

Resonanzanalyse und Psychoakustik im Geigenbau

Martin Schleske, Geigenbaumeister und Dipl.-Physik-Ing. (FH)
Meisteratelier für Geigenbau, Georg-Hellmair-Platz 382, 86899 Landsberg am Lech, Germany

Zusammenfassung

Die Resonanzanalyse ist eine akustische Messmethode, die im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske als Diagnosewerkzeug für die Klangeinstellung von Violinen, Bratschen und Celli entwickelt wurde. Mithilfe der akustischen Resonanzanalyse wird der vom Instrument abgestrahlte Schall gehörgerecht dargestellt. Es werden das individuelle „Resonanzprofil“ des Instrumentes, sowie die Erregungsmuster des menschlichen Innenohres sichtbar gemacht.

Seit vielen Jahrzehnten bemüht sich eine kleine, internationale Gemeinschaft von Akustikforschern darum, den klanglichen Geheimnissen der Geige durch akustische Messungen auf die Spur zu kommen. Gemeinhin werden dabei die Analyseergebnisse mittels physikalischer Standardfunktionen (sog. Übertragungsfunktionen) dargestellt. Dies greift nicht tief genug. Unsere Arbeit veranschaulicht, wie physikalische Messungen auf eine musikalisch relevante Weise die künstlerische Arbeit in der Werkstattpraxis ergänzen und bereichern. Durch psychoakustische Auswertung der ‚Harmonischen Struktur‘ werden die Erregungsmuster des Innenohres sichtbar gemacht. So gelingt es uns, aus der physikalischen Analyse musikalisch relevante Informationen zu extrahieren. Klang- und Qualitätsunterschiede unterschiedlicher Instrumente werden dabei durch akustische „Landkarten“ sichtbar gemacht.

Die Pegel der Schallabstrahlung haben ihre akustische Ursache in den Schwingungsformen der Resonanzen. Während diese Schwingungsformen mithilfe der experimentellen Modalanalyse erkennbar werden (Körperschall-Analyse), wird die akustische Wirkung der Resonanzen mithilfe der Luftschall-Resonanzanalyse sichtbar gemacht. Indem also sowohl akustische *Ursache* als auch akustische *Wirkung* des Instrumentes analysiert werden, bilden Modalanalyse und Resonanzanalyse umfassende Diagnosewerkzeuge in der akustischen Geigenforschung unserer Werkstatt.

RESONANZPROFILE IM VERGLEICH

Die Übertragungsprofil wird durch Darstellung des Schalldrucks p über der anregenden Kraft F als Funktion der Frequenz dargestellt. So entsteht ein „Resonanzprofil“, das den Charakter des Instrumentes durch eine Vielzahl einzelner Resonanzspitzen sichtbar werden lässt. Abb. 1 zeigt das Resonanzprofil einer Violine von Antonio Stradivari aus dem Jahr 1721 im Vergleich mit einer zeitgenössischen Violine (Martin Schleske – Op. 371) aus dem Jahr 2025. Diese wurde in unserer Werkstatt aus einem 50.000 Jahre alten neuseeländischen Kauriholz gefertigt.

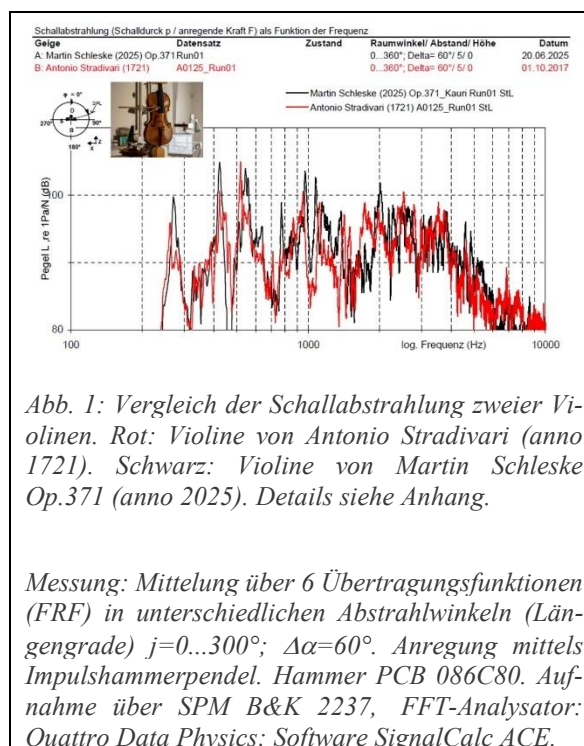


Abb. 1: Vergleich der Schallabstrahlung zweier Violinen. Rot: Violine von Antonio Stradivari (anno 1721). Schwarz: Violine von Martin Schleske Op.371 (anno 2025). Details siehe Anhang.

Messung: Mittelung über 6 Übertragungsfunktionen (FRF) in unterschiedlichen Abstrahlwinkeln (Längengrade) $j=0...300^\circ$; $\Delta\alpha=60^\circ$. Anregung mittels Impulshammerpendel. Hammer PCB 086C80. Aufnahme über SPM B&K 2237, FFT-Analysator: Quattro Data Physics; Software SignalCalc ACE.

Dank der akustisch außergewöhnlich hohen Qualität dieses Klangholzes war es uns möglich, ein modernes Instrument (schwarze Kurve) mit einer Strahlkraft herzustellen, das der Violine von Antonio Stradivari (rote Kurve) ebenbürtig und in einigen Bereichen überlegen ist. Eine hohe Resonanzstärke gilt für ein solistisches Instrument als eine notwendige und von Musikern begehrte klangliche Eigenschaft.

Eine energetische Mittelwertbildung der Übertragungsfunktion über eine gewisse Frequenzbandbreite macht die akustische Energieverteilung der Resonanzbereiche anschaulich. Abb. 2 zeigt eine entsprechende Pegelmittelung über die Einzelresonanzen in Terzbandbreiten. Dargestellt sind die Übertragungsfunktionen aus Abb. 1, jedoch durch ebenjene Mittelung geglättet. Erkennbar ist die große solistische Kraft des neu gefertigten Instrumentes aus dem Jahr 2025. Diese akustische Analyse stellt für die tägliche Arbeit der Geigenbauwerkstatt ein unbestechliches Kontrollwerkzeug dar.

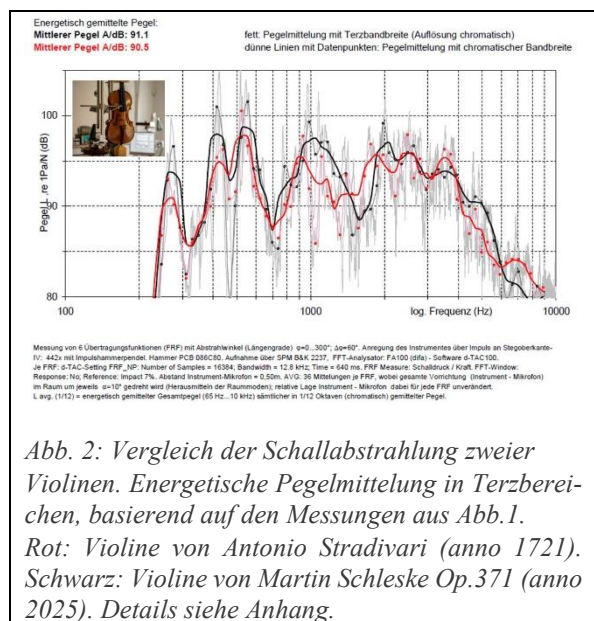


Abb. 2: Vergleich der Schallabstrahlung zweier Violinen. Energetische Pegelmittelung in Terzbereichen, basierend auf den Messungen aus Abb. 1. Rot: Violine von Antonio Stradivari (anno 1721). Schwarz: Violine von Martin Schleske Op.371 (anno 2025). Details siehe Anhang.

EU CRAFT PROJECT

Während eines zweijährigen von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsvorhabens (CRAFT Projekt 1999 – 2000) hatten wir die Möglichkeit, eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe die Schallabstrahlung von Violinen analysiert und gehörgerecht dargestellt werden kann. Ziel war es, wesentliche Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen subjektiven Empfindungsgrößen („Klang“) und objektiven Reizgrößen („Akustik“) zu erforschen. Einerseits war dafür die Untersuchung subjektiver Beurteilungskriterien nötig, die geeignet sind, den Klang einer Violine zu charakterisieren, andererseits die Erforschung messbarer akustischer Größen, die im abgestrahlten Schall enthalten sind. Im Folgenden gebe ich einen kurzen Überblick über einige Ergebnisse.

HÖRTESTS

Im Projektverlauf spielten zwei Geiger – Ingolf Turban und Michael Dinnebie – auf acht unterschiedlichen Violinen jeweils die gleichen Musikstücke, Motive und Passagen ein. Aus dem dreistündigen Tonmaterial wurden kurze Sequenzen für einen anschließenden Hörtest ausgewählt. Die untersuchten Attribute waren folgende:

- hell – dunkel
- nasal – nicht nasal
- angenehm – unangenehm
- ausgeglichen – unausgeglichen
- gute Ansprache – schlechte Ansprache
- farbenreich – monoton
- leidenschaftlich – langweilig

Der Hörversuch wurde im Paarvergleich durchgeführt, wobei die Probanden für sämtliche Paare durch Ankreuzen zu beurteilen hatten, welcher Schall dem abgefragten Attribut ihrer Ansicht nach besser entspricht.

Die acht Violinen deckten die Bandbreite unterschiedlicher Qualitäten ab: Angefangen bei Antonio Stradivari (anno 1721), Domenico Montagnana (anno 1729), Carlo Ferdinando Landolfi (anno 1750) bis hin zu einer einfachen böhmisch-sächsischen Schülergeige (um 1900).

Es zeigten sich erstaunlich hohe Konsistenzen: Die individuell vergebene Rangfolge der besser und schlechter zum jeweils abgefragten Attribut passenden Violinen wurden für alle acht Violinen teilweise sehr konsistent eingehalten. Zirkuläre Triaden zeigen dabei den Grad mangelnder Konsistenz. Eine Antwortkombination $A > B > C > A$ (sog. zirkuläre Triade) gilt als inkonsistent. Andererseits zeigte sich, dass einzelne Probanden zwar konsistent mit den abgefragten Attributen umgehen konnten, dass aber die individuelle Definition der Attribute unterschiedlich ausfiel. Mit anderen Worten: Unterschiedliche Personen beurteilten die Instrumente zwar jeweils konsistent, hielten also ihre eigene individuelle Rangfolge konsequent ein. Die durch die einzelnen Testpersonen ermittelten Rangfolgen wichen aber teilweise (je nach Attribut) deutlich voneinander ab. Weitere Hörversuche mit einer größeren Anzahl von Testpersonen sollen noch durchgeführt werden.

Im Folgenden sind die Bewertungen der acht Instrumente dargestellt:

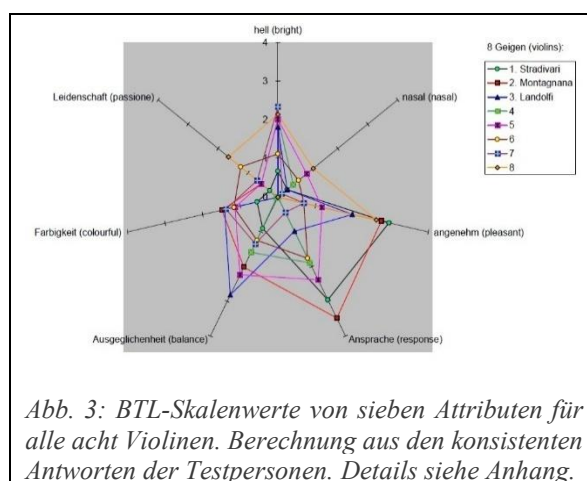


Abb. 3: BTL-Skalenwerte von sieben Attributen für alle acht Violinen. Berechnung aus den konsistenten Antworten der Testpersonen. Details siehe Anhang.

Das Netzdiagramm Abb. 3 zeigt in seinen Skalenwerten etwa, dass Violine #1 (Antonio Stradivari 1721) als nicht besonders hell klingend beurteilt wird (0.67), gleichzeitig aber als angenehm empfunden wird (2.96). Ferner wird bei dieser Violine eine gute Ansprache (2.96) wahrgenommen. Violine #7 wird demgegenüber als sehr hell klingend gewertet

(2.34) aber wenig angenehm (0.69) und mit schlechter Ansprache (0.44). Es wird ferner ersichtlich, dass sich für die Wertung des Attributes „nasal“ keine signifikanten Unterschiede ergaben.

METHODE

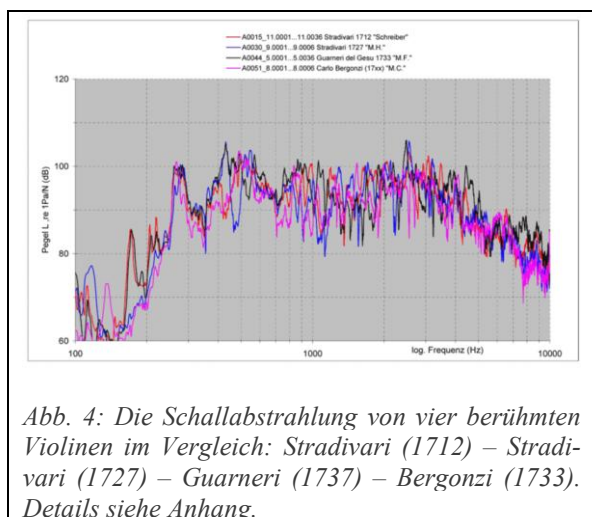
Das im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Schallabstrahlung von Violinen beruht auf folgenden Schritten:

- Räumliche Messung des abgestrahlten Schalls
- Energetische Mittelwertbildung: Resonanzprofil des Instrumentes
- Bestimmung der Pegel der Harmonischen aller spielbaren Töne
- Darstellung der Erregungsmuster der Basilar-membran im menschlichen Innenohr

Die Messung des abgestrahlten Schalls basiert auf einer zweikanaligen Fouriertransformation. Es wird das Verhältnisses von abgestrahltem Schalldruck (p) zu anregender Kraft (F) bestimmt. Die analysierten Größen werden absolut dargestellt. Beide Größen (p und F) sind frequenzabhängig. Diese Frequenzabhängigkeit wird in der Physik üblicher Weise als eine Funktion (Diagrammkurve) dargestellt. Am Verlauf der Kurve lässt sich für jede dargestellte Frequenz (x -Achse) der Übertragungsfaktor von p/F (Stärke der Schallabstrahlung) ablesen (y -Achse). Man nennt diese Kurve daher eine sog. Übertragungsfunktion (Engl: Frequency Response Function FRF).

Abb. 4 zeigt vier entsprechende FRF's berühmter Violinen altitalienischer Geigenbaukunst:

- Antonio Stradivari (anno 1712)
- Antonio Stradivari (anno 1727)
- Joseph Guarneri del Gesù (anno 1737)
- Carlo Bergonzi (anno 1733)



Sowohl Konstruktion als auch Akustik der vier dargestellten Violinen wurde im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske eingehend analysiert. Es zeigt sich, dass die Korpusresonanzen der Stradivari anno 1712 (rot) den Resonanzen der Bergonzi (violett) mehr ähneln als denen der zweiten Stradivari anno 1727 (blau). Ebenso weist das Resonanzprofil stärkere Ähnlichkeiten zwischen der späten Stradivari 1727 und der Guarneri del Gesù 1737 (schwarz) auf als zwischen den beiden Stradivaris.

Die Messung der für die Übertragungsfunktion FRF erforderlichen physikalischen Größen – anregende Kraft F und abgestrahlter Schalldruck p – erfolgt mit Hilfe der in Abb. 5 ersichtlichen Anregungsmimik: Das mit dem Schalldruckpegelmessgerät verbundene Messmikrophon ist auf einem Stativarm um das am Hals mittels Schaumstoffring eingefassten Instrument drehbar gelagert. Die Kraft wird über ein in der Modalanalyse üblichen Miniatur-Impulshämmerchen an der Stegoberkante in Bogenstrichrichtung in das Instrument eingeleitet.



Abb. 5: Anregungsmimik: Stativ mit kugelgelagertem Impulshammer-Pedel.

Die auf diese Weise gemessene und durch Fouriertransformation berechnete Übertragungsfunktion FRF wäre noch keine umfassende Darstellung der Schallabstrahlung des Instrumentes. Der Grund dafür ist die stark richtungsabhängige Abstrahlcharakteristik des Instrumentes: Eine Violine strahlt ihren Schwingungsmoden gemäß nicht in alle Raumrichtungen gleichmäßig ab. Der Kurvenverlauf der Übertragungsfunktion FRF hängt daher stark von der

Raumrichtung ab. Um ein repräsentatives Ergebnis für den tatsächlich vom Instrument abgestrahlten Schall zu bekommen, muss daher eine große Anzahl von Übertragungsfunktionen FRF in unterschiedlichen Raumrichtungen bestimmt werden. Diese Übertragungsfunktionen FRF werden dann sinnvoller Weise nicht mehr als einzelnen Kurven, sondern als farbige „Landkarte“ dargestellt.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen solche Landkarten der Schallabstrahlung dar. Hierbei wird als Farbwert die Stärke des Pegels p/F (dB) aufgetragen (rot = starker Pegel, blau = schwacher Pegel). Die x-Achse repräsentiert wieder die Frequenz. Auf der y-Achse wird nun aber der Abstrahlwinkel (Kreis um das Instrument mit Drehachse parallel zum Geigenhals; Höhe des Kreises auf Mensurhöhe) um das Instrument aufgetragen: Winkel von 0° bzw. 360° entsprechen dabei dem Normalenvektor der Decke, 180° dem Normalenvektor des Bodens.

Verfolgt man auf diesem Konturdiagramm den Farbverlauf in horizontaler Richtung, so zeigt die Farbänderung die Frequenzabhängigkeit der Schallabstrahlung in einem einzelnen Abstrahlwinkel an. In vertikaler Richtung wird durch die Farbänderungen die Richtungsabhängigkeit in einer einzelnen Frequenz erkennbar.

Bleibt also ein vertikaler Farbstreifen in seiner Farbe weitgehend unverändert, so bedeutet dies, dass bei dieser Frequenz eine richtungsunabhängige Schallabstrahlung gegeben ist. In der Physik spricht man in diesem Fall von einer Schwingungsmode mit Monopolcharakter. Dies ist grundsätzlich nur im tieffrequenten Bereich der Geige gegeben. Deutlich erkennbar ist dagegen, dass im hochfrequenten Bereich eine zunehmende Zerklüftung der Schallabstrahlung einsetzt: die Resonanzen „feuern“ hier den Schall in einzelne Raumrichtungen stärker als in andere ab. Hierin liegt die wesentliche Ursache für die „Lebendigkeit“ und „Räumlichkeit“ des Klanges. Die Zerklüftung in diesem Frequenzbereich, die sich in zahlreichen kleinen Farbinseeln zeigt, veranschaulicht, wie sehr das Instrument dem Musiker erlaubt, durch Vibrato- und Bogenstrichänderungen mit diesem räumlichen richtungsabhängigen Feuern der Resonanzen „zu spielen“.

Die Landkarten der Schallabstrahlung erlauben es, klangliche Unterschiede zwischen verschiedenen Instrumenten anschaulich zu machen. Darüber hinaus können (etwa im Fall der Restauration oder Klang-einstellung) verschiedene Zustände ein- und desselben Instrumentes miteinander verglichen werden. So lassen sich Rückschlüsse auf die klangliche Wirkung vorgenommener Veränderungen (Ausarbeitung, Stimmstockverschiebung, Stegänderungen etc.) ziehen.

Die nachfolgende Abb. 6 zeigt, dass sich aus solch einer „Landkarte der Schallabstrahlung“ zahlreiche charakteristische Merkmale ableiten lassen. Es handelt sich beim dargestellten Instrument um die Analyse eines Cellos von Domenico Montagnana aus dem Jahre 1740. Unter dem farbigen Konturdiagramm ist das Resonanzprofil der Schallabstrahlung dargestellt, wie es sich aus energetischer Mittelung um sämtliche Raumwinkel ergibt. Die Höhen der einzelnen Resonanzspitzen im Resonanzprofil sind damit ein Maß für die Stärke der Schallabstrahlung. Der jeder Resonanzspitze vertikal zugehörige Farbstreifen wiederum ist ein Maß für die räumliche Richtcharakteristik der jeweiligen Resonanz. Sowohl die Stärke der Schallabstrahlung als auch die Richtcharakteristik resultieren aus der zugehörigen Schwingungsform einer jeden Resonanz. (Über Bedeutung und Messmethode der Schwingungsformen s. a.a.O. dieser Website zum Thema Modalanalyse.)

Das Zusammenspiel der vielerlei Moden bestimmt den akustischen Charakter des Instrumentes.

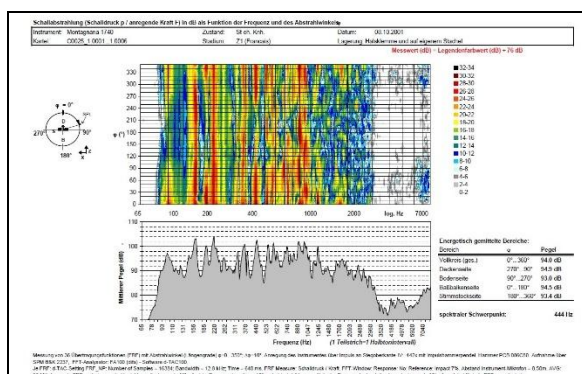


Abb. 6: **Oben:** „Landkarten der Schallabstrahlung“ eines Cellos von Domenico Montagnana (anno 1740).

Auf der x-Achse ist die Frequenz (Hz) aufgetragen, die y-Achse repräsentiert den Richtungswinkel: 0° =senkrecht zur Deckenebene (Normalenrichtung); 90° parallel zur Deckenebene und senkrecht zum Hals in Richtung Bassbalkenseite; 180° senkrecht zur Bodenebene (Normalenrichtung); 270° parallel zur Deckenebene und senkrecht zum Hals in Richtung Stimmstockseite. Die Farbskala zeigt den Schallpegel dividiert durch die anregende Kraft. Beachte: Absolutwert (re 1 Pa/N) in dB=Legendenfarb-wert (dB) + 76dB. Verfolgt man auf diesen Konturdiagramm den Farbverlauf in horizontaler Richtung, so erkennt man durch die Farbänderung die Frequenzabhängigkeit der Schallabstrahlung (bei einem einzelnen Abstrahlwinkel) an. In vertikaler Richtung wird durch die Farbänderungen die Richtungsabhängigkeit (bei einer einzelnen Frequenz) erkennbar. Details siehe Anhang.

Die akustische Schallanalyse des Montagnana-Cellos lässt folgende charakteristische Merkmale erkennbar werden:

Die Helmholtzresonanz: Der Pegel dieser tiefsten Hauptresonanz des Cellos (knapp unter 100 Hz) liegt senkrecht (0°) zur Deckenebene (max. Pegel) um knapp 10 dB über dem minimalen Pegel senkrecht (180°) zur Bodenebene.

Die Abstrahlung einer Hauptkorpusresonanz bei 217 Hz ist relativ richtungsunabhängig, während eine Korpusresonanz bei 194 Hz eine starke Richtungsabhängigkeit aufweist. Hier liegt das Maximum mit 105 dB im Bereich der Richtungswinkel $0...90^\circ$, also in Richtung der Decke auf der Bassbalkenhälfte, während das Minimum mit 77 dB bei einem Richtungswinkel von 150° in Richtung des Bodens (ebenfalls auf der Bassbalkenseite) liegt.

Im Oktavbereich zwischen 200...400 Hz weist das Cello zahlreiche wirksame und weitgehend richtungsunabhängig strahlende Resonanzen auf, erkennbar durch starke, d.h. rot-orange-farbige und gleichbleibende vertikale Streifen. Im Resonanzbereich 400–1000 Hz setzt eine zunehmende Bildung von Richtungskeulen mit richtungsabhängigen Pegelunterschieden von teilweise über 20 dB ein.

Der Resonanzbereich zwischen 1–3 kHz ist durch unzählige kleinere Pegelinseln gekennzeichnet. Aufgrund der großen Gipfelsteilheit der Resonanzspitzen, also geringer Resonanzdämpfungen, reagieren die Pegel der Obertöne, die in diesen Resonanzbereich fallen, stark auf das Vibrato des Musikers. Dies hat eine große Lebendigkeit und musikalische Formbarkeit der gespielten Töne zur Folge.

Oberhalb von 3 kHz setzt eine starke Tiefpassfilterwirkung ein. Dieser steile Pegelabfall im Bereich um 3 kHz ist klanglich wünschenswert, um einen zwar „samtigen“ – bzw. wie einige Musiker sagen „italienisch-sandigen“ –, jedoch keinesfalls zu scharfen Ton zu ermöglichen. Im energetischen Mittel liegt die Gesamtabstrahlung (Mittelung über alle Frequenzen) in Richtung der Decke (Richtungswinkel $270...90^\circ$) um knapp 2 dB über der Abstrahlung in Richtung des Bodens (Richtungswinkel $90...270^\circ$).

Für die Praxis des Geigenbaus ist es lehrreich, Instrumente unterschiedlicher empfundener Klangqualität akustisch zu vergleichen. Abb. 7 zeigt eine einfache Studentengeige (um 1900) im Vergleich mit der berühmten „Schreiber“-Stradivarius (anno 1712). Die vergleichsweise deutlich höheren Schallpegelanteile der Stradivarius im tieffrequenten Bereich (200–600 Hz) und die höheren Schallanteile der Studentengeige im Nasalbereich (1000–1600 Hz) werden sofort erkennbar.

Die räumliche Schallabstrahlung lässt sich darüber hinaus für beliebige Frequenzen einzeln darstellen. Dazu wird zweckmäßig die Form des Netzdiagrammes gewählt.

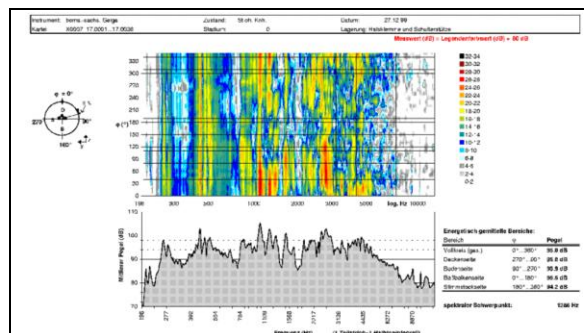


Abb. 7a: Schallabstrahlung einer einfachen Studentengeige, ca. 1900.

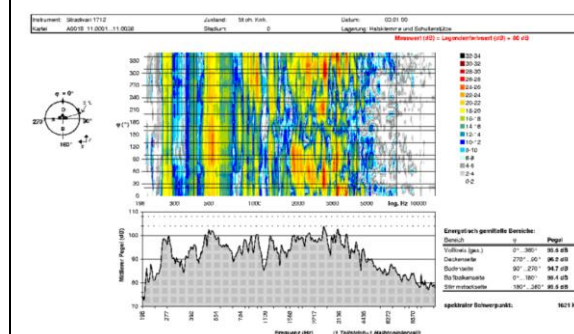


Abb. 7b: Schallabstrahlung einer Violine von Antonio Stradivari (anno 1712)

Die in den entsprechenden farbigen Landkarte der Schallabstrahlung enthaltene Information ist in Abb. 8 und 9 in Form von Richtdiagrammen (Pegel in Abhängigkeit vom Richtungswinkel) für zahlreiche Resonanzspitzen dargestellt. Auch hier werden die genannten Charakteristika – wie Richtungsmaxima und Richtkeulen – augenfällig.

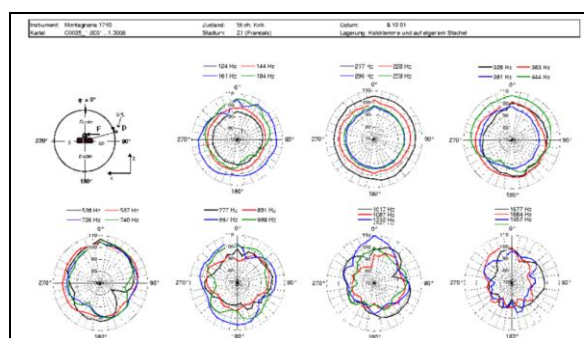


Abb. 8: Richtdiagramme der Schallabstrahlung für einige Resonanzfrequenzen eines Cellos von Domenico Montagnana (anno 1740). Jede Resonanz ist mit einer eigenen Linie repräsentiert (4 Resonanzen je Einzeldiagramm). Der radiale Abstand vom Mittelpunkt steht für den Absolutwert des Schallpegels (re 1 Pa/N) in dB. Die Winkelkoordinate des Vollkreises beschreibt den Messpunkt um das Instrument (0° = Normalenvektor der Deckenebene).

Erkennbar sind die eher kugelförmige Schallabstrahlung bei tiefen und die starke zerklüftete Abstrahlung bei höheren Frequenzen.

Die folgende Abbildung zeigt die akustische Landkarte einer Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733), ebenfalls dargestellt als entsprechendes Netzdiagramm:

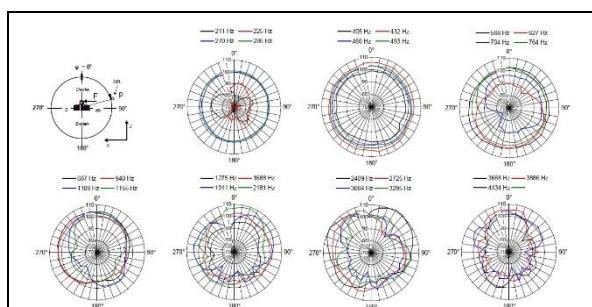


Abb. 9: Schallabstrahlung einer Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733):

Pegel aus dem Verhältnis von Schalldruck p zu anregender Kraft F in Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel (Richtcharakteristik) um das Instrument.

Dargestellt ist die Richtcharakteristik für 20 Einzelfrequenzen. Gewählt wurden die Frequenzen der Schwingungsmoden im Bereich 211–3295 Hz.

Es wird sofort erkennbar, dass die tieffrequenten Moden durch eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik gekennzeichnet sind, während die höherfrequenten Moden ab etwa 1000 Hz zunehmend mehr oder weniger starke Richtkeulen aufweisen. Diese starke Zerklüftung ist für die musikalische Lebendigkeit des Tones von wesentlicher Bedeutung.

HARMONISCHE STRUKTUR

Eine Analyse der Schallabstrahlung ist umso sinnvoller, je besser die gewählte Darstellungsform des Resonanzprofils der tatsächlichen musikalischen Situation entspricht. Aus diesem Grund wurde im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe sich das Resonanzprofil der Schallabstrahlung auf musikalisch relevante Weise darstellen lässt – die ‚Harmonische Struktur‘:

Bei der ‚Harmonischen Struktur‘ handelt es sich um eine dreidimensionale Darstellung des abgestrahlten Schalls. Aufgetragen werden dabei die Pegel p/F als Funktion der Frequenzen der musikalischen Töne und deren zugehörige erste 15 Harmonische.

Es zeigt sich, dass diese Darstellung die musikalischen Unterschiede verschiedener Violinen besser erkennbar werden lässt als durch das in der Physik üblicherweise verwendete Liniendiagramm der zweidimensionalen Übertragungsfunktion FRF.

Die nachfolgende Abb. 10 zeigt die ‚Harmonische Struktur‘ einer Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733):

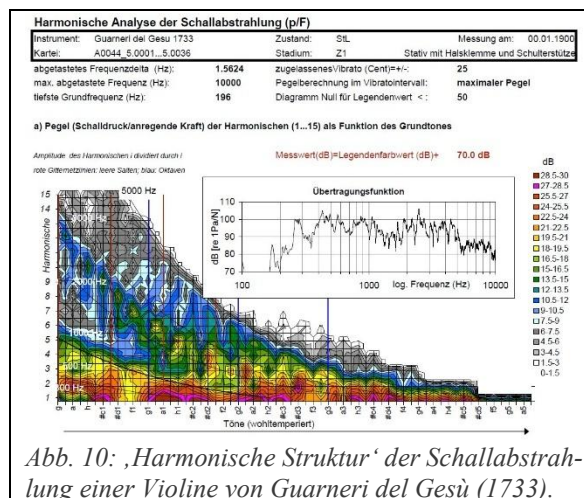


Abb. 10: ‚Harmonische Struktur‘ der Schallabstrahlung einer Violine von Guarneri del Gesù (1733).

Die ‚Harmonische Struktur‘ lässt die musikalische Relevanz der physikalischen Übertragungsfunktion FRF erkennbar werden: So taucht etwa die Resonanzspitze bei der Frequenz des Grundtons a_1 (440 Hz) gleichzeitig nochmals als Resonanzspitze beim zweiten Harmonischen des Grundtons a (220 Hz) auf (folge der gebogenen Linie!). Denn sowohl der 2. Harmonische zum Grundton a mit 220 Hz, als auch der Grundton a_1 mit 440 Hz fallen auf die Resonanzspitze der T1-Korpusresonanz der Instruments.

Ähnliches gilt für die Resonanzspitzen um 2 kHz und 2.3 kHz. Diese beiden Resonanzen liefern einerseits ihren Beitrag zur Schallabstrahlung im Bereich der hohen Grundtöne h_3 bis $\#d_4$, andererseits sind sie verantwortlich für die starken Schallpegelanteile der 2. Harmonischen der um eine Oktave tiefer liegenden musikalischen Töne und wiederum für die Schallanteile der 3. Harmonischen der um eine weitere Quinte tiefer liegenden musikalischen Töne; usw. Die grundsätzliche Bedeutung der hochfrequenten Resonanzen des Instrumentes – einerseits für die Grundtöne der hohen musikalischen Töne, andererseits für die höheren Harmonischen der tiefen musikalischen Töne – wird somit anschaulich erkennbar. Beim Spielen einer chromatischen Tonleiter findet die Darstellung der ‚Harmonischen Struktur‘ eine deutliche Entsprechung mit dem Höreindruck. So wird etwa der Helmholtzbereich der G-Saite um c_1 als deutlich sonorer empfunden als die leere G-Saite. Auch der schwach resonante Bereich um f_1 ist deutlich hörbar und in der Abbildung durch den (entsprechend der Legende) grün gefärbten Einbruch repräsentiert.

Eine alternative Darstellung besteht darin, durch Querschnitte durch die ‚Harmonischen Struktur‘ jeden einzelnen Harmonischen als Funktion des musikalischen Tones darzustellen. Entsprechend des Kraftspektrums welches durch den Bogenstrich des

Musikers erzeugt wird, wird die Amplitude des i -ten Harmonischen durch i dividiert. In Abb. 11 ist solch ein „Harmonischer Querschnitt“ der Schallabstrahlung für die ersten zehn Harmonischen am Beispiel einer Violine von Antonio Stradivari (anno 1712) dargestellt:

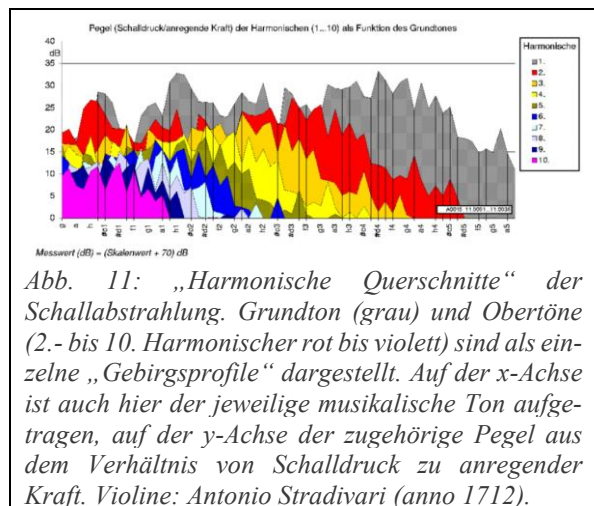


Abb. 11: „Harmonische Querschnitte“ der Schallabstrahlung. Grundton (grau) und Obertöne (2.- bis 10. Harmonischer rot bis violett) sind als einzelne „Gebirgsprofile“ dargestellt. Auf der x-Achse ist auch hier der jeweilige musikalische Ton aufgetragen, auf der y-Achse der zugehörige Pegel aus dem Verhältnis von Schalldruck zu anregender Kraft. Violine: Antonio Stradivari (anno 1712).

Von Interesse sind die „Harmonischen Querschnitte“ der Schallabstrahlung vor allem durch augenfällige Gemeinsamkeiten von Instrumenten, die als subjektiv gut klingend eingestuft werden, im Vergleich zu weniger reizvoll oder hässlich klingenden Instrumenten.

So zeigt sich etwa bei den von uns untersuchten Violinen Antonio Stradivaris ein gleichmäßig abnehmendes, weiches „Igelmuster“ der „Harmonischen Struktur“, wohingegen bei eher durchschnittlichen Schülerinstrumenten solch ein durchgängiges Muster nicht erkennbar ist. Ferner treten die Pegel der Harmonischen bei Stradivari fast überall in einer klaren, abnehmenden Ordnung auf, während bei durchschnittlichen Instrumenten häufig Harmonische einer hohen Ordnungszahl diejenigen einer geringeren Ordnungszahl in ihren Pegeln übertreffen. Beachte hier besonders den Bereich der D-Saite mit den starken Einbruch von 1. und 2. Harmonischen und einer einseitig herausragenden, dominierenden Spitze des 3. Harmonischen. Das Fehlen der unteren Harmonischen hat einen „dünnen“, „rauen“, „substanzlosen“ Klang zur Folge. Es fehlen Volumen und Wärme im Ton.

Meine Erfahrungen zeigen, dass bei häufigem Anhören von Instrumenten, deren Schallabstrahlung gleichzeitig in der „Harmonischen Struktur“ vorliegt, ein intuitiver Umgang mit diesen farbigen Landkarten entsteht. Es kann auf diese Weise gelernt werden, die harmonische Struktur des Instrumentes zu hören. Dies ist insbesondere der Fall, wenn AB-Vergleichsaufnahmen zweier verschiedener Violinen abgehört und beide farbige Landkarten der Schallabstrahlung miteinander verglichen werden.

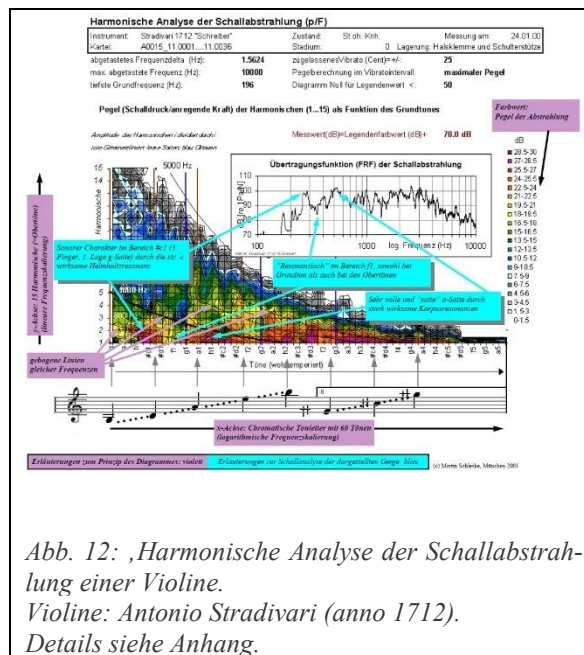


Abb. 12: „Harmonische Analyse der Schallabstrahlung einer Violine.“
Violine: Antonio Stradivari (anno 1712).
Details siehe Anhang.

PSYCHOAKUSTIK

Eine psychoakustisch relevante Schallanalyse von Streichinstrumenten hat zum Ziel, die gemessene Schallabstrahlung des Instrumentes derart darzustellen, dass das Anregungsmuster des Innenohres erkennbar wird.

Der abgestrahlte Schall wird somit nicht nur durch physikalische Reizgrößen abgebildet, sondern in einem weiteren Schritt durch psychoakustische Empfindungsgrößen dargestellt.

Dazu entwickelte das Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske eine Analysesoftware, die aus dem gemessenen Schall das spezifische Lautheitsmuster für sämtliche spielbaren Töne berechnet und darstellt. Es werden nicht nur die spezifischen Filtercharakteristika des menschlichen Ohres, sondern sämtliche Maskierungseffekte des Ohres berücksichtigt.

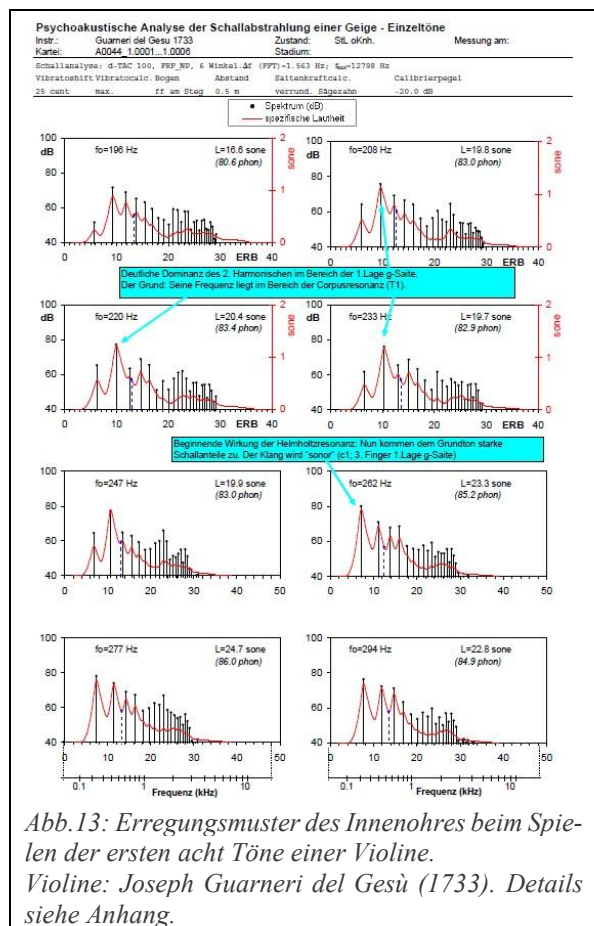


Für die Praxis des Geigenbaus hat die psychoakustische Schallanalyse folgende Bedeutung:

- Charakterisierung des Instrumentes hinsichtlich Stärken und Schwächen
- Diagnosewerkzeug bei der Klangeinstellung (Stimmstock Justage, Griffbrettastimmung, Steg etc.)
- Akustischer Vergleich zweier unterschiedlicher Instrumente
- Erweitertes Verständnis für Klangfarbenunterschiede

Im ersten Schritt wird die räumliche Schallabstrahlung des Instrumentes gemessen. Die Messung erfolgt über Impulsanregung. Über Fouriertransformation wird die Übertragungsfunktion FRF bestimmt. So wird das Resonanzprofil der Violine erkennbar.

Musikalische Relevanz gewinnt diese Messung, indem anschließend das harmonische Spektrum aller spielbaren Töne errechnet und in Form farbiger Konturdiagramms dargestellt wird. Hierbei sind die Resonanzen der Violine durch farbige Hörschichten (wie die Höhenlinien eines Gebirges) aufgetragen: Spitzen bzw. Täler weisen auf starke bzw. schwache Teiltonanteile der gespielten Töne hin. Attribute wie „hell“ oder „dunkel“ klingend, „ausgeglichen“ oder „unausgeglichen“ etc. werden so objektiv sichtbar.



Erläuterungen zu Abb. 13: Auswertung der psychoakustischen Erregungsmuster des Innenohrs am Beispiel verschiedener Einzeltöne, die aus der Übertragungsfunktion FRF der Schallabstrahlung berechnet und anschließend psychoakustisch ausgewertet wurden. Instrument: Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733). Es handelt sich um die Lautheitsdarstellung der ersten acht chromatischen Einzeltöne der G-Saite. Die schwarzen Punkte mit den senkrechten Linien repräsentieren diejenigen diskreten Pegel (dB) über der Frequenz (ERB), an denen aus der gemessenen Übertragungsfunktion FRF für den jeweils dargestellten musikalischen Ton Schallanteile berechnet wurden. Dies geschieht an den sog. harmonischen Pegel, bestehend aus den Pegelanteilen von Grundton und zugehörigen Obertönen.

Die spezifische Lautheit, die aus den diskreten Schallanteilen berechnet wurde, veranschaulicht, an welchem Ort und mit welcher Stärke die feinen Haarzellen auf der Basilarmembran des menschlichen Innenohres angeregt werden. Die Anregung der Basilarmembran ist bestimmend für die neuronale Aktivität, die mit unserm Hörempfinden korreliert. Wie man durch Vergleich der „physikalischen Information“ (schwarze Punkte) mit der „psychoakustischen Verarbeitung“ (rote Kurve) erkennt, erfolgt eine Anregung der Haarzellen des Innenohres nicht nur an den „physikalisch vorhandenen“ diskreten Einzelfrequenzen, sondern – in Form der Kurve der spezifischen Lautheit – in einem breitbandigen „weichen“ Bereich.

Der blaue Punkt mit gestrichelter Linie in Abb. 13 markiert für jeden musikalischen Ton den „spektralen Schwerpunkt“ der spezifischen Lautheit. Der spektrale Schwerpunkt ist dadurch definiert, dass die Lautheitsanteile links und rechts von ihm gleich groß sind. Seine Position auf der Frequenzachse (ERB) ist damit ein Maß für das Klangfarbengleichgewicht des jeweils dargestellten musikalischen Tones. (links = dunklerer Klang, rechts = hellerer Klang).

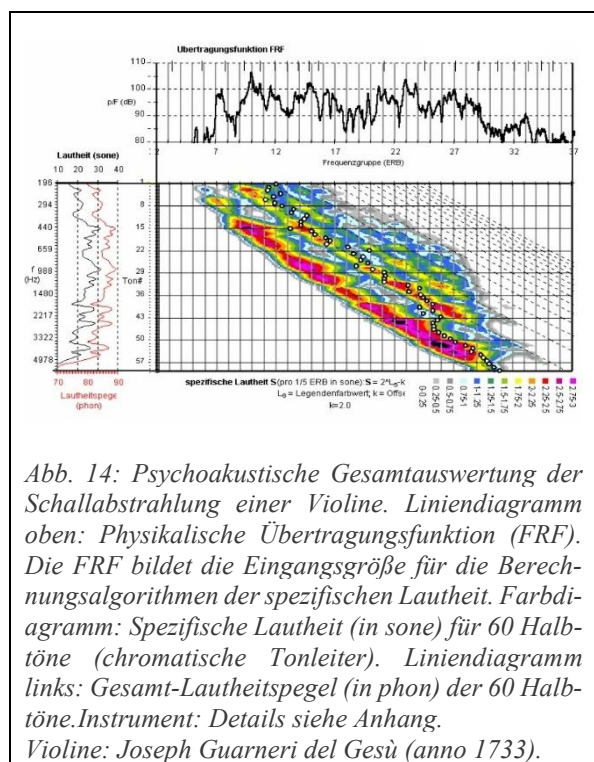
Wertet man die rot gezeichnete Kurve der spezifischen Lautheit aus, so erkennt man wesentliche Merkmale der musikalischen Töne des Instrumentes. Beispielsweise zeigt sich eine deutliche Dominanz des 2. Harmonischen (= erster Oberton über dem Grundton) im Bereich der 1. Lage bis zum h1. Der Grund: Die Frequenz der 2. Harmonischen liegt im Bereich der Korpusresonanzen. Mit dem c1 (3. Finger 1. Lage G-Saite) beginnt sich die Klangfarbe deutlich zu verändern. Es setzt die Wirkung der stark „atmenden“ Helmholtzresonanz ein. Nun kommen dem Grundton starke Schallanteile zu. Der Klang wird "sonor" und „voll“.

Mithilfe unseres Programms zur psychoakustischen Auswertung der Schallabstrahlung von Streichinstrumenten stellen wir schließlich die spezifische Lautheit sämtlicher Einzeltöne in Form eines Konturplots dar. Dabei repräsentieren die Farbwerte die

spezifische Lautheit als Funktion der Frequenzgruppen (ERB). Auf der horizontalen Achse ist die Basilarmembran aufgetragen, auf der vertikalen Achse eine chromatische Tonleiter über 60 Halbtöne. Links neben dem farbigen Konturdiagramm ist die Gesamtlautheit dieser 60 chromatischen Töne dargestellt. Sie resultiert aus dem Aufaddieren der spezifischen Lautheitswerte über alle Frequenzgruppen.

Eine derartige psychoakustische Auswertung der Schallabstrahlung einer Vielzahl verschiedener Violinen fördert bemerkenswerte Ergebnisse zutage. Besonders aufschlussreich ist hierbei, dass die Klangunterschiede zwischen verschiedenen Violinen wenig erkennbar wird, wenn die Form der Absolutdarstellung gewählt wird. Erst eine Darstellung der Lautheitsdifferenzen zweier Violinen lässt die Klangunterschiede deutlich sichtbar werden.

Die Komplettdarstellung der Lautheit sämtlicher musikalischer Töne eines Instrumentes ist in nachfolgender Abb. 14 gegeben. Es handelt sich dabei um die bereits erwähnte Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733).



Erläuterungen zu Abb. 14:

Als horizontale Achse des Liniendiagramms (oben) ist die Frequenzachse in ERB (Frequenzgruppe 2...37) dargestellt, die der örtlichen Anregung auf der Basilarmembran des menschlichen Innenohres entspricht. Auf der vertikalen Achse ist der Pegel des Verhältnisses aus Schalldruck p zu anregender Kraft F aufgetragen. Die einzelnen Resonanzen werden als Resonanzspitzen erkennbar.

Zum Farbdigramm: Die Farbskala L_s stellt den Wert der spezifischen Lautheit S (in sone) dar, dass ein Zuwachs um den Wert 1 jeweils einer Verdoppelung des Lautstärkeindrucks entspricht: $S = 2^{L_s - k}$; mit k = Diagrammoffset (große Lautheiten rot, geringe Lautheiten grau).

Die horizontale Achse (identisch mit der horizontalen Achse der Übertragungsfunktion FRF) stellt auch hier die ERB-Frequenzachse mit den Frequenzgruppen 2...37 (graue vertikale Gitternetzlinien) dar; die vertikale Achse repräsentiert die 60 musikalischen Halbtöne der chromatischen Tonleiter (Ton#); schwarze horizontale Gitternetzlinien sind in Quintabständen angeordnet: Ton#1 = leere G-Saite; Ton#8 = leere D-Saite; etc. Gestrichelte diagonale Gitternetzlinien = Position der Harmonischen. Auf der ersten (leicht gebogenen) Linie links liegen somit sämtliche erste Harmonischen (Grundtöne); auf der 2. Linie sämtliche zweite Harmonischen etc. Die weißen Punkte im Farbdigramm geben die Position des jeweiligen spektralen Schwerpunktes der musikalischen Töne an. Die Position in horizontaler Richtung ist ein Indikator für die Klangfarbe des entsprechenden musikalischen Tones (s.o.).

Zum Liniendiagramm links: Gesamt-Lautheitspegel (in phon) für die 60 musikalischen Halbtöne. Die Gesamtlautheit resultiert aus der Addition sämtlicher Teillautheiten der einzelnen Frequenzgruppen (horizontales Aufaddieren der Farbwerte). So lässt sich die „Lautheitsausgeglichenheit“ und die absolute Lautheit eines Instrumentes über den gesamten Spielbereich darstellen.

ANALYSEN DES VIOLONCELLO

Vergleicht man die verschiedenen Instrumente der Streichinstrumentenfamilie, so wird eine grundsätzliche akustische Schwäche des Cello deutlich. Verglichen mit der Violine weist das Cello auf seinen beiden unteren Saiten eine grundsätzliche Leistungsschwäche auf. Aufgrund der naturbedingten „Schwerhörigkeit“ des Menschen zu tiefen Frequenzen hin und der grundsätzlich mangelnden Resonanzstärke des Cellos in diesem tiefen Frequenzbereich erfolgt im Innenohr eine wesentlich geringere Erregung der tieferen Grundtöne als der höheren Grundtöne.

Diese Effekte sind sämtlich in die beschriebene psychoakustische Auswertung der Schallabstrahlung einbezogen. Man könnte sagen: Das klangliche „Feuerwerk“ beginnt beim Cello weiter oben. Hier ist eine grundsätzliche Problematik des Cellos auszumachen, die für den Konzertbesucher – etwa bei der Darbietung eines Cellokonzertes „gegen“ ein ganzes Orchester – unschwer hörbar wird. Selbst bei

Spitzeninstrumenten (wie dem dargestellten berühmten „Isserlis“-Montagnana) ist die erzielbare Schallabstrahlung in diesem tieffrequenten Bereich der beiden unteren Saiten noch zu gering.



Abb. 15: Violoncello von Domenico Montagnana (anno 1740).

Abb. 16 stellt die psychoakustische Analyse des genannten Cellos dar.

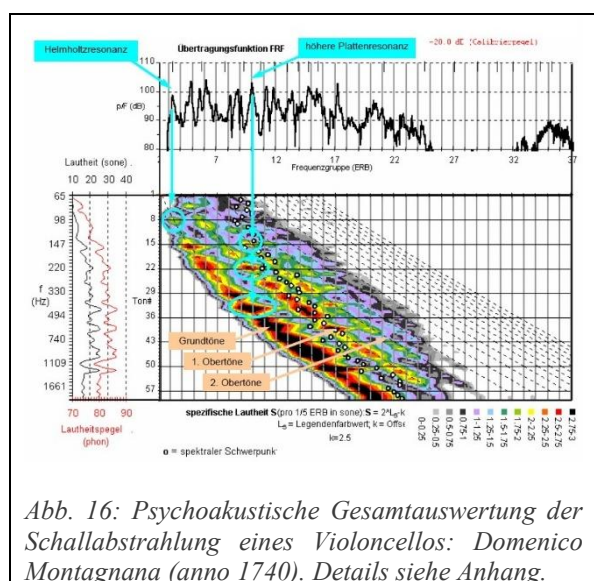


Abb. 16: Psychoakustische Gesamtauswertung der Schallabstrahlung eines Violoncellos: Domenico Montagnana (anno 1740). Details siehe Anhang.

Erläuterungen zu Abb.16:

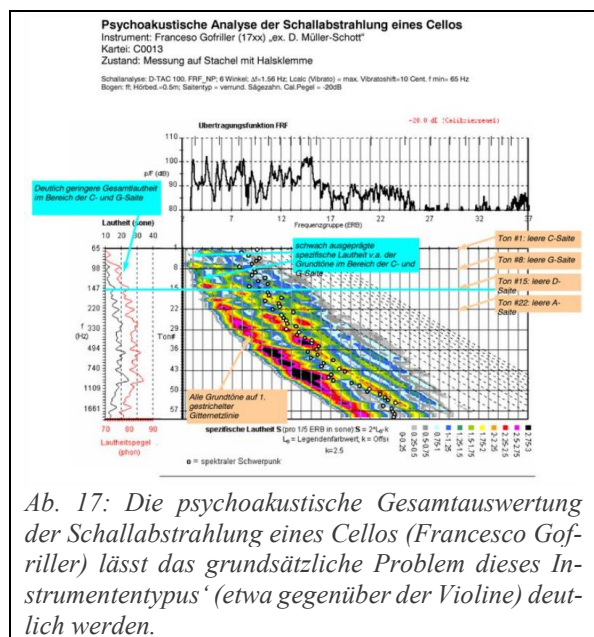
Als Farbwert wird der Lautheitspegel L_s dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Lautheitspegel L_s , Lautheit S und Offset k ist gegeben durch: $S=2^{L_s-k}$. Somit entspricht der Abstand zweier Farben im Diagramm immer demselben subjektiven Lautheitsunterschied und ein Farbwertabstand von $\Delta L_s=1$ entspricht einer Verdoppelung bzw. Halbierung der empfundenen Lautheit. In diesen Berechnungen sind die spezifischen Wahrnehmungseigenschaften des menschlichen Gehörs – Frequenzabhängigkeit der Lautstärkeempfindung und spektrale Verdeckung – berücksichtigt.

Zum dargestellten Violoncello: Die tieffrequente Helmholtzresonanz (erste Resonanzspitze der Übertragungsfunktion FRF bei 3.4 ERB, bzw. 100 Hz) erzeugt lediglich eine Erregung beim Spielen des 8. Halbtönen (leere G-Saite); siehe hellblauer Pfeil und Kreis. Dagegen ist die Wirkung höherfrequenter Resonanzen vielfältiger: So ist etwa die markante Plattenresonanz im Bereich von 10 ERB (bzw. 444 Hz) verantwortlich sowohl für die starken Lautheiten im Grundtonbereich der 31...35 Ton# als auch im Bereich der leeren a-Saite (22. Ton#) für den jeweils stark vorhandenen ersten Oberton. Gleiches gilt für den zweiten Oberton im Bereich der G-Saite (15. Ton#); siehe die drei hellblau eingekreisten Lautheitsgebiete.

Die Resonanzstärke des Violoncellos in höheren Frequenzgruppen kommt einer Vielzahl musikalischer Töne (Noten) zugute, nämlich dem Grundtonbereich hoher Noten wie auch dem Obertonbereich tiefer Noten. Entsprechendes lässt sich für alle Resonanzen des Instrumentes verfolgen, wenn man von der Resonanzspitze der Übertragungsfunktion FRF vertikal nach unten in das farbige Lautheitsdiagramm geht und dort darauf achtet, welchen der 60 Halbtönen – sei es im Grundtonbereich, also auf der ersten diagonal gestrichelten Gitternetzlinie links (s. Bezeichnung „Grundton“) oder im Obertonbereich, also auf weiter rechts liegenden diagonal gebogenen Gitternetzlinien – die ausgewählte Resonanz zugutekommt.

Die nachfolgende Abb.17 stellt die entsprechende psychoakustische Analyse eines Violoncellos von Francesco Goffriller dar.

Prinzipiell zeigt sich auch hier eindrucksvoll die genannte Schwäche des Instrumententyps Violoncello: Es besteht die grundsätzliche Problematik, dass der tieffrequente Bereich der Basilmembran wenig erregt wird. Dies liegt einerseits am Fehlen wirksamer Resonanzen in diesem Frequenzbereich, andererseits an der naturbedingten „Schwerhörigkeit“ des Menschen zu tiefen Frequenzen hin.



Wie anhand des Farbverlaufes der spezifischen Lautheit in diesem Diagramm erkennbar wird, weisen die ersten beiden Quinten (Töne #1...#15) eine geringe Lautheit auf. Dieser Spielbereich ist daher wenig grundtönig, was am Abfall der Lautheit auf der ersten (gestrichelten) Gitternetzlinie des ersten Harmonischen erkennbar ist. Auch liegt die Gesamtlautheit (s. Kurvendigramm links) um etwa 10 phon unter der ab der D-Saite auftretenden Gesamtlautheit.

Die Oberfläche des psychoakustischen Analysators zur Messung und gehörgerechten Darstellung der Schallabstrahlung von Violinen ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. In der Klangpraxis unseres Ateliers erweist sich dieses „Spezialwerkzeug“ als äußerst brauchbar zur Auswertung von Parameterstudien im Werdegang von Violinen, Bratschen und Violoncelli.

Es wurden damit zahlreiche Studien der verschiedenen Konstruktionsparameter durchgeführt, die den Klang der Violine maßgeblich bestimmen oder verändern. Diese Parameter waren:

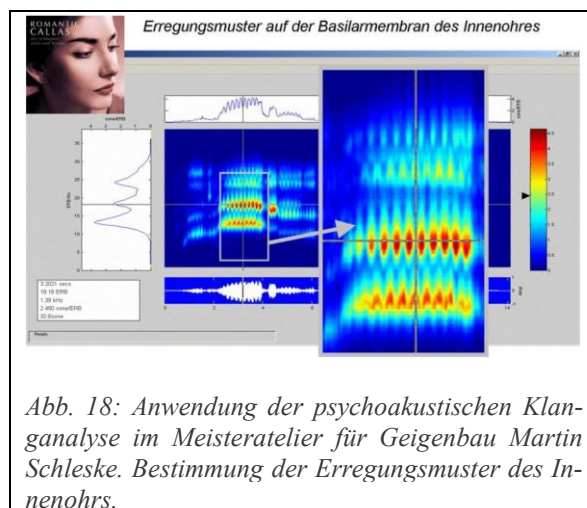
- verschiedene Stege
- unterschiedliche Saiten
- verschiedene Stimmstockstellungen
- unterschiedliche Hölzer
- unterschiedliche Griffbrett-Ausarbeitungen
- Modellunterschiede
- Variationen der Plattenausarbeitung

Die Methode der Schallanalyse eignet sich als wirksames Werkzeug zur Kontrolle eines neu entstehenden Instrumentes und als Optimierungstool, sowohl bei der Klangeinstellung wertvoller Instrumente als auch bei der Anfertigung von Klangkopien nach vorgegebenen Referenzinstrumenten.

PSYCHOAKUSTISCH BEGLEITETE PARAMETERSTUDIEN IM GEIGENBAU

Beispiele der psychoakustischen Schallanalyse von Streichinstrumenten:

- Violine von Antonio Stradivari (1712) im Vergleich mit Joseph Guarneri del Gesù (1733).
- Cello von David Tecchler (1719) im Vergleich mit Stradivari-Lott.
- Cello von Francesco Gofriller im Vergleich mit Domenico Montagnana (1740).
- Bratsche von Sannino (1906).
- Einfluss der Klangoptimierung einer Violine durch Stimmstock und Steg.
- Umfassende Klangeinstellung eines Cellos (Stradivari-Lott) durch neuen Bassbalken, Stimmstock und Steg.



Die nachfolgenden Beispiele zeigen, dass es bei Streichinstrumenten nicht um ein pauschales „gut“ oder „schlecht“ geht, sondern vielmehr um den spezifischen Charakter des Instrumentes.

Beispiel 1: Abb. 19 zeigt die Differenz der spezifischen Lautheit zweier Violinen. Dargestellt sind eine Violine von Antonio Stradivari (anno 1712), sowie eine Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733).

Beide Violinen gelten als erstklassige Repräsentanten der altitalienischen Schule. Es wird deutlich, dass die Stradivari den mittleren Bereich der Basilarmembran wesentlich stärker anregt, während die Guarneri sowohl im tieffrequenten als auch im hochfrequenten Bereich stärkere Anregungen des menschlichen Innenohres bewirkt. Es kann hier wohl von typologischen Unterschieden gesprochen werden.

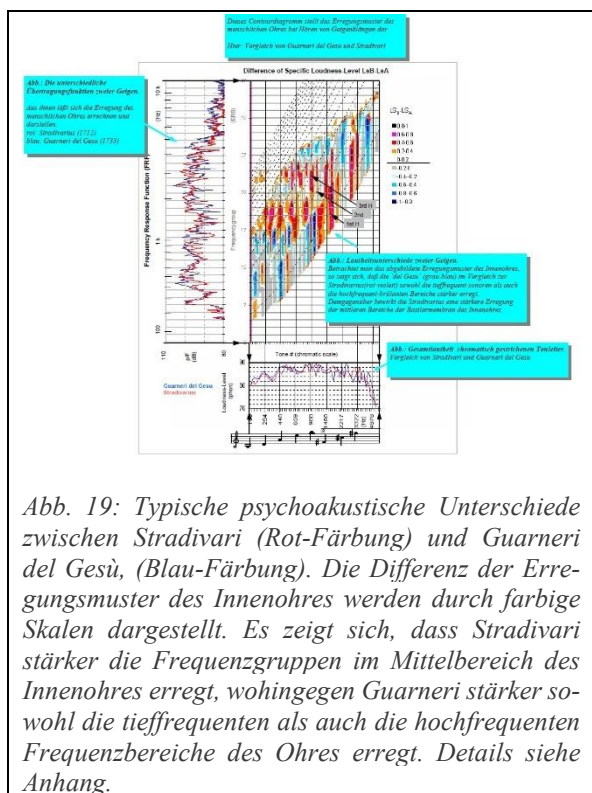


Abb. 19: Typische psychoakustische Unterschiede zwischen Stradivari (Rot-Färbung) und Guarneri del Gesù, (Blau-Färbung). Die Differenz der Erregungsmuster des Innenohres werden durch farbige Skalen dargestellt. Es zeigt sich, dass Stradivari stärker die Frequenzgruppen im Mittelbereich des Innenohres erregt, wohingegen Guarneri stärker sowohl die tieffrequenten als auch die hochfrequenten Frequenzbereiche des Ohres erregt. Details siehe Anhang.

Beispiel 2: Abb. 20 stellt eine vergleichende Schallanalyse eines Cellos von David Tecchler (Rom 1719) aus dem Bayerischen Staatsorchester mit einem Cello von Stradivari-Lott Cellos (Decke von Antonio Stradivari, Boden und Zargen von J.F. Lott) dar.

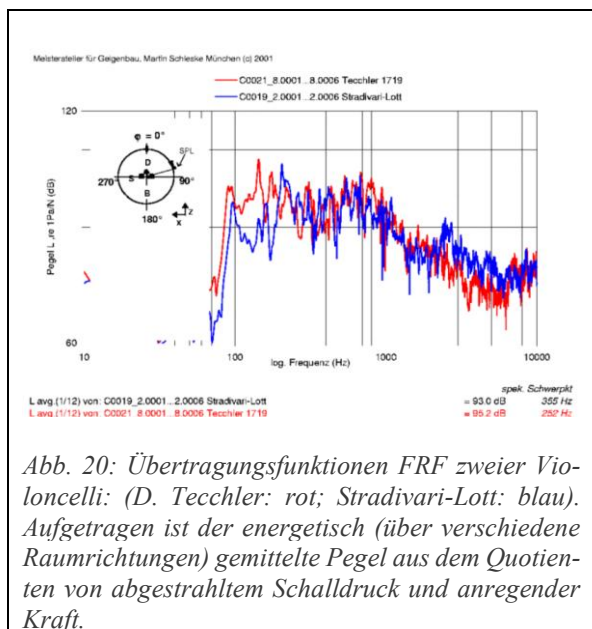


Abb. 20: Übertragungsfunktionen FRF zweier Violoncelli: (D. Tecchler: rot; Stradivari-Lott: blau). Aufgetragen ist der energetisch (über verschiedene Raumrichtungen) gemittelte Pegel aus dem Quotienten von abgestrahltem Schalldruck und anregender Kraft.

Die Abbildung zeigt zunächst die energetisch über verschiedene Raumrichtungen gemittelten Resonanzprofile der Schallabstrahlung beider Violoncelli. Es ist erkennbar, dass das Tecchler-Cello im tieffrequenten Bereich bei 156 Hz und 173 Hz zwei

starke Korpusresonanzen aufweist. Die vergleichbaren Korpusresonanzen liegen beim Stradivari-Cello mit 204 und 223 Hz bei deutlich höheren Frequenzen. Diese akustischen Unterschiede bilden sich auch im Höreindruck beider Instrumente ab: Das Tecchler-Cello gilt im Bayerischen Staatsorchester aufgrund seiner ‚Bassstärke‘ als eines der klanglich herausragenden Celli. Beachtlich sind die hohen Pegel im Grundtonbereich 100–200 Hz, die erheblich über denen des Stradivari-Cellos liegen.

Letzteres ist – bedingt durch seine anderen Bauweise – ein wesentlich ‚tenorartiger‘, stärker den Mittelbereich betonendes, Instrument. Auch dies lässt sich im Resonanzprofil quantitativ erkennen: Im Frequenzbereich zwischen 2–3 kHz, der für die Brillanz des Tones maßgeblich ist, weist das Stradivari-Cello (um bis zu 10dB) höhere Resonanzpegel auf als das Tecchler-Cello. Die Klangfarbenunterschiede werden auch durch Berechnung des sog. spektralen Schwerpunktes erkennbar: Dieser liegt bei ‚Tecchler‘ bei 252 Hz, bei ‚Stradivari-Lott‘ dagegen bei 355 Hz.

Oberhalb und unterhalb der Frequenz des spektralen Schwerpunktes sind die energetisch aufaddierten Pegelanteile des Resonanzprofils gleich groß. Je höher der spektrale Schwerpunkt liegt, desto stärkere hochfrequente Anteile werden abgestrahlt. Ein hoher spektraler Schwerpunkt weist somit auf einen eher hellen, ein tiefer spektraler Schwerpunkt auf einen dunklen Klang des Instrumentes hin. Der spektrale Schwerpunkt wird in Hz (Schwingungen pro Sekunde) angegeben.

Der energetisch gemittelte Pegel des gesamten Resonanzprofils ist mit 95.2 dB bei ‚Tecchler‘ um gut 2.0 dB größer als der des Stradivari-Lott-Cellos mit 93.0 dB.

Die unterschiedliche Bauweise ist bereits bei den Modellunterschieden augenfällig: Das Tecchler-Cello (Brustbreite im C-Bügel 240 mm) ist im Umriss wesentlich breiter als das Stradivari-Cello (211 mm).

Im Frequenzbereich des sog. a-Formant (600–900 Hz), der für einen „offenen Ton“ verantwortlich ist, liegt die Schallabstrahlung der Stradivari-Resonanzen teilweise um bis zu 6 dB (vierfache Schall-Leistung) über der des Tecchler-Cellos. Durch dieses starke „Resonanzpotential“ wird in den zugehörigen Frequenzgruppen des Innenohres teilweise eine fast doppelt so starke spezifische Lautheit hervorgerufen. Umgekehrt ist die spezifische Lautheit des Tecchler-Cellos im tieffrequenten Grundtonbereich von C-, G-, und D-Saite fast doppelt so groß wie beim Stradivari-Cello.

Dass Instrumente von Stradivari stärker den spektralen Mittelbereich betonen, fiel im Übrigen auch beim

Vergleich seiner Violinen etwa mit denen von Joseph Guarneri del Gesù auf. Es scheint ein typologisches Merkmal Stradivaris zu sein, dass seine Instrumente sehr stark die Mitte betonen.

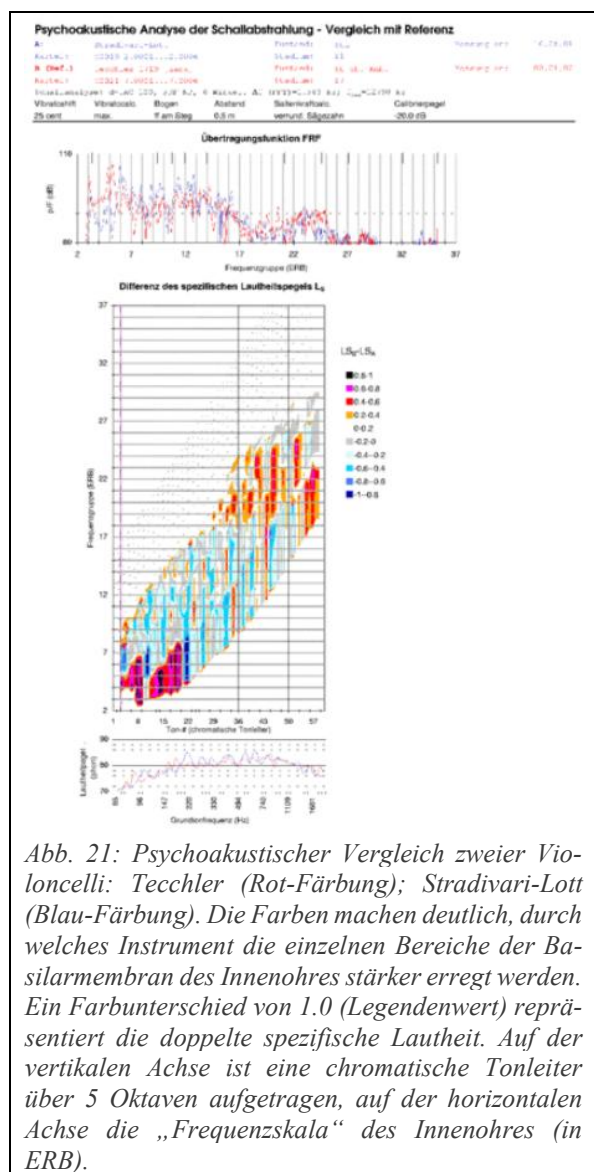


Abb. 21: Psychoakustischer Vergleich zweier Violoncelli: Tecchler (Rot-Färbung); Stradivari-Lott (Blau-Färbung). Die Farben machen deutlich, durch welches Instrument die einzelnen Bereiche der Basilarmembran des Innenohres stärker erregt werden. Ein Farbunterschied von 1.0 (Legendenwert) repräsentiert die doppelte spezifische Lautheit. Auf der vertikalen Achse ist eine chromatische Tonleiter über 5 Oktaven aufgetragen, auf der horizontalen Achse die „Frequenzskala“ des Innenohres (in ERB).

Durch Aufaddieren der spezifischen Lautheiten sämtlicher Frequenzgruppen erhält man die Gesamtlautheit des berechneten, gestrichenen Tones. Dieser Lautheitspegel in phon (der, wie auch die spezifische Lautheit die frequenzabhängige Hörempfindung des menschlichen Gehörs berücksichtigt) ist im unteren Liniendiagramm der Abbildung dargestellt. Es zeigt sich, dass trotz der oben beschriebenen Klangfarbenunterschiede beider Violoncelli, die Gesamtlautheiten beider Instrumente relativ ähnlich sind.

Die Berechnungen zeigen, dass beim chromatischen Spiel auf ein- und demselben Instrument maximale Lautheitspegel-Unterschiede von etwa 12 phon auftreten. Beiden Instrumenten gemeinsam sind die wesentlich geringeren Lautheitspegel der tiefen Töne (C- und G-Saite) im Vergleich mit den Tönen ab der

leeren D-Saite aufwärts. Diese „tiefrequente Schwäche“ ist beim Cello generell gravierender als bei der Violine. Denn die Abmessungen des Cellos sind im Vergleich zur Wellenlänge der abzustrahlenden Töne vergleichsweise kleiner als die der Violine. Erschwerend kommt hinzu, dass die menschliche Hörempfindlichkeit zu tiefen Frequenzen hin stark abnimmt.

Wie dieses Beispiel deutlich macht, geht es nicht um ein pauschales „gut“ oder „schlecht“, sondern um den spezifischen Charakter des Instrumentes.

Beispiel 3: Klangunterschiede zweier Violoncelli: Francesco Gofriller und Domenico Montagnana (1740).

Das nachfolgende Diagramm stellt die energetisch über verschiedene Raumrichtungen gemittelten Übertragungsfunktionen der Schallabstrahlung beider Celli dar. Signifikante Hauptunterschiede betreffen die beiden Hauptkorpusresonanzen (T1 und B1). Sowohl deren Eigenfrequenzen als auch die Pegel der Schallabstrahlung sind bei dem untersuchten Montagnana-Cello höher als bei dem untersuchten Gofriller-Cello. Auffällig sind ferner die deutlich höheren Pegel der Schallabstrahlung der Plattenmoden zwischen 1–2 kHz.

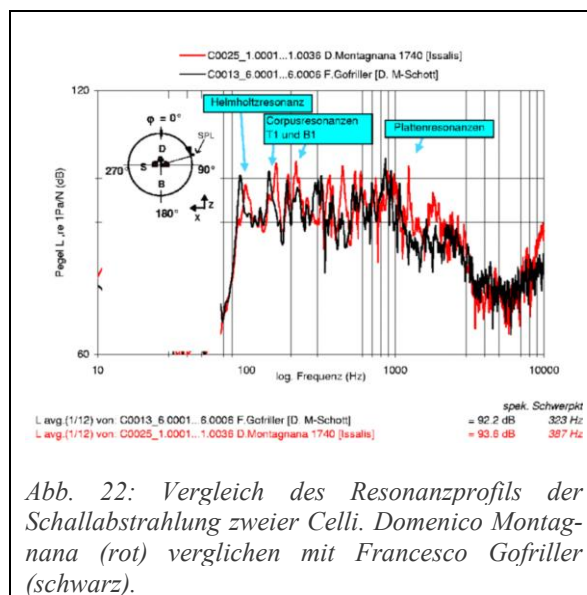


Abb. 22: Vergleich des Resonanzprofils der Schallabstrahlung zweier Celli. Domenico Montagnana (rot) verglichen mit Francesco Gofriller (schwarz).

Die hohe Aussagekraft der genannten psychoakustischen Auswertung der Schallabstrahlung wird hier besonders deutlich. Die gemessenen Resonanzprofile wurden im psychoakustischen Analyseprogramm weiterverarbeitet. Die nachfolgende Darstellung zeigt das Ergebnis.

Die unterschiedliche Wirkung auf die menschliche Hörwahrnehmung ist im farbigen Konturdiagramm Abb. 23 („Differenz des spezifischen Lautheitspegels L_p “) erkennbar. Diejenigen Bereiche, bei denen das ‚Montagnana‘-Cello eine stärkere Erregung des

Innenohres hervorruft, sind in roten Farben, diejenigen des ‚Gofriller‘-Cellos in blauen Farben dargestellt.

Es zeigt sich hier eine akustische Überlegenheit (größeres Klangvolumen, höherer Dynamikbereich) des vorliegenden Montagnana-Cellos: Fast die Gesamtfläche der Erregung ist in Rottönen gefärbt. Lediglich um die 26. Frequenzgruppe herum und im Bereich der Grundtöne einiger weniger tieffrequenter Einzeltöne ruft dieses Gofriller-Cello eine stärkere spezifische Erregung des Innenohres hervor.

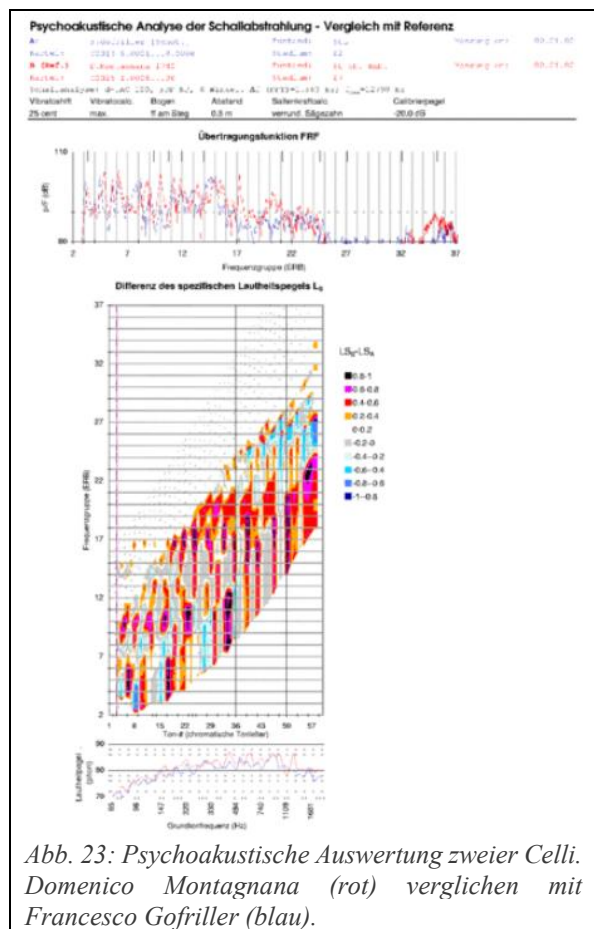


Abb. 23: Psychoakustische Auswertung zweier Celli. Domenico Montagnana (rot) verglichen mit Francesco Gofriller (blau).

Beispiel 4: Schallanalyse einer Bratsche (Sannino, Neapel anno 1906). Methode: Messung der Schallabstrahlung mittels Impulsanregung und anschließende Berechnung der Erregungsmuster des Innenohres für alle spielbaren Einzeltöne.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die spezifische Lautheit (d.h. die frequenzmäßig vom Ohr wahrgenommene Erregung) von acht verschiedenen Einzeltönen. Es zeigen sich die Klangfarbenunterschiede etwa zwischen der leeren C- und der leeren D-Saite. Aufgrund fehlender Resonanzen im tieffrequenten Bereich werden die Grundtöne der 1. Lage C-Saite praktisch nicht abgestrahlt. Infolgedessen erfolgt hier im Innenohr auch keine Erregung. Der Ton

klingt wenig „voll“ und wenig „voluminös“. Im Gegensatz dazu entfaltet die Bratsche auf der D-Saite ein großes „Volumen“. Die psychoakustische Auswertung zeigt hier eine starke Erregung der Basilarmembran des Innenohres im Bereich des Grund- und ersten Obertones.

Es zeigt sich hier eine grundsätzliche Schwäche der Bratsche: Das Verhältnis von Luftschallwellenlänge des abgestrahlten Schalls zur Größe des Korpus ist bei der Bratsche problematischer als bei der Violine. Daher fehlen im tieffrequenten Bereich der tiefsten Saite wirksam abstrahlende Resonanzen.

Wegen dieser fehlenden Resonanzen im tieffrequenten Bereich werden die Grundtöne über die gesamte 1. Lage der C-Saite fast nicht angeregt. Die starken Resonanzen im Bereich der D- und A-Saite sorgen dagegen für eine wirksame Abstrahlung von Grundton und erstem Oberton. Dies erzeugt auf der Basilarmembran breitbandige "sonore" Erregungen: Das Instrument klingt in diesem Bereich "voll" und "voluminös".

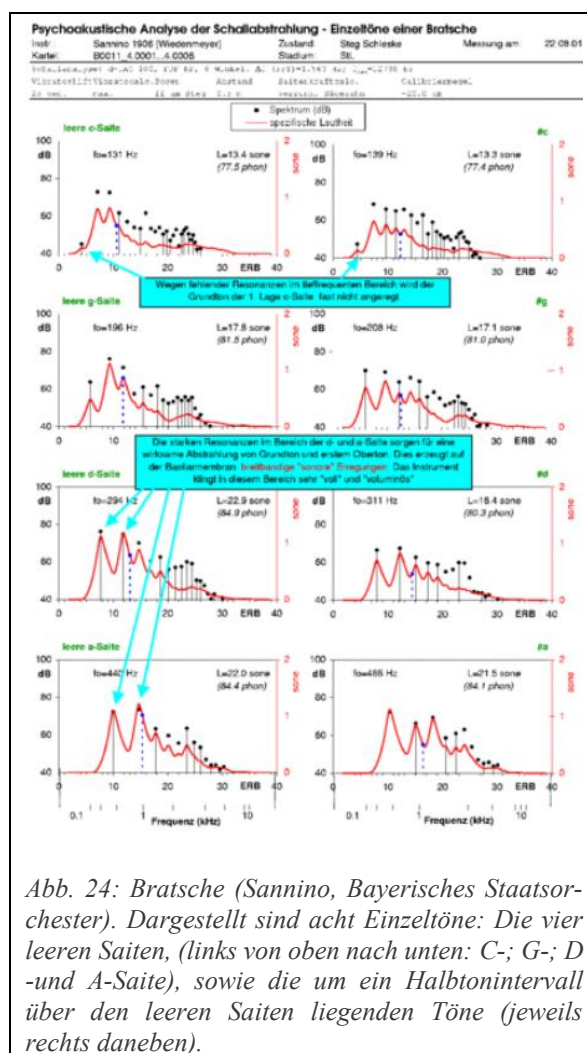


Abb. 24: Bratsche (Sannino, Bayerisches Staatsorchester). Dargestellt sind acht Einzeltöne: Die vier leeren Saiten, (links von oben nach unten: C-; G-; D- und A-Saite), sowie die um ein Halbtonintervall über den leeren Saiten liegenden Töne (jeweils rechts daneben).

Das nachfolgende Konturdiagramm Abb. 25 stellt sämtliche 60 im Spielbereich der Bratsche spielbaren Töne als spezifisches Lautheitsmuster (Erregung des Innenohres) dar. Die x-Achse repräsentiert die chromatische Tonleiter der 60 Halbtöne, die y-Achse die „Frequenzachse des Ohres“ (in Frequenzgruppen ERB).

Die Farblegende repräsentiert die Lautheitswerte. Auch hier zeigt sich deutlich das „Grundtonloch“ auf der C-Saite. Erst ab der G-Saite stehen den Grundtönen ausreichende Resonanzen im Resonanzprofil des Instrumentes zur Verfügung. Die Dominanz der Grundtöne ist auf dem unteren, farbigen nach oben gebogenen, Bereich erkennbar.

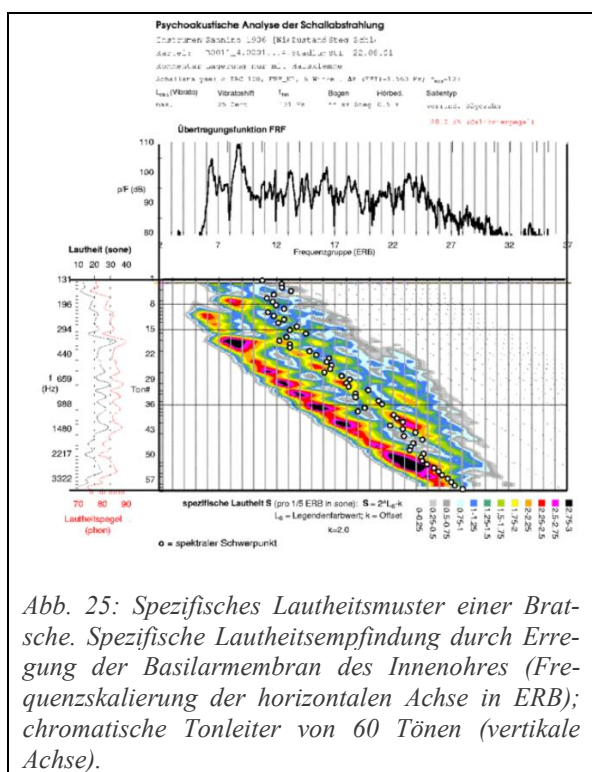


Abb. 25: Spezifisches Lautheitsmuster einer Bratsche. Spezifische Lautheitsempfindung durch Erregung der Basilarmembran des Innenohres (Frequenzskalierung der horizontalen Achse in ERB); chromatische Tonleiter von 60 Tönen (vertikale Achse).

Beispiel 5: Klangoptimierung einer Violine mittels neuem Stimmstock und Steg (Violine: Sannino).

Die psychoakustische Auswertung der Schallabstrahlung stellt für die Klangoptimierung von Geigen, Bratschen und Violoncelli ein hilfreiches Diagnose-Werkzeug in der täglichen Praxis des Geigenbaus dar.

Die Violine, deren Erregungsmuster in Abb. 26 dargestellt ist, wurde uns mit einer klanglich schwachen E-Saite zur Klangeinstellung anvertraut. Es zeigt sich, dass in diesem für die Brillanz des Klanges wichtigen Spektralbereiches die spezifische Lautheit um fast die Hälfte angehoben werden konnte.

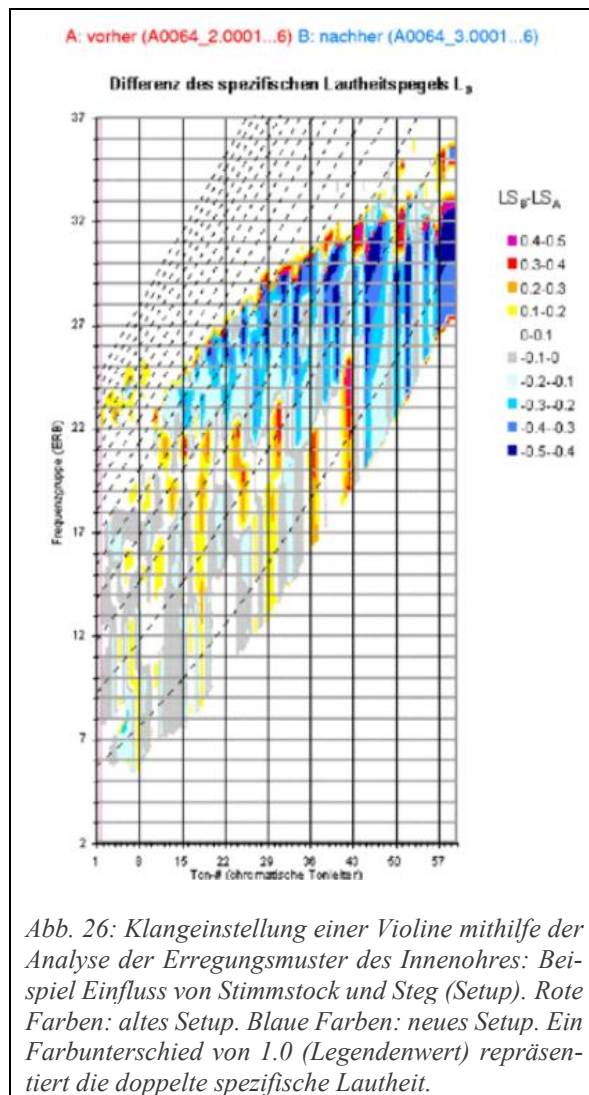


Abb. 26: Klangeinstellung einer Violine mithilfe der Analyse der Erregungsmuster des Innenohres: Beispiel Einfluss von Stimmstock und Steg (Setup). Rote Farben: altes Setup. Blaue Farben: neues Setup. Ein Farbunterschied von 1.0 (Legendenwert) repräsentiert die doppelte spezifische Lautheit.

Auch im tieffrequenten Bereich wurde durch die Pegelerhöhung der beiden Hauptkorpusresonanzen ein gewisser Zuwachs der spezifischen Lautheit erreicht.

Abb. 27 zeigt die Gesamtlautheit, die aus den spezifischen Lautheiten sämtlicher gestrichener Töne berechnet wurde. Wie die beiden Kurven (vorher-nachher) zeigen, wurde durch den neuen Steg und Stimmstock v.a. auf der E-Saite ein deutlicher Zuwachs der solistischen Kraft des Instrumentes erreicht.

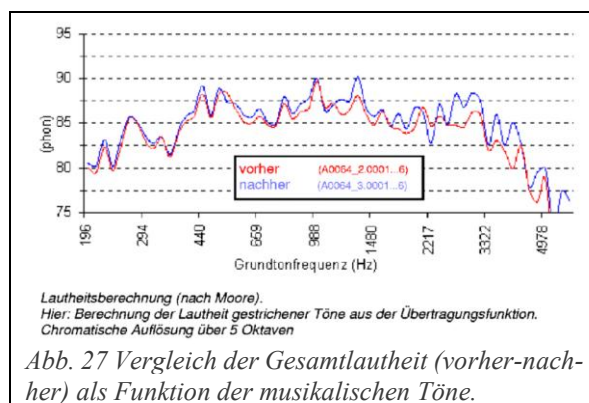


Abb. 27 Vergleich der Gesamtlautheit (vorher-nachher) als Funktion der musikalischen Töne.

Erläuterungen zu Abb. 27:

Der erzielte Zuwachs der Gesamtlautheit ist ab der zweiten Lage auf der E-Saite (Grundtonfrequenzen ab 1 kHz aufwärts) mit +1..+2 dB merklich. So wurden auch die solistischen Qualitäten des Instrumentes merklich verbessert. Der erzielte Zuwachs der Gesamtlautheit ist ab der zweiten Lage auf der e-Saite (Grundtonfrequenzen ab 1 kHz aufwärts) mit +1..+2 dB merklich. So wurden auch die solistischen Qualitäten des Instrumentes merklich verbessert.

Beispiel 6: Kontrolle bei der Anfertigung der „Klangkopie“ einer Stradivarius

Der Grundlagenartikel Martin Schleske: On Making Tonal Copies of a Violin (CAS Journal, Vol.3, Nr. 2, Series II, November 1996), der auch im Handbuch dieser Website als PDF verfügbar ist, beschreibt die Vorgehensweise der gezielten Anfertigung von Violinen, deren Resonanzeigenschaften sich an vorgegebenen Referenzinstrumenten orientieren.

Die Schallabstrahlungsanalyse ist ein wesentliches akustisches Kontrollwerkzeug im klanglichen Werdegang. Die Ergebnisse werden als abschließende Kontrolle psychoakustisch ausgewertet und durch ergänzende Klangaufnahmen dokumentiert.

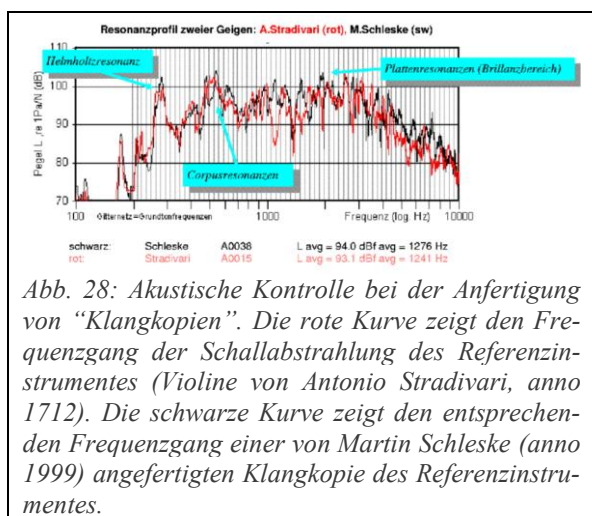


Abb. 28: Akustische Kontrolle bei der Anfertigung von „Klangkopien“. Die rote Kurve zeigt den Frequenzgang der Schallabstrahlung des Referenzinstrumentes (Violine von Antonio Stradivari, anno 1712). Die schwarze Kurve zeigt den entsprechenden Frequenzgang einer von Martin Schleske (anno 1999) angefertigten Klangkopie des Referenzinstrumentes.

Ziel bei der Anfertigung einer Klangkopie ist es, die wesentlichen Eigenschaften des individuellen Resonanzprofils im Werdegang des neu entstehenden Instrumentes nachzubilden. Ein Vergleich der beiden Frequenzgänge zeigt, dass dies für die charakteristischen Resonanzspitzen und Resonanztäler gelungen ist. Charakteristisch dabei sind Frequenzbereich und Pegel der Helmholtzresonanz, die Ausprägung der Korpusresonanzen, die Einhüllende (Gesamtverlauf) der Plattenresonanzen, sowie jeweils die Frequenzen der „Einschnitte“ zwischen diesen Resonanzgebieten. Der energetisch gemittelte Gesamtpegel der Klangkopie liegt (mit 94.0 dB) geringfügig über dem

der Stradivari (mit 93.1 dB). Ebenso liegt der spektrale Schwerpunkt (mit 1276 Hz) etwas über dem der Stradivari (mit 1241 Hz).

Beispiel 7: Klangoptimierung eines Cellos (Stradivari-Lott) durch einen neuen Bassbalken, Stimmstock und Steg. Durchgeführte Analysen:

- Modalanalysen des spielfertigen Instrumentes
- Modalanalysen der freien Decke (Stradivari) mit altem (nicht originalen) Bassbalken
- Modalanalyse der freien Decke ohne Bassbalken
- Modalanalyse der freien Decke mit neuem Bassbalken
- Analyse der Schallabstrahlung vor- und nach der Klangeinstellung

Neben kleineren Restaurationen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Einpassen eines neuen Bassbalkens
- Anfertigung eines neuen Griffbrettes
- Korrektur des Halswinkels
- Anfertigen eines neuen Stimmstocks
- Anfertigen eines neuen Steges
- Verwendung anderer Saitentypen

Das dargestellte Cello von Stradivari und J.F. Lott wurde in unserm Atelier klanglich umfassend überarbeitet. Die originale Beschaffenheit wurde dabei nicht angetastet. Es wurde ein neuer Bassbalken, Stimmstock und Steg gefertigt. Während dieser Arbeiten wurden umfassende akustische und konstruktive Analysen durchgeführt. Ein Beispiel der dafür nötigen zahlreichen Einzelmessungen ist in Abb. 30. zu sehen:

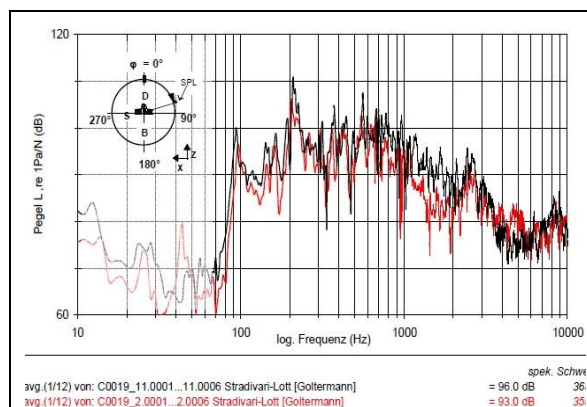


Abb. 30: Frequenzgang der Schallabstrahlung eines Violoncellos vor (rot) und nach (schwarz) einer Klangkorrektur. Aufgetragen ist der energetisch über verschiedene Raumrichtungen gemittelte Pegel aus dem Quotienten von abgestrahltem Schalldruck p und anregender Kraft F .

Es zeigt sich eine erhebliche Erhöhung der Tragfähigkeit im Saal im energetischen Mittel um +3dB.

Es zeigte sich, dass durch die vorgenommenen Arbeiten ein erhebliches zusätzliches Klangpotential dieses Cellos freigesetzt werden konnte. Abb.30 zeigt den Frequenzgang der Schallabstrahlung vor (rotes Resonanzprofil) und nach (schwarzes Resonanzprofil) der umfassenden Klangeinstellung.



Abb. 31: Akustikanalyse im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske

Vor allem die Anhebung des tieffrequenten Resonanzbereiches 100–300 Hz wirkt sich äußerst günstig auf die Grundtonstärke des tieferen Registers aus. Durch die deutliche Anhebung der Schallabstrahlung im Resonanzgebiet zwischen 1–3 kHz konnte die Brillanz des Tones bei fortissimo-Spiel nah am Steg und der ‚Fokus‘ erhöht werden.

Das Klangfarbengleichgewicht dieses Instrumentes wurde nicht verändert, d.h. der Klang wurde nicht pauschal heller oder dunkler. Dies ist – über den subjektiven Höreindruck hinaus – daran erkennbar, dass die Position des spektralen Schwerpunktes (vorher 365 Hz, nachher 355 Hz) weitgehend unverändert blieb.

LITERATUR

Zur thematischen Vertiefung der akustischen Resonanzanalyse im Geigenbau:

Martin Schleske: On Making Tonal Copies of a Violin. CAS Journal, Vol.3, Nr.2 (Series II) November 1996.

Martin Schleske: Empirical Tools in Contemporary Violin Making: Part II: Psychoacoustic Analysis and Use of Acoustical Tools. CAS Journal, Vol. 4, No.5 (Series II) November 2002.

DANK

Aufnahmen und Hörtests im Zuge des genannten EU-CRAFT Projektes wurden mit Unterstützung des Schalltechnischen Beratungsbüros Müller-BBM durchgeführt. Hier gilt mein besonderer Dank Dr. Karsten Zerbs, Dr. Otto Martner, sowie Dipl.-Phys. Paul Geißler.

Das meiner Arbeit zugrundeliegende Lautheitsmodell beruht auf den Arbeiten von Professor Brian C. J. Moore, Department of Psychology, University of Cambridge, UK.

COPYRIGHT

© Martin Schleske, Landsberg am Lech 2025.

Die hier veröffentlichten Inhalte (Texte, Bilder, Grafiken) unterliegen dem Urheberrecht. Jede Art der Verwertung bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Rechteinhabers.

ANHANG: Detaildarstellung der Abbildungen

Abb. 1

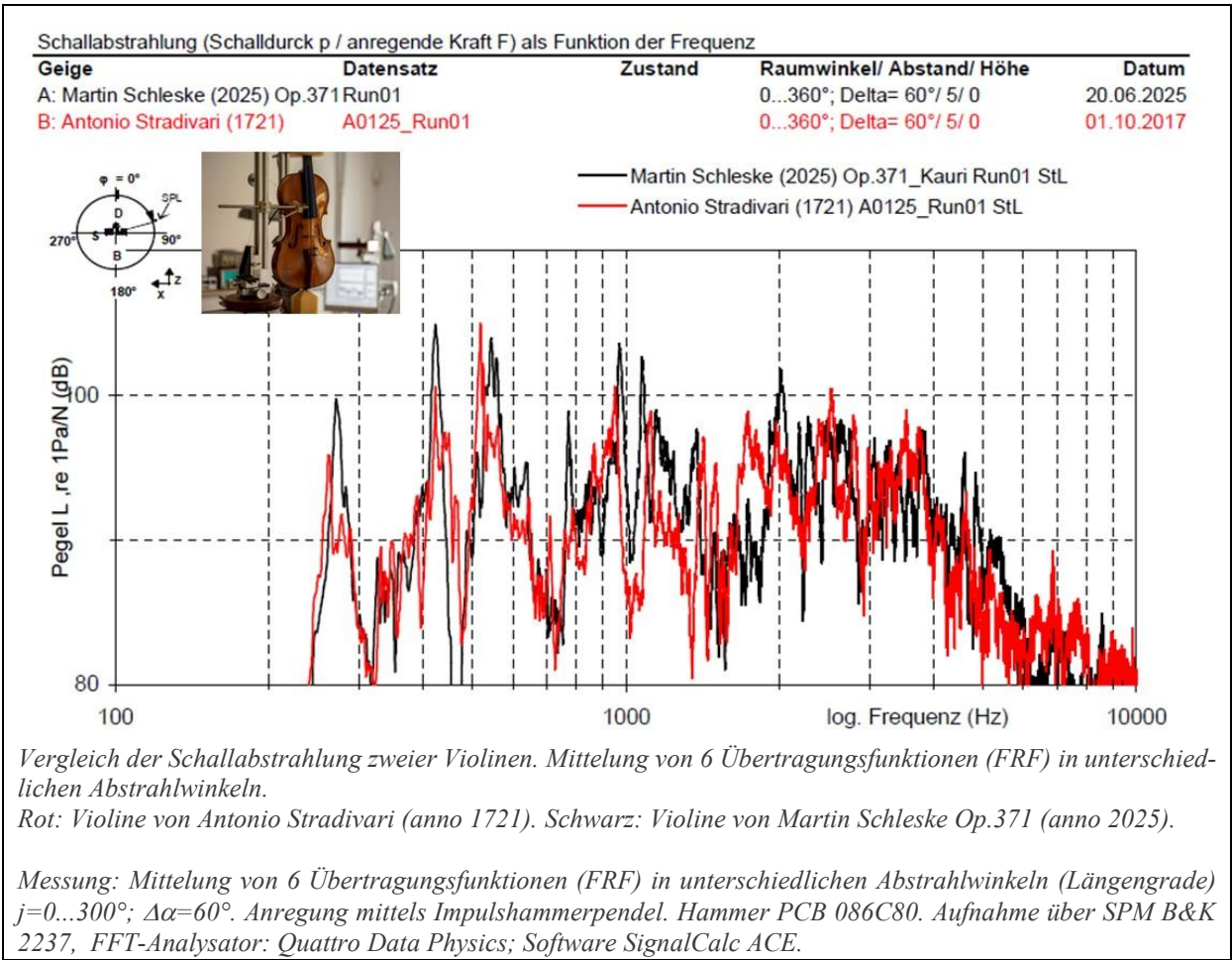


Abb. 2

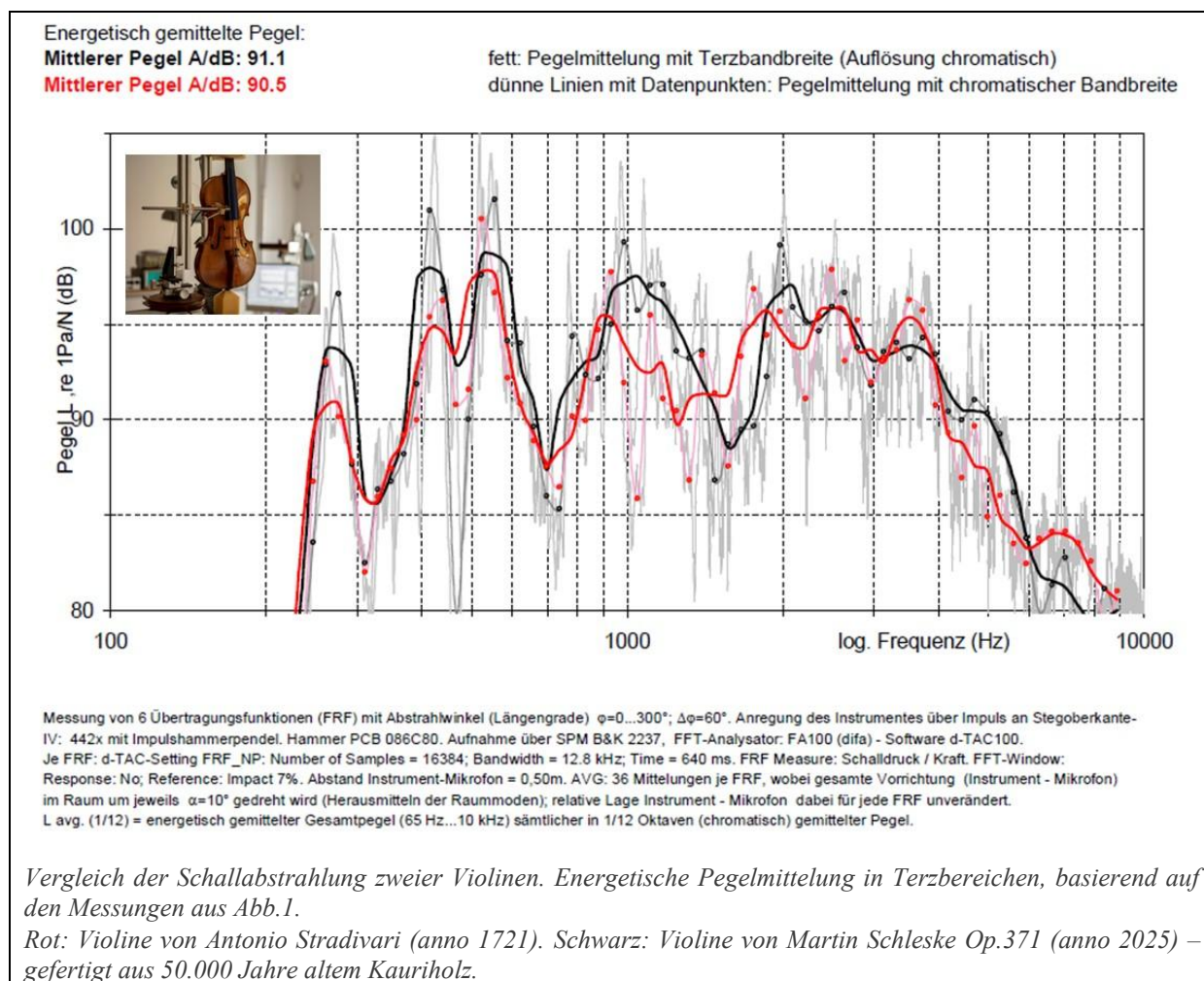


Abb. 3

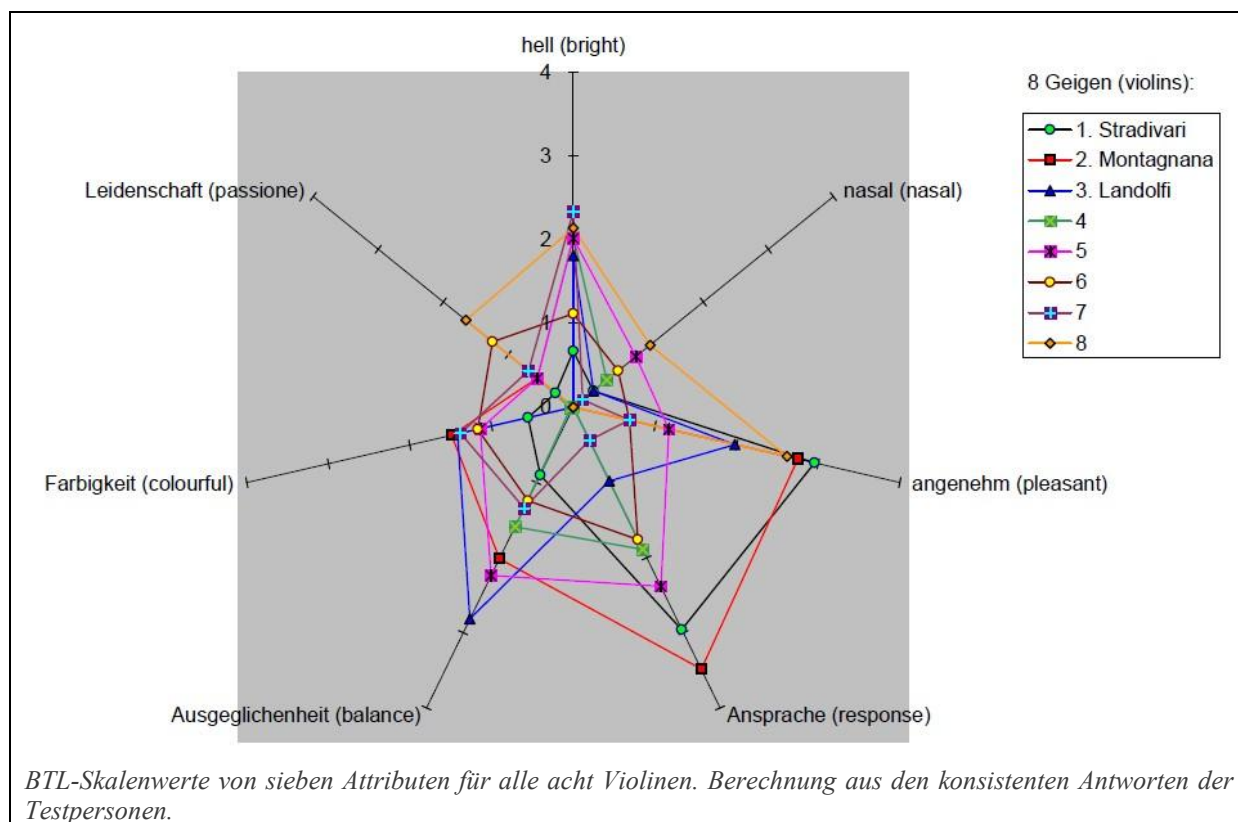


Abb. 4

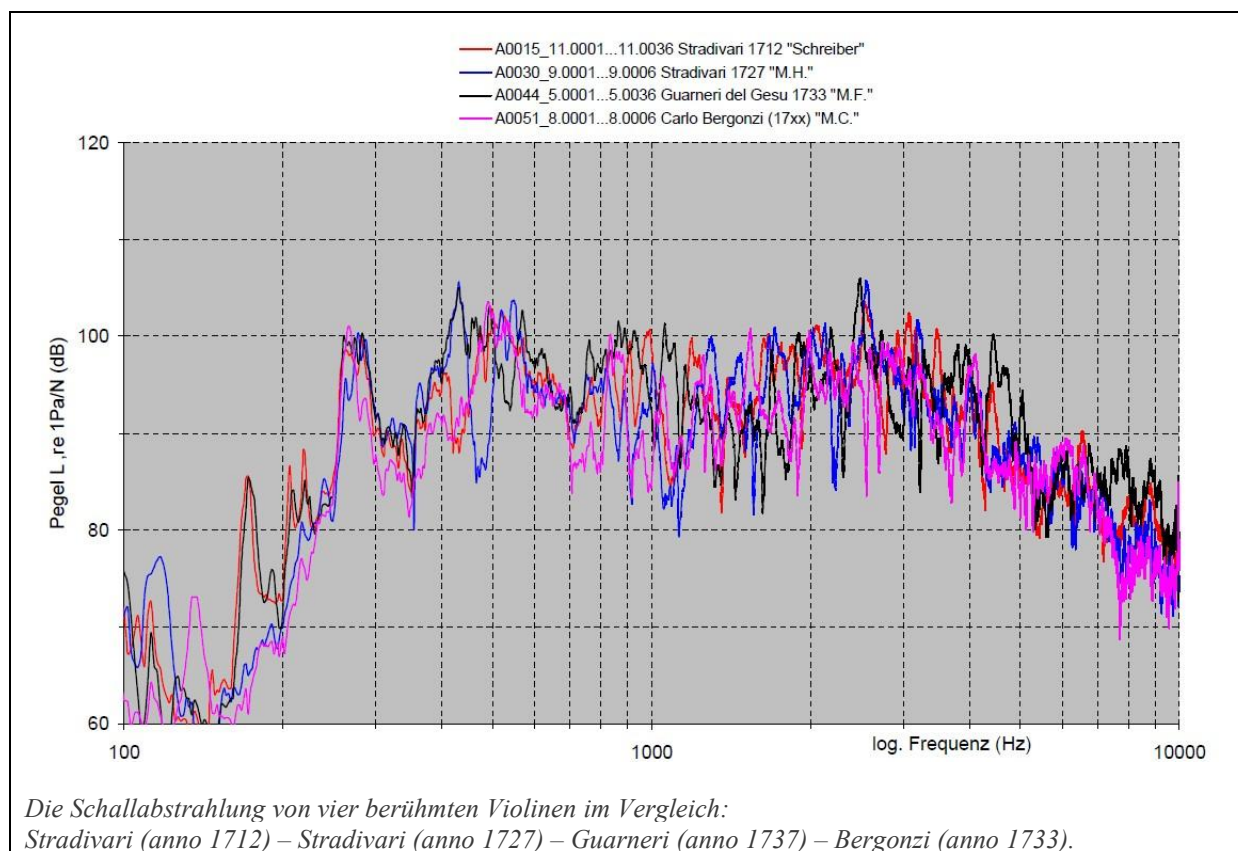


Abb. 6

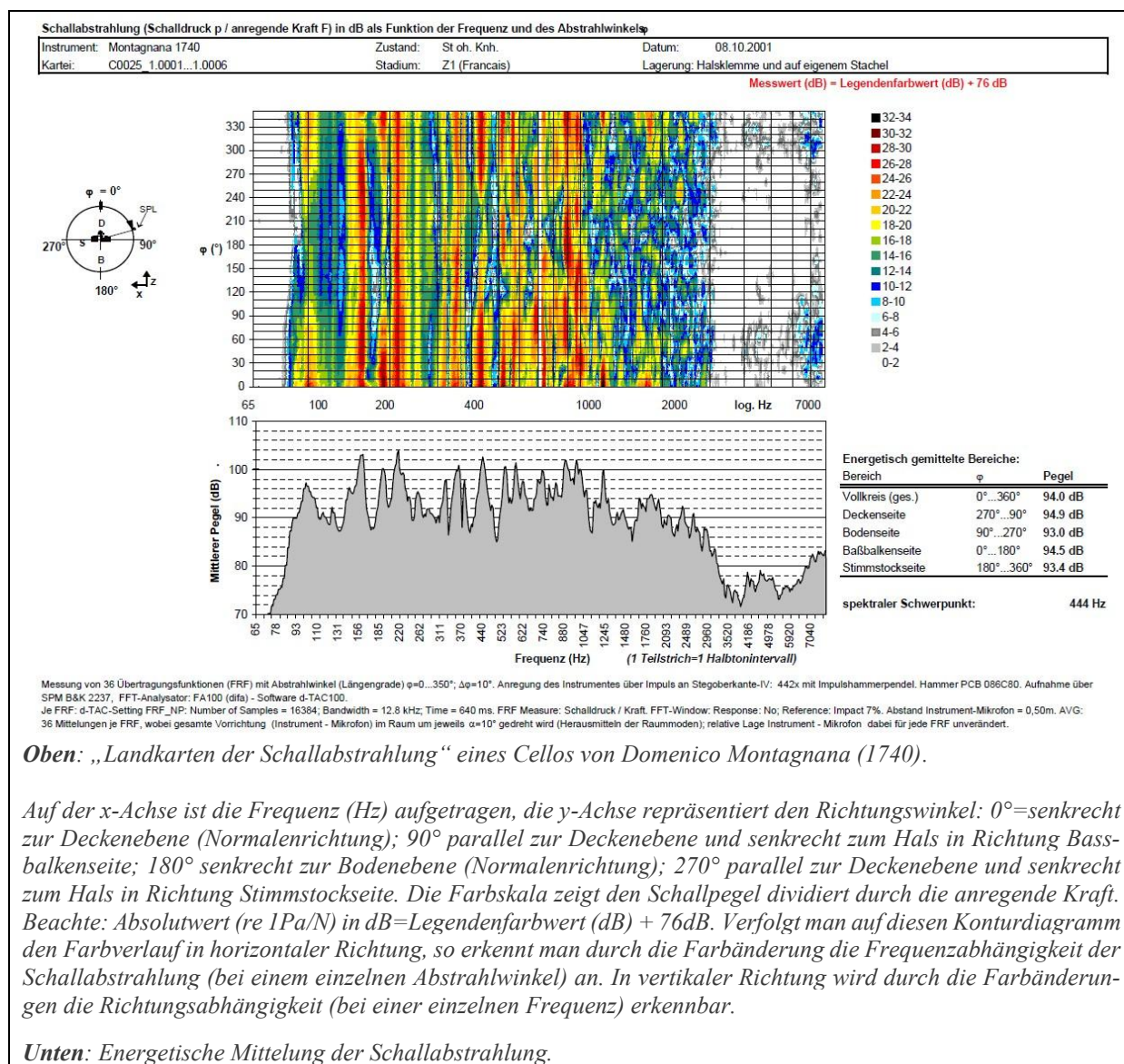


Abb. 9

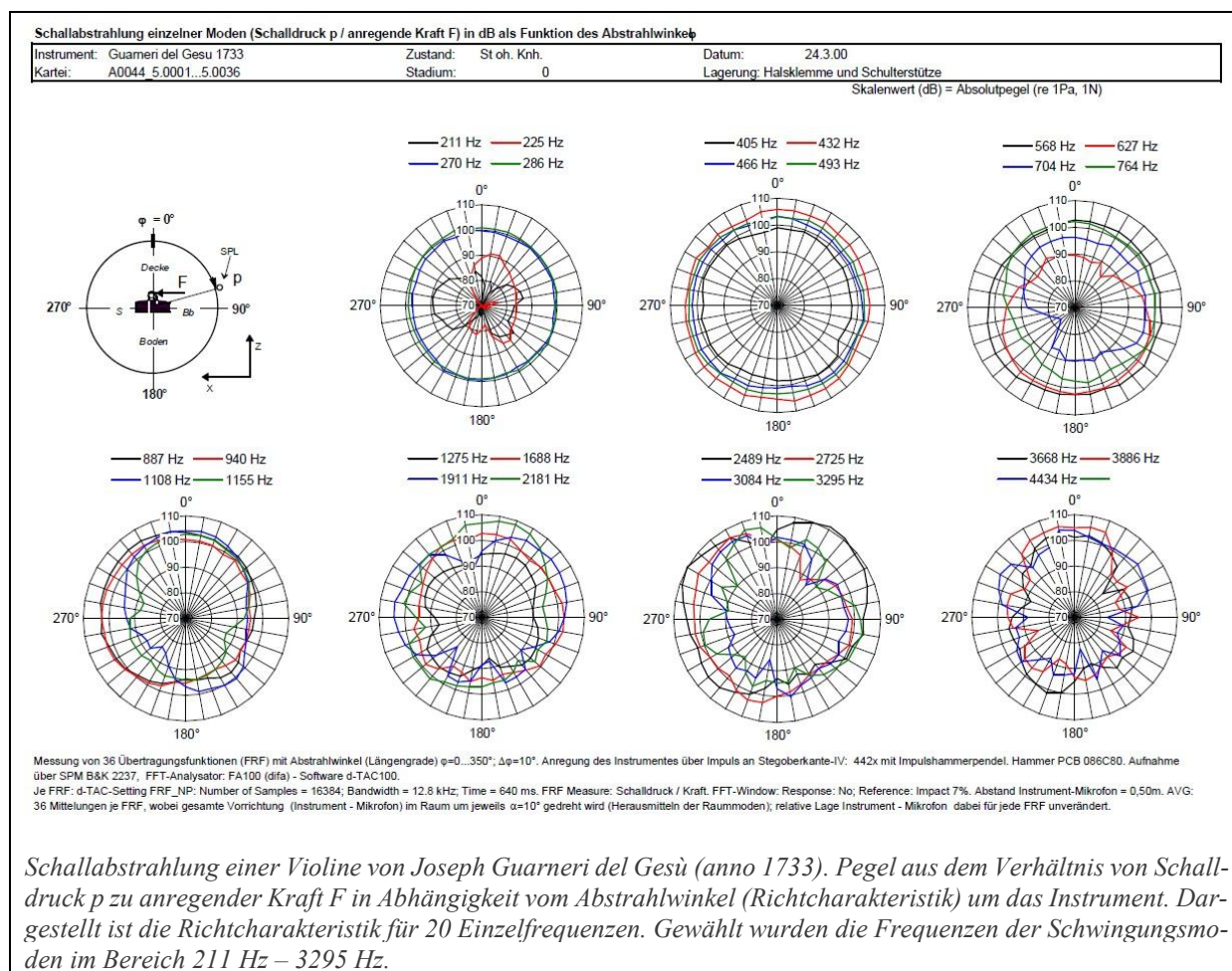


Abb. 10

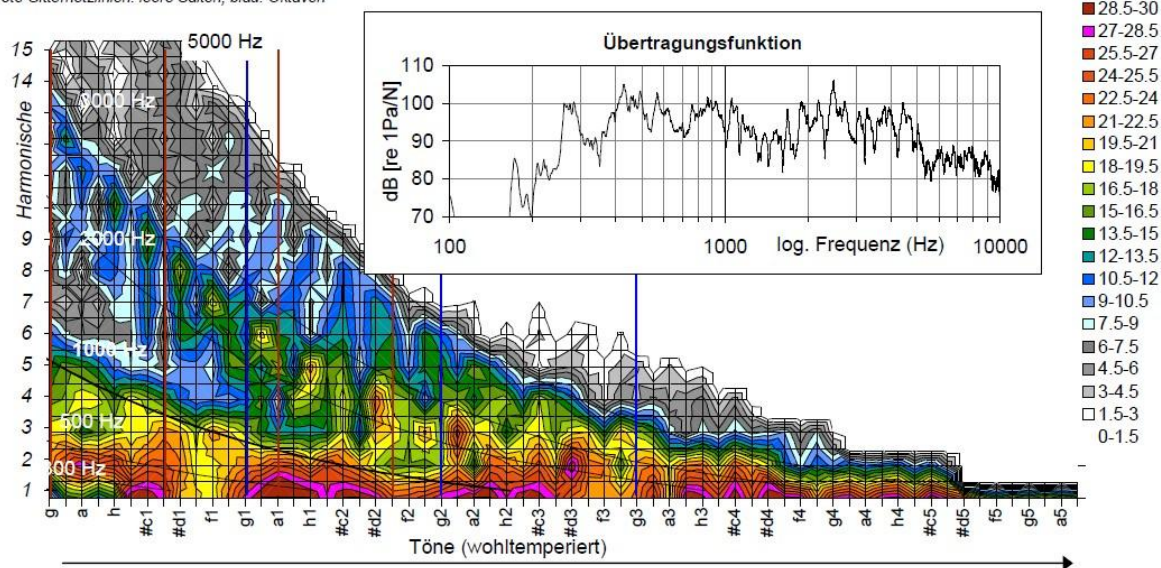
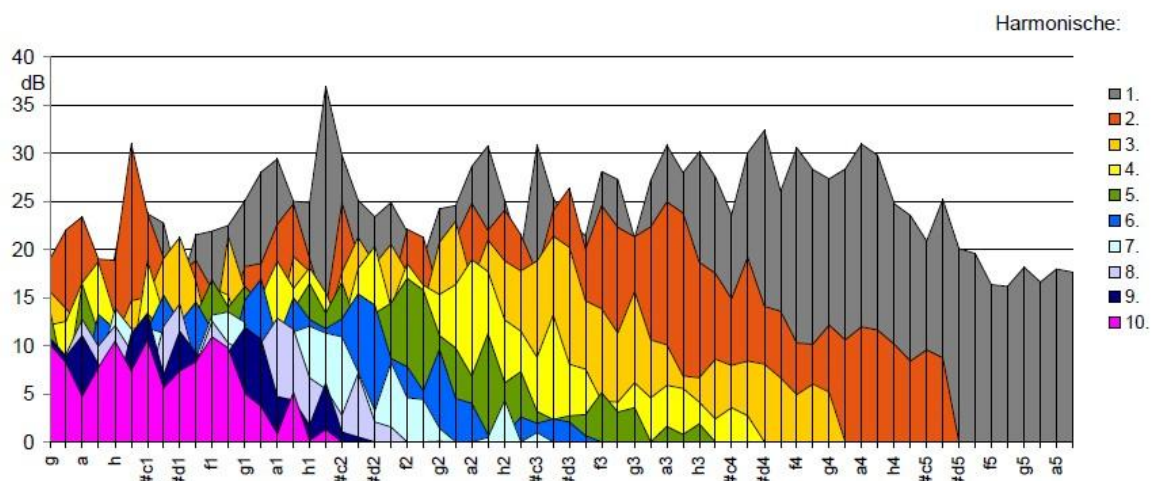
Harmonische Analyse der Schallabstrahlung (p/F)

Instrument:	Guarneri del Gesu 1733	Zustand:	StL	Messung am:	00.01.1900
Kartei:	A0044_5.0001...5.0036	Stadium:	Z1	Stativ mit Halsklemme und Schulterstütze	
abgetastetes Frequenzdelta (Hz):	1.5624	zugelassenes Vibrato (Cent)=+/-:	25		
max. abgetastete Frequenz (Hz):	10000	Pegelberechnung im Vibratointervall:	maximaler Pegel		
tiefste Grundfrequenz (Hz):	196	Diagramm Null für Legendenwert < :	50		

a) Pegel (Schalldruck/anregende Kraft) der Harmonischen (1...15) als Funktion des Grundtones

Amplitude des Harmonischen i dividiert durch i
rote Gitternetzlinien: leere Saiten; blau: Oktaven

Messwert(dB)=Legendenfarbwert (dB)+ 70.0 dB

**b) Pegel (Schalldruck/anregende Kraft) der Harmonischen (1...10) als Funktion des Grundtones**

„Harmonische Struktur“ der Schallabstrahlung einer Violine von Guarneri del Gesù (anno 1733).

Abb. 12

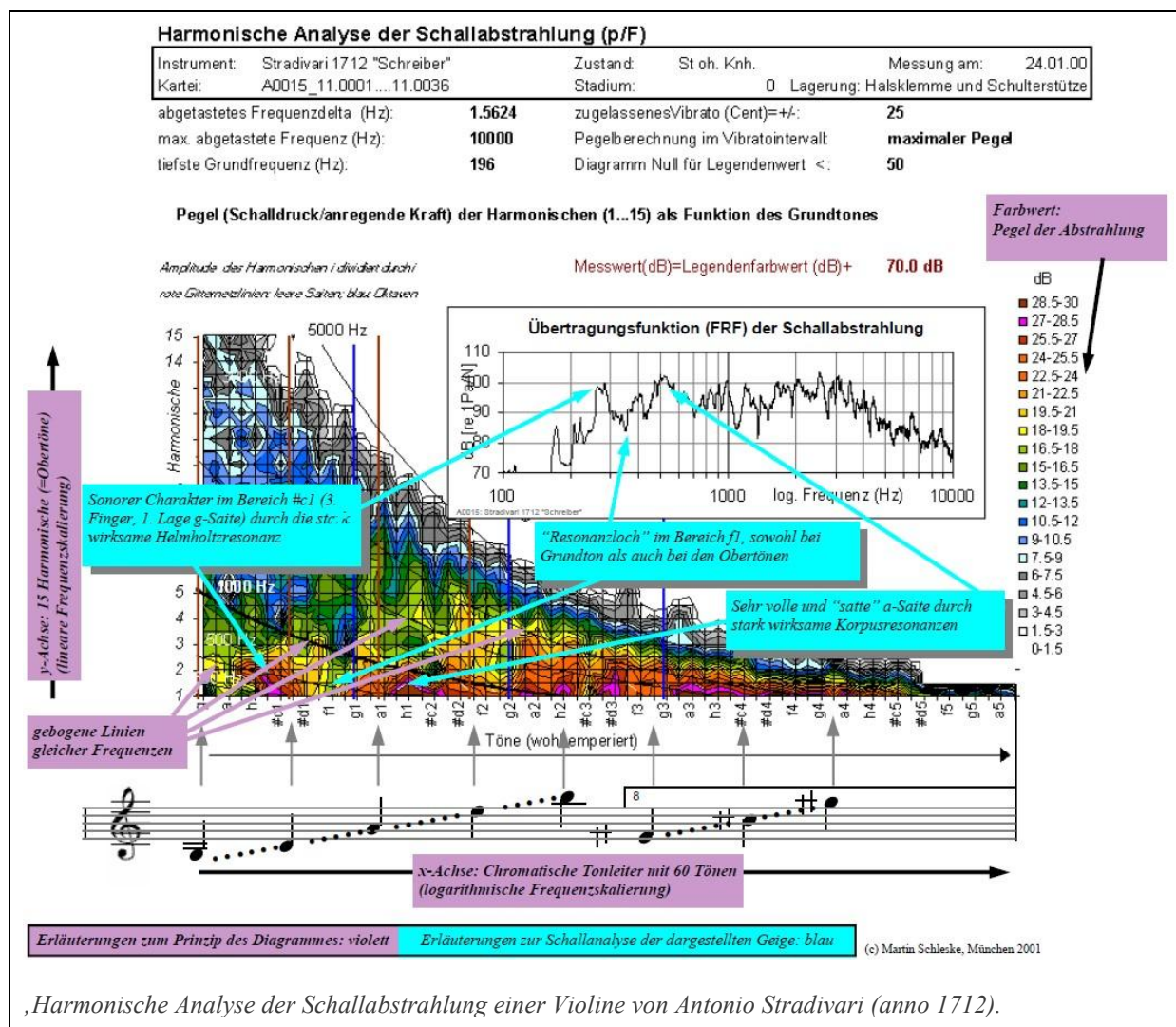
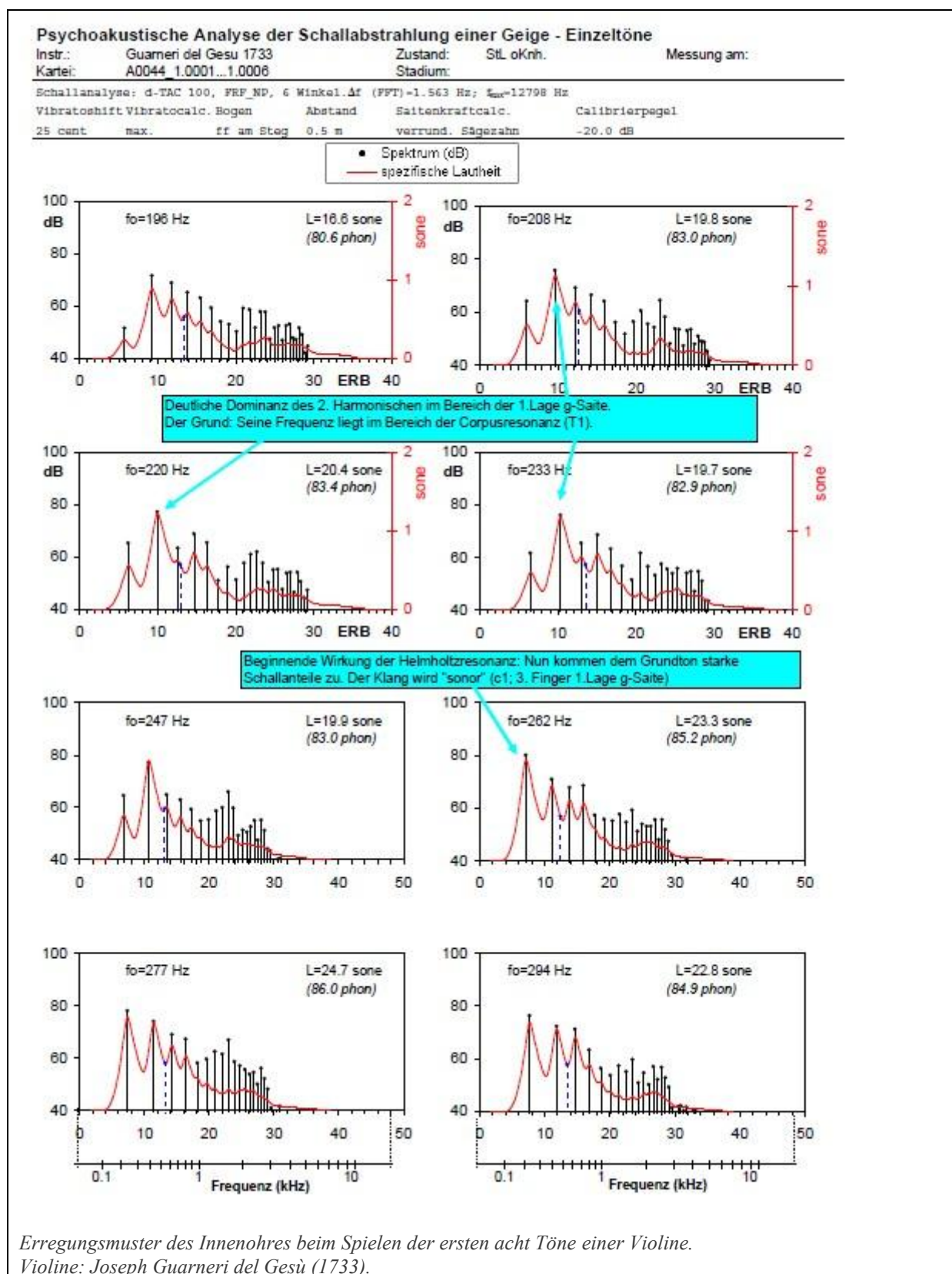


Abb. 13



Erregungsmuster des Innenohres beim Spielen der ersten acht Töne einer Violine.
 Violine: Joseph Guarneri del Gesù (1733).

Abb. 14

Psychoakustische Analyse der Schallabstrahlung einer Geige

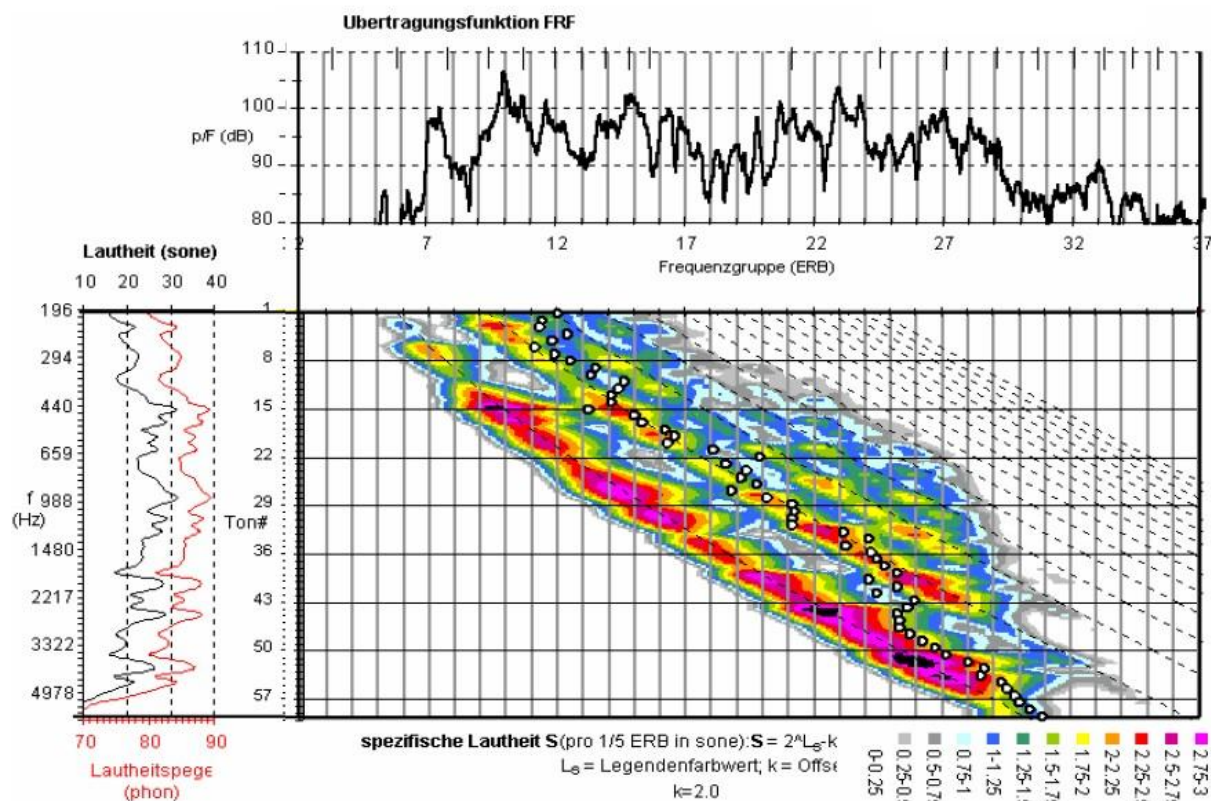
Instrument: Guarneri del Gesu (1733)

Kartei: A0044

Zustand: ohne Kinnhalter. Messung mit Halsklemme

Schallanalyse: D-TAC 100. FRF_NP; 6 Winkel; $\Delta f = 1.56$ Hz; Lcalc (Vibrato) = max. Vibratoshift = 10 Cent. $f_{\min} = 196$ Hz

Bogen: ff; Hörbed. = 0.5m; Saitentyp = verrund. Sägezahn. Cal. Pegel = -20dB



Psychoakustische Analyse der Schallabstrahlung einer Violine. Liniendiagramm oben: Physikalische Übertragungsfunktion (FRF). Die FRF bildet die Eingangsgröße für die Berechnungsalgorithmen der spezifischen Lautheit.

Farbdiagramm: Spezifische Lautheit (in sone) für 60 Halbtöne (chromatische Tonleiter).

Liniendiagramm links: Gesamt-Lautheitspegel (in phon) der 60 Halbtöne.

Instrument: Violine von Joseph Guarneri del Gesù (anno 1733).

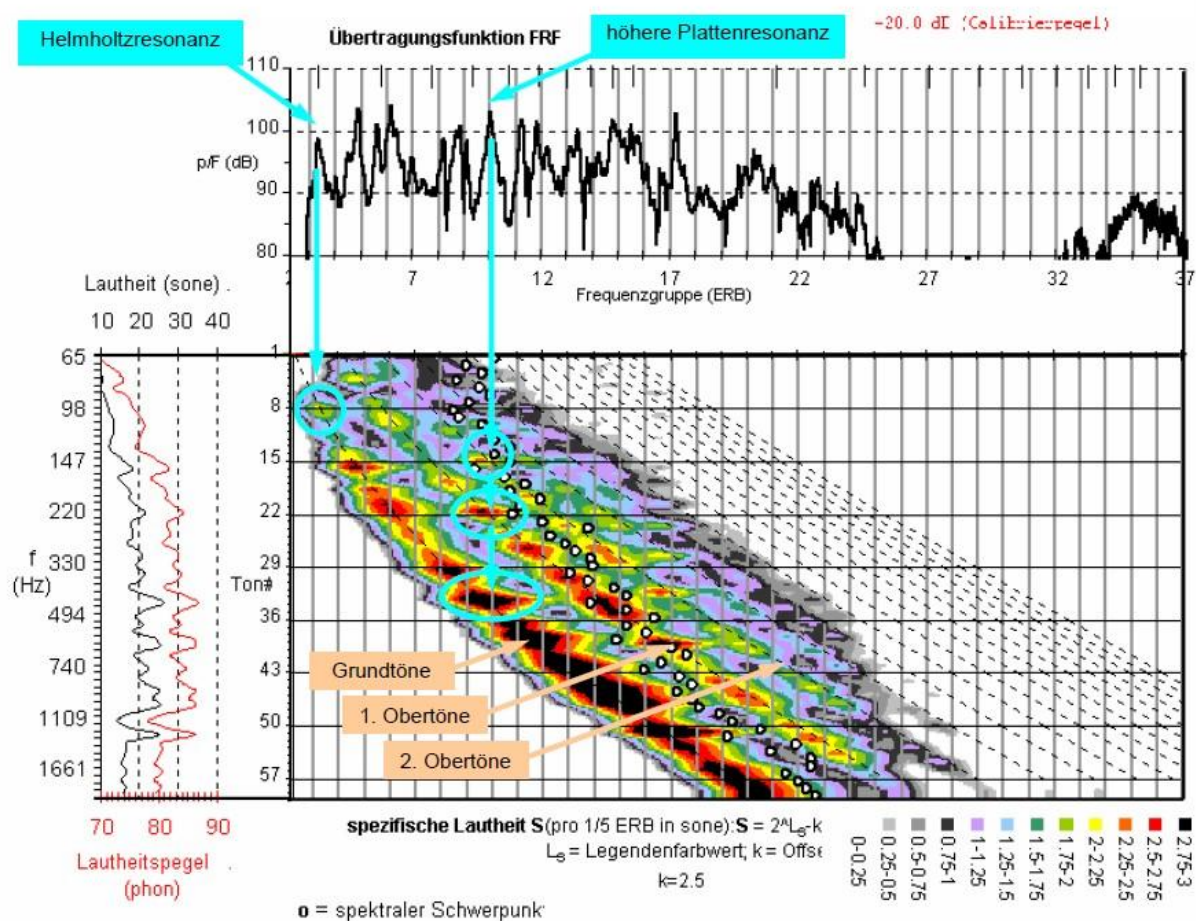
Abb. 16

Psychoakustische Analyse der Schallabstrahlung eines Cellos

Instrument: Domenico Montagnana (1740) „Islerli“

Kartei: C0025

Zustand: Messung auf Stachel mit Halsklemme

Schallanalyse: D-TAC 100. FRF_NP; 6 Winkel; $\Delta f = 1.56$ Hz; Lcalc (Vibrato) = max. Vibratoshift = 10 Cent. f min = 65 Hz
Bogen: ff; Hörbed. = 0.5m; Saitentyp = verrund. Sägezahn. Cal. Pegel = -20dB

Psychoakustische Gesamtauswertung der Schallabstrahlung eines Violoncellos. Liniendiagramm oben: Physikalische Übertragungsfunktion (FRF). Die FRF bildet die Eingangsgröße für die Berechnungsalgorithmen der spezifischen Lautheit.

Farbdiagramm: Spezifische Lautheit (in sone) für 60 Halbtöne (chromatische Tonleiter).

Liniendiagramm links: Gesamt-Lautheitspegel (in phon) der 60 Halbtöne.

Instrument: Violoncello von Domenico Montagnana (anno 1740).

Abb. 19

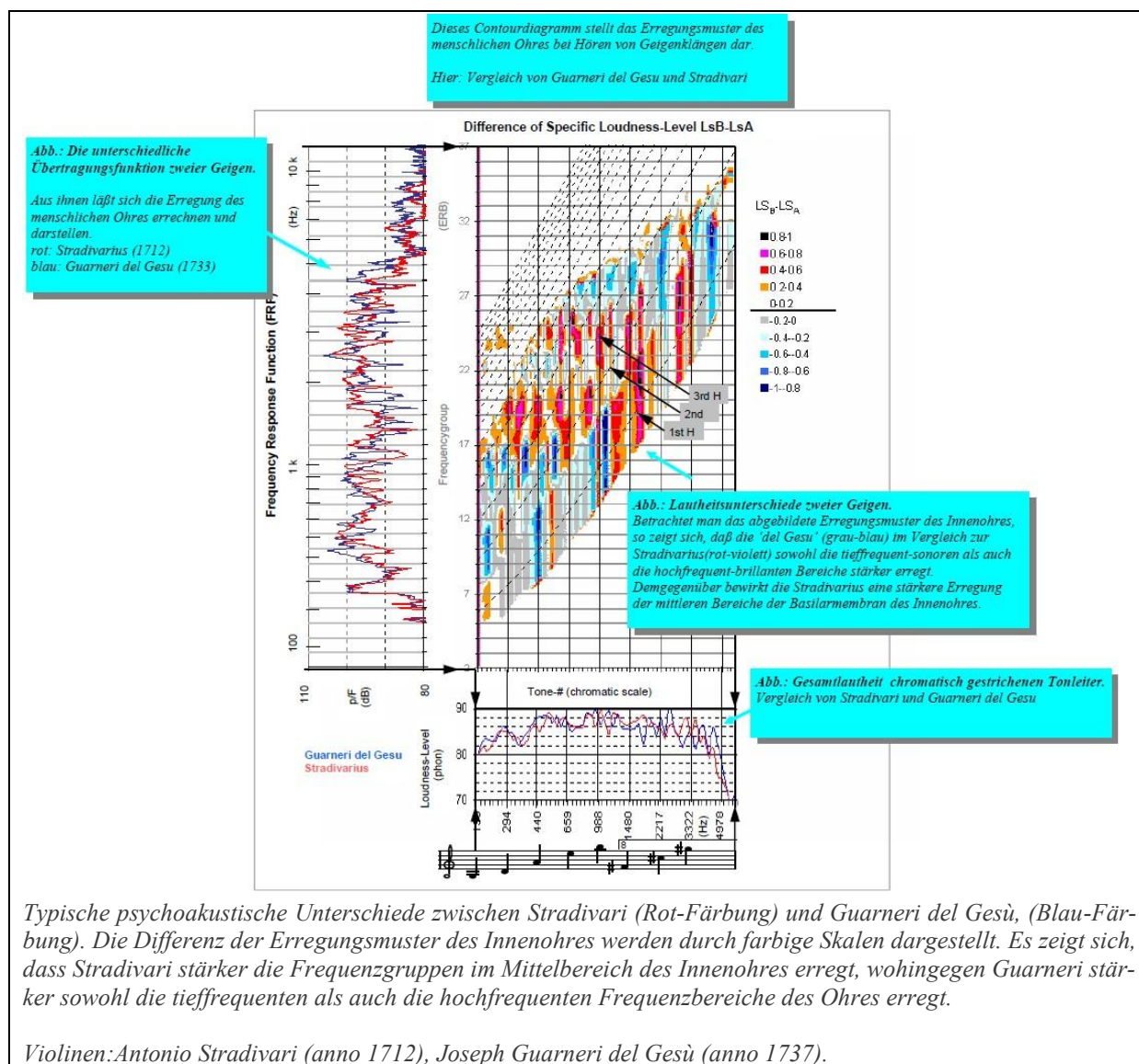


Abb. 30

