

Die Resonanzanalyse

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

Zusammenfassung

Die Übertragungsfunktion ist von großer Bedeutung für die akustische Beschreibung einer Geige, denn hier werden die Resonanzen und damit das akustische Eigenleben des Instrumentes sichtbar. Man könnte daher den Kurvenverlauf der Übertragungsfunktion anschaulich auch als „Resonanzprofil“ des Instrumentes bezeichnen. Es wird die Schallabstrahlung einer Geige von Antonio Stradivari (1721) im Vergleich zu einer modernen Geige (2017) dargestellt

Jede Geige, Bratsche oder Cello weist ihr eigenes, charakteristisches, unverwechselbares Resonanzprofil auf. Was ist eine Übertragungsfunktion und wie wird sie gemessen?

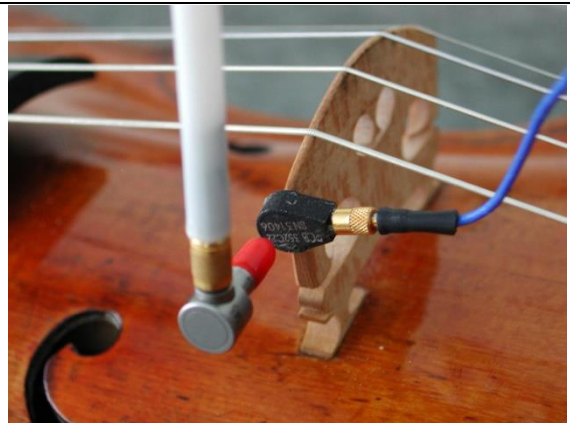


Abb.1: Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer zur Messung einer Übertragungsfunktion der Geige. Der Impulshammer enthält eine kleine Kraftmesszelle, mit welcher zeitlicher Verlauf und Betrag der eingeleiteten Kraft F gemessen werden. Der Beschleunigungsaufnehmer misst die Schwingungsantwort a .

Die Übertragungsfunktion (engl. „Transferfunction“ oder „Frequency Response Function FRF“) zeigt, wie die Geige „antwortet“, wenn sie zum Schwingen erregt wird. Wird das Instrument mit einem kurzen Impuls in Schwingung versetzt, so antwortet es auf diese Anregung mit seinen sämtlichen Resonanzen (Eigenschwingungen). Zur Messung der Übertragungsfunktion FRF wird sowohl die impulsförmige Anregung (Kraft F) als auch die Antwort (Schwingungsbeschleunigung a) gemessen. Anschließend wird der Quotient aus Antwort a und Anregung F berechnet: $FRF=a/F$.

Der kurze Anregungsimpuls hat eine zeitliche Länge von weniger als einer tausendstel Sekunde (der exakte Zeitverlauf wird von einem digitalen Signalprozessor erfasst). Im Frequenzbereich betrachtet, beinhaltet dieser kurze Impuls sämtliche Frequenzen, die zur Anregung des Instrumentes nötig sind.

Wenn das Instrument in einer seiner Resonanzfrequenzen angeregt wird, dann reicht bereits eine geringe Kraft F aus, um eine große Schwingungsbeschleunigung a zu erzielen. Der Grund dafür ist, dass die Geige in ihren Resonanzen dynamisch sehr „beweglich“ ist. Diese hohe „Resonanzbeweglichkeit“ wird durch einen entsprechend großen Übertragungsfaktor a/F erkennbar. Die Folge: Das „Resonanzprofil“ weist hier eine Resonanzspitze auf.

Wird das Instrument dagegen in einer Frequenz erregt, in deren Nähe keine Resonanz vorhanden ist, bewirkt die Anregungskraft F nur eine geringe Schwingungsantwort a . Bei dieser Frequenz wird entsprechend nur ein kleiner Übertragungsfaktor gemessen. Im „Resonanzprofil“ wird dieser als Einschnitt erkennbar.

Wenn (bildlich gesprochen) alle Übertragungsfaktoren mit steigender Anregungsfrequenz (x-Achse) nebeneinander aufgezeichnet werden, erhält man als gemessene Kurve den Betrag der Übertragungsfunktion FRF. Auf der Amplitudenachse (y-Achse) ist dabei der jeder Frequenz zugehörige Übertragungsfaktor ablesbar.

Die Übertragungsfunktion ist also eine frequenzabhängige Kurve, an der das Verhältnis von Antwort zu Anregung bzw. das Verhältnis von Beschleunigung zu Kraft (a/F) für alle Frequenzen (f) abgelesen werden kann:

$$FRF=a(f)/F(f).$$



J.B. Fourier

Die mathematische Berechnung der Übertragungsfunktion erfolgt durch die sog. Fouriertransformation. Dabei wird der Zeitbereich der beiden gemessenen Signale $a(t)$ und $F(t)$ in den Frequenzbereich transformiert. Für diese Messung ist der Einsatz eines sog. Fourieranalysators erforderlich.

J.B. Fourier zeigte 1822 in seiner „Théorie analytique de la chaleur“, dass sich ein Vorgang beliebiger Form, der sich nach einer Periode T wiederholt (z.B. die Schwingung einer gestrichenen Geigen- saite) vollständig aus einzelnen harmonischen Frequenzkomponenten aufbauen lässt. Die Grund- und Oberschwingungen nennt man Fourierkomponenten.

Auf ihn geht die sog. Fouriertransformation zurück - jener Algorithmus anhand dessen Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert werden können. Die Fouriertransformation lässt sämtliche Frequenzkomponenten sichtbar werden, aus denen zeitliche Vorgänge bestehen.

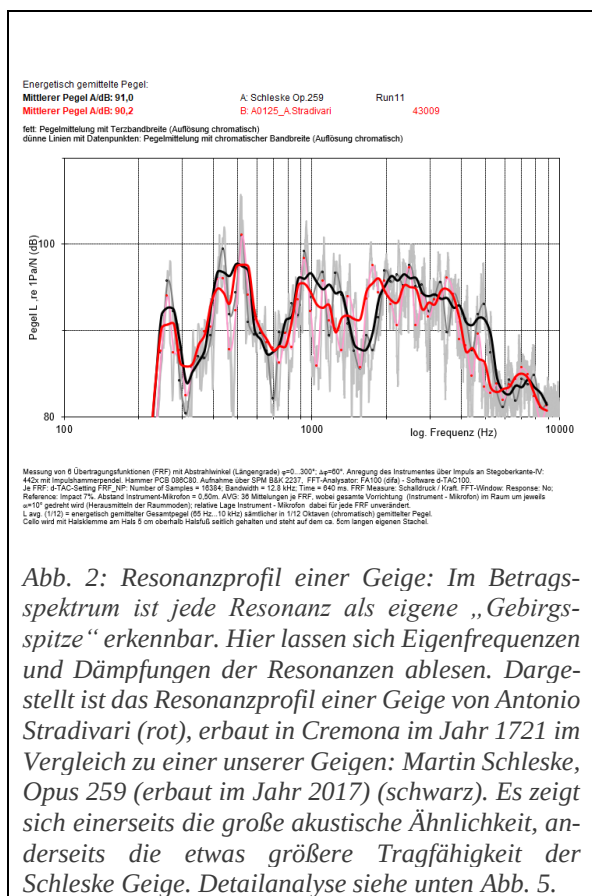


Abb. 2: Resonanzprofil einer Geige: Im Betragspektrum ist jede Resonanz als eigene „Gebirgsspitze“ erkennbar. Hier lassen sich Eigenfrequenzen und Dämpfungen der Resonanzen ablesen. Dargestellt ist das Resonanzprofil einer Geige von Antonio Stradivari (rot), erbaut in Cremona im Jahr 1721 im Vergleich zu einer unserer Geigen: Martin Schleske, Opus 259 (erbaut im Jahr 2017) (schwarz). Es zeigt sich einerseits die große akustische Ähnlichkeit, andererseits die etwas größere Tragfähigkeit der Schleske Geige. Detailanalyse siehe unten Abb. 5.

Die auf der Messung von Übertragungsfunktionen basierende Resonanzanalyse von Geigen, Bratschen und Violoncelli lässt Rückschlüsse auf Konstruktion, Materialeigenschaften und Lackierung des Instrumentes zu.



Abb. 3: Geige von Joseph Guarneri. Resonanzanalyse im Akustiklabor unseres Geigenbauateliers.

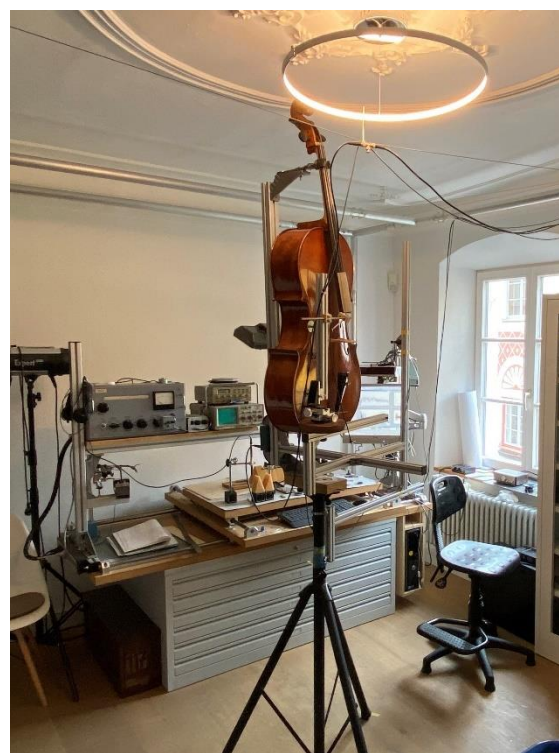


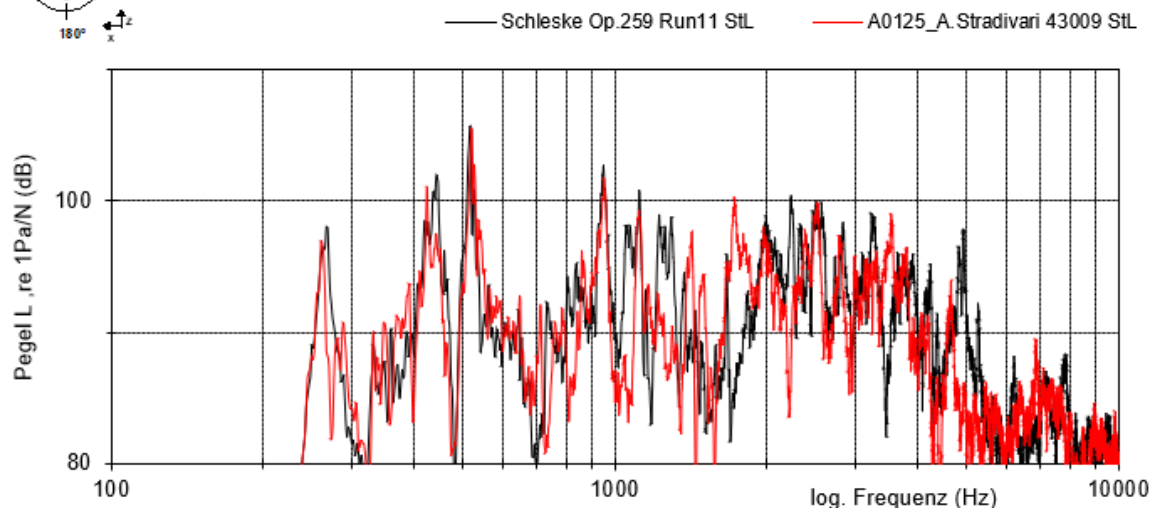
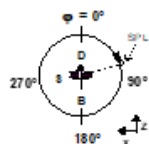
Abb. 4: Resonanzanalyse eines Cellos von Martin Schleske im Akustiklabor unseres Geigenbauateliers.

Die Resonanzanalyse ist ein akustisches Werkzeug zur objektiven Diagnose der Schallabstrahlung der Instrumente. Durch das Resonanzprofil lassen sich somit objektive akustische Stärken und Schwächen sichtbar machen.

Abb. 5: Detailanalyse der Übertragungsfunktion einer Geige von **Antonio Stradivari 1721 (rot)** im Vergleich zu einer modernen Geige von **Martin Schleske 2017 (schwarz)**.

Schallabstrahlung (Schalldruck p / anregende Kraft F) als Funktion der Frequenz

Instrument	Datensatz	Zustand	Raumwinkel/ Abstand/ Höhe	Datum
A: Schleske Op.259	Run11			07.02.2024
B: A0125_A.Stradivari	43009			29.05.2017



Energetisch gemittelte Pegel:

Mittlerer Pegel A/dB: 91,0

A: Schleske Op.259

Run11

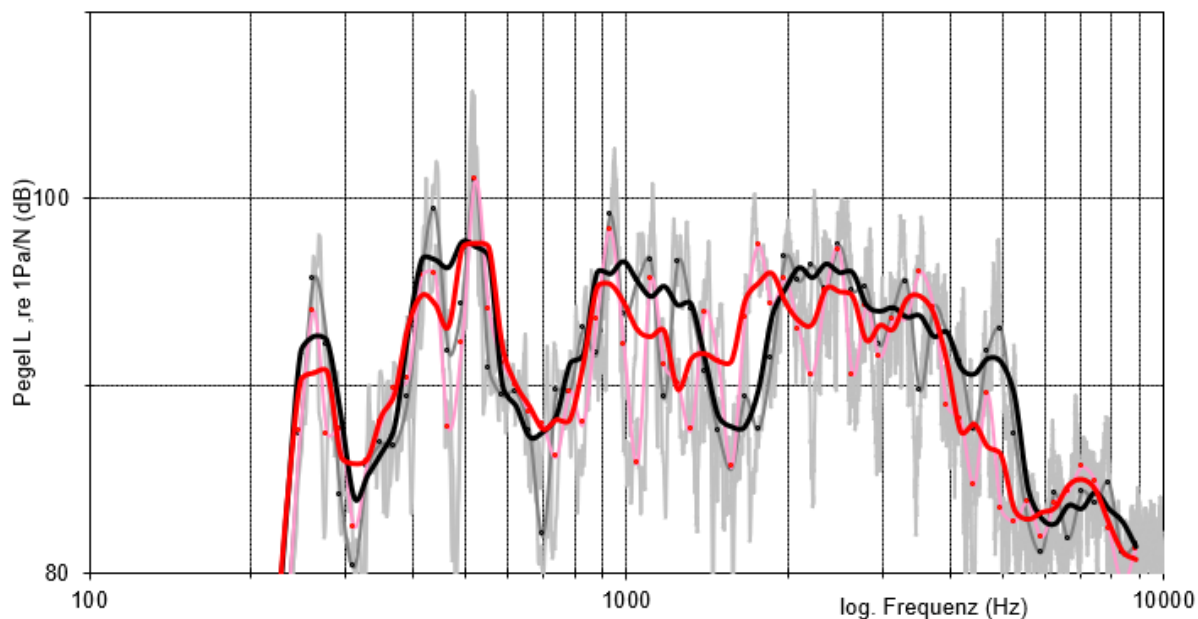
Mittlerer Pegel A/dB: 90,2

B: A0125_A.Stradivari

43009

fett: Pegelmittelung mit Terzbandbreite (Auflösung chromatisch)

dünne Linien mit Datenpunkten: Pegelmittelung mit chromatischer Bandbreite (Auflösung chromatisch)



Messung von 6 Übertragungsfunktionen (FRF) mit Abstrahlwinkel (Längengrade) $\varphi=0^\circ\ldots300^\circ$; $\Delta\varphi=60^\circ$. Anregung des Instrumentes über Impuls an Stegoberkante-IV: 442x mit Impulshammerpendel, Hammer PCB 086C80. Aufnahme über SPM B&K 2237, FFT-Analysator: FA100 (difa) - Software d-TAC100.
Je FRF: d-TAC-Setting FRF_NP: Number of Samples = 16384; Bandwidth = 12,8 kHz; Time = 640 ms. FRF Measure: Schalldruck / Kraft. FFT-Window: Response: No;
Reference: Impact 7%. Abstand Instrument-Mikrofon = 0,50m. AVG: 36 Mittelungen je FRF, wobei gesamte Vorrichtung (Instrument - Mikrofon) im Raum um jeweils $\alpha=10^\circ$ gedreht wird (Herausmitteln der Raummoden); relative Lage Instrument - Mikrofon dabei für jede FRF unverändert.
L avg. (1/12) = energetisch gemittelter Gesamtpegel (65 Hz...10 kHz) sämtlicher in 1/12 Oktaven (chromatisch) gemittelter Pegel.
Cello wird mit Halsklemme am Hals 5 cm oberhalb Halsfuß seitlich gehalten und steht auf dem ca. 5cm langen eigenen Stachel.