

Aufbau und Eigenschaften piezokeramischer Stapelaktoren

Physikalische Grundlagen

Die Funktion piezokeramischer Aktoren beruht auf der Deformation piezokeramischer Materialien (z.B. Blei-Zirkonat-Titanat) unter Einwirkung elektrischer Felder (reziproker piezoelektrischer Effekt).

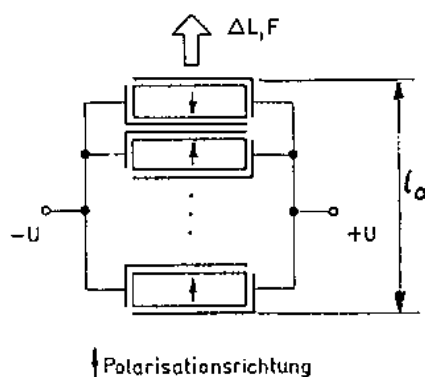
Wird an gepoltes piezokeramisches Material eine Spannung in Polungsrichtung angelegt, so wird dieses eine Ausdehnung und senkrecht dazu eine Kontraktion ausführen. Entsprechend dem eingesetzten Material und dessen piezoelektrischer Deformationskonstanten d werden relative Dehnungen Δl um 0,15 % erreicht.

$$\Delta l = d \cdot E \cdot l_0 \quad (1)$$

d - piezoelektrische Deformations(Ladungs-)konstante, *Piezomodul*

E - elektrische Feldstärke

l_0 - Baulänge des Aktors



Der Dehnungseffekt ist also proportional der Feldstärke und der Gesamtlänge des Bauelements. Im Gegensatz zum konventionellen Einsatz der Keramiken als Schwingler liegen die Betriebsfeldstärken zum Erreichen hoher Deformationseffekte im Bereich 2 kV/mm, darüber tritt Sättigungsverhalten auf.

Feldstärken dieser Größenordnung werden auch zum Polarisieren (Formieren) der Keramiken angewandt. Man kann also beim Aktoreinsatz der Piezokeramiken von elektrischen Großsignalbetrieb sprechen.

Daraus ergeben sich erhebliche Abweichungen von den üblicherweise angegebenen charakteristischen Materialkonstanten (Kleinsignalkennwerte d , k_{eff} , ϵ).

Bild 1

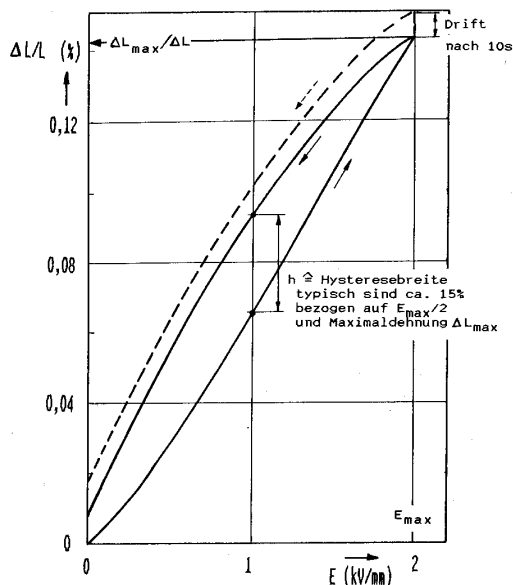
Um hohe Dehnungen bei handhabbaren Betriebsspannungen erzielen zu können, ist eine Vervielfachung des Effekts an einer Einzelscheibe erforderlich. Dies erfolgt durch Stapelung (mechanische Reihenschaltung) einer Vielzahl von Einzelscheiben und deren elektrische Parallelschaltung zu einem Stapelaktor.

Bei einer üblichen Scheibendicke von 0,5 mm werden Betriebsspannungen von 1000 V erforderlich; 0,1 mm dicke Keramiken benötigen nur noch 200 V Ansteuerspannung. Zu beachten ist allerdings, daß nach Gleichung (1) in beiden Fällen zur Erzielung einer gleichen Ausdehnung Δl eine Stapelhöhe von l_0 erforderlich ist.

Aus Bild 2 ist ersichtlich, daß die Auslenkung bei linearer Abhängigkeit von der Spannung auch im Remanenzbereich Hysterese-Erscheinungen zeigt.

Darüberhinaus ist der Verlauf der Hysterese $\Delta l = f(U)$ auch z.T. noch von der Dauer der Einwirkzeit des elektrischen Feldes (Zykluszeit) abhängig, und damit ist auch der Hinweis auf Nachwirkungserscheinungen bei Einwirkung (Halten) eines Feldes bestimmter Stärke oder nach Abschalten des Feldes gegeben.

Aufbau und Eigenschaften piezokeramischer Stapelaktoren



Negative Spannungen bezogen auf die Polungsrichtung der Scheiben bewirken eine Kontraktion. Nach Überschreiten der Feldstärke $E=0$ erfolgt eine Umpolarisierung der Keramiken. Unterhalb der $E=0$ treten starke temperatur- und zeitabhängige Veränderungen des Polarisationszustandes auf, so daß Spannungen entgegen der Polungsrichtung generell ausgeschlossen werden sollten!

Bild 2

Hysteresis-Verlauf eines Aktorstapels aus FPM 220

Piezoaktoren im elektrischen Stromkreis

Im elektrischen Stromkreis stellen Piezoaktoren einen Kondensator mit materialabhängiger relativer Dielektrizitätskonstante zwischen etwa 600 und 5000 sowie einem Innenwiderstand von über 10^8 Ohm dar. Die Kapazität ist im Großsignalbetrieb feldstärkeabhängig und kann bei Betriebsfeldstärke auf über 150 % des Ausgangswertes ansteigen. Die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Aktors ist proportional dem zeitlichen Aufladeverhalten der elektrischen Kapazität. Der dazu erforderliche Strom errechnet sich:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

Schlußfolgerungen daraus sind:

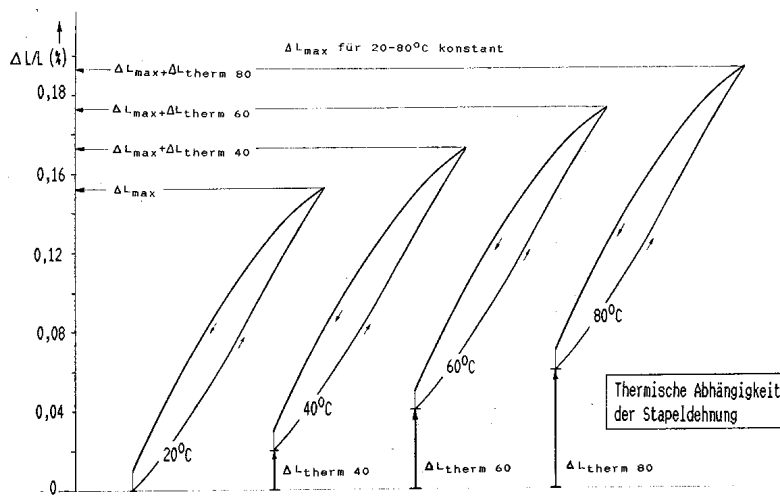
- der maximale Ausgangsstrom der Spannungsversorgung ist bestimmend für die Dynamik des Aktors,
- niedrige Betriebsspannungen bei gleicher Dehnung/Bauhöhe des Aktors durch Verringerung der Scheibendicke um den Faktor $1/n$ bewirken Kapazitätserhöhungen um den Faktor n^2 .

Temperaturverhalten

Stapelaktoren weisen einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von etwa $3 \cdot 10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ auf. (Im seltenen Fall offener Pole sind diese negativ.)

Die relative Dehnung Δl für den Werkstoff FPM 220 zeigt Temperaturabhängigkeit: Im Arbeitstemperaturbereich von -40 °C bis 80 °C ist die Änderung zu vernachlässigen, zu tiefen Temperaturen hin nimmt Δl ab und oberhalb 125 °C ($\frac{T_C}{2}$) treten irreversible Depolarisationserscheinungen auf. Das Temperaturverhalten ist werkstoffspezifisch.

Aufbau und Eigenschaften piezokeramischer Stapelaktoren



Werden Stapelaktoren mit Spannungen höherer Frequenzen angeregt, tritt eine Eigenerwärmung infolge von kapazitiven und Hystereseverlusten des piezokeramischen Materials auf. Bei hochdynamischen Anwendungen sollten daher Materialien mit geringer Hysterese im Remanenzbereich zum Einsatz kommen bzw. Kühlmöglichkeiten vorgesehen werden.

Bild 3 Thermische Abhängigkeit der Stapeldehnung (FPM 220)