

SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN AN DER VIOLINE

von

Helmut Fleischer

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

Heft 1/10 der Reihe

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

ISSN 1430-936X

Herausgeber:

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

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

Postanschrift:

LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland

Fleischer, Helmut:
Schwingungsuntersuchungen an der Violine
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/10
Neubiberg 2010
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

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

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

SCHWINGUNGSUNTERSUCHUNGEN AN DER VIOLINE

Zusammenfassung

Zwei Violinen werden untersucht. Die Schwingungen der Vorderseite der ersten Violine werden mittels Laser-Scanning-Vibrometrie im Frequenzbereich bis 1,6 kHz bestimmt. Der Steg wird mit einem elektrodynamischen Schwingerreger parallel und senkrecht zur Decke angeregt. Für jede Anregungsrichtung werden etwa zwanzig charakteristische Betriebsschwingungen gefunden. Eine anschließende Modalanalyse schränkt die Anzahl auf 12 bis 16 Eigenmoden ein.

Die komplexe mechanische Admittanz wird an zwei unterschiedlichen Stegen auf einer zweiten Violine im Bereich bis 4 kHz gemessen. Ein elektrodynamischer Schwingerreger und ein Impedanzmesskopf (mit Masse-Kompensation), orientiert in einem Winkel von 30 Grad an beiden Ecken der Stege, werden verwendet. Unterschiedliche Messpunkte und -orientierungen führen auf unterschiedliche Ergebnisse. Bis etwa 2 kHz sind für beide Stege die Admittanz-Kurven sehr ähnlich; sie spiegeln die Schwingungen des Instrumentenkörpers wider. Für höhere Frequenzen zeigt einer der Stege eine deutlich größere Admittanz, was offenbar eine Eigenschaft des Steges ist. Somit erweist sich die Admittanz als leistungsfähiges Werkzeug, um die relevanten Schwingungen des Korpus zu identifizieren und das Übertragungsverhalten des Steges zu kennzeichnen.

INVESTIGATING THE VIBRATIONS OF THE VIOLIN

Summary

Two violins are investigated. The vibrations of the front of the first violin are ascertained by Laser Scanning Vibrometry in the frequency range up to 1.6 kHz. The bridge is excited by an electro-dynamic shaker in parallel and perpendicular to the top plate. For each direction of excitation about twenty characteristic operating deflection shapes are found. A consecutive Modal Analysis reduces this number to 12 through 16 eigenmodes.

The complex mechanical admittance is measured at two different bridges on a second violin in the range up to 4 kHz. An electro-dynamic shaker and an impedance head (with mass compensation), oriented in an angle of 30 degree at both corners of the bridges, are used. Different measuring positions and orientations lead to different results. Up to about 2 kHz, the admittance curves are very similar for both bridges; they reflect the vibrations of the instrument body. For higher frequencies, one of the bridges exhibits a significantly greater admittance which is supposed to be a feature of the bridge. Thus, measuring the admittance proves as a powerful tool for identifying the relevant vibrations of the body and characterizing the transfer behaviour of the bridge.

INHALT

VORWORT VON PROFESSOR HUGO FASTL

1.	EINLEITUNG	1
2.	AUFGABENSTELLUNG.....	5
2.1.	Motivation der Untersuchungen.....	5
2.2.	Messung der Admittanz an zwei unterschiedlichen Stegen.....	5
2.3.	Messung der Schwingungen an einer anderen Violine.....	7
2.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	8
3.	SCHWINGUNGEN DES KORPUS BEI ANREGUNG IN NORMALEN- RICHTUNG.....	10
3.1.	Messung.....	10
3.2.	Betriebsschwingungen bei Anregung in Normalenrichtung, dargestellt als Color Map.....	13
3.3.	Vergleich zwischen Betriebsschwingungen und Moden.....	18
3.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	26
4.	SCHWINGUNGEN DES KORPUS BEI TANGENTIALER ANREGUNG.....	27
4.1.	Messung.....	27
4.2.	Betriebsschwingungen bei tangentialer Anregung, dargestellt als Color Map.....	29
4.3.	Vergleich zwischen Betriebsschwingungen und Moden.....	33
4.4.	Zusammenfassende Bemerkung.....	38
5.	VERGLEICHE.....	39
5.1.	Korpusschwingungen der Violine bei unterschiedlichen Richtungen der Anregung.....	39
5.1.1.	Anregung in tangentialer Richtung.....	39
5.1.2.	Anregung in Normalenrichtung.....	41
5.1.3.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede.....	43
5.2.	Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur.....	43
5.2.1.	Nomenklatur.....	44
5.2.2.	Holografische Interferometrie.....	44
5.2.3.	Speckle-Interferometrie.....	48
5.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	50
6.	MECHANISCHE ADMITTANZ.....	52
6.1.	Definition und Bedeutung.....	52
6.2.	Messungen.....	53
6.2.1.	Messaufnehmer und Versuchsaufbau.....	53
6.2.2.	Messanordnung.....	55
6.3.	Zusammenfassende Bemerkung.....	57
7.	ERGEBNISSE DER ADMITTANZ-MESSUNGEN.....	58
7.1.	Komplexe Admittanz.....	58
7.1.1.	Komplexe Admittanz am traditionellen Steg.....	58

7.1.2.	Komplexe Admittanz am Steg DAC	61
7.2.	Reproduzierbarkeit	63
7.2.1.	Betrag der Admittanz am traditionellen Steg	63
7.2.2.	Betrag der Admittanz am Steg DAC	65
7.3.	Vergleich der Messergebnisse	66
7.3.1.	Admittanz am bassseitigen Ende	67
7.3.2.	Admittanz am diskantseitigen Ende	68
7.4.	Zusammenfassende Bemerkung	69
8.	VERGLEICH MIT DEN ERGEBNISSEN ANDERER AUTOREN	71
8.1.	Aufbau und Funktion des Steges	71
8.2.	Stegimpedanz	74
8.3.	Stegadmittanz	75
8.3.1.	Punkt-Admittanz	77
8.3.2.	Transfer-Admittanz (Geschwindigkeit und Kraft in unterschiedlichen Richtungen)	79
8.3.3.	Transfer-Admittanz (Geschwindigkeit und Kraft in gleicher Richtung)	82
8.4.	Der „ <i>Bridge Hill</i> “	86
8.5.	Zusammenfassende Bemerkung	89
9.	STEGADMITTANZ UND DECKENSCHWINGUNGEN.....	91
9.1.	Maxima der Admittanz	91
9.1.1.	Traditioneller Steg	91
9.1.2.	Steg DAC	92
9.2.	Relevante Betriebsschwingungen	94
9.3.	Zusammenfassende Bemerkung	98
10.	ABSCHLIESSENDE DISKUSSION.....	99
	LITERATUR.....	108

VORWORT

Im vorliegenden Band der Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik behandelt Helmut Fleischer eine Thematik, die über die Wissenschaft hinaus auch beim breiten Publikum großes Interesse findet: Kann das "Geheimnis" altitalienischer Meistergeigen wie Stradivari oder Guaneri mit modernen Methoden der Schwingungsanalyse ergründet werden?

Wie nicht anders zu erwarten, erliegt Helmut Fleischer nicht der Versuchung medienwirksamer Effekthascherei mit schnellen Antworten, sondern er studiert zielstrebig Schwingungen der Decke von Violinen mit besonderer Berücksichtigung verschieden geformter Stege. Im Gegensatz zu zahlreichen früheren, in der Literatur bekanntgewordenen Untersuchungen beziehen sich die Messungen auf spielfertige Instrumente. Bei ein und derselben Meistergeige wechselt der Maître Luthier eigenhändig den Steg aus, so dass für Vergleiche der Schwingungsmuster optimale Bedingungen herrschen, da das Instrument jeweils von Meisterhand spielfertig gemacht wurde.

Obwohl Untersuchungen einzelner Komponenten einer Violine wie Decke, Boden, Zargen, Steg etc. durchaus ihre Berechtigung haben mögen, ist angesichts des äußerst komplexen Zusammenwirkens der einzelnen Bestandteile die Aussagekraft hinsichtlich der Qualität des Gesamtinstruments eingeschränkt. Dementsprechend argumentiert Helmut Fleischer, dass Betrachtungen einzelner Komponenten auf der Basis Finiter Elemente (FEM) in der Regel nur Teilbereiche abdecken werden. Insbesondere unterschiedliche Randbedingungen können die resultierenden Schwingungsformen ganz erheblich beeinflussen.

Als an der Praxis angelehnte Lagerung wählt Helmut Fleischer eine Dreipunktlagerung in einem Instrumentenständer bzw. einem Violinenhalter des Instrumentenbauers. Mittels Laser-Vibrometrie untersucht er Schwingungen der Decke von Violinen. Die dabei ermittelten Betriebsschwingungsformen (ODS) sind mit Eigenschwingungsformen hoch korreliert, aber nicht zwangsläufig identisch: Zwar bildet sich jede Eigenschwingung in einer entsprechenden Betriebsschwingung ab, jedoch repräsentiert nicht jede Betriebsschwingung auch eine Eigenmode.

Diese strenge Trennung von ODS und Moden wird in der Literatur oft recht salopp gehandhabt, wodurch Vergleiche der Ergebnisse mit Literaturdaten erschwert werden. Dennoch zeigen Helmut Fleischers Daten zahlreiche Parallelen zu Literaturergebnissen, die er sehr ausführlich diskutiert. Mit Hochachtung berichtet er von Messungen, die teilweise mehr als vierzig Jahre zurückliegen und angesichts der damals zur Verfügung stehenden eingeschränkten Messtechnik als bewunderungswürdige Meilensteine betrachtet werden sollten. Allerdings rät er von der in der Literatur häufiger verwendeten Einteilung in Luft-, Decken-, und Korpusmoden ab, da in der Praxis immer alle Teile der Violine gemeinsam das Schwingungsgeschehen beeinflussen.

Die Frage nach der Wirkung unterschiedlich gestalteter Stege behandelt Helmut Fleischer - wie schon in Heft 3/09 für das Cello - im vorliegenden Band auch für die Violine anhand der Admittanz, die vereinfacht als ein Maß für die "Schwingfreudigkeit" betrachtet werden kann. Je nachdem, ob der Steg von oben oder von der Seite angeregt wird, entspricht dies musikalische gesehen eher *pizzicato* bzw. *arco*. Insbesondere im letztgenannten Fall, der Simulation gestrichener Saiten, kommt dem Ort der Schwingungsanregung entscheidende Bedeutung zu: Je nachdem, ob der Shaker den Steg der Violine bassseitig (nahe der G-Saite) oder diskant-

seitig (nahe der e-Saite) anregt, ergeben sich unterschiedliche Verläufe der Admittanz. Es ist also mit der musikalischen Praxis nicht vereinbar, von *einer* Schwingfreudigkeit zu sprechen. Vielmehr können je nach Anstreichort unterschiedliche Admittanzverläufe auftreten. Trotz dieser komplexen Zusammenhänge kann Helmut Fleischer nachweisen, dass ein von ihm untersuchter neuartiger Steg der Violine ab der viergestrichenen Oktave eine deutlich höhere Schwingfreudigkeit als traditionelle Stegvarianten aufweist. Die zugehörigen Pegelerhöhungen lassen Unterschiede um bis zu 10 dB erwarten.

Bis zum wissenschaftlich stringent abgesicherten Nachweis dieser fulminanten Unterschiede sind noch weitere Schritte empfehlenswert. Während in der vorliegenden Studie Stegadmittanz und Korpuschwingungen an verschiedenen Instrumenten bestimmt wurden ist es äußerst erstrebenswert, beide Messungen am *gleichen* Instrument durchzuführen. Darüber hinaus bleibt ein weiterer, ganz wesentlicher Schritt: Letztendlich wird die Qualität eines Musikinstruments mit dem menschlichen Gehör beurteilt. Deshalb bieten sich für die Zukunft psychoakustische Untersuchungen an, um die Brücke zwischen Schwingungen als Schallreizen und den zugehörigen Hörwahrnehmungen zu schlagen.

München, im Januar 2010

Hugo Fastl

1. EINLEITUNG

Im vorliegenden Band der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“ wird ein Streichinstrument, die Violine bzw. Geige, betrachtet. Nach der Systematisierung von Hornbostel und Sachs (1914) gehört die Violine, ebenso wie das Violoncello (Fleischer 2009a und b), zur Gruppe der gestrichenen Chordophone. Die Bezeichnung Violine wird im Folgenden bevorzugt gebraucht, da sie schön klingt und international gebräuchlich ist. Das deutsche Wort Geige ist völlig synonym, wird aber weniger häufig verwendet.

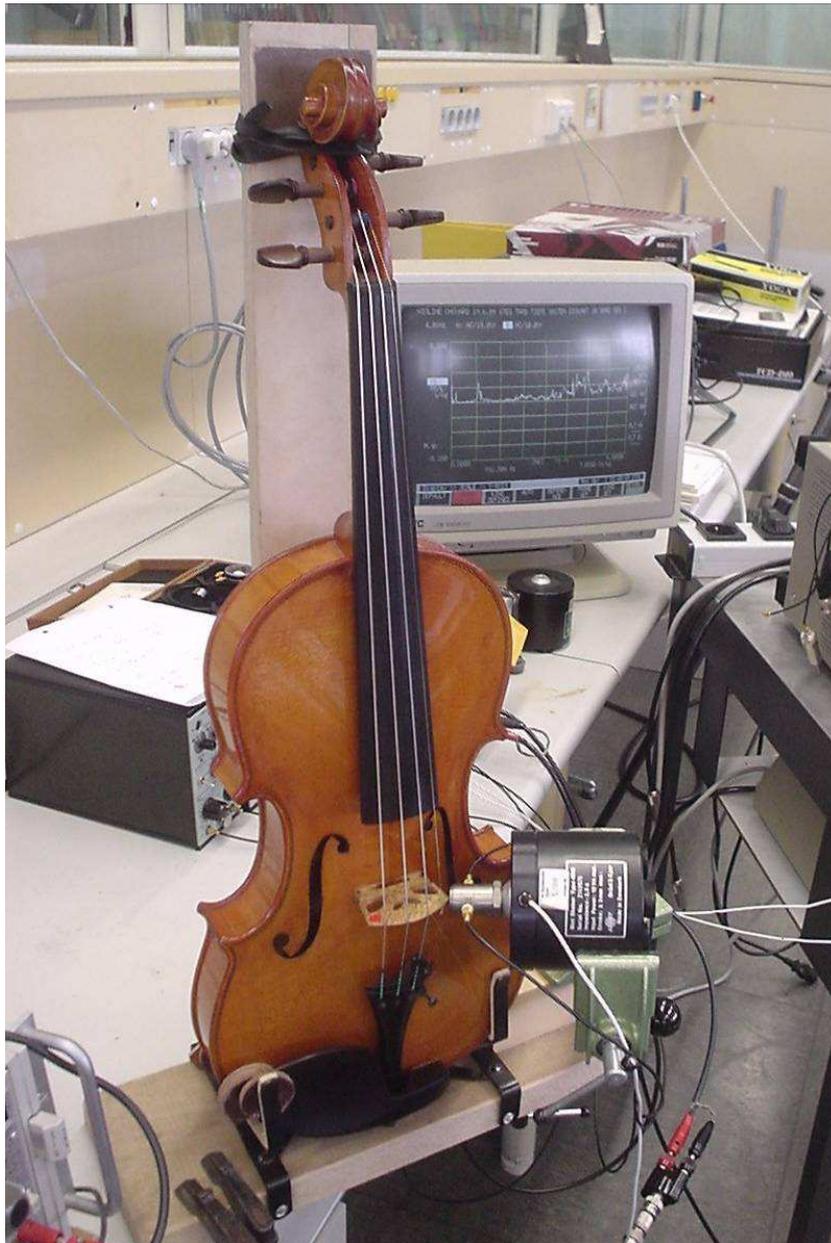


Abb. 1. 1. Violine bei der Messung der Stegadmittanz.

Die Violine dürfte das Musikinstrument sein, das so häufig wie kein anderes Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtungen war und ist. Die physikalischen Grundlagen ihrer Funktion

werden in einigen Standardwerken behandelt. An deutschsprachigen Werken ist insbesondere die „Physik der Geige“ (Cremer 1981) zu erwähnen. In „*The Physics of Musical Instruments*“ von Fletcher und Rossing (1998) ist das Kapitel 10 den Streichinstrumenten, vor allem der Violine, gewidmet. Zahlreiche Originalarbeiten mit dem Stand von 1993 sind in den beiden Sammelbänden „*Research Papers in Violin Acoustics: 1975 – 1993*“, herausgegeben von Hutchins (1996), zusammen gestellt. Im Zusammenhang mit Schwingungsmessungen an einem Cello hat der Autor auch nach Parallelen zur Violine gesucht und einige Gemeinsamkeiten gefunden (Fleischer 2009a).

Ein wesentlicher Bestandteil eines Streichinstruments ist der Steg, der die Schwingung der Saite an den Instrumentenkörper weiterleitet. Der Steg steht hier im Mittelpunkt. Mit ihm hat sich bereits vor längerer Zeit Zimmermann (1967) analytisch befasst. Experimentell haben sich z.B. Hacklinger (1978) und einige weitere Autoren mit dem Steg beschäftigt und Messungen zur Übertragung mechanischer Größen wie Kraft und Schwinggeschwindigkeit durchgeführt.

Abb. 1.1 lässt erkennen, wie die vier Saiten der Violine am unteren Ende, bevor sie am Saitenhalter enden, über den Steg gespannt sind. Der Steg (unbehandeltes helles Hartholz, meist Ahorn) steht mit seinen zwei Füßen auf der Decke. Die gespannten Saiten drücken ihn gegen die Decke. Dieses Element stellt die Verbindung zwischen dem Generator (der schwingenden Saite) und dem Schallstrahler (dem Korpus) her. 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.

Beim Spielen fixiert der Violinist sein Instrument zwischen Schlüsselbein und Kinn und hält es waagrecht. Üblicherweise streicht er die vier Saiten mit einem Bogen. Leer, d.h. wenn sie nicht durch Greifen verkürzt werden, sind die Saiten auf die Noten g bzw. G3 (Grundfrequenz 196 Hz), d¹ bzw. D3 (294 Hz), a¹ bzw. A4 (440 Hz) sowie e² bzw. E5 (659 Hz) gestimmt. Der normale Tonumfang des Instruments reicht somit vom kleinen g in der dritten Oktave bis hin zur fünften oder gar sechsten Oktave. Die Grundfrequenzen der Töne, die auf der Violine gespielt werden können, umfassen eine Spanne von etwa zweihundert Hertz bis zu etwa zweitausend Hertz.



Abb. 1.2. Die beiden Stege der Werkstätte H.R. Chouard, die für die Admittanz-Messung zur Verfügung standen.

Die Violine, die Abb. 1.1 zeigt, hat Maître Luthier Hermé Raoul Chouard, ein oberbayerischer Saiteninstrumentenbaumeister mit französischen Wurzeln, geschaffen. Er hat auch die zwei Stege (Abb. 1.2) gefertigt, die in das Instrument eingesetzt waren. Abb. 1.3 zeigt ihn beim Befestigen seiner Violine in einem Stativ. Dank seiner Initiative konnten im Institut für Mechanik an diesem Instrument experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. An einem anderen Instrument waren früher schon Schwingungsmessungen mit dem Laser-Vibrometer vorgenommen worden (Winter und Wörner 2000). Über einige dieser Resultate ist bereits in einem vorhergehenden Band dieser Reihe (Fleischer 2009a) berichtet worden. Im vorliegenden Bericht sollen die Ergebnisse der Schwingungsmessungen am Violinkorpus mit den Resultaten von Messungen an den Stegen in Verbindung gebracht werden.



Abb. 1.3. Instrumentenbaumeister H.R. Chouard, wie er seine Violine zur Messung der Stegadmittanz in ihre Halterung einspannt.

Die beiden Stege, die nacheinander in die Violine eingesetzt waren, sind im Foto von Abb. 1.2 nebeneinander abgebildet. Sie weisen von ihrer Bauart her deutliche Unterschiede auf, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. Man erkennt die Kerben, in denen die vier Saiten aufliegen. Nicht nur die Violine, die für die Admittanz-Messung zur Verfügung stand, sondern auch beide Stege stammen aus handwerklicher Fertigung und sind von hoher Qualität. Der rechte ist musterrechtlich geschützt. Es war nicht etwa der Autor, sondern der Instrumentenbaumeister selbst, der das Auswechseln erledigte. Abb. 1.3 zeigt ihn dabei, wie er die

Violine danach wiederum in ihre Halterung setzt, damit erneut gemessen werden kann. Somit darf in allen Fällen vorausgesetzt werden, dass das untersuchte Instrument spielbereit und in einem fachgerechten Zustand war, der professionellen Ansprüchen genügt.

Von den vielfältigen Messaufgaben, die im Zusammenhang mit der Violine vorstellbar sind, wurden einige wenige herausgegriffen und bearbeitet. Zunächst werden Schwingungen des Korpus, insbesondere der Vorderseite (Decke, Griffbrett, Saitenhalter) behandelt. Eine umfangreiche Sammlung von Betriebsschwingungsformen der Vorderseite und zugehöriger Eigenmoden wird präsentiert. Darüber hinaus wird versucht, 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 an den beiden seitlichen Begrenzungen des Steges gemessen. Diverse Messergebnisse, die sich auf die untersuchten Stege beziehen, werden dargestellt. Die eigenen Ergebnisse werden mit Resultaten verglichen, die sich in der Literatur finden. Abschließend wird versucht, Beziehungen zwischen der gemessenen Admittanz am Steg und den Schwingungsformen des Instrumentenkörpers herzustellen.

2. AUFGABENSTELLUNG

Bereits seit Langem sind Schwingungen, Schallfelder und Schallsignale von Musikinstrumenten ein Forschungsgebiet des Instituts für Mechanik; siehe hierzu zum Beispiel die Liste der „Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik“, die am Ende dieses Bandes eingefügt ist. Schwingungen einer Violine wurden bereits im Jahr 2000 im Rahmen einer Studienarbeit untersucht (Winter und Wörner 2000). Wie bereits in der Einleitung geschildert, hat sich in jüngerer Zeit die Möglichkeit eröffnete, mechanische Messungen an hochwertigen Stegen einer hochwertigen Violine durchzuführen. Es erschien erfolgversprechend, die verschiedenartigen Messergebnisse zusammen zu fassen und nach Gemeinsamkeiten zu suchen. Die Analyse der Resultate der früheren Laser-Untersuchungen an einer Violine soll dazu beitragen, die Ergebnisse der neueren Messungen leichter interpretieren zu können.

2.1. Motivation der Untersuchungen

Die Saiteninstrumenten-Werkstätte Hervé Raould Chouard aus Freising hat den Anstoß dazu gegeben, vergleichende Messungen an zwei unterschiedlichen Violinstegen durchzuführen. Ein genormtes Messverfahren liegt nicht vor, so dass eine geeignete Mess-Strategie zu wählen war. Dabei sollte die Aussagekraft der Messergebnisse möglichst groß, der dafür notwendige Aufwand möglichst gering sein.

Nach längeren Diskussionen wurde entschieden, die mechanische Admittanz nahe bei den stegseitigen Auflagepunkten der Saite experimentell zu bestimmen. Dazu sollte an ein und dieselbe Violine mit den zwei unterschiedlichen Stegen gemessen werden. Um den Tonbereich möglichst vollständig zu erfassen, der den Klang der Violine kennzeichnet, sollten Frequenzen bis in die viergestrichenen bzw. 7. Oktave, d.h. bis 4000 Hz, betrachtet werden. Die so gewonnenen Ergebnisse werden in den Kapitel 6 und 7 präsentiert.

2.2. Messung der Admittanz an zwei unterschiedlichen Stegen

Einen Steg fachgerecht in ein Streichinstrument einzufügen, erfordert Kenntnis und Fingerspitzengefühl. Diese Arbeit erledigte der Instrumentenmachermeister. Er selbst setzte jeden der beiden Stege in ein und dieselbe Meistervioline ein. Abb. 2.1 zeigt ihn bei dieser Tätigkeit. Die Violine stammt ebenfalls aus der Werkstätte H. R. Chouard. Danach wurde das Instrument gestimmt. Bei der Messung der Admittanz befanden sich die Stege in ein und demselben Instrument, das jeweils in spielbereitem Zustand war. Die Stege wurden somit unter natürlichen Randbedingungen als Teil eines vollständigen Systems untersucht. Die Messung fand im Jahr 2009 in den Laboren des Instituts für Mechanik statt.



Abb. 2.1. Instrumentenbaumeister H.R. Chouard beim Wechseln des Steges.

In Abb. 2.2 sind die beiden Stege abgebildet, die der Instrumentenmachermeister H.R. Chouard zur Verfügung gestellt hatte. Der linke Steg ist von herkömmlicher Bauart; er wird im Folgenden als „traditionell“ bezeichnet. Der rechte Steg ist eine Erfindung des Saiteninstrumentmachers H.R. Chouard, patentrechtlich geschützt und wird „DAC-Steg“ genannt. Beide Stege wurden von H.R. Chouard entworfen und gefertigt.



*Abb. 2.2. Die beiden Stege, die in das Instrument eingesetzt werden konnten.
Links: traditioneller Typ; rechts: Typ DAC, musterrechtlich geschützt.*

In Abb. 2.3 ist die Violine zu erkennen, in die der Steg DAC eingesetzt ist. Wie in Kapitel 6 näher erläutert wird, wurde die Admittanz an zwei Stellen in zwei Richtungen gemessen. Das Bild bezieht sich auf die Messung auf der Seite der Basssaiten. Der Schwingerreger, der links im Foto zu sehen ist, ließ sich auch so orientieren, dass auf der Seite der Diskantsaiten gemessen werden konnte, ohne dass die Violine aus ihrer Halterung genommen werden musste.



Abb. 2.3. Violine, in die der Steg DAC eingesetzt ist.

2.3. Messung der Schwingungen an einer anderen Violine

Bereits im Jahr 2000 haben Winter und Wörner in einer gemeinsamen Studienarbeit Schwingungen einer anderen, etwas schlichteren Violine gemessen. Sie interessierten sich für die Biegeschwingungen der Vorderseite des Korpus. Diese wurden berührungsfrei mit dem institutseigenen Scanning-Vibrometer, einem Erzeugnis der Firma Polytec, gemessen.



Abb. 2.4. Violine bei der Vibrometer-Messung der Oberflächenschwingung.

Abb. 2.4 lässt erkennen, dass Winter und Wörner (2000) die Violine in einem Gitarrenständer und damit ähnlich gelagert haben, wie dies auch bei der Messung der Admittanz der Fall war. Im dargestellten Beispiel wurde der Steg von links parallel zur Decke angeregt. Dies entspricht weitgehend der Anregung, wie sie bei der Admittanz-Messung von Abb. 2.3 vorlag. Der Laserstrahl des Vibrometers tastete die Oberfläche von Decke, Hals und Griffbrett ab. Unter Nutzung des Doppler-Effekts erfasste er an einer Vielzahl von Messpunkten berührungsfrei die Schwinggeschwindigkeit. Die anschließende Verarbeitung im Computer des Messsystems liefert die Frequenzen und Formen von Betriebsschwingungen der Vorderseite. In einer weiterführenden Modalanalyse wurde untersucht, inwieweit die „charakteristischen Betriebsschwingungen“ mit den „Eigenschwingungen“ der Violin-Vorderseite übereinstimmen. Es ist zu vermuten, dass sich die beobachteten Schwingungen in der Stegadmittanz widerspiegeln. Dies sollte anschließend überprüft werden.

2.4. Zusammenfassende Bemerkung

Es liegen experimentelle Untersuchungen für zwei Violinen vor. Die älteren Ergebnisse beziehen sich auf die Schwingungen der Vorderseite einer Violine mittlerer Qualität. Die jüngeren Ergebnisse wurden bei Admittanz-Messungen an einem Meisterinstrument mit zwei unterschiedlichen Stegen ermittelt. Zunächst werden in den Kapiteln 3 bis 5 die Schwingungsmes-

sungen behandelt. Danach werden in den Kapiteln 6 und 7 die Methode und die Ergebnisse der Admittanz-Messung präsentiert. Kapitel 8 beinhaltet Vergleiche mit Ergebnissen aus der Literatur. Abschließend soll in Kapitel 9 versucht werden, mögliche Zusammenhänge zwischen Admittanz und Schwingungen zu erkennen und aufzuzeigen.

3. SCHWINGUNGEN DES KORPUS BEI ANREGUNG IN NORMALENRICHTUNG

Im Folgenden werden einige Schwingungsmessungen an einer Violine präsentiert, die Winter und Wörner (2000) im Rahmen ihrer Studienarbeit am Institut für Mechanik durchgeführt haben. Ziel der Arbeit war es zunächst, die Schwingungen der Oberfläche berührungsfrei zu messen und Betriebsschwingungen zu extrahieren. Danach galt es zu untersuchen, in welcher Beziehung Betriebsschwingungen und Eigenmoden zueinander stehen. Bei der untersuchten Violine handelte es sich um ein Schülerinstrument mittlerer Qualität aus Privateigentum, das mittlerweile für Experimente nicht mehr zur Verfügung steht.

3.1. Messung

Gegenstand der beschriebenen Messungen sind die Schwingungen der Ober- bzw. Vorderseite des Instruments, d.h. von Decke, Hals, Griffbrett und Saitenhalter. Primär interessieren Biegeschwingungen, die zur Abstrahlung von Schall führen können. Gemessen wurden sie mit einem Laser-Scanning-Vibrometer, hergestellt von der Firma Polytec. Neben dem zentralen Computer ist dessen wesentlicher Bestandteil ein Messkopf, der den Laser, die Galvo-Spiegel für die gezielte Ablenkung des Laserstrahls sowie eine Videokamera enthält.

Abb. 3.1. Die Violine ist für die Messung in einem Gitarrenständer gelagert; der Steg wird senkrecht zur Decke angeregt.

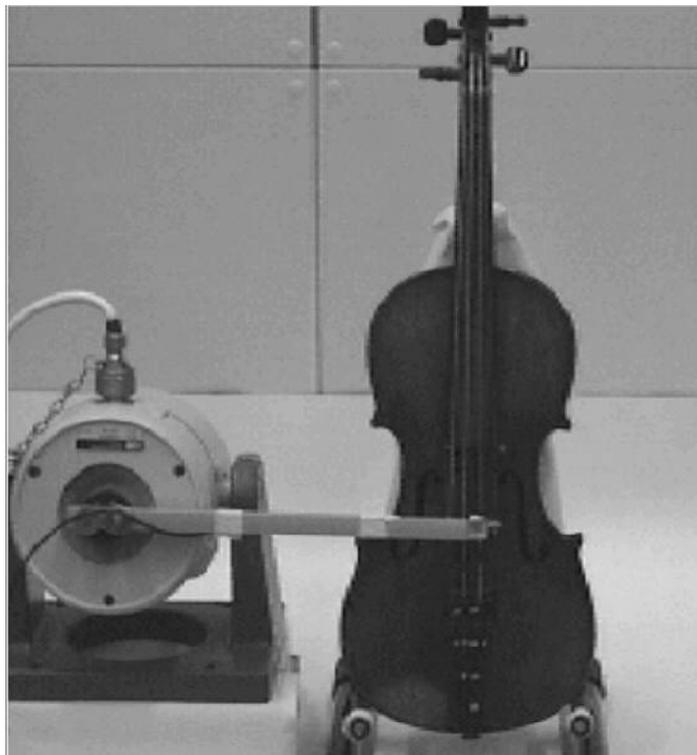


Abb. 3.1 gibt ein schwarz-weißes Videobild wieder, wie es diese Kamera liefert. Die Violine war in einem Instrumentenständer gelagert, der hinter dem Instrument sichtbar ist. Abb. 3.1 zeigt die Lagerung an drei Punkten, zwei an der unteren Zarge und einem am Korpus nahe dem Hals. Auf diese Art war das Instrument an der Rückseite gestützt und nahezu senkrecht gehalten. Der Hals blieb frei.

Links im Foto von Abb. 3.1 erkennt man den elektrodynamischen Schwingerreger vom Typ LDS V404. Er regte über einen Ausleger den Steg weitgehend mittig zwischen den Auflagepunkten der A- und der D-Saite in Normalenrichtung, d.h. senkrecht zur Decke, an. Als Signal wurde ein periodisches Rauschen verwendet, das den Analyseparametern angepasst war und das über einen Leistungsverstärker B&K 2706, hergestellt von der Firma Brüel & Kjaer, verstärkt wurde. Zwischen das rechte Ende des Auslegers und den Steg war ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer B&K 8200 geschaltet, der unter Vorlast gegen den Steg drückte. Sein Signal wurde über einen Ladungsverstärker B&K 2635 in den zentralen Computer eingespeist. Damit war die vom Schwingerreger herrührende Wechselkraft erfasst, mit der das Instrument am Steg senkrecht zur Decke zum Schwingen gebracht wurde.

Der Messkopf steuerte über seine Galvo-Spiegel den Laserstrahl nacheinander auf Punkte eines Messgitters, das der Versuchsleiter anhand des Videobildes vorgegeben und auf dem Untersuchungsobjekt platziert hatte. Abb. 3.2 zeigt dieses Gitter. Es umfasste nahezu 300 Messpunkte. Der Kopf der Violine blieb ausgespart. Aus der Dopplerverschiebung der Frequenz des reflektierten gegenüber dem originalen Laserlicht kann auf die Schwinggeschwindigkeit der Oberfläche geschlossen werden. Die Oberfläche muss dabei nicht berührt werden. Auf diese Weise erhält man Aufschluss über diejenige Komponente der Schwinggeschwindigkeit, welche dieselbe Richtung wie der Laserstrahl hat. Da Decke, Saitenhalter und Griffbrett gekrümmt sind, wurde nicht immer ganz exakt, aber zumindest weitgehend die wandnormale Komponente der Bewegung erfasst.

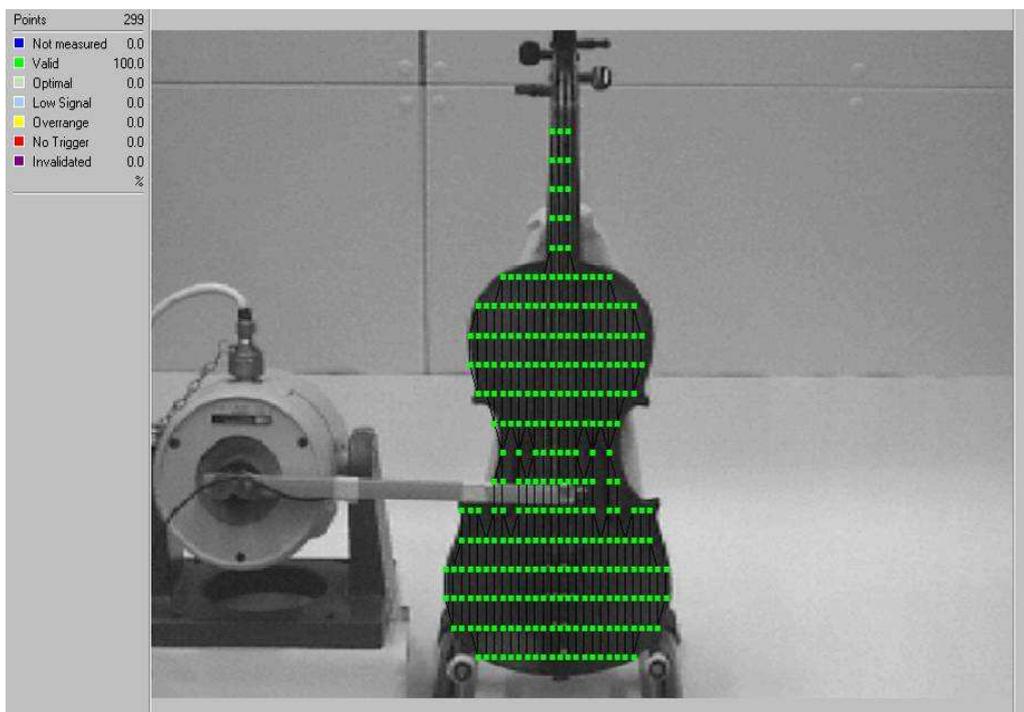


Abb. 3.2. Die Violine, gelagert im Gitarrenständer, mit dem Messgitter.
Die Bedeutung der Farben ist links oben erklärt; sämtliche Messpunkte sind „valid“.

Es wurde an jedem Messpunkt über vier Messungen gemittelt und damit das Signal-Stör-Verhältnis verbessert (*Complex Averaging*). Die Frequenzauflösung betrug 2 Hz; die Bandbreite war 1600 Hz. Aus der Eingangsgröße - der Kraft senkrecht auf den Steg - und der Ausgangsgröße - der wandnormalen Schwinggeschwindigkeit am jeweiligen Messpunkt - wurde im

zentralen Computer mittels *Fast Fourier Transformation* (FFT) für jeden Punkt eine Übertragungsfunktion bestimmt. Diese stellt eine Transfer-Admittanz dar.

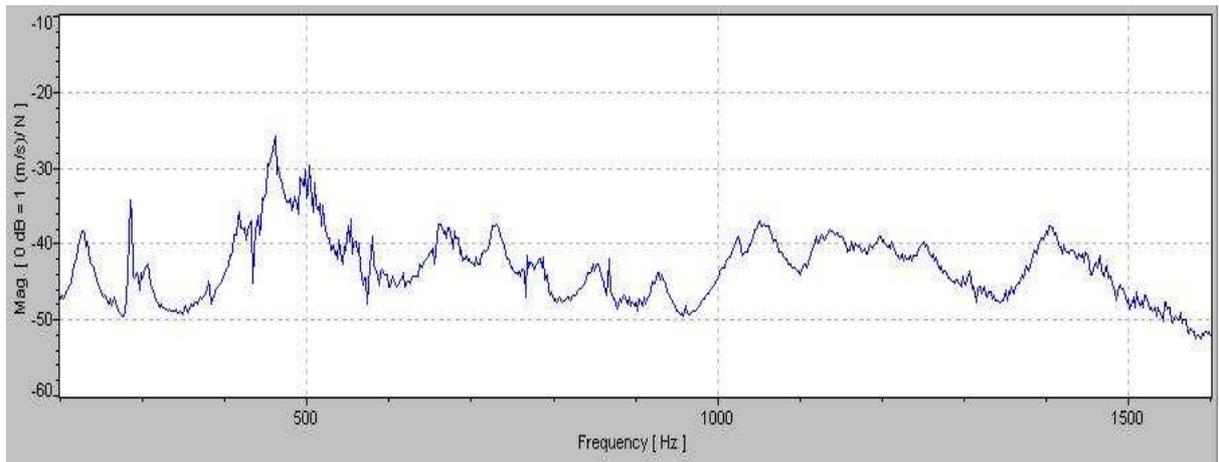


Abb. 3.3. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion (Transfer-Admittanz).

Durch Mittelung sämtlicher 299 Punkt-Übertragungsfunktionen folgt eine Gesamt-Übertragungsfunktion, wie sie Abb. 3.3 wiedergibt. Dargestellt ist der Frequenzbereich von 200 Hz bis 1600 Hz. Es sind zahlreiche lokale Maxima zu erkennen, von denen manche sehr dicht benachbart liegen. Der Experimentator wählte Maxima aus und markierte sie. Wie Abb. 3.4 zeigt, wurden auf diese Weise zahlreiche „Bänder“ gelegt. Für die dadurch ausgewählten „charakteristischen Frequenzen“ wurden aus den Messdaten „charakteristische Betriebs-schwingungsformen“, im Englischen „*Operating Deflection Shapes*“, bestimmt und veranschaulicht. Das Adjektiv „charakteristisch“ wird, sofern keine Verwechslungsgefahr besteht, im Weiteren vielfach weggelassen.

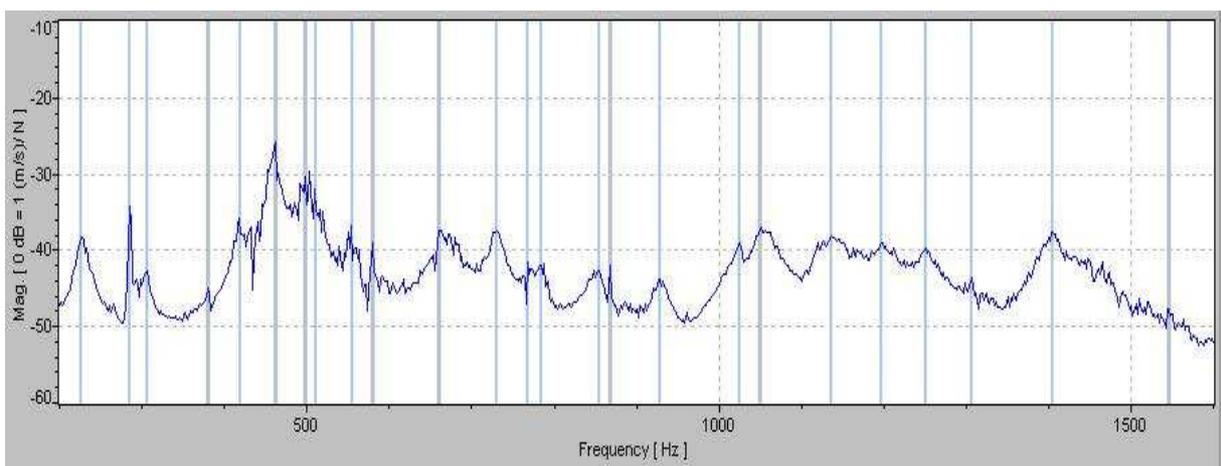


Abb. 3.4. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion; die Frequenzen, für welche die Betriebs-schwingungsformen dargestellt werden sollen, sind durch Bänder markiert.

Eine Auswahl charakteristischer Betriebs-schwingungen findet sich im folgenden Abschnitt. Die Bewegungsmuster, die man für die charakteristischen Frequenzen erhält, sind dem Videobild überlagert und als *Color Map* visualisiert. In Abschnitt 3.3 ist als weitere Darstellung ein 3D-Bild verwendet.

3.2. Betriebsschwingungen bei Anregung in Normalenrichtung, dargestellt als *Color Map*

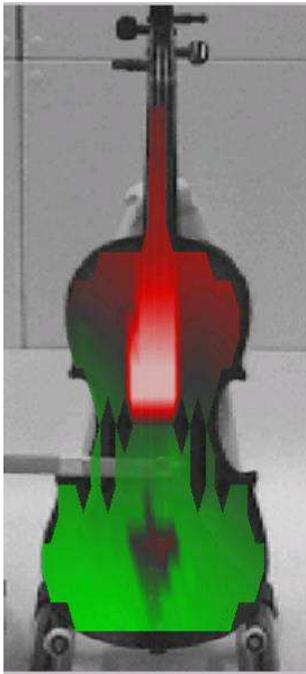
Die Originaldaten von Winter und Wörner (2000) wurden einer erneuten sorgfältigen Auswertung unterzogen. Ausgewählte Ergebnisse sind in Abb. 3.5 zuerst so dargestellt, dass sich über das schwarz-weiße Bild der Violine das farbige Schwingungsbild legt. Das Videobild lässt erkennen, wie die Violine gelagert und angeregt war. Das Bild der Schwingung, wie sie das Auswertungsprogramm der Vibrometer-Software animiert darstellt, ist zu einem geeigneten Zeitpunkt „eingefroren“. Rot bzw. grün stehen für Bewegung aus der Ebene heraus bzw. für Bewegung in die Ebene hinein. Die Helligkeit der Farben ist ein Maß für die Schwingungsamplitude. Dunkle Linien charakterisieren Knotenlinien, helle Bereiche Schwingungsbäuche.

Der tiefste Teilton, den die Violine abstrahlt, hat die Frequenz 196 Hz (Note g bzw. G3) und definiert damit die untere Begrenzung des „Betriebs-Frequenzbereiches“. Aus den Messergebnissen oberhalb dieser Frequenz wurden 24 charakteristische Schwingungsformen zwischen 226 Hz und 1596 Hz ausgewählt und in Abb. 3.5 zusammen gestellt. Die Bezeichnung M nimmt ein Ergebnis des Abschnitts 3.3 vorweg. Es deutet darauf hin, dass in der Nähe der betrachteten charakteristischen Betriebsschwingung eine Eigenmode der in Klammern angegebenen Eigenfrequenz liegt, die der Mode gemäß Abb. 3.6 hinsichtlich Frequenz und Schwingungsmuster ähnelt.

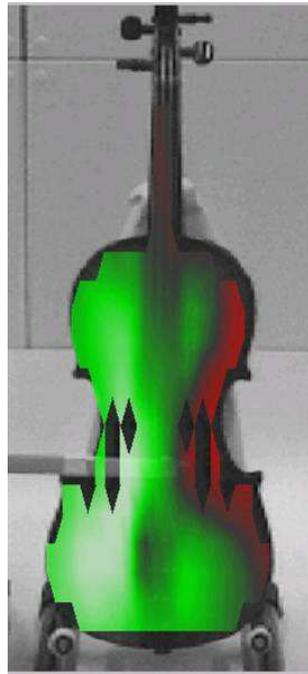
Bei nicht allzu hohen Frequenzen schwingt der obere Teil der Decke in Gegenrichtung zum unteren Teil. Mit steigender Frequenz bildet sich eine Knotenlinie in Längsrichtung aus; der linke Teil bewegt sich dann gegenphasig zum rechten. Allmählich prägen sich weitere Bereiche aus, die jeweils in Gegenphase schwingen. Es hat den Anschein, dass sich der linke Teil der Decke, unter dem der Bassbalken geleimt ist, nicht so fein unterteilt wie der rechte Teil, unter dem der Stimmstock eine Verbindung zum Boden herstellt. Bei steigender Frequenz erscheinen Knotenlinien auch in Querrichtung. Die roten bzw. grünen Bereiche werden immer kleiner; der Korpus unterteilt sich immer feiner. Es bilden sich immer mehr Gebiete aus, in denen die Decke sich gegensinnig zu den benachbarten Gebieten bewegt.

Einige der Schwingungsbilder, insbesondere die in Abb. 3.5.a, sind durch Bewegungen des Griffbretts/Halses gekennzeichnet. Dies bezieht sich vor allem auf Frequenzen, die etwas oberhalb von 196 Hz liegen. Bei 226 Hz bewegt sich das Griffbrett (hellrot) in Phase zum Saitenhalter (dunkelrot). Bei 284 Hz schwingt der Saitenhalter in gleicher Phase wie das Griffbrett und der rechte Teil der Decke. Die Schwingung bei 306 Hz ist durch extreme Bewegung des Griffbretts in Gegenphase zur Decke gekennzeichnet. Dieses „Eigenleben“ des Halses wurde schon häufig beobachtet. So haben Day und Jansson (1998) Schwingungen des Halses, des Griffbretts und der Schnecke experimentell untersucht und mit dem mechanischen Standardmodell des Balkens nachgebildet.

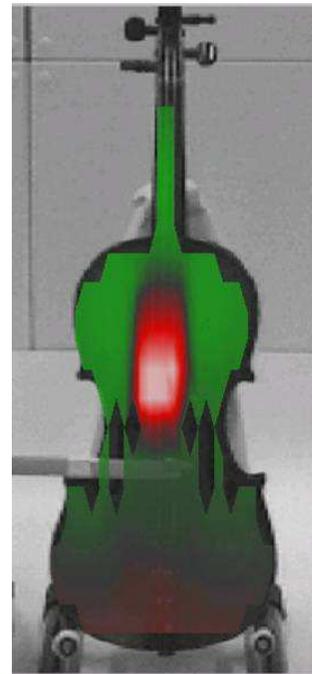
Bei 380 Hz und 418 Hz bewegt sich der Saitenhalter sehr stark, und zwar in Gegenphase zum Griffbrett. Bei 462 Hz schwingen dagegen Saitenhalter und Griffbrett gleichphasig. Es ist zu vermuten, dass diese teilweise gleichphasigen, teilweise auch gegenphasigen Bewegungen von Saitenhalter und Griffbrett sich auf die Saitenschwingungen auswirken. Sie dürften somit die Spielbarkeit des Instruments beeinflussen. Dieser Aspekt soll hier festgehalten, jedoch nicht weiter verfolgt werden.



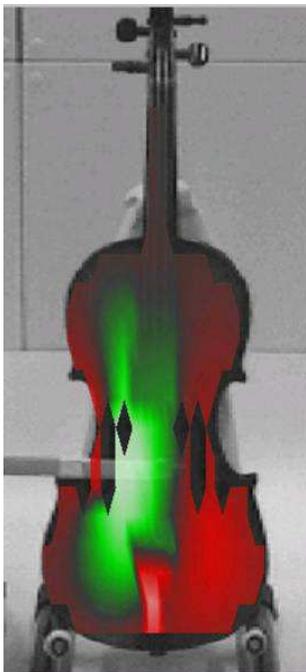
226 Hz (M: 229 Hz)



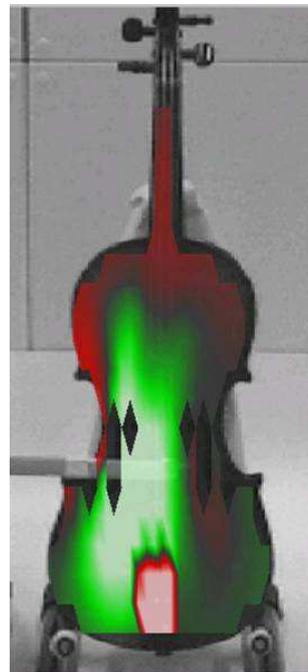
284 Hz (M: 284 Hz)



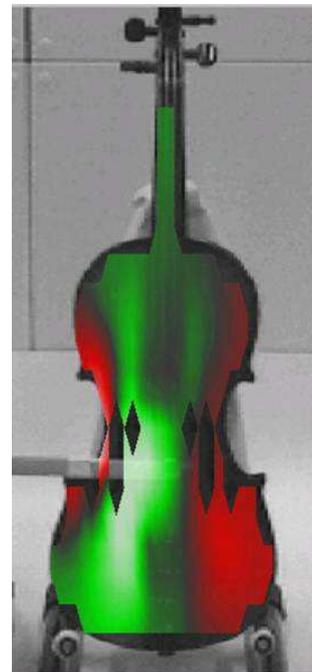
306 Hz



380 Hz (M: 304 Hz)

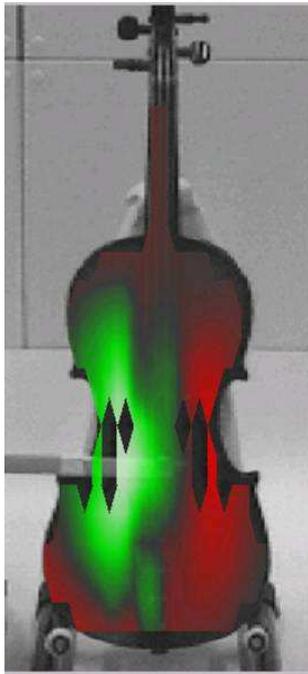


418 Hz (M: 435 Hz)

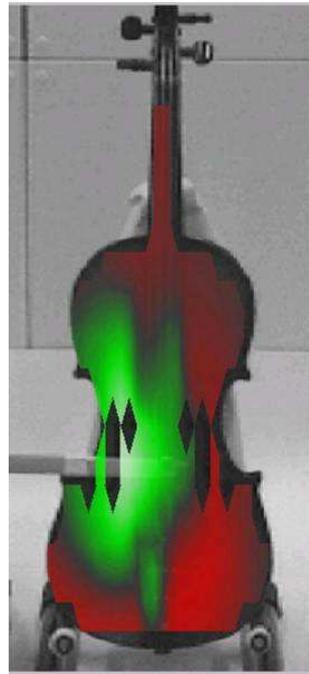


462 Hz (M: 459 Hz)

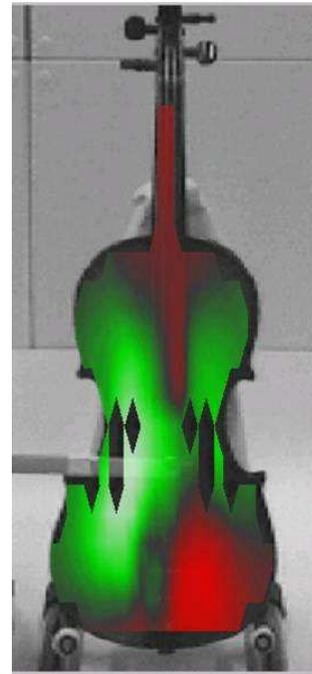
Abb. 3.5.a. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.



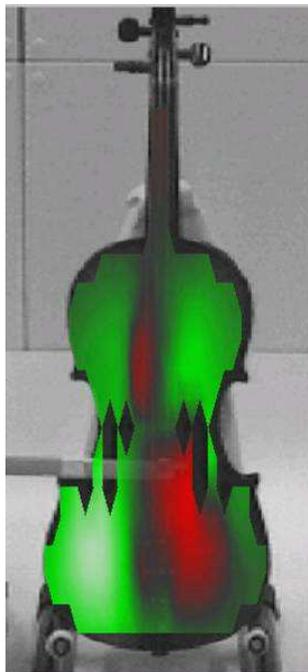
498 Hz (M: 502 Hz)



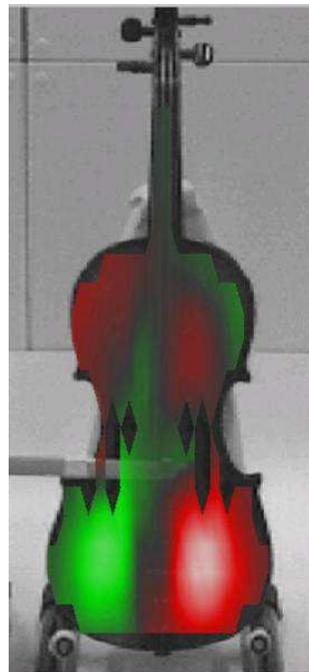
510 Hz (M 520 Hz)



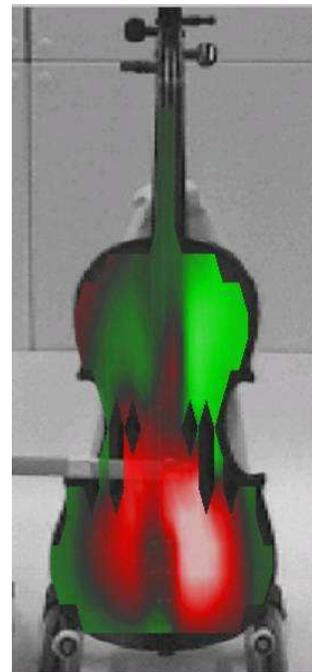
554 Hz (M: 553 Hz)



660 Hz (M: 664 Hz)

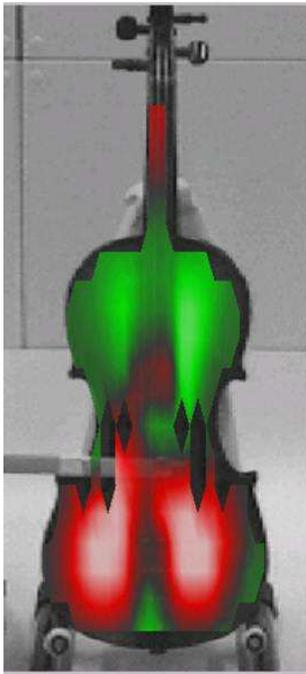


730 Hz

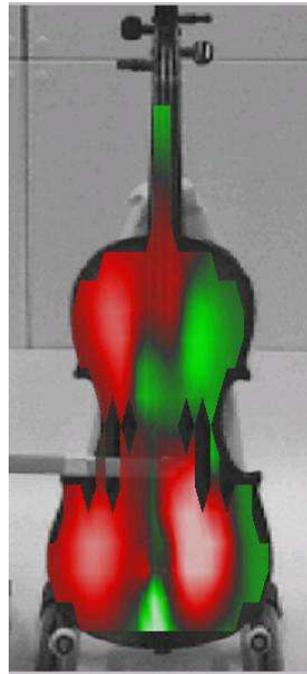


768 Hz

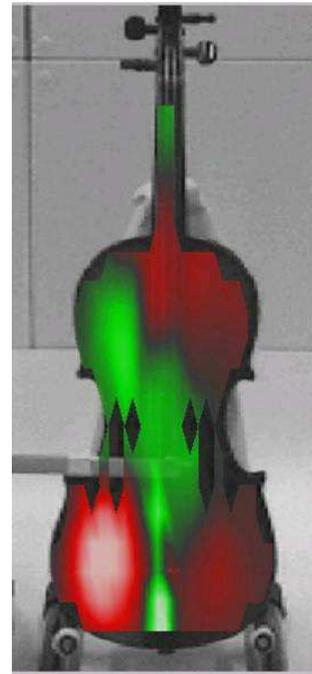
Abb. 3.5.b. Betriebschwingungsformen einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.



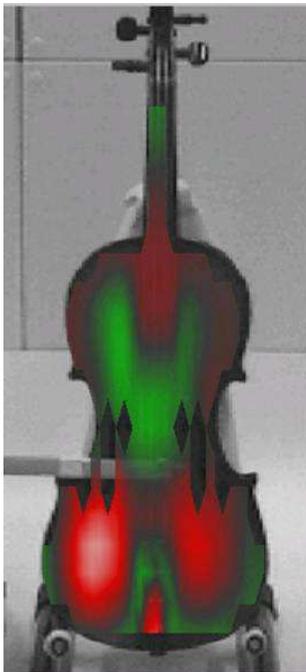
784 Hz



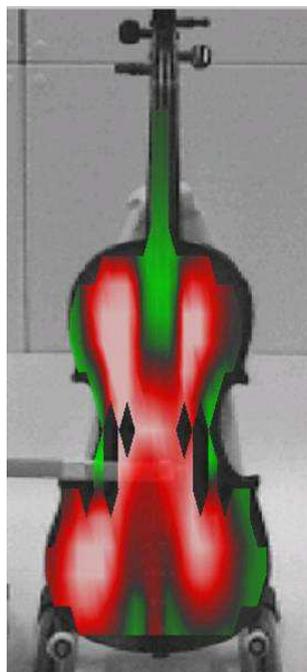
854 Hz (M: 852 Hz)



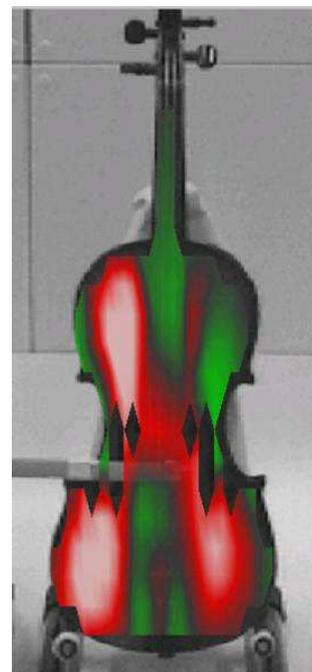
868 Hz



928 Hz (M: 926 Hz)

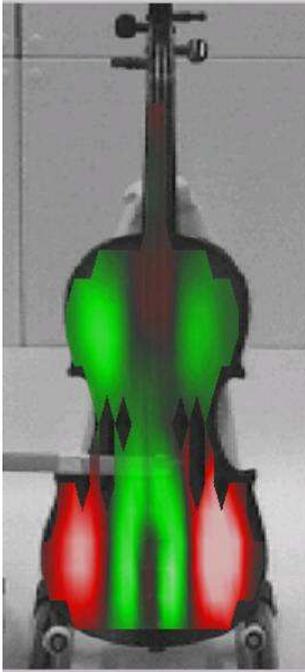


1024 Hz (M: 1030 Hz)

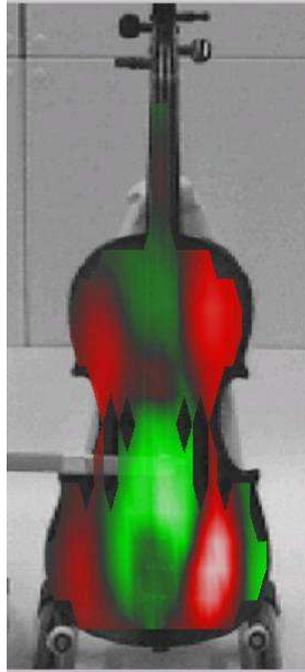


1050 Hz

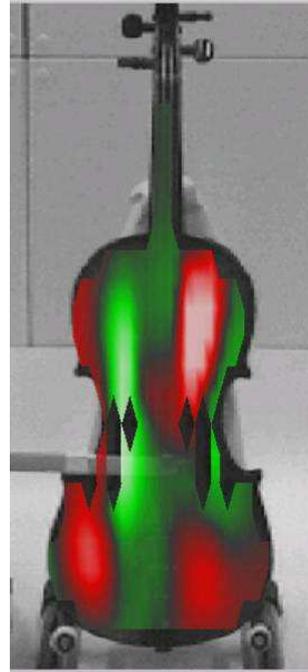
Abb. 3.5.c. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.



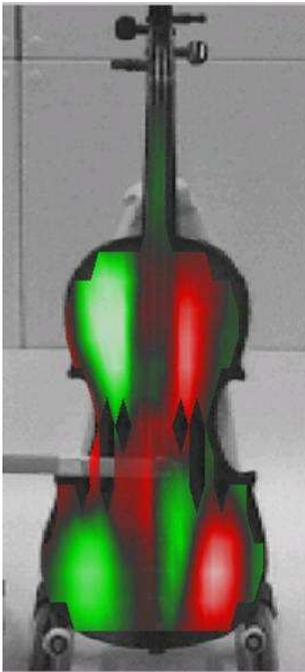
1136 H (M: 1140 Hz)z



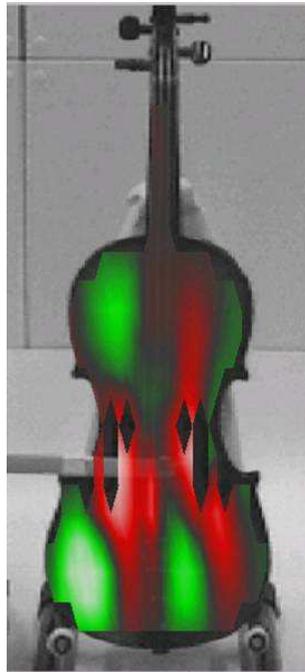
1196 Hz (M: 1190 Hz)



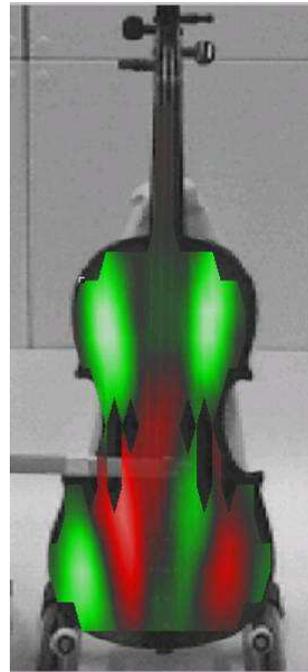
1250 Hz



1306 Hz (M: 1340 Hz)



1404 Hz



1556 Hz

Abb. 3.5.d. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

Je höher die Frequenz wird, desto zahlreicher werden die roten Bereiche, die sich in Gegenphase zu den grünen bewegen. Insgesamt fällt auf, dass die schwingenden Felder stets in Längsrichtung gestreckt sind. Dies dürfte seinen Grund in der Geometrie der Decke und in ihrer richtungsabhängigen Steifigkeit haben. In Richtung der Holzfasern (längs bzw. senkrecht in Abb. 3.5) dehnen sie sich weiter aus als in Querrichtung. Auf diese Erscheinung haben bereits Reinicke und Cremer (1970) hingewiesen. Die dargestellten Schwingungsformen werden nicht im Detail diskutiert. Sie sollen vielmehr mit den Eigenmoden verglichen werden. Der Vergleich soll die bislang noch offene Frage klären, inwieweit die Betriebschwingungen mit den Eigenmoden dieses Streichinstruments übereinstimmen.

3.3. Vergleich zwischen Betriebsschwingungen und Moden

Was Moden sind und wie Modalanalyse abläuft, hat Marshall (1986b) aus Anlass der Untersuchung von Musikinstrumenten behandelt. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass unter Modalanalyse häufig ein Verfahren verstanden wird, das als „Hämmerchen-Methode“ bezeichnet wird. Hierbei wird mit „*Fixed Response*“ gearbeitet. Wie bei Marshall (1985) wird meist ein Beschleunigungsaufnehmer an einem festen Punkt aufgeklebt und die Anregung, in aller Regel durch einen Impulshammer mit Kraftaufnehmer, wandert. Es ist vorausgesetzt, dass sich das System linear verhält und das Reziprozitätsprinzip gilt. Ebenso lässt sich – wie im vorliegenden Beispiel – mit „*Fixed Excitation*“ arbeiten. Die Anregung bleibt fest und die Bewegungsantwort wird an unterschiedlichen Punkten der schwingenden Struktur gemessen. Wie die Übertragungsfunktionen Bewegung/Kraft, die Grundlage der Modalanalyse sind, zustande kommen, ist rein eine Frage der Zweckmäßigkeit und sonst völlig unerheblich. Sie können beispielsweise mit einem Kraftimpuls, einem Gleitsinus oder - wie hiermit einem periodischen Rauschen bestimmt werden.

Richardson (1997) hat den Unterschied zwischen Betriebsschwingungen (*Operating Deflection Shapes*), wie sie in Abb. 3.5 zusammen gestellt sind, und Eigenmoden bzw. -schwingungen anschaulich herausgearbeitet. Eigenmoden sind die „Atome“ einer jeden Kontinuumschwingung und mathematisch streng definiert. Sie sind orthogonal, was bedeutet, dass jede Mode einzigartig ist und keine Anteile einer anderen Mode enthält. Ob es sich bei den charakteristischen Betriebsschwingungen von Abb. 3.5 um Moden handelt, wird im vorliegenden Abschnitt untersucht. Winter und Wörner (2000) haben mit dem Vibrometer die Messdaten ermittelt, die zu den bereits dargestellten Betriebsschwingungsformen geführt haben. Sie haben diese Daten exportiert und denselben Datensatz im Programmpaket StarModal der Firma SMS einer Modalanalyse unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.6 zusammen gefasst.

Im Bereich von 76 Hz bis 1450 Hz wurden auf diese Weise 20 Moden identifiziert und die Eigenfrequenzen und -formen gefunden, die in der rechten Spalte von Abb. 3.6.a bis g angeordnet sind. Die Eigenschwingungsformen sind als 3D-Drahtgitter gezeichnet. Zum Vergleich stehen daneben charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungen, wie sie sich bei der direkten Auswertung der Vibrometer-Daten mit der Software des Polytec-Systems ergeben haben. Des einfacheren Vergleiches willen sind die Schwingungsmuster ebenfalls als 3D-Bilder dargestellt. Neben der Verformung des Gitters sind unterstützend Farben verwendet. Rot kennzeichnet die Bewegung aus der Ebene heraus, Grün die Bewegung in die Ebene hinein.

Die vier Schwingungen von Abb. 3.6.a treten bei Frequenzen auf, die unterhalb des Betriebsbereiches der Violine liegen. Hinsichtlich der Abstrahlung von Schall dürften sie keine unmittelbare musikalische Bedeutung haben. Jedoch eignen sie sich aber gut dafür, Schwingungsmuster und -frequenzen zu validieren.

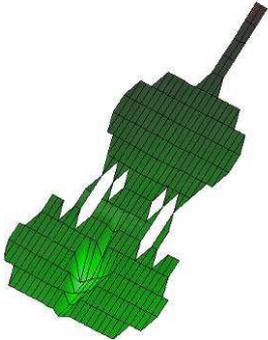
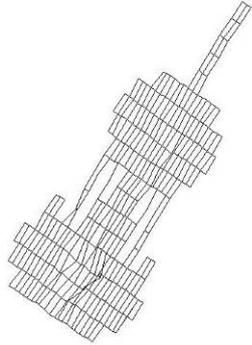
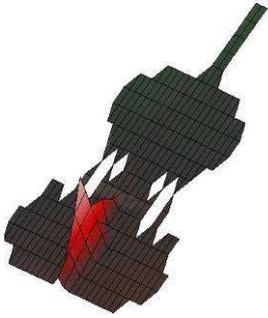
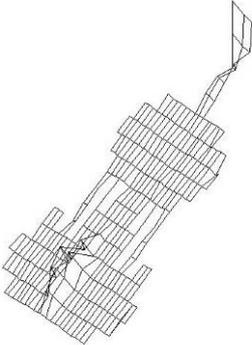
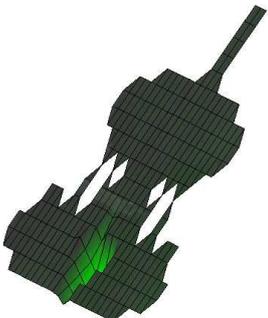
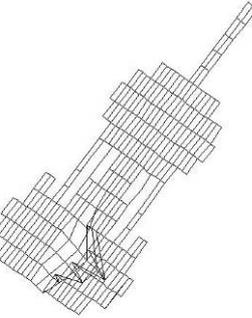
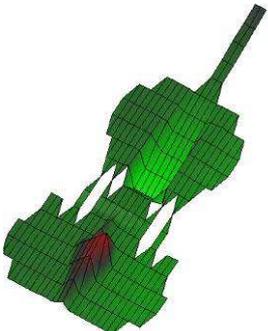
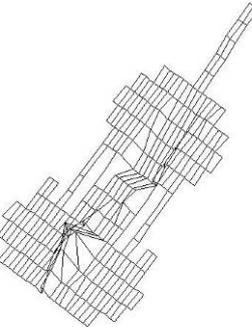
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
76 Hz 	70,7 Hz 
98 Hz 	98,2 Hz 
112 Hz 	111,5 Hz 
160 Hz 	154,0 Hz 

Abb. 3.6.a. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

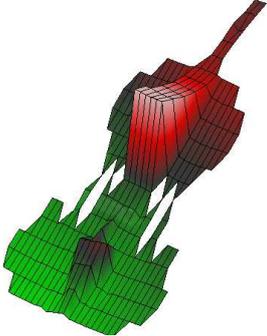
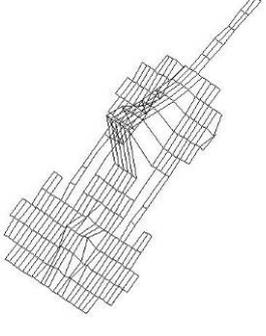
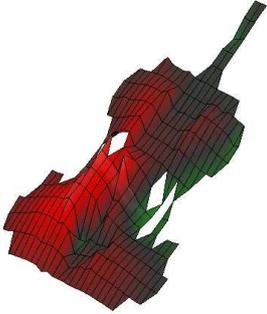
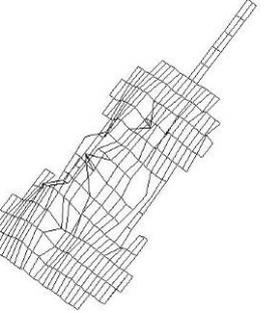
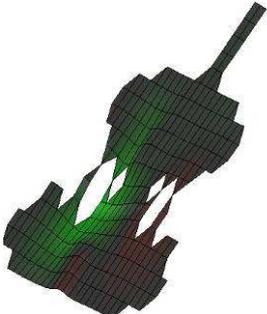
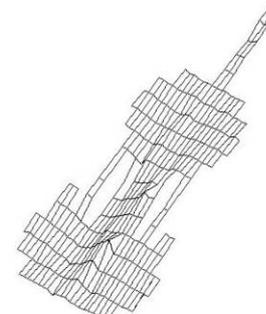
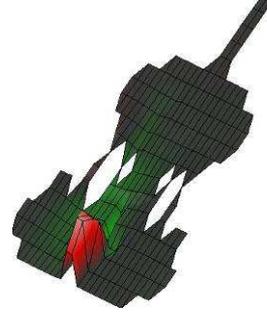
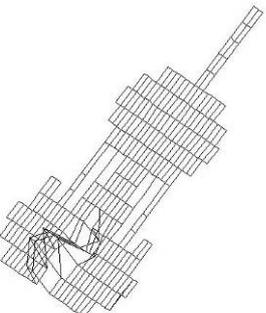
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
226 Hz 	228,8 Hz 
284 Hz 	283,5 Hz 
380 Hz 	303,8 Hz 
418 Hz 	434,8 Hz 

Abb. 3.6.b. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

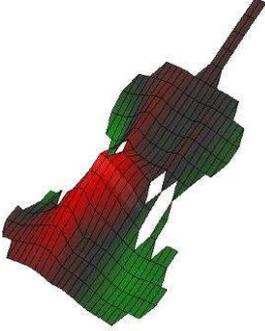
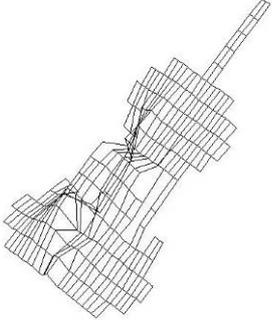
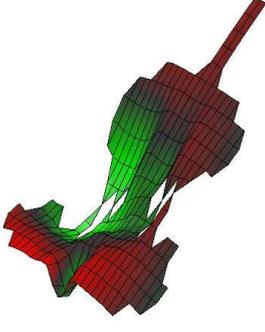
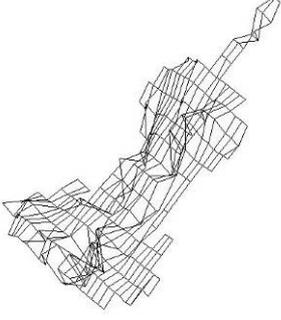
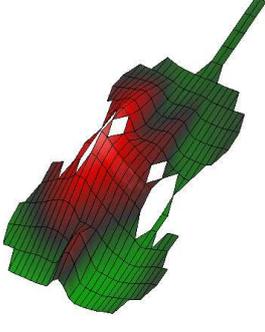
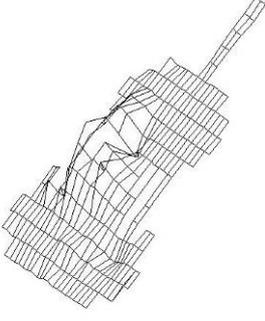
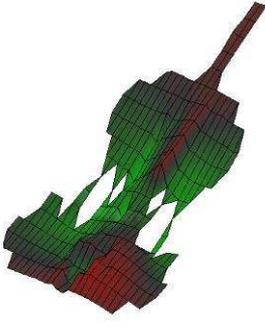
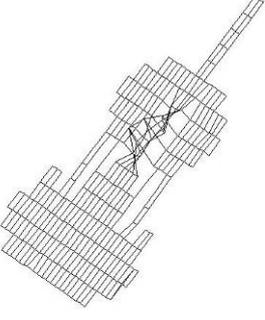
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
462 Hz 	459,2 Hz 
498 Hz 	502,3 Hz 
510 Hz 	519,7 Hz 
554 Hz 	552,8 Hz 

Abb. 3.6.c. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung..

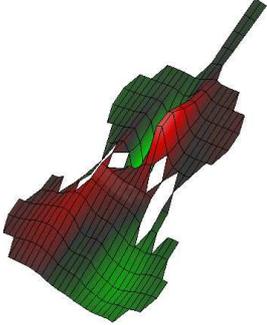
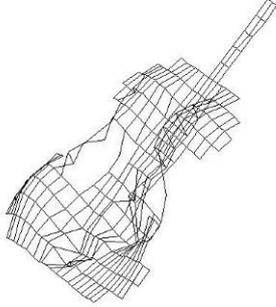
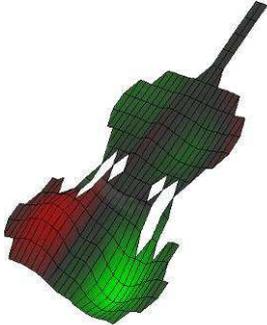
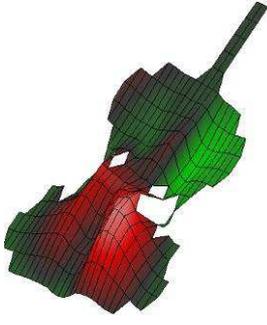
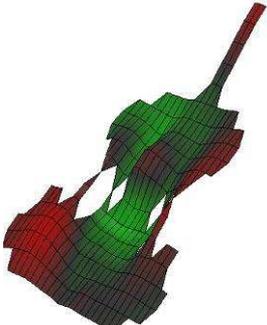
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
660 Hz 	664,0 Hz 
730 Hz 	
768 Hz 	
784 Hz 	

Abb. 3.6.d. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

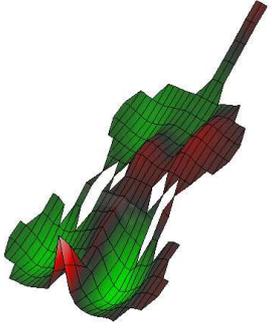
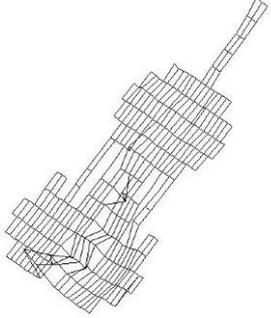
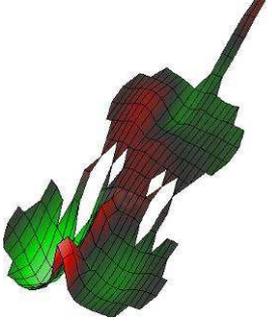
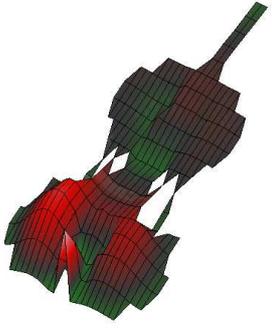
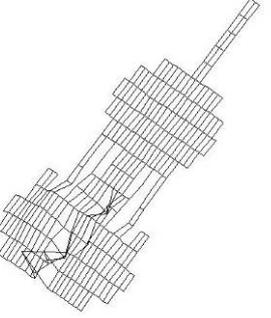
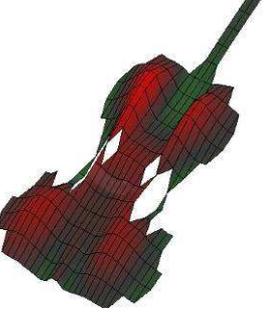
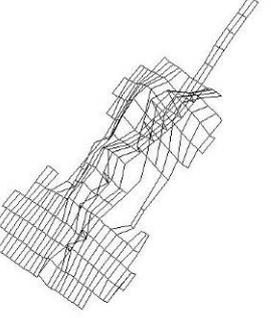
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
854 Hz 	852,0 Hz 
868 Hz 	
928 Hz 	926,2 Hz 
1024 Hz 	1030 Hz 

Abb. 3.6.e. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

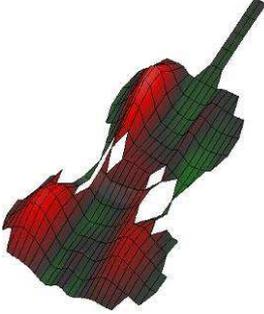
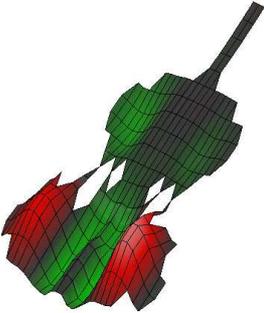
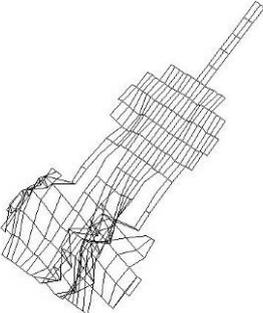
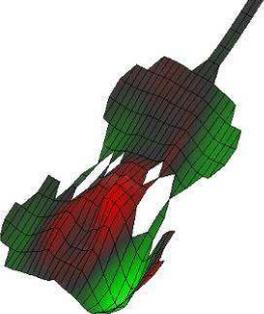
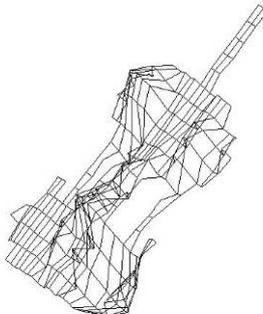
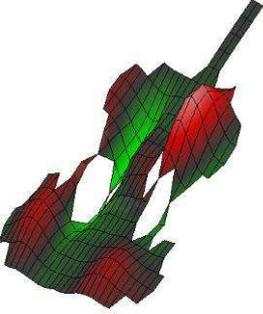
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
1050 Hz 	
1136 Hz 	1140 Hz 
1196 Hz 	1190 Hz 
1250 Hz 	

Abb. 3.6.f. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

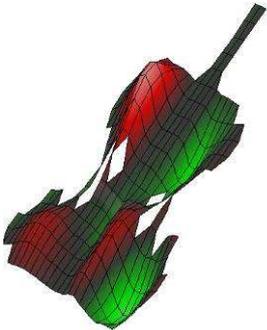
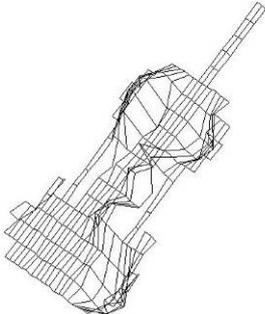
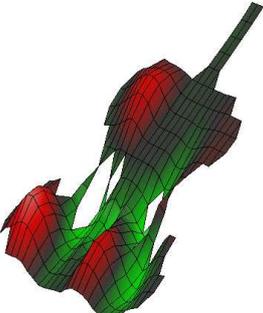
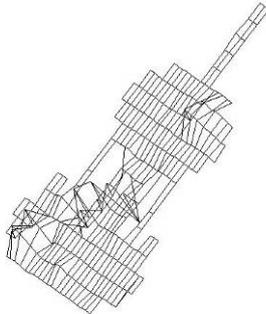
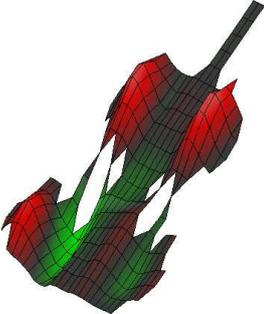
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
1306 Hz 	1340 Hz 
1404 Hz 	
	1450 Hz 
1556 Hz 	

Abb. 3.6.g. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei Anregung des Steges in Normalenrichtung.

Insgesamt sind in Abb. 3.6 nach Maßgabe der Frequenzen 27 charakteristische Betriebschwingungen und 20 Eigenmoden einander gegenüber gestellt. In einem Fall (Abb. 3.4.g; 1450 Hz) steht der Eigenmode keine Betriebsschwingung gegenüber. In 19 Fällen kann Übereinstimmung festgestellt werden; einer jeden Mode ist eine sehr ähnliche Betriebsschwingung zugeordnet. Nicht nur die Schwingungsmuster, sondern auch die Frequenzen stimmen dann erkennbar miteinander überein. In den verbleibenden acht Fällen deuten lokale Maxima in der Gesamt-Übertragungsfunktion (Abb. 3.3 oder 3.4) auf charakteristische Betriebsschwingungsformen hin, ohne dass die Modalanalyse dazu gehörende Eigenmoden ergeben hätte. Das bedeutet, dass sich zu praktisch jeder Eigenschwingung eine charakteristische Betriebsschwingung finden lässt. Umgekehrt gibt es allerdings einige charakteristische Betriebsschwingungen, denen keine Eigenschwingung zugeordnet werden kann.

Die charakteristischen Betriebsschwingungen werden vom Experimentator mehr oder weniger willkürlich ausgewählt. Sie können nicht *a priori* Moden gleichgesetzt werden, da sie nicht so streng legitimiert sind wie die orthogonalen Eigenmoden. Möglicherweise ist eine charakteristische Betriebsschwingung durch Überlagerung dicht beieinander liegender Moden entstanden. Die Modalanalyse hat jedoch ergeben, dass in den meisten Fällen Eigenmoden den charakteristischen Betriebsschwingungsformen stark ähneln. In aller Regel stellen die Eigenformen eine Untermenge der charakteristischen Betriebsschwingungsformen dar.

Abschließend sei noch einmal auf Folgendes hingewiesen: Die Moden, von denen hier die Rede ist, beziehen sich auf die wandnormale Bewegung von Decke, Hals, Saitenhalter und Griffbrett. Weder der Kopf, noch die Zargen, noch der Boden waren in die Messung einbezogen. Wie am Beispiel eines Hackbretts gezeigt wurde (Fleischer 2004), ergibt die Modalanalyse der Decke andere Eigenfrequenzen als die des Bodens. Demnach ist damit zu rechnen, dass die Analyse des Gesamtsystems wiederum andere Eigenformen und -frequenzen als bei den Einzelsystemen ergeben wird. Dies sollte beim Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur berücksichtigt werden.

3.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die Anregung und Messung in Normalenrichtung entspricht der Spielweise *Pizzicato*, bei der die Saite mit dem Finger gezupft wird. Für diese Anregungsart haben Untersuchungen an einer Violine, die Winter und Wörner (2000) am Institut für Mechanik durchgeführt haben, eine große Zahl von Betriebsschwingungen ergeben. Einige Schwingungen unterhalb der tiefsten Note g bzw. G3 (196 Hz) wurden detektiert, hier aber nur am Rande behandelt. Unter Verwendung der Auswertungs-Software des Vibrometers wurden zwischen 226 Hz und 1556 Hz mehr als zwanzig charakteristische Frequenzen und Formen aufgefunden. Eine nachgeschaltete Modalanalyse desselben Datensatzes liefert sechzehn Eigenmoden. Diese sind - mit einer Ausnahme - in der Menge der Betriebsschwingungen enthalten. In Hinsicht auf die Frequenzen war dabei weitgehende Übereinstimmung zu beobachten. Auch in Bezug auf die Bewegungsmuster waren visuell keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Offenbar stellen die im ersten Teil dieses Kapitels präsentierten Betriebsschwingungen der Violine eine Obermenge dar, in der die Untermenge der Eigenmoden enthalten ist.

Ob Betriebsschwingungen oder Eigenmoden bestimmt worden sind, ist bei vielen Schwingungsuntersuchungen in der Literatur nicht explizit unterschieden. Zu vermuten ist, dass es sich in den meisten Fällen um Betriebsschwingungen handeln wird. Allein deshalb werden Vergleiche von Ergebnissen, die zudem unter verschiedenen Anregungs- und Lagerungsbedingungen zustande gekommen sind, häufig nicht sehr viel Aussicht auf Erfolg haben.

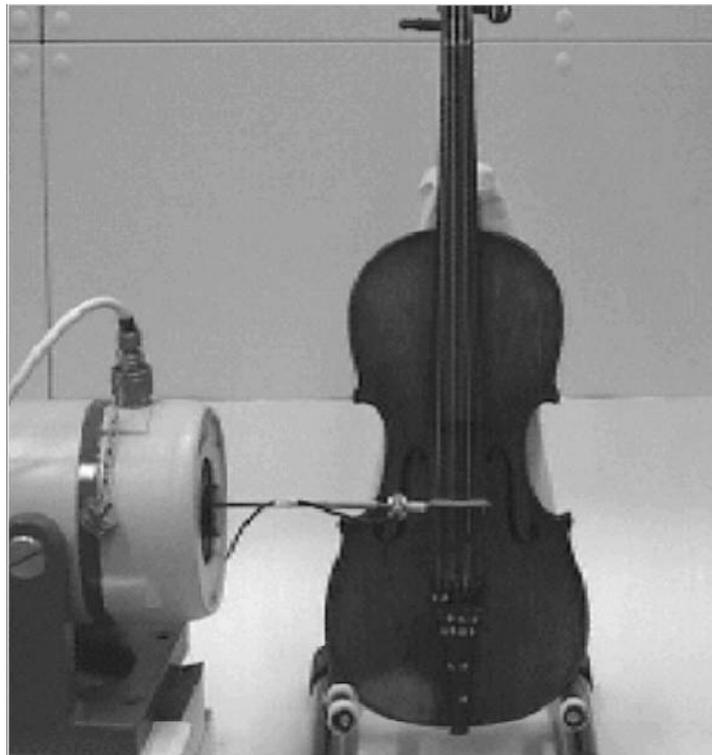
4. SCHWINGUNGEN DES KORPUS BEI TANGENTIALER ANREGUNG

Winter und Wörner (2000) haben im Rahmen ihrer Studienarbeit Schwingungen der Violine auch für eine weitere Art der Anregung untersucht. Sie haben die Kraft am Steg nicht - wie im vorigen Kapitel beschrieben - senkrecht, sondern nunmehr parallel zur Decke eingeleitet. Einige Ergebnisse werden im vorliegenden Kapitel präsentiert.

4.1. Messung

Üblicherweise wird ein Saiteninstrument mit einem Bogen gespielt. Die Anregung des Korpus erfolgt demnach im Wesentlichen durch die tangentiale Saitenkraft am Steg. Abb. 4.1 zeigt den Versuchsaufbau von Winter und Wörner (2000), der dieser Tatsache Rechnung trägt. Über einen langen Stift regte der Schwingerreger das Instrument am linken, bassseitigen Ende des Steges, nahe dem Auflagepunkt der G-Saite, parallel zur Decke an. Es war ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer vom Typ B&K 8200, zwischengeschaltet. Dieser erfasste die Wechselkraft, die tangential in den Steg eingeleitet wurde.

Abb. 4.1. Die Violine ist für die Messung in einem Gitarrenständer gelagert; der Steg wird parallel zur Decke angeregt.



Wie bei der im vorigen Kapitel geschilderten Messung war die Violine so in einem Gitarrenständer gelagert, dass der Korpus an drei Punkten gestützt und nahezu senkrecht gehalten wurde. Der Hals war frei beweglich. Jede Messung wurde viermal durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Die Frequenzauflösung war 2 Hz, die gesamte Messbandbreite 1600 Hz. Abgesehen von der andersartigen Orientierung der Anregung entsprach die Instrumentierung derjenigen, welche in Kapitel 3 ausführlich erklärt worden ist.

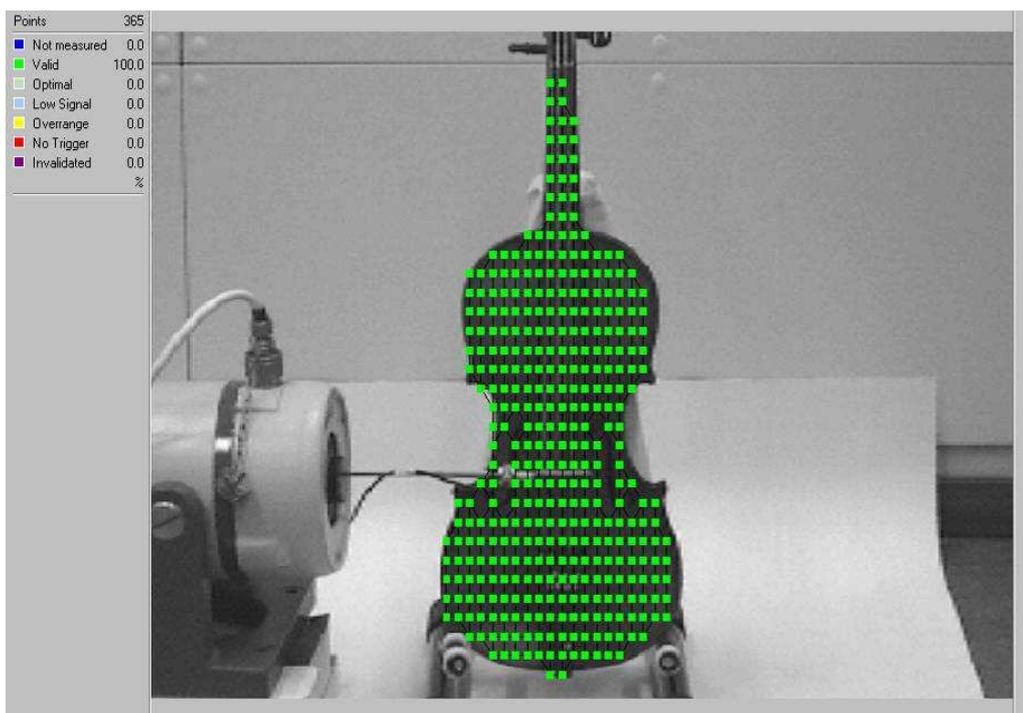


Abb. 4.2. Die Violine, gelagert im Gitarrenständer, mit dem Messgitter.
Die Bedeutung der Farben ist links oben erklärt; sämtliche Messpunkte sind „valid“.

Abb. 4.2 gibt das Messgitter wieder, das 365 Messpunkte umfasste. Sämtliche Messungen haben die Qualitätsstufe „valid“, was bedeutet, dass die Ergebnisse als äußerst zuverlässig gelten dürfen. Die über alle Messpunkte gemittelte Transfer-Admittanz im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 1600 Hz ist Abb. 4.3 zu entnehmen.

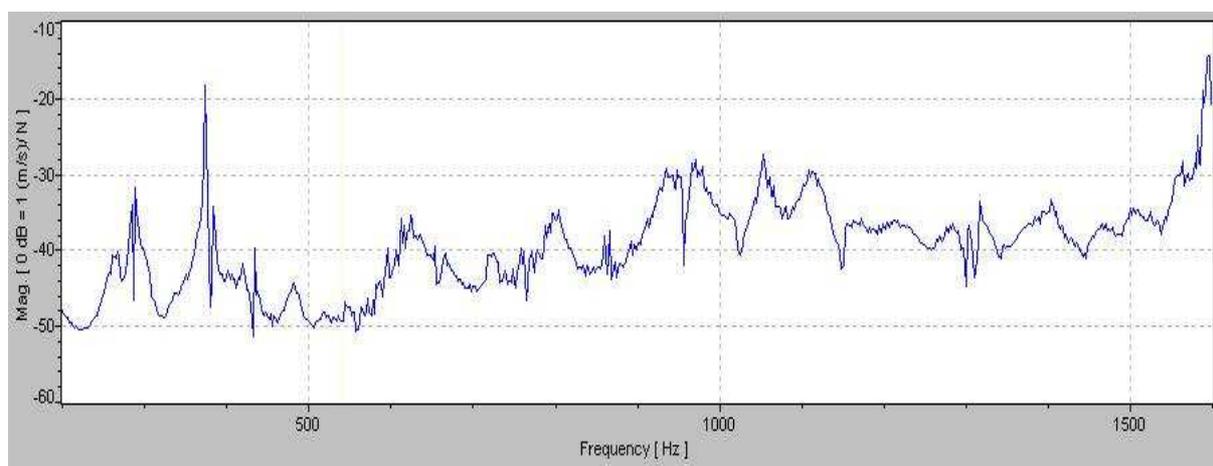


Abb. 4.3. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion (Transfer-Admittanz).

Ein Vergleich der Gesamt-Übertragungsfunktionen für die beiden unterschiedlichen Arten der Anregung zeigt ein höheres Niveau für Abb. 4.3 als für Abb. 3.3. Demnach ist die Violine insgesamt „schwingfreudiger“, wenn die Kraft in den Steg nicht senkrecht zur Decke, sondern parallel dazu eingeleitet wird. Wiederum ist eine Vielzahl von lokalen Maxima zu erkennen. Wie Abb. 4.4 zeigt, lassen sich zahlreiche Bänder legen. Eine Auswahl der ebenso zahlreichen charakteristischen Betriebsschwingungen ist im folgenden Abschnitt zusammen gestellt.

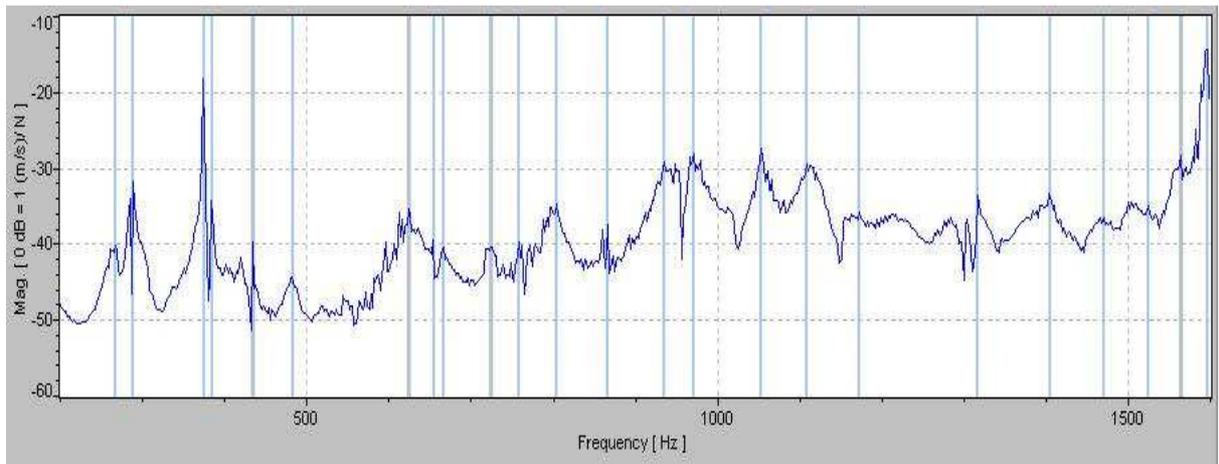


Abb. 4.4. Über alle Messpunkte gemittelte Übertragungsfunktion; die Frequenzen, für welche die Betriebsschwingungsformen dargestellt werden sollen, sind durch Bänder markiert.

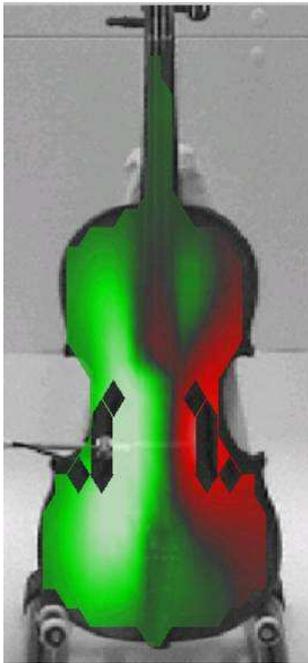
4.2. Betriebsschwingungen bei tangentialer Anregung, dargestellt als *Color Map*

Auch diese Messdaten von Winter und Wörner (2000) wurden erneut sorgfältig ausgewertet. Im vorliegenden Abschnitt sind die Ergebnisse als *Color Maps* dargestellt. Dem schwarz-weißen Videobild der Violine ist das farbige Schwingungsbild überlagert. Das Bild zeigt, wie die Violine gehalten und angeregt war. Die Schwingung ist zu einem geeigneten Zeitpunkt gestoppt. Die rote bzw. grüne Farbe charakterisiert die Bewegung der Oberfläche aus der Ebene heraus bzw. in die Ebene hinein. Je heller die Farbe ist, desto größer ist die Schwingungsamplitude. Somit stehen dunkle Linien für Schwingungsknoten, helle Bereiche für Schwingungsbäuche.

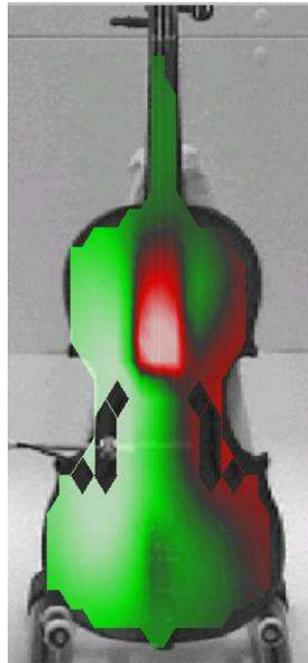
Aus den Messergebnissen oberhalb der tiefsten Violin-Note wurden 21 charakteristische Schwingungsformen zwischen 266 Hz und 1596 Hz ausgewählt und in Abb. 4.5 zusammen gestellt. Wiederum kennzeichnet der Zusatz M diejenigen, in deren Nähe gemäß Abb. 4.6 eine Eigenmode mit weitgehend identischer Schwingungsform liegt. Die zugehörige Eigenfrequenz ist in Klammern angegeben.

Bei tiefen Frequenzen, die etwas oberhalb von 196 Hz (Note g bzw. G3) liegen, bewirkt die kippende Anregung am Steg, dass sich eine Knotenlinie in Längsrichtung einstellt und der linke Teil der Decke in Gegenphase zum rechten Teil schwingt. Mit steigender Frequenz bilden sich weitere Bereiche aus, die jeweils in Gegenphase zueinander schwingen. Bei ansteigender Frequenz zeigen sich ab etwa 600 Hz auch Knotenlinien in Querrichtung. Die roten bzw. grünen Bereiche werden immer kleiner. Es bilden sich immer mehr Gebiete aus, in denen Teile der Decke sich gegensinnig zu den benachbarten Bereichen bewegen.

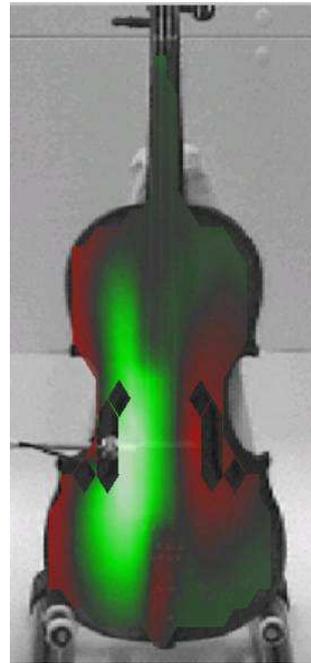
Die Schwingungsbilder in Abb. 4.5.a sind durch ausgeprägte Biegung des Griffbretts/Halses charakterisiert; siehe auch Day und Jansson (1998). Bei 288 Hz bewegt sich das Griffbrett (rot) in Gegenphase zum linken Teil der Decke (grün). Bei 374 Hz schwingen Griffbrett und linker Rand der Decke in gleicher Phase (rot). Griffbrett und Saitenhalter bewegen sich meistens gleichphasig. Der Steg „kippt“. Bei manchen Frequenzen schwingt er am bassseitigen Rand in Phase, am anderen Rand in Gegenphase zum Griffbrett, und umgekehrt. Die Endpunkte der Saiten bewegen sich in mannigfaltigen Phasenlagen. Die Vermutung ist begründet, dass die gleich- bzw. gegenphasige Bewegung der Saitenenden einen Einfluss auf die Spielbarkeit des Instruments haben wird.



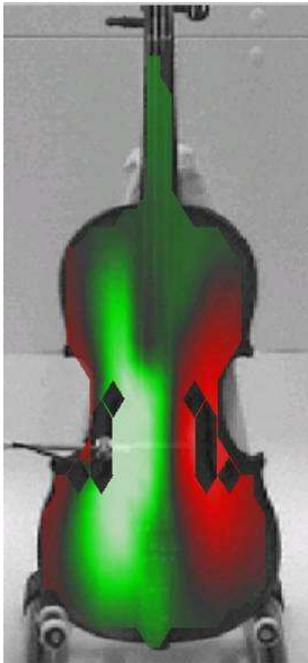
266 Hz



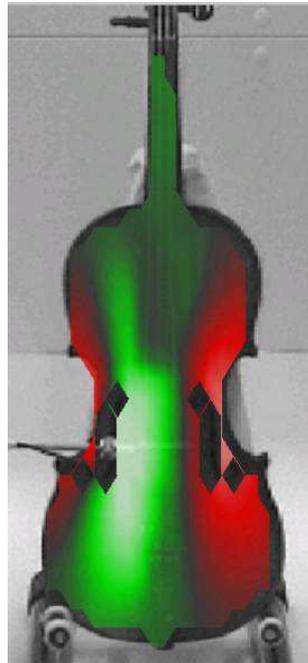
288 Hz (M: 289 Hz)



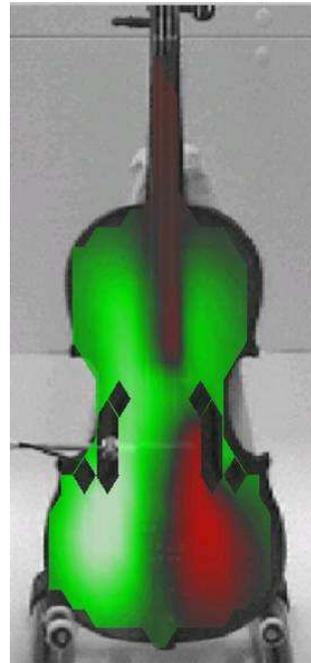
374 Hz (M: 374 Hz)



434 Hz

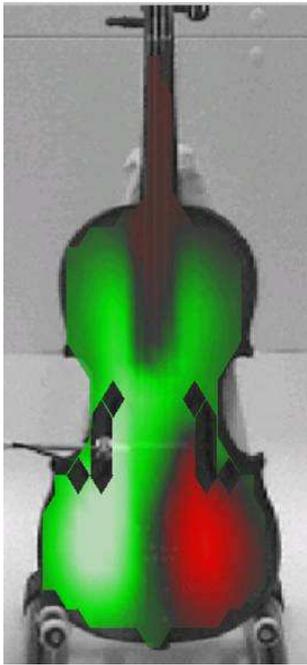


482 Hz (M: 483 Hz)

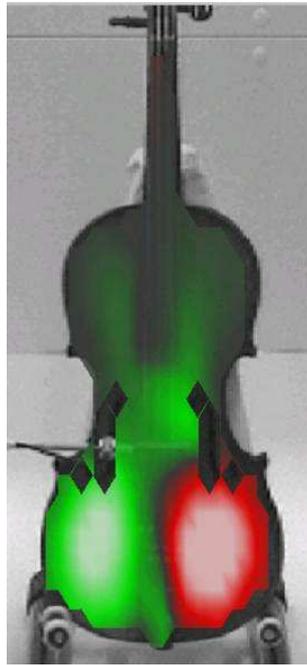


624 Hz (M: 623 Hz)

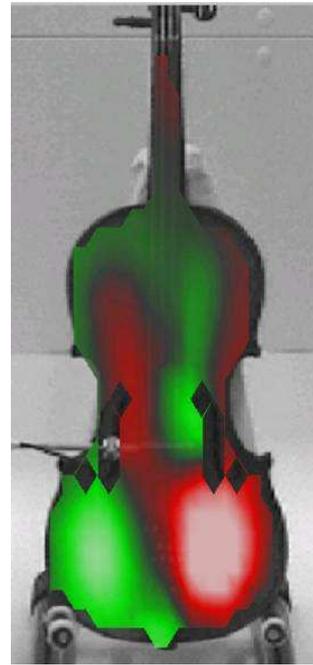
Abb. 4.5.a. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.



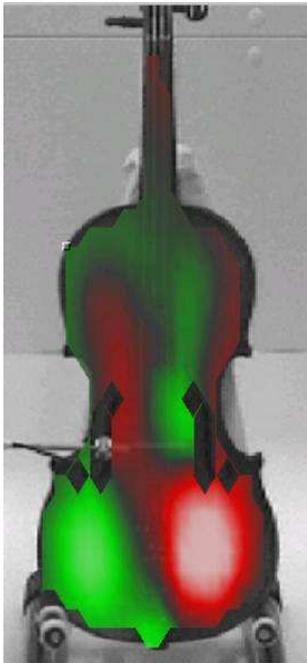
654 Hz



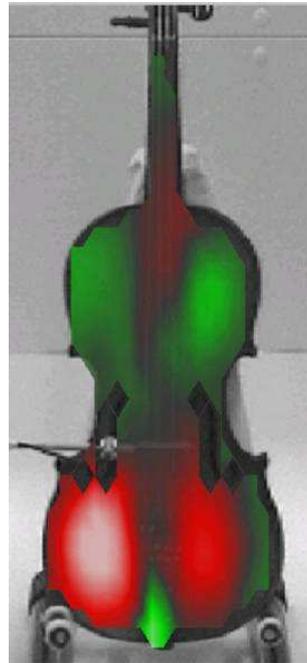
724 Hz (M: 726 Hz)



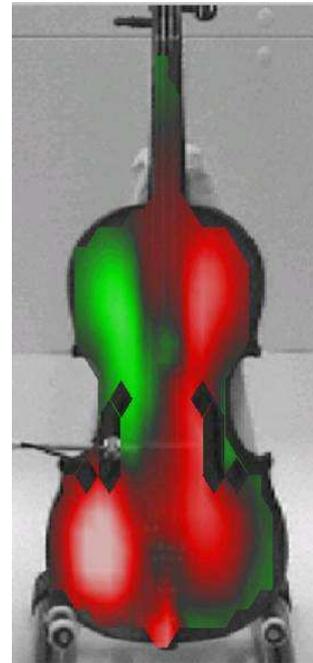
758 Hz (M: 766 Hz)



796 Hz (M: 797 Hz)

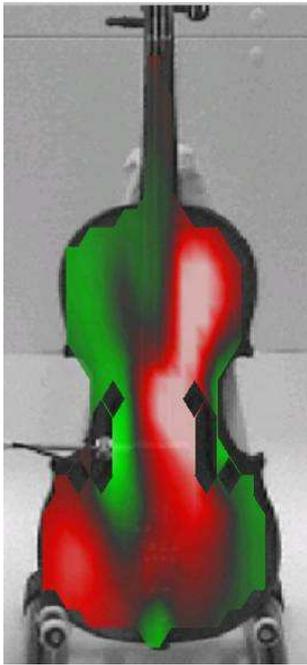


866 Hz (M: 871 Hz)

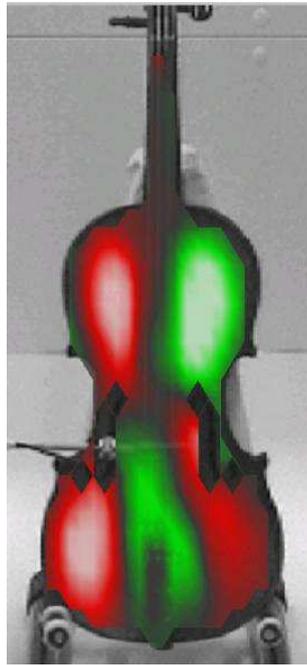


934 Hz (M: 930 Hz)

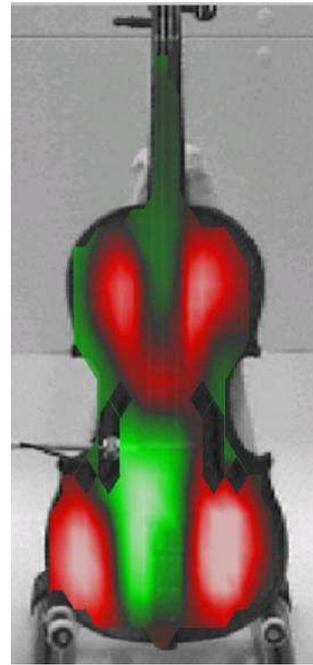
Abb. 4.5.b. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.



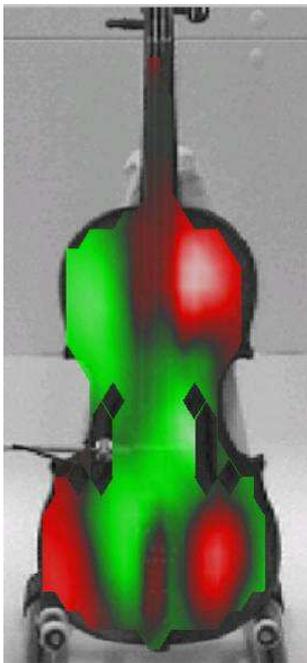
970 Hz (M: 970 Hz)



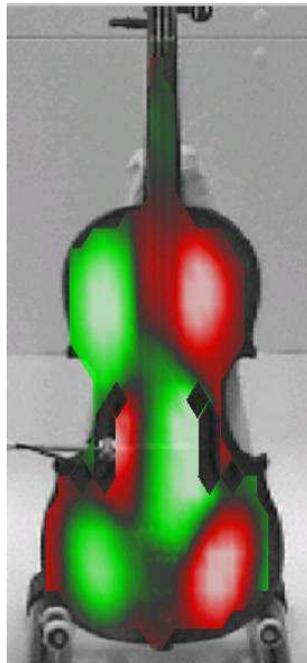
1052 Hz



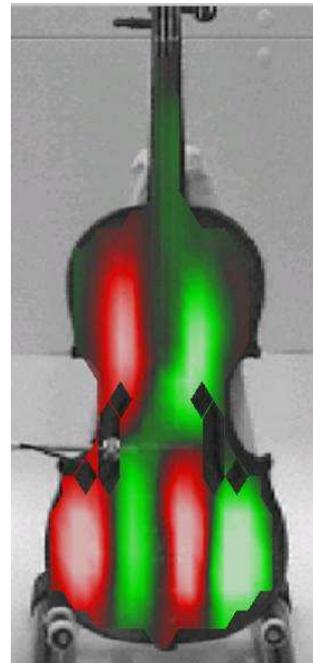
1108 Hz (M: 1110 Hz)



1172 Hz



1316 Hz



1404 Hz

Abb. 4.5.c. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

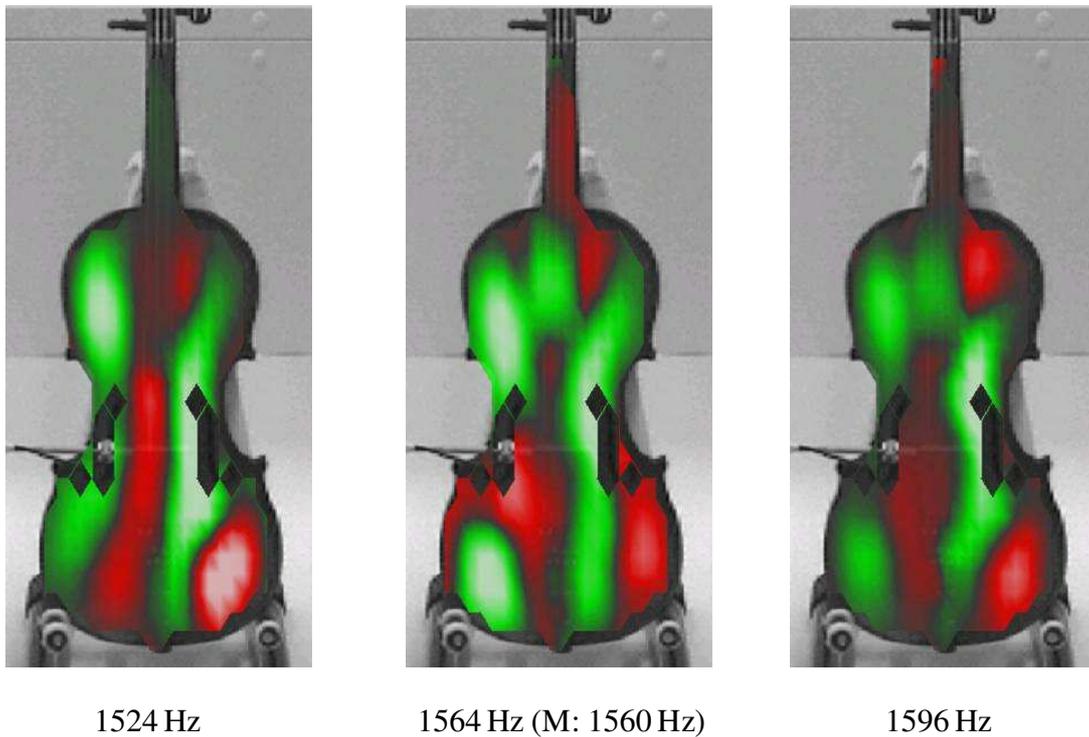


Abb. 4.5.d. Betriebsschwingungsformen einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

Auch bei den Schwingungsbildern für tangentialer Anregung zeigt sich, dass die schwingenden Felder stets in Längsrichtung gestreckt sind. Dies dürfte seinen Grund in der richtungsabhängigen Steifigkeit der Decke und ihrer Unterkonstruktion haben. Längs der Fasern des Holzes, aus dem die Decke gefertigt ist (senkrecht in Abb. 4.5), dehnen die schwingenden Bereiche sich weiter aus als in Querrichtung. Die dargestellten Schwingungsformen sollen auch hier nicht im Detail diskutiert oder mit den Schwingungen bei normaler Anregung verglichen werden. Sie werden im nächsten Abschnitt den Eigenmoden gegenüber gestellt.

4.3 Vergleich zwischen Betriebsschwingungen und Moden

Wie bereits für Anregung in Normalenrichtung praktiziert, haben Winter und Wörner (2000) ihre Messdaten, die sie mit dem Scanning-Vibrometer ermittelt hatten, einer Modalanalyse unterzogen. Mit diesem Ziel haben sie sie in das Programmpaket StarModal exportiert und im untersuchten Frequenzbereich oberhalb von 196 Hz auf diese Weise zwölf Moden identifiziert. Dabei haben sie die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen gefunden, die in der rechten Spalte von Abb. 4.5.b bis d zusammen gestellt sind. Zusätzlich sind in Abb. 4.5.a drei Schwingungen eingefügt, deren Frequenzen unterhalb der tiefsten Note liegen, die auf der Violine gespielt wird.

Die Eigenschwingungsformen sind als 3D-Drahtmodelle gezeichnet, wobei das Schwingungsmuster aus der Verformung des Drahtgitters zu ersehen ist. Zum Vergleich finden sich links daneben charakteristische Betriebsschwingungen, wie sie sich bei der direkten Auswertung der Vibrometer-Daten ergeben. Um besser vergleichen zu können, sind diese Schwingungsmuster

ebenfalls als 3D-Bilder dargestellt. Neben der Verformung des Gitters sind unterstützend die Farben Rot und Grün verwendet, an denen die Richtung der Bewegung zu erkennen ist.

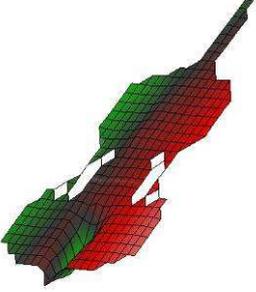
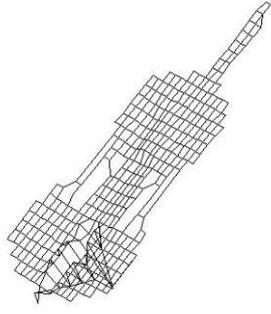
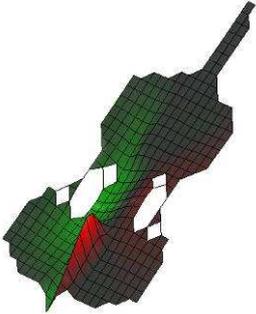
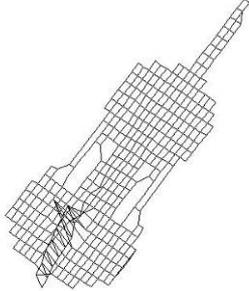
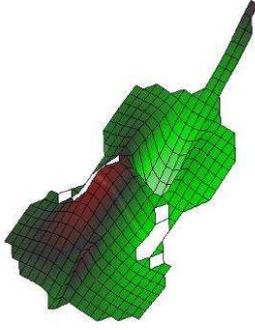
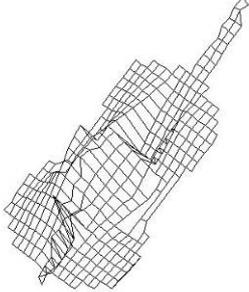
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
106 Hz 	106,2 Hz 
134 Hz 	135,6 Hz 
162 Hz 	160,4 Hz 

Abb. 4.6.a. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

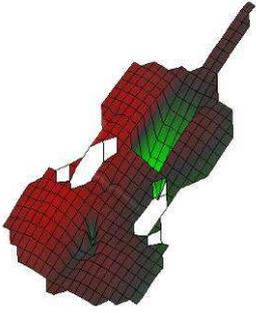
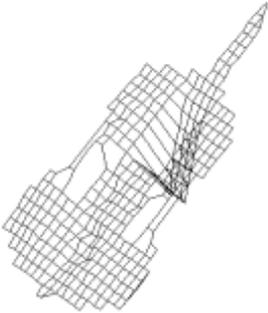
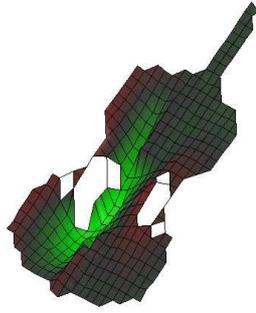
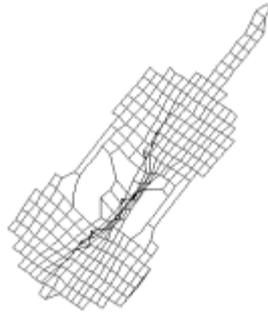
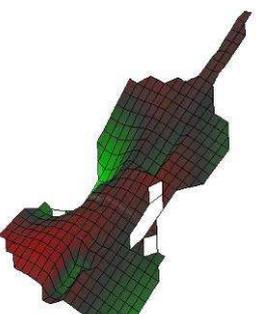
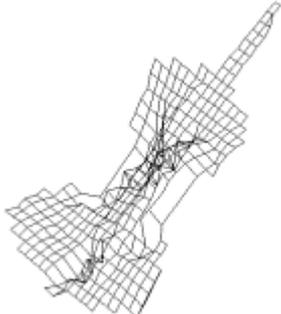
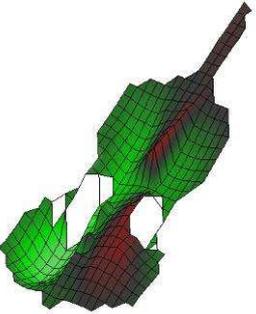
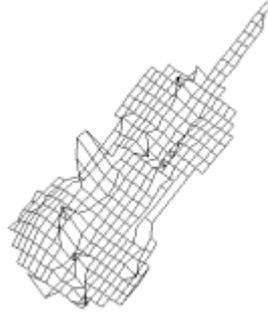
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
288 Hz 	288,6 Hz 
374 Hz 	373,5 Hz 
482 Hz 	482,6 Hz 
624 Hz 	623,4 Hz 

Abb. 4.6.b. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

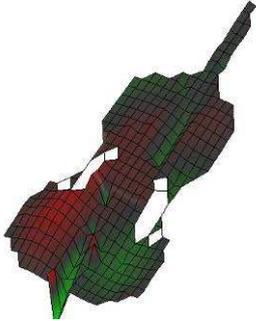
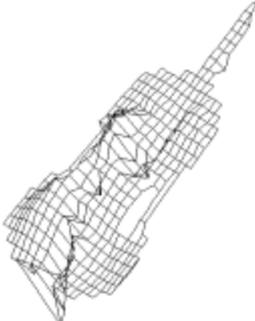
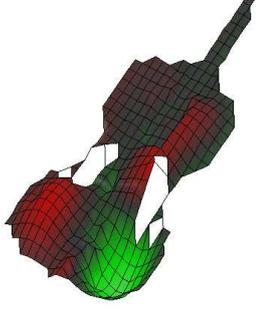
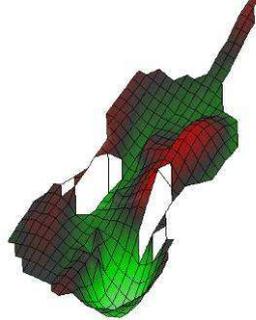
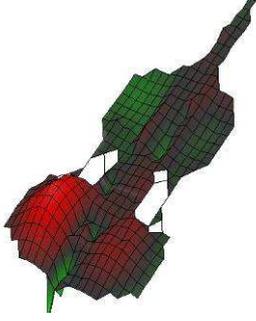
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
724 Hz 	726,5 Hz 
758 Hz 	766,1 Hz 
796 Hz 	797,1 Hz 
866 Hz 	871,3 Hz 

Abb. 4.6.c. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

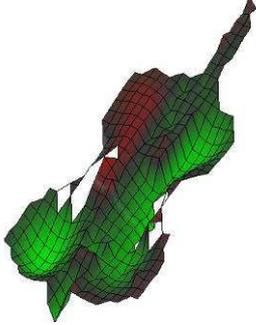
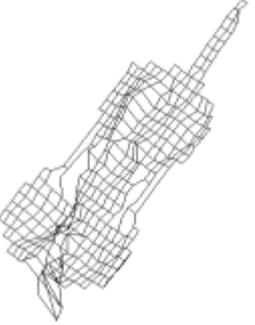
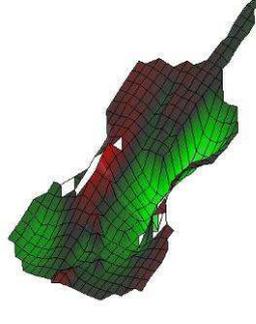
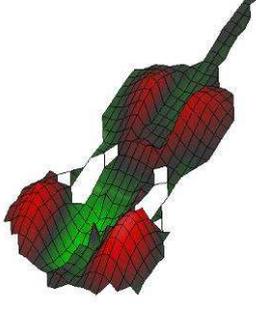
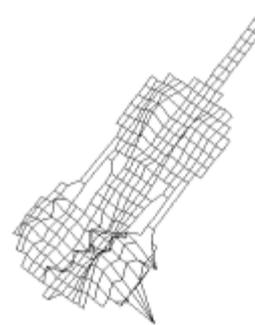
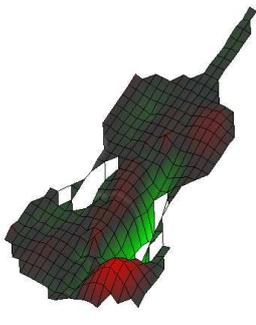
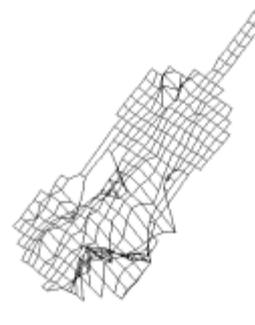
Charakteristische Betriebsschwingung	Eigenschwingung
934 Hz 	929,8 Hz 
970 Hz 	969,5 Hz 
1108 Hz 	1110 Hz 
1564 Hz 	1560 Hz 

Abb. 4.6.d. Betriebsschwingungen (links) und Moden (rechts) der Vorderseite einer Violine bei tangentialer Anregung des Steges.

Richardson (1997) hat Betriebsschwingungen und Moden ausführlich definiert und beschrieben. Etwas vereinfachend lässt sich feststellen, dass die zwölf Eigenmoden von Abb. 4.6 b bis d eine Untermenge der 21 charakteristischen Betriebsschwingungen von Abb. 4.5 sind. Neun charakteristische Betriebsschwingungen stellen offenbar keine reinen Moden dar. Vielmehr scheinen sie Überlagerungen benachbarter Moden und damit Mischformen zu sein. Die größte Differenz zwischen der Frequenz, bei der die Gesamt-Übertragungsfunktion ein lokales Maximum aufweist, und der mittels Modalanalyse errechneten Eigenfrequenz betrug 8 Hz. Damit entsprach sie weniger als einem Prozent, so dass von brauchbarer Übereinstimmung der Eigenfrequenzen mit den entsprechenden charakteristischen Frequenzen gesprochen werden kann. In Hinsicht auf die Schwingungsformen sind rein optisch so gut wie keine Abweichungen zu erkennen. Der Vergleich zeigt, dass nicht jede charakteristische Betriebsschwingung eine Mode darstellt. Umgekehrt kann jedoch jeder Eigenmode eine charakteristische Betriebsschwingung zugeordnet werden.

4.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die Anregung und Messung in tangentialer Richtung entspricht dem Streichen der Saite mit dem Bogen. Die Untersuchungen an einer Violine, von Winter und Wörner (2000) mit tangentialer Anregung am Steg durchgeführt, haben eine große Zahl von Betriebsschwingungen ergeben. Schwingungen unterhalb des tiefsten Tones g bzw. G3 (196 Hz) wurden zwar nachgewiesen, hier aber nicht näher besprochen. Mit der Auswertungs-Software des Vibrometers wurden zwischen 266 Hz und 1596 Hz insgesamt 21 charakteristische Frequenzen und Formen ausfindig gemacht. Eine nachgeschaltete Modalanalyse desselben Datensatzes liefert zwischen 288 Hz und 1560 Hz zwölf Eigenmoden, die ausnahmslos in der Menge der Betriebsschwingungen enthalten sind. Die Eigenfrequenzen stimmen weitgehend mit den entsprechenden charakteristischen Frequenzen überein. Bei den Bewegungsmustern waren visuell keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen. Aus diesen und den Resultaten des vorhergehenden Kapitels kann geschlossen werden, dass die Betriebsschwingungen eine Obermenge darstellen, welche die Untermenge der Eigenmoden einschließt. Von dieser Regel wurde eine einzige Ausnahme (Abb. 3.6.e; 1450 Hz) beobachtet.

Zwischen der tiefsten Frequenz einer Violine und 1600 Hz sind für tangentialer Anregung am Steg nun zwölf Eigenmoden der Violine identifiziert worden. Für Anregung in Normalenrichtung waren sogar sechzehn Eigenschwingungen nachweisbar. Offenbar können sich benachbarte Eigenmoden von Fall zu Fall mischen und bei Frequenzen, die in der Nähe der Eigenfrequenzen liegen, neue Betriebsschwingungsformen hervorbringen. Im nächsten Kapitel wird eine gezielte Auswahl getroffen. Diejenigen charakteristischen Betriebsschwingungen, denen sich Eigenmoden zuordnen lassen, werden zusammengefasst und mit anderen Ergebnissen verglichen.

5. VERGLEICHE

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der eigenen Schwingungsmessungen erneut zusammen gestellt. Danach wird versucht, Gemeinsamkeiten der eigenen Resultate mit solchen aufzufinden, die der Literatur entnommen werden können.

5.1. Korpuschwingungen der Violine bei unterschiedlichen Richtungen der Anregung

Erwartungsgemäß hatten die Betrachtungen der Kapitel 3 und 4 nicht dieselben Schwingungsformen und –frequenzen ergeben, wenn die Violine am Steg einmal parallel zur Decke, einmal senkrecht dazu angeregt wurde. Die Ergebnisse werden noch einmal in Kürze zusammengefasst. Als Darstellungsart wird *Color Map* und *Magnitude* gewählt. Den Hintergrund liefert das Schwarz-Weiß-Bild der Violine bei der Messung. Der Betrag der Schwingamplitude ist in der Farbe Blau veranschaulicht. Je heller das Blau ist, desto mehr bewegt sich der Korpus an der betreffenden Stelle. Weiße Bereiche kennzeichnen Schwingungsbäuche, dunkle Linien Schwingungsknoten. Naturgemäß geht das Vorzeichen und damit die Information über Gleich- und Gegenphase verloren. Eine Auswahl wurde dadurch getroffen, dass ausschließlich solche Betriebsschwingungen dargestellt sind, die sich Eigenmoden zuordnen lassen. Angegeben sind die charakteristischen Frequenzen, die aus der direkten Auswertung der Gesamt-Übertragungsfunktion der Vibrometer-Messung resultieren. Es ist somit berechtigt, diese Betriebsschwingungen mit Moden gleichzusetzen.

5.1.1. Anregung in tangentialer Richtung

Wenn der Steg, wie in Abb. 5.1 skizziert, parallel zur Decke angeregt wird, arbeiten seine beiden Füße im Gegentakt; der Steg „kippt“. Bei dieser Betriebsart ergeben sich die Schwingungsmuster, die in Abb. 5.2 zusammen gestellt sind. Zwischen der Grundfrequenz des tiefsten Geigtones (196 Hz) und 1600 Hz wurden zwölf Betriebsschwingungen detektiert, denen Eigenmoden entsprechen. Diese charakteristischen Betriebsschwingungen werden zukünftig kurz als Moden bezeichnet. Die Anregungsrichtung ist durch den Buchstaben „t“ vor der Frequenzangabe gekennzeichnet.

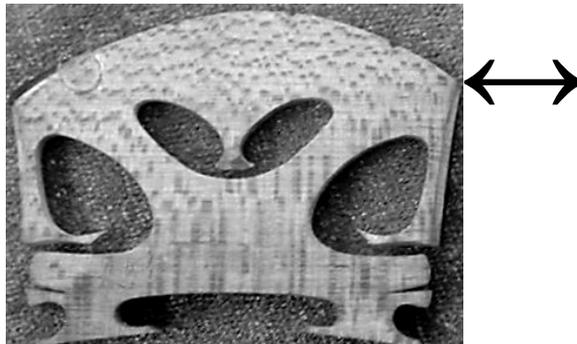


Abb. 5.1. Ein traditioneller Steg, wie er auf der Violine häufig verwendet wird. Der Pfeil zeigt die tangentielle Richtung, in der angeregt wurde.

Die vier Moden zwischen 288 Hz und 624 Hz sind dadurch gekennzeichnet, dass sich die Decke längs unterteilt und der linke Teil in Gegenphase zum rechten Teil schwingt. Bei 724 Hz und 758 Hz reichen die schwingenden Bereiche nicht mehr über die gesamte Länge der Decke, sondern nur noch etwa bis zu den f -Löchern. Der obere Teil der Decke ist weitgehend in Ruhe. Bis 624 Hz bewegt sich der linke (bassseitige) Teil der Decke stärker als der rechte (diskantseitige) Teil. Bei 724 Hz schwingen beide unteren Teile etwa gleich stark. Ab 758 Hz zeigen sich in aller Regel auf dem rechten Teil die größeren Amplituden.

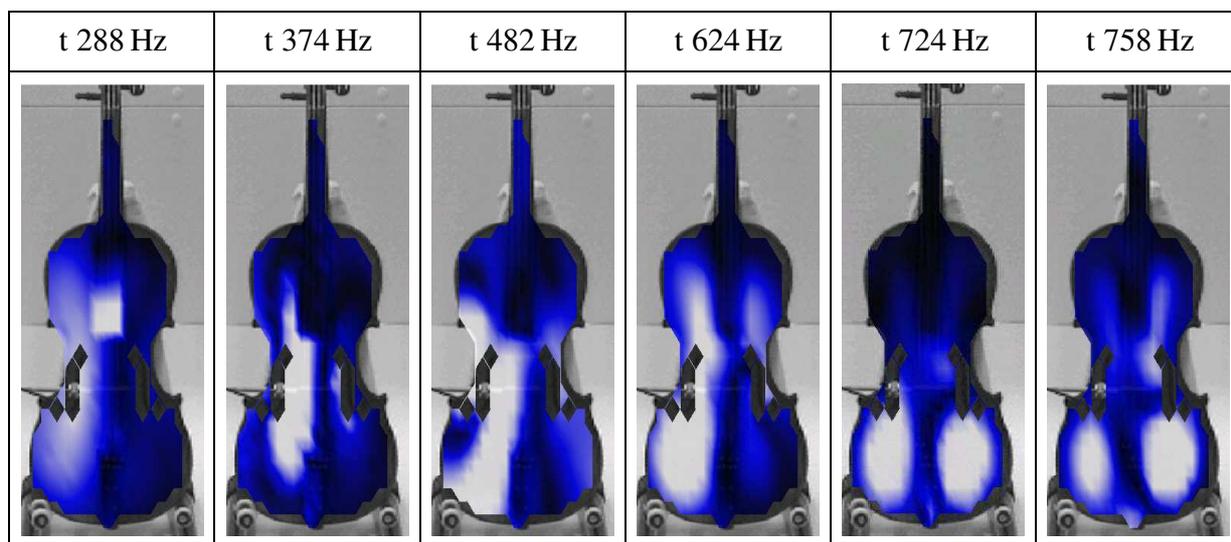


Abb. 5.2.a. Charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der Violine bei tangentialer Anregung; dargestellt ist der Betrag.

Die Mode bei 796 Hz ist durch eine starke Bewegung des unteren rechten (diskantseitigen) Teils der Decke charakterisiert. Allmählich werden im oberen Teil der Decke die Amplituden ähnlich groß wie unten. Bei 1108 Hz treten im unteren Teil offenbar drei Schwingungsbäuche und im oberen ein weit ausgedehnter Schwingungsbauch auf, der sich am stärksten unter dem

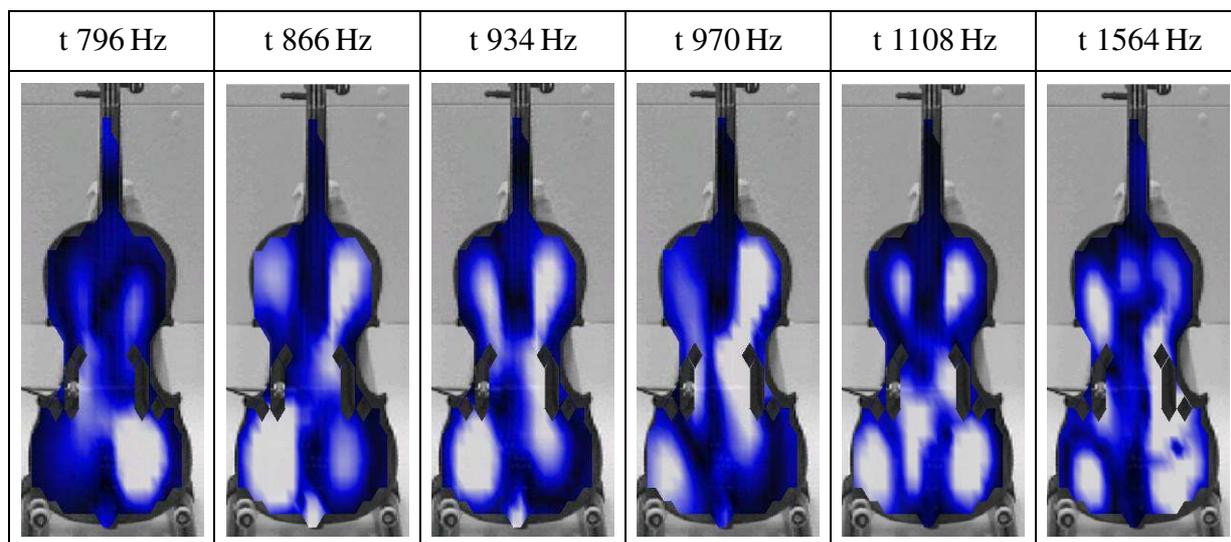


Abb. 5.2.b. Charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der Violine bei tangentialer Anregung; dargestellt ist der Betrag.

Griffbrett ausprägt. Je höher die Frequenz wird, desto mehr Bereiche bilden sich aus, die immer kleiner werden und sich in Gegenphase zueinander bewegen.

5.1.2. Anregung in Normalenrichtung

Abb. 5.3 gibt die Richtung der Anregung senkrecht zur Decke wieder. Die FüÙe des Steges bewegen sich weitgehend im Gleichtakt. Im Wesentlichen „pumpt“ der Steg. Ein geringes zusätzliches Kippen wirkt zusätzlich. Es kommt dadurch zustande, dass der Steg nicht ganz mittig angeregt wurde und der Korpus zudem im Inneren asymmetrisch ist. Bei dieser Betriebsart ergeben sich die Schwingungsmuster, die in Abb. 5.4 zusammen gestellt sind. Die Anregungsrichtung ist durch den Buchstaben „n“ vor der Frequenz charakterisiert. Zwischen der Grundfrequenz des tiefsten Tones der Violine (196 Hz) und 1600 Hz konnten fünfzehn charakteristische Betriebsschwingungen nachgewiesen werden, zu denen Eigenmoden gehören. Für die Mode bei 1450 Hz ließ sich keine Betriebsschwingung auffinden.

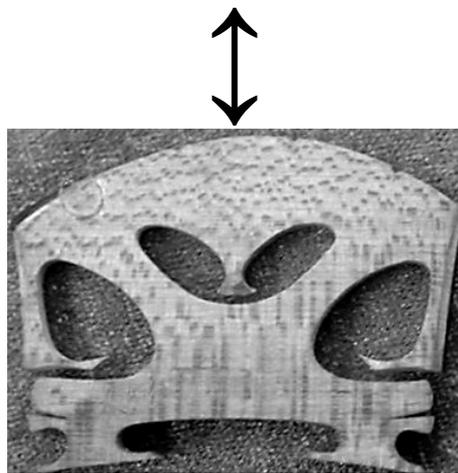


Abb. 5.3. Ein traditioneller Steg, wie er auf der Violine häufig verwendet wird. Der Pfeil zeigt die Normalenrichtung, in der angeregt wurde.

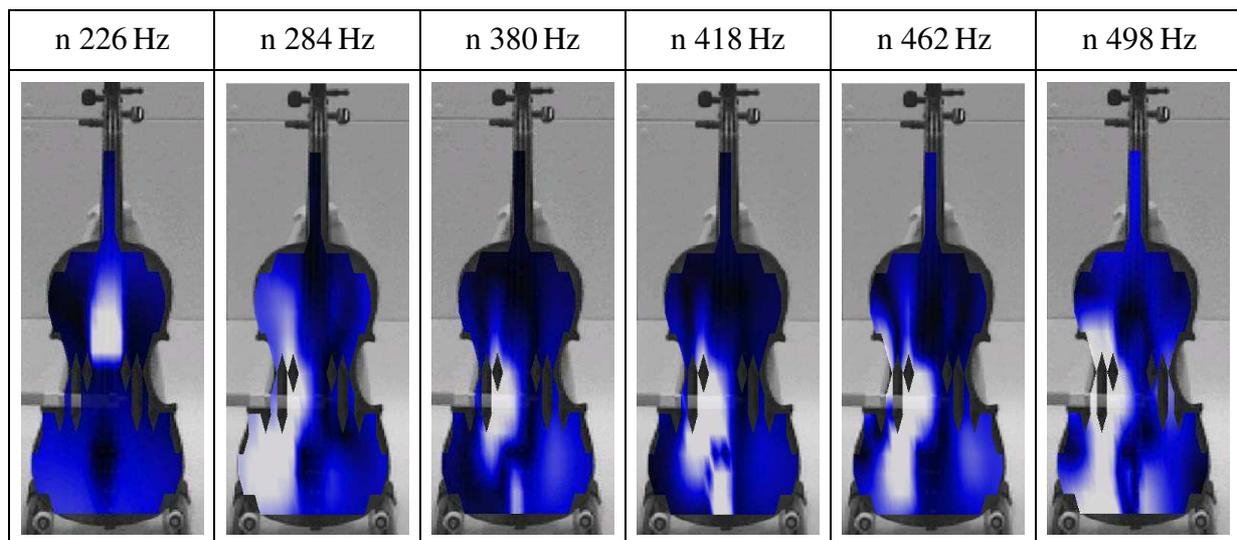


Abb. 5.4.a. Charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der Violine bei Anregung in Normalenrichtung; dargestellt ist der Betrag.

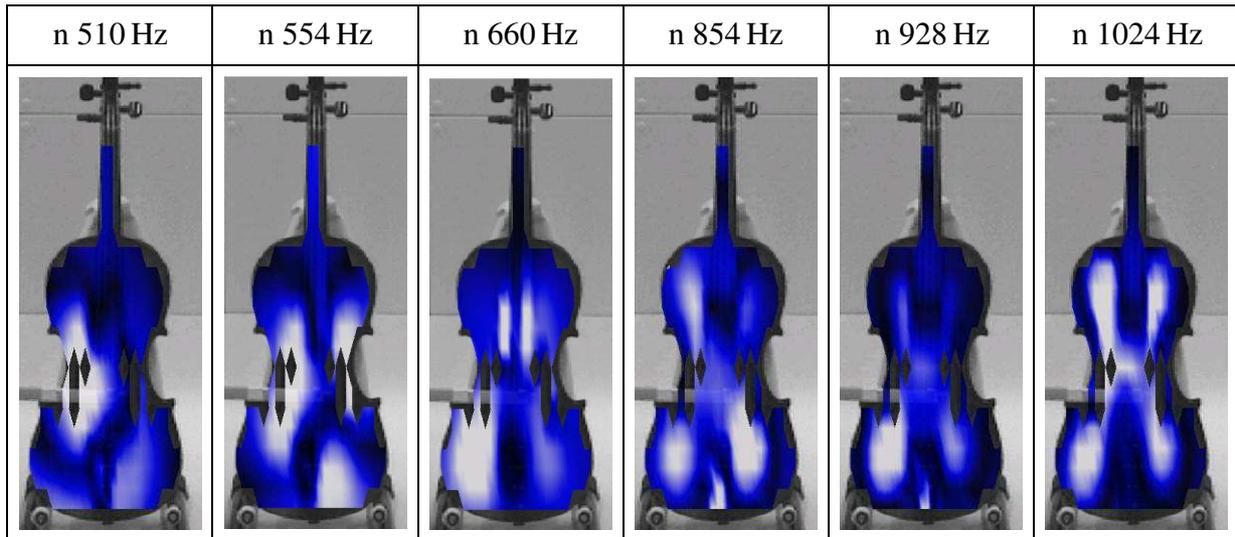


Abb. 5.4.b. Charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der Violine bei Anregung in Normalenrichtung; dargestellt ist der Betrag.

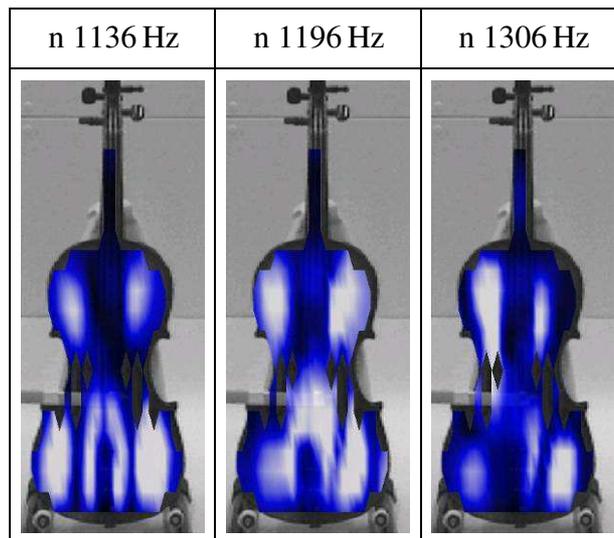


Abb. 5.4.c. Charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der Violine bei Anregung in Normalenrichtung; dargestellt ist der Betrag.

Wie aufgrund der weitgehend symmetrischen Anregung zu erwarten war, schwingt der Korpus bei tiefen Frequenzen zunächst ohne Knotenlinie in Längsrichtung. Bis 226 Hz bewegt sich der Korpus wie ein größerer Biegebalken, das Griffbrett wie ein kleinerer Balken. Ab 284 Hz überlagert sich dieser Biegebewegung eine weitere Bewegung des Violinkörpers mit einer Knotenlinie, die etwas rechts von der Mittellinie auf der Seite der Diskantsaiten liegt. Etwa ab 660 Hz erstrecken sich die schwingenden Bereiche nicht mehr über die gesamte Decke, sondern reichen nur noch bis zu den f -Löchern. Der obere Teil der Decke schwingt zunehmend stärker. Zwischen 700 Hz und 800 Hz bewegen sich der obere und der untere Teil der Decke in Gegenphase. Ab 1000 Hz werden beide Teile der Decke mit etwa den gleichen Amplituden ausgelenkt. Auch bei dieser Art der Anregung ist zu beobachten, dass sich umso mehr schwingende „Inseln“ ausbilden, je höher die Frequenz wird. Naturgemäß werden diese Bereiche dabei immer kleiner.

5.1.3. Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Da die Saite zu geringe Querabmessungen hat, kann sie selbst keinen Schall abstrahlen. Ihre Schwingung wird daher dem Korpus zugeleitet, der Biegeschwingungen ausführt und als Abstrahlkörper fungiert. Gemeinhin wird angenommen, dass der Steg das „Eingangstor“ für die Schwingungsenergie ist. In vielen Fällen scheint dies zuzutreffen. Es zeigen sich in den Abb. 5.2 und 5.4 jeweils zumindest eine Mode, bei der sich das Griffbrett extrem stark bewegt; vgl. 288 Hz bei tangentialer und 226 Hz bei senkrechter Anregung. Es wäre denkbar, dass bei dieser oder bei benachbarten Frequenzen der Steg nicht der einzige Eingang für Schwingungsenergie ist. Möglicherweise bringen dann die Saiten den Korpus weniger am Steg und mehr über den Hals zum Schwingen. Beobachtungen dieser Art an akustischen Gitarren sind bei Fleischer (1997) dokumentiert.

Erwartungsgemäß treten andere Schwingungsmuster auf, wenn nicht parallel zur Decke, sondern senkrecht dazu angeregt wird. Bereits Reinicke und Cremer (1970) haben darauf hingewiesen, dass unterschiedliche Orte und Richtungen der Anregung unterschiedliche Schwingungsmuster hervorrufen können. Wirkt die Anregungskraft tangential, werden Schwingungen stärker angeregt, die eine Folge der kippenden Bewegung des Steges sind. Demnach werden sich Schwingungsmuster besonders deutlich ausbilden, die antimetrisch in Bezug auf Knoten längs der Mittellinie sind. Wird der Steg in Normalenrichtung angeregt, so ruft dies vor allem Schwingungen hervor, bei denen sich die Decke spiegelsymmetrisch hinsichtlich ihrer Mittellinie bewegt. Jedoch sorgen Bassbalken und Stimmstock dafür, dass die Symmetrie des Korpus gezielt gestört wird. Die Schwingungen werden gekoppelt auftreten. Selbst wenn hinsichtlich Richtung und Ort symmetrisch angeregt wird, werden sich immer auch antimetrische Schwingungen ausbilden.

Die Abb. 5.2 und 5.4 zeigen einige Schwingungen, die sich in Hinsicht auf Form und Frequenz stark ähneln. Es gibt jedoch auch zahlreiche Moden, die nur bei Anregung in einer bestimmten Richtung auftreten. Aus dieser Beobachtung folgt für weitere Messungen die Forderung, den Ort und die Richtung der Anregung genauestens zu dokumentieren. Betrachtet man die Art, wie eine Violine gespielt wird, dann schälen sich zwei Betriebsweisen heraus: Wird mit dem Bogen gestrichen, dann wird die Saite vor allem parallel zur Decke ausgelenkt. Die Anregungsrichtung, die dies adäquat nachbildet, ist tangential. Zupft der Spieler die Saite mit dem Finger (*Pizzicato*), dann wird sie vor allem senkrecht zur Decke ausgelenkt. Die adäquate Anregung ist in diesem Fall normal zur Decke orientiert.

5.2. Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur

Schwingungsmessungen an Violinen sind schon in großer Zahl veröffentlicht worden. Ein geschichtlicher Überblick wird im Vorwort zu Kapitel G des Sammelbandes I von Hutchins (1993) gegeben. Literaturhinweise zum Stand vom Ende des letzten Jahrhunderts finden sich dort und bei Fletcher und Rossing (1998). Cremer (1981) gibt einige Ergebnisse von Untersuchungen an, die seine Schüler durchgeführt haben.

Die eigenen Ergebnisse werden ausschließlich mit Resultaten verglichen, die an der kompletten Violine experimentell gefunden wurden. Messungen an Einzelteilen, beispielsweise an der nicht eingebauten Decke oder am Boden, lassen nur unzureichende oder gar keine Schlüsse auf das Verhalten im Gesamtsystem zu. Numerische Untersuchungen, z.B. nach der Methode der Finiten Elemente, sind deshalb in vielen Fällen nicht sehr realitätsnah. Die Violine ist ein vierteiliger Schwinger. Es bereitet größte Schwierigkeiten, in einem Rechnermodell die Eigen-

schaften der verschiedenen Materialien, die Fügestellen, die ausgeprägte Fluid-Struktur-Interaktion usw. zu berücksichtigen. Wenn dies nicht in ausreichendem Umfang gelungen ist, ist keine wirklichkeitsgetreue Nachbildung des Gesamtsystems zu erwarten. Demzufolge sind die Schwingungen, die sich als Resultat einer Simulation ergeben, mit der gebotenen Zurückhaltung zu bewerten.

5.2.1. Nomenklatur

Als schwingungsfähiges Gebilde ist die Violine hochkomplex. Schwingungen der Decke, auf die sich die Bewegung der Saite primär überträgt, wirken mit Schwingungen des Bodens und weiterer Bestandteile des Korpus zusammen. Darüber hinaus ist die Interaktion der mechanischen Struktur mit dem Fluid von großer Bedeutung. Sowohl die umgebende als auch die im Hohlraum eingeschlossene Luft spielen eine Rolle. Eine Schwingung des Gesamtsystems lässt sich demzufolge nie einem einzigen Bestandteil zuordnen.

Trotzdem wird immer wieder versucht, beobachtete Schwingungen bestimmten Teilen der Violine zuzuschreiben. Dafür haben sich teilweise unterschiedliche Bezeichnungsweisen eingebürgert. Zusammen mit anderen Autoren haben Fletcher und Rossing (1998) die Schwingungen des Korpus der Violine dadurch strukturiert, dass sie zwischen unterschiedlichen Bewegungstypen unterscheiden. Sie verwenden folgende Unterteilung:

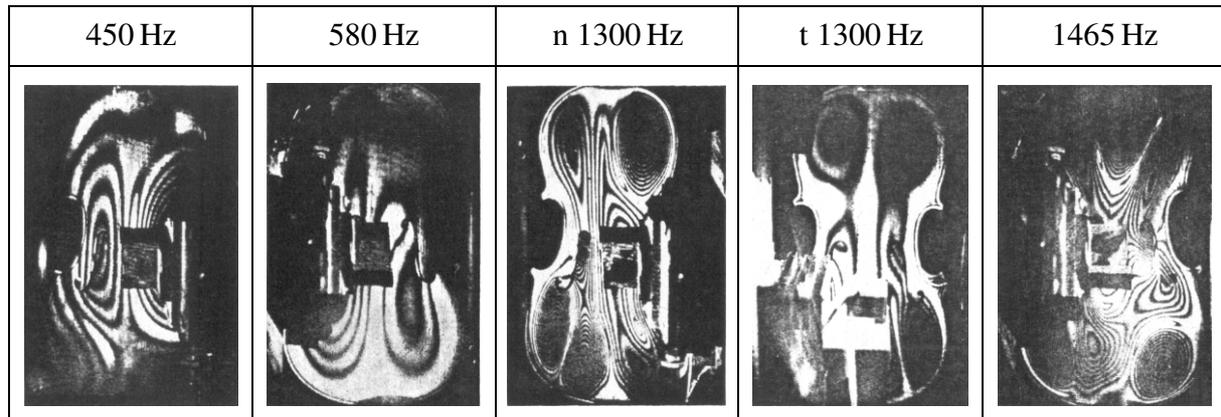
- Es gibt Moden, die im Wesentlichen durch die Luft (*Air*) im Hohlraum bestimmt sind; zu deren Kennzeichnung wird der Buchstabe A verwendet.
- Daneben existieren Moden, bei denen vor allem die Decke (*Top Plate*) schwingt; diese werden mit T gekennzeichnet.
- Für Corpus-Moden, bei denen Decke und Boden vergleichbar stark schwingen, steht der Buchstabe C.

Ein Index wird angefügt, der diese Typen von Schwingungen in der Reihenfolge ihres Auftretens bei steigender Frequenz nummeriert. Es existieren auch noch zahlreiche andere Klassifikationen. Sie sind selten kompatibel und praktisch nie physikalisch eindeutig. Stets schwingt die gesamte Struktur des Violinenkörpers. Die Kennzeichnung A, T oder C besagt lediglich, dass bestimmte Teile des Instruments starken Anteil an der Schwingung der Violine haben. Sie besagt jedoch keineswegs, dass der Rest in Ruhe wäre.

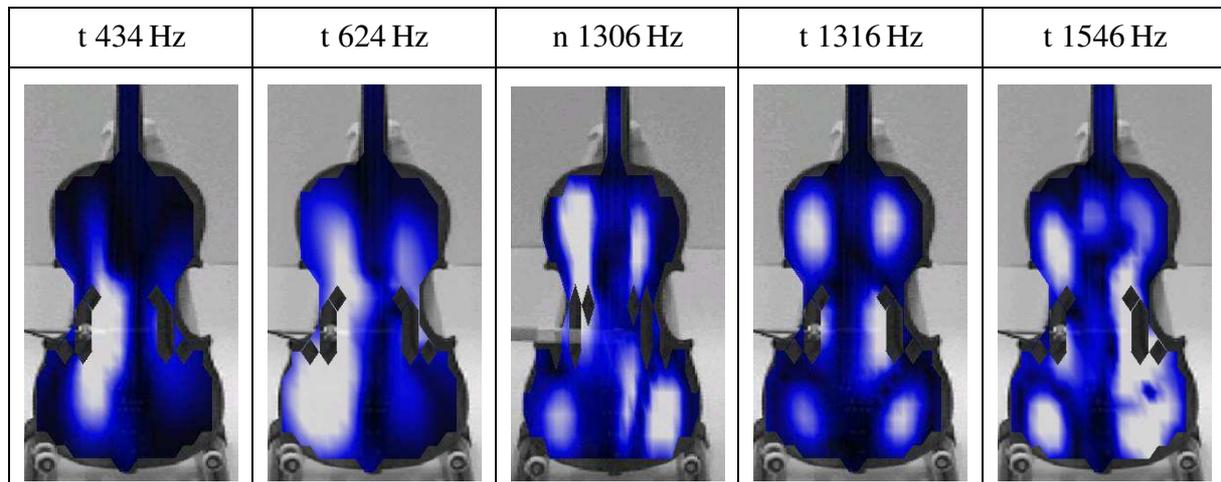
5.2.2. Holografische Interferometrie

Vor den Vergleichen sei auf die wesentliche Rolle der Randbedingungen hingewiesen. Für manche Messungen, wie z.B. mittels der in diesem Abschnitt besprochenen Laser-Holografie, muss die Violine fixiert werden. Dies führt in aller Regel zu anderen Frequenzen und Schwingungsmustern, als wenn sie in Spielposition gehalten wird. Dieses Manko ließe sich bei der hier verwendeten Laser-Vibrometrie vermeiden. Es wäre möglich, die Violine während der Messung in Spielhaltung zu untersuchen. Experimente an einem Cello (Fleischer 2009a) haben gezeigt, dass unterschiedliche Randbedingungen insbesondere bei tiefen Frequenzen zu unterschiedlichen Schwingungen führen können.

Tab. 5.I.a. Schwingungsformen der Decke einer Violine nach Reinicke und Cremer (1970);
ermittelt durch holografische Interferometrie



Tab. 5.I.b. Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der hier untersuchten Violine



Bereits vor nahezu vier Jahrzehnten haben Reinicke und Cremer (1970) Lasermessungen als Werkzeug vorgeschlagen. Sie haben gezeigt, dass sich die holografische Interferometrie für die berührungslose Untersuchung der Schwingung von Instrumentenoberflächen eignet. Sie haben auch erste Ergebnisse solcher Messungen an einer Violine präsentiert. Einige ihrer Hologramme sind in Tab. 5.I.a eigenen Ergebnissen (Tab. 5.I.b) gegenüber gestellt.

Reinicke und Cremer haben insbesondere darauf hingewiesen, dass unterschiedliche Orte und Richtungen der Anregung unterschiedliche Schwingungsmuster hervorrufen können. Diese Beobachtung deckt sich mit eigenen Erkenntnissen, die der Vergleich der Ergebnisse von Kapitel 3 und 4 erbracht hat. Als Beispiel führen sie Schwingungsbilder für die Anregungsfrequenz 1300 Hz an, die in Tab. 5.I.a durch n (für Anregung normal zur Oberfläche) bzw. t (für Anregung in tangentialer Richtung) gekennzeichnet sind. Die eigenen Ergebnisse in Tab. 5.I.b gelten im Allgemeinen für tangentiale Anregung (Kurzbezeichnung t). Ausnahmsweise ist das Bild einer Schwingung eingefügt, bei der die Violine in Normalenrichtung (Kurzbezeichnung n) angeregt worden war; vgl. auch n 1306 Hz in Abb. 5.4.c.

Dass die Methoden der Datenerfassung und -visualisierung naturgemäß in den letzten drei bis vier Dekaden Fortschritte gemacht haben, zeigt sich in der Gegenüberstellung. Die Ergebnisse der holografischen Interferometrie sind relativ schwer zu interpretieren. Die Schwarz-Weiß-Übergänge der konzentrischen Strukturen müssten abgezählt, was bei den vorliegenden Kopien kaum möglich ist, und in Auslenkungen umgerechnet werden. Obwohl ein quantitativer Vergleich mit den eigenen Ergebnissen sehr schwer fällt, zeigt sich gleichwohl globale Übereinstimmung der Schwingungsmuster. Angesichts der Tatsache, dass die Arbeit vor nahezu vierzig Jahren entstanden ist, bleibt festzuhalten, dass Reinicke und Cremer (1970) hiermit bahnbrechende Pionierarbeit geleistet haben.

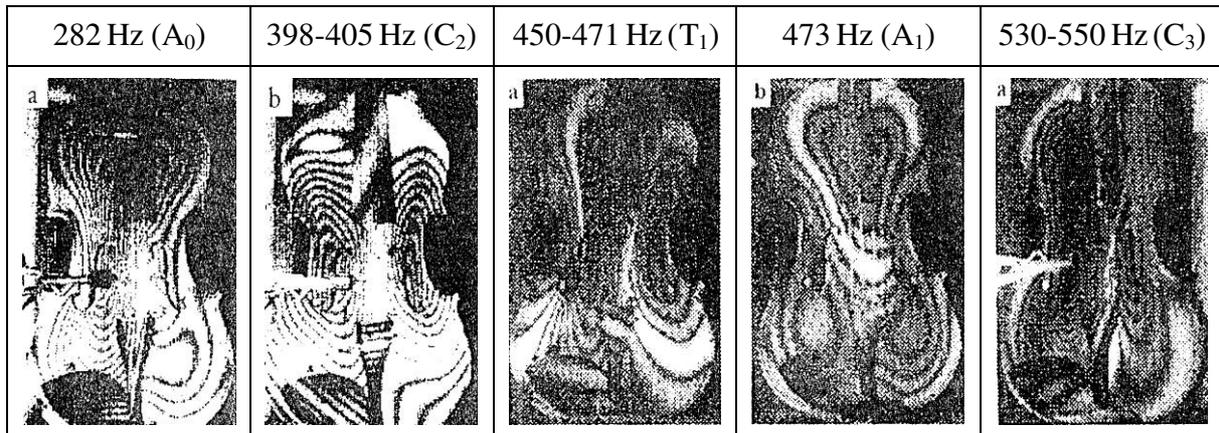
Auch Roberts und Rossing (1998) haben die holografische Interferometrie dazu verwendet, die Schwingungen von Violinen zu untersuchen. Um gezielt die im vorigen Abschnitt angeführten A-, T- oder C-Moden zu „züchten“, haben sie unterschiedliche Arten der Anregung (Druckschwankungen im Inneren; mechanische Anregung am Steg; akustische Anregung über Lautsprecher von außen) verwendet. Mit der oben eingeführten Nomenklatur klassifizieren sie ihre Resultate, die innerhalb des Frequenzbereiches der Geigentöne liegen, wie in Tab. 5.II angegeben. Daneben führen sie eine Biegeschwingung C_1 des Korpus bei 175 Hz an. Da diese unterhalb des Bereichs der Saitenschwingungen liegt, ist sie nicht in der Zusammenstellung vermerkt.

Tab. 5.II. Schwingungen der Decke von Violinen nach Roberts und Rossing (1998); ermittelt durch holografische Interferometrie

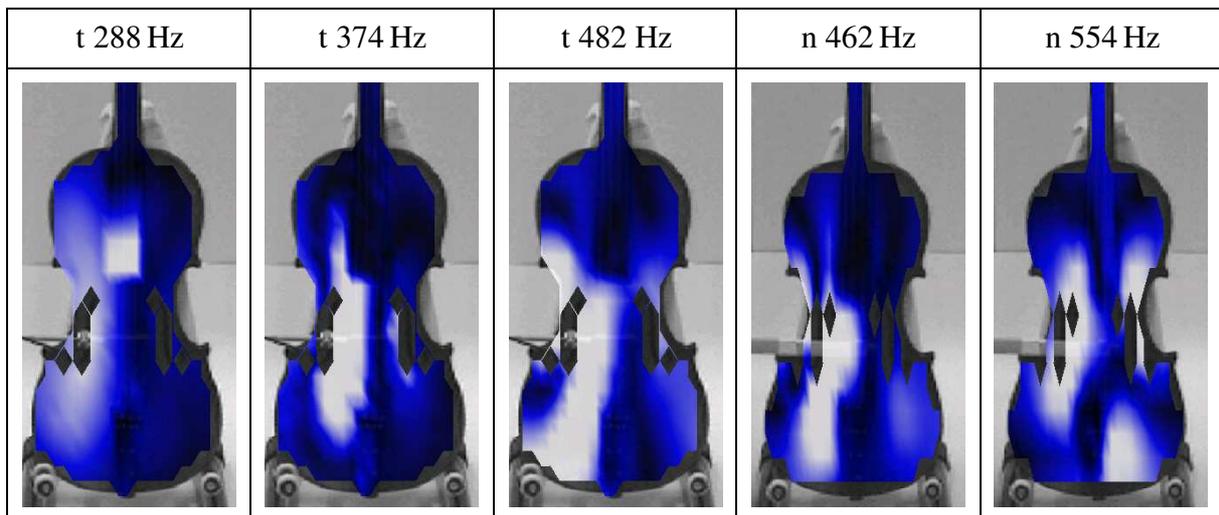
Mode	Frequenz	Schallabstrahlung	Bemerkung
A ₀	282 Hz	mäßig	0,0-Helmholtz-Resonanz
C ₂	398-405 Hz		tordierende Bewegung
T ₁	450-471 Hz	stark	starke Schallabstrahlung
A ₁	473 Hz		0,1-Hohlraum-Mode
C ₃	530-550 Hz	stark	starke Schallabstrahlung
C ₄	628-665 Hz	mäßig bis stark	Ring-Mode
A ₂	827 Hz		0,1-Hohlraum-Mode in Gegenphase zu A ₁
C ₅	892 Hz		
A ₃	1087 Hz		

Ihre Ergebnisse stimmen weitgehend mit den eigenen überein. Dies zeigt ein Vergleich der Formen und Frequenzen in den Tab. 5.III und 5.IV. Roberts und Rossing (1998) weisen darauf hin, dass sich manche Moden besser mit tangentialer, manche besser mit normaler Anregung hervorrufen lassen. Auch hier charakterisiert in den Tab. 5.III b und 5.IV.b der Buchstabe t bzw. n vor der Frequenz, auf welche Anregungsrichtung sich die abgebildete Mode bezieht.

Tab. 5.III.a. Schwingungen der Decke einer Violine nach Roberts und Rossing (1998), ermittelt durch holografische Interferometrie

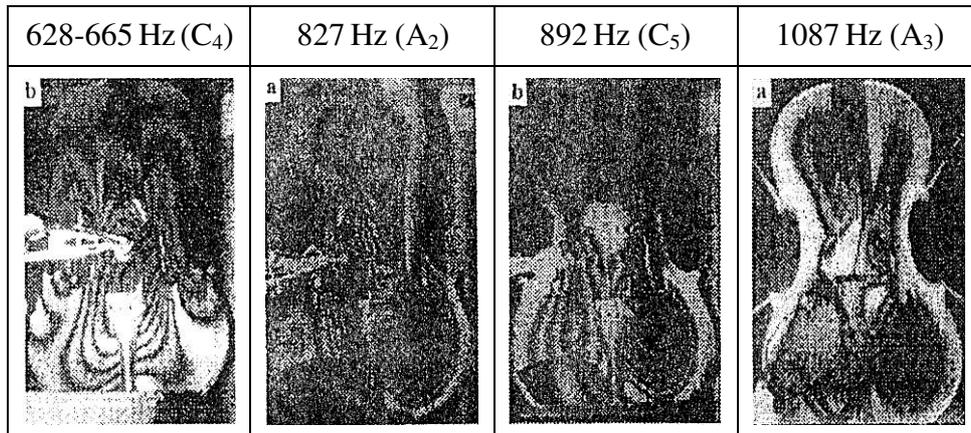


Tab. 5.III.b. Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der hier untersuchten Violine

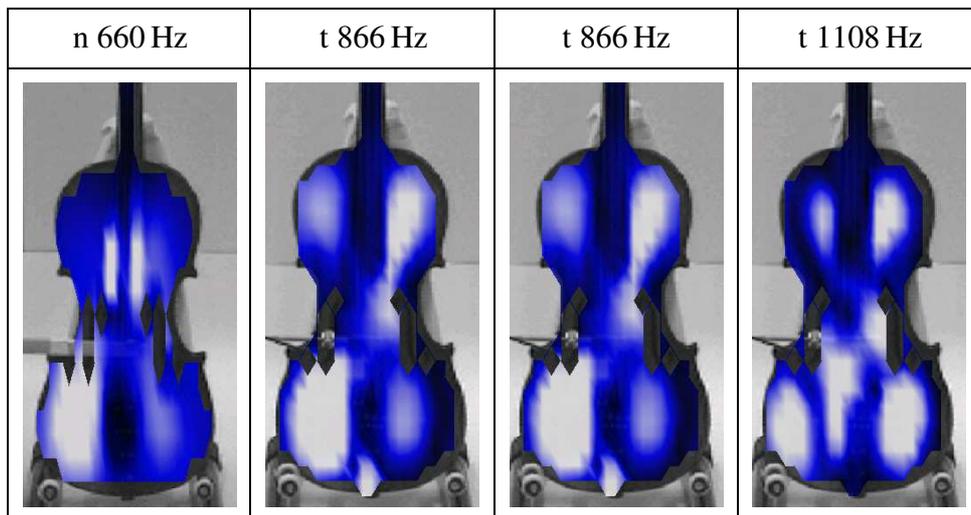


In Anknüpfung an den vorherigen Abschnitt erscheinen zwei Hinweise angebracht: Zum einen werden bei den Vergleichen in aller Regel keine Moden, sondern charakteristische Betriebsschwingungsformen präsentiert. Wie in den vorherigen Kapiteln anhand der eigenen Untersuchungen gezeigt, können diese, müssen aber nicht mit Moden übereinstimmen. Zum anderen wurde bei den eigenen Experimenten die Oberflächenschwingung lediglich auf der Vorderseite der Violine (Decke, Hals, Griffbrett und Saitenhalter) gemessen. Das bedeutet, dass Hohlraummoden (Typ A) nicht als solche detektiert werden. Sie lassen sich dann nachweisen, wenn sie von entsprechend starken Deckenschwingungen begleitet sind. Dies kann, muss aber nicht zwangsläufig der Fall sein. Zunächst war zu erwarten, dass Schwingungsmuster in den Abb. 5.2 und 5.4 vor allem mit Deckenmoden (Typ T) oder Korpusmoden (Typ C) korrespondieren würden. Die Vergleiche haben aber gezeigt, dass auch Luftmoden vom Typ A offensichtlich von so starken Deckenschwingungen begleitet werden, dass sie nachgewiesen werden konnten.

Tab. 5.IV.a. Schwingungen der Decke einer Violine nach Roberts und Rossing (1998), ermittelt durch holografische Interferometrie



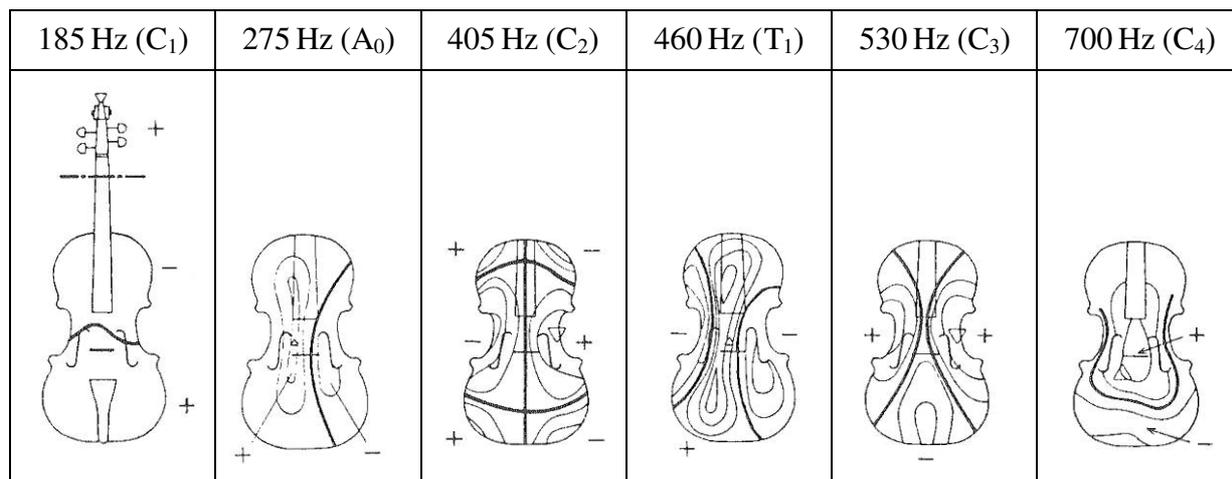
Tab. 5.IV.b. Schwingungsformen und Frequenzen der Vorderseite der hier untersuchten Violine



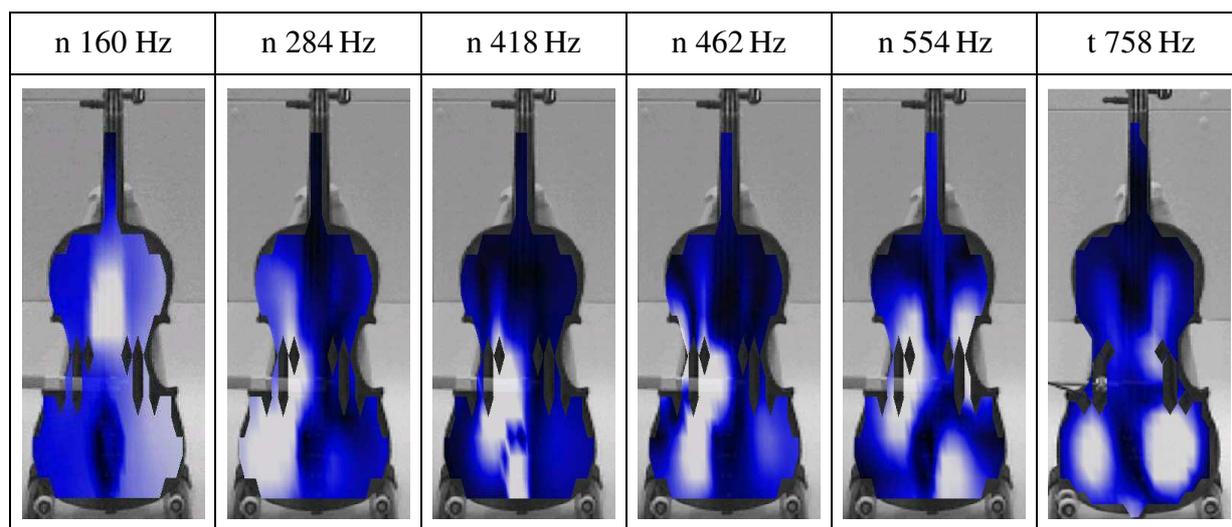
5.2.3. Speckle-Interferometrie

Moral und Jansson (1982) haben eine etwas andere Laser-Methode angewandt und mittels TV-Speckle-Interferometrie die Schwingungen von Violinen untersucht. Die Schwingungsmuster der Vorderseite sind mit der Nomenklatur nach Abschnitt 5.2.1 in Tab. 5.V.a so dargestellt, wie sich ihre Ergebnisse bei Fletcher und Rossing (1998) finden. Die Frequenzen sind die Mittelwerte mehrerer Messungen. Ihnen sind in Tab. 5.V.b als eigene Ergebnisse charakteristische Frequenzen und Betriebsschwingungsformen einer Geigendecke gegenüber gestellt, die Moden entsprechen. Es wurde jeweils diejenige charakteristische Schwingung ausgewählt, deren Frequenz der in Tab. 5.V.a angegebenen am nächsten kommt.

Tab. 5.V.a. Moden der Decke einer Violine nach Moral und Jansson (1982); fette Linien kennzeichnen Knoten



Tab. 5.V.b. Moden der Vorderseite der hier untersuchten Violine



Im Vergleich zeigt sich Übereinstimmung in einigen Punkten. Die Mode C_1 , die unterhalb der tiefsten Saitenschwingung liegt, wurde in den eigenen Untersuchungen bei einer etwas tieferen Frequenz gefunden. Dies lässt sich damit erklären, dass die Messungen mit unterschiedlicher Lagerung der Instrumente durchgeführt wurden. Bekanntlich wirken sich die Randbedingungen am meisten bei tiefen Frequenzen aus. Bei der Mode A_0 liegen Frequenzen sowie Formen nahe beieinander. Die horizontalen gebogenen Knotenlinien der C_2 -Mode finden sich beim entsprechenden eigenen Ergebnis lediglich angedeutet. Die Form der Mode T_1 zeigt sich in Tab. 5.V.b bei einer Betriebsschwingung, deren Frequenz nahezu dieselbe ist. Die Mode C_3 findet sich bei einer vergleichbaren Betriebsschwingung von etwas höherer Frequenz wieder. Dagegen hat die Mode C_4 in Hinsicht auf Form und Frequenz so gut wie kein Pendant unter den eigenen Ergebnissen. Die Schwingungsmuster der Violine, die bei den eigenen Untersuchungen bestimmt wurden, sind demnach nicht in allen Fällen, jedoch teilweise kongruent mit den Angaben von Moral und Jansson (1982) und denen im Buch von Fletcher und Rossing (1998).

5.3. Zusammenfassende Bemerkung

Winter und Wörner haben im Jahr 2000 am Institut für Mechanik Laser-Vibrometer-Messungen an einer Violine durchgeführt. Sie haben zunächst charakteristische Betriebsschwingungen bestimmt und in einer weitergehenden Modalanalyse Eigenmoden identifiziert. Wird die Violine am Steg in horizontaler Richtung angeregt, dann finden sich im betrachteten Frequenzbereich zwölf Eigenmoden. Wird senkrecht zur Decke und weitgehend mittig angeregt, so lassen sich noch einige weitere Moden nachweisen.

Für den Vergleich mit den eigenen Experimenten sind vorwiegend Ergebnisse verfügbar, die mit Laser-Interferometrie gewonnen wurden, wie z.B. von Reinicke und Cremer (1970), Moral und Jansson (1982) sowie von Roberts und Rossing (1998). Mehrere Resultate sind zu Übersichten zusammen gestellt von Fletcher und Rossing (1998) sowie von Hutchins (1996 und 1998). Abb. 5.5 zeigt ein Beispiel; die beiden linken Schwingungsbilder gehen auf experimentelle Modalanalyse, das rechte auf eine numerische FE-Berechnung mittels NASTRAN zurück.

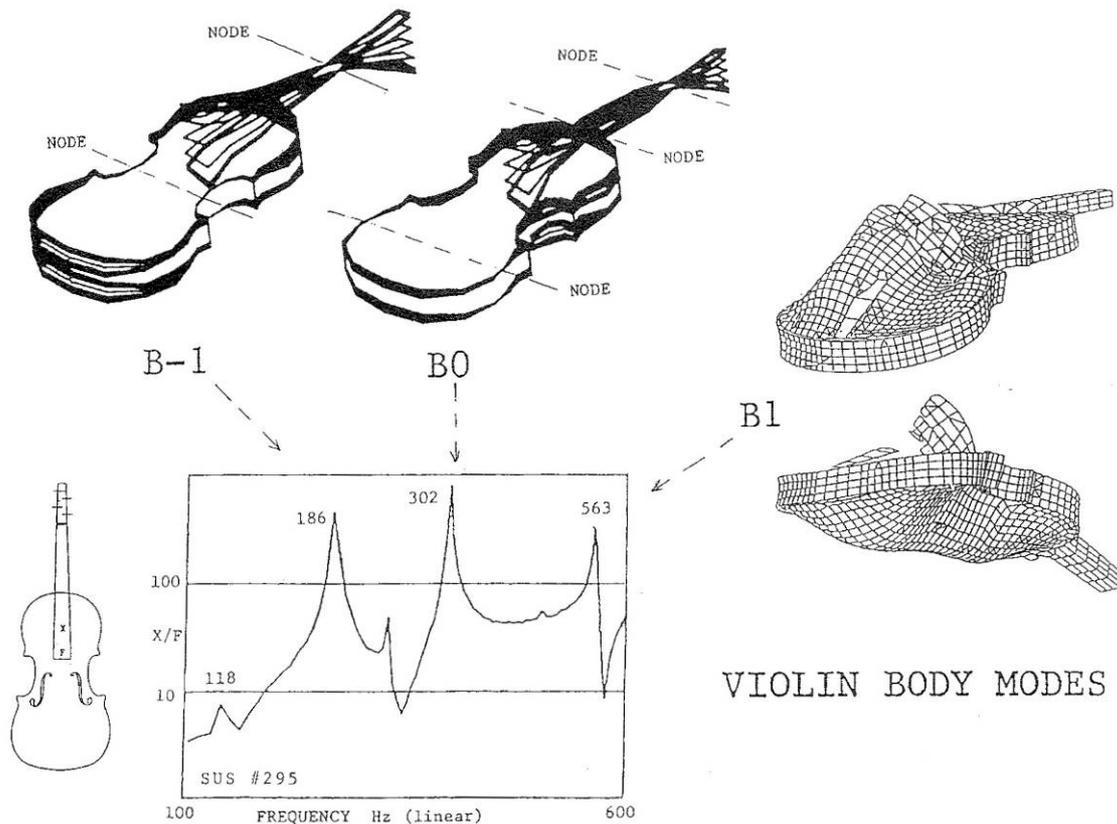


Abb. 5.5. Drei Korpusmoden der Violine, die sich als Spitzen in der Kurve der Stegadmittanz widerspiegeln, nach Hutchins (1996 und 1998).

Bei der Mode B-1 dürfte es sich um die Schwingung handeln, die bei 160 Hz bzw. 162 Hz beobachtet wurde und hier mit C_1 bezeichnet wird. Die Mode B0 stimmt hinsichtlich ihrer Frequenz mit derjenigen überein, welche bei 284 Hz bzw. 288 Hz zu finden war und hier mit A_0 bezeichnet wird. Beide Schwingungsarten erinnern an den Biegebalken. Die Mode B1 entspricht der Korpuschwingung C_3 bei 554 Hz.

An diesem Beispiel zeigt sich ein Dilemma bei den unterschiedlichen Nomenklaturen. Ein Außenstehender wird durch die verschiedenartigsten Bezeichnungen stark verunsichert. Die Urheber dieser Klassifizierungen vermuten hinter den Schwingungen der Gesamtstruktur einen dominierenden Einfluss und kennzeichnen diesen durch einen Buchstaben. Die Abfolge mit steigender Frequenz charakterisieren sie mit einer Ziffer. Roberts und Rossing (1998) haben durch unterschiedliche Arten der Anregung versucht, verschiedenartige Typen von Moden zu „züchten“. Schwingungen, die wesentlich von der Decke bestimmt sind (Kennbuchstabe T), haben sie durch mechanische Anregung am Steg hervorgerufen. Um Schwingungen des Korpus anzuregen, die zu hoher Schallabstrahlung führen, haben sie die Violine mit einem Lautsprecher beschallt. Wenn sie die Bewegung von Decke und Boden mit aufgelegten Sandsäcken unterdrückt haben, gelang es ihnen durch Anregung über Luftdruckschwankungen im Hohlraum der Violine,

- eine Helmholtz-Luftschwingung (0,0) bei 284 Hz,
- eine erste longitudinale Mode (0,1) mit einem Knoten nahe der Taille der Violine bei 499 Hz und
- eine erste transversale Mode (1,0) bei 1077 Hz,
- eine zweite longitudinale Mode (0,2) bei 1190 Hz,
- eine dritte longitudinale Mode (0,3) bei 1664 Hz,
- eine gemischte Mode (1,1) bei 1340 Hz und
- eine weitere gemischte Mode (1,2) bei 1887 Hz

hervorzurufen. Der Nomenklatur von Abschnitt 5.2.1 zufolge handelt es sich dabei um Luftmoden, die mit dem Buchstaben A und den Indizes 0 bis 6 gekennzeichnet werden. Roberts und Rossing (1998) schreiben, dass die meisten Moden durch jede Art der Anregung hervorgerufen werden konnten. Nach Überzeugung des Autors ist die Unterteilung in A-, T und C-Moden alles andere als eindeutig und wenig hilfreich. Bei den beobachteten Moden handelt es sich nie um reine Luft-, Korpus- oder Deckenschwingungen, sondern immer um Schwingungen der gesamten Festkörperstruktur samt umgebendem Fluid. Der Autor wird sich dieser Art der Kennzeichnung entziehen. Die hier beobachteten Schwingungen werden durch ihre Frequenz und die Bewegung der Vorderseite beschreiben, wie sie in den Zusammenstellungen dieses Bandes dargestellt ist. Da nicht bekannt ist, wie sich die Rückseite bewegt, erlaubt dies zwar nicht, die Abstrahlung von Schall zu behandeln. Zu kennen, wie die Vorderseite schwingt, reicht aber aus, die Interaktion Decke-Steg zu verstehen.

Bei den Vergleichen des vorigen Abschnitts war in Bezug auf die Schwingungsformen und -frequenzen in einigen, jedoch nicht in allen Fällen Übereinstimmung zu erkennen. Abweichungen können mehrere Gründe haben. Eigene Untersuchungen am Cello (Fleischer 2009a) haben belegt, dass unterschiedliche Lagerungsbedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Am stärksten prägt sich dies bei tiefen Frequenzen aus. Des Weiteren hat sich dabei gezeigt, dass unterschiedliche Arten der Anregung ebenfalls unterschiedliche Schwingungen hervorrufen. Ob Betriebsschwingungen (wie sie hier zunächst ermittelt wurden) oder Eigenmoden (wie sie erst durch eine nachgeschaltete Modalanalyse identifiziert werden) vorliegen, ist bei vielen Untersuchungen in der Literatur nicht explizit unterschieden. Lediglich in einem Fall (Marshall 1995) ist eine Modalanalyse explizit beschrieben. Ansonsten ist zu vermuten, dass es sich bei den Literaturabgaben in den meisten Fällen um Betriebsschwingungen handeln wird. Somit mussten hier häufig Ergebnisse miteinander verglichen werden, die auf unterschiedliche Art und Weise zustande gekommen sind. Es verwundert nicht, dass dieser Vergleich nicht immer von Erfolg gekrönt sein kann.

6. MECHANISCHE ADMITTANZ

Die Abb. 5.5 des vorigen Kapitels hat deutlich gemacht, dass sich die relevanten Schwingungen der Decke in der Admittanz am Steg widerspiegeln müssen. Diese Beobachtung war auch schon beim Cello (Fleischer 2009b) zu machen. Was die Admittanz bedeutet und wie sie gemessen werden kann, ist Thema dieses Kapitels.

6.1. Definition und Bedeutung

Um die Reaktion des Korpus nahe der Stelle zu kennzeichnen, an welcher er in Kontakt mit der Saite ist, soll im Folgenden die mechanische Admittanz (im Englischen oft als *Mobility* bezeichnet) bestimmt werden. Diese Messgröße wird im vorliegenden Abschnitt definiert und interpretiert. Die Betrachtungen beziehen sich auf harmonische Vorgänge mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ (f ist die Frequenz).

Nach DIN 1320 wird die Admittanz aus einer dynamischen und einer kinematischen Größe gebildet. 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 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. Werden beide Größen am gleichen Punkt und in der gleichen Richtung gemessen, spricht man von einer Punkt-Admittanz. Im Gegensatz dazu werden die Übertragungsfunktionen, die bei den Schwingungsmessungen der Kapitel 3 bis 5 bestimmt wurden, als Transfer-Admittanzen bezeichnet.

Der Betrag der Admittanz Y ist ein Maß für die gesamte „Schwingfreudigkeit“ einer Struktur an der betreffenden Stelle in der betreffenden Richtung. Ihr Realteil G wird als Konduktanz, ihr Imaginärteil B als Suszeptanz bezeichnet.

Die Konduktanz G , d.h. der Realteil der Admittanz, ist immer positiv und ein Maß für die Leistung

$$P_w = \frac{1}{2} G F^2 \quad , \quad (5)$$

die am Messpunkt irreversibel in den Steg eingebracht wird. Diese „Wirk“-Leistung ist von elementarer Bedeutung für die Funktion eines akustischen Musikinstruments. Nur sie kann der Erzeugung von Schall dienen. Denjenigen Anteil dieser Leistung, welcher nicht im Korpus durch Reibung in Wärme umgewandelt wird, strahlt das Instrument ins Schallfeld ab.

Die *Suszeptanz B*, d.h. der Imaginärteil der Admittanz, kann beide Vorzeichen annehmen. Positives Vorzeichen besagt, dass der Steg sich am Messpunkt wie eine Feder verhält. Ist die Suszeptanz negativ, reagiert der Steg wie eine Masse. In beiden Fällen entsteht ausschließlich „Blind“-Leistung, die in Form von potentieller bzw. kinetischer Energie zwischengespeichert wird. Da diese Leistung anschließend wieder zurückgegeben wird, trägt sie nicht zur Schallabstrahlung bei. Die „Schein“-Leistung ergibt sich dadurch, dass in Gl. (5) die Konduktanz durch den Betrag der Admittanz ersetzt wird, was auf

$$P_s = \frac{1}{2} Y F^2 \quad , \quad (6)$$

führt. Die Wirkleistung nach Gl. (5) ist in der Scheinleistung nach Gl. (6) enthalten.

Von größter Aussagekraft ist die Admittanz, die direkt an den Auflagepunkten der Saiten ermittelt wird; vgl. Fleischer (2009b). An diesen Punkten wird Energie in den Korpus eingebracht. Sie zu messen, gelingt in manchen Fällen nicht. Ersatzweise wird im Folgenden die Admittanz in der Nähe der Stellen bestimmt, an denen die Saiten über den Steg geführt sind. Die bisherigen Erfahrungen mit Schwingungsexperimenten lassen erwarten, dass dabei die Richtung eine wichtige Rolle spielen wird, in der die Admittanz gemessen wird.

Wesentlich für die Funktion eines Musikinstruments ist, wie oben ausgeführt, die Wirkleistung, die der Steg aufnimmt, in Abhängigkeit von der Frequenz. Nur sie kann als Schall abgestrahlt werden. Wird nach Einsetzen eines anderen Steges bei ein und demselben Instrument mit unveränderter Besaitung eine größere Konduktanz gemessen, bedeutet dies, dass mehr Wirkleistung ins Instrument fließen kann. Sofern keine erhöhte Reibung im Bereich des Steges auftritt, beispielsweise zwischen Füßen und Decke, kann erwartet werden, dass das Instrument eine größere Schalleistung abgeben wird.

6.2. Messungen

6.2.1. Messaufnehmer und Versuchsaufbau

Experimentell wurde die Admittanz mit einer Messapparatur bestimmt, deren Kernstück ein Impedanzmesskopf B&K 8000 der Firma Brüel & Kjaer war. Abb. 6.1 zeigt ihn zusammen mit dem elektrodynamischen Schwingerreger B&K 4810. Neben einen Kraftsensor enthält der Messkopf auch einen Beschleunigungssensor, die beide nach dem Piezoprinzip arbeiten. Deren Signale wurden über die beiden schwarzen Kabel an zwei Ladungsverstärkern B&K 2635 weitergeleitet und dort aufbereitet. Bei der Messung wurde das obere Ende des Messkopfes seitlich gegen den Steg gedrückt. Die statische Vorlast war dabei so groß, dass der Messkopf nie abhob, sondern ständig Kontakt mit dem Steg hatte. Während der Messung lässt sich dies leicht anhand des Geräusches überprüfen, das dabei entsteht.



Abb. 6.1. Schwingerreger mit aufgeschraubtem Impedanzmesskopf.

Der Steg der Violine hat eine Masse von wenig mehr als einem Gramm. Um den störenden Einfluss einer zusätzlichen Masse gering zu halten, hat Dünnwald (1982, 1992) eine direkte Anregung der Metallsaite entwickelt und erprobt. Diese Methode kommt, in Kombination mit einer optischen Erfassung der Schwingung, auch im Violinen-Testverfahren VIAS (2009) des Instituts für Wiener Klangstil zum Einsatz. Bei den eigenen Untersuchungen mit dem Impedanzmesskopf wurde ein anderer Weg beschritten. Der bewegte Teil des Messkopfes hat eine Masse von 1,1 Gramm, die von gleicher Größenordnung wie die des Steges ist. Daraus würde ein beträchtlicher Messfehler resultieren, der noch größer wäre, wenn – um besser positionieren zu können – eine Tastspitze aufgesetzt würde. Dies ist beispielsweise beim Messkopf B&K 8001 möglich ist; vgl. Fleischer (2009b). Der Einfluss der Masse, die zwischen Sensor und Messobjekt mitbewegt wird, wurde mittels einer elektrischen Masse-Kompensationseinheit B&K 5565 minimiert. Deren Einstellung wurde anhand einer „Leermessung“ überprüft, die ergab, dass im dargestellten Bereich keinerlei Einfluss der Aufnehmermasse nachzuweisen war.

Es wurde ein Analysator vom Typ Ono Sokki CF-5210 verwendet. Dieses Gerät kann nicht nur auf zwei Kanälen eine Fourier-Transformation (FFT) durchführen, sondern auch eine Vielfalt von Messsignalen liefern, die an die Analyseparameter angepasst sind. Es wurde ein Pseudo-Rauschsignal ausgewählt, das Anteile genau bei den aktuellen Analysefrequenzen enthält und einen minimalen Spitzenfaktor aufweist. Dieses Rauschsignal wurde in den Leistungsverstärker B&K 2706 eingespeist und dem Schwingerreger zugeführt; siehe das weiße Kabel in Abb. 6.1. Es erwies sich als zielführend, über zehn Messungen zu mitteln. Für die Experimente, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln dieses Berichts aufgeführt sind, wurden Frequenzen zwischen 0 Hz und 4000 Hz betrachtet. Die Frequenzauflösung war 2,5 Hz. Damit dürfte der wichtigste Bereich von Frequenzen der Geigentöne abgedeckt sein. Die Messdiagramme wurden mit einem Plotter hp 7470A aufgezeichnet und liegen als Papierdokumente vor.

Mit diesem Versuchsaufbau ist es möglich, die Punkt-Admittanz nach Gl. (4) experimentell zu bestimmen. Das Ergebnis ist die Admittanz-Frequenz-Kurve. Betrag, Realteil und Imaginärteil der Admittanz lassen sich im linearen Maßstab darstellen. Wird eine logarithmische Teilung der Ordinate gewünscht, lässt sich nur der Betrag darstellen. Die Abszisse (Frequenzachse) ist – wie dies der FFT entspricht – linear geteilt.

6.2.2. Messanordnung

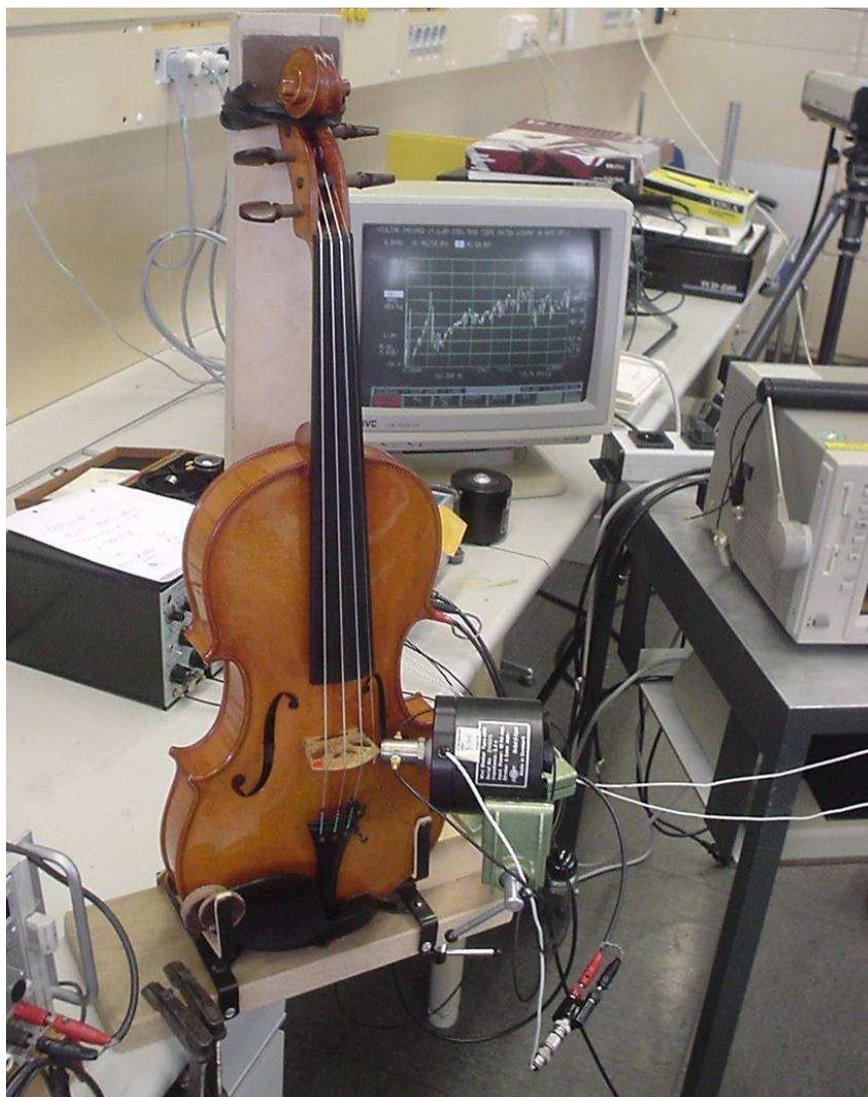


Abb. 6.2. Messung der Admittanz am Steg vom Typ DAC auf der Seite der Diskantsaiten.

Abb. 6.2 zeigt, wie die Violine aufrecht stehend in einem hölzernen Stativ befestigt war, das aus der Werkstatt des Instrumentenbauers stammte. Damit war eine reproduzierbare, nicht ganz wirklichkeitsfremde Lagerung sichergestellt. Nach Untersuchungen von Marshall (1986a) dürfte eine Lagerung nahe der Kinnstütze und am Hals den Spielbetrieb relativ gut nachbilden. Der Messkopf wurde von der Seite her mit ausreichender Anpresskraft gegen den Steg gedrückt. Aus geometrischen Gründen war es nicht möglich, den Schwingerreger und den Messkopf parallel zur Decke auszurichten. Abb. 6.3 ist zu entnehmen, dass unter einem Winkel von etwa 30° zur Decke angeregt und gemessen wurde. In den Abb. 6.2 und 6.3 ist die Situation bei der Messung am diskantseitigen Ende des Steges zu erkennen.

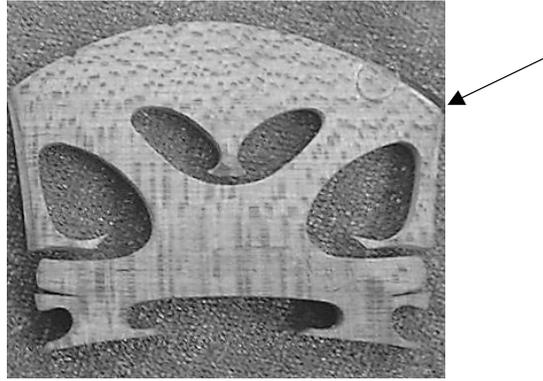


Abb. 6.3. Richtung und Ort der Messung am traditionellen Steg auf der Seite der Diskantsaiten.

In Abb. 6.4 befindet sich die Violine nach wie vor im Stativ. Der Schwingerreger greift nun am bassseitigen Ende des Steges an. Diese Situation ist in Abb. 6.5 noch einmal schematisch dargestellt. Alternativ könnte – wie auch bei den Schwingungsmessungen der vorigen Kapitel –



Abb. 6.4. Messung der Admittanz am Steg DAC auf der Seite der Basssaiten.

unter den Winkeln 0° bzw. 90° zur Decke gemessen werden. Aus geometrischen Gründen müsste dann ein Verlängerungsstück eingesetzt werden. Bei den Messungen am Cello (Fleischer 2009b) wurde dies mittels einer Tastspitze erreicht, die auf den Kraftaufnehmer geschraubt war. Wegen der zusätzlichen Masse hätte dies beim Steg der Violine eine Verfälschung der Messergebnisse zur Folge, die nicht mehr akzeptabel wäre. Eine mögliche Lösung bietet ein Verlängerungsstück, das zwischen Schwingerreger und Messkopf eingefügt wird. Damit ließe sich in tangentialer und in normaler Richtung messen. In Normalenrichtung könnte die Admittanz an den Auflagepunkten der Saiten gemessen werden. Messungen in tangentialer Richtung wären zumindest an den beiden Ecken des Steges möglich. Die hier gewählte Art, den Impedanzmesskopf zu orientieren, stellt einen Kompromiss dar. Sie soll dazu dienen, mit wenigen Messungen wirklichkeitsnahe Information über die Aufnahmefähigkeit des Steges zu gewinnen.

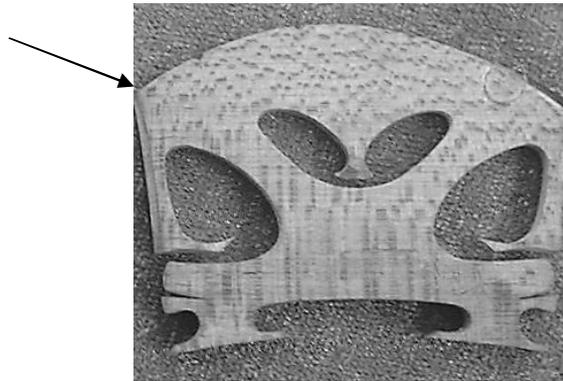


Abb. 6.5. Richtung und Ort der Messung am traditionellen Steg auf der Seite der Basssaiten.

6.3. Zusammenfassende Bemerkung

Die mechanische Admittanz ist eine sehr aussagekräftige Kenngröße. Wird sie am Steg gemessen, so kennzeichnet sie die „Schwingfreudigkeit“ am Messpunkt und lässt damit Schlüsse darauf zu, in welchem Maße das Instrument Energie aufzunehmen in der Lage ist. Dadurch gibt sie Hinweise, bei welchen Frequenzen wenig und bei welchen viel Schwingungsenergie in den Korpus fließen kann. Nur dann, wenn die Saiten Energie an den Korpus abgeben, kann auch Schall abgestrahlt werden. Unter der vereinfachenden Annahme, dass dies im Wesentlichen über den Steg geschieht, ist die Stegadmittanz ein adäquates Maß für den möglichen „Output“ des Instruments.

Im Frequenzgang der Admittanz spiegeln sich die Schwingungen der Decke wider. Bei den Schwingungsmessungen der vorigen Kapitel hatte sich gezeigt, dass die Richtung, in welcher der Steg angeregt wird, einen wesentlichen Einfluss darauf hat, welche Schwingungen sich ausbilden. Es wurde entschieden, die Admittanz nicht senkrecht oder parallel zur Decke, sondern in einem Winkel von 30° zu bestimmen. Unter diesem Winkel sollte an beiden Enden des Steges gemessen werden.

Der Aufbau für diesen Versuch ist ausführlich beschrieben. Großer Wert wurde darauf gelegt, dass die effektive Masse des Impedanzkopfes das Ergebnis möglichst wenig verfälscht. Dies geschah zum einen durch die Auswahl eines möglichst leichten Messkopfes und zum anderen dadurch, dass eine Masse-Kompensationseinheit verwendet wurde. Damit ist sichergestellt, dass aussagekräftige und jederzeit reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden.

7. ERGEBNISSE DER ADMITTANZ-MESSUNGEN

Ein und dieselbe Violine wurde mit zwei unterschiedlichen Stegen versehen. Mit der Messapparatur, die im vorigen Kapitel beschrieben ist, wurde die Admittanz sowohl in der Nähe der Diskantsaiten als auch in der Nähe der Basssaiten gemessen, so dass nun vier vollständige Sätze von Messergebnissen vorliegen.

7.1. Komplexe Admittanz

Um Realteil, Imaginärteil und Betrag der komplexen Admittanz zu veranschaulichen, sind Resultate von Messungen am traditionellen Steg sowie von Messungen am Steg DAC angegeben. Zuerst werden jeweils die Resultate gezeigt, wie man sie in der Nähe der Basssaiten erhält. Daran anschließend wird die Admittanz, gemessen in der Nähe der Diskantsaiten, präsentiert.

Die Mess-Bandbreite war 4000 Hz, die Frequenzauflösung 2,5 Hz. In den Diagrammen sind sämtliche Achsen, auch die Ordinaten, linear geteilt. An den Ordinaten sind sowohl positive, als auch negative Werte angetragen. Letztere können allerdings nur beim Imaginärteil (der Suszeptanz B) auftreten, der in den Abb. 7.1 bis 7.4 jeweils oben angeordnet ist. Wie in Abschnitt 6.1 ausgeführt, bedeutet positives Vorzeichen der Suszeptanz, dass der Steg sich am Messpunkt wie eine Feder verhält. Ist die Suszeptanz negativ, dann reagiert der Steg wie eine Masse.

Der Realteil (die Konduktanz G) ist in der Mitte angegeben. Er ist stets positiv und nach Gl. (5) ein Maß für die Leistung, die am Messpunkt irreversibel in den Steg eingebracht werden kann. Für die Funktion eines Musikinstruments ist er von hoher Aussagekraft. Der Betrag der Admittanz, der stets unten angefügt ist, ergibt sich gemäß

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (7)$$

als Wurzel aus der Summe der Quadrate von Real- und Imaginärteil und ist naturgemäß ebenfalls stets positiv.

Es ist zu erwarten, dass Real- und Imaginärteil miteinander verknüpft sein werden. Beispielsweise sollte ein Maximum im Realteil mit einem Nulldurchgang im Imaginärteil einhergehen. In einigen markanten Fällen lässt sich dies in den Abb. 7.1 bis 7.4 tatsächlich beobachten. Es hat jedoch den Anschein, dass die gewählte Frequenzauflösung nicht fein genug ist, um jedes Detail dieser Art sichtbar zu machen.

7.1.1. Komplexe Admittanz am traditionellen Steg

Die Ergebnisse von Abb. 7.1 beziehen sich auf die Messrichtung und -stelle, wie sie in Abb. 6.5 skizziert sind. Der Impedanzmesskopf drückte unter ausreichender Vorlast an der Seite der Basssaiten gegen den Steg traditioneller Bauart. Er war so orientiert, dass die Admittanz in einem Winkel von 30° zur Decke bzw. von 60° zur Normalen erfasst wurde.

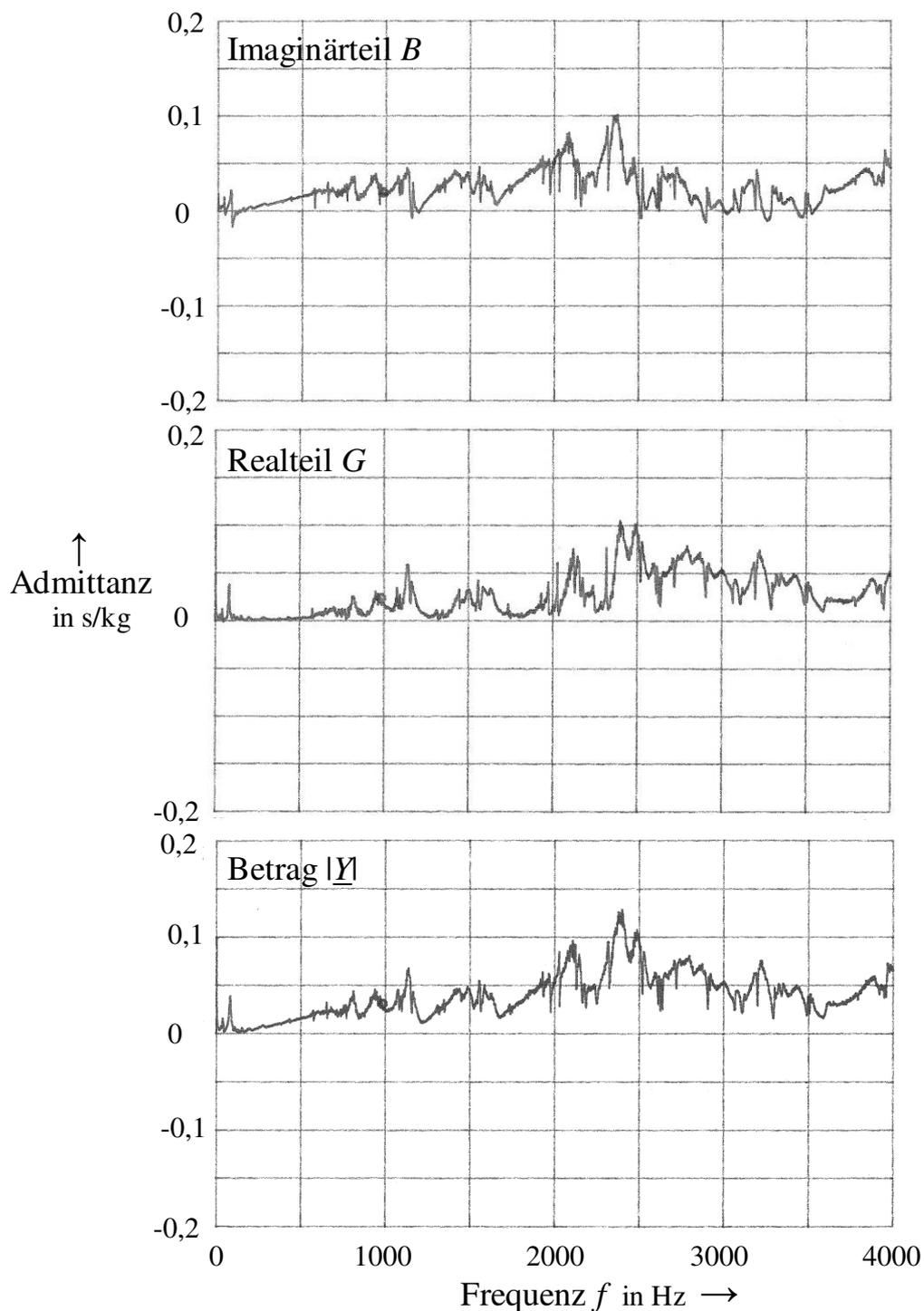


Abb. 7.1. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} gemessen am bassseitigen Ende des traditionellen Steges als Funktion der Frequenz f .

Wird am selben Steg von der Seite der Diskantsaiten her gemessen, dann ergeben sich die Kurven von Abb. 7.2. Sie unterscheiden sich von denjenigen, welche die Messung auf der Seite der Basssaiten ergeben hat. Dies verwundert nicht, da der Steg selbst nicht ganz symmetrisch ist. Darüber hinaus findet jeder seiner FüÙe auf der Decke und ihrer Unterkonstruktion eine andersartige Lagerung (Bassbalken bzw. Stimmstock) vor. Demnach ist es angezeigt, nicht nur eine, sondern beide Messungen durchzuführen.

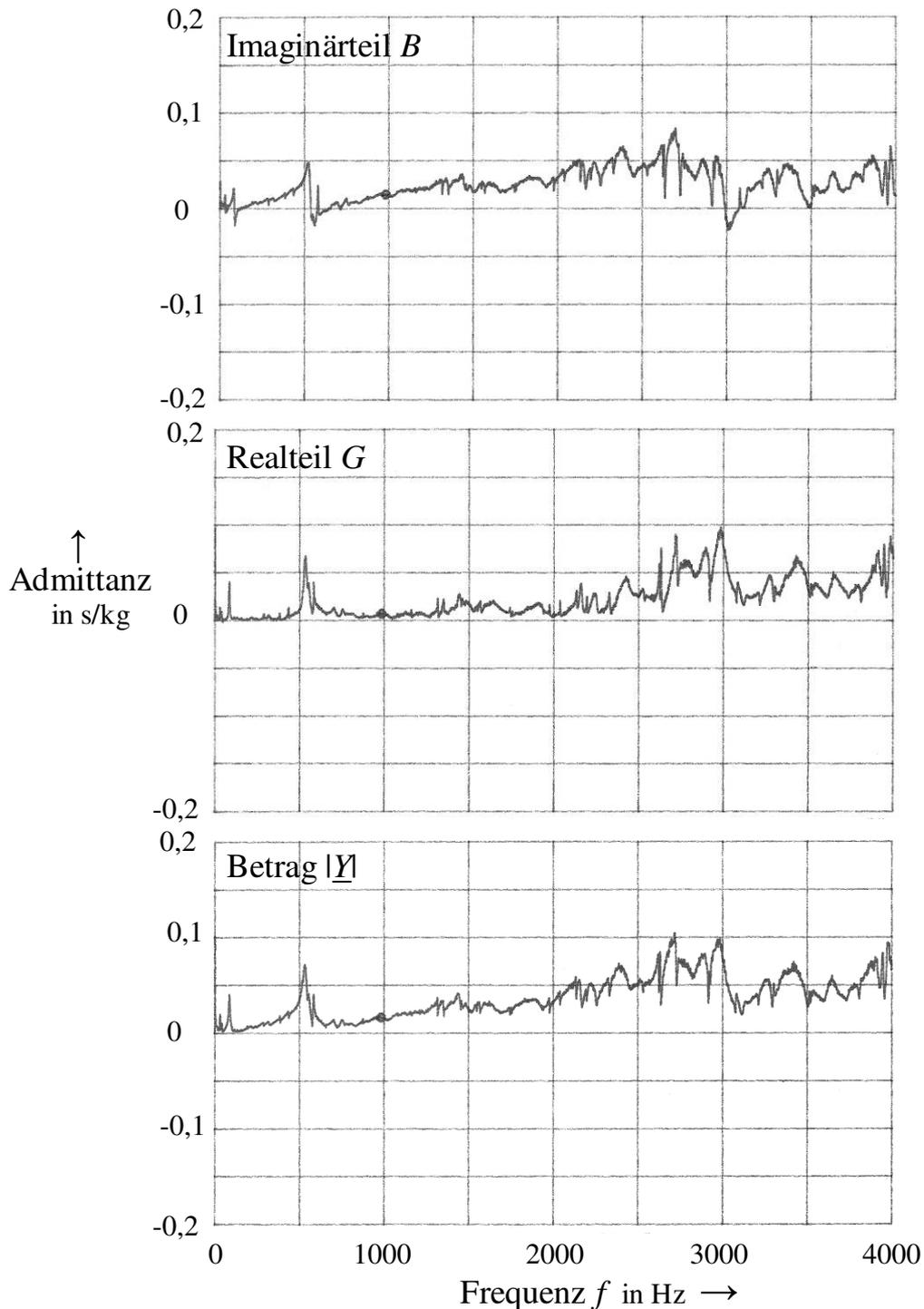


Abb. 7.2. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} gemessen am diskantseitigen Ende des traditionellen Steges als Funktion der Frequenz f .

In der Suszeptanz B (oberes Diagramm in den Abb. 7.1 und 7.2) überwiegen die positiven Anteile. Offenbar reagiert der Steg vor allem wie eine Feder. Die Messungen an beiden Seiten des Steges machen deutlich, dass der Realteil G und der Betrag $|Y|$ (mittleres bzw. unteres Diagramm) ähnlich verlaufen. Zwar weist gemäß Gl. (7) der Betrag naturgemäß ein höheres Niveau als der Realteil auf; in Hinsicht auf die Maxima ist jedoch eine deutliche Verwandtschaft zu erkennen. Die Software des Analysators erlaubt es lediglich, den Betrag, nicht jedoch den Realteil auf einer logarithmischen Skala darzustellen. Zwar hat im vorliegenden Zusammenhang die Konduktanz die höhere Aussagekraft. Soll für das Ergebnis auf einer loga-

rithmischen Skale dargestellt werden, erscheint es jedoch zulässig, ersatzweise den Betrag der Admittanz anzugeben und zu interpretieren. Dies wird später auch praktiziert werden.

7.1.2. Komplexe Admittanz am Steg DAC

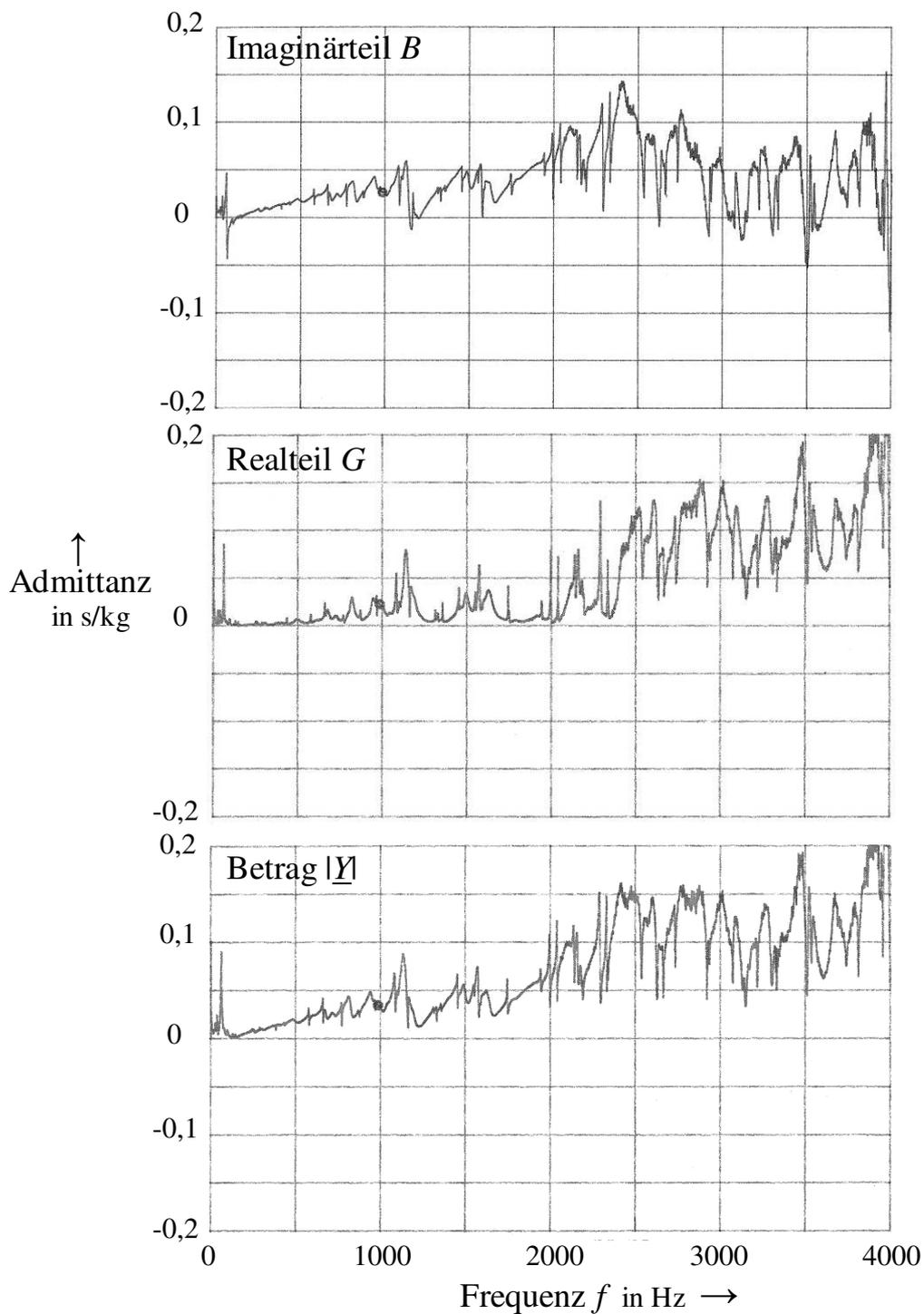


Abb. 7.3. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz \underline{Y} , gemessen am bassseitigen Ende des Steges DAC als Funktion der Frequenz f .

Nachdem der traditionelle Steg entnommen und der Steg DAC eingefügt worden war, wurde die Admittanz erneut gemessen. Die Ergebnisse sind auf einer linear geteilten Ordinate in den Abb. 7.3 und 7.4 zusammen gestellt. Auch hier zeigt ein erster Vergleich Unterschiede zwischen den Messungen am bass- bzw. diskantseitigen Ende. Vergleicht man mit den Resultaten des traditionellen Steges, ergibt die Messung an beiden Enden deutlich höhere Werte der Admittanz, wenn der Steg DAC eingesetzt ist. In Abb. 7.4 wird bei einigen Frequenzen sogar der Wert von 0,2 s/kg überschritten, bis zu dem die Skale der Ordinate reicht.

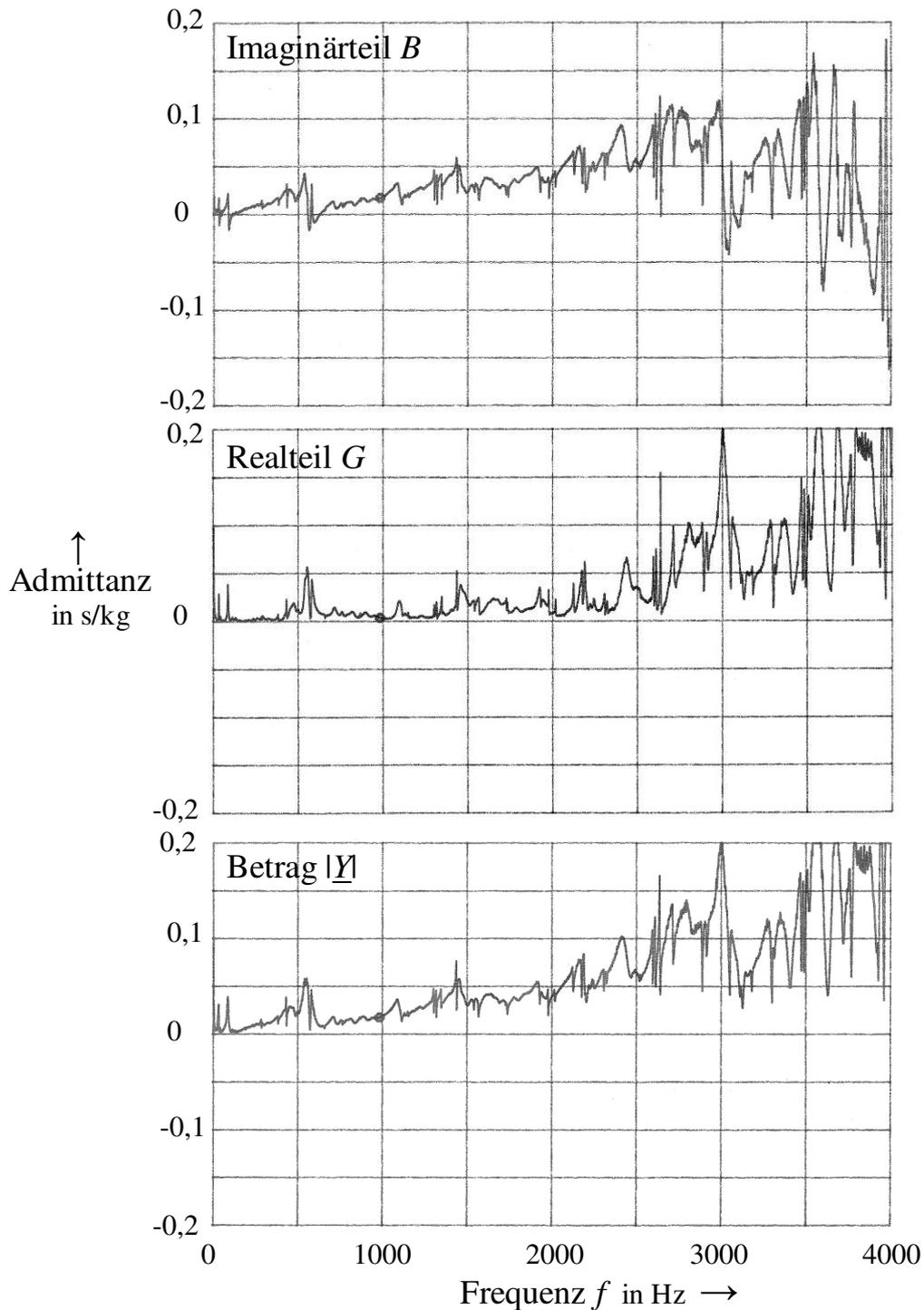


Abb. 7.4. Imaginärteil (oben), Realteil (Mitte) und Betrag (unten) der Admittanz Y , gemessen am diskantseitigen Ende des Steges DAC als Funktion der Frequenz f .

Alle vier Abbildungen belegen die wohlbekannte Tatsache, dass der Imaginärteil (oberes Diagramm) beide Vorzeichen annehmen kann, der Realteil (mittleres Diagramm) dagegen immer positiv ist. Im Wesentlichen zeigt der Realteil die gleichen Charakteristika wie der Betrag (unteres Diagramm). Insbesondere haben die Maxima dieselben Höchstwerte, da der Imaginärteil bei den entsprechenden Frequenzen verschwindet.

Festzuhalten bleibt, dass im vorliegenden Zusammenhang der Realteil (die Konduktanz) die wesentliche Kenngröße ist. Es wäre wünschenswert, diese Größe logarithmisch anstelle von linear aufzutragen. Dies ist im Sinne einer Anpassung an die Eigenschaft des Gehörs, eher mit einer Pegel- als mit einer Schalldruck-Skala zu arbeiten (Fastl und Zwicker 2006). Da im Analysator diese Darstellung für den Realteil nicht verfügbar ist, wird im Folgenden ersatzweise der Betrag (unten in den Abb. 7.1 bis 7.4) auf einer logarithmischen Skale aufgetragen.

7.2. Reproduzierbarkeit

Die folgenden Abb. 7.5 bis 7.8 zeigen jeweils zwei Messergebnisse in dieser Darstellungsart. Die Ordinate ist logarithmisch unterteilt. Jede Teilung entspricht 5 dB *re* 1 s/kg. Der gesamte Bereich umfasst somit zwei Zehnerpotenzen bzw. den Faktor 100 bzw. 40 dB.

7.2.1. Betrag der Admittanz am traditionellen Steg

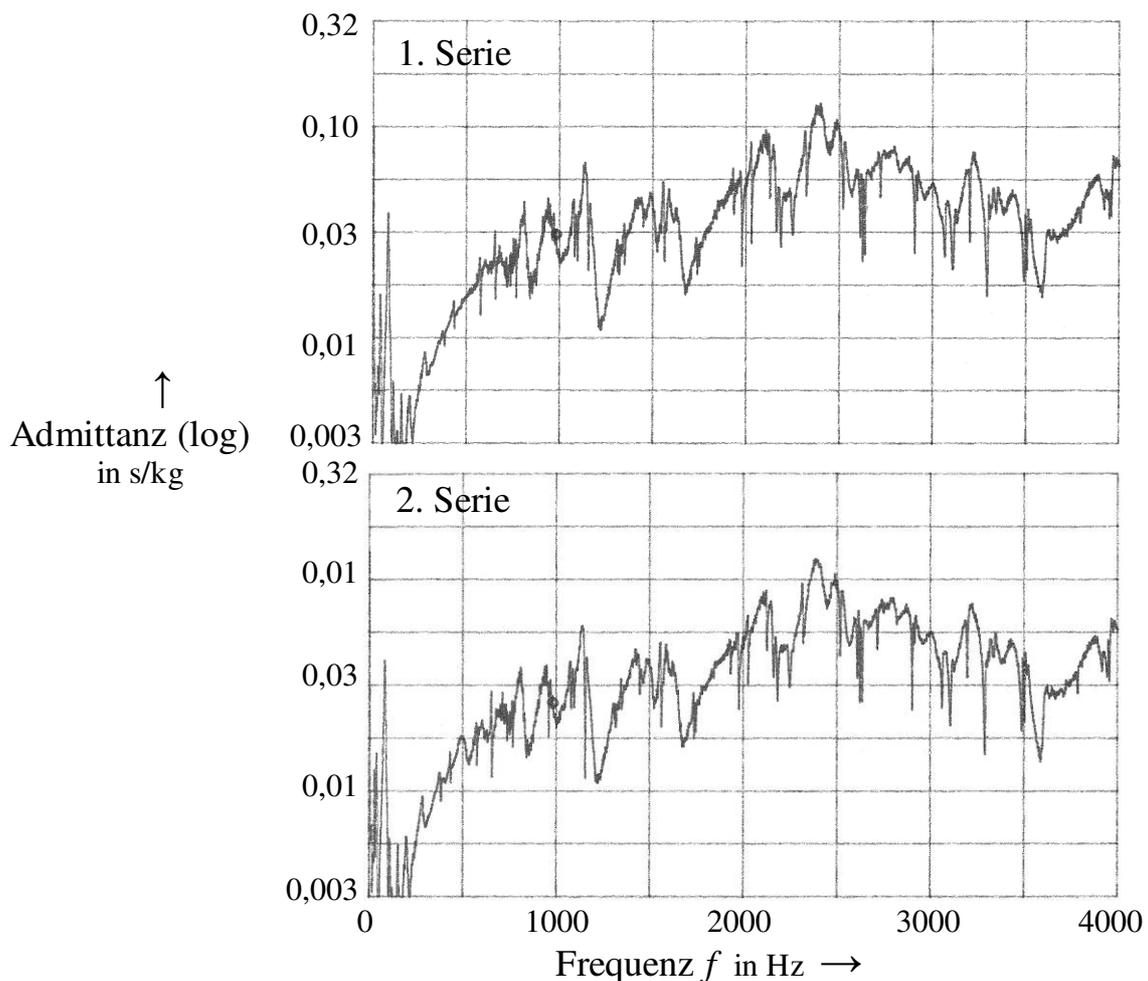


Abb. 7.5. Betrag der Admittanz Y , bezogen auf 1 s/kg und logarithmiert, in zwei Durchgängen gemessen am bassseitigen Ende des traditionellen Steges als Funktion der Frequenz f .

Bei Messungen mechanischer Schwingungen lassen sich Ergebnisse oftmals nicht im gewünschten Ausmaß reproduzieren. Ob dies auch auf die hier betrachteten Admittanz-Messungen zutrifft, wird im vorliegenden Abschnitt überprüft. Die Versuchsanordnung war wie in Abschnitt 6.2 beschrieben. Nachdem eine Messung durchgeführt worden war (1. Serie; oben), wurde der Schwingerreger vom Steg entfernt und dann erneut angesetzt. Danach wurde ein weiteres Mal gemessen (2. Serie; unten). Zwischen diesen beiden Messungen vergingen wenige Minuten.

Wird am traditionellen Steg in der Nähe der Basssaiten gemessen, erhält man die Resultate von Abb. 7.5. Die Kurven von zwei Messdurchgängen unter sonst gleichen Bedingungen zeigen nur geringfügige Abweichungen. Dies gilt auch für die experimentellen Ergebnisse von Abb. 7.6, die sich auf eine gleichartige Wiederholungsmessung am diskantseitigen Ende desselben Steges beziehen.

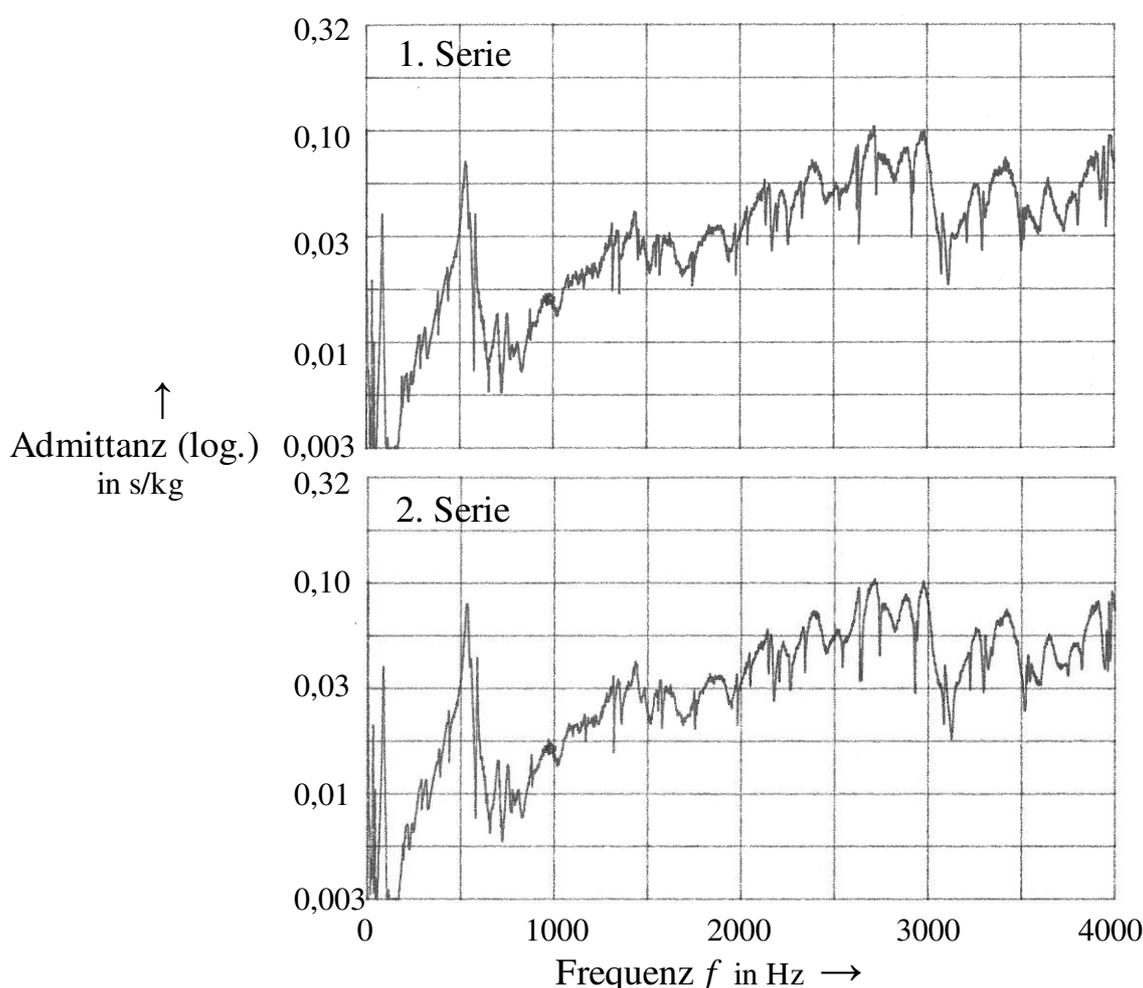


Abb. 7.6. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skala, in zwei Durchgängen gemessen am diskantseitigen Ende des traditionellen Steges als Funktion der Frequenz f .

Die Experimente am traditionellen Steg haben gezeigt, dass die Admittanz-Messungen reproduziert werden können. An beiden Enden wurde der Betrag der Admittanz gemessen und auf einer logarithmischen Skala aufgetragen. Die Messkurven ließen sich jeweils sehr gut reproduzieren. Obwohl dies bereits darauf hindeutet, dass die gezeigten Diagramme keine Zufallsbefunde sind, wurde noch eine Messreihe am Steg DAC angeschlossen.

7.2.2. Betrag der Admittanz am Steg DAC

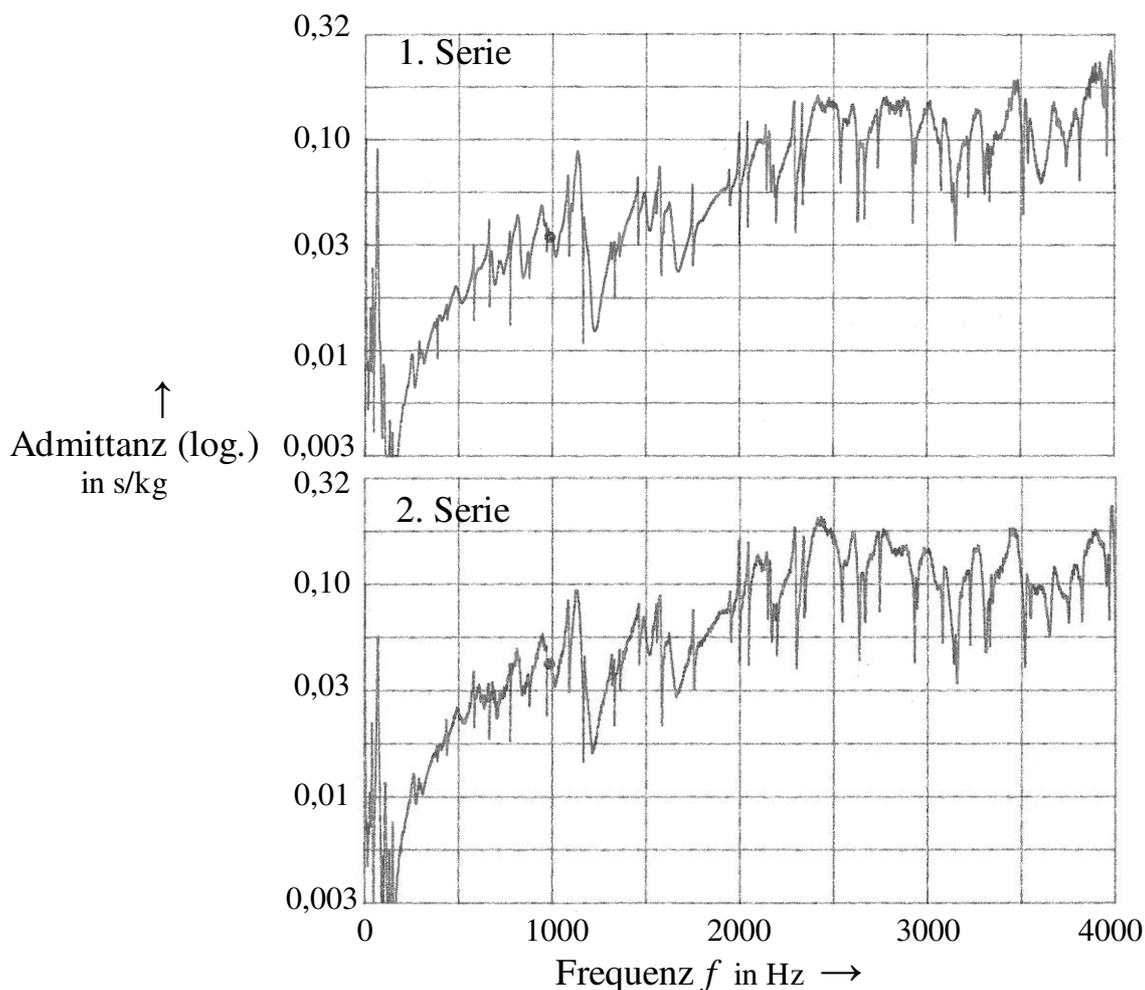


Abb. 7.7. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skale, in zwei Durchgängen gemessen am bassseitigen Ende des Steges DAC als Funktion der Frequenz f .

Abb. 7.7 bezieht sich auf die Messung auf derjenigen Seite des DAC-Steges, an der die Basssaiten aufliegen. Nachdem die Messung der 1. Serie durchgeführt worden war, wurde der Schwingerreger vom Steg abgenommen. Danach wurde er erneut angesetzt und eine weitere Messung (2. Serie) schloss sich an. Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt die große Ähnlichkeit.

Erwartungsgemäß verfestigt sich diese Beobachtung, wenn am selben Steg in der Nähe der Diskantsaiten gemessen wird. Zwei Resultate wiederholter Messungen sind in Abb. 7.8 einander gegenüber gestellt. Auch hier ist der Befund, dass die Unterschiede klein und lediglich bei Details erkennbar sind. Beide Messungen führen zu Diagrammen, die in allen wesentlichen Merkmalen übereinstimmen.

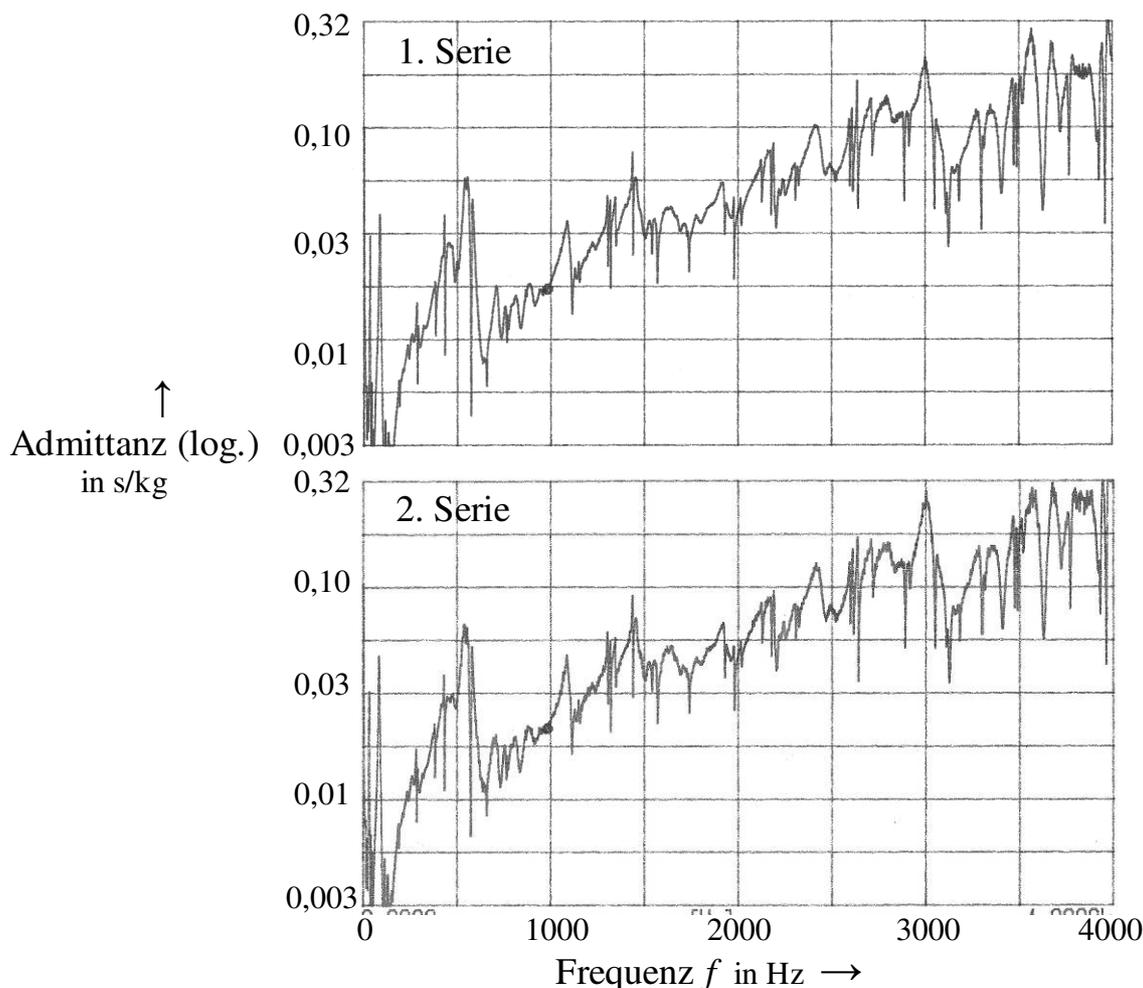


Abb. 7.8. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skale, in zwei Durchgängen gemessen am diskantseitigen Ende des Steges DAC als Funktion der Frequenz f .

In allen vier Fällen haben wiederholte Messungen ähnliche Resultate ergeben. Dies belegt, dass die Ergebnisse zuverlässig sind. Sie stellen keine Zufallsprodukte dar, sondern lassen sich hinreichend reproduzieren. Damit ist der Weg frei, die beiden Stege in Hinsicht auf ihre Admittanz zu vergleichen.

7.3. Vergleich der Messergebnisse

Ergebnisse der Messungen an den beiden Stegen sind in den folgenden Abb. 7.9 und 7.10 einander gegenüber gestellt. Es ist der Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Die Abszisse ist linear geteilt und reicht von 0 Hz bis 4000 Hz, so dass eine Teilung 500 Hz entspricht. Die tiefste Note g bzw. $G3$, die auf einer Geige gespielt werden kann, entspricht einer Grundfrequenz von 196 Hz. Von praktischem Interesse sind somit Frequenzen oberhalb von etwa 200 Hz. Der Maßstab der Ordinate ist logarithmisch und umfasst die Spanne zwischen 0,0032 s/kg bis 0,32 s/kg bzw. -50 dB bis -10 dB *re* 1 s/kg. Sämtliche gemessene Frequenzgänge stellen sich stets sehr zerklüftet dar. Offenbar beruhen sie auf einer Aneinanderreihung von verschiedenartigen Resonanzen des Steges und/oder des Instruments; vgl. die Kapitel 3 bis 5. Maximal werden Werte von 0,1 s/kg bis 0,3 s/kg erreicht. Diese sind um mindestens eine Zehnerpotenz kleiner als die Kenn-Admittanzen der Saiten, die nach Jansson (1990) zwischen 2,4 s/kg (g -Saite) und 5,7 s/kg (e^2 -Saite) liegen.

7.3.1 Admittanz am bassseitigen Ende

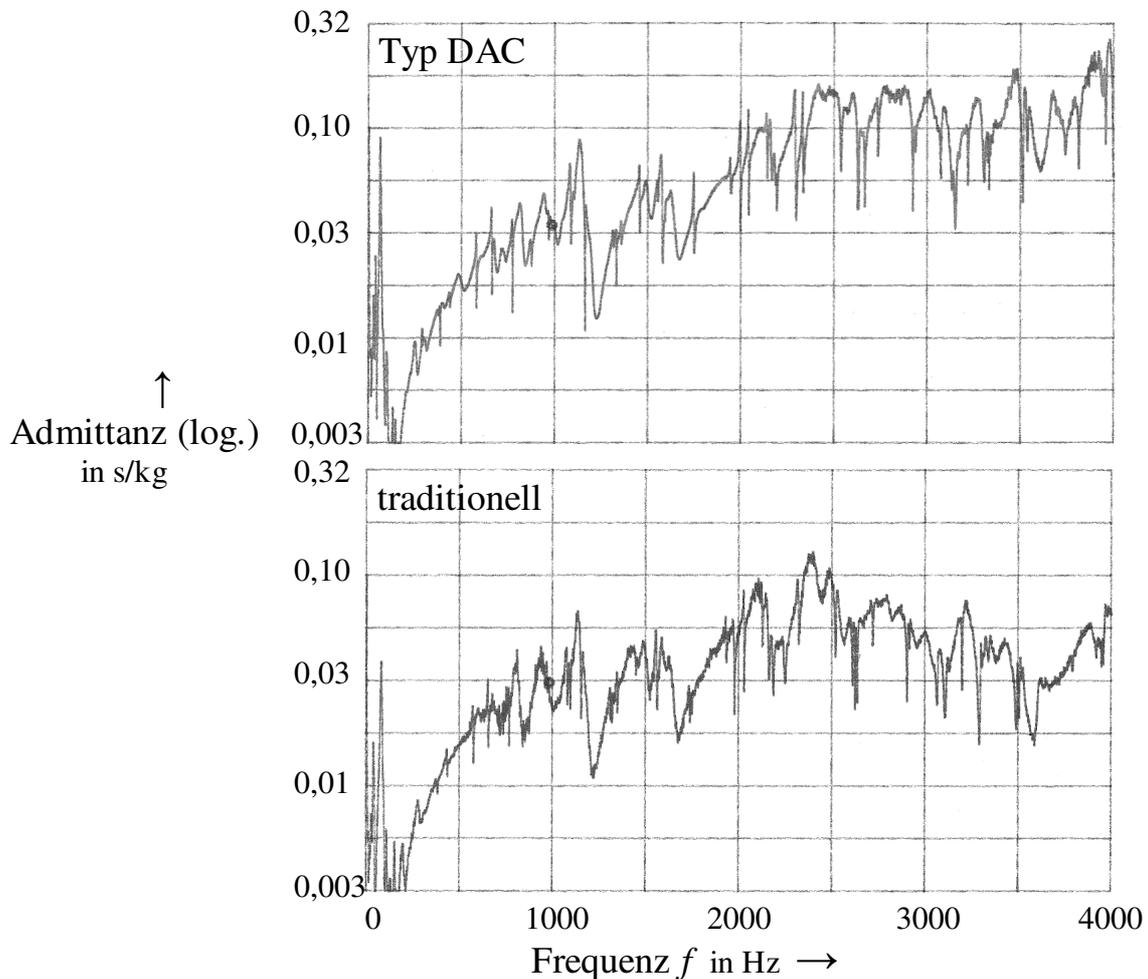


Abb. 7.9. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skale, gemessen am bassseitigen Ende von zwei Stegen als Funktion der Frequenz f .

Die Ergebnisse von Abb. 7.9 gehen auf die Messung in der Nähe der Basssaiten zurück; vgl. die Abb. 7.5 und 7.7. Die Positionierung des Messaufnehmers ist aus Abb. 6.5 zu ersehen. Die Admittanz erreicht mittlere Werte zwischen 0,05 s/kg und 0,1 s/kg, in der Spitze auch bis zu 0,2 s/kg. Wie schwingfreudig die beiden Stege sind, kann hier direkt beurteilt werden.

Beide Diagramme zeigen ein lokales Maximum bei etwa 100 Hz, das für die Abstrahlung musikalischer Schalle unerheblich ist. Von unmittelbarer musikalischer Bedeutung sind erst Frequenzen ab etwa 200 Hz. Ab dieser Grenze beginnen beide Messkurven vom Wert 0,03 s/kg zunächst stetig anzusteigen. Zwischen etwa 500 Hz und 1000 Hz sind diesem Anstieg einige lokale Schwankungen überlagert. Ein erstes größeres Maximum von nicht ganz 0,1 s/kg prägt sich bei zirka 1150 Hz aus. Weitere Maxima schließen sich bei etwa 1500 Hz, 2200 Hz und 2400/2500 Hz an. Dieser prinzipielle Verlauf ist bei beiden Stegen zu beobachten. Der „*Bridge Hill*“, von dem in der Literatur häufig die Rede ist (Durup und Jansson 2005, Woodhouse 2005), könnte bei etwa 1700 Hz bis 3000 Hz geortet werden. Bis zur Frequenz 2300 Hz verlaufen die Admittanzen für beide Stege sehr ähnlich. Deutliche Unterschiede zeigen sich dann, wenn diese Grenze überschritten wird.

Für den traditionellen Steg gilt das untere Diagramm. Von etwa 400 Hz bis 4000 Hz schwankt die Admittanz zwischen 0,01 s/kg und 0,1 s/kg. Der *Bridge Hill* reicht möglicherweise bis 3000 Hz. Er gipfelt in einem Maximalwert von etwas mehr als 0,1 s/kg. Ist der Gipfel überschritten, sinkt die Admittanz wieder etwas ab. Zu höheren Frequenzen hin beträgt die Admittanz im Mittel etwa 0,05 s/kg.

Das obere Diagramm, das sich auf die Messung am Steg DAC bezieht, stimmt bis etwa 2300 Hz weitgehend mit demjenigen für den traditionellen Steg überein. Im höherfrequenten Teil des *Bridge Hill* und oberhalb differieren die Messkurven jedoch. Wird die Frequenz über 2300 Hz hinaus gesteigert, weist der Steg DAC eine deutlich höhere Admittanz auf als der traditionelle Steg. Der Zuwachs im hochfrequenten Bereich kann mit dem Faktor drei bzw. mit 10 dB abgeschätzt werden. Das bedeutet, dass der Steg DAC oberhalb von 2300 Hz dreimal so schwingfreudig ist wie der traditionelle Steg. Spitzen können 0,2 s/kg bis 0,3 s/kg erreichen.

7.3.2. Admittanz am diskantseitigen Ende

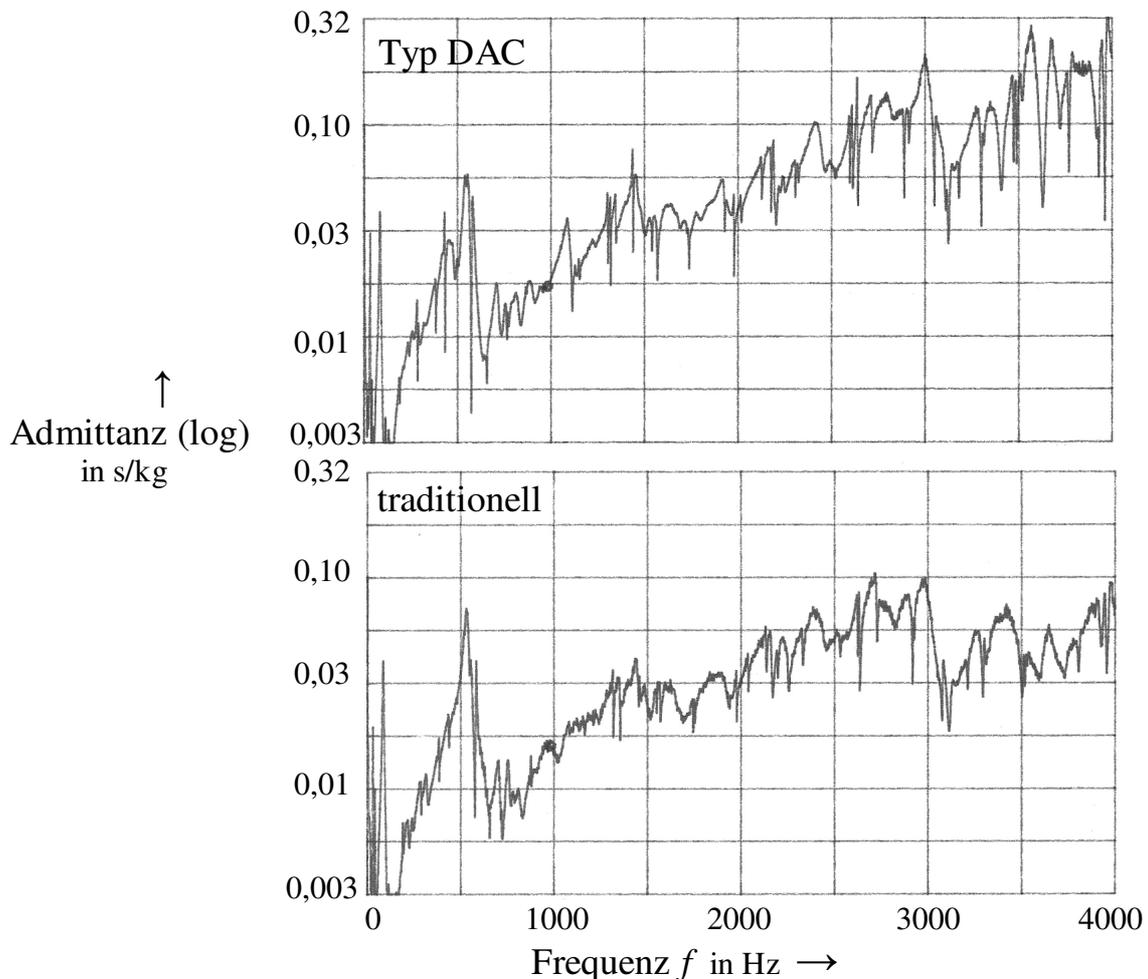


Abb. 7.10. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skala, gemessen am diskantseitigen Ende von zwei Stegen als Funktion der Frequenz f .

Dass dieser Befund Bestand hat, belegt die weitere Messung (Abb. 7.10) in der Nähe der Diskantsaiten. Lage und Orientierung des Messaufnehmers sind Abb. 6.3 zu entnehmen. Auch hier stellen sich die Messkurven als sehr zerklüftet dar. Auffällig ist eine starke Anhebung etwas oberhalb von 500 Hz, die in Abb. 7.9 nicht zu beobachten war. Innerhalb eines schmalen Frequenzbandes wird eine Admittanz von 0,06 s/kg oder mehr gemessen. Da sie bei beiden Stegen zu beobachten ist, dürfte es sich um eine Resonanz des Geigenkörpers handeln, die nur unter den hier vorliegenden Bedingungen angeregt wird. Bei der 30⁰-Anregung am bassseitigen Ende tritt sie offenbar nicht auf. Daran schließt sich ein Minimum von etwa 0,01 s/kg an.

Danach steigt die Admittanz im Mittel stetig bis etwa 3000 Hz an. Der *Bridge Hill* ist bei beiden Stegen von ähnlicher Gestalt, jedoch von unterschiedlichem Niveau. Beim traditionellen Steg (unten) ist der Höchstwert 0,1 s/kg. Beim DAC-Steg wird in der Spitze das Doppelte gemessen. Zu höheren Frequenzen hin hält diese Tendenz an. Wenn der DAC-Steg eingesetzt ist, werden Admittanz-Werte bis zu 0,3 s/kg erreicht. Auch am diskantseitigen Ende kann bei diesem Steg die Admittanz um den Faktor drei größer sein als beim traditionellen Steg.

Die Frequenzgänge der Abb. 7.9 unterscheiden sich von denen der Abb. 7.10. Offenbar werden bei jeder Art der Anregung, abhängig von Ort und Richtung, andere Schwingungen von Steg und Korpus hervorgerufen. Auch hier erweisen sich bis etwa 2300 Hz die Messkurven für beide Stege als sehr ähnlich. Wird die Frequenz darüber hinaus erhöht, verbleibt die Admittanz beim traditionellen Steg auf einem Niveau zwischen 0,03 s/kg und 0,1 s/kg. Beim Steg DAC steigt die Admittanz dagegen weiterhin an; zwischen etwa 3000 Hz und 4000 Hz ist sie deutlich höher als beim traditionellen Steg. Im Extremfall, etwa oberhalb von 3500 Hz, kann sich der Steg vom Typ DAC um bis zu sechsmal schwingfreudiger erweisen als der traditionelle Steg.

7.4. Zusammenfassende Bemerkung

Die Messungen von Imaginärteil, Realteil und Betrag der komplexen Admittanz haben gezeigt, dass der Betrags-Frequenzgang wesentliche Merkmale enthält, die auch den Frequenzgang des Realteils kennzeichnen. Aus praktischen Erwägungen heraus wurde entschieden, zukünftig den Betrag zu messen und im logarithmischen Maß aufzutragen. Die Darstellung auf einer logarithmischen Ordinate ist weithin gebräuchlich und orientiert sich an den Eigenschaften des Gehörs. Da eine Schnelle Fourier-Transformation (FFT) verwendet wurde, ist an der Abszisse die Frequenz linear angetragen. Vergleichsmessungen haben ergeben, dass sich die Resultate gut reproduzieren lassen. Die gemessenen Frequenzgänge der Admittanz lassen Schlüsse auf die frequenzabhängige Schwingfreudigkeit zu, wie sie die Saiten an ihren Auflagepunkten „sehen“. Da zwei verschiedenartige Stege auf ein und derselben Violine verwendet wurden, kann der Einfluss des Instrumentenkörpers vom Einfluss des Steges getrennt werden.

Vergleicht man die Messung an der Seite der Basssaiten mit derjenigen am diskantseitigen Ende, zeigen sich Unterschiede. Wird bassseitig gemessen, beginnen die Messkurven von 200 Hz an stetig anzusteigen. Zwischen etwa 500 Hz und 1000 Hz überlagern sich diesem Anstieg lokale Schwankungen. Ein erstes größeres Maximum bildet sich bei zirka 1150 Hz aus. Daran schließen sich weitere Maxima, etwa bei 1500 Hz und 2200 Hz, an. Der *Bridge Hill*, von dem im nächsten Kapitel noch ausführlicher die Rede sein wird, kann zwischen 1700 Hz und 3000 Hz lokalisiert werden. Wenn auf der Seite der Diskantsaiten gemessen wird, zeigen sich die Messkurven ebenfalls sehr zerklüftet. Eine markante Anhebung tritt nun etwas ober-

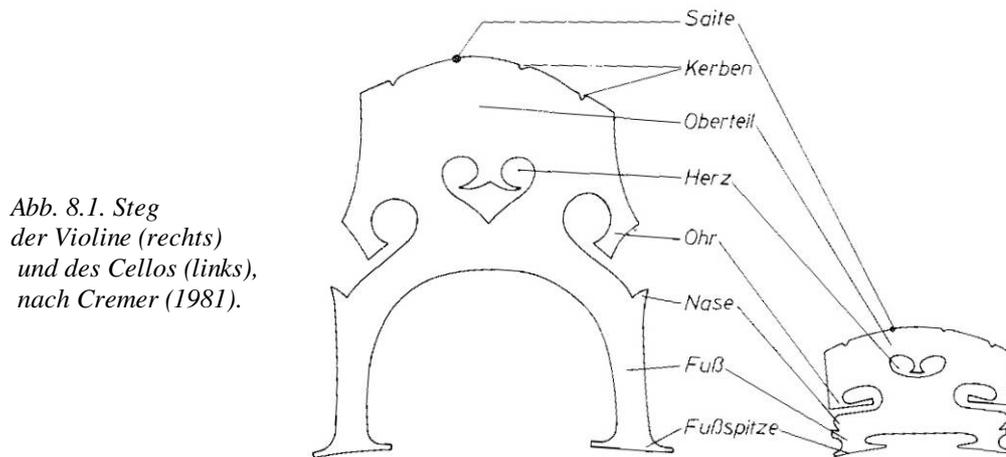
halb von 500 Hz (Note c'' bzw. C5) auf. Innerhalb eines schmalen Frequenzbandes nimmt die Admittanz auf 0,06 s/kg zu. Nach einem Minimum von etwa 0,01 s/kg steigt die Admittanz im Mittel stetig bis etwa 3000 Hz an. Der *Bridge Hill* zeigt unterschiedliches Niveau. Zu höheren Frequenzen hin prägen sich auch bei dieser Messung Unterschiede zwischen den beiden Stegen immer deutlicher aus. Beim traditionellen Steg fällt die Admittanz ab, während sie beim DAC-Steg auf sehr hohem Niveau verharrt. Die Messkurven hängen erkennbar davon ab, an welchem Ort und in welcher Richtung angeregt und gemessen wird. Offenbar werden jeweils andere Schwingungen von Steg und Korpus hervorgerufen. Dass eine einzige Messung ausreicht, das Übertragungsverhalten eines Steges vollständig zu beschreiben, darf demnach bezweifelt werden.

Sehr aufschlussreich ist der Vergleich zwischen Messungen an ein und demselben Ende, wenn unterschiedliche Stege eingesetzt sind. Bis zur Frequenz 2300 Hz (Note d⁴ bzw. D7) verlaufen die Admittanzen für beide Stege sehr ähnlich. Erst wenn diese Grenze überschritten ist, zeigen sich deutliche Diskrepanzen. So bildet sich beim Steg DAC der *Bridge Hill* stärker aus als beim traditionellen Steg. Zu höheren Frequenzen hin fällt beim traditionellen Steg die Admittanz wieder ab und nimmt dann ein im Mittel gleichbleibendes Niveau an. Beim Steg DAC steigt die Admittanz dagegen weiterhin an. Zwischen etwa 3000 Hz und 4000 Hz (Noten f⁴ bzw. F7 bis h⁴ bzw. H7) ist die Admittanz deutlich höher als beim traditionellen Steg. Im Extremfall, etwa um die Note a⁴ bzw. A7, erweist sich der Steg vom Typ DAC sogar um bis zu sechsmal schwingfreudiger als der traditionelle Steg.

8. VERGLEICH MIT DEN ERGEBNISSEN ANDERER AUTOREN

8.1. Aufbau und Funktion des Steges

Umfassend und anschaulich hat Cremer (1981) ab Seite 171 beschrieben, welche Funktion der Steg hat. Diesem Buch ist Abb. 8.1 entnommen. Sie zeigt mit den gebräuchlichen Bezeichnungen die traditionellen Stege eines Cellos sowie einer Violine. Letzterer ist kleiner und weniger „hochbeinig“; Cremer (1981) erinnern die Füße des Geigensteges an einen Dackel.



Cremer schlägt vor, den Steg als „Dreitor“ aufzufassen. Das Dreitor (bzw. der „Sechspol“) verknüpft einen Eingang (die Kerbe, in der die schwingende Saite liegt und eine Kraft einbringt; oben in Abb. 8.1) mit zwei Ausgängen (den beiden Füßen; links und rechts unten in Abb. 8.1). Was die Saite am Eingang „sieht“, hängt naturgemäß von der Impedanz bzw. Admittanz an den beiden Ausgängen ab. Das bedeutet, dass die Stegadmittanz davon beeinflusst wird, ob und in welchem Maße jeder der Füße nachgibt.

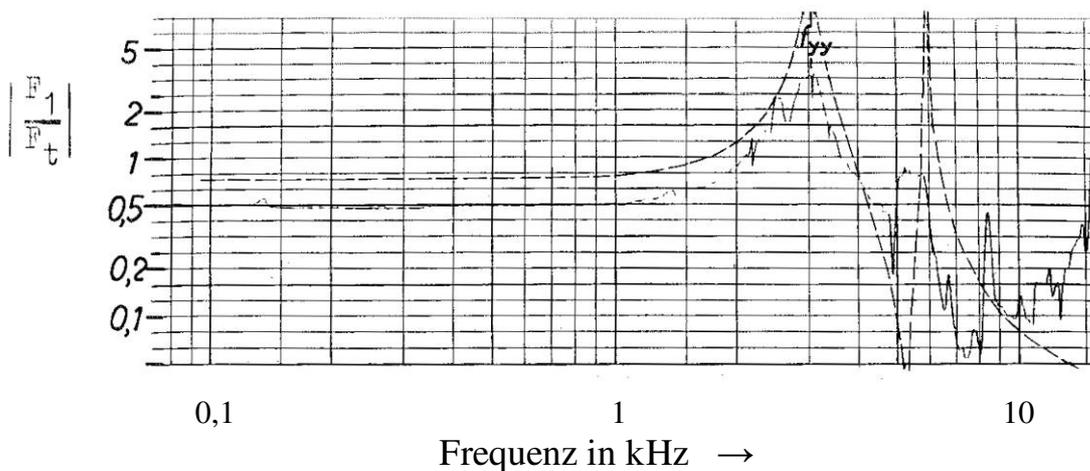


Abb. 8.2. Betrag der Kraft-Übertragungsfunktion eines Violin-Steges als Funktion der Frequenz; F_t ist die Kraft am Auflagepunkt einer Saite, F_1 die Kraft am Fuß. Durchgezogen: gemessen; gestrichelt: berechnet; nach Reinicke aus Cremer (1981).

Eine Möglichkeit, das Übertragungsverhalten des Steges isoliert zu prüfen, besteht darin, den Einfluss des Korpus unter den Füßen auszuschalten und diese „festzubremesen“, d.h. unbeweglich einzuspannen. Im Buch von Cremer finden sich Ergebnisse für diese zwar nicht sehr realitätsnahe, aber aufschlussreiche Situation, die auf Untersuchungen von Reinicke zurückgehen.

Abb. 8.2 zeigt ein Resultat nach Reinicke (1973). Bis etwa 1000 Hz ist die Kraft F_1 am Fuß halb so groß wie die Anregungskraft F_t . Bei tiefen Frequenzen verteilt sich demnach die am Auflagepunkt der Saite eingebrachte Kraft je zur Hälfte auf die beiden Füße. Wird die Frequenz erhöht, tritt bei 3000 Hz eine Art Verstärkung um das etwa Dreifache auf. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich noch einmal bei 6000 Hz. Offensichtlich hat der Steg frequenzabhängige Durchlass-Eigenschaften und verhält sich hinsichtlich der Kraft wie ein Filter. Tieffrequente Anteile (bis etwa 2 kHz) werden lediglich auf die beiden Füße verteilt. Von den hochfrequenten Anteilen werden manche (bei etwa 3000 Hz und 6000 Hz) hervorgehoben, andere wiederum (bei 4000 Hz und 8000 Hz) deutlich abgeschwächt.

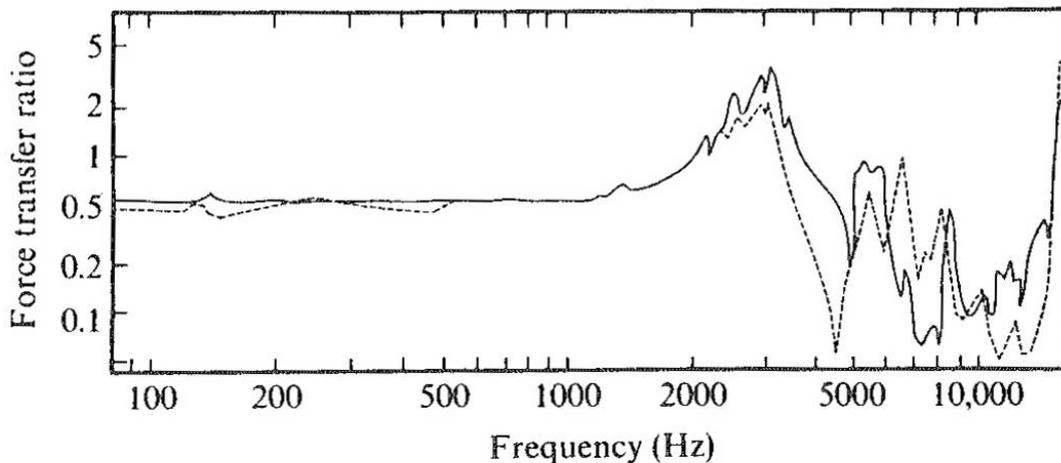


Abb. 8.3. Betrag der Kraft-Übertragungsfunktion eines Violin-Steges als Funktion der Frequenz. Durchgezogen: diskantseitiger Fuß; gestrichelt: bassseitiger Fuß; nach Reinicke aus Fletcher und Rossing (1998).

Ein weiteres experimentelles Ergebnis von Reinicke (1973) findet sich im Buch von Fletcher und Rossing (1998); siehe Abb. 8.3. Es zeigt, wie sich die eingebrachte Kraft auf den bassseitigen und auf den diskantseitigen Fuß überträgt. Zunächst verteilt sich die Saitenkraft bis etwa 1000 Hz gleichmäßig auf beide Füße. Wird die Frequenz weiter erhöht, tritt an beiden Füßen zunächst eine gleichmäßige Verstärkung auf. Ab 2000 Hz wirkt am Fuß nahe dem Bassbalken die doppelte, am Fuß nahe dem Stimmstock sogar die dreifache Wechselkraft der Saite. Eine weitere, allerdings geringere Anhebung ist bei etwa 6000 Hz zu beobachten. Dabei zeigen sich dann auch zunehmende Unterschiede zwischen den Kräften an den zwei Füßen des Steges. Bei weiter steigender Frequenz kommt im Mittel immer weniger Kraft an den Füßen an, bis weit oberhalb von 10 000 Hz noch einmal Verstärkung zu beobachten ist.

Den Durchlasskurven in den Abb. 8.2 und 8.3 zufolge fungiert der Steg als Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 3000 Hz bis 4000 Hz und einer deutlichen Überhöhung im Durchlassbereich des Filters, die etwas unterhalb der Grenzfrequenz liegt. Anders als bei tiefen Frequenzen bewegt sich der Steg hier nicht mehr als starrer Körper, sondern schwingt offensichtlich als Kontinuum. Es findet eine Vergrößerung der Kraftamplituden statt, die mit Eigenschwingungen des Steges zusammenhängt. Höchstwahrscheinlich geht sie auf Schwingungsarten des Steges zurück, wie sie Reinicke (1973) gefunden hat und wie sie in Abb. 8.4 skizziert

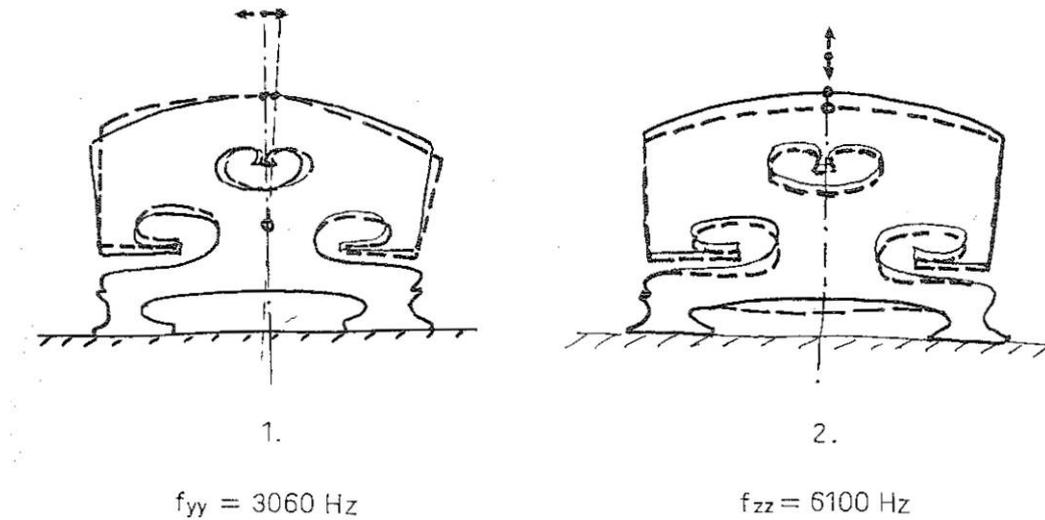


Abb. 8.4. Zwei gemessene Schwingungsformen eines Violin-Steges, nach Reinicke aus Cremer (1981).

sind. Die beiden Bewegungsmuster (Nr. 1 bei 3060 Hz und Nr. 2 bei 6100 Hz) treten bei eben denjenigen Frequenzen auf, bei welchen die Filterkurven Maxima haben. Es ist zu erwarten, dass die Lage und Art der Eigenschwingungen des Steges nicht nur von den Randbedingungen, sondern auch stark von der Geometrie des Steges abhängen werden. Ebenso stark werden Einzelheiten der Filterkurven der Geometrie des Steges abhängen.

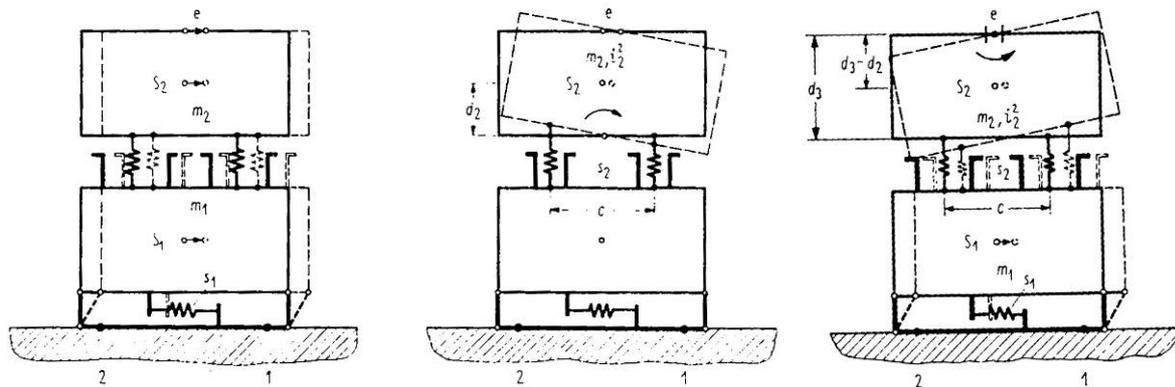


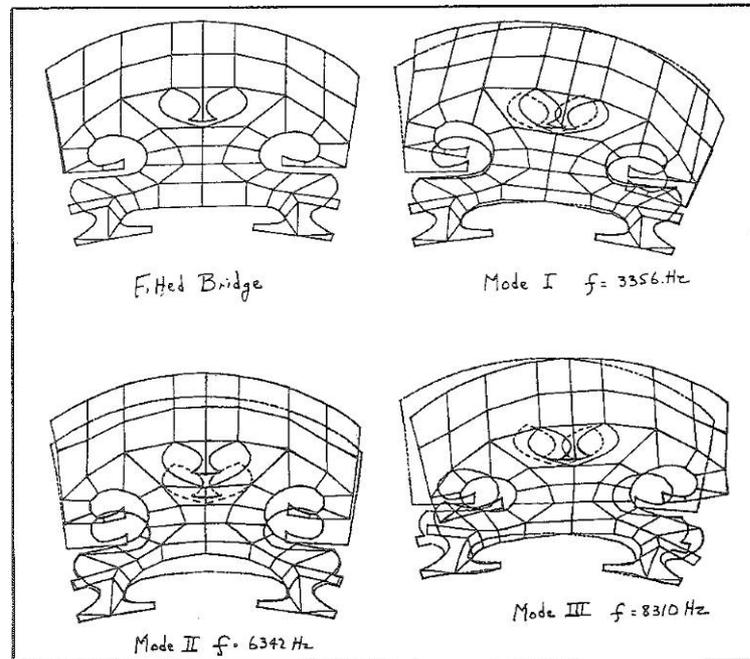
Abb. 8.5. Schwingungsformen des Ersatzmodells eines Cellosteges, nach Zimmermann (1967).

Schon früh sind deshalb Versuche unternommen worden, das Übertragungsverhalten des Steges zu simulieren. Zimmermann (1967) hat den Steg als ebenes Mehrkörpersystem mit wenigen Freiheitsgraden aufgefasst und ihn als Dreitor modelliert. Drei der Schwingungsformen, die seine Berechnungen für das Ersatzmodell ergeben haben, sind in Abb. 8.5 zusammen gestellt. Sie zeigen verschiedene Kombinationen von translatorischen und rotatorischen Bewegungen der Teilsysteme. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Reinicke zeigt, dass die mittlere Schwingungsform in Abb. 8.5 dieselben Merkmale zeigt, wie sie der Schwingung bei 3060 Hz in Abb. 8.4 zu eigen sind.

Mittlerweile stehen leistungsfähige numerische Verfahren wie etwa die Methode der Finiten Elemente zur Verfügung. Damit und mit der Kenntnis der Materialeigenschaften des Holzes, aus dem der Steg gefertigt ist, sollte es möglich sein, das Schwingungs- und Übertragungsverhalten des Steges sehr gut zu beschreiben. Erste Bemühungen in dieser Richtung finden

sich bei Rodgers und Masino (1990). Drei Moden, die sie für den unten festgebremsten Steg angeben, sind in Abb. 8.6 dargestellt. Die Schwingungen bei 3356 Hz und 6342 Hz ähneln denen von Abb. 8.4. Die Autoren haben die numerische Berechnung auch zur Optimierung genutzt. Sie haben simuliert, dass an bestimmten Stellen Material abgenommen wird, und die daraus resultierenden Verschiebungen der Eigenfrequenzen beobachtet; vgl. Kapitel 10. Die fundamentale Rolle der Randbedingungen braucht nicht gesondert erwähnt zu werden.

Abb. 8.6. Drei Schwingungsformen eines Violin-Steges, berechnet mittels FEM, nach Rodgers und Masino (1990).



8.2. Stegimpedanz

Erfreulicherweise ist die Violine häufig Gegenstand naturwissenschaftlicher Studien. Wiederum sei auf die Bücher von Cremer (1981), von Fletcher und Rossing (1998) sowie die Dissertation von Pfaffelhuber (1993) verwiesen. Dort finden sich auch gemessene Frequenzgänge

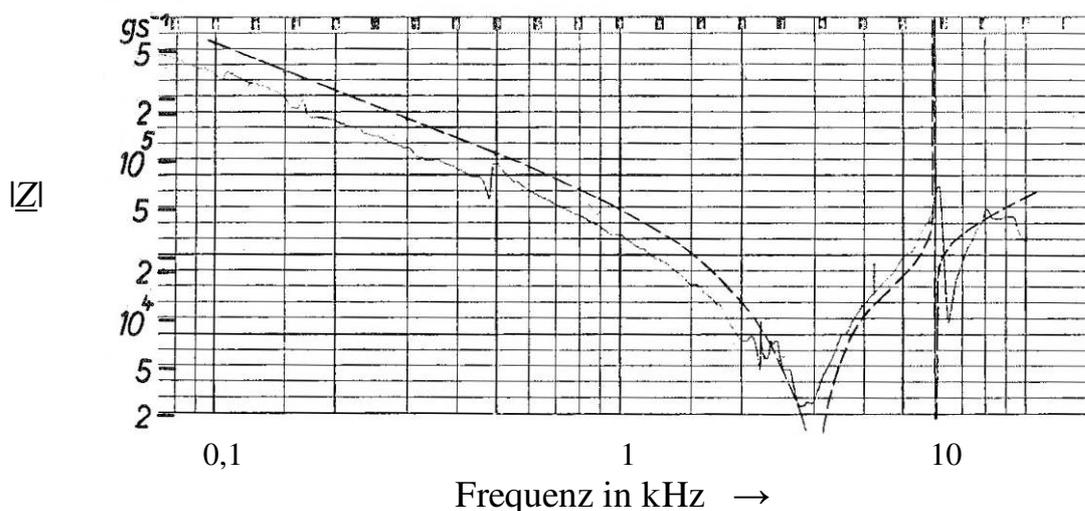


Abb. 8.7. Betrag der Impedanz Z als Funktion der Frequenz eines Violin-Steges mit festgebremsten Füßen. Durchgezogen: gemessen; gestrichelt: berechnet; nach Reinicke aus Cremer (1981).

der Eingangsimpedanz des Steges. Was die Saite am Eingang „sieht“, wird naturgemäß vom Abschluss, d.h. davon beeinflusst, wie die Stegfüße gelagert sind. Die Stegimpedanz hängt davon ab, bei welchen Frequenzen und in welchem Maße die Füße nachgeben.

Auch das Eingangsverhalten des Steges hat Reinicke (1973) dadurch untersucht, dass er die Füße festgebremst hat. Er hat sie unbeweglich festgehalten und damit den Einfluss des Korpus völlig ausgeschaltet. Im Buch von Cremer findet sich ein Ergebnis für diese Versuchsbedingung, das auf Reinicke zurückgeht. Es ist in Abb. 8.7 wiedergegeben.

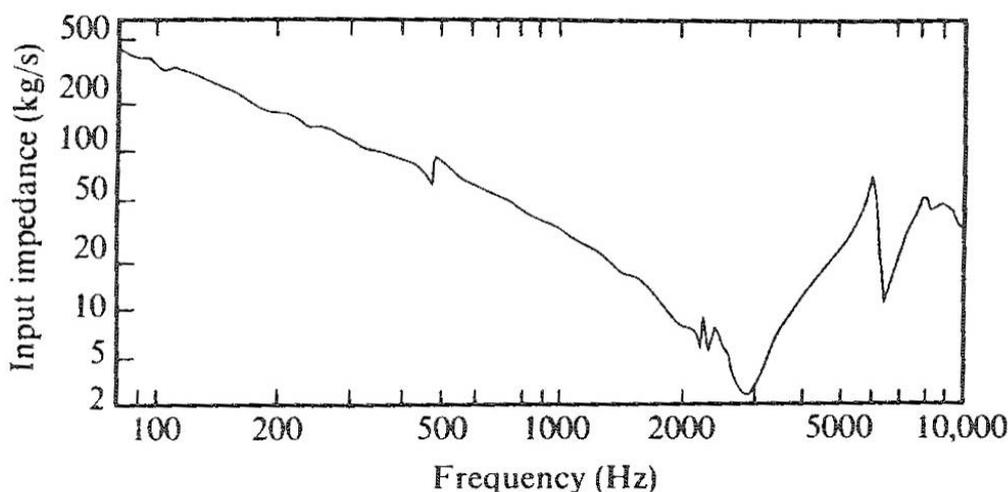


Abb. 8.8. Eingangs-Impedanz eines Violin-Steiges
nach Reinicke (1973), entnommen aus Fletcher und Rossing (1998).

Dasselbe Ergebnis, etwas anders dargestellt und mit SI-Einheiten skaliert, findet sich bei Fletcher und Rossing (1998). In Abb. 8.8 ist eine doppelt-logarithmische Skale verwendet. Zwischen 200 Hz und 3000 Hz 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 könnte mit dem Maximum der Admittanz korrespondieren, das bei den eigenen Messungen am diskantseitigen Ende der beiden Stege (Abb. 7.10) beobachtet wurde. Die minimale Impedanz von etwa 70 kg/s, die hier gemessen wurde, entspricht einer maximalen Admittanz von etwa 0,015 s/kg. Etwa halb so große Zahlenwerte hatten die Experimente bei der diskantseitigen Anregung beider Stege ergeben. Das ausgeprägte Minimum im Impedanz-Frequenzgang von Abb. 8.7 bei 3000 Hz spiegelt sich in der Admittanz wieder, wenn die Stege an der Diskantseite angeregt werden. Beim traditionellen Steg (Abb. 7.10 unten) wurden 0,1 kg/s, beim Steg DAC (Abb. 7.10 oben) etwa der doppelte Betrag gemessen. Dies ist zwar etwas weniger, als der Impedanz von 2,5 kg/s entsprechen würde, ist aber zumindest von gleicher Größenordnung.

8.3. Stegadmittanz

In der Elektrotechnik ist die Impedanz die gebräuchliche Messgröße, um das Verhalten eines Systems zu kennzeichnen. Deren Kehrwert, die Admittanz, enthält dieselbe Information wie die Impedanz, hat aber im betrachteten Fall den Vorteil, anschaulicher zu sein und wird an Streichinstrumenten schon seit mindestens einem halben Jahrhundert (Eggers 1959) bis in die Gegenwart (Fleischer 2009b) gemessen. Sie ist ein direktes Maß für die Schwingfreudigkeit.

8.3.1. Punkt-Admittanz

Werden Kraft und Schwinggeschwindigkeit am selben Punkt gemessen, spricht man von einer Punkt-Admittanz. Misst man diese am Auflagepunkt einer Saite am Steg und kennt die Kraft, die eine Saite auf den Steg ausübt, so lässt sich die eingebrachte Leistung berechnen. Gemäß Gl. (5) gibt die Konduktanz Aufschluss über die Wirkleistung; gemäß Gl. (6) die Admittanz Aufschluss über die Scheinleistung.

Angaben zur Punkt-Admittanz am Steg der Violine finden sich beispielsweise bei Pfaffelhuber (1993), der die Admittanz modelliert und sich dabei auf Angaben von Beldie (1975) bezogen hat. Danach unterteilt sich gemäß Abb. 8.9 die Frequenzachse (logarithmisch geteilt) in mehrere Bereiche. Im untersten Bereich bildet sich zunächst bei etwa 300 Hz die Helmholtz-Resonanz des Korpus ab, die sich bei den eigenen Messungen höchstens ganz schwach ausgeprägt hat. Danach sind in Abb. 8.9 um 500 Hz zwei deutliche Minima zu beobachten. Das tiefere wird einer Eigenschwingung der Decke, das etwas höhere einer Schwingung des gesamten Korpus zugeordnet. Spitzen dieser Art traten bei eigenen Messungen am diskantseitigen Ende ebenfalls zutage. Getrennt durch ein ausgeprägtes Minimum, das auch bei einigen der eigenen Experimente zu beobachten war, schließt sich der nächste Bereich an. Dieser ist durch ein starkes und mehrere kleinere Maxima um etwa 1000 Hz gekennzeichnet, die sich in den eigenen Messungen ebenfalls zeigten und die Beldie (1975) Hohlraumresonanzen zuschreibt.

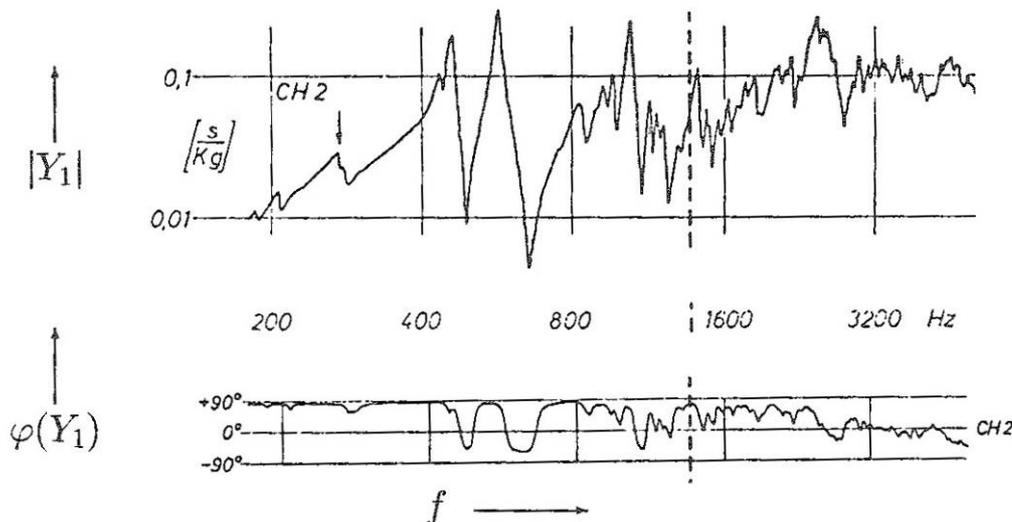


Abb. 8.9. Betrag und Phase der komplexen Admittanz \underline{Y} eines Violin-Steges bei tangentialer Anregung nach Beldie (1975), entnommen aus Pfaffelhuber (1993).

Der daran anschließende Bereich zeigt zwischen 1600 Hz und 3200 Hz eine Folge von zahlreichen Spitzen, die immer dichter aufeinander folgen und in denen verschiedenartige Eigenschwingungen ihren Ausdruck finden. Nach den bisherigen Betrachtungen (siehe z.B. die Abb. 8.2 und 8.7) ist zu vermuten, dass in diesem Frequenzbereich der Steg ein „Eigenleben“ entfaltet und die Admittanz beeinflusst. Das Hauptmaximum, das in den eigenen Experimenten meist bei etwa 2500 Hz lokalisiert war, dürfte den Gipfel des „*Bridge Hill*“ darstellen, der in einem anschließenden Abschnitt näher besprochen wird. Danach fällt die Admittanz auf ein niedrigeres Niveau zurück, wie dies auch bei den eigenen Messungen für den traditionellen Steg der Fall war. Die Zahlenwerte von maximal etwa 0,3 s/kg und im Mittel 0,1 s/kg sind etwas größer, als sie in den Untersuchungen von Kapitel 7 gemessen worden waren.

Trott (1987) hat unter verschiedenen Bedingungen mit einem elektrodynamischen Schwingerreger und einem Impedanzmesskopf die Admittanz am Steg der Violine gemessen und absolute Werte dokumentiert. Abb. 6.10 gibt die Punkt-Admittanz an den Auflagepunkten der g-Saite (oben), der e-Saite (unten) sowie in der Mitte (Mitte) wieder. Das obere Diagramm bezieht sich auf die Messung senkrecht zur Decke, das untere auf die Messung parallel dazu. Bei all diesen Messungen waren die Füße des Steges festgehalten. Die Ergebnisse sind doppelt-logarithmisch aufgetragen.

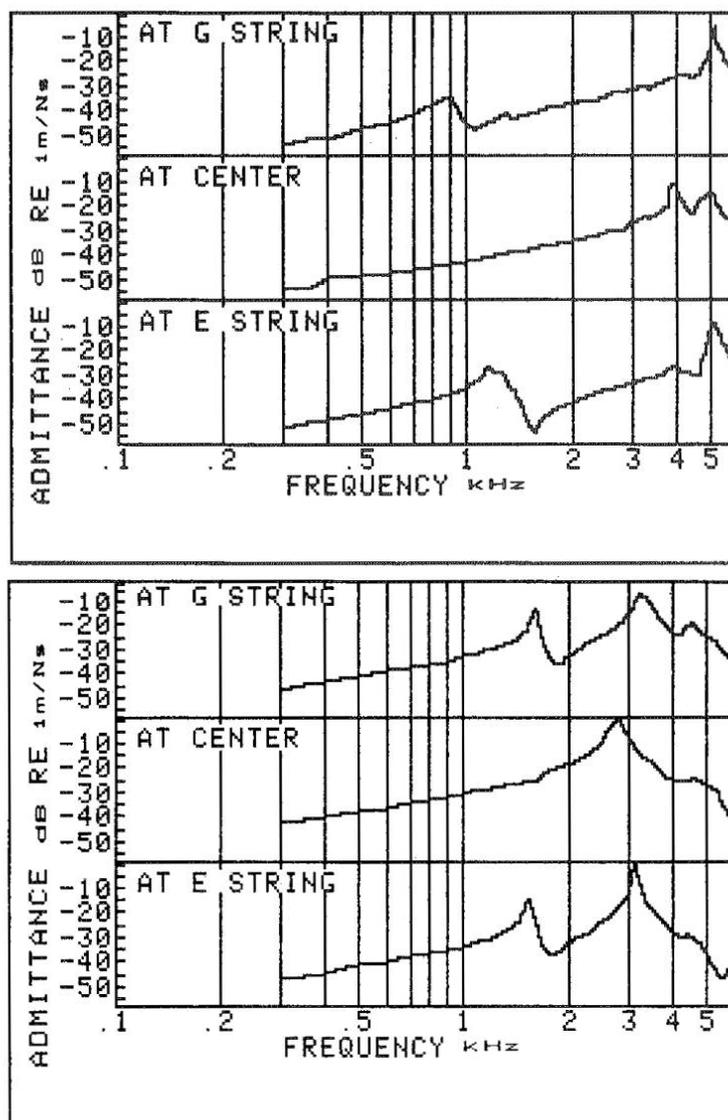


Abb. 8.10. Betrag der Admittanz als Funktion der Frequenz eines Violin-Steges mit festgebremsten Füßen für Anregung und Messung in Normalenrichtung (oben) bzw. in tangentialer Richtung (unten), nach Trott (1987).

Die Messkurven sind relativ glatt. Da der Einfluss des Korpus ausgeschaltet ist, spiegeln sie das Eingangsverhalten „des Steges an sich“ wider. Alle Kurven verlaufen unterschiedlich. Gemeinsam ist ihnen, dass bei tiefen Frequenzen zunächst ein stetiger Anstieg mit etwa 20 dB pro Dekade zu beobachten ist.

Für normale Anregung (oben in Abb. 8.10) zeigt sich, sofern nicht in der Mitte gemessen wird, bei etwa 1000 Hz ein Maximum. Für das bassseitige Ende tritt dieses Maximum bei 900 Hz,

für das diskantseitige Ende bei 1200 Hz auf. Daran schließt sich ein weiterer Anstieg bis zu einem Hauptmaximum bei 5000 Hz an. Die Messung in der Mitte liefert ein weiteres Maximum bei 4000 Hz. Die Höchstwerte sind -20 dB bzw. -10 dB *re* 1 m/(Ns) bzw. 1 s/kg. Sie liegen demnach zwischen 0,1 s/kg und 0,3 s/kg.

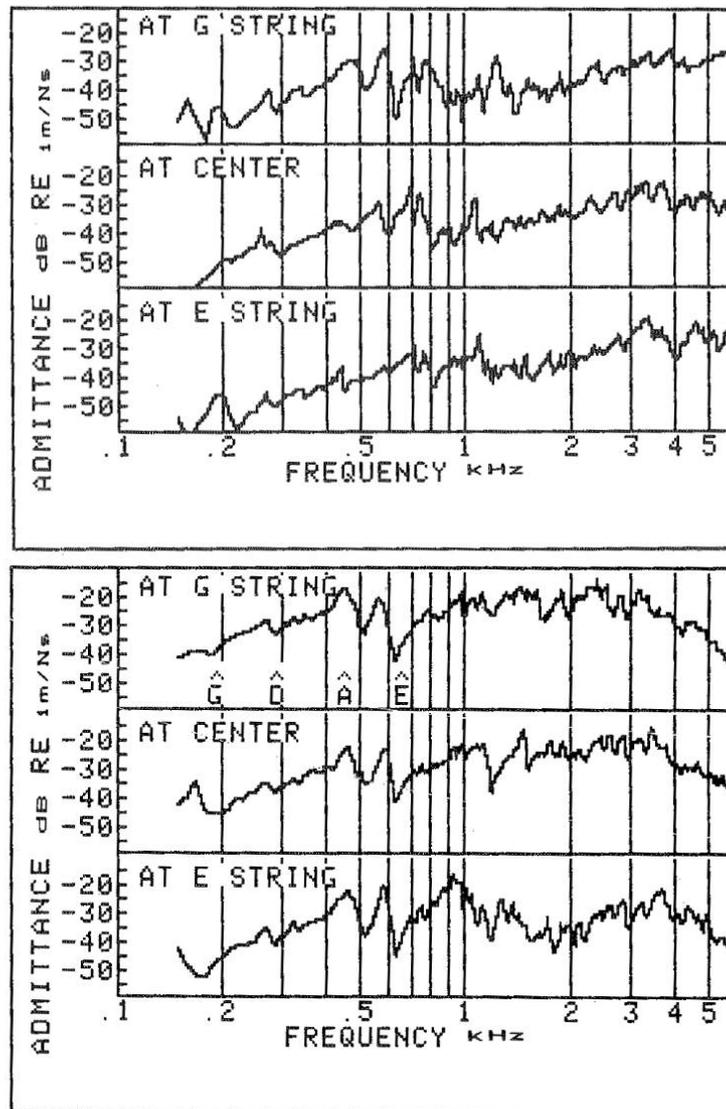


Abb. 8.11. Betrag der Admittanz eines Violin-Steges als Funktion der Frequenz für Anregung und Messung in Normalenrichtung (oben) bzw. in tangentialer Richtung (unten), nach Trott (1987).

Für die Messung in tangentialer Richtung (unten in Abb. 8.10) liegen die Kurven in aller Regel höher. Offenbar erweist sich der Steg als schwingfreudiger, wenn er von der Seite her gekippt wird, als wenn er von oben gedrückt wird. Wird in der Mitte gemessen, tritt ein einziges Maximum etwas unterhalb von 3000 Hz auf, was mit den Erkenntnissen von Reinicke (1973) übereinstimmt. An den Auflagepunkten der äußeren Saiten zeigt sich ein erstes Maximum bei etwa 1600 Hz und ein zweites bei 3000 Hz. Im Höchstfall werden -10 dB bzw. 0 dB *re* 1 s/kg bzw. Admittanzen zwischen 0,3 s/kg und 1 s/kg erreicht.

Bei der Messung, die zu Abb. 8.11 führt, war der Steg in die Violine eingesetzt. Die Kurven wirken nun zerklüftet und weisen wesentlich mehr lokale Maxima und Minima auf, als wenn

der Steg auf einer unnachgiebigen Unterlage sitzt. Der Vergleich mit den entsprechenden Messkurven von Abb. 8.10 zeigt deutlich abweichende Verläufe. Dass eine Messung am Steg, dessen Füße festgebremst sind, aussagekräftige Schlüsse hinsichtlich seines Übertragungsverhaltens auf der Violine zulässt, darf somit bezweifelt werden.

Die Messung am Auflagepunkt der Basssaite (jeweils oben in den Diagrammen von Abb. 8.11) ist zu vergleichen mit den eigenen Ergebnissen von Abb. 7.5. Sie ergibt lokale Maxima zwischen 450 Hz und 600 Hz, bei etwa mehr als 1000 Hz und 3000 Hz bis 4000 Hz. Die tangentiale Anregung (unteres Diagramm) führt auf höhere Admittanz-Werte als die Anregung in Normalenrichtung (oberes Diagramm). Es werden über 0,1 s/kg erreicht, und zwar bei tangentialer Anregung (unten in Abb. 8.11) mehr, als wenn in Normalenrichtung angeregt und gemessen wird (oben in Abb. 8.11). Zu höheren Frequenzen hin wird die Admittanz dann wieder kleiner.

Wird an der Diskantsaite gemessen, erhält man die unteren Diagramme von Abb. 8.10. Die Ergebnisse könnten beispielsweise mit denen von Abb. 7.6 verglichen werden. Es zeigt sich ein erstes Maximum knapp unterhalb bzw. oberhalb von 500 Hz mit einer daran anschließenden Abnahme der Admittanz. Weitere Maxima treten um 1000 Hz und zwischen 3000 Hz und 4000 Hz auf. Die Admittanz erreicht Höchstwerte von etwa 0,1 s/kg, was mit den eigenen Ergebnissen von Kapitel 7 sehr gut übereinstimmt. Ein *Bridge Hill*, wie er im folgenden Abschnitt noch näher besprochen wird, ist – wenn überhaupt - zwischen 2000 Hz und 4000 Hz zu lokalisieren. Mit der Eingangs-Admittanz lässt sich abschätzen, welche Scheinleistung von der Saite in den Steg eingebracht werden kann; vgl. Gl. (6). Für die Kraft hat Trott die von Cremer angegebenen 0,15 N eingesetzt. Damit hat er die Leistung berechnet, die über die Saite in den Korpus fließt, und auch eine erste Abschätzung der akustischen Leistung versucht, die ins Schallfeld abgegeben wird.

3.5.2. Transfer-Admittanz (Kraft und Geschwindigkeit in unterschiedlichen Richtungen)

Werden Kraft und Schwinggeschwindigkeit an zwei unterschiedlichen Punkten bestimmt und ins Verhältnis gesetzt, spricht man von einer Transfer-Admittanz. Möglicherweise werden die dynamische Größe und die kinematische Größe dabei nicht in derselben Richtung gemessen. Ein Beispiel dafür ist die Laser Vibrometrie, wie sie in Kapitel 4 beschrieben ist. Angeregt wurde mit einer Kraft am Steg parallel zur Decke. Als Reaktion des Instruments wurde die Bewegung der Vorderseite senkrecht zur Oberfläche gemessen.

Ziegenhals und Voigtsberger (1995) berichten über die Bestimmung zahlreicher Übertragungsfunktionen; es wurde an den verschiedensten Punkten von Geigenstegen in den verschiedensten Richtungen gemessen. Trott (1987) hat Transfer-Admittanzen angegeben, bei denen er die Bewegung an einem Fuß ins Verhältnis zur Kraft am Auflagepunkt einer Bass-, einer Diskantsaite oder in der Mitte des Steges gesetzt hat. Kraft und Geschwindigkeit wurden dabei nicht nur an unterschiedlichen Punkten, sondern häufig auch in unterschiedlichen Richtungen gemessen.

Über eine Messung dieser Art haben Morset, Krokstad und Løkberg (1998) berichtet. Abb. 8.12 gibt ihren Versuchsaufbau wieder. Wie die Skizze im rechten Teil zeigt, haben sie den Steg am bassseitigen Ende parallel zur Decke angeregt. Am bassseitigen Fuß haben sie mit einem Piezoaufnehmer die Schwinggeschwindigkeit senkrecht zur Decke bestimmt. Aus diesen beiden Größen, die im rechten Winkel zueinander gemessen wurden, haben sie die Transfer-Admittanz gebildet.

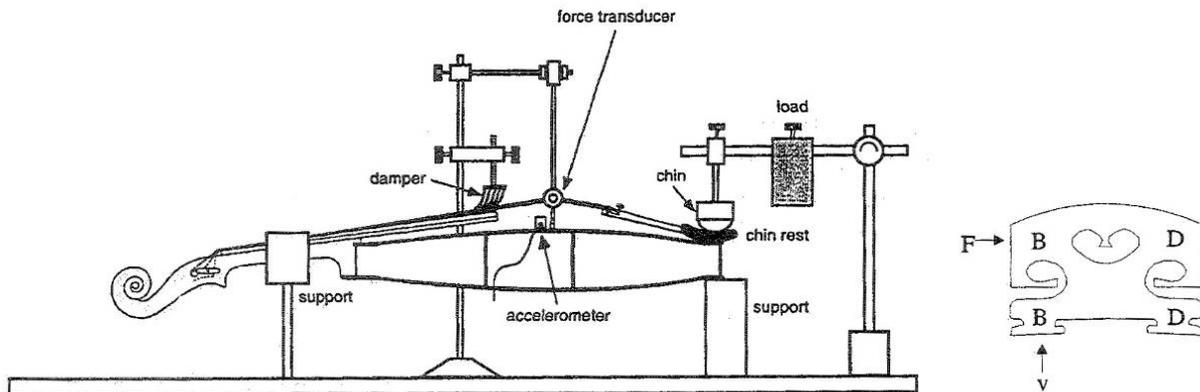


Abb. 8.12. Messvorrichtung zur Ermittlung der Transfer-Admittanz am Steg der Violine, nach Morset et al. (1998).

Als Beispiele geben sie den Betrag der Admittanz von zwei alten italienischen Meisterviolenen und eines neueren skandinavischen Instruments an; vgl. Abb. 8.13. Eine Transfer-Admittanz dieser Art lässt sich den Ergebnissen der eigenen Vibrometer-Messungen entnehmen, wenn die Übertragungsfunktion für einen Messpunkt nahe dem bassseitigen Ende des Steges betrachtet wird. Um die Plausibilität zu prüfen, ist in Abb. 8.14 ein solches Messergebnis präsentiert. Es bezieht sich auf die Violine, deren Schwingungen in Kapitel 4 besprochen sind. Für einen Messpunkt, der sich in der Nähe des Stegfußes befindet, ist das Verhältnis von deckennormaler Schwinggeschwindigkeit zur deckenparallelen Kraft am Steg dargestellt. Zum besseren Vergleich mit Abb. 8.13 sind beide Achsen logarithmisch geteilt. Die Frequenzachse reicht von 100 Hz bis 2000 Hz. Für die Teilung der Ordinate ist - ebenso wie in Abb. 8.13 - der Bezugswert 1 s/kg. Das eigene Diagramm ist so verzerrt und positioniert, dass der direkte Vergleich mit Abb. 8.13 möglich ist.

Es zeigen sich große Ähnlichkeiten zwischen den beiden Diagrammen. Im Mittel liegt die Admittanz zwischen -50 dB und -20 dB, d.h. zwischen 0,003 s/kg und 0,1 s/kg. Maxima zeigen sich bei 100 Hz, oberhalb von 200 Hz, oberhalb von 500 Hz, bei 800 Hz usw. Die Spitzen rücken immer dichter aneinander, wenn die Frequenz ansteigt. Ausgeprägte Minima lassen sich zwischen 100 Hz und 200 Hz, unterhalb von 700 Hz, bei 1200 Hz usw. beobachten. Angesichts der Tatsache, dass völlig unterschiedliche Instrumente mit unterschiedlichen Methoden untersucht worden sind, lässt sich ungeachtet einiger Diskrepanzen im Detail prinzipielle Übereinstimmung feststellen.

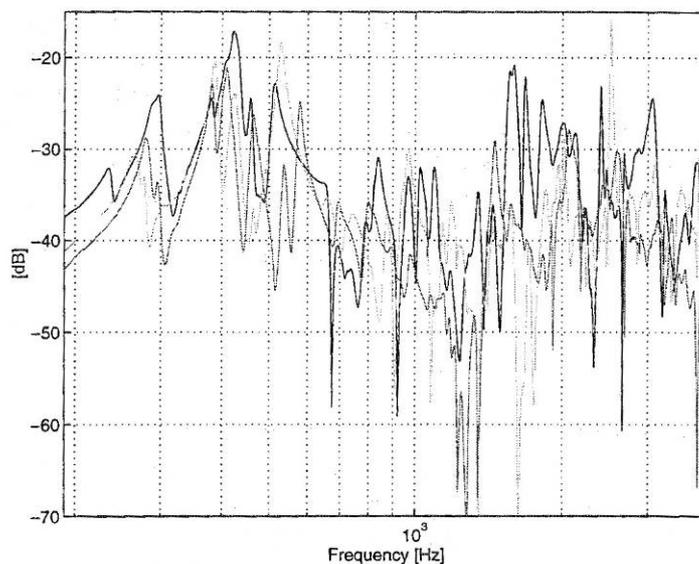


Abb. 8.13. Transfer-Admittanz an den Stegen von drei Violinen von Stradivari (1722; schwach punktiert) bzw. von Guarneri (1744; durchgezogen) bzw. eines skandinavischen Herstellers (stark punktiert); nach Morset et al. (1998).

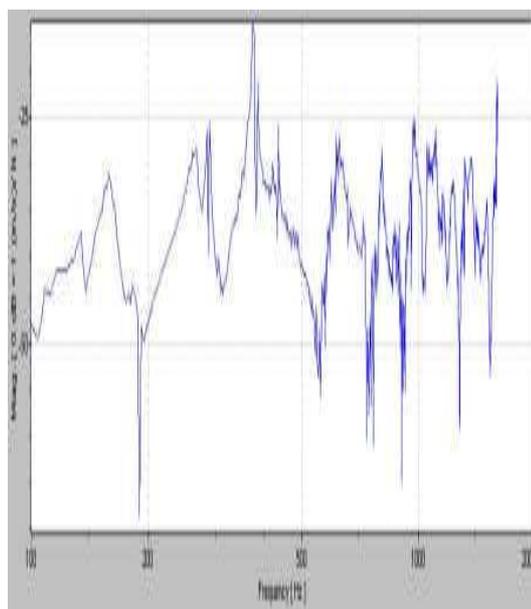


Abb. 8.14. Transfer-Admittanz am Steg der Schülervioline, bestimmt für einen Messpunkt nahe dem bassseitigen Stegfuß.

Dass die so gemessene Transfer-Admittanz mit dem Klangeindruck verknüpft ist, versuchen Morset et al. (1997) damit zu belegen, dass sie Messungen an zwei Violinen („*similar built and similar sounding*“) miteinander vergleichen (Abb. 8.15). Die Abweichungen erweisen sich als marginal. Neben dem Betrag der Admittanz ist in Abb. 8.15 unten auch der Phasenwinkel angegeben. Nach der Erfahrung des Autors sind Messungen mit zwei getrennten Aufnehmern, die möglicherweise nach verschiedenen Wandlerprinzipien arbeiten, oft mit Schwierigkeiten behaftet. Auch wenn die Übertragungsfaktoren hinsichtlich der Amplitude wenig von der Frequenz abhängen, sind häufig Abweichungen bezüglich der Phase zu beobachten. Daraus resultiert die Möglichkeit, dass sich in der Übertragungsfunktion eine Phasenverschiebung manifestiert, die nicht vom Messobjekt herrührt, sondern eine Folge der Eigenschaften der Messwandler ist. Dieses Problem ist wesentlich geringer, wenn der Impedanz-Messkopf eines zuverlässigen und bewährten Herstellers verwendet wird, dessen Eigenschaften bekannt und samt seiner Toleranzen dokumentiert sind.

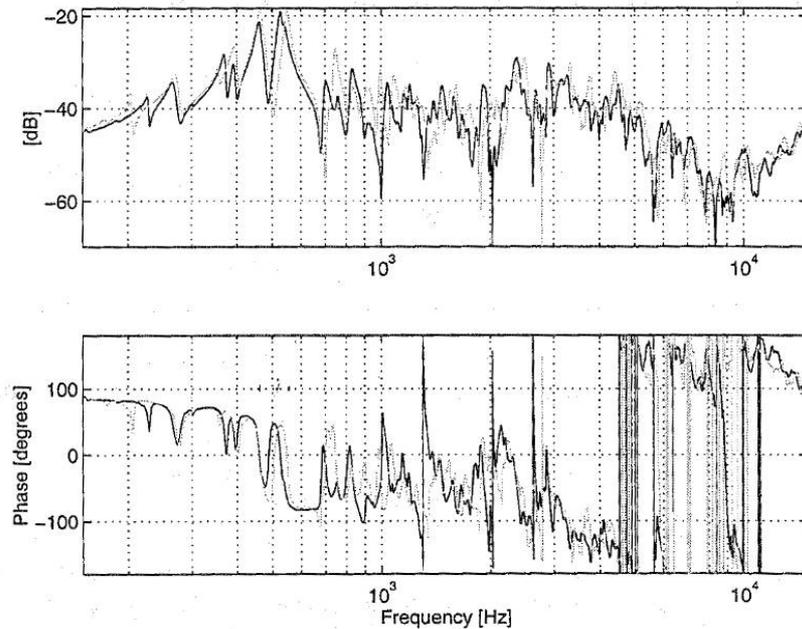


Abb. 8.15. Transfer-Admittanz an den Stegen von zwei ähnlichen Violinen; nach Morset et al. (1998).

3.5.3. Transfer-Admittanz (Kraft und Geschwindigkeit in gleicher Richtung)

Jüngere Angaben zu Messungen, bei denen Kraft und Bewegung gleich gerichtet waren, finden sich beispielsweise bei Jansson, Niewczyk und Frydén (1992), Jansson und Niewczyk (1992) sowie Jansson (1997). Bei all den genannten Untersuchungen wurden getrennte Aufnehmer für die Kraft und die Bewegung verwendet und mit Impulsen und nachfolgender FFT gearbeitet. Abb. 8.16 gibt eine Prinzipskizze der Versuchsanordnung wieder, mit der Admittanzen bestimmt wurden. Ein pendelnder Hammer bringt eine Kraft auf, die an einer Seite des Steges gemessen wird. Am anderen Ende wird mit Hilfe eines Magnets und einer Spule berührungsfrei der Impuls der Schwinggeschwindigkeit bestimmt. Die anregende Kraft (rechts, aufgebracht durch den auftreffenden Hammer) und die Schwinggeschwindigkeit (links, erfasst mit dem magnetischen Aufnehmer) wurden anschließend analysiert und ins Verhältnis gesetzt.

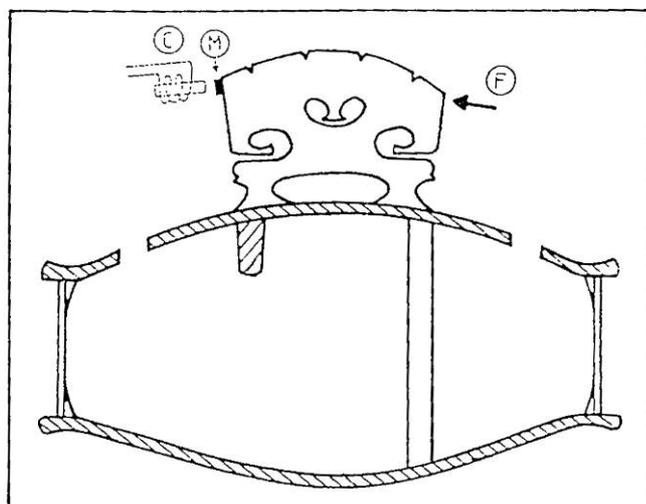


Abb. 8.16. Messvorrichtung zur Ermittlung der Transfer-Admittanz am Steg der Violine, nach Jansson et al. (1992).

Die Messgrößen wurden somit beide parallel zur Decke, aber an zwei unterschiedlichen Stellen abgegriffen. Solange sich der Steg in Querrichtung starr verhält (was bei tiefen Frequenzen der Fall ist), stimmt die gemessene Größe mit einer tangential gemessenen Punkt-Admittanz überein. Sobald sich der Steg in Querrichtung als Kontinuum verhält (was bei höheren Frequenzen der Fall sein wird), handelt es sich dagegen um eine Transfer-Admittanz, gemessen in tangentialer Richtung. Um die Ergebnisse von Jansson *et al.* mit den eigenen vergleichen zu können, muss im Folgenden vereinfachend unterstellt werden, dass der Steg in Querrichtung starr sei. Dann – und nur dann – kommt das Messergebnis einer Punkt-Admittanz gleich, wie sie in den eigenen Experimenten bestimmt worden ist.

Beim Vergleich ist weiterhin zu beachten, dass einmal mit impulsartiger, einmal mit quasi-stationärer Anregung gearbeitet worden ist. Solange Linearität vorausgesetzt werden kann, sind gleichartige Ergebnisse zu erwarten. Von größerer Bedeutung dürfte aber sein, dass die Richtungen sich unterschieden, in denen gemessen worden ist. Während Jansson *et al.* parallel zur Decke gemessen haben, war bei den eigenen Experimenten der Messkopf im Winkel 30^0 orientiert. Umso erstaunlicher ist, dass ungeachtet dieser Unterschiede deutliche Gemeinsamkeiten zwischen den eigenen und den Resultaten von Jansson *et al.* zu erkennen sind.

Abb. 8.17 zeigt ein einschlägiges Resultat. Es gibt die Admittanz am Steg einer Violine wieder, die nach Jansson *et al.* (1992) als gut beurteilt worden ist. Die Abszisse und die Ordinate sind logarithmisch unterteilt. Die Autoren sehen in diesem Diagramm eine Aneinanderreihung von Resonanzen zwischen 400 Hz und 600 Hz, eine weitere Anhäufung von Resonanzen zwischen 1000 Hz und 1500 Hz, daran anschließend ein Tal und zwischen 2000 Hz und 3000 Hz jene charakteristische Anhebung, die sie als „*Bridge Hill*“ bezeichnen. Hierauf wird in Abschnitt 8.4 noch näher einzugehen sein.

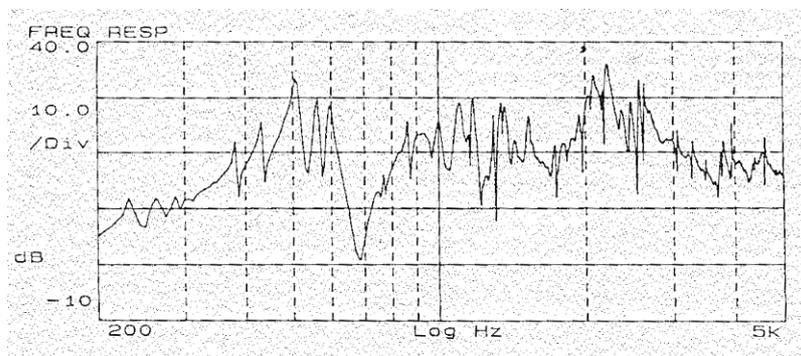


Abb. 8.17. Betrag der komplexen Admittanz, gemessen am Steg einer „guten“ Violine, nach Jansson, Niewczyk und Frydén (1992).

Zwei weitere Resultate finden sich in Abb. 8.18. Admittanzen, wie sie Jansson und Niewczyk (1997) gemessen haben, sind nach Betrag und Phase aufgetragen. Sie beziehen sich auf zwei Typen von hochwertigen Violinen. Zwischen 200 Hz und 5000 Hz variiert die Admittanz innerhalb einer Schwankungsbreite von 30 dB, wobei 10 dB der Admittanz $0,2 \text{ s/kg}$ entsprechen. Dieser Wert wird in einigen Fällen erreicht, was mit der Größenordnung der eigenen Ergebnisse übereinstimmt.

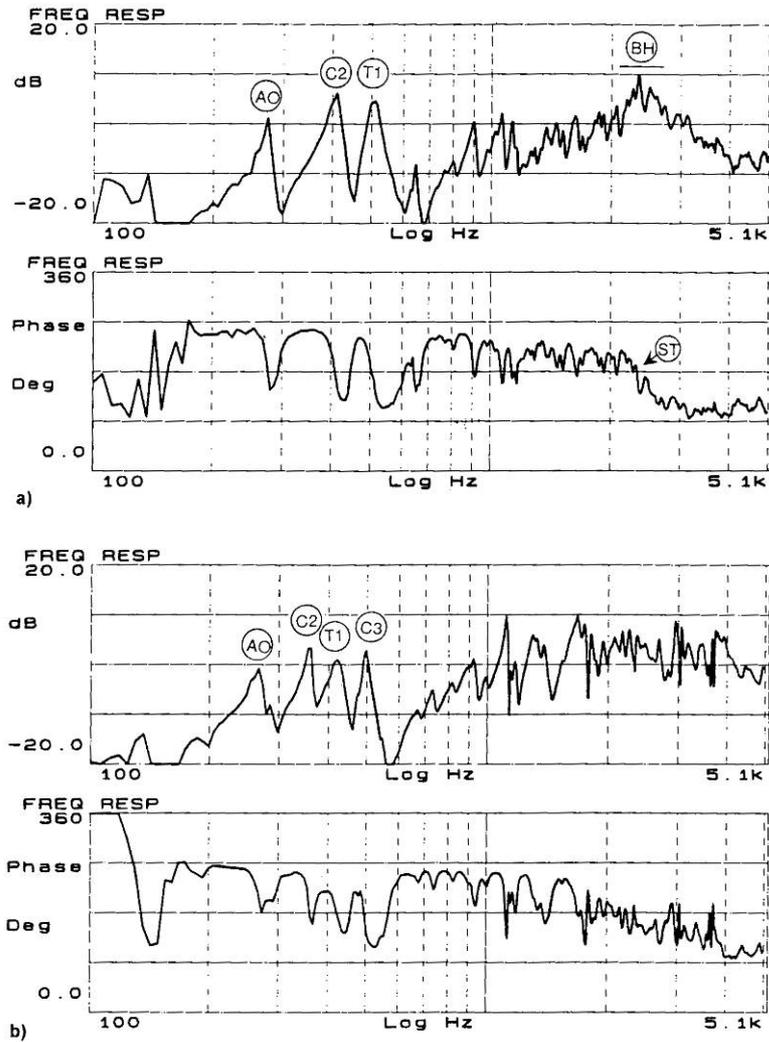


Abb. 8.18. Betrag und Phase der komplexen Admittanz, gemessen an den Stegen von zwei hochwertigen Violinen, nach Jansson und Niewczyk (1997).

Die ersten Maxima spiegeln Eigenschwingungen des Korpus wider. Sie sind entsprechend der Nomenklatur von Tab. 5.III mit A_0 , C_2 , T_1 und C_3 bezeichnet. Die Admittanz der Violine von Abb. 8.18.b (unten) weist Maxima bei allen Frequenzen auf, die diesen vier Moden des Violinkörpers entsprechen. Bei hohen Frequenzen zeigt sie eine Aneinanderreihung zahlreicher Spitzen, aber keine auffällige Anhebung. Ungewöhnlicherweise schwankt bei beiden Instrumenten der Phasenwinkel nicht um 0° , sondern um 90° .

Beim Instrument von Abb. 8.18.a (oben) lassen sich im Bereich bis 500 Hz drei Schwingungen des Geigenkörpers erkennen. Zwischen 2000 Hz und 3000 Hz ist eine charakteristische Anhebung in der Admittanz zu erkennen. Sie ist mit BH (nach *Bridge Hill*) bezeichnet. Davon wird im folgenden Abschnitt ausführlich die Rede sein. Die Kurven in Abb. 8.18.a und b deuten darauf hin, dass diese Überhöhung nicht ausnahmslos bei allen Violinen zu beobachten sein wird.

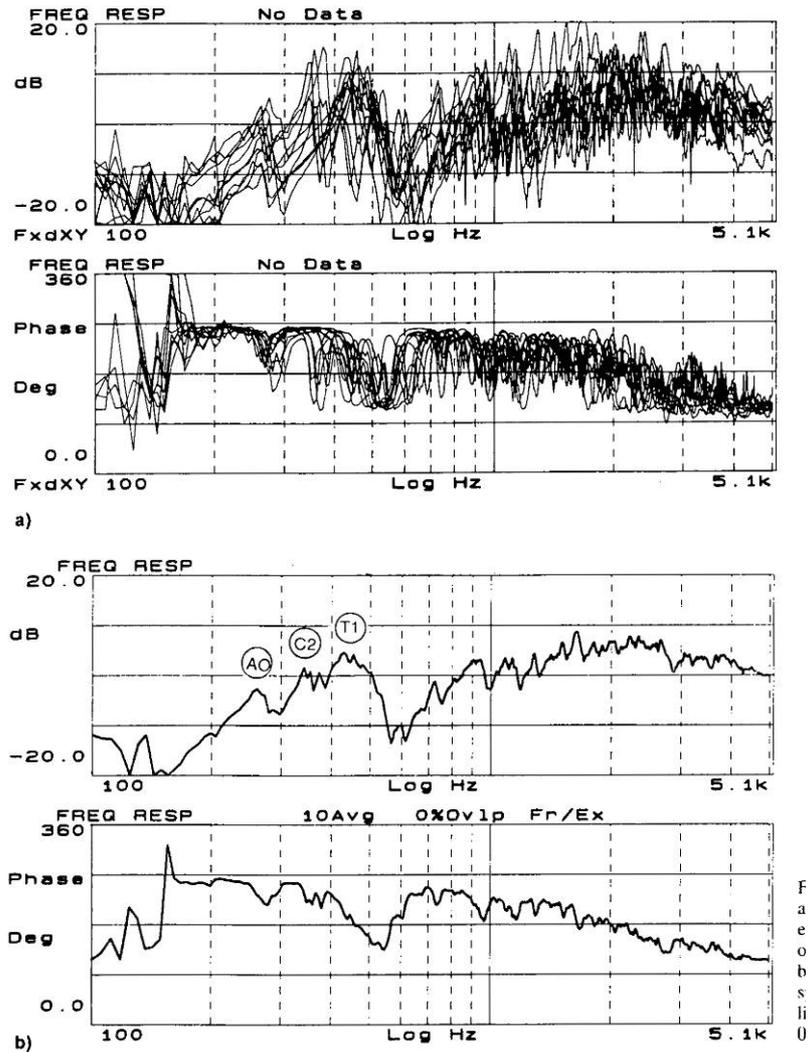


Abb. 8.19. Betrag und Phase der komplexen Admittanz, gemessen an den Stegen von elf hochwertigen Violinen, nach Jansson und Niewczyk (1997).
 a) Die einzelnen Messkurven sind übereinander geschrieben;
 b) gemittelt über alle elf Messungen.

Jansson und Niewczyk (1997) haben Frequenzgänge von Admittanz-Messungen an elf Violinen zusammengefasst und alle in ein Diagramm für den Betrag und eines für die Phase geschrieben. Abb. 8.19.a (oben) macht anschaulich, dass beim Betrag die Schwankungsbreite enorm ist. So prägt sich beispielsweise die erste Spitze der Admittanz bei Frequenzen zwischen 350 Hz und 450 Hz aus. Bei den eigenen Messungen lag sie – übrigens nur bei Anregung am diskantseitigen Ende – bei etwas mehr als 500 Hz. Der *Bridge Hill* wäre, wie die gemittelte Kurve zeigt, etwa zwischen 1300 Hz und 3000 Hz angesiedelt.

8.4. Der „*Bridge Hill*“

Im Jahr 1992 haben Jansson *et al.* den Begriff *Bridge Hill* geprägt, der seitdem immer wieder auftaucht. Die Bezeichnung suggeriert, dass sich hierin ausschließlich der Steg mit seinen Übertragungseigenschaften manifestiert. Jansson *et al.* bezeichnen damit eine Anhebung im Frequenzgang der Eingangs-Admittanz zwischen etwa 2000 Hz und etwa 3000 Hz. Diese war im obersten Diagramm von Abb. 8.18 mit „BH“ markiert und auch im Sammel-Diagramm von Abb. 8.19 oben zu erkennen. Der *Bridge Hill* gilt als charakteristisch für hochwertige Violinen. Bei den Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass es durchaus auch Violinen gibt, bei denen diese Anhebung nicht zu beobachten ist.

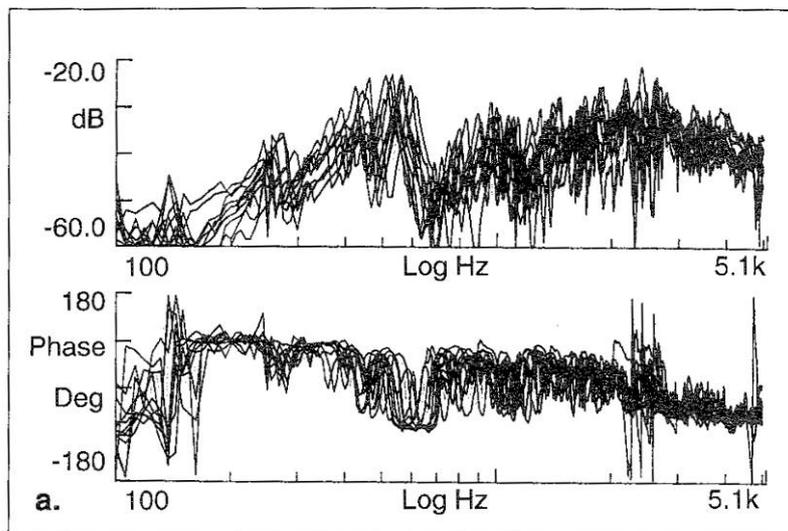


Abb. 8.20. Betrag und Phase der Transfer-Admittanz, gemessen an den Stegen von zehn hochwertigen Violinen, nach Jansson (1997).

Die Diagramme von Abb. 8.20 gehen auf Messungen an zehn Violinen hoher Qualität zurück. Wie auch in Abb. 8.19 oben sind sämtliche Frequenzgänge übereinander geschrieben. Die Abszissen, und beim Betrag (oben) auch die Ordinate, sind logarithmisch unterteilt. Der Pegel -20 dB entspricht 0,2 s/kg. Die Admittanz bleibt stets unterhalb dieses Wertes und hat damit dieselbe Größenordnung wie bei den eigenen Messungen. Wiederum ist zwischen etwas weniger als 2 kHz und 3 kHz die als *Bridge Hill* bezeichnete Anhebung zu erkennen.

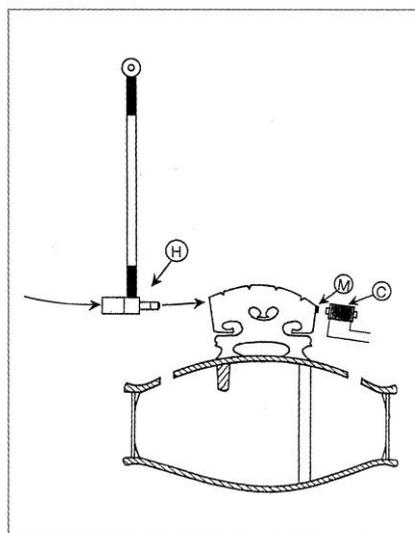


Abb. 8.21. Messvorrichtung zur Ermittlung der Transfer-Admittanz am Steg der Violine nach Jansson (1997).

Anhand von Abb. 8.21 sei noch einmal daran erinnert, dass Jansson *et al.* eine Methode zur Messung der Admittanz verwendet, die von der eigenen (siehe Kapitel 6) in wesentlicher Hinsicht abweicht. Die Abbildung zeigt eine Skizze ihrer Versuchsanordnung. Der Impulshammer (links im Bild) bringt eine horizontale Kraft auf, die an einer Seite des Steges gemessen wird. Am anderen Ende des Steges wird der dadurch hervorgerufene Impuls der Schwinggeschwindigkeit bestimmt. Die anregende Kraft (links, gemessen mit einem Piezoaufnehmer) und die Schwinggeschwindigkeit (rechts, erfasst mit einem magnetischen Aufnehmer) werden anschließend FFT-analysiert und ins Verhältnis gesetzt. Für tiefe Frequenzen kann angenommen werden, dass der Steg in Querrichtung sich starr verhält; die ermittelte Größe stimmt dann mit einer Punkt-Admittanz in tangentialer Richtung überein. Bei höheren Frequenzen muss jedoch damit gerechnet werden, dass der Steg in Querrichtung als Kontinuum fungiert. Dann handelt es sich bei der Messgröße von Jansson, Niewczyk und Frydén (1992), Jansson und Niewczyk (1992) sowie Jansson (1997) um eine Transfer-Admittanz, gemessen in tangentialer Richtung.

Versuche, die Qualität von Violinen zu prüfen, ohne dass ein Spieler beteiligt ist und ohne dass Personen ein subjektives Urteil abliefern, gibt es schon seit langem. So haben bereits vor mehr als einem halben Jahrhundert Lottermoser und Linhardt (1957) vorgeschlagen, Violinen durch einen elektro-mechanischen Wandler zum Schwingen zu bringen und den Schalldruck zu messen, der dadurch erzeugt wird. Später hat Dünnwald (1991) Übertragungsfrequenzgänge gemessen und daraus Gütekriterien entnommen. Zu ermitteln, wie sich die Anregungskraft in Schall umsetzt, ist von hoher Aussagekraft. Jedoch erfordert die Messung einen großen Aufwand, beispielsweise einen reflexionsarmen Raum, wie er nicht überall verfügbar ist.

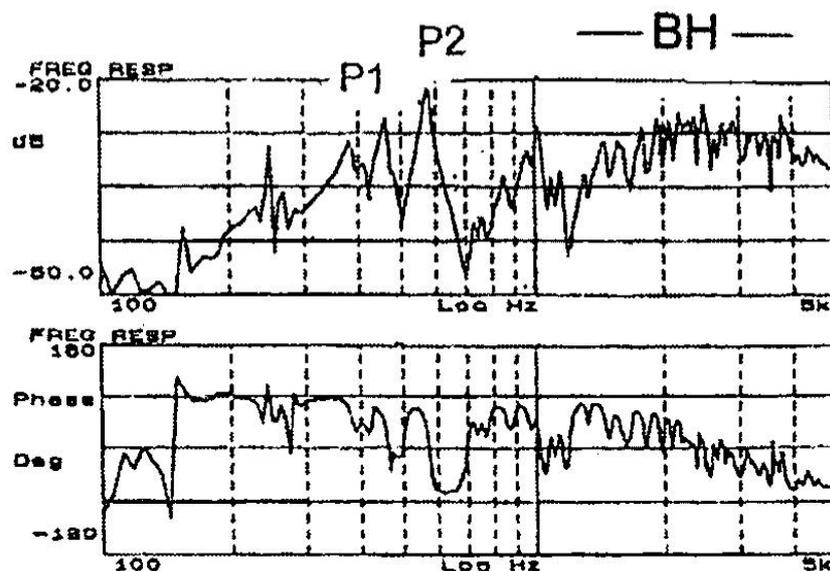


Abb. 8.22. Betrag und Phase der komplexen Admittanz bei tangentialer Anregung am Steg einer Stradivari von 1709, nach Durup und Jansson (2005).

Demgegenüber bietet die Stegadmittanz große Vorteile. Sie wurde bereits 1978 von Hacklinger experimentell bestimmt und wird beispielsweise im System VIAS (2009) des Instituts für Wiener Klangstil gemessen und bewertet. Die Admittanz ist „eindimensional“ und ohne allzu großen Aufwand zu bestimmen. Auch Durup und Jansson (2005) nutzen sie und werten ihren Frequenzgang aus. Im Zusammenhang mit ihren Messungen am Steg haben sie noch einmal erläutert, welche Merkmale in der Stegadmittanz sie für relevant halten; vgl. Abb. 8.22. Neben den Spitzen P1 und P2 zwischen 400 Hz und 600 Hz betrachten sie den *Bridge Hill*

BH als Qualitätskriterium. Dessen Frequenzlage wird im Text mit 2000 Hz bis 3000 Hz angegeben, ist laut obiger Abbildung dagegen eher bei 1500 Hz bis 4000 Hz zu lokalisieren. In ihrer Arbeit ersetzen sie die bisherig verwendete Bezeichnung durch das Wort „*Hill*“. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass ihre Untersuchungen die Rolle des Steges relativieren. Die Experimente haben gezeigt, dass der *Hill* nicht nur von der Form des Steges beeinflusst wird. Vielmehr hängt er auch vom Abstand der Füße und überdies davon ab, wie der Korpus auf die Füße rückwirkt. Besonders stark scheint diese Rückwirkung von den *f*-Löchern geprägt zu sein.

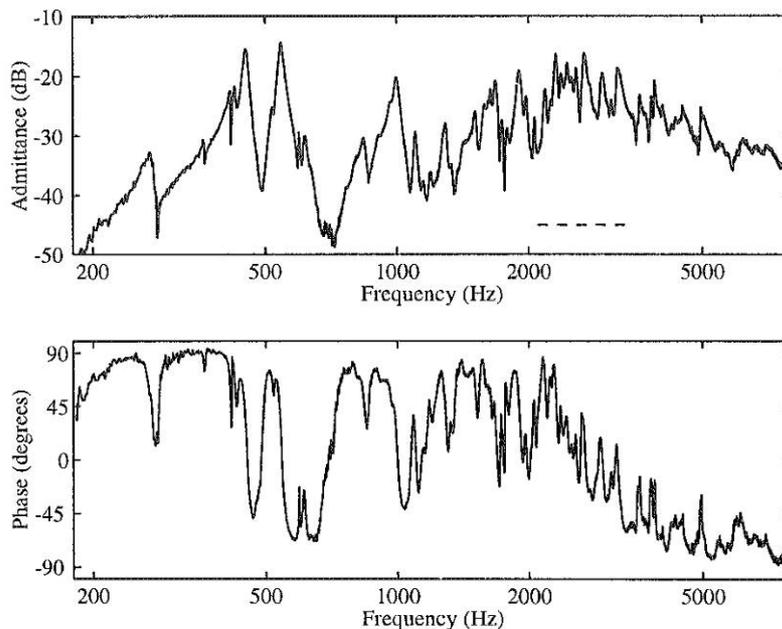


Abb. 8.23. Betrag und Phase der komplexen Admittanz bei tangentialer Anregung am Steg einer Violine, nach Woodhouse (2005); der *Bridge Hill* ist gestrichelt markiert.

Abb. 8.23 zeigt ein Ergebnis eines weiteren Autors. Woodhouse (2005) hat ein Modell vorgeschlagen, mit dem er das „Skelett“ des *Brigde Hill* beschreiben kann. Im vorliegenden Zusammenhang ist die Admittanz von Interesse, die er in tangentialer Richtung gemessen hat. Die Phase im unteren Diagramm schwankt nun, wie dies der Erwartung entspricht, um 0° . Oben ist der Admittanz-Pegel auf 1 s/kg normiert. Demnach kann die Admittanz Maximalwerte von etwas mehr als 0,1 s/kg erreichen, was mit den eigenen Ergebnissen gut übereinstimmt. Der *Bridge Hill* liegt im Bereich von 2000 Hz bis 3500 Hz; seine Frequenzlage ist in Abb. 8.23 durch Strichelung markiert. Es ist zu sehen, dass diese Eingrenzung in gewisser Weise willkürlich ist. Man könnte den Beginn mit gleicher Berechtigung auf 1700 Hz festlegen.

Im Lichte dieser Hinweise anderer Autoren sollen die eigenen Ergebnisse noch einmal überprüft werden. In Abb. 8.24 sind vier Frequenzgänge des Betrages der Admittanz zusammen gestellt. Oben finden sich die Ergebnisse für den Steg DAC, unten diejenigen für den traditionellen Steg.

Im linken unteren Diagramm ist ein *Bridge Hill* zwischen 1700 Hz und 3000 Hz zu erkennen. Dieser zeigt sich im linken oberen Diagramm bis etwa 2300 Hz ebenfalls. Bis zu dieser Frequenz treten keine sehr großen Unterschiede auf. Geht man davon aus, dass der *Bridge Hill* bis 3000 Hz reicht, dann beträgt zu höheren Frequenzen hin die Admittanz im Mittel etwa 0,05 s/kg. Verglichen damit bewirkt der Steg DAC bereits im oberen Teil des *Bridge Hill* eine deutliche Anhebung. Wird die Frequenz über 2300 Hz hinaus gesteigert, dann weist der Steg DAC eine deutlich höhere Admittanz auf als der traditionelle Steg. Der Zuwachs im hochfre-

quenten Bereich ist so ausgeprägt, dass von einem *Bridge Hill* keine Rede mehr sein kann. Vielmehr bleibt beim Steg DAC oberhalb von 2300 Hz dieses hohe Niveau der Admittanz erhalten, bei dem Spitzen zwischen 0,2 s/kg und 0,3 s/kg auftreten können.

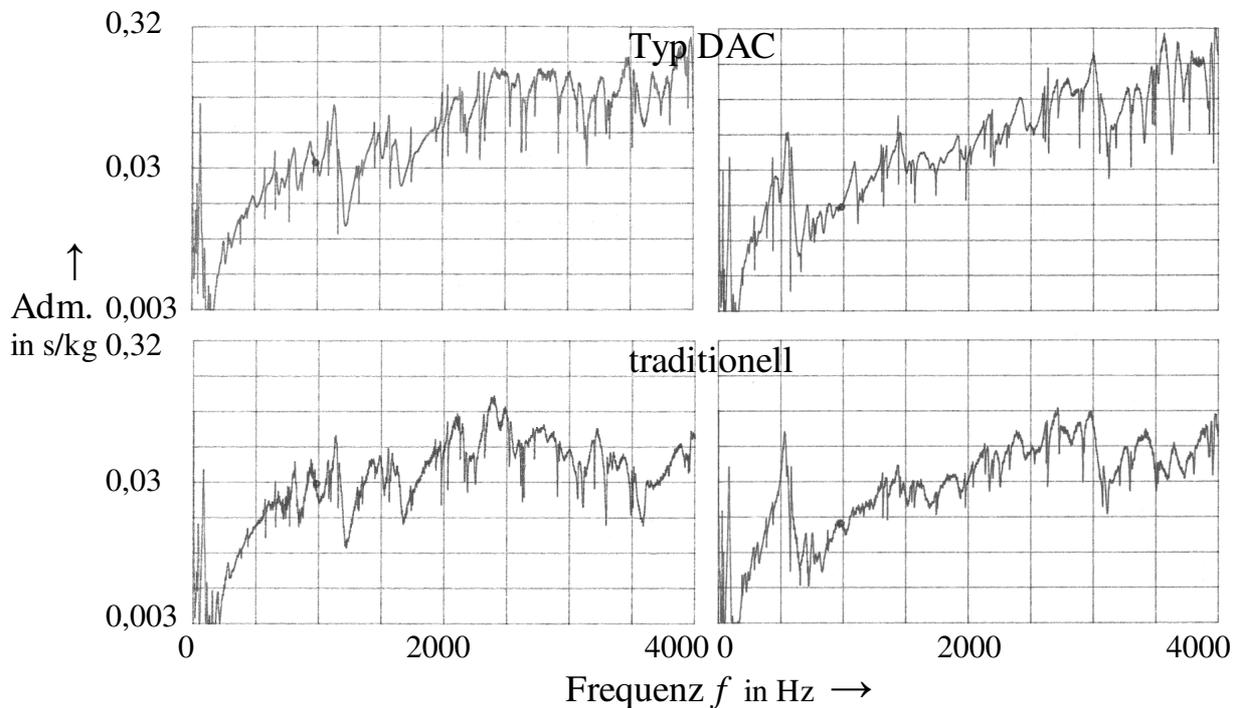


Abb. 8.24. Betrag der Admittanz Y auf einer logarithmischen Skala als Funktion der Frequenz f , gemessen in 30° -Richtung am bassseitigen Ende (links) bzw. am diskantseitigen Ende (rechts) von zwei Stegen.

Die beiden rechten Diagramme bieten ein etwas abweichendes Bild. Ab etwa 600 Hz steigt die Admittanz im Mittel stetig bis etwa 3000 Hz an. Der *Bridge Hill* ist bei beiden Stegen von ähnlicher Gestalt, jedoch von unterschiedlichem Niveau. Beim traditionellen Steg (unten) ist der Höchstwert 0,1 s/kg, beim DAC-Steg in der Spitze bis zu doppelt so groß. Ist der *Bridge Hill* überschritten, verharrt die Admittanz beim traditionellen Steg (rechts unten) auf niedrigerem Niveau zwischen 0,03 s/kg und 0,1 s/kg. Beim DAC-Steg werden oberhalb von 3500 Hz dagegen Admittanz-Werte von bis zu 0,3 s/kg erreicht.

Die eigenen Experimente zeigen, dass die Messkurven davon abhängen, an welchem Ort und in welcher Richtung angeregt wird. Offenbar werden jeweils andersartige Schwingungen von Steg und Korpus hervorgerufen. Dass eine einzige Messung ausreicht, das Übertragungsverhalten eines Steges vollständig zu beschreiben, ist demnach zu bezweifeln. Festzuhalten bleibt, dass sich bei höheren Frequenzen Unterschiede in der Admittanz nachweisen lassen, die vom Steg selbst herrühren. Diese beschränken sich allerdings nicht auf den Bereich des *Bridge Hill*, sondern äußern sich sehr deutlich im gesamten Bereich oberhalb von etwa 2300 Hz. Die beobachteten Unterschiede im Eingangsverhalten der Stege lassen Änderungen im Klangbild der Geigentöne erwarten, die sich am stärksten im Bereich der Noten oberhalb von d^4 bzw. $D7$ ausprägen werden.

8.5. Zusammenfassende Bemerkung

Der Steg eines Saiteninstrumentes wirkt als Übertragungselement mit speziellen Filtereigenschaften. Die Kraft, mit der die Saite den Steg an ihrem Auflagepunkt anregt, überträgt sich

auf die beiden Füße und von dort auf die Decke. Es leuchtet ein, dass dabei von Bedeutung ist, in welcher Richtung und an welcher Stelle die Kraft in den Steg eingeleitet wird. Auf den Einleitungspunkt wird auch einen Einfluss haben, was die Füße des Steges „sehen“.

Bei Experimenten sind früher vielfach die Füße „festgebremst“ worden, so dass der Einfluss des Instrumentenkörpers ausgeschaltet war. Diese Randbedingung ist weit von der Wirklichkeit entfernt; die damit erzielten Ergebnisse lassen sich nur eingeschränkt auf den realen Spielbetrieb übertragen. Es ist anzustreben, den Steg in seiner natürlichen Umgebung, d.h. unter der Belastung durch die vier gespannten Saiten und korrekt auf dem Instrument positioniert, zu messen. Hinsichtlich der Richtung und der Stelle, an der gemessen wird, haben eigene Experimente am Cello eine hohe Sensitivität der Ergebnisse gezeigt. Resultate, die in dieser Hinsicht differieren, können nur sehr eingeschränkt miteinander verglichen werden.

Die Auswertung von Ergebnissen in der Literatur sowie die eigenen Erfahrungen lassen erwarten, dass die Resultate in gewissem Maße auch vom Messverfahren beeinflusst werden. Ein geringerer Einfluss dürfte den verwendeten Messaufnehmern, der Art der Anregung, dem Anregungssignal usw. zukommen. Von großer Bedeutung ist dagegen, ob an einem Punkt (wie bei den eigenen Messungen) oder an zwei unterschiedlichen Punkten (wie z.B. bei den Experimenten von Jansson 1997) gemessen wird. Selbstverständlich spielt neben dem Ort eine wesentliche Rolle, in welcher Richtung gemessen wird. Vergleiche zwischen verschiedenen Stegen erscheinen nur sinnvoll, wenn diese auf ein und demselben Instrument ein und derselben Messprozedur unterzogen werden. In allen anderen Fällen werden die Unterschiede, die in der Messung begründet liegen, größer als diejenigen sein, die auf den Steg zurückgehen.

Positiv ist zu vermerken, dass die meisten Resultate anderer Autoren in Hinsicht auf die Größenordnung und wesentliche Charakteristika mit den eigenen Ergebnissen übereinstimmen. Das kann so gedeutet werden, dass die hier verwendete Messmethode zuverlässige und aussagekräftige Resultate liefert. Als Verbesserung wäre denkbar, in Zukunft ein Verlängerungsstück zu verwenden, so dass der Impedanzmesskopf anders orientiert werden kann. Dann wäre es möglich, ihn nicht – wie bei den bisherigen Messungen – im Winkel von 30° , sondern parallel oder auch senkrecht zur Decke auszurichten. Die eigenen Ergebnisse ließen sich dann besser mit denen anderer Autoren vergleichen. Das Verlängerungsstück dürfte aber nicht zwischen Messkopf und Steg eingebracht werden; dies würde durch eine zusätzliche Masse die Messung verfälschen. Sinnvoll wäre es vielmehr, den Messkopf nach wie vor in direktem Kontakt mit dem Steg zu halten und die Verlängerung zwischen Messkopf und Schwingerreger einzufügen.

Mit der Kenntnis, dass einige Autoren einen *Bridge Hill* propagieren, kann man diesen in den eigenen Messdiagrammen auch finden. Jedoch zeigt sich, dass ein Auswechseln des Steges – anders als dies der Name erwarten ließe – sich nicht bevorzugt auf diese Anhebung in der Eingangs-Admittanz auswirkt. Vielmehr deuten die eigenen Ergebnisse darauf hin, dass unterschiedliche Stege auf ein und derselben Violine den tieffrequenten Teil des *Bridge Hill* nicht beeinflussen. Im höherfrequenten Teil wurde allerdings beobachtet, dass sich in einem Fall die Feinstruktur, im anderen Fall das Niveau im Frequenzgang änderte. Wirklich gravierende Unterschiede zwischen den beiden Stegen wurden jedoch bei Frequenzen offenkundig, die oberhalb des *Bridge Hill* liegen.

Die Übertragungseigenschaften des Steges bilden seine Ausgänge – was die beiden Füße vom Korpus „sehen – auf seinen Eingang – den Ort, an dem die Admittanz gemessen wird – ab. Demnach müssen sich die Schwingungen der Decke in der Stegadmittanz widerspiegeln. In welchem Ausmaß dies zutrifft, wird im folgenden Kapitel untersucht.

9. STEGADMITTANZ UND DECKENSCHWINGUNGEN

Die Schwingungen, die in Kapiteln 3 bis 5 besprochen worden sind, wurden auf der Vorderseite einer Schüler-Violine gemessen. Im Unterschied dazu beziehen sich die Frequenzgänge der Admittanz von Kapitel 7 auf ein anderes Instrument aus einer Meister-Werkstätte. Obwohl verschiedene Violinen betrachtet worden sind, soll doch versucht werden, Gemeinsamkeiten und Zusammenhänge aufzuspüren. Da Schwingungen im Bereich bis 1600 Hz gemessen wurden, wird die Admittanz nur zwischen 0 Hz und 2000 Hz ausgewertet.

9.1. Maxima der Admittanz

Bei den eigenen Experimenten war der Steg schräg an seinen Enden angeregt worden; vgl. Abschnitt 6.2. Die Vergleiche in Kapitel 7 haben gezeigt, dass die Messungen an den beiden Enden zu andersartigen Ergebnissen führen. Bis etwa 2300 Hz sind die Diskrepanzen infolge der unterschiedlichen Messorte und –richtungen wesentlich größer als diejenigen, welche auf die verschiedenartigen Stege zurückzuführen sind.

9.1.1. Traditioneller Steg

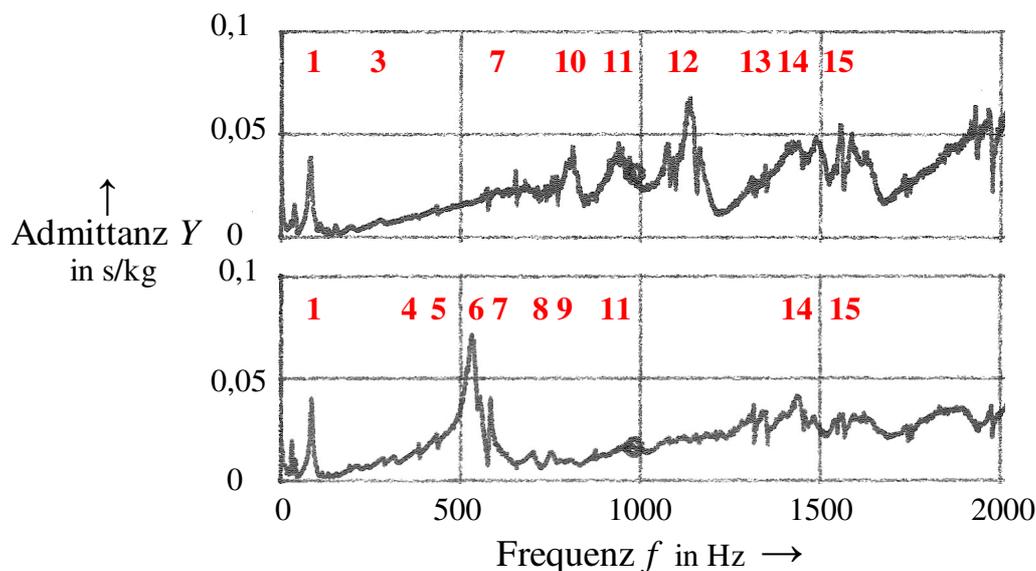


Abb. 9.1. Betrag der Admittanz $|Y|$ als Funktion der Frequenz f , gemessen am bassseitigen Ende (oben) bzw. am diskantseitigen Ende (unten) des traditionellen Steges.

Die Abb. 9.1 und 9.2 beziehen sich auf den traditionellen Steg. Es ist der Betrag $|Y| = Y$ der Admittanz als Funktion der Frequenz aufgetragen, die von 0 Hz bis 2000 Hz reicht. In Abb. 9.1 ist die Ordinate linear, in Abb. 9.2 logarithmisch geteilt. In beiden Darstellungsarten wird offenkundig, wie stark die Admittanz davon abhängt, ob der Steg am Ende der Basssaiten (Abb. 6.4 und 6.5) oder am Ende der Diskantsaiten (Abb. 6.2 und 6.3) angeregt wird. Offenbar werden bei der Messung jeweils andere Schwingungen des Korpus geweckt. Abb. 9.2 gibt denselben Sachverhalt wie Abb. 9.1 wieder. Die logarithmische Teilung hebt aber Details hervor, die in der linearen Darstellung kaum sichtbar sind. Die beiden Darstellungsarten ergänzen sich somit. Mehrere Maxima lassen sich mehr oder weniger klar identifizieren.

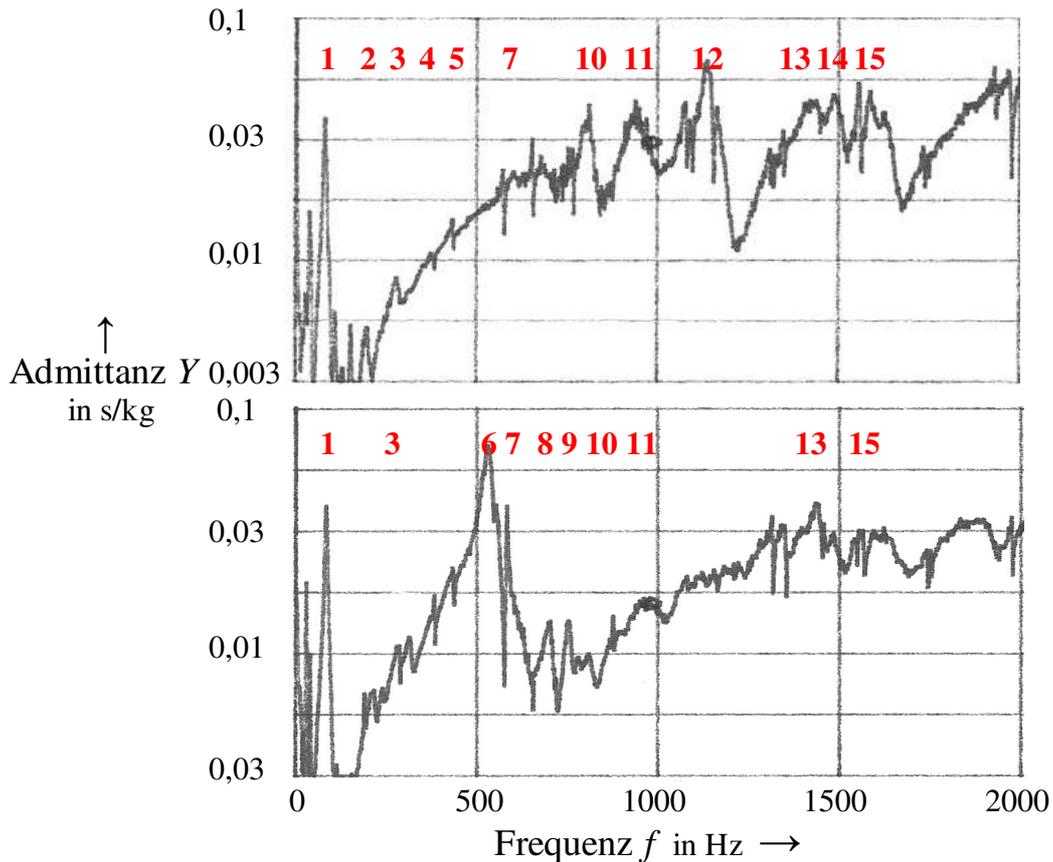


Abb. 9.2. Admittanz $|Y|$ im logarithmischen Maßstab als Funktion der Frequenz f , gemessen am bassseitigen Ende (oben) bzw. am diskantseitigen Ende (unten) des traditionellen Steges.

Im Folgenden soll versucht werden, den Maxima in den Frequenzgängen der Admittanz Schwingungsformen des Instrumentenkörpers zuzuordnen. Dazu sind in die Abb. 9.1 und 9.2 der Messung am traditionellen Steg in roter Farbe Kennziffern eingetragen. Jede dieser Ziffern kennzeichnet ein mehr oder weniger gut erkennbares Maximum. Fünfzehn Kennziffern samt den ungefähren Frequenzen zwischen 100 Hz und 1600 Hz, bei denen Maxima zu lokalisieren sind, sind in Tab. 9.1 zusammen gestellt.

Tab. 9.1. Ungefähre Frequenz, bei der ein Maximum im Frequenzgang der Admittanz zu erkennen ist, mit zugehöriger Kennziffer

Kennziffer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Frequenz in Hz	100	200	250	320	450	550	600	650	700	800	950	1150	1400	1500	1600

9.1.2. Steg DAC

Im Vergleich zum traditionellen Steg hatten sich beim Steg DAC in der Admittanz bei Frequenzen bis 2000 Hz keine wesentlichen Unterschiede gezeigt. Somit lässt sich die Auswahl der Maxima anhand der Admittanz-Diagramme überprüfen, die im vorliegenden Abschnitt betrachtet werden. In den Abb. 9.3 und 9.4 ist der Betrag $|Y| = Y$ über der Frequenz aufgetragen.

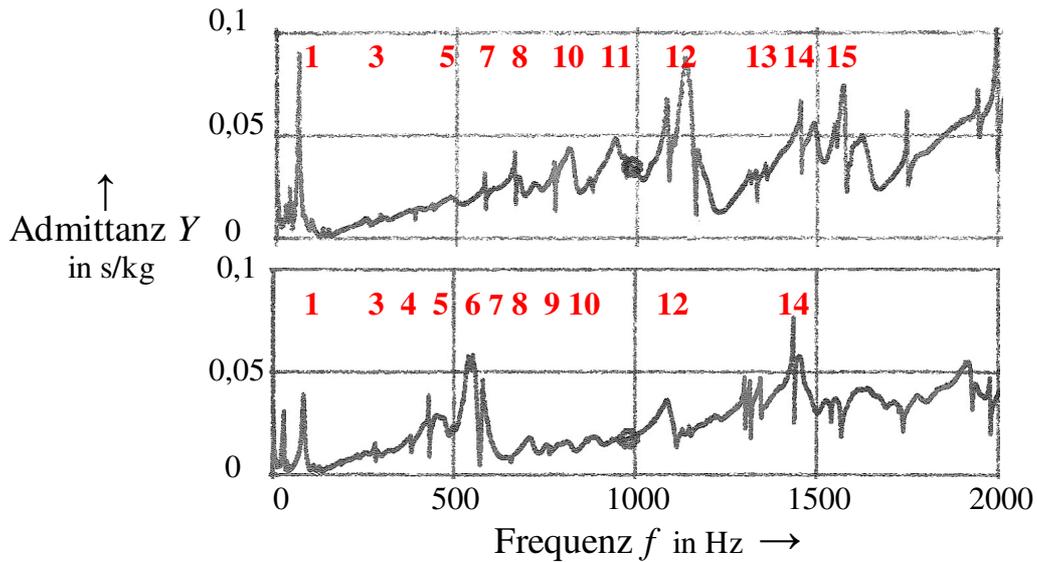


Abb. 9.3. Betrag der Admittanz $|Y|$ als Funktion der Frequenz f , gemessen am bassseitigen Ende (oben) bzw. am diskantseitigen Ende (unten) des Steges DAC.

Die oberen Diagramme gelten für das bassseitige Ende, die unteren für das diskantseitige Ende des Steges DAC. Die Zuordnung der Frequenzen zu den Maxima, wie sie Tab. 9.I wiedergibt, bestätigt sich.

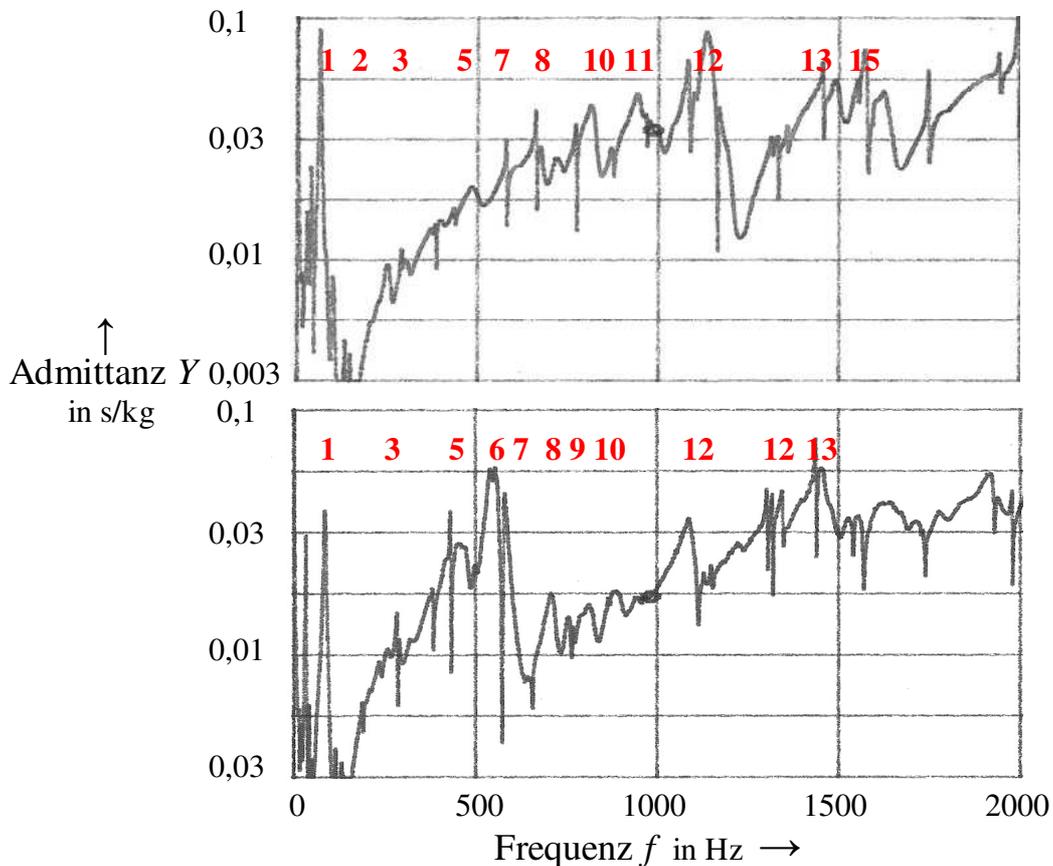


Abb. 9.4. Admittanz $|Y|$ im logarithmischen Maßstab als Funktion der Frequenz f , gemessen am bassseitigen Ende (oben) bzw. am diskantseitigen Ende (unten) des Steges DAC.

9.2. Relevante Betriebsschwingungen

Es wurde bereits erwähnt, dass die Auswahl der charakteristischen Betriebsschwingungen in gewisser Weise der Willkür unterliegt. In den Kapiteln 3 und 4 waren Betriebsschwingungen mit Moden verglichen worden. Auf diese Weise war versucht worden, Betriebsschwingungen dadurch zu „legitimieren“, dass sie in Hinsicht auf Form und Frequenz Eigenformen und Eigenfrequenzen nahekommen. Dabei hatte sich gezeigt, dass man meist mehr charakteristische Betriebsschwingungen als Moden findet. In aller Regel sind die Moden als Untermenge in den charakteristischen Betriebsschwingungen enthalten.

Im Folgenden wird nach solchen Betriebsschwingungen gesucht, die sich in den Frequenzgängen der Admittanz wiederfinden. Wie eingangs erwähnt, ist dabei problematisch, dass die Schwingungen (Winter und Wörner 2000) und die Admittanz an zwei unterschiedlichen Instrumenten gemessen worden sind. Trotzdem soll der Versuch unternommen werden, Beziehungen aufzuspüren. Dass sich Schwingungen der Violine in der Admittanz widerspiegeln, kann z.B. Abb. 5.5 in Kapitel 5 entnommen werden. Nach Hutchins (1996 und 1998) sind drei Admittanz-Maxima bei 186 Hz, 302 Hz bzw. 563 Hz jeweils einer Schwingung des Korpus zugeordnet. Deren erste ist durch Biegung mit zwei Knoten in Längsrichtung (in Hutchins' Nomenklatur B-1) und die zweite (B0) durch drei Knoten in Längsrichtung gekennzeichnet. Bei der dritten Form (B1) schwingen der linke und der rechte Teil des Korpus in Gegenphase.

Abb. 9.5 enthält auf drei Seiten 15 Schwingungsbilder, die entsprechend ihrer Frequenz den Maxima in den Admittanzkurven der Abb. 9.1 bis 9.4 zugeordnet werden können. Sie sind den Kapiteln 3 und 4 entnommen. In der linken Spalte findet sich die Kennziffer des Maximums der Admittanz nach Tab. 9.I. In der mittleren Spalte ist die charakteristische Frequenz angegeben, die der Frequenz des Admittanz-Maximums am nächsten kommt. Der Buchstabe davor lässt erkennen, in welcher Richtung der Schwingerreger bei der Messung orientiert war. So steht „n“ für normale Anregung (senkrecht zur Decke) und „t“ für tangentielle Anregung (parallel zur Decke). In der rechten Spalte sind die charakteristischen Betriebsschwingungsformen der Vorderseite zusammen gestellt, von denen angenommen wird, dass sie sich als Maxima in der Admittanz äußern.

Die Zuordnung in Abb. 9.5 kann nur vorläufig sein. Bei ihrer Bewertung sollte berücksichtigt werden, dass zum einen die Angaben von Tab. 5.I nicht sehr genau sind, da die Frequenzen der Admittanz-Maxima nicht direkt gemessen, sondern visuell den Diagrammen der Abb. 9.1 bis 9.3 entnommen worden sind. Zum anderen sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich beim Objekt der Schwingungsmessungen um ein anderes Instrument als bei der Messung der Admittanz handelt. Die Zuordnung von Schwingungen zu Admittanz-Maxima sollte demnach nur als ein erster Versuch verstanden werden.

Die Schwingung, die dem deutlich ausgeprägten Maximum **1** zugeordnet ist, liegt unterhalb des Tonbereichs der Violine. Das Instrument bewegt sich nur wenig, der Saitenhalter dagegen stark. Die weiteren Maxima fallen dagegen mit Tönen zusammen, die auf der Violine gespielt werden können. Die Maxima **2** bis **5** prägen sich nicht sehr stark aus. Sehr hoch ist die Schwingfreudigkeit am diskantseitigen Ende des Steges beim Maximum **6**, das oberhalb von 500 Hz etwa im Bereich der Noten c^2 bis d^2 auftritt. In diesem Frequenzbereich finden sich noch weitere Maxima, die dicht benachbart liegen. Sie sind schwer zu unterscheiden und Schwingungen zuzuordnen. Wie z.B. Tab. 5.III zu entnehmen ist, haben Roberts und Rossing (1998) bei Frequenzen zwischen 450 Hz und 550 Hz die Schwingungsarten T_1 , A_1 und C_3 identifiziert. Die Zuordnung, wie sie in Abb. 9.5.b vorgeschlagen ist, kann demnach nicht mehr als einen Vorschlag darstellen.

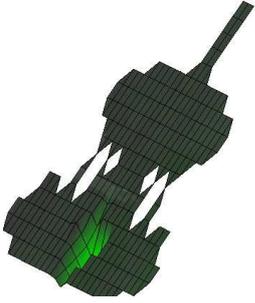
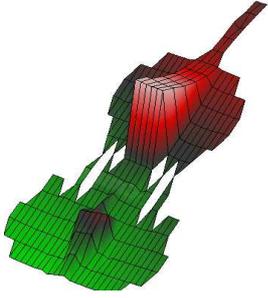
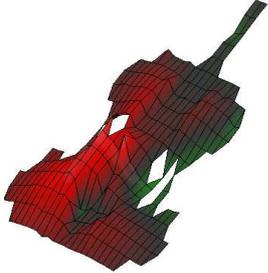
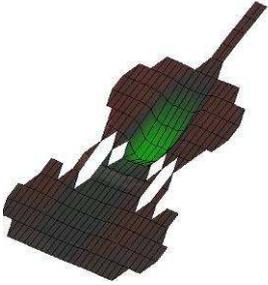
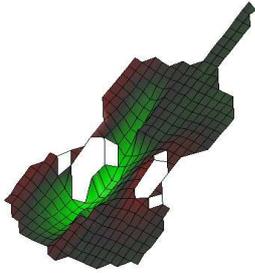
Kennziffer des Maximums der Admittanz	Charakteristische Frequenz (n: norm.; t: tang.)	Schwingungsbild
1	n 112 Hz	
2	n 226 Hz	
3	n 284 Hz	
4	n 306 Hz	
5	t 374 Hz	

Abb. 9.5.a. Charakteristische Betriebsschwingungen einer Violine in der Nähe von Frequenzen, bei denen Maxima in der Admittanz einer anderen Violine auftreten.

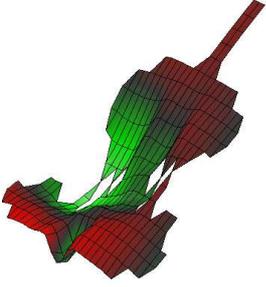
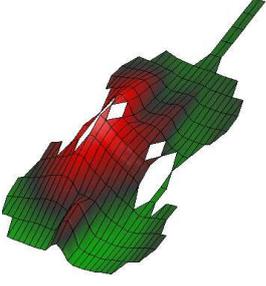
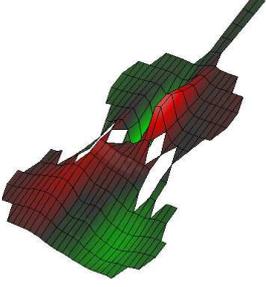
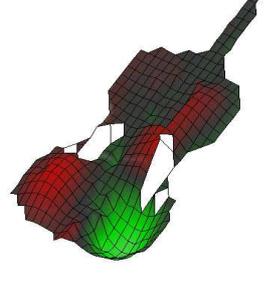
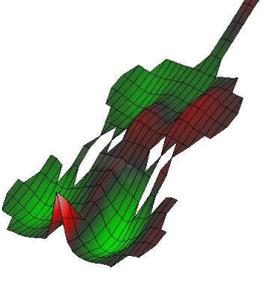
Kennziffer des Maximums der Admittanz	Charakteristische Frequenz (n: norm.; t: tang.)	Schwingungsbild
6	n 498 Hz	
7	n 554 Hz	
8	n 660 Hz	
9	t 758 Hz	
10	n 854 Hz	

Abb. 9.5.b. Charakteristische Betriebsschwingungen einer Violine in der Nähe von Frequenzen, bei denen Maxima in der Admittanz einer anderen Violine auftreten.

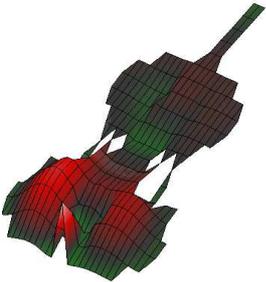
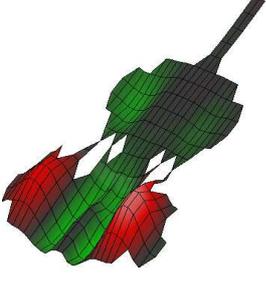
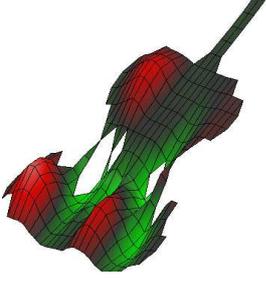
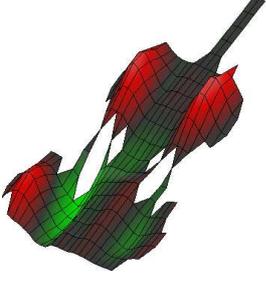
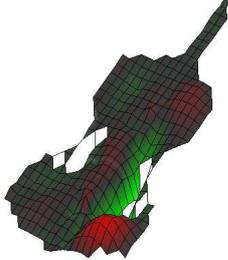
Kennziffer des Maximums der Admittanz	Charakteristische Frequenz (n: norm.; t: tang.)	Schwingungsbild
11	n 928 Hz	
12	n 1136 Hz	
13	n 1404 Hz	
14	n 1556 Hz	
15	t 1564 Hz	

Abb. 9.5.c. Charakteristische Betriebschwingungen einer Violine in der Nähe von Frequenzen, bei denen Maxima in der Admittanz einer anderen Violine auftreten.

Dies gilt auch für die übrigen Maxima und Schwingungen. Je größer die Frequenz wird, desto weniger verlässlich ist die Zuordnung. Ein Maximum (Nr. 12) bildet sich in der Admittanz am bassseitigen Ende besonders stark aus. Der Steg reagiert sehr schwingfreudig, wenn er mit etwa 1150 Hz, d.h. in der Umgebung der Note d^5 , angeregt wird. In Abb. 9.5.c ist als zugehörig eine Schwingung vorgeschlagen, die sich sowohl tangential als auch normal zur Decke anregen lässt. Die unteren äußeren Teile der Decke schwingen gegenphasig zum inneren Teil, der sich wiederum in Gleichphase zum darüber liegenden Teil bewegt. Oberhalb der f -Löcher schwingen die äußeren Teile der Decke ebenfalls gegenphasig zum inneren Teil. Möglicherweise handelt es sich dabei um die A_3 -Mode, wie sie Roberts und Rossing (1998) bei 1087 Hz gefunden haben. Insgesamt betrachtet hat die Auswahl in Abb. 9.5 eine gewisse Ähnlichkeit mit derjenigen nach Abb. 3.6 bzw. 4.6, wie sie anhand der Modalanalyse getroffen wurde. Mit Ausnahme von Nr. 4, 13 und 14 sind alle Betriebsschwingungen auch Eigenmoden.

9.3. Zusammenfassende Bemerkung

Zwischen den Betriebsschwingungen einer Violine, angeregt am Steg, und der Admittanz, gemessen an ihrem Steg, muss eine Verbindung bestehen. Der Steg wird sich dann als besonders schwingfreudig erweisen, wenn die Füße besonders leicht nachgeben, da der Korpus sich in Resonanz befindet. Ergebnisse von Messungen der Schwingung und der Admittanz an ein und demselben Instrument liegen nicht vor. Ersatzweise wurde versucht, Resultate von Messungen an zwei unterschiedlichen Instrumenten miteinander zu verknüpfen. Dieser Versuch beruht auf der Hoffnung, die zwei Violinen würden sich so weit ähneln, dass die wesentlichen Schwingungen im Bereich bis 1600 Hz in vergleichbarer Form und bei vergleichbaren Frequenzen auftreten.

Die Schwingungen waren auf der Vorderseite der einen Violine bei normaler und tangentialer Anregung gemessen worden. Die Admittanz-Frequenzgänge beziehen sich auf das andere Instrument. Bei den Experimenten zur Admittanz war der Steg an beiden Enden unter einem Winkel von 30° zur Decke angeregt worden. Insbesondere bei tiefen Frequenzen gelingt die Zuordnung brauchbar. Bei hohen Frequenzen wird sie mehr oder weniger spekulativ.

Ungeachtet dieser momentanen Unzulänglichkeiten erscheint es sinnvoll, den zahlreichen Betriebsschwingungen auf diese Weise ein Gewicht zuzuweisen. Spiegelt sich eine Schwingung des Instrumentenkörpers in der Admittanz wider, kommt ihr eine musikalische Bedeutung zu. Bildet sie sich nicht in der Admittanz ab, dann kann sie durch die Saite auch nicht angeregt werden und ist demnach für die Erzeugung von Schall ohne Belang. Die Stegadmittanz gibt nicht nur Aufschluss darüber, ob eine Schwingung des Instrumentenkörpers von Bedeutung für die Funktion des Instruments ist. Sie vermittelt darüber hinaus auch ein Gefühl dafür, in welchem Maße dies der Fall ist. Wie groß die Admittanz bei der betreffenden Frequenz wird, stellt ein direktes Indiz für die musikalische Bedeutung der zugehörigen Schwingung des Instrumentenkörpers dar. Eine Ausnahme wäre lediglich dann denkbar, wenn sich in der Admittanz eine Schwingung des Steges abbilden würde, die nicht auf die Decke übertragen wird. Damit ist aber erst bei höheren Frequenzen, nicht jedoch im hier betrachteten Frequenzbereich zu rechnen. Sobald Stegadmittanz und Korpusschwingungen an ein und demselben Instrument gemessen worden sind, ist anzustreben, den Zusammengang erneut zu untersuchen.

10. ABSCHLIESSENDE DISKUSSION

Gegenstand der vorliegenden Studie ist die Violine. Selbst wenn der komplizierte Streichvorgang, mit dem der Bogen die Saite in Vibration versetzt, nicht in die Betrachtung mit einbezogen wird, erweist sich dieses Instrument aus der Sicht der Mechanik als ein hochkomplexer Schwinger. Die vierteilige Struktur (Decke, Boden, Hals, Griffbrett, Saitenhalter usw.) aus Materialien, deren Eigenschaften nur bruchstückhaft bekannt sind, wirkt mit der eingeschlossenen und der umgebenden Luft zusammen. Es erscheint deshalb naheliegend, einzelne Teile der Violine aus ihrem Zusammenhang zu reißen und isoliert zu betrachten. Da es aber wenig zielführend ist, die Schwingungen an heraus gelösten Teilen - wie freien Decken oder Böden - zu untersuchen, kommen solche Studien hier nicht in Betracht. Eine Ausnahme bilden Betrachtungen, die andere Autoren am Steg mit festgebremsten Füßen angestellt haben. Ansonsten wird Bezug ausschließlich auf Studien genommen, die an kompletten Instrumenten durchgeführt worden sind. Wenn hier von Schwingungsuntersuchungen die Rede ist, sind immer Experimente am vollständigen und spielbereiten Instrument gemeint. Numerische Simulationen, beispielsweise mit der Methode der Finiten Elemente, werden höchstens am Rande erwähnt.

Schwingungen von zwei Violinen wurden auf unterschiedliche Weise behandelt. Dabei interessierten Frequenzen ab etwa 196 Hz (leere g-Saite). An dem einen Instrument wurde flächig die Bewegung der Vorderseite gemessen, an dem anderen punktuell die Admittanz am Steg untersucht. Letztere ist von zentralem Interesse, dass sie die Übertragung der Schwingungsenergie von der Saite auf den Korpus kennzeichnet. Die „Schwingfreudigkeit“, gemessen in der Nähe der Punkte, an denen die Saiten aufliegen, wurde an zwei unterschiedlichen Stegen auf ein und demselben Instrument gemessen. Als obere Frequenzgrenze für die Messung der Oberflächenschwingung wurde 1600 Hz (Note g^3 bzw. G6), für die der Admittanz 4000 Hz (Note h^4 bzw. H7) gewählt. Obwohl Admittanz und Körperschwingungen sich auf zwei unterschiedliche Violinen beziehen, wurde abschließend versucht, Maxima der Stegadmittanz mit den Schwingungen des Instrumentenkörpers zu verknüpfen.

Die Schwingungen des Korpus des einen Instruments wurden bereits im Jahr 2000 im Rahmen einer Studienarbeit untersucht. Mit einem Laser-Scanning-Vibrometer haben Winter und Wörner unter Ausnutzung des Doppler-Effekts gemessen, wie sich die Vorderseite einer Schülervioline bewegt. Angeregt wurde das Instrument am Steg über einen Schwingerreger, der mit einem Pseudo-Rauschsignal gespeist wurde, in zwei unterschiedlichen Richtungen. Bei einer Messreihe griff der Schwingerreger senkrecht zur Decke, d.h. in Normalenrichtung, an. Dies entspricht der Richtung, in der die Saite beim *Pizzicato*-Spiel mit dem Finger gezupft wird. In der anderen Messreihe wurde der Steg von der Seite her parallel zur Decke angeregt, was dem Anstreichen der Saite mit dem Bogen nahe kommt.

Eine Gesamt-Übertragungsfunktion zeigt die gemittelte Beweglichkeit des Instruments in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Maxima geben Aufschluss darüber, bei welchen Frequenzen das Instrument auf die anregende Kraft mit besonders großen Bewegungen reagiert. Diese Maxima verwendete der Experimentator als Indikatoren für charakteristische Betriebschwingungen, die bei den charakteristischen Frequenzen auftreten. Die Untersuchungen ergaben für Anregung in Normalenrichtung zwischen 226 Hz und 1556 Hz mehr als zwanzig charakteristische Frequenzen und Formen. Eine ähnliche Anzahl von charakteristischen Betriebschwingungen ließ sich zwischen 266 Hz und 1596 Hz für tangentiale Anregung nachweisen.

Der beschriebene Auswahlprozess beinhaltet eine gewisse Willkür. Hinweise auf die wahre Bedeutung, die den auf diese Weise gewonnenen Betriebsschwingungen zukommt, lassen sich auf unterschiedliche Art gewinnen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Vibrometer-Messdaten einer Modalanalyse zu unterziehen und die Eigenschwingungen bzw. -moden zu extrahieren. Ins Deutsche übersetzt definieren Roberts und Rossing (1998) Moden folgendermaßen: „Eine Schwingungsmoden stellt die Bewegung eines linearen Systems bei einer Eigenfrequenz dar. Es sollte möglich sein, eine Schwingungsmoden an jedem Punkt der Struktur anzuregen, der kein Knoten ist und Bewegung an jedem anderen Punkt zu beobachten, der kein Knoten ist. Sie ist charakteristisch ausschließlich für die Struktur selbst (daher der Begriff „Eigenmode“) und unabhängig davon, wie sie angeregt oder beobachtet wird.“ Jede Mode ist linear unabhängig von anderen Moden („orthogonal“). Demnach ist die Mode enger definiert als die Betriebsschwingung. Dies wird nicht von allen Autoren beachtet.

Bei den eigenen Untersuchungen hat die Modalanalyse im untersuchten Frequenzbereich die Zahl der Schwingungen bei normaler Anregung auf 16 Eigenmoden und bei tangentialer Anregung auf 12 Moden reduziert. Die Eigenmoden lassen sich in der Obermenge der Betriebsschwingungen auffinden. Etwas vereinfacht kann dies so formuliert werden, dass nicht jede charakteristische Betriebsschwingung eine Eigenschwingung ist, dass sich aber jede Eigenschwingung in einer charakteristischen Betriebsschwingung abbildet. Betriebsschwingungen können Eigenmoden sein, müssen dies aber nicht. Vielmehr ist auch vorstellbar, dass sich Eigenmoden überlagern und eine Betriebsschwingung eine Folge dieser Überlagerung ist.

Die Ergebnisse der eigenen Messungen an Violinen wurden mit denen anderer Autoren verglichen. Dabei handelt es sich vorwiegend um Experimente mittels Laser-Holografie. Frühe Ergebnisse stammen von Reinicke und Cremer (1970), etwas jüngere von Roberts und Rossing (1998). Ein detaillierter Vergleich ist mit Resultaten möglich, die Fletcher und Rossing (1998) zusammen gestellt haben und die auf Experimenten von Moral und Jansson (1982) beruhen. Hinsichtlich der Schwingungsformen und -frequenzen war in einigen, erwartungsgemäß jedoch nicht in allen Fällen Übereinstimmung zu erkennen.

Insbesondere Messungen mittels Laser-Interferometrie machen es erforderlich, das Messobjekt unverrückbar zu fixieren. Zur Modalanalyse nach der Hämmerchen-Methode wird die Violine dagegen häufig sehr weich mit Gummibändern aufgehängt und damit nahezu frei gelagert. In beiden Fällen werden andere Randbedingungen geschaffen, als sie beim Spielen vorliegen. Daraus resultiert die Gefahr, dass andere Schwingungsformen bei anderen Frequenzen gemessen werden, die möglicherweise für den realen Betrieb des Instruments nicht relevant sind. Beim Cello wurden deshalb Messungen nicht nur in einem Instrumentenständer, sondern auch „*in situ*“ durchgeführt. Wie von Fleischer (2000a) geschildert, hielt eine Person das Instrument während der Messung, um dessen Kontakt mit dem Spieler so weit wie möglich nachzubilden. Bei der Violine bestand aus Zeitgründen keine Gelegenheit, Untersuchungen dieser Art und Vergleiche selbst anzustellen. Die betrachteten Instrumente waren in einem handelsüblichen Ständer oder einem speziellen Stativ gelagert.

Jedoch hat Marshall (1986a) an der Violine den Einfluss von „natürlicher“ Lagerung studiert. Er führte Modalanalysen an einem Instrument durch, welches das eine Mal weitgehend frei aufgehängt, das andere Mal von einer Person in Spielposition gehalten war. Erwartungsgemäß hat Marshall herausgefunden, dass der Kontakt mit einer Person zur Folge hat, dass sich das Instrument weniger bewegt. Die Person wirkt wie eine zusätzliche Dämpfung, was sich bei Frequenzen bis 1500 Hz in starkem Maße und bis 3000 Hz in abgeschwächter Form zeigte. Dies kann dazu führen, dass Schwingungen, die bei freier Aufhängung gefunden wurden, sich *in situ* gar nicht mehr nachweisen lassen. Erstaunlicherweise hat die Lagerungsart nach Marshall die Frequenzen nur wenig beeinflusst. Dies kann darin begründet sein, dass die Moden

niedriger Ordnungszahl, für die der größte Einfluss zu erwarten wäre, bei der Violine musikalisch keine Rolle spielen. Möglicherweise bedeutet es auch, dass eine möglichst freie Aufhängung der Violine der Lagerung im realen Spielbetrieb ziemlich nahe kommt.

Der Frage der Randbedingungen wird bei Messungen an Musikinstrumenten meist nur wenig Beachtung geschenkt. Bei tiefen Frequenzen deuten die eigenen Untersuchungen und beispielsweise die Bilder, die in Abb. 5.5 eingefügt sind, auf eine deutliche Verwandtschaft der Schwingungen einer Violine mit denen eines Balkens hin. Aus der Theorie des Biegebalkens ist bekannt, welchen immensen Einfluss die Randbedingungen auf die Frequenzen und Formen der Eigenschwingungen haben. So kann bei einem Balken die erste Eigenfrequenz bei 100 Hz liegen, wenn er an einem Ende eingespannt und am anderen frei ist. Wenn derselbe Balken an beiden Enden frei ist, tritt seine erste Eigenschwingung bei 636 Hz auf! Die Theorie lehrt, dass sogar noch größere Unterschiede möglich sind. Nicht nur die Frequenzen, sondern auch die zugehörigen Eigenformen differieren in hohem Maße. Mit zunehmender Frequenz bzw. Ordnungszahl der Eigenschwingung werden die Unterschiede zwar allmählich kleiner. Im obigen Beispiel tritt bei der dritten Eigenfrequenz aber immer noch ein Unterschied um den Faktor 1,96, also fast das Doppelte, auf.

Zeigen sich Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Schwingungsmessungen verschiedener Autoren, so sind dafür mehrere Gründe denkbar. Zunächst können unterschiedliche Lagerungsbedingungen vorgelegen haben. Die oben angestellten theoretischen Überlegungen sowie eigene Untersuchungen am Cello (Fleischer 2009a) haben gezeigt, dass im Bereich tiefer Frequenzen ein deutlicher Einfluss zu erwarten ist. Unterschiedliche Randbedingungen bei den Messungen können zu unterschiedlichen Schwingungsformen und -frequenzen führen. Weiter hat sich bei den eigenen Untersuchungen erwiesen, dass unterschiedliche Arten der Anregung ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse ergeben können. Darüber hinaus ist bei vielen Schwingungsuntersuchungen in der Literatur nicht explizit unterschieden, ob Betriebschwingungen (wie sie hier zunächst ermittelt wurden) oder Eigenmoden (wie sie erst durch die nachgeschaltete Modalanalyse identifiziert worden sind) präsentiert werden. Lediglich in einem Fall (Marshall 1995) ist eine Modalanalyse explizit beschrieben. In den übrigen Fällen ist zu vermuten, dass es sich bei den angegebenen Ergebnissen in den meisten Fällen um Betriebschwingungen handeln wird. Vergleiche von Resultaten, die auf unterschiedliche Art und Weise zustande gekommen sind, werden deshalb häufig nicht sehr viel Aussicht auf Erfolg haben.

Die Durchsicht der Literatur zeigt, dass es weit verbreitet ist, Schwingungen des Körpers von Saiteninstrumenten in Luft-, Decken- oder Korpusmoden zu unterteilen. Möglicherweise hat diese Einteilung für den Geigenbauer Sinn. Im Zusammenhang mit der Messung mechanischer Schwingungen sind diese Bezeichnungen alles andere als eindeutig. Bestenfalls können sie dazu dienen, den dominierenden Effekt zu kennzeichnen. Keinesfalls besagen sie, dass die übrigen Teile der Violine am Schwingungsgeschehen unbeteiligt wären.

Roberts und Rossing (1998), die einige Fundstellen für Schwingungsuntersuchungen an Violinen mit dem Wissensstand von 1998 angeben, haben mittels unterschiedlicher Arten der Anregung versucht, gezielt verschiedenartige Typen von Moden zu „züchten“. Schwingungen der Violine, die wesentlich von der Decke bestimmt sind, haben sie durch mechanische Anregung am Steg hervorgerufen. Um Schwingungen des Korpus zu erregen, die zu hoher Schallabstrahlung führen, haben sie vom Reziprozitätstheorem Gebrauch gemacht und die Violine mit einem Lautsprecher beschallt. Wenn sie die Bewegung von Decke und Boden mit aufgelegten Sandsäcken unterdrückt hatten, gelang es ihnen mittels Luftdruckschwankungen, die sie über einen Gummischlauch ins Inneren der Violine leiteten, Hohlraummoden zu erzeugen. Sie schreiben jedoch, dass die meisten Moden durch j e d e Art der Anregung hervorgerufen

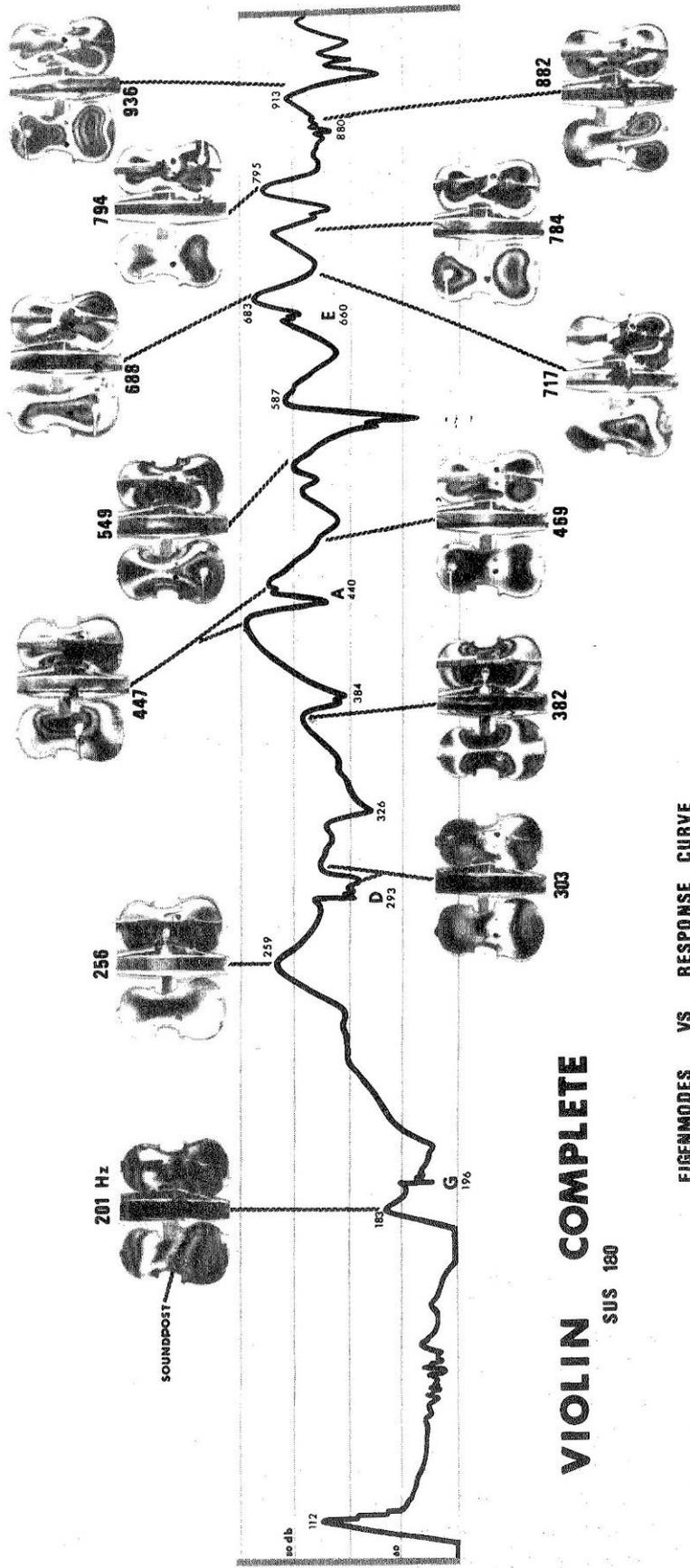


Abb. 10.1. Schwingungsbilder nach K.A. Stetson sowie Schallpegel-Frequenzgang aus dem Sammelband von Hutchins (1993; Band I S. 502).

werden konnten. Nach Meinung des Autors ist die Unterteilung in Luft-, Decken- und Korpusmoden alles andere als eindeutig und wenig hilfreich. Da zudem mehrere Klassifizierungssysteme, auch hinsichtlich der zusätzlichen Nummerierung, nebeneinander existieren, wurde von dieser Nomenklatur im vorliegenden Bericht kein Gebrauch gemacht.

Neben der Modalanalyse wurde noch eine weitere Möglichkeit dazu genutzt, Betriebsschwingungen ihre wahre Bedeutung zuzumessen. Es wurde versucht, diejenigen Schwingungen auffindig zu machen, die sich im Frequenzgang der Admittanz abbilden. Die Punkt-Admittanz kennzeichnet die Schwingfreudigkeit des Instruments an einer bestimmten Stelle in einer bestimmten Richtung. Sie wurde nahe bei den Stellen gemessen, an denen die Saiten aufliegen. Schwingerreger und Messkopf waren in einem Winkel von 30° zur Decke orientiert und wurden an das bass- und an das diskantseitige Ende des Steges angesetzt. Obwohl sich die Ergebnisse auf unterschiedliche Instrumente und Messbedingungen beziehen, erscheint es nicht aussichtslos, die zahlreichen Betriebsschwingungen auf diese Weise zu gewichten.

Diese Idee ist nicht neu. Abb. 10.1 gibt ein Ergebnis von Stetson wieder, das sich im Sammelband I von Hutchins (1993) findet. Offenbar ist die Frequenz das einzige Kriterium, das für die Zuordnung der Schwingungen des Instruments herangezogen wurde. Dies führt dazu, dass in Abb. 10.1 nicht nur Maxima, sondern auch Minima (z.B. bei 717 Hz) mit Schwingungen des Korpus in Verbindung gebracht werden. Dies wäre nur dadurch zu erklären, dass die betreffende Schwingungsform genau dort einen Knoten ausbildet, wo die Admittanz gemessen wird. Eine solche Schwingung könnte dann vom Steg her nicht angeregt werden und wäre ein Beispiel dafür, dass sich manche Korpuschwingungen zwar nachweisen lassen, für den Spielbetrieb aber letztlich ohne Belang sind. Da bei den eigenen Untersuchungen die Schwingungen über den Steg angeregt worden sind und auch die Admittanz am Steg gemessen wurde, kann dieser Fall hier nicht auftreten.

In einem ersten Versuch wurden den Kurven der Stegadmittanz zwischen 100 Hz und 1600 Hz fünfzehn Maxima entnommen und probenhalber Betriebsschwingungen zugeordnet. Bildet sich eine Schwingung des Instrumentenkörpers als lokales Maximum in der Admittanz ab, dann kommt ihr eine musikalische Bedeutung zu. Spiegelt sie sich nicht in der Admittanz wider, dann kann sie durch die Saite auch nicht angeregt werden und ist demnach für die Erzeugung von Schall ohne Bedeutung. Wie groß die Admittanz bei der betreffenden Frequenz wird, stellt ein direktes Maß für das musikalische Gewicht der zugehörigen Schwingung des Instrumentenkörpers dar. Die fünfzehn Schwingungen der Schülervioline, die den Admittanz-Maxima des Meisterinstruments zuzuordnen waren, lassen sich häufig – jedoch nicht immer – mit Eigenmoden in Verbindung bringen. Es erscheint sinnvoll und lohnend, bei zukünftigen Studien Stegadmittanz und Schwingungen ein und desselben Instruments zu messen und auf die beschriebene Weise miteinander zu verknüpfen.

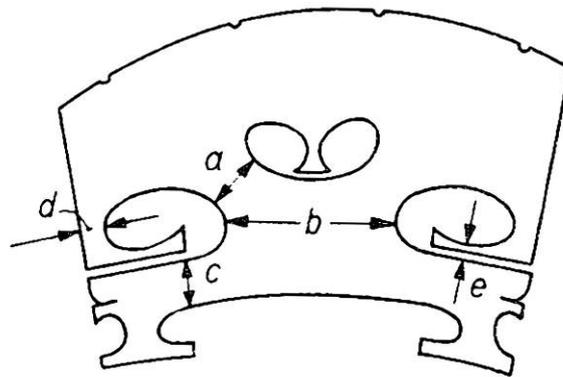
Die Punkt-Admittanz ist einfach zu messen und von großer Aussagekraft nicht nur in Hinsicht auf die Gewichtung von Korpuschwingungen. Wenn die Violine gespielt wird, streicht der Bogen die Saite und bringt sie über Reibvorgänge zum Schwingen. Die Schwingung der Saite kann sich an zwei Punkten auf den 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. Dieser letztgenannte Kontaktpunkt ist im vorliegenden Bericht von Interesse. In der Nähe der Stellen, an denen die Saiten aufliegen, wurde die mechanische Admittanz des Steges gemessen. Sehr realitätsnah und zielorientiert konnte auf diese Weise der Steg nahe den Auflagepunkten untersucht werden, an denen die Saiten in Verbindung zum Instrumentenkörper stehen. Die relevante Messgröße ist die Konduktanz, d.h. der Realteil der Admittanz. Die Software des Analysators erlaubt es nicht, den Realteil auf einer logarithmischen

(„gehörgerechten“) Skale darzustellen. Jedoch lässt sich der Betrag der Admittanz logarithmisch skalieren. Da sich gezeigt hat, dass wesentliche Charakteristiken der Konduktanz auch aus dem Frequenzgang des Betrages zu ersehen sind, wurde ersatzweise meist der Betrag diskutiert.

Die Admittanzkurven lassen darauf schließen, bei welchen Frequenzen und in welchem Ausmaß die Saiten am Steg Schwingungsenergie in den Korpus einbringen können. Im Rahmen einer Studie der verschiedenen Arbeitsgänge an Violinen haben sich Jansson *et al.* (1992) ausführlich mit der Aussagekraft von Admittanzmessungen befasst. Auf Seite 8 schreiben sie: „... *the experiments indicate that the mobility curve of a violin is informative, at least on a coarse level.*“ Dieser Einschätzung schließt sich der Autor an. Für Aussagen darüber, wie der Admittanz-Frequenzgang einer Violine aussehen soll, fehlt dem Autor die Erfahrung. Nach Jansson *et al.* ist anzustreben, dass sich in der Admittanz das Folgende wiederfinden soll: „... *a conglomerate of resonances ... in the range 400-600 Hz, a tendency to a second conglomerate 1-1.5 kHz of resonances followed by a valley, and a bridge hill 2-3 kHz.*“ In der Tat erscheint es aussichtsreich, die Admittanz (*mobility*) am Steg zu untersuchen.

Der Steg ist das wesentliche Übertragungselement zwischen Saite und Instrumentenkörper. Er leitet die Wechselkraft der Saite über die beiden Füße an die Decke weiter. Dabei hat er zunächst die Funktion eines Systems starrer Hebel. In diesem Zusammenhang spielen die äußeren Abmessungen des Steges sowie seine Ankopplung an die Decke eine Rolle. Die beiden Füße bewegen sich vor allem in Gegenphase. Das bedeutet, dass beim Anstreichen der Saite im Wesentlichen ein Kräftepaar auf die Decke des Cellos wirkt. Dem wurde bei der Messung dadurch Rechnung getragen, dass der Messkopf nicht senkrecht, sondern soweit möglich parallel zur Decke ausgerichtet wurde. Dies gelang zwar nicht vollständig, aber zumindest in einem Winkel von 30° .

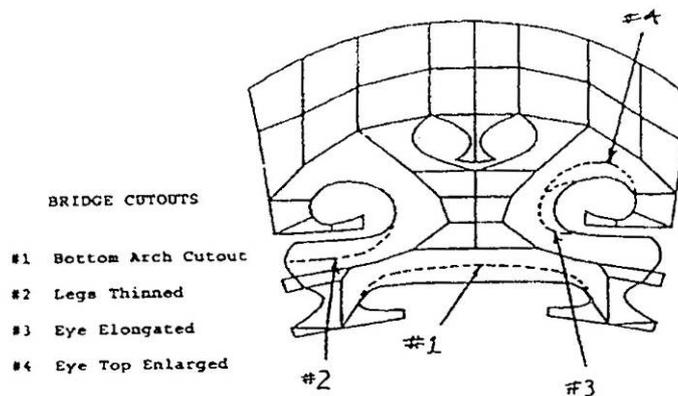
Abb. 10.2. Geometrieparameter des Steges, die besonders kritisch in Hinsicht auf das Übertragungsverhalten sind; nach Hacklinger (1978).



Darüber hinaus fungiert der Steg als ein mechanisches Filter. Im Wesentlichen liegt eine Tiefpass-Charakteristik vor. Tieffrequente Schwingungen werden praktisch unverändert von der Saite an die Decke weitergegeben. Bei höheren Frequenzen findet darüber hinaus eine Art Verstärkung statt, die mit dem „Eigenleben“ des Steges zusammenhängt. Für diesen Mechanismus ist jedes Detail der Form und des Materials des Steges von Bedeutung. Diejenigen Stellen, an denen sich nach Hacklinger (1978) Veränderungen der Geometrie besonders stark auf das Übertragungsverhalten auswirken, sind Abb. 10.2 zu entnehmen.

Rodgers (1998) hat „numerische Experimente“ durchgeführt und untersucht, in welchem Ausmaß die ersten drei Eigenfrequenzen eines Steges dadurch beeinflusst werden, dass Material

abgenommen wird. In Abb. 10.3 ist oben skizziert, wo und wie viel Stegmaterial entfernt worden ist. Die Abnahme erfolgte symmetrisch; für die Berechnung wurden festgebremste Füße angenommen. Die Auswirkungen auf die ersten drei Eigenfrequenzen des Steges sind dem unteren Teil von Abb. 10.3 zu entnehmen. Möglicherweise stellen FE-Studien dieser Art einen gangbaren Weg dar, Stege nicht nur mit Intuition, sondern ganz gezielt umzugestalten. Jedoch kann die Computer-Simulation lediglich Hinweise geben. Eine experimentelle Verifikation durch eine nachfolgende Admittanz-Messung ist unabdingbar.



Case	Frequencies (Hz.)			
	Mode	I	II	III
0. Fitted Bridge		3356	6342	8310
1. #1 Cutout		3204	6000	7432
2. #1 & #2		2915	5692	7322
3. #1 & #3		2592	5453	7290
4. #1 & #2 & #3		2289	5074	7206
5. #1 & #3 & #4		2599	5538	7048
6. All four cutouts (Per Cent of Base Case)		2303 68%	5159 81%	6923 84%

Abb. 10.3. Auswirkungen der Materialabnahme auf die ersten drei Eigenfrequenzen des Steges; nach Rodgers (1998).

Dass bei tiefen Frequenzen der Steg sich weitgehend als starrer Körper bewegt und seine Eigenschwingungen so gut wie keine Rolle spielen, zeigt sich in den Admittanzkurven von Kapitel 7. Diese stimmen für die beiden Stege bis etwas mehr als 2000 Hz weitgehend überein. Im Bereich tiefer Frequenzen ist die Admittanz ganz wesentlich durch die Schwingungen der Decke geprägt, die bei allen Messungen dieselbe war. Kleinere Abweichungen können dann auftreten, wenn die Füße von zwei Stegen auf unterschiedlichen Punkten der Decke ruhen. Insgesamt erscheinen die beobachteten Abweichungen im Bereich tiefer Frequenzen aber so gering, dass im untersuchten Bereich keine signifikanten Auswirkungen auf das Schallsignal zu erwarten sind. Dies ist in Übereinstimmung mit der Größenordnung der Ergebnisse von FE-Rechnungen, wie sie in Abb. 10.2 aufgeführt sind. Danach ist die tiefste Eigenfrequenz des Steges, die Rodgers (1998) errechnet hat, 2289 Hz.

Bei höheren Frequenzen haben die Experimente jedoch ausgeprägte Unterschiede sichtbar gemacht. In allen Messungen zeigt sich der Steg DAC wesentlich „schwingfreudiger“ als der traditionelle Steg. Die Experimente haben belegt, dass dessen Admittanz dreimal so groß sein kann wie die des traditionellen Steges. Demzufolge ist der Steg DAC in der Lage, mehr

Schwingleistung aufzunehmen als der traditionelle Steg. Dies ist die grundlegende Bedingung dafür, dass er mehr Leistung an den Korpus weiterleiten kann.

Die hohe Admittanz ist zwar keine hinreichende, aber eine notwendige Voraussetzung dafür, dass unter sonst gleichen Bedingungen mehr Schall abgestrahlt werden kann. Vereinfachend wird im Weiteren angenommen, dass in beiden Stegen gleich große Verluste auftreten. Die Messungen besagen dann, dass der musterrechtlich geschützte Steg DAC Töne ab der Note h^3 mit einem dreimal so großen Schalldruck wie der traditionelle Steg abstrahlen könnte. Im Pegelmaß ausgedrückt entspricht dies einem Zuwachs um 10 Dezibel. Bei Geigentönen in den hohen Lagen kommt dies der Empfindung der doppelten Lautstärke gleich. Für Noten in den tiefen Lagen resultiert daraus eine deutliche Anhebung höherfrequenter Spektralkomponenten.

*Abb. 10.4. Violine
von M. Klotz aus
Mittenwald.*



Abb. 10.4 zeigt eine Violine aus dem Geigenbau- und Heimatmuseum Mittenwald. Ein Instrument dieser Art besteht aus etwa einem Pfund Holz und ist in der Lage, einen voll besetzten Konzertsaal mit wohlklingendem Schall zu versorgen. Es stellt ein Wunderwerk an Leichtbau und einen äußerst gelungenen Kompromiss zwischen Stabilität und Schwingfähigkeit dar. Wenn es bereits vor zwei oder drei Jahrhunderten gelungen ist, meisterhafte Instrumente zu bauen, bedeutet dies aber nicht, dass heutzutage keine Innovationen mehr möglich wären.

Insbesondere die moderne Mess- und Analysetechnik bietet vielfältige Möglichkeiten, die Funktion des Instruments besser zu verstehen und bestimmte Aspekte messtechnisch zu untersuchen. Instrumentenbauer wären gut beraten, aus diesen Möglichkeiten Nutzen zu ziehen.

Ein Musikinstrument sollte nicht nur mit dem Bauch, sondern auch mit dem Kopf behandelt werden. Letzteres ist im vorliegenden Bericht am Beispiel der Schwingungen des Korpus und der komplexen Admittanz am Steg geschehen. Während sich die Schwingungen nur mit hohem gerätetechnischen Aufwand erfassen lassen, ist es relativ einfach, die Punkt-Admittanz zu messen. Die Admittanz ist das physikalische Maß für die Schwingfreudigkeit des Instruments am Messpunkt. Wird sie an der Auflagestelle einer Saite gemessen, kennzeichnet ihr Realteil, die Konduktanz, die mechanische Leistung, die von der Saite in das Instrument fließen kann. Zwar geht ein Teil der eingebrachten Leistung im Instrument verloren (genauer: wird in Wärme umgewandelt). Jedoch kann auch nur diejenige Leistung als Nutzschall abgestrahlt werden, die in das Instrument eingebracht worden ist. So ist die Konduktanz (oder ersatzweise: der Betrag der Admittanz) von hoher Aussagekraft. Da sie zudem nicht schwer zu messen ist, stellt sie eine sehr wirkungsvolle Kenngröße dar. Man sollte viel häufiger von ihr Gebrauch machen.

Dem Maître Luthier Hervé Raould Chouard aus Freising sei dafür gedankt, dass er den Anstoß zu wissenschaftlichen Untersuchungen an Violinstegen in den Laboren des Instituts gegeben und mit regen Interesse verfolgt hat. Herzlicher Dank gebührt auch der Ehefrau des Autors, die das Manuskript gegengelesen hat.

LITERATUR

- Beldie, I.P., Darstellung des Geigenkörpers als ein Schwingungssystem mit vier Freiheitsgraden im tiefen Frequenzbereich. Dissertation TU Berlin, Berlin 1975.
- Cremer, L., Die Physik der Geige. Hirzel, Stuttgart 1981.
- Day, R.K., Jansson, E.V., Vibration modes of neck, scroll and fingerboard. *Catgut Acoustical Society J. 1* (1991), Nr. 7 Serie II, 1 – 5.
- Dünnwald, H., Zur Messung von Geigenfrequenzgängen. *Acustica* 51 (1982), 281 – 287.
- Dünnwald, H., Deduction of quality parameters of old and new violins. *Catgut Acoustical Society J. 1* (1991), Nr. 7 Serie II, 1 - 4.
- Dünnwald, H., Detection of objective quality parameters on old and new violins. *Catgut Acoustical Society J. 2* (1992), Nr. 2 Serie II, 6 – 10.
- Durup, F., Jansson, E.V., The quest of the bridge hill. *Acustica united with acta acustica* 91 (2005), 206 - 213.
- Eggers, F., Untersuchung von Corpus-Schwingungen am Violoncello. *Acustica* 9 (1959), 453 – 465.
- Fastl, H., Zwicker, E., *Psychoacoustics*. 3. erw. Aufl. Springer, Berlin 2006.
- 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., Schwingungen eines Cellos. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/09. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2009a.
- Fleischer, H., Admittanzmessungen an einem Cello. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 3/09. Hrsg. H. Fleischer und H. Fastl, UniBw und TU München, Neubiberg 2009b.
- Fletcher, N.H., Rossing, T.D., *The physics of musical instruments*. 2. Aufl. Springer, New York 1998.
- Hacklinger, M., Violin timbre and bridge frequency response. *Acustica* 39 (1970), 323 – 330.
- Hornbostel, E.M. v.; Sachs, C., Systematik der Musikinstrumente. *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (1914), 553 - 590.
- 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.
- Hutchins, C.M., The air and wood modes of the violin. *J. Audio Eng. Soc.* 46, Nr. 9, Sept. 1998, 751 – 765.
- Jansson, E., Experiments on the violin string and bridge. *Applied Acoustics* 30 (1990), 133 - 146.
- Jansson, E., Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acustica united with acta acustica* 83 (1997), 337 - 341.

- Jansson, E., Niewczyk, B., Admittance measurements of violins with high arching. *Acustica united with acta acustica* 83 (1997), 571 - 574.
- Jansson, E., Niewczyk, B., Frydén, L., Experiments on the construction and the function of the violin. *Catgut Acoustical Society J.* 2 (1992), Nr. 2 Serie II, 6 – 10.
- Lottermoser, W., Linhardt, W., Beitrag zur akustischen Prüfung von Geigen und Bratschen. *Acustica* 7 (1957), 281 – 288.
- Marshall, K.D., Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Amer.* 77 (2) (1985), 695 – 709.
- Marshall, K.D., Modal Analysis. The musician and the vibration behavior of a violin. *Catgut Acoustical Society J.* 45 (1986a), 28 - 33.
- Marshall, K.D., Modal Analysis. A primer on theory and practice. *Catgut Acoustical Society J.* 46 (1986b), 7 - 17.
- Moral, J.A., Jansson, E.V., Eigenmodes, input admittance, and the function of the violin. *Acustica* 50 (1982), 329 – 337.
- Morset, L.H., Krokstad, A., Løkberg, O.J., A computer-based method for quality control of violins using impulse excitation. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics 1998, ASA und CAS*, 23 – 28.
- Pfaffelhuber, K., Das dynamische Verhalten der Geige an der Anstreichstelle und sein Einfluss auf das Klangsignal. *Dissertation an der TU München, München 1993.*
- Reinicke, W., Cremer, L., Application of holographic interferometry to vibrations of the bodies of string instruments. *J. Acoust. Soc. Amer.* 48 (1970), 988 – 992.
- Reinicke, W., *Dissertation am Institut für Technische Akustik, TU Berlin 1973.*
- Richardson, M.H., Is it a mode shape, or an operating deflection shape? *Sound and Vibration*, Jan. 1997, 54 - 61.
- Roberts, M., Rossing, T.D., Normal modes of vibration in violins. *Catgut Acoustical Society J.* (1998) 2, Nr. 4 Ser. II, 11 – 14.
- Rodgers, O.E., Masino, T.R., The effect of wood removal on bridge frequencies. *Catgut Acoustical Society J.* (1990) 1, Nr. 6 Ser. II, 6 – 10.
- Rodgers, O.E., A technical approach in 1998 to violin plate and corpus tuning and adjusting. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics 1998, ASA und CAS*, 53 – 57.
- Trott, W.J., The violin and its bridge. *J. Acoust. Soc. Amer.* 81 (6) (1987), 1948 – 1954.
- VIAS: <http://iwk.mdw.ac.at/news/deutsch/iwkevents/smartvias/svias1.htm> (2009).
- Winter, M., Wörner, J., Vergleich zwischen Moden und ODS. *Studienarbeit am Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2000.*
- Woodhouse, J. On the „bridge hill“ of the violin. *Acustica united with acta acustica* 91 (2005), 155 - 165.
- Ziegenhals, G., Voigtsberger, K., Der Einfluß der Stegform auf den Klang der Streichinstrumente. *Schlussbericht zum Forschungsvorhaben BfW-Nr. 54/95 aus dem Institut für Musikinstrumentenbau, Zwota 1996.*
- 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., Korpussschwingungen einer Elektrogitarre.
- Heft 1/07 Fleischer, H., Hörversuche mit Glockenklängen.
- Heft 1/08 Fleischer, H., Fell, Kessel und Gestell der Orchesterpauke.
- Heft 2/08 Fleischer, H., Physikalische und gehörbezogene Analyse von Paukenklängen.
- Heft 1/09 Fleischer, H., Mechanische Untersuchungen an Nylonsaiten für Gitarren.
- Heft 2/09 Fleischer, H., Schwingungen eines Cellos.
- Heft 3/09 Fleischer, H., Admittanzmessungen an einem Cello.

Anfragen richten Sie bitte an

Helmut Fleischer
LRT 4 UniBwM
D-85577 Neubiberg

oder

helmut.fleischer@unibw.de

