6. Piezo-Tonabnehmer

Um 1880 entdeckt der französische Physiker Pierre Curie den **Piezoeffekt**: Beim Verformen spezieller Kristallplättchen entsteht an deren Oberfläche eine elektrische Spannung. Montiert man ein derartiges Kristallplättchen an die Gitarrendecke oder den Gitarrensteg, so führen Schwingungen der Gitarre zu Kristallverformungen und damit zu elektrischen Signalen. Im Gegensatz zum elektromagnetischen Wandlungsprinzip wird hierbei nicht die originäre Saitenschwingung abgegriffen, sondern deren Wirkung auf schwingungsfähige Gitarrenteile – mit dem Vorteil, dass nun auch die Schwingungen nichtmagnetischer Saiten erfasst werden können. Piezo- und Magnet-Tonabnehmer unterscheiden sich aber nicht nur im Wandlungsprinzip, sondern auch in ihrer Übertragungsfunktion: Der Magnet-Tonabnehmer erfasst die Schwinggeschwindigkeit (Schnelle v) der Saite an einem Punkt (Singlecoil) bzw. an zwei Punkten (Humbucker) mit positionsabhängigen Kammfilterwirkungen (Kap. 2.8). Der Piezo-Tonabnehmer wandelt hingegen entweder die im Steg wirkende Kraft in elektrische Signale (sog. Stegeinlagen-Tonabnehmer), oder er erfasst die Bewegung eines kleinen Bereichs der Gitarrendecke (Decken-Tonabnehmer). In den Sechzigerjahren des 20. Jh. begannen Decken-Tonabnehmer von Barcus-Berry als Nachrüstsatz für Akustik-Gitarren den Markt zu erobern, ab Werk rüstete vor allem Ovation seine Westerngitarren mit Stegeinlagen-Tonabnehmer aus. Inzwischen enthalten auch einige Massivgitarren einen Piezo-Tonabnehmer als Alternative oder Ergänzung zum Magnet-Tonabnehmer.

6.1 Der Piezo-Effekt

Wirken externe Kräfte auf spezielle Kristalle ein, so entsteht aufgrund von Ladungsverschiebungen zusätzlich zur Deformation eine elektrische **Polarisation**. Die beschreibenden piezoelektrischen Materialparameter haben eigentlich Tensorcharakter, weil sowohl die mechanische als auch die elektrische Spannung dreidimensional-räumlich wirken. Beim Gitarren-Tonabnehmer ist aber eine vereinfachte Beschreibung ausreichend, bei der eine skalare Materialgröße sowohl Kraft und elektrische Spannung, als auch Schnelle und Strom miteinander im Sinne eines elektromechanischen Wandler-Zweitors verknüpft.

Die meisten Piezo-Sensoren werden heute aus künstlich polarisierten ferroelektrischen Mischkristallen (**Blei-Zirkonat/Titanat**) hergestellt, die durch unterschiedliche Dotierungen und Zusammensetzungen optimal an die spezifischen Anwendungen angepasst werden können. Daneben kommen auch **PVDF-Folien** (=Polyvinylidenfluorid) zum Einsatz. Die aus Mischkristallen aufgebauten Piezokeramiken müssen nach der Herstellung (Sintern, Schleifen, Metallisieren) in einem starken elektrischen Gleichfeld bei hoher Temperatur polarisiert werden. Im Laufe der Jahre nimmt diese Polarisation zwar wieder ab, aber nur in relativ unbedeutendem Ausmaß, so dass die Langzeitstabilität in der Regel sehr gut ist. Bei thermischer oder mechanischer Überlastung kann es allerdings zu einer wesentlichen Verschlechterung des Übertragungsverhaltens kommen. Im eingebauten Zustand sind derartige irreversible Änderungen aber nicht zu befürchten.

Die **Wandlerkonstante** α eines Piezo-Tonabnehmers hängt von der Geometrie des Piezoplättchens (Fläche *S*, Dicke *h*) und der materialspezifischen **Piezokonstante** *e* ab. Beim freien Piezo-Dickenschwinger erhält man zwischen den parallel wirkenden mechanischen und elektrischen Größen einfache Zusammenhänge [3]:

$$\underline{F} = \alpha \cdot \underline{U}; \qquad \underline{I} = \alpha \cdot \underline{v}; \qquad \alpha = e \cdot S / h$$ Wandlergleichungen

Die am Kristall entstehende Spannung $\underline{U}$ ist proportional zur Kraft $\underline{F}$, der Strom $\underline{I}$ ist proportional zur Schnelle $\underline{v}$; Proportionalitätskoeffizient ist die Wandlerkonstante α. Die Piezokonstante *e* lässt sich fertigungstechnisch in einem weiten Bereich gestalten, typische Werte sind e = 20 ... 50 N/Vm. Ein erster Orientierungswert für α ist 1 N/V.

Der Piezokristall wandelt aber nicht nur mechanische in elektrische Größen, er enthält zudem mechanische und elektrische Elemente. Vereinfacht müssen auf der mechanischen Seite eine **Steifigkeit** *s*, und auf der elektrischen Seite eine **Kapazität** *C* berücksichtigt werden. Dass ein glashartes Keramikplättchen, dessen Elastizitätsmodul um $5 \cdot 10^{10}$ Pa beträgt, eine hohe Steifigkeit aufweist, überrascht nicht. Ein wesentlicher Teil der Steifigkeit wird jedoch durch die elektromechanische Kopplung verursacht: Aus der Kondensatorgleichung $I = C \cdot dU/dt$ erhält man über die Wandlergleichungen:

$$\alpha \cdot v = C_K \cdot \dot{F} / \alpha \;\rightarrow\; \alpha^2 = C_K \cdot \dot{F} / v = C_K \cdot s_C \;\rightarrow\; s_C = \alpha^2 / C_K$$

Die (elektrisch verursachte und auf die mechanische Seite gewandelte) Steifigkeit s_C trägt wesentlich zur Gesamtsteifigkeit bei, die als Summe von *Kristallsteifigkeit* s_K und *Kondensatorsteifigkeit* s_C gebildet wird: $s = s_K + s_C$. Diese Summe tritt auch bei der **Energiebetrachtung** auf: Beim Zusammendrücken eines Kristallplättchens wird (auch ohne Piezoeffekt) potentielle Federenergie gespeichert. Durch den Piezoeffekt entsteht an dem Kristallplättchen (Dielektrikum mit hoher Dielektrizitätskonstante) eine elektrische Spannung und somit potentielle elektrische Feldenergie, die von der mechanischen Seite geliefert wird und die mechanische Quelle wie eine zusätzliche Feder belastet.

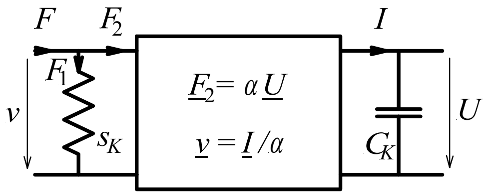

Abb. 6.1: Ersatzschaltbild des Piezowandlers. Die antreibende Kraft $\underline{F}$ teilt sich in $\underline{F}_1$ und $\underline{F}_2$.

Abb. 6.1 zeigt das elektromechanische Wandler-Ersatzschaltbild. Die Teilkräfte $\underline{F}_1$ und $\underline{F}_2$ wirken parallel, die Bilddarstellung (skalares Kraftflussdiagramm) nimmt keine Rücksicht auf Raumrichtungen. Bei sekundärem Kurzschluss (U = 0) wird auch die Eingangskraft des Wandlers zu null (F_2 = 0), damit ist s_K die allein wirkende Feder. Dieser spezielle Lastfall wird in der Literatur mit hochgestelltem E gekennzeichnet (festgeklemmte Feldstärke *E*). Der unter dieser Randbedingung gemessene **Elastizitätsmodul** wird symbolhaft mit E^{E} bezeichnet (das hochgestellte E ist kein mathematischer Exponent). Hiermit ergibt sich s_K zu:

$$s_K = E^{\mathrm{E}} \cdot S / h$$ Kristallsteifigkeit

Übliche Werte sind: $E^{\mathrm{E}} = 5 \cdot 10^{10}$ Pa … $8 \cdot 10^{10}$ Pa (Elastizitätsmodul ohne Piezoeffekt).

© M. Zollner 2005

Der Elastizitätsmodul E^{E} beschreibt die <u>mechanische</u> Elastizität des Piezomaterials für vollständige Entkopplung, wie sie für jedes α erreichbar ist, wenn die Piezoelektroden kurzgeschlossen werden. Bei <u>elektrischen</u> Messungen ist Entkopplung für jedes α 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 $\varepsilon_r^{\mathrm{S}}$ = 1000 … 4000. Hiermit berechnet sich die Kristallkapazität C_K zu:

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

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*:

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

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: $C_s / C_K = s_C / s_K \approx 50...100\%$. 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]:

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

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 MΩ; demgegenüber kann ein Line-Eingang mit z.B. 50 kΩ deutlich niederohmiger sein. Der kapazitive Innenwiderstand des Tonabnehmers bildet zusammen mit dem Verstärker-Eingangswiderstand einen Hochpass erster Ordnung (**Abb. 6.2**).

♣ Kopplungsfaktor: $k^2 = W_{\mathrm{mech}} / W_\Sigma = C_s / (C_s + C_K) = 0{,}3 \ldots \underline{0{,}5}$.

© M. Zollner 2005