

Für den $I_2 \rightarrow v_1$ -Betrieb wird an den elektrischen Klemmen des Tonabnehmers ein Generator angeschlossen, der eine eingeprägte Wechselspannung erzeugt. Da der Tonabnehmer unabhängig von seiner mechanischen Belastung in guter Näherung als reine Kapazität wirkt, kann von der elektrischen Spannung \underline{U}_2 leicht auf den Strom \underline{I}_2 geschlossen werden ($\underline{I}_2 = j\omega C \underline{U}_2$). Dieser Strom \rightarrow Schnelle-Übertragungskoeffizient T_{vI} entspricht dem Kraft \rightarrow Spannungs-Übertragungskoeffizient T_{UF} bei elektrischem Leerlauf:

$$\frac{\underline{U}_2}{F_1} = \frac{v_1}{\underline{I}_2} = \frac{v_1}{j\omega C \cdot \underline{U}_2} = \frac{x_1}{C \cdot \underline{U}_2} \quad T_{UF} \text{ für } I_2 = 0, \quad T_{vI} \text{ für } F_1 = 0$$

Die Schwinggeschwindigkeit v_1 lässt sich z.B. mit einem Laser-Vibrometer bestimmen, wobei wegen der geringen Messwerte geeignete Mittelungsverfahren unabdingbar sind.

6.5 Aktorbetrieb

Piezoelektrische Materialien wandeln in beide Richtungen: Mechanische in elektrische Größen (Sensorbetrieb), und elektrische in mechanische Größen (Aktorbetrieb). Legt man an die elektrischen Anschlüsse des Tonabnehmers eine elektrische Wechselspannung an, so vibriert der Stegreiter auf und ab. Wenig. Sehr wenig: Nur einige Nanometer. Da nicht bekannt war, ab welcher Spannung der Kristall irreversibel geschädigt wird, wurden die folgenden Messungen mit einer Effektivspannung von 10V durchgeführt – ohne erkennbare Beschädigung. Die Ovation-Gitarre lag während der Messung im Koffer, die Schwinggeschwindigkeit des Stegreiters wurde mit einem **Laser-Vibrometer** (Polytec) gemessen. Das in Abb. 6.8 dargestellte Ersatzschaltbild lässt für einen masselosen Stegreiter (Idealisierung) eine frequenzunabhängige *Auslenkung* erwarten, wenn eine frequenzunabhängige Spannung eingepreßt wird. Da aber das auf dem Dopplereffekt beruhende Vibrometer die *Schwinggeschwindigkeit* als originale Größe misst, wird die Messung um so schwieriger, je niedriger die Frequenz ist. Mit hinreichend schmalbandigen Filtern sind aber auch im niederfrequenten Bereich kohärente Ergebnisse erreichbar (**Abb. 6.14**). Sowohl die Aktor- als auch die Sensor-Messung zeigt ein in erster Näherung frequenzunabhängiges Übertragungsmaß – aber auch kleinere Resonanzzacken, die zum überwiegenden Teil von der Gitarre, und nicht vom Messverfahren stammen.

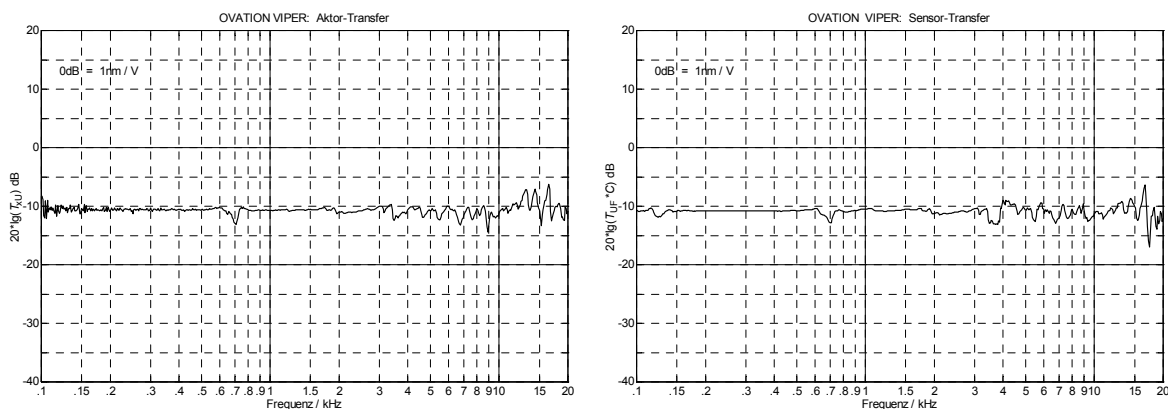


Abb. 6.14: Mit dem Laser-Vibrometer gemessenes Übertragungsmaß G_{XU} (links). Zum Vergleich ist im rechten Bild die entsprechende Sensor-Messung dargestellt: $T_{XU} = C \cdot T_{UF}$. Die Übereinstimmung ist beeindruckend.

Als Ergebnis der Aktormessung erhält man einen Spannung→Auslenkungs-Übertragungskoeffizient von 0,29 nm/V. Für die gewählte Generatorspannung (10 V_{eff}) bedeuten 2,9 nm Auslenkung, dass bei 100 Hz die Schnelle nur 1,8 µm/s beträgt, und das Laser-Vibrometer (mit 0,2 Vs/mm) nur 0,36 mV erzeugt. Diese geringe Signal-Spannung liegt deutlich unter dem **Eigenrauschen** des Laser-Vibrometers, ihre genaue Messung erfordert die Anwendung eines frequenzselektiven Mitlauffilters (**Abb. 6.15**). Anstelle des hier verwendeten Verfahrens (**Hilbert-Transformation**, komplexer Quotient, Blockmittelung) könnte auch der komplexe Quotient zweier DFT-Spektren berechnet werden; der Weg über die Hilbert-Transformation ist bei logarithmischer Frequenzachse aber zweckmäßiger.

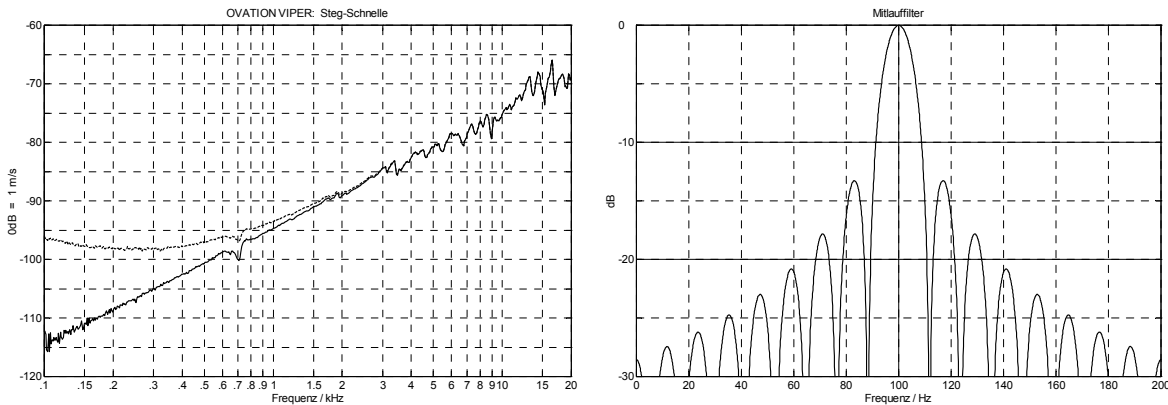


Abb. 6.15: Gemessene Schnelle ohne (---) bzw. mit Mitlauffilter (links); Filtercharakteristik für 100 Hz (rechts).

Der **Vergleich** von Sensor- und Aktorbetrieb (Abb. 6.14) zeigt, dass die in Kap. 6.3 erläuterte Massenkompensation genaue Ergebnisse liefert, und dass die Wandler-Modellierung in erster Näherung geeignet ist. Die bei der Laser-Messung im tieffrequenten Bereich auftretenden Rauschstörungen können leicht durch eine Verlängerung des Mittelungsfensters verringert werden, sodass für $f < 3$ kHz zwei gleichwertige Verfahren zur Verfügung stehen. Im höheren Frequenzbereich zeigen sich kleinere Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren, die auf nicht vollständig perfekte Massenkompensation und auf kleine Unterschiede in den Messpositionen zurückgeführt werden können.

Viele der hochfrequenten Resonanzspitzen lassen sich auf Strukturresonanzen der dachförmigen Saitenreiter und der Saiten zurückführen. Aber auch die **Unterseite des Tonabnehmers** verdient Beachtung, bildet sie doch das Bezugssystem, gegen das die saitenzugewandte Piezooberseite schwingt. Die Unterseite des Tonabnehmergehäuses ist eine u-förmige Aluminiumschiene, die auf Pertinax-Distanzplättchen (engl. *Shims*) auf dem ausgefrästen Gitarrenkorpus aufliegt. Zumindest im Auslieferungszustand. Für die o.a. Messungen waren die Shims aber durch Wellpappestreifen ersetzt worden. Befürchtungen, hiermit die Absorption ungebührlich zu vergrößern, waren unbegründet. Im Gegenteil: Mit den Original-Shims ergab sich im Bereich um 5 kHz eine kleine Delle im Übertragungsfrequenzgang, die auf eine Resonanz der U-Schiene zurückgeführt werden konnte. Die Wellpappe-Shims ermöglichten offenbar einen besseren Kontakt, und somit eine bessere Bedämpfung der Resonanz. Wobei wie immer gilt: Erlaubt ist, was gefällt. **Abb. 6.16** zeigt im linken Bild das Übertragungsmaß G_{xU} für Aktorbetrieb mit Original-Shims, und rechts die (mit gleicher Ansteuerung) gemessene Auslenkung der U-Schiene. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die U-Schiene im Bereich um 5 kHz in stärkere Schwingungen gerät. Die räumliche Form diese Schwingungen wurde nicht näher untersucht – der Aufwand wäre unangemessen.

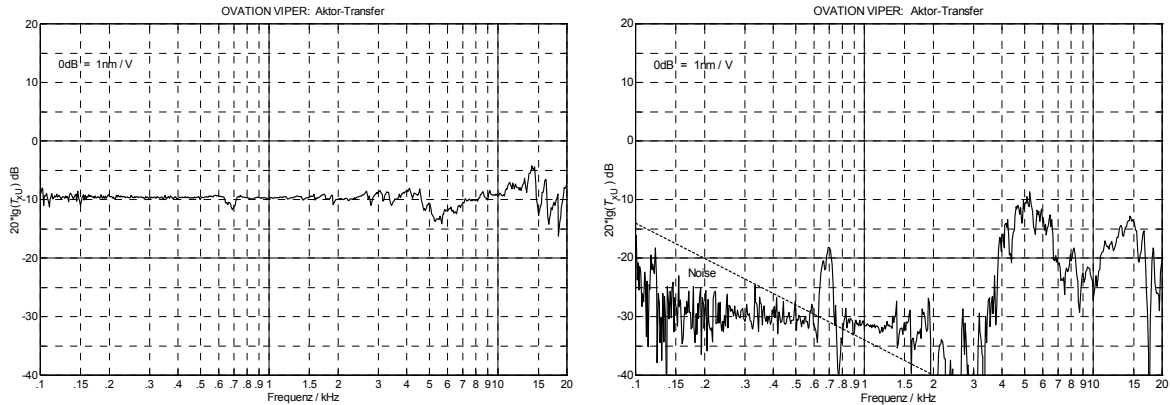


Abb. 6.16: Übertragungsmaß mit Pertinax-Shims: Stegreiter (links), U-Schiene (rechts). Für beide Messungen wurde der Piezo-Tonabnehmer mit eingepprägter elektrischer Spannung angeregt. Um 700 Hz ist eine Deckenresonanz zu beobachten, um 5 kHz und um 15 kHz gerät die den Piezokristall tragende U-Schiene in Resonanz.

Außer der für Ovation eher untypischen Massivgitarre Viper (EA-68) wurde auch noch eine typische Westerngitarre (**Adamas SMT**) analysiert. Der als "mid depth bowl" bezeichnete Lyrachord-Korpus trägt eine Kohlefaser/Birke-Verbunddecke, im Steg ist ein Piezo-Tonabnehmer eingebaut. **Abb. 6.17** zeigt den Vergleich zwischen Sensor- und Aktorbetrieb, wieder in guter Übereinstimmung. Die Messung im Aktorbetrieb gestaltete sich etwas schwieriger als bei der Ovation EA-68, weil die schwingfreudige Gitarrendecke durch Umgebungslärm angeregt wurde – insbesondere im Bereich der 160-Hz-Resonanz.

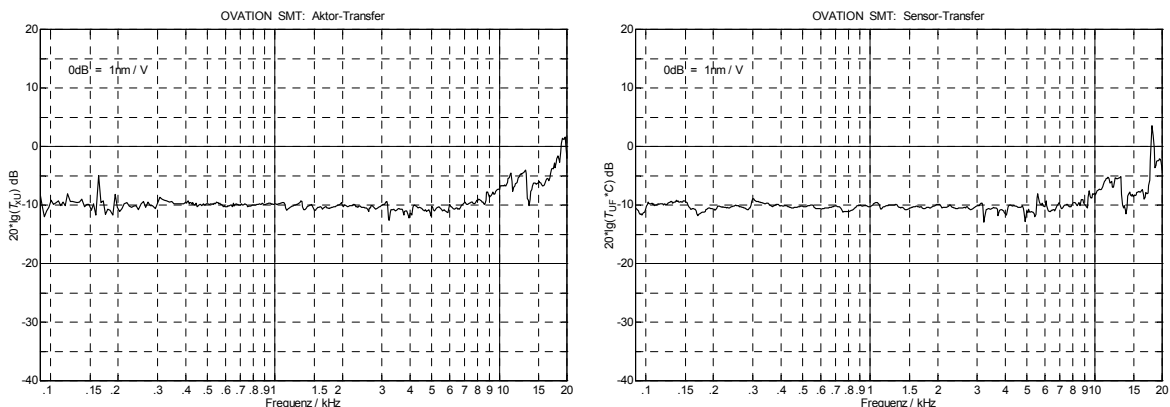


Abb. 6.17: Übertragungsmaß der Adamas SMT. Aktor-Messung (links), Sensor-Messung (rechts). $C = 450\text{pF}$.

Zwei wesentliche Unterschiede zeigen sich im Vergleich zur Viper: Die Kapazität des SMT-Tonabnehmers beträgt nur 450 pF (gegenüber 1,45 nF bei der Viper), und im Übertragungsverhalten der SMT ist eine Anhebung im Bereich der höchsten Oktave zu beobachten. Beim Betrieb der Tonabnehmer an dem in der jeweiligen Gitarre eingebauten FET-Verstärker ist auch im Bereich tiefer Frequenzen ein kleiner Unterschied festzustellen: Der Viper-Piezo wird mit 500 k Ω belastet, was einen Hochpass mit 220 Hz unterer Grenzfrequenz ergibt. Demgegenüber ist der SMT-Piezo mit 2 M Ω abgeschlossen, woraus 177 Hz Grenzfrequenz resultieren. Bei den o.a. Messprotokollen ist hingegen kein Hochpass zu erkennen: Beim Aktorbetrieb tritt er prinzipbedingt nicht auf, beim Sensorbetrieb wurde er herausgerechnet.