

Zur Berechnung der Hochpass-Grenzfrequenz (3-dB-Frequenz) fasst man die beiden Kapazitäten additiv zusammen, da sie vom Lastwiderstand aus gesehen parallel liegen:  $C = C_K + C_S$ .

$$f_g = \frac{1}{2\pi R(C_K + C_S)} = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Hochpass-Grenzfrequenz}$$

Mit  $C = 1,5 \text{ nF}$  und  $R = 1 \text{ M}\Omega$  erhält man  $f_g = 106 \text{ Hz}$ , einen zum Frequenzumfang der Gitarre passenden Wert. Mit  $R = 50 \text{ k}\Omega$  (Line-Eingang) würde sich die Grenzfrequenz auf  $2,1 \text{ kHz}$  erhöhen, was einem fast vollständigen Tiefenverlust gleichkäme. Noch ungeeigneter wäre der Betrieb an einem Mikrofoneingang: Sein Eingangswiderstand beträgt üblicherweise nur  $2 \text{ k}\Omega$ .

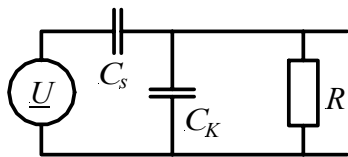


Abb. 6.2: Wandler-Ersatzschaltbild

Beim **aktiven** Piezo-Tonabnehmer spielt die Impedanz des Gitarren-Verstärkers keine Rolle, denn hierbei ist in die Gitarre ein batteriebetriebener Vorverstärker eingebaut, dessen niederohmiger Ausgangswiderstand die problemlose Ansteuerung eines Line-Eingangs ermöglicht. Beim **passiven** Piezo-System enthält die Gitarre jedoch keinen Vorverstärker; das Tonabnehmersignal muss über ein abgeschirmtes Kabel zum Gitarrenverstärker geführt werden. Hochwertige Kabel stellen lediglich eine kapazitive Last dar (Kap. 5.5.8), sie vergrößern somit  $C_K$ . Dies bewirkt zum einen eine breitbandige Signalabschwächung (kapazitiver Teiler), zum anderen eine Erniedrigung der Hochpass-Grenzfrequenz. Die häufig anzutreffende Vermutung, ein **langes Kabel** würde vor allem die Höhen bedämpfen, ist unzutreffend – der Piezo-Innenwiderstand ist ja nicht resistiv, sondern kapazitiv.

### 6.3 Der Piezowandler als Sensor

Im Sensorbetrieb wandelt der Gitarrentonabnehmer mechanische Eingangssignale (Saitenschwingungen) in elektrische Ausgangssignale um. Das ist für ihn der Normalzustand; der ebenfalls mögliche Aktorbetrieb ist nur für die Messtechnik interessant (Kap. 6.5). In der bisher betrachteten Idealisierung arbeitet der Piezowandler als Kraft-Spannungs-Wandler. Er erfasst insbesondere den Wechselanteil der Saitenauflegekraft und erzeugt eine hierzu proportionale elektrische Spannung. Allerdings wirkt die Auflagekraft nicht unmittelbar auf den Piezokristall ein – das **Tonabnehmergehäuse** stellt mit seinen Massen und Federn ein mechanisches Filter dar. Die Auswirkungen dieses Filters werden im Folgenden für einen Ovation-Tonabnehmer (Abb. 6.3) messtechnisch untersucht.

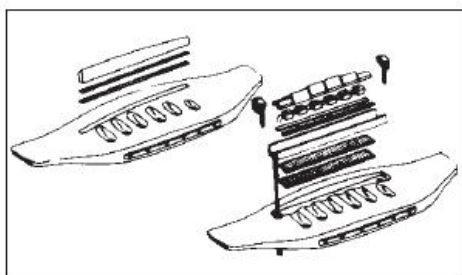
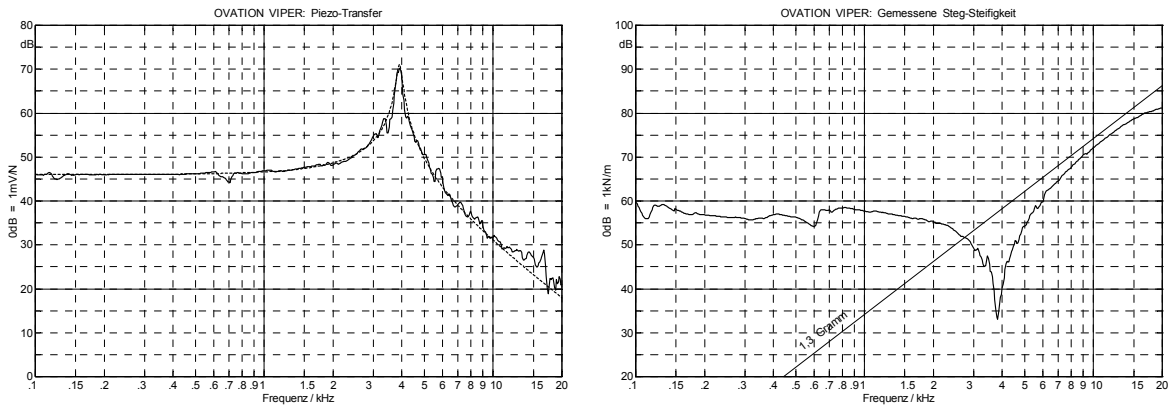


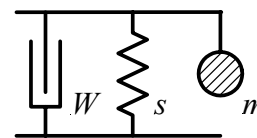
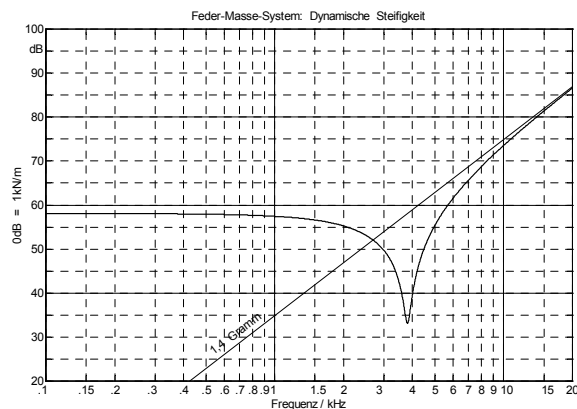
Abb. 6.3: Zwei verschiedene Piezo-Tonabnehmer (Ovation).

Für die **Messungen** wurde die Gitarre im geöffneten Koffer auf einen Steintisch (250 kg) gelegt. Ein elektromechanischer Shaker (B&K 4810) erzeugte translatorische Schwingungen, mit einem Impedanzmesskopf (B&K 8001) konnten Kraft und Beschleunigung gemessen werden. In den Messkopf war eine kleine Meißelklinge eingeschraubt, die auf den Stegsattel aufgesetzt wurde. Der Piezo-Tonabnehmer war während der Messungen mit 2 MΩ belastet. **Abb. 6.4** zeigt über der Frequenz das gemessene Übertragungsmaß. Zum Vergleich ist die entsprechende Idealkurve eines Tiefpasses 2.Ordnung gestrichelt eingezeichnet. Seine Resonanzfrequenz beträgt ca. 3,9 kHz, seine Güte ca. 18.



**Abb. 6.4:** Übertragungsmaß (links) und dynamische Steifigkeit (rechts) des Piezo-Tonabnehmers (Ovation).

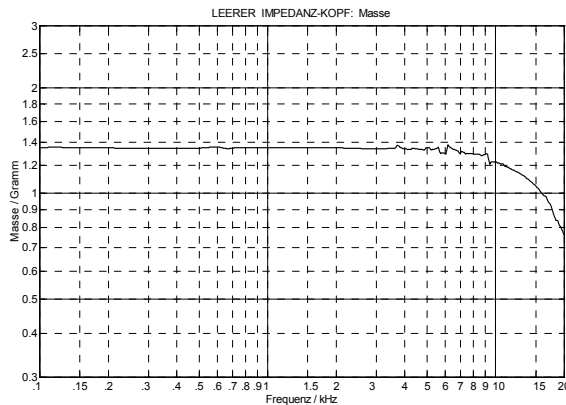
Das dargestellte Übertragungsverhalten darf nun aber nicht als "Frequenzgang" der Gitarre interpretiert werden. Im linken Bild der Abb. 6.4 ist über der Frequenz der zwanzigfache Logarithmus des Quotienten  $U/F$  dargestellt, mit  $U$  = Piezospannung und  $F$  = gemessene Kraft. Die im Impedanzkopf gemessene Kraft entspricht aber nicht exakt der Stegkraft, vielmehr wird eine kleine zusätzliche Massenkraft mitgemessen, die von der lastseitigen Montageplatte des Impedanzkopfes kommt. Anders ausgedrückt: Während der Messung liegt auf dem Steg eine kleine **Zusatzmasse** von 1,4 Gramm, deren Wirkung mitgemessen wird. Zusammen mit der Steg-Steifigkeit erzeugt diese Masse eine Resonanz bei 3,9 kHz. Zur Bestätigung dieser Hypothese ist **im rechten Bild** in Abb. 6.4 der Quotient aus gemessener Kraft  $F$  und gemessener Auslenkung  $x$  dargestellt (wieder in üblicher dB-Skalierung, d.h. zwanzigfacher Logarithmus). Für  $f > 100$  Hz ist sehr schön das Verhalten eines Feder-Masse-Systems zu erkennen, dessen Idealisierung **Abb. 6.5** zeigt. Vereinfacht betrachtet wirkt der Gitarrensteg als Steifigkeit (ca. 800 kN/m) und bildet zusammen mit der vom Impedanzkopf beigesteuerten Zusatzmasse eine Resonanz bei 3,9 kHz.



$$W=1,9\text{Ns/m}; s=800\text{kN/m}; m=1,4\text{g}.$$

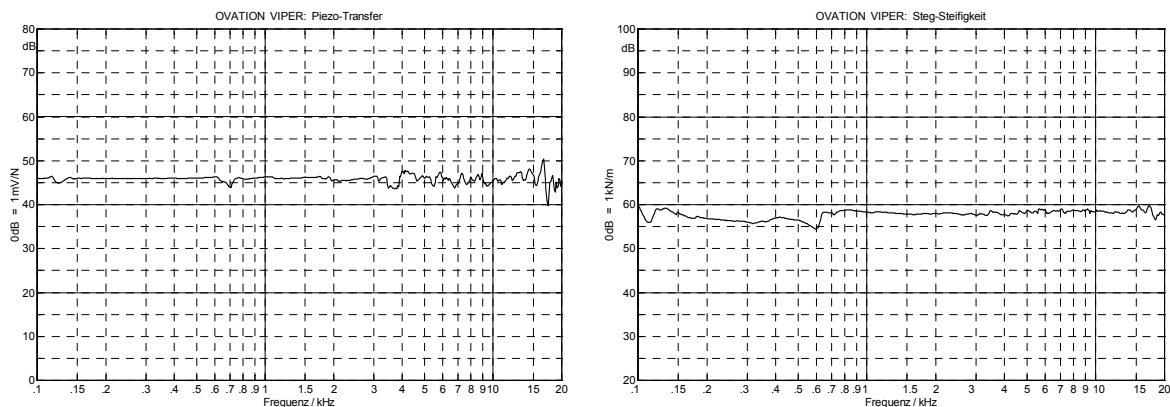
**Abb. 6.5:** Dynamische Steifigkeit  $F/x$  eines idealen Feder-Masse-Systems.

Die 3,9-kHz-Resonanz entsteht durch das Zusammenwirken der Stegreiter-Steifigkeit  $s_R$  und der von der Endplatte des Impedanzkopfes und der Meißelklinge erzeugten Zusatzmasse  $m_0$ . Der genaue Wert von  $m_0$  lässt sich leicht am unbelasteten Impedanzkopf messen: In **Abb. 6.6** ist hierfür der Betrag des komplexen Quotienten  $\underline{F}/\underline{a}$  dargestellt. Für eine ideale Masse müsste sich ein frequenzunabhängiger Verlauf ergeben; die Abweichungen sind Auswirkungen von Strukturresonanzen (Messkopf und Kabel).



**Abb. 6.6:** Betrag der mitschwingenden komplexen Masse  $\underline{F}/\underline{a}$  des Impedanzkopfes (incl. Meißel).

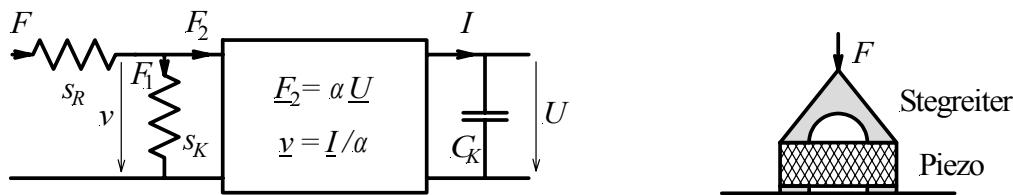
Unter der Annahme von Zeitinvarianz (die nicht hundertprozentig erreichbar ist) lassen sich die Artefakte des Messkopfes weitgehend **kompensieren**: Hierzu werden zunächst das Kraft- und das Beschleunigungssignal bei leerem Messkopf in möglichst hoher Qualität digital aufgezeichnet. Mit der Hilbert-Transformation erzeugt man im nächsten Schritt zu diesen reellen Signalen die zugehörigen analytischen Signale  $\underline{F}$  und  $\underline{a}$ , deren Quotient – in geeigneter Weise gemittelt – die komplexe Masse  $\underline{m}_0 = \underline{F}/\underline{a}$  ergibt. Zur Kompensation wird dann (bei belastetem Kopf) lediglich  $\underline{m}_0$  vom gemessenen  $\underline{F}/\underline{a}$ -Quotient abgezogen. **Abb. 6.7** zeigt Ergebnisse, die mit dieser Kompensation erzielt wurden. Als Übertragungsmaß erhält man einen (in erster Näherung) frequenzunabhängigen Wert von 0,2 V/N, als Steg-Steifigkeit ca. 800 kN/m.



**Abb. 6.7:** Messungen mit Kompensation der Messkopf-Artefakte: Übertragungsmaß (links), Steifigkeit (rechts).

**Zusammengefasst:** Als Sensor arbeitet der untersuchte Piezo-Tonabnehmer (Ovation EA-68) erwartungsgemäß als Kraft→Spannungs-Wandler mit einem Übertragungskoeffizient von 0,2 V/N. Der Gitarrensteg wirkt als Steifigkeit mit ca. 800 kN/m. Diese Größen sind im einfachen Modellfall frequenzunabhängig, die 3,9-kHz-Resonanz ist ein Antriebs-Artefakt. Bei genauer Analyse erkennt man Strukturresonanzen, die dieses einfache Modell nicht nachbildet.

**Abb. 6.8** fasst die bisherigen Ergebnisse zu einem Ersatzschaltbild zusammen. Auf der elektrischen Seite des Wandler-Zweiters ist die Kristallkapazität zu erkennen, auf der mechanischen Seite die Kristallsteifigkeit  $s_K$  und die Stegreitersteifigkeit  $s_R$ . Der **Stegreiter** ist ein giebeldachförmiges Kunststoffteil, das auf dem Kristall sitzt und die Verbindung zur Saite herstellt; seine Steifigkeit ist um ca. drei Zehnerpotenzen kleiner als die Kristallsteifigkeit. Aufgrund dieser Relation sind Änderungen der elektrischen Belastung (z.B. Kurzschluss) am mechanischen Tonabnehmer-Eingang (bei  $F$ ) nicht zu messen; sie verändern zwar die Eingangsimpedanz des Wandlers (bei  $F_2$ ), müssen aber gegenüber  $s_R$  vernachlässigt werden: Bei der Reihen-Montage zweier Federn dominiert die weichere. Aus dem gleichen Grund sind Änderungen der mechanischen Belastung (z.B. die in Abb. 6.8 ganz links anzubringende Shakermasse) auf der elektrischen Seite nicht zu messen: Die sehr steife Feder  $s_K$  dominiert, Parallel-Montage einer weicheren Feder ändert die Steifigkeit nur unwesentlich.



**Abb. 6.8:** Ersatzschaltbild des Piezo-Tonabnehmers (Ovation EA-68).

Mit dem gemessenen Übertragungskoeffizient  $T_{UF} = U/F = 0,2 \text{ V/N}$  und der Tonabnehmer-Kapazität  $C = 1,45 \text{ nF}$  stehen allerdings nur zwei Bedingungen für die drei Unbekannten  $s_K$ ,  $\alpha$  und  $C_K$  zur Verfügung; lediglich  $s_R$  ist durch die 3,9-kHz-Resonanz und die Messkopfmasse vollständig definiert. Da ohne invasive (und damit unerwünschte) Analytik keine zusätzliche Bedingung erhältlich ist, wurde das Verhältnis  $C_s/C_K = s_C/s_K$  **willkürlich** zu 50% angenommen. Ein- und Ausgangsimpedanz sowie Übertragungsfunktion sind hiermit im Rahmen der Modellgrenzen trotzdem definierbar, nur beim Rückrechnen auf Materialparameter verbleibt Ungewissheit – die aber sowieso besteht, weil die räumlichen Verteilungen der mechanischen Spannungen in Piezo und Stegreiter unbekannt sind.

Die folgenden Berechnungen gehen von der Annahme aus, dass im Tonabnehmer kein durchgängiger Kristallstreifen verwendet wird, sondern unter jeder Saite ein kleines, quadratisches Kristallplättchen liegt, das mit seinen Nachbarn über zwei Kontaktdrähte verbunden ist. Bei mechanischer Anregung eines Stegreiters erzeugt dann nur *ein* Kristallplättchen elektrische Signale, die anderen 5 Kristallplättchen wirken als elektrische Last. Für ein derartiges saiten-spezifisches Kristallplättchen ergibt die Berechnung:

$$\alpha = 0,28 \text{ N/V}, \quad C_K = 161 \text{ pF}, \quad s_K = 9,7 \cdot 10^8 \text{ N/m}, \quad s_R = 7,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}.$$

Mit diesen Daten kann das in Abb. 6.8 vorgeschlagene Modell folgende gemessenen Größen erklären: Die elektrische Impedanz (als reine Kapazität), die mechanische Impedanz (als reine Feder), das in Abb. 6.5 dargestellte Impedanzverhalten beim Aufsetzen einer Masse, das frequenzunabhängige Übertragungsverhalten. Nicht nachgebildet werden die in Abb. 6.7 auftretenden Resonanzspitzen. Wie belastbar diese Modellierung ist, wird sich zeigen, wenn im Wandler die Signalflussrichtung umgedreht wird, wenn also beim Anlegen einer elektrischen Spannung aus einem Sensor ein Aktor entsteht. Auch für diesen Fall muss dann das o.a. Modell mit denselben Parametern die Messergebnisse erklären können (Kap. 6.5).