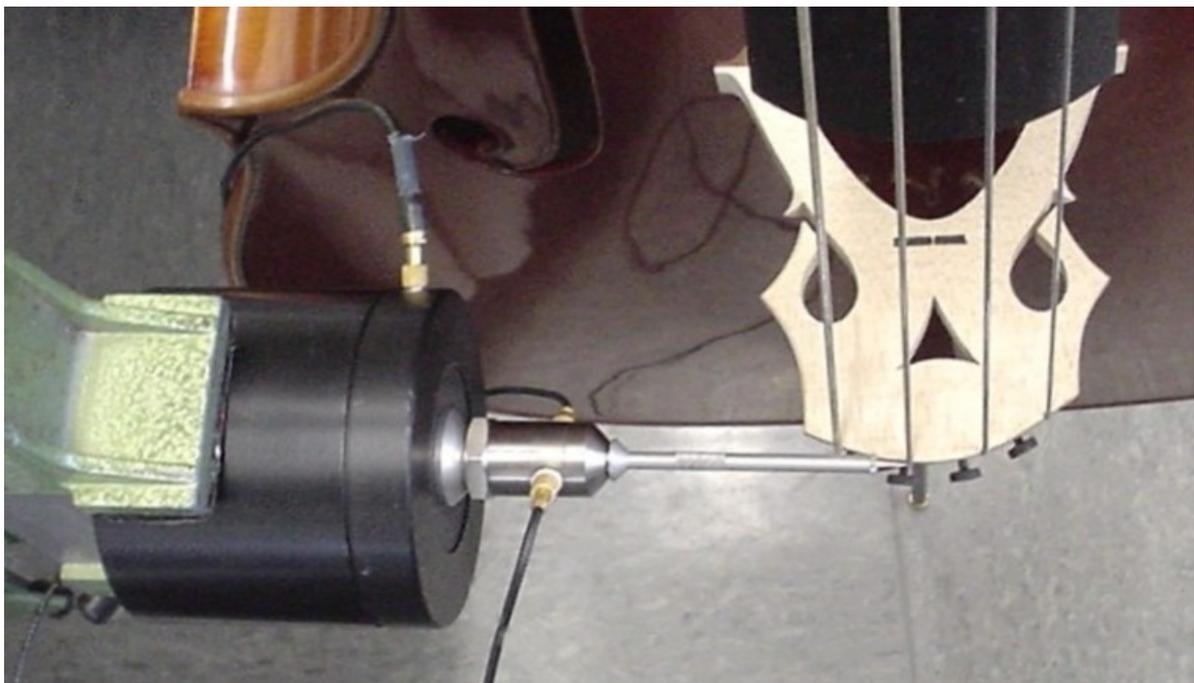


Abb. 9.2. Schwingerreger (schwarz) und Impedanzmesskopf (silbern) mit aufgesetzter Tastspitze; es wird die Admittanz der G-Saite in tangentialer Richtung gemessen.

Damit die Auflagepunkte der Saiten besser erreicht werden können, wurde eine Tastspitze in das obere Ende des Impedanzmesskopfes eingeschraubt. Eine elektrische Kompensationschaltung sollte verhindern, dass die Messergebnisse durch diese zusätzliche Masse in unzulässigem Ausmaß verfälscht werden. Das Kraft- und das Bewegungssignal, die der Impedanzmesskopf lieferte, wurden in einen Zweikanal-FFT-Analysator eingespeist. Der Analysator berechnete die Admittanz als den Quotienten aus Schwinggeschwindigkeit und Kraft und gab sie als Funktion der Frequenz aus. Derselbe Analysator lieferte auch ein Pseudo-Rauschen, das an die Parameter der Analyse angepasst war. Dieses wurde über einen Leistungsverstärker in den Schwingerreger eingespeist und trieb den Schwingerreger an.

Die aufgesetzte Tastspitze, die in Abb. 9.2. zu erkennen ist, macht es leicht möglich, an den Auflagepunkten aller Saiten nicht nur senkrecht zum Steg, sondern auch parallel zur Decke anzuregen und zu messen. In dieser Richtung erwies sich der Steg als wesentlich schwingfreudiger, als wenn er zur Decke hin bzw. von der Decke weg belastet wurde. Da die tangentielle Anregung das Anstreichen der Saite mit dem Bogen gut nachbildet, wurde sie bevorzugt angewandt. Exemplarisch zeigt Abb. 9.3 Messkurven, wie man sie damit erhält.

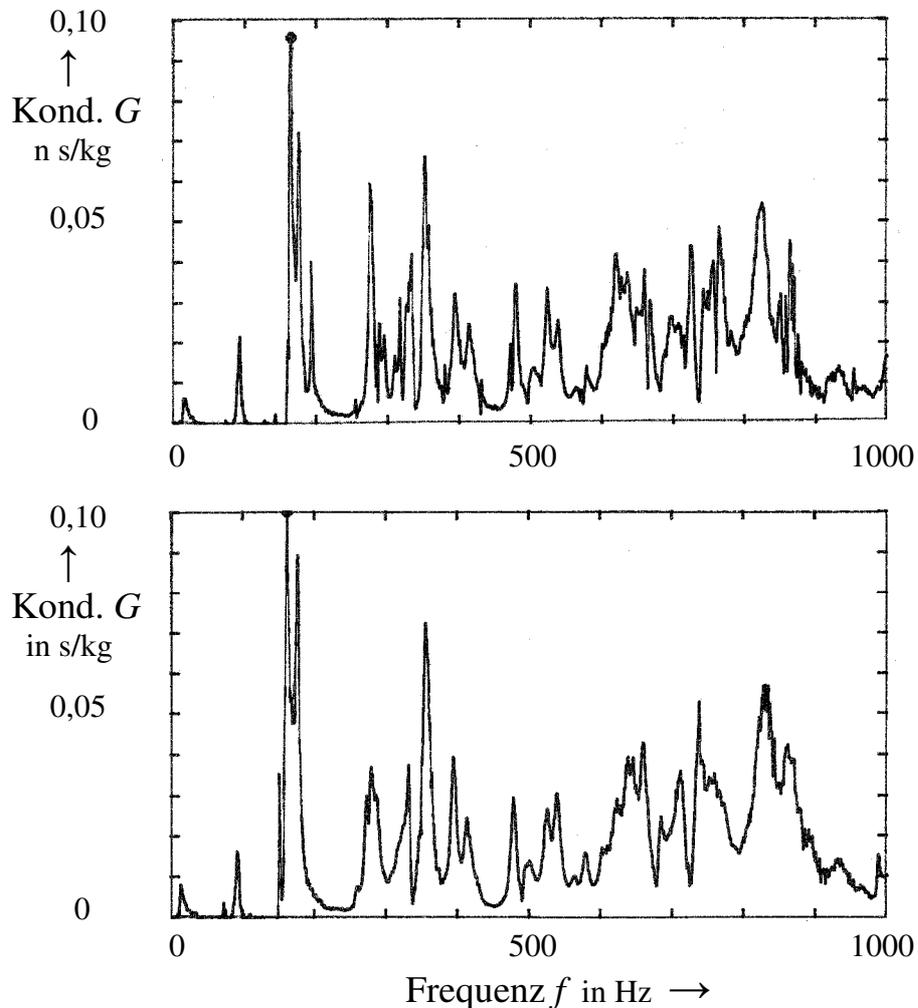


Abb. 9.3. Konduktanz G in tangentialer Richtung als Funktion der Frequenz f , gemessen am Auflagepunkt der G-Saite auf dem Steg A (oben) bzw. dem Steg N (unten).

Sehr realitätsnah und zielorientiert konnte auf diese Weise der untere der beiden Auflagepunkte untersucht werden, an denen jede Saite in Verbindung zum Instrumentenkörper steht. In Abb. 9.3 ist die Konduktanz, d.h. der Realteil der Admittanz, dargestellt. Sie wurde für zwei unterschiedliche Stege an der G-Saite parallel zur Decke gemessen. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, bei welchen Frequenzen und in welchem Ausmaß diese Saite am Steg Schwingungsenergie in den Korpus einbringen kann. Dabei zeigt sich, dass dies in hohem Maße in einem schmalen Frequenzband etwas unterhalb von 200 Hz gelingt. Für die a-Saite ($f \geq 220$ Hz), die solch tieffrequente Schwingungen nicht ausführt, ist diese Beobachtung nicht von Belang. Sie ist jedoch für die C-Saite ($f \geq 65$ Hz), die G-Saite (Abb. 9.3; $f \geq 98$ Hz) und für die tieferen Lagen der d-Saite ($f \geq 147$ Hz) relevant. Möglicherweise ist die extrem hohe Konduktanz, die 0,1 s/kg überschreiten kann, die Ursache für den „Wolfston“.

Cremer (1981) bezeichnet den Wolfston als „pathologischen“ Streichvorgang. Seine Ursache wird üblicherweise darin gesehen, dass sich zwei Schwingungen überlagern. Die eine wird von der Saite, die andere vom Korpus dominiert. Zu bestimmten Zeitpunkten ist die Überlagerung konstruktiv, zu anderen destruktiv, so dass sich eine Schwebung einstellt. Diese Schwebung lässt den Celloklang „schnarren“, „flattern“ oder „heulen“. Letzteres kann mit den Lauten assoziiert werden, die ein Wolf von sich gibt. 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 Schwebung führen kann. Es gibt Hinweise darauf, dass Messungen der Admittanz - oder besser der Konduktanz – dazu beitragen können, gezielt die Neigung eines Instruments zum Wolfsston zu entschärfen; vgl. Eggers (1959).

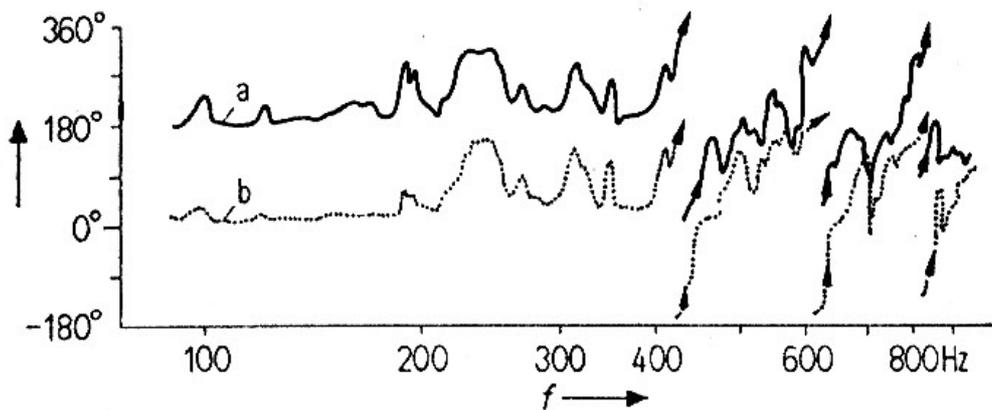


Abb. 9.4. Phasendifferenz nach Eggers (1959) zwischen
 a) rechtem und linkem Stegfuß bzw.
 b) Stegmitte und linkem Stegfuß.

Der Steg, der im vorliegenden Bericht im Mittelpunkt stand, ist das wesentliche Übertragungselement eines Chordophons. Er leitet die Wechselkraft der Saite in die Decke ein. Dabei hat er zunächst die Funktion eines Systems starrer Hebel. Eine tangential auf den Steg aufgebrachte Kraft wird über die beiden Füße in den Korpus eingeleitet. Dass sich dabei die beiden Füße in Gegenphase bewegen, kann der durchgezogenen Kurve a in Abb. 9.4 entnommen werden. In weiten Bereichen bewegen sich die beiden Stegfüße mit der Phasenverschiebung 180° . Den Untersuchungen von Eggers (1959) zufolge gilt dies zumindest bis 800 Hz. Das bedeutet, dass beim Anstreichen der Saite im Wesentlichen ein Kräftepaar auf die Decke des Cellos wirkt. Anregung und Messung in Normalenrichtung (senkrecht zur Decke) bilden demnach die Verhältnisse nur unzureichend nach, wie sie beim Spielen vorliegen. Bei zukünftigen Untersuchungen an Streichinstrumenten sollte deshalb den Messungen in der tangentialen Richtung (parallel zur Decke) der Vorzug gegeben werden.

Darüber hinaus fungiert der Steg als mechanisches Filter. Der Frequenzgang gemäß Abb. 9.5 zeigt die Durchlasskurve nach Reinecke (1973). Abgesehen von einer Abhebung bei sehr hohen Frequenzen, die für viele Hörer bereits außerhalb des wahrnehmbaren Bereiches liegt, lässt sie im Wesentlichen eine Tiefpass-Charakteristik erkennen. Schwingungen mit Frequenzen bis etwa 2 kHz werden praktisch unverändert von der Saite an die Decke weitergegeben. Der Faktor 0,5 besagt, dass sich die Kraft gleichmäßig auf beide Füße des Steges verteilt. Ob sich die Füße im Gleich- oder Gegentakt bewegen, zeigt Abb. 9.4. Meist haben die Kräfte in den beiden Füßen entgegengesetztes Vorzeichen; der eine Fuß bewegt sich nach oben, wenn der andere nach unten geht. Es wirkt dann ein Kräftepaar, das die Decke zu Biegeschwingungen anregt.

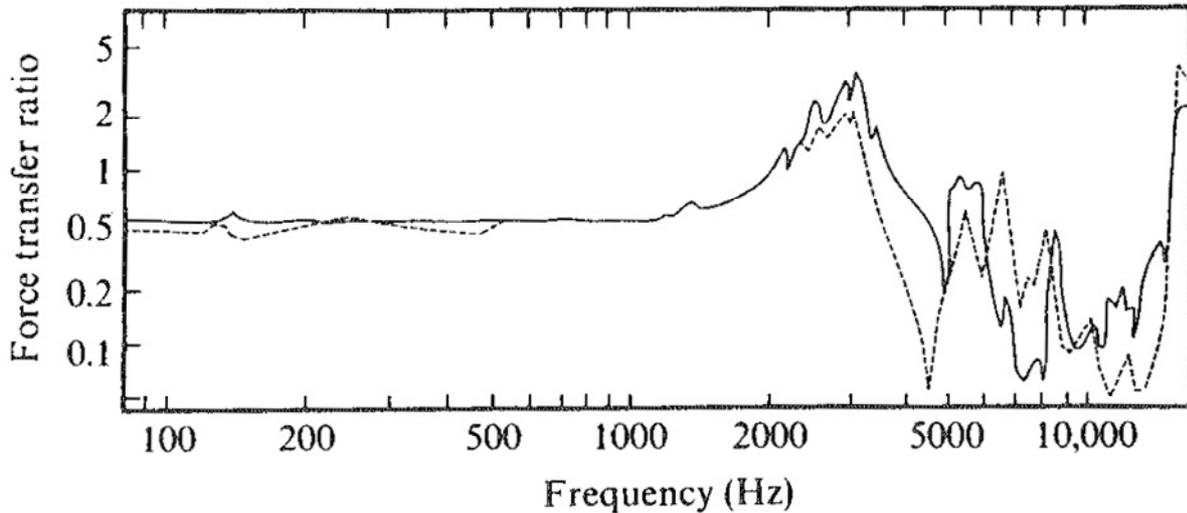


Abb. 9.5. Durchlassfunktion $F_{\text{unten}}/F_{\text{oben}}$ eines Cello-Steges; F_{oben} ist die oben am Steg eingebrachte Kraft, F_{unten} die Kraft, die am Fuß nahe dem Bassbalken (punktiert) bzw. am Fuß nahe dem Stimmstock (durchgezogen) auf die Decke übertragen wird.
Nach Reinecke (1973), entnommen aus Fletcher und Rossing (1998).

Bemerkenswert ist die deutliche Anhebung im Durchlassbereich zwischen etwa 2 kHz und 4 kHz. Der Steg bewegt sich nicht mehr als starrer Körper, sondern schwingt offensichtlich als Kontinuum. Es findet eine Art von Verstärkung statt, die mit einer oder mehreren Eigenschwingungen des Steges zusammenhängt. Möglicherweise spielt dabei auch eine Schwingungsart, wie sie Reinecke (1973) gefunden hat und wie sie in Abb. 9.6 rechts skizziert ist, eine Rolle. Abb. 9.5 besagt, dass am Fuß nahe dem Bassbalken die doppelte, am Fuß nahe dem Stimmstock sogar die dreifache Wechselkraft der Saite wirkt. Saitenschwingungen mit Frequenzen in diesem Bereich werden besonders effektiv an die Decke weitergegeben. Höherfrequente Anteile (oberhalb von 4 kHz) werden weniger gut durchgelassen, wobei sich dann auch zunehmende Unterschiede zwischen den Kräften an den zwei Füßen des Steges zeigen.

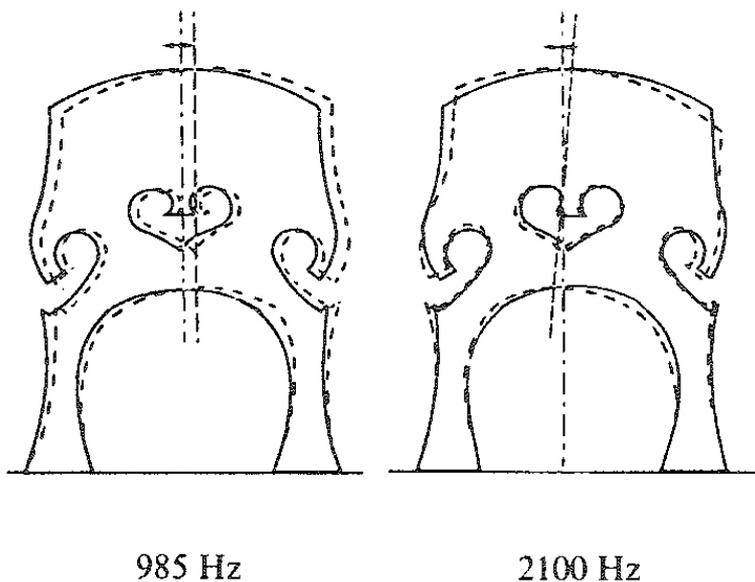


Abb. 9.6. Die ersten beiden Schwingungsformen und -frequenzen eines Cello-Steges.
Nach Reinecke (1973), entnommen aus Fletcher und Rossing (1998).

Offensichtlich spielt bei tiefen Frequenzen das „Eigenleben“ des Steges so gut wie keine Rolle; der Steg bewegt sich weitgehend als starrer Körper und fungiert als Hebelsystem. Den Abb. 9.5 und 9.6 zufolge sind die wesentlichen Eigenschwingungen des Steges bei etwa 2 kHz und höher zu erwarten. Es leuchtet demnach ein, dass Vergleiche der beiden Stege im Bereich bis 1 kHz keine eklatanten Unterschiede aufgezeigt haben. Dies gilt für die Untersuchungen der Schwingungsformen des Korpus (Fleischer 2008) ebenso wie für die hier präsentierten Messungen der Admittanz (Kapitel 5 und 6). Die Admittanz, wie sie beispielsweise Abb. 9.3 zeigt, ist demnach ganz wesentlich durch die Schwingungen der Decke geprägt, die bei allen Messungen dieselbe war. Abweichungen, die zwischen beiden Konduktanz-Diagrammen in Abb. 9.3 zu erkennen sind, könnten andere Gründe haben. Möglicherweise rühren sie davon her, dass nicht bei jeder Messung die Füße der Stege exakt an den gleichen Stellen auf der Decke aufliegen. Denkbar wäre auch, dass die Stege sich in ihren äußeren geometrischen Abmessungen unterscheiden und dadurch eine unterschiedliche Momentenanregung der Decke realisieren. Insgesamt erscheinen die beobachteten Abweichungen aber so gering, dass im untersuchten Frequenzbereich keine signifikanten Auswirkungen auf das Schallsignal zu erwarten sind.

Erst bei höheren Frequenzen ist damit zu rechnen, dass die Experimente aussagekräftige Unterschiede sichtbar machen. Schon aus diesem Grund wurde im vorliegenden Bericht davon Abstand genommen, aus den vorliegenden Messergebnissen Wertungen zugunsten des Steges A oder des Steges N abzuleiten. Jedoch besteht kein Zweifel, dass die Admittanz an den Auflagepunkten der Saiten und insbesondere deren Realteil, die Konduktanz, die adäquate Messgröße ist. Sie eignet sich dazu, Unterschiede in der musikalischen Funktion von Stegen auf ein und demselben Instrument messtechnisch nachzuweisen. Allerdings sollte aus den oben erwähnten Gründen beim Cello der Bereich von Frequenzen deutlich über 1 kHz hinaus ausgedehnt werden. Bei zukünftigen Untersuchungen würden dann nicht nur sämtliche Grundtöne, sondern auch die höheren Teiltöne erfasst werden, die bekanntlich den Klang des Cellos wesentlich mitbestimmen.

Wenn ein anderer Steg in das Instrument eingesetzt ist, der das Verhalten des Cellos tatsächlich ändert, dürfte sich dies in mehrerlei Hinsicht äußern. Zum Einen könnte der Spieler bemerken, dass sich die Spielbarkeit seines Instruments verändert hat. Darüber hinaus nimmt sein Ohr (im Nahfeld) eventuell einen veränderten Klang wahr. Zum Anderen wird ein aufmerksamer Zuhörer feststellen, dass das Instrument (im Fernfeld) nun anders klingt. Unter dem letztgenannten Aspekt das Cello bisher noch nicht betrachtet worden. Ob sich Unterschiede in Klängen nachweisen lassen, die ein Spieler auf demselben Cellos mit dem Steg A oder dem Steg N hervorgerufen hat, soll deshalb in einem nachfolgenden Bericht untersucht werden.

Der Journalistin und Drehbuchautorin Ina-Maria Schaffer sei herzlich dafür gedankt, dass sie den Kontakt zwischen der Meisterwerkstätte in Regensburg und dem Institut für Mechanik hergestellt hat. Dem Geigenbaumeister Thomas Goldfuss gebührt Dank dafür, dass er sein Meisterinstrument vertrauensvoll für wissenschaftliche Untersuchungen zu Verfügung gestellt und zusammen mit seinem Meisterkollegen Zeit in den Laboren des Instituts verbracht hat. Herzlicher Dank geht auch an die Ehefrau des Autors, die das Manuskript mit großem Langmut gegengelesen hat.

LITERATUR

- Beldie, I.P., Darstellung des Geigenkörpers als ein Schwingungssystem mit vier Freiheitsgraden im tiefen Frequenzbereich. Dissertation TU Berlin, Berlin 1975.
- Chladni, E.F.F., Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787.
- Cremer, L., Die Physik der Geige. Hirzel, Stuttgart 1981.
- Day, R.K. und Janson, E.V., Vibration modes of neck, scroll and fingerboard. *Catgut Acoustical Society J.* (1993). 2, Nr. 4 Serie II, 11 – 14.
- Eggers, F., Untersuchung von Corpus-Schwingungen am Violoncello. *Acustica* 9 (1959), 453 – 465.
- Eggers, F., Mechanische Admittanzmessungen am Violoncello. *Fortschritte der Akustik (DAGA '87)*, DPG, Bad Honnef 1987, 697 – 700.
- Eggers, F., Mechanical impedance measurements around the violoncello. *Acustica* 74 (1991), 264 – 270.
- Fleischer, H., Über die Schalleistung von Kreisstrahlern. Forschungsbericht aus dem Institut für Mechanik, Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik, Hochschule der Bundeswehr München, Neubiberg 1984.
- 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., Schwingung und Schall eines Hackbretts. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/04. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2004.
- Fleischer, H., Vibration of an electric bass guitar. *Acustica united with acta acustica* 91 (2005), 247 - 260.
- Fleischer, H., Schwingungen eines Cellos. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/09. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2009.
- Fleischer, H., Zwicker, T., Investigating dead spots of electric guitars. *Acustica united with acta acustica* 85 (1999), 128 -135.
- Fletcher, N.H., Rossing, T.D., *The physics of musical instruments*. 2. Aufl. Springer, New York 1998.
- 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.
- Jansson, E., Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acustica united with acta acustica* 83 (1997), 337 -341.

- Jarczyk, J.C, Analyse von Celloklängen. Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2007.
- Kishi, K. und Osanai, T., Vibration analysis of the cello bridge using the finite element method, J. Acoust. Soc. Jpn. (J) 47 (4), 274 - 281 (in japanischer Sprache).
- Pape, W.; Boettcher, W.: Das Violoncello. Bau, Technik, Repertoire. 2. Aufl. Schott, Mainz 2005.
- Pfaffelhuber, K., Das dynamische Verhalten der Geige an der Anstreichstelle und sein Einfluss auf das Klangsignal. Dissertation an der TU München, München 1993.
- Reinecke, W., Übertragungseigenschaften des Streichinstrumentenstegs. Catgut. Acoust. Soc. Newsletter Nr. 19 (1973), 26 – 34.
- Reinecke, W. und Cremer, L., Application of holographic interferometry to vibrations of the bodies of string instruments. JASA 48 (1970), 988 – 992.
- VIAS: <http://iwk.mdw.ac.at/news/deutsch/iwkevents/smartvias/svias1.htm> (2009).
- Woodhouse, J. On the „bridge hill“ of the violin. Acustica united with acta acustica 91 (2005), 155 -165.
- Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Cello> (2009).
- Zimmermann, P., Theoretische Untersuchungen zur Funktion des Steges bei Streichinstrumenten. Acustica 18 (1967), 297 – 299.

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., Korpusschwingungen 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.

Anfragen richten Sie bitte an

Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
D-85577 Neubiberg

oder

helmut.fleischer@unibw.de