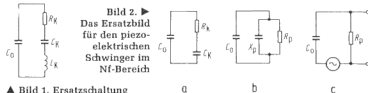


Tonabnehmer und Mikrofone mit piezoelektrischen Systemen

1 Die Ersatzschaltung eines piezoelektrischen Schwingers

Sie ist in Bild 1 dargestellt. Darin bedeuten:
 L_K die elektrische Ersatzgröße für die schwingende Masse
 C_K die elektrische Ersatzgröße für die Elastizität
 R_K die elektrische Ersatzgröße für die mechanischen Verluste

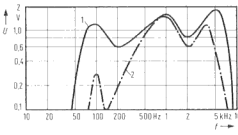
Ihre Werte sind nur indirekt bestimmbar. C_0 dagegen ist eine elektrische Größe, sie gibt die Kapazität des Schwingers weiter unterhalb seiner Resonanzfrequenz an, und sie ist durch die Größe der Elektrodenflächen, die Dicke und Dielektrizitätskonstante des piezoelektrischen Elements gegeben (s. a. FTA Fi 82). Aus diesen Größen bestimmt sich eine Serien- und eine Parallelresonanz. Beide sind sehr schmalbandig und liegen bei hohen Frequenzen. Der elektromechanische Wandler für den (großen) Tonfrequenzbereich arbeitet weit unterhalb dieser Resonanzstellen. Der Blindwiderstand von L_K ist deshalb vernachlässigbar. Es bleiben als frequenzabhängige Größen nur C_K und C_0 zu betrachten, von denen $C_K < C_0$ ist. Das Ersatzbild für den so betriebenen piezoelektrischen Schwinger zeigt Bild 2a.



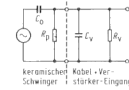
▲ Bild 1. Ersatzschaltung eines piezoelektrischen Schwingers

Die Serienschaltung von $X_K = \frac{1}{\omega C_K}$ und R_K läßt sich nach Bild 2b in eine Parallelschaltung umformen (ELEKTRONIK-Arb.-Bl. Bd. 5, Uf 11). Darin ist $X_p = \frac{R_K^2 + X_K^2}{X_K} \cdot R_K$ ist sehr klein, somit ist $X_p \approx X_K$ und die Gesamtkapazität $C_0 + C_p \approx C_0 + C_K \approx C_0$. Für R_p gilt: $R_p = \frac{R_K^2 + X_K^2}{R_K}$, da X_K sehr klein ist, wird R_p sehr groß. Man erhält also als Ersatzschaltung Bild 2c.

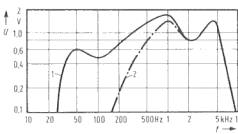
Daß nun, wie Bild 2b zeigt, R_p den Ausgangsklemmen parallel liegt und C_0 den Innenwiderstand der Quelle verkörpert, ergibt sich aus den Messungen des Frequenzganges. Mit kleiner werdendem C_0 vergrößert sich der Amplitudenabfall nach tiefen Frequenzen zu (Bild 3). Derselbe Effekt tritt auch ein,



◀ Bild 3. Der Einfluß der Größe der Kapazität C_0 des piezoelektrischen Elements auf den Amplitudenverlauf über der Frequenz (schematisch).
 Kurve 1: $C_0 = 3,5 \text{ nF}$,
 Kurve 2: $C_0 = 1 \text{ nF}$



▲ Bild 5. Ersatzschaltung eines piezoelektrischen Elements für den NF-Bereich unter Einschluß von Kabel und Verstärker-Eingang
 ◀ Bild 4. Der Einfluß eines dem Ausgang eines piezoelektrischen Elements parallel geschalteten Widerstands auf den Amplitudenverlauf über der Frequenz (schematisch).
 Kurve 1: $R_p \infty$, Kurve 2: $R_p = 100 \text{ k}\Omega$



wenn R_p durch zusätzliche Widerstände zwischen den Ausgangsklemmen verringert wird (Bild 4).

Zu dem Ersatzschaltbild (Bild 2a) kommt man auch aufgrund folgender einfacher Überlegung. Das piezoelektrische Element stellt weit unterhalb seiner elektrischen Resonanz eine Kapazität dar. In ihm wird durch Druck, Biegung usw. eine EMK erzeugt. Für diese ist also die Kapazität der innere Widerstand.

Will man den Amplitudengang über der Frequenz am Verstärkereingang untersuchen, müssen der Ersatzschaltung noch die Werte für die Eingangsimpedanz des Verstärkers und die Kabelkapazität hinzugefügt werden. Dann erhält man Bild 5.

Aus dieser erweiterten Ersatzschaltung lassen sich nun auch die elektrischen Bedingungen ablesen, die ein piezoelektrischer Schwinger bzw. die Eingangsschaltung erfüllen soll. Für eine große Nutzspeisung am Verstärkereingang soll sein: C_0 groß, R_p groß, R_v groß, C_v klein.

Man sieht ferner, daß bei großen Werten für R_v und R_p die Frequenzabhängigkeit kleiner und gleichzeitig die Nutzamplitude größer wird.

2 Schwingungsform, Material des Wandlers

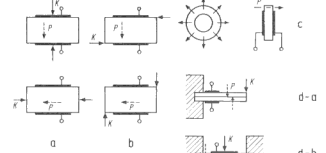
2.1 Schwingungsformen

Von den verschiedenen Schwingungsformen Dicken/Dehnungs-Schwinger Bild 6a Scherschwinger Bild 6b Planarschwinger Bild 6c und Biegeschwinger Bild 6d wird für Schallwandler normalerweise der Biegeschwinger benutzt (in der Form 6 d-a für Tonabnehmer, in der Form 6 d-b für Mikrofone).

Das ergibt sich aus folgender Überlegung: Die Nadellösung den sich ändernden Rillenamplituden unterschiedlicher Größe exakt folgen können. Das Wandlerelement seinerseits muß auch die kleinen Auslenkungen unverzerrt in Spannungsschwankungen umsetzen. Die erste genannte Forderung ist bei den heutigen niedrigen Plattenteller-Drehzahlen und den kleinen Rillenabständen – die Auslenkungen betragen nur wenige tausendstel Millimeter – nur zu erfüllen, wenn das System eine geringe Rückstellkraft (Steifigkeit) oder, anders ausgedrückt, eine hohe Nachgiebigkeit (compliance) aufweist¹⁾. Man rechnet mit einer Nachgiebigkeit von etwa $\frac{1 \mu\text{m}}{0,2 \text{ mN}} = \frac{5 \mu\text{m}}{1 \text{ mN}}$. Das ist aber nur mit Biegeschwingern zu erreichen.

Ein solcher Biegeschwinger wird aus zwei dünnen Streifen zusammengeklebt. (Daher auch der Name Bimorph-Streifen.) Eine in gleicher Richtung ausgeübte Kraft bewirkt demnach in dem einen Streifen eine Zugspannung, d. h. eine Dehnung,

¹⁾ Siehe Anhang.



▲ Bild 6. Schwingungsformen piezoelektrischer Wandler, P = Polarisationsrichtung, a = Dicken/Dehnungs-Schwinger, b = Scherschwinger, c = Planarschwinger, d = Biegeschwinger

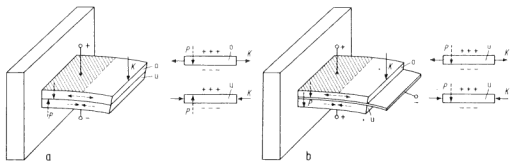


Bild 7. Der Biegeschwinger ohne Zwischenelektrode (a) und mit Zwischenelektrode (b)

im anderen eine Druckschwingung, d. h. ein Zusammendrücken (Bild 7).

Je nach Richtung der Polarisierung und der angelegten Kraft kann an den Elektroden eine nach Größe und Polung unterschiedliche Spannung abgenommen werden. Bei dem Aufbau nach Bild 7a – die beiden zu einem Element gehörenden Streifen sind im Bild rechts einzeln dargestellt – müssen die Keramikplättchen entgegengesetzt polarisiert sein. Bei dem Aufbau nach Bild 7b, wo die zwischen den beiden Streifen liegende Metallfolie eine Belegung darstellt, ist gleichsinnige Polarisation erforderlich.

2.2 Kristall- und keramische Systeme

Bei den piezoelektrischen Elementen unterscheidet man zwischen Kristall- und keramischen Systemen. Im ersten Fall benutzt man Seignettesalz (weinsaures Kalium-Natrium-Tartrat) $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, im zweiten Fall im wesentlichen Blei-Zirkonat-Titanat, aber auch Kalium-Natrium-Niobat. Die verbesserten Eigenschaften der Piezokeramik, ihre leichte Formbarkeit, gute Temperaturbeständigkeit ermöglichen das Vordringen der keramischen Elemente.

3 Vergleich zwischen piezokeramischen und magnetischen Tonabnehmersystemen

Der Vorteil beider (Kristall wie Keramik) liegt in der hohen Ausgangsspannung gegenüber den elektromagnetischen/elektrodynamischen Systemen. Das zeigen folgende Werte für den Übertragungsfaktor [3]:

(ausgedrückt in U/δ = Spannung : Spitzenschnelle)	
Magnet-System	> 0,35... > 0,8 mV/cm · s ⁻¹ bei 1 kHz
Keramik-System	> 20... > 65 mV/cm · s ⁻¹ bei 1 kHz
Kristall-System	> 70 mV/cm · s ⁻¹ bei 1 kHz

Im Vergleich dazu beträgt die Nachgiebigkeit [3]:
ausgedrückt in Al/P = Auslenkung : Kraft

bei Magnet-Systemen	10...40 cm/dyn \approx 1...4 $\mu\text{m}/0,1$ mN
bei Keramik-Systemen	4...12 cm/dyn \approx 0,4...1,2 $\mu\text{m}/0,1$ mN
bei Kristall-Systemen	3,5...4,5 cm/dyn \approx 0,35...0,45 $\mu\text{m}/0,1$ mN

Die Nachgiebigkeit ist aber der entscheidende Faktor bei der Bemessung der Auflagekraft. Sie beträgt [3]:

bei Magnet-Systemen	1...2,5 p \approx 10...25 mN
bei Keramik-Systemen	2,5...4 p \approx 25...40 mN
bei Kristall-Systemen	3,5...4,5 p \approx 35...45 mN

Der Innenwiderstand

Für die verschiedenen Tonabnehmerarten gelten folgende Richtwerte (bei 1 kHz) [3]:

Magnet-Tonabnehmersystem	R_i	2...5,5 k Ω
Keramik-Tonabnehmersystem	R_i	40...160 k Ω
Kristall-Tonabnehmersystem	R_i	200 k Ω

Die angegebenen Werte für die verschiedenen Tonabnehmersysteme machen deutlich, daß die Qualitätsunterschiede zwischen den magnetischen und keramischen Elementen durch die stetige Weiterentwicklung der Piezokeramik immer kleiner geworden sind. Zu dem Vorteil der höheren Ausgangsspannung bei den keramischen Elementen kommt noch hinzu,

daß eine besondere Entzerrung (z. B. durch einen Entzerrer-Vorverstärker) überflüssig ist, denn bei dem keramischen Tonabnehmer ist die Ausgangsspannung nur von der Rillenamplitude abhängig. Bei der Schallplattenaufnahme wird auf annähernde Amplitudenkonstanz – bezogen auf gleichen Schalldruck – entzerrt.

Der magnetische Tonabnehmer spricht aber nicht auf die Auslenkungsamplitude sondern auf die Geschwindigkeit der bei Auslenkung entstehenden Feldänderung an, so daß tiefe Frequenzen angehoben werden müssen.

Beispiele: Tonabnehmer T 260 [5]

Ausgangsspannung: 0,8...1,2 V

Auflagegewicht: 50 mN

Übersprechdämpfung bei 1000 Hz > 20 dB

Übertragungsbereich: 40...12.500 Hz

Differenz der Übertragungsmaße beider Kanäle < 2 dB

Fernsprechmikrofon [6]

Das Kohlekörnermikrofon hat sich in der Fernsprechtechnik sehr lange gehalten. Jetzt sind Piezomikrofone für die Sprechkabine entwickelt worden, die wesentlich bessere Übertragungseigenschaften als die Kohlekörnermikrofone aufweisen [Ts 71 von Siemens].

Vorteile gegenüber dem Kohlekörnermikrofon:

Die Rauschspannung ist um den Faktor 20 kleiner (statt 3 mV nur 0,15 mV).

Der Klirrfaktor (bei Schalldrücken um 10 μbar) ist um den Faktor 15 kleiner (statt 15 % nur 1 %),
ferner kleineres Gewicht, kleineres Einbaувolumen.

Der Schallwandler besteht aus einer großflächigen, dünnen Schicht aus Blei-Zirkon-Titanat, die auf eine Aluminiumplatte aufgeklebt ist.

4 Anhang

Wie der Vergleich in Abschnitt 3 zeigt, haben die magnetischen Tonabnehmer die kleinste Rückstellkraft. Denn bei den piezoelektrischen Systemen ist nicht nur die Lagergröße zu überwinden, sondern auch noch die Verbiegearbeit aufzubringen.

Die von der Schallrille bewirkte Auslenkkraft ist der Rückstellkraft proportional. Damit sie geleistet werden kann, muß das Tonarmauflagegewicht auf die Rückstellkraft abgestimmt sein.

Bei der Rückstellkraft unterscheidet man zwischen der statischen und dynamischen Rückstellkraft:

Die statische Rückstellkraft (Reziprokwert: Nachgiebigkeit, compliance) gibt an, welche Kraft notwendig ist, um die Nadelspitze um einen bestimmten Betrag aus ihrer Ruhelage auszulenken. Bei Stereo-Systemen findet man dafür zwei Angaben: für die horizontale und für die vertikale Auslenkung.

In der dynamischen Rückstellkraft ist sowohl die statische Rückstellkraft als auch die frequenzabhängige, durch die schwingende Masse des Systems an der Nadelspitze entstehende Wechselkraft enthalten.

Literatur

- [1] Beernald, P., und Keller, H.: Über piezoelektrische Kristallelemente für elektroakustische Zwecke. FTM, 1938, H. 11, S. 345 (zur Verfügung gestellt von Fa. Dr. Steeg u. Reuter).
- [2] Koch, I.: Piezoelektrischer Wandler. Valvo GmbH, Hamburg.
- [3] Druckschrift und Datenblätter von Fa. Dual (Gebr. Steidinger).
- [4] ELEKTRONIK-Arbeitsblatt Nr. 75. ELEKTRONIK 1973, Heft 7.
- [5] Behnke, I.: Piezoelektrischer Tonabnehmer T 260, FUNKSCHAU 1973, Heft 14, S. 302.
- [6] Piezokeramik für Fernsprechmikrofone. FUNKSCHAU 1972, Heft 16, S. 646.
- [7] Loescher, F. A.: Neuere Entwicklungstendenzen auf dem Tonabnehmergebiet. FUNKSCHAU 1965, Heft 15, S. 413.