

Piezo- und pyroelektrischer Effekt

1 Wirkungsweise und Anwendung

Die Piezoelektrizität wurde im Jahre 1881 durch die französischen Physiker Pierre und Paul Jacques Curie entdeckt: bei mechanischer Belastung bestimmter Kristalle treten elektrische Ladungen auf. Diese Erscheinung nennt man den **direkten piezoelektrischen Effekt**. Dieser Effekt ist umkehrbar: wird ein piezoelektrischer Stoff in ein elektrisches Feld gebracht, so dehnt er sich aus oder zieht sich zusammen. Man spricht von **Elektrostriktion** oder vom reziproken piezoelektrischen Effekt.

Bei den piezoelektrisch wirksamen dielektrischen Stoffen (Einkristalle, wie z.B. Lithiumtantalat LiTaO_3 , sowie polykristalline Keramiken wie Bariumtitanat BaTiO_3 , Bleititanat PbTiO_3 , Bleizirkonat PbZrO_3) sind die positiven und negativen Ladungen unsymmetrisch verteilt: sie sind elektrisch polarisiert, dh. der Schwerpunkt der positiven Ladungen fällt nicht mit dem der negativen zusammen. Werden diese Stoffe deformiert, so ändert sich ihre Polarisation¹. Dadurch werden an der Oberfläche Ladungen frei.

Analog zu den ferromagnetischen Stoffen, bei denen ab einer bestimmten Temperatur die Magnetisierung schlagartig verschwindet, verschwindet auch die Polarisation oberhalb der sogenannten **Curie-Temperatur**.

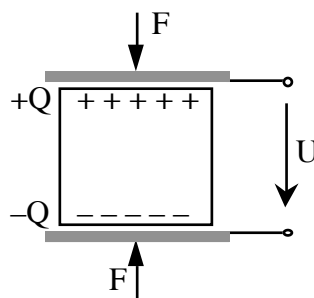
In der Messtechnik spielen die piezoelektrischen Körper als mechanisch-elektrische Energiewandler eine wichtige Rolle: Kraft- und Druckmessung, Beschleunigungsmessung. Umgekehrt, wird auch der reziproke piezoelektrische Effekt für die elektrisch-mechanische Energiewandlung eingesetzt: Erzeugung von Hochspannung (Gasanzünder), Schwingquarz, Ultraschallerzeugung, Mikromotoren.

Die Polarisation eines dielektrischen Körpers nimmt nicht nur bei mechanischer Verformung andere Werte an, sondern auch bei Temperaturänderungen. Dieser Effekt wird als **pyroelektrischer**² **Effekt** bezeichnet und wurde erst im Jahre 1969 bei Polyvinylidendifluorid³ (PVDF) entdeckt. Das PVDF lässt sich in Folien (Piezofilme) gießen und anschliessend in verschiedenen Richtungen polarisieren.

Der pyroelektrische Effekt ermöglicht die berührungslose Detektion einer Temperaturänderung im IR-Bereich: z.B. kann durch Erfassen der Wärmestrahlung von Personen deren Anwesenheit in einem Raum detektiert werden. Die Piezofilme können teilweise Piezokeramiken ersetzen, da der pyroelektrische gleichzeitig mit dem piezoelektrischen Effekt auftritt.

2 Elektrisches Verhalten und Eigenschaften

Als Beispiel für einen piezoelektrischen Kraftaufnehmer wird eine in einer bestimmten Richtung herausgeschnittene Quarzscheibe betrachtet. Die obere und untere Schnittfläche sind metallisiert und bilden die Elektroden.



Wirkt eine Kraft F auf die Quarzscheibe, so wird die Ladung Q frei:

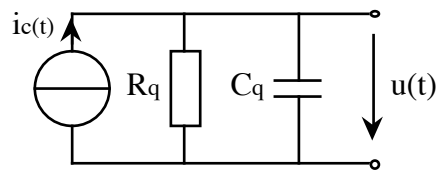
$$Q = k \cdot F$$

¹ Bei Quarz (SiO_2) kommt es zur Polarisation durch Störung der Symmetrie. Es gibt bei Quarz also keine bereits im unbelasteten Zustand vorhandene Polarisation.

² „πρ“ (pyr), griechisch: Feuer

³ Ein organisches Polymer. Mittlerweile gibt es eine ganze Palette von Copolymeren von VF_2 (Difluorethan) mit VF (Vinylfluorid), VF_3 (Trifluorethylen) oder VF_4 (Tetrafluorethylen) die noch stärkere pyroelektrische Eigenschaften aufweisen als PVDF.

k ist dabei die **piezoelektrische Empfindlichkeit** in der betrachteten Richtung. Das Ersatzschaltbild eines derartigen Quarzes ist eine Stromquelle mit dem Kurzschlussstrom $i_c = dQ/dt = k \cdot dF/dt$ und dem Innenwiderstand R_q parallel zur Kapazität C_q .



Figur Elektrisches Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Aufnehmers

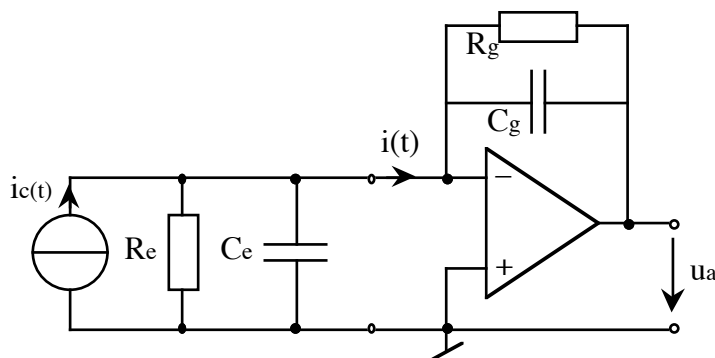
Beispiel:

Ein Quarz mit der Empfindlichkeit $k = 2.3 \cdot 10^{-12} \text{ As/N}$, der Fläche $A = 10 \text{ cm}^2$, der Dicke $d = 1 \text{ mm}$, dem spezifischen Widerstand $\rho = 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, der relativen Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 5$ und belastet mit einer Kraft von 10^3 N

- hat den Innenwiderstand $R_q = \rho \frac{d}{A} = 10^{12} \Omega$
- die Kapazität $C_q = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 44 \text{ pF}$
- liefert die Ladung $Q_0 = k \cdot F_0 = 2.3 \cdot 10^{-9} \text{ As}$
- und die Spannung $U_0 = \frac{Q_0}{C_q} = 52 \text{ V}$

Die durch die wirkende Kraft getrennten Ladungen bleiben nicht beliebig lange auf den Elektroden sitzen, sondern versuchen sich über den Innenwiderstand R_q auszugleichen. Für das Beispiel oben ergibt sich somit eine Entladezeitkonstante von $R_q \cdot C_q = 44 \text{ s}$, sofern kein Messgerät an den Quarz angeschlossen ist über das der Entladevorgang noch schneller erfolgen kann. Um die Spannung messen zu können, muss also ein Elektrometervverstärker verwendet werden, dessen Eingangswiderstand gross gegenüber dem Innenwiderstand des Quarzaufnehmers sein muss.

Soll ausserdem die Spannung proportional zur anstehenden Kraft erhalten bleiben, so muss ein Ladungsverstärker verwendet werden:



Figur Piezoelektrischer Aufnehmer mit Ladungsverstärker

Der Ersatzwiderstand R_e besteht aus dem Detektor- und den Isolationswiderstand des Anschlusskabels $R_e = R_q \parallel R_K$ und die Ersatzkapazität C_e enthält die Detektor- und die Kabelkapazität $C_e = C_q + C_K$.

Damit erhält man für die Ausgangsspannung u_a :

$$u_a(t) = -\frac{Q_0}{C_e} \cdot e^{-\frac{t}{R_e C_g}} = -\frac{k \cdot F_0}{C_e} \cdot e^{-\frac{t}{R_e C_g}} \quad \text{für } t > 0$$

Für genügend grosse Werte von R_g kann die Kondensatorladung nicht mehr abfliessen und die Spannung bleibt praktisch beliebig lange an.

Tabelle: Eigenschaften einiger piezo- und pyroelektrischen Materialien bei Raumtemperatur

Material	Curie Temperatur	Dielektrizitätszahl ϵ_r	piezoelektrische Empfindlichkeit k (Längseffekt d_{33})	pyroelektrische Empfindlichkeit k_Q
	in °C		in $10^{-12} \text{ As} \cdot \text{N}^{-1}$	in $10^{-4} \text{ As} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Quarz	—	4.5	2.3	—
LiTaO ₃	618	45	5.7	2
BaTiO ₃	120	1000	374	4
PVDF	80	12	30	0.4

Ein pyroelektrischer Sensor enthält ein dünnes pyroelektrisches Plättchen, das auf der Ober- und Unterseite metallisiert ist und mit Anschlüssen versehen ist. Erwärmt sich das Plättchen um die Temperatur ΔT , so wird die Ladung ΔQ frei. Mit A als Fläche des Plättchens und k_Q als **Ladungsempfindlichkeit** ergibt sich:

$$\Delta Q = k_Q \cdot A \cdot \Delta T$$

Der Sensor liefert primär eine Ladung. Die Ersatzschaltung eines pyroelektrischen Aufnehmers ist die selbe wie für einen piezoelektrischen. Ein Plättchen der Dicke d und der Dielektrizitätszahl ϵ_r hat die Kapazität

$$C_q = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Die Ladung erzeugt bei dieser Kapazität die Spannung

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_q} = k_Q \cdot A \cdot \Delta T \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r A} = \frac{k_Q}{\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot d \cdot \Delta T$$

Nach dieser Beziehung liefert also eine 30 μm dicke Scheibe aus LiTaO₃ der in der Tabelle angegebenen Empfindlichkeit bei einer Temperaturänderung von 1 K die Spannung 15 V.