

Der Elastizitätsmodul  $E^E$  beschreibt die mechanische Elastizität des Piezomaterials für vollständige Entkopplung, wie sie für jedes  $\alpha$  erreichbar ist, wenn die Piezoelektroden kurzgeschlossen werden. Bei elektrischen Messungen ist Entkopplung für jedes  $\alpha$  erreichbar, wenn die Bewegung unterbunden wird (Gedankenexperiment): Für  $v = 0$  wird der Sekundärstrom des Wandlers zu null, sodass nur mehr die reine Kristallkapazität  $C_K$  übrig bleibt. In der Literatur wird dieser Sonderfall mit hochgestelltem S gekennzeichnet (festgeklemmte mechanische relative Verformung  $S$ ). Typische Werte für die relative Dielektrizitätskonstante sind  $\varepsilon_r^S = 1000 \dots 4000$ . Hiermit berechnet sich die Kristallkapazität  $C_K$  zu:

$$C_K = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^S \cdot S / h; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm} \quad \text{Kristallkapazität}$$

Beim normalen (nicht festgebremsten) Betrieb misst man auf der elektrischen Seite zwei parallel liegende Kapazitäten: Die *Kristallkapazität*  $C_K$ , und die von der mechanischen Seite verursachte *Federkapazität*  $C_s$ :

$$C_s = \alpha^2 / s_K \quad \text{Federkapazität}$$

**Zusammengefasst:** Bei elektrischem Leerlauf (auf der elektrischen Seite ist nur  $C_K$  wirksam) misst man auf der mechanischen Seite zwei Steifigkeiten:  $s = s_K + s_C$ . Bei mechanischem Leerlauf (auf der mechanischen Seite ist nur  $s_K$  wirksam) misst man auf der elektrischen Seite zwei Kapazitäten:  $C = C_K + C_s$ . Die von der jeweils anderen Seite durch den Wandler transformierte Blindlast ergibt sich zu:  $C_s / C_K = s_C / s_K \approx 50 \dots 100\%$ . Bei guter elektromechanischer bzw. mechanoelektrischer Kopplung\* kann  $C_s \approx C_K$  gesetzt werden; je nach verwendetem Piezo-Material sind auch kleinere Werte möglich.

## 6.2 Elektrische Belastung

Eine leerlaufende Wandlerklemme stellt eine **Idealisierung** dar, die in dieser Form nicht vorkommt. Beim piezoelektrischen Gitarren-Tonabnehmer ist die elektrische Seite durch das (kapazitiv wirkende) Kabel und den Verstärker-Eingangswiderstand belastet, auf der mechanischen Seite sind der Stegsattel und die Saiten zu berücksichtigen. Als mechanische Quelle soll zunächst eine eingeprägte Kraft  $\underline{F}$  angenommen werden. Zur Berechnung der Ausgangsspannung ist es nun am einfachsten, sowohl diese Kraft als auch die Kristallsteifigkeit auf die elektrische Seite zu transformieren [3]:

$$\underline{U} = \underline{F} / \alpha \quad C_s = \alpha^2 / s_K \quad \text{transformierte Größen}$$

Durch diese Transformation erhält man ein rein elektrisches Netzwerk, das mithilfe der bekannten Netzwerkanalyse-Verfahren untersucht werden kann. Von besonderer Bedeutung ist die Wirkung des elektrischen Lastwiderstandes auf die **Übertragungsfunktion**  $\underline{H}$ . Der Eingangswiderstand eines Gitarrenverstärkers beträgt typisch 1 M $\Omega$ ; demgegenüber kann ein Line-Eingang mit z.B. 50 k $\Omega$  deutlich niederohmiger sein. Der kapazitive Innenwiderstand des Tonabnehmers bildet zusammen mit dem Verstärker-Eingangswiderstand einen Hochpass erster Ordnung (**Abb. 6.2**).

\* Kopplungsfaktor:  $k^2 = W_{\text{mech}} / W_{\Sigma} = C_s / (C_s + C_K) = 0,3 \dots 0,5$ .

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  $2 \text{ k}\Omega$ .

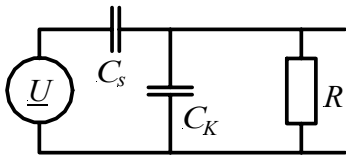


Abb. 6.2: Wandler-Ersatzschaltbild

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.

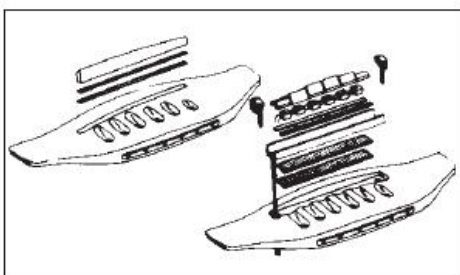


Abb. 6.3: Zwei verschiedene Piezo-Tonabnehmer (Ovation).