

## **5. Workshop 2**

## **5.1. Bewegen und Feinpositionieren mit Piezokeramik**

# **Bewegen und Feinpositionieren mit Piezokeramik**

Dr.-Ing. Günter Helke

CeramTec AG

Geschäftsbereich Piezotechnik

Lauf a.d. Pegnitz

## **Piezoelektrische Keramiken und Multilayer- Aktoren**

### **1. Einleitung**

Die Funktionsweise von Multilayer- Aktoren ergibt sich aus dem Polarisations- und Deformationsverhalten ferroelektrischer Keramiken (Piezokeramiken) unter Einwirkung eines elektrischen Feldes. Nichtlinearitäten und Hystereseerscheinungen bei der Erzeugung großer Deformationen bestimmen Grenzen und Möglichkeiten des Einsatzes von Piezokeramiken für ferroelektrische Festkörper- Aktoren.

Piezokeramiken auf der Basis des binären Systems der festen Lösungen von Bleititanat  $\text{PbTiO}_3$  und Bleizirkonat  $\text{PbZrO}_3$  werden wegen ihrer excellenten, durch Dotierungen auf die jeweiligen Anwendungen zugeschnittenen physikalischen Eigenschaften in der industriellen Fertigung favorisiert. Modifikationen von Bleizirkonat- Bleititanat in Vielkomponentensystemen sind piezokeramische Werkstoffe mit maximaler piezoelektrischer Aktivität. Mit der Entwicklung piezokeramischer monolithischer Multilayer- Aktoren werden neue Anwendungsgebiete ferroelektrischer Keramiken erschlossen.

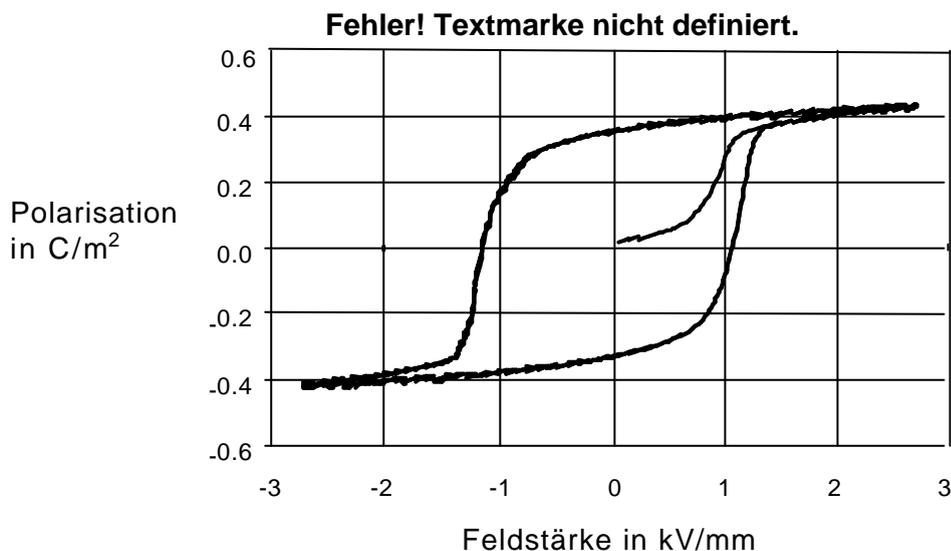
### **2. Polarisation und feldinduzierte Deformation von Piezokeramiken**

Die notwendige Bedingung für das Auftreten der Piezoelektrizität erfüllen Ferroelektrika: Bei Ferroelektrika tritt bei einer bestimmten Temperatur, der Curietemperatur  $T_C$  eine spontane Polarisation  $P_s$  des Kristallgitters, begleitet von einem Maximum der Dielektrizitätszahl, auf, und es erfolgt die Bildung von Domänen als Bereiche einheitlicher Richtung der spontanen

Polarisation. Charakteristisch ist für Ferroelektrika die Umkehrbarkeit der Richtung der spontanen Polarisation unter Einwirkung eines elektrischen Gleichfeldes, beschrieben durch den Verlauf einer Hystereseschleife (Bild 1).

Piezoelektrische Keramiken sind spezielle Ferroelektrika. Die Polarisierungseffekte in ferroelektrischer Keramik ergeben sich aus den Besonderheiten der keramischen Mikrostruktur bei Auftreten der spontanen Polarisation. Als Ergebnis des Sinterprozesses ist jedes kristalline Korn von anderen Körnern umgeben. Bei der Temperatur der Umwandlung in den ferroelektrischen Zustand (Curietemperatur) wird zunächst jedes Korn infolge elektrostriktiver Effekte spontan deformiert, jedoch auch durch benachbarte Körner behindert, so daß innere Spannungen teilweise nur durch Aufspaltung des Korns in Domänen abgebaut werden können.

Bei Einwirkung eines äußeren elektrischen Gleichfeldes wird die Polung eines polykristallinen Körpers möglich, und es tritt wie bei Eindomänenkristallen eine endliche remanente Polarisation auf. Nach Abschalten des elektrischen Feldes ist die Keramik gepolt.

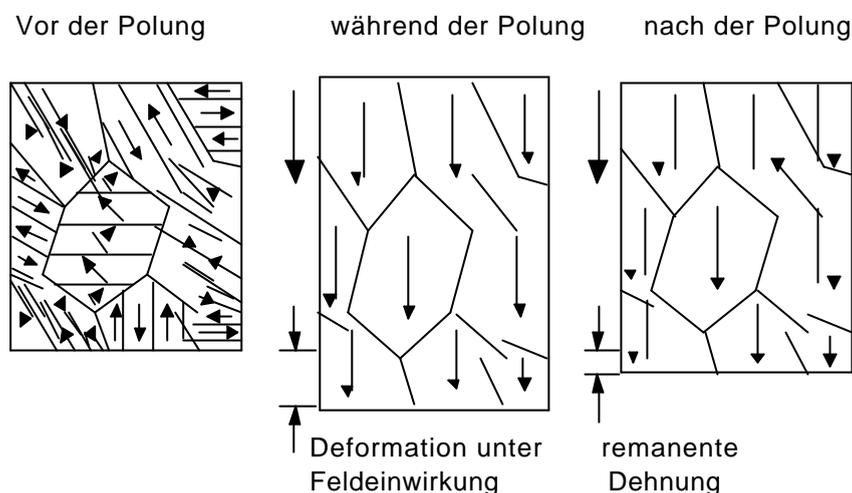


**Bild 1: Ferroelektrische Hysterese**

Die für die Polung erforderliche Beweglichkeit der Domänen trägt in direkter Weise zu dem dielektrischen und elektromechanischen Verhalten der Piezokeramiken bei. Die Domänenprozesse führen dazu, daß die piezoelektrische Aktivität ferroelektrischer Keramiken beträchtlich höher ist als die ferroelektrischer Einkristalle.

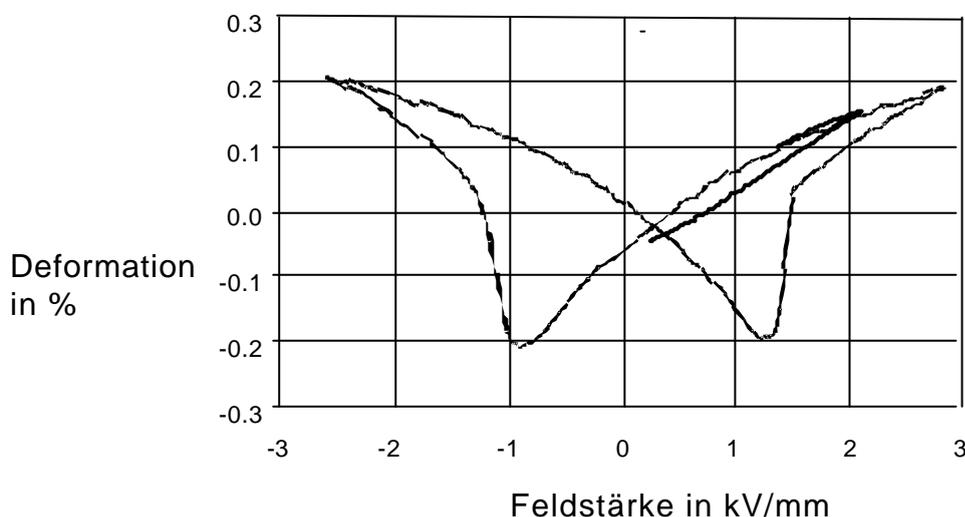
Nach der Polung entsteht ein metastabiler Zustand von Domänenkonfigurationen. Infolge der strukturellen Besonderheiten der Piezokeramiken bedingen die Domänenprozesse nicht nur das Polarisations- Feldstärke- Verhalten der piezoelektrischen Keramiken, sondern auch das

Deformations- Verhalten unter Einwirkung eines starken elektrischen Gleichfeldes. Durch das elektrische Feld wird eine Deformation induziert. Die Reorientierung von Domänen führt zu einer Änderung der äußeren geometrischen Abmessungen eines piezokeramischen Formkörpers (Bild 2).



**Bild 2: Verformung ferroelektrischer Keramik bei Einwirkung eines elektrischen Feldes**

Entsprechend dem nichtlinearen Verlauf der Polarisations- Feldstärke- Abhängigkeit wird die induzierte Deformation durch eine Schmetterlingsschleife, wie im Bild 3 dargestellt, beschrieben.



**Bild 3: Feldinduzierte Deformation ferroelektrischer Keramik: „Schmetterlingsschleife,,**

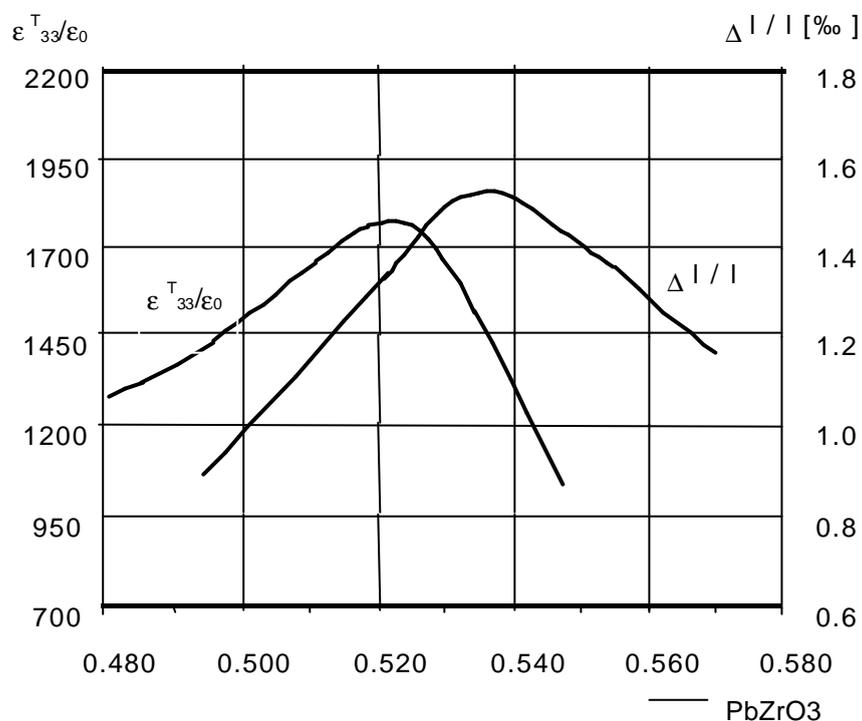
Beim unipolaren Betrieb von Aktoren in Polungsrichtung wird von Feldstärken Gebrauch gemacht, die etwa beim 2 bis 3-fachen Wert der Koerzitiv- Feldstärke liegen. Elektrische Feldstärken in der Größenordnung der vom 2 kV/mm ergeben Deformationen (relative Längenänderungen) 1.5 ... 1.7 ‰.

### 3. Modifikationen des Systems der festen Lösungen Bleizirkonat- Bleititanat

Die einmalig vorteilhaften Merkmale von Bleizirkonat - Bleititanat bestehen darin, daß in einem bestimmten Zusammensetzungsbereich (nahe dem Zr/Ti- Verhältnis 52:48) Anomalien der ferroelektrischen Polarisationsmechanismen auftreten.

Aus den Anomalien ergeben sich als Extremwerte (vgl. Bild 4)

- ein Maximum der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$
- Maxima des piezoelektrischen Koeffizienten  $d_{33}$  und der Deformation  $S_3$ .



**Bild 4: Abhängigkeit von Deformation und Dielektrizitätszahl vom Zr-/ Ti- Verhältnis in Bleizirkonat- Bleititanat- (PZT)- Keramiken**

Eine Modifikation der Grundzusammensetzung durch Dotierung mit Ionen abweichender Wertigkeit gegenüber den ursprünglichen Ionen führt zu einer weitergehenden Diversifizierung der dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften.

Für Aktoren sind zunächst ferroelektrisch „weiche„ Keramiken zu bevorzugen. Solche Keramiken sind sich im allgemeinen gekennzeichnet durch

- hohe Dielektrizitätskonstante
- niedrige Curietemperatur, niedrige Koerzitivfeldstärke
- hohe piezoelektrische Aktivität und hohe (Polarisations-) Deformation.

Im Bildungsprozeß nach der herkömmlichen Mischoxid- Technik können Ionenkombinationen und insbesondere Ionen- Komplexe in festen Lösungen (Mischkristallen) des Bleizirkonat- Bleititanat die Sinteraktivität über die Bildung von Flüssigphasen beeinflussen.

Der Syntheseweg niedrig sinternder Werkstoffe für monolithische Multilayer- Aktoren auf der Basis von Multikomponenten- Systemen  $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ - $\sum AB'_{1-\alpha}B''_{\alpha}O_3$  führt zu Zusammensetzungen mit maximalen elektromechanischen Effekten (Piezoelektrizität, Polarisations- Deformation).

Den gestiegenen Anforderungen der praktischen Anwendung von Piezokeramiken werden Multikomponenten- Systeme gerecht, in denen bleihaltige Ionen- Komplexe („komplexe Verbindungen“) die allgemeine Formulierung  $AB'_{1-\alpha}B''_{\alpha}O_3$ , mit B': 3- ,5- bzw. 6- wertige Kationen und B'': 1- und 2-wertige Kationen, ( $\alpha = 1/4, 1/3$  oder  $1/2$  in Abhängigkeit von der Wertigkeit des Kations B') repräsentieren und teilweise den Ionen- Komplex  $Pb^{2+}(Zr^{4+}, Ti^{4+})O_3$  ersetzen.

Beispiele für bleihaltige Ionen- Komplexe, die die Existenzbedingungen für Multikomponenten- Systeme erfüllen, und feste Lösungen mit dem Bleizirkonat- Bleititanat bilden, sind  $(Mg_{1/3}Nb_{2/3})$  und  $(Pb(Ni_{2/3}W_{1/3})O_3)$ . Weitere Möglichkeit ergeben sich mit der Substitution bleifreier Ionen- Komplexe, wie  $Sr(K_{1/4}Nb_{3/4})O_3$ .

Ternäre bzw. quaternäre feste Lösungen mit komplexen Verbindungen zeigen hohe Werte der Polarisations- Deformation  $S_3$ . Die maximale Deformation erreicht Werte  $S_3 = 1.7 \text{ ‰}$  (für die maximale Feldstärke  $E_3 = 2 \text{ kV/mm}$ ).

Zusammensetzungen des Systems  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})(Ni_{2/3}W_{1/3})O_3$  (PZT-PMN- PNW) sind für Multilayer- Aktoren geeignete Werkstoffe mit niedriger Sintertemperatur ( $T_S \leq 1120 \text{ °C}$ ), hohem  $d_{33}$  – Wert und großer Dehnung  $S_3$  und einer Curietemperatur von ca.  $200 \text{ °C}$ .

Die elektromechanischen Eigenschaften sind mit denen des bei  $1.240 \text{ °C}$  gesinterten Standardwerkstoff Sonox P53 vergleichbar (vgl. Tabelle 1: Vergleich Sonox®P 53/PZT-PMN- PWN).

	$T_S$ °C	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$T_c$ °C	$d_{33}$ $10^{-12}m/V$	$S_3, 10^{-3}$

Sonox® P53	1240	3.800	215	640	1,7
<sup>(1)</sup> PZT- PMN - PNW	1120	3.750	193	540	1,63
<sup>(2)</sup> PZT- SKN	1060	1600	347	465	1,7

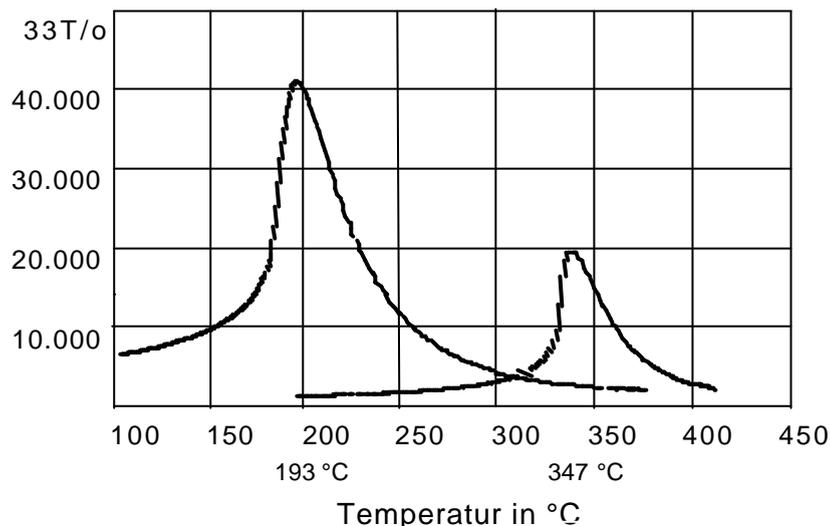
<sup>(1)</sup> PZT- PMN - PNW:  $0,94 \text{ Pb}(\text{Zr}_{0,220} \text{Ti}_{0,405}) (\text{Mg}_{1/3} \text{Nb}_{2/3})_{0,375} \text{O}_3 - 0,06 \text{ Pb}(\text{Ni}_{2/3} \text{W}_{1/3}) \text{O}_3$

<sup>(2)</sup> PZT- SKN:  $0,98 \text{ Pb}(\text{Zr}_{0,52} \text{Ti}_{0,48}) \text{O}_3 - 0,02 \text{ Sr}(\text{K}_{0,25} \text{Nb}_{0,75}) \text{O}_3$

**Tabelle 1: Eigenschaften niedrig sinternder piezokeramischer Werkstoffe im Vergleich zu Sonox® P53**

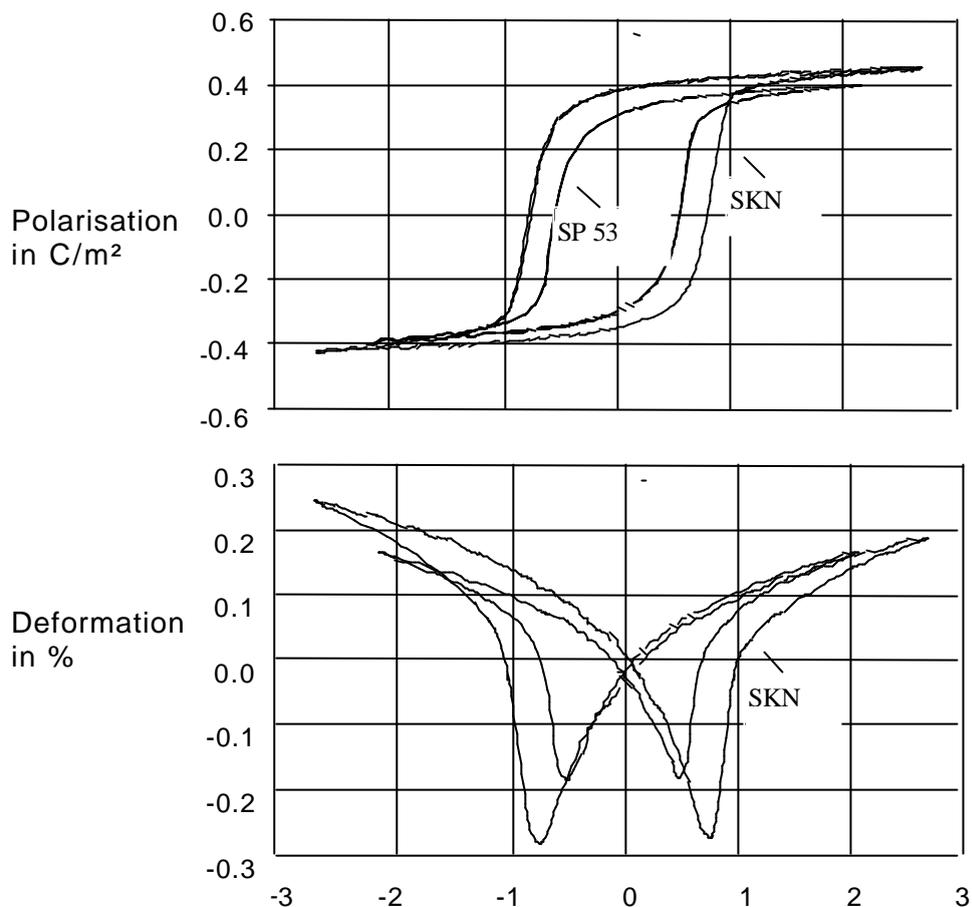
Die gekoppelte Substitution („Co- Dotierung„/ Doppel- Substitution) heterovalenter Ionen mit Donator- Wirkung einerseits und Akzeptor- Wirkung andererseits ist geeignet, die Eigenschaften von piezoelektrischer Keramiken des Systems der ternären feste Lösungen  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})_2\text{O}_7$  -  $\text{Sr}(\text{K}_{0,25}\text{Nb}_{0,75})\text{O}_3$  (PZT – SKN) für Aktoren weiter zu optimieren:

Die Co- Dotierung ergibt piezoelektrische Keramiken mit Curietemperaturen  $T_C > 300^\circ\text{C}$  im Vergleich zu  $T_C < 200^\circ\text{C}$  für die quaternären festen Lösungen PZT-PN-PNW (Bild. 5).



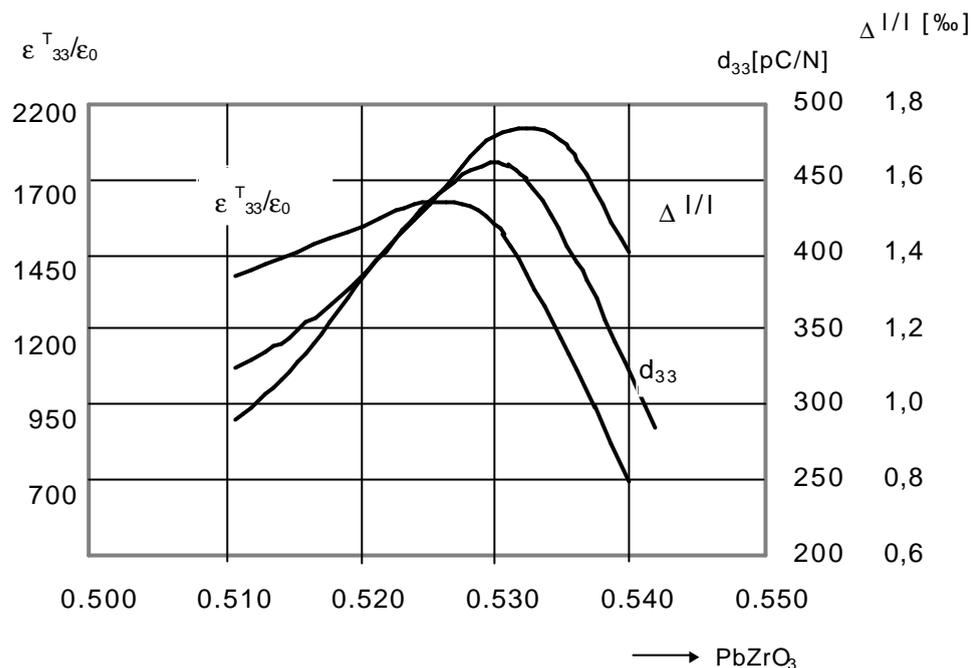
**Bild 5: Curietemperaturen piezokeramischer Werkstoffe für Aktoren**

Die Polarisations- Feldstärke- Charakteristik (ferroelektrische Hysterese) und Deformations- Feldstärke-Charakteristik („Schmetterlings-Schleife) offenbaren deutliche Unterschiede (s. Bild 6) in den Polarisations- Deformations- Phänomenen.



**Bild 6: Vergleich von ferroelektrischer Hysterese und Deformations- Charakteristik der Piezokeramischen Werkstoffe von Sonox® P53 und PZT-SKN<sup>(4)</sup>**

In Abhängigkeit vom Zr-/ Ti- Verhältnis der PZT- Basis ergeben sich für die elektromechanischen Kenngrößen (piezoelektrischer Koeffizient  $d_{33}$  und  $S_3 = D/I$ ) Extremwerte, deren Werte bisher nur „weichen„ PZT- Modifikationen, erreicht werden konnten (s. Bild 7 und Tabelle 1, Sonox® P53 und PZT – SKN). Bemerkenswert ist für diese Modifikationen auch die niedrigere Dielektrizitätszahl  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ .



**Bild 7: Dielektrizitätszahl, piezoelektrischer Koeffizient und Polarisations**  
**- Deformation von Zusammensetzungen des Systems PZT-SKN**

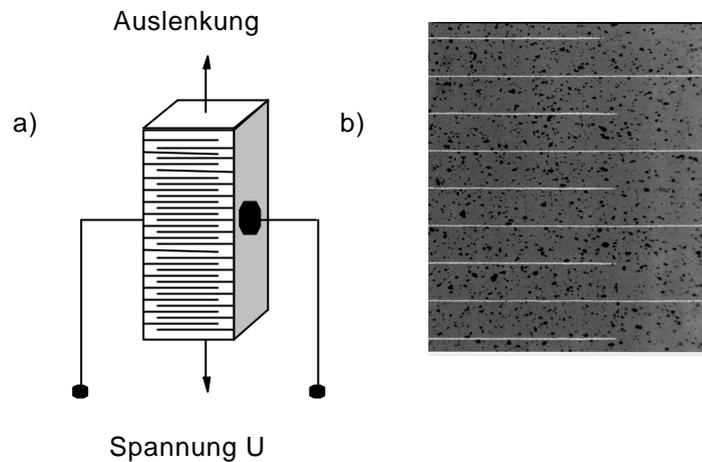
#### 4. Technologisches Konzept zur Herstellung von Multilayer- Aktoren

Die durch das elektrische Feld induzierte Deformation ist materialspezifisch. Sie kann nicht einfach durch eine beliebige Erhöhung der Betriebsspannung vergrößert werden.

Längenänderungen im Mikrometerbereich, wie sie für eine praktische Anwendung von Piezokeramik für Positionier- und Antriebselemente erforderlich sind, werden durch mechanische Reihenschaltung und elektrische Parallelschaltung einzelner Elemente erreicht (Bild 8). Die Laminiertechnik und das Cofiring von Piezokeramiken und Innenmetallisierung ermöglichen den Aufbau von monolithischen piezokeramischen Multilayer- Aktoren mit Bauhöhen von 5...50 mm (40...500 Schichten). Die axiale Dehnung ist die Summe der Dehnungen der Einzellagen der monolithischen – Aktoren.

Im allgemeinen bestehen monolithische Multilayer- Aktoren metallisierten Einzellagen mit einer effektiven Dicke von 100  $\mu\text{m}$ , die zusammen gesintert und bei geeigneter Struktur der Innenelektroden durch eine Kantenmetallisierung elektrisch parallel geschaltet werden. Die Kompatibilität von elektromechanisch aktiver Piezokeramik und einer AgPd- Innenmetallisierung

mit niedrigem Pd- Gehalt (aus Kostengründen) erfordert die Verringerung der Sinteremperatur der Piezokeramiken unter 1150 °C.



**Bild 8: a) Konfiguration und  
b) Schnittbild eines piezokeramischen monolithischen Multilayer-Aktors**

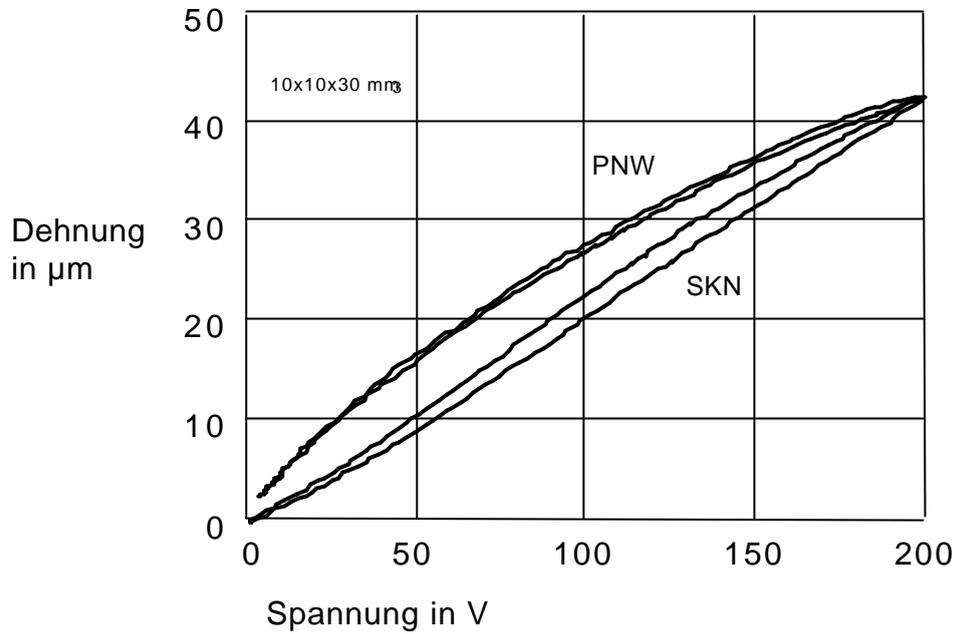
Die keramische Multilayer- Technologie gestattet den Aufbau von Aktoren, die bei Spannungen in der Größenordnung von 200 V betrieben werden können. Die maximale Betriebsfeldstärke (in Polungsrichtung) liegt dann bei 2 kV/mm.

Eine Verringerung der Betriebsspannung der mehrlagigen Aktoren wäre bei Verringerung der Schichtdicke in den Monolithen denkbar. Es ist jedoch nicht vorteilhaft, für eine monolithische Multilayer- Struktur die mit der Gießfolien- und Laminieretechnik für keramische Werkstoffe (u.a. zur Herstellung von Multilayer- Kondensatoren) grundsätzlich gegebenen Möglichkeiten auszuschöpfen. Das Risiko eines dielektrischen Durchschlags würde dann ansteigen, und das Verhältnis der Masse der inneren Elektroden zur effektiven Masse der Piezokeramik- Schichten wäre zu groß, um hinreichend steife monolithische Multilayer aufzubauen. Außerdem würde die Eigenkapazität der Aktoren so stark ansteigen, so daß die elektrische Beschaltung problematisch wird.

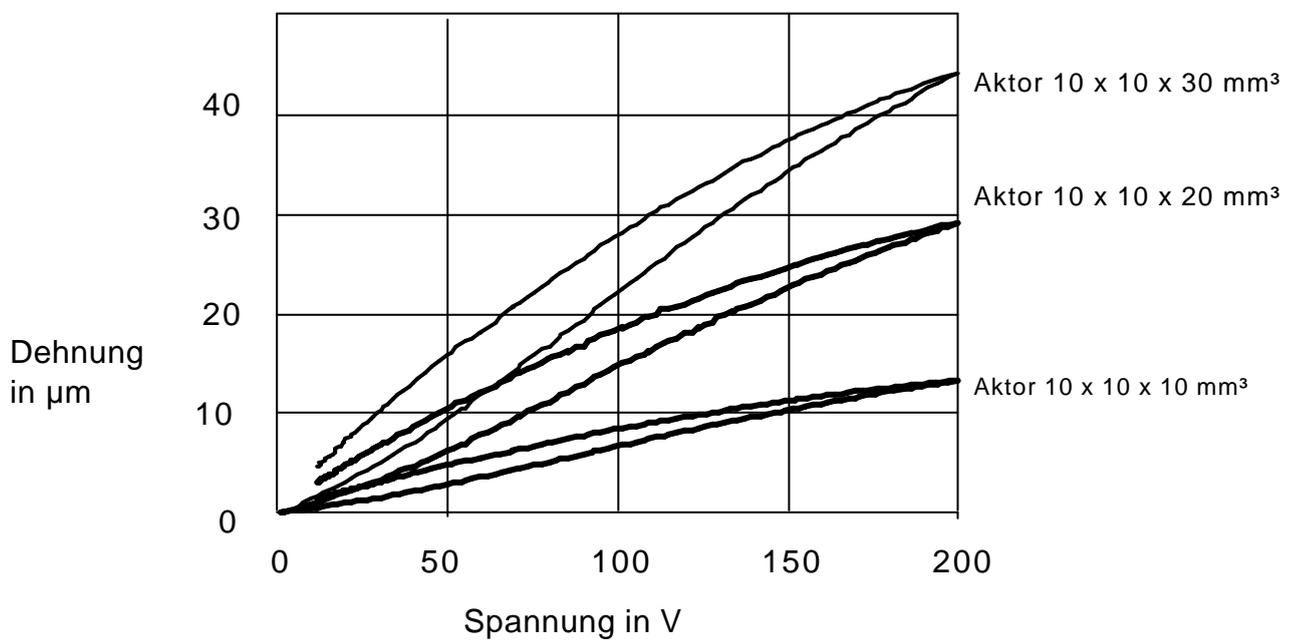
## 5. Das Deformationsverhalten von Multilayer- Aktoren

Die Werkstoffe <sup>(1)</sup> PZT- PMN - PNW bzw. <sup>(2)</sup> PZT- SKN bilden die Basis für den Aufbau (Laminierung und Cofiring) von piezokeramischen Multilayer- Aktoren mit Bauhöhen von 5...50 mm (40 - 500 Schichten). Typische Dehnungskurven ausgewählter Multilayer- Aktoren sind in den Bildern 9 und 10 wiedergegeben. Die Deformationen wurden bei Verwendung von

Keramiksichten mit einer effektiven Dicke von 100  $\mu\text{m}$  und einer maximalen Betriebsspannung von 200 V erzielt.



**Bild 9: Deformationsverlauf von Multilayer- Aktoren aus <sup>(1)</sup> PZT - PMN - PNW bzw. <sup>(2)</sup> PZT - SKN**



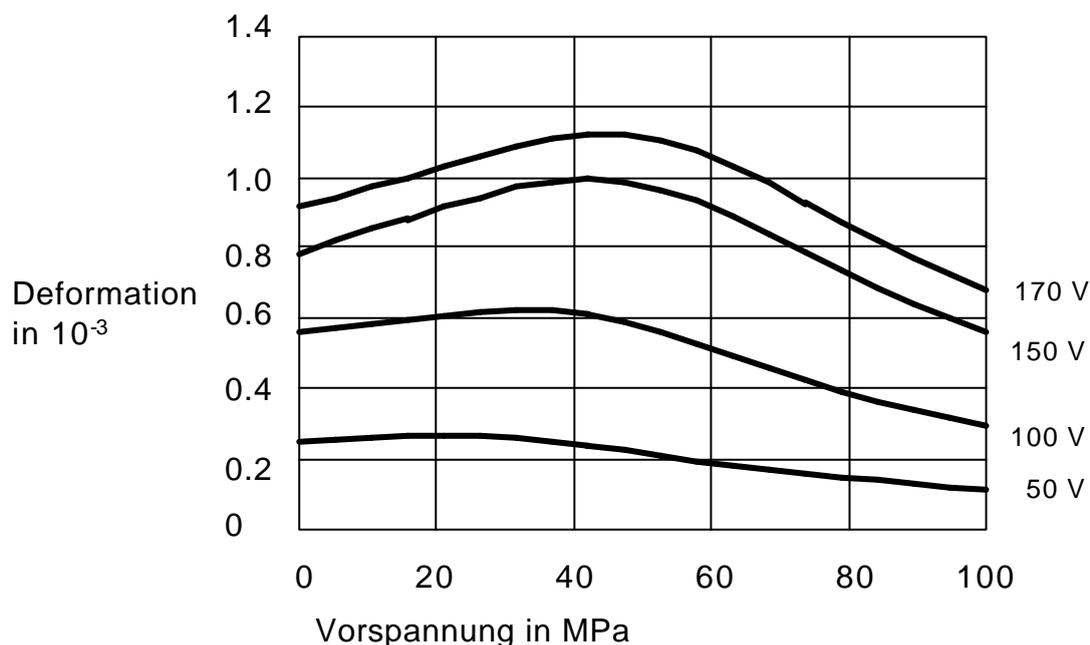
**Bild 10. Dehnung von Multilayer- Aktoren unterschiedlicher Geometrie**

## 6. Charakteristik von Multilayer- Aktoren bei mechanischer Belastung

Das Deformationsverhalten piezokeramischer Multilayer-Aktoren ergibt sich aus den Besonderheiten der Polarisations-Deformation unter Einwirkung starker elektrischer Felder. Piezokeramische Multilayer-Aktoren sind aber auch Quellen großer intrinsischer Kräfte in Wechselwirkung mit äußeren Kräften infolge von mechanischer Vorspannung und Massebelastung im Betriebsfall.

Dehnungen in Abhängigkeit von der Spannung wurden bisher nur für den unbelasteten Fall (bei „Leerlauf,“) diskutiert. Für diesen Grenzfall ergibt sich ein materialspezifischer Wert der Deformation  $S_3 \cong 1.7 \text{ ‰}$  bei der maximalen Feldstärke  $E_3 = 2 \text{ kV/mm}$ .

Wird ein piezokeramischer Multilayer- Aktor mechanisch belastet bzw. durch eine äußere Kraft vorgespannt, ergibt sich ein deutlicher Einfluß auf die Deformationscharakteristik, wie in Bild 11 dargestellt: Das Maximum der Deformation ergibt sich der Wechselwirkung der externen Größen und ist abhängig sowohl von der jeweiligen Höhe der mechanischen Belastung als auch von der elektrischen Feldstärke.

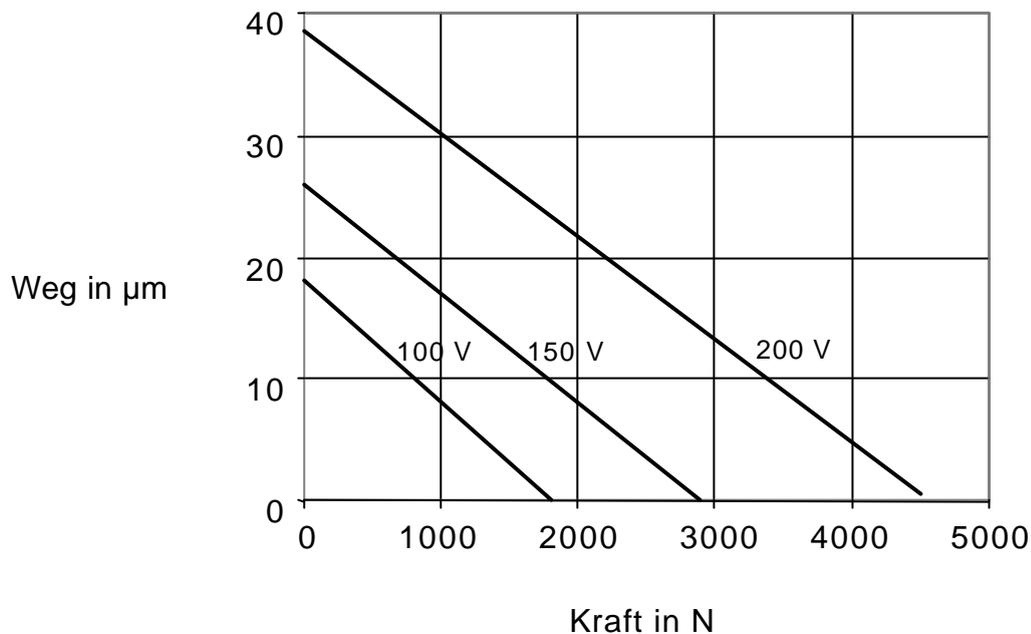


**Bild 11: Verlauf der Deformation bei konstanter mechanischer Vorspannung**

Andererseits ist die von einem Multilayer- Aktor erzeugte Kraft vom Weg und damit auch von der Betriebsspannung abhängig. Unterschiede in Deformationsverhalten und Kraftwirkung ergeben sich für die Fälle konstanter und veränderlicher mechanischer Last beim. Die maximale, von

einem Multilayer- Aktor ausgehende Kraft wird erreicht, wenn die spannungsinduzierte Deformation durch eine äußere Kraft (Blockierkraft) kompensiert wird.

Für einen piezokeramischen Multilayer- Aktor mit den Standard- Abmessungen 10 x 10 x 30 mm<sup>3</sup> ist das „Weg- Kraft- Kennlinienfeld“ für unterschiedliche Betriebsspannungen in Bild 12 dargestellt.



**Bild 12: Kennlinienfeld eines piezokeramischen Multilayer- Aktors 10 x 10 x 30 mm<sup>3</sup>**

## 7. Thermische und zeitliche Stabilität von Multilayer- Aktoren

Für prädestinierte Anwendungsfälle von piezokeramischen Multilayer- Aktoren, wie Kraft-Einspritzventile, hydraulische Stetigventile und adaptive Systeme der Schwingungsdämpfung, sind die Anforderungen wesentlich anspruchsvoller als für einen quasistatischen Betrieb

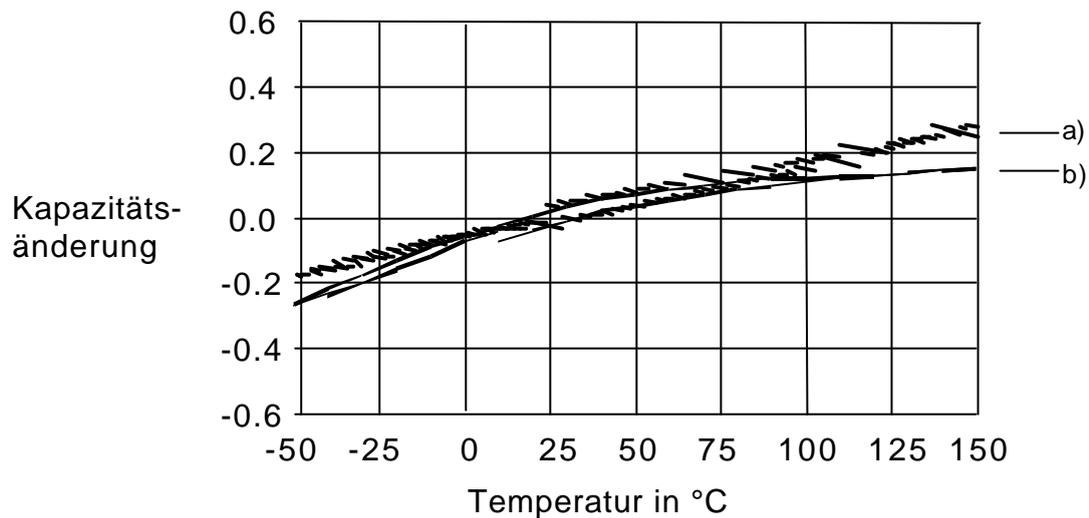
Für den praktischen Einsatz piezokeramischer Multilayer- Aktoren sind dann außer maximaler Deformation und mechanischer Belastbarkeit bzw. mechanischem Wirkungsgrad noch folgende Aspekte wesentlich:

- Funktion (Verlauf, Frequenz, Höhe) des Ansteuersignals
- Betriebstemperaturbereich
- Lebensdauer/ Beständigkeit bei dynamischer Dauerbelastung

Die Möglichkeiten und Grenzen für piezokeramischen Multilayer- Aktoren resultieren aus den ferroelektrischen Merkmalen, wie Beweglichkeit von polaren Bereichen (Domänen) im

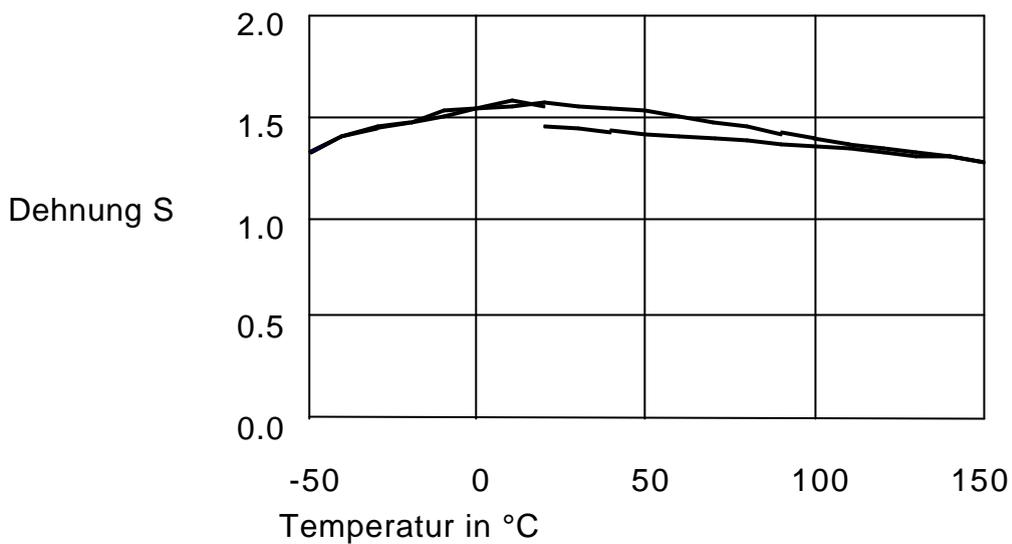
elektrischen Feld, Hysterese, Depolarisierbarkeit im elektrischen Feld oder/ und unter mechanischer Belastung oder durch Einfluß hoher Temperaturen. Von besondere Bedeutung ist die thermische Stabilität der dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften in einem weiten Temperaturbereich (z. B.  $-40 \dots + 150^\circ\text{C}$  für Kfz- Anwendungen).

Somit ist die Größe der feldinduzierten Deformation längst nicht das einzige Auswahlkriterium für einen optimalen Einsatz von piezokeramischen Multilayer- Aktoren. Unter dem Aspekt der thermischen Stabilität erweisen sich eine Piezokeramik, wie <sup>(2)</sup> PZT- SKN mit der hohen Curietemperatur  $T_C = 347^\circ\text{C}$  gegenüber <sup>(1)</sup> PZT- PMN - PNW mit  $T_C = 193^\circ\text{C}$  als vorteilhaft. Ein besonderes Merkmal der <sup>(2)</sup> PZT- SKN- Modifikation mit  $T_C = 347^\circ\text{C}$  ist die geringe, nahezu lineare Temperaturabhängigkeit sowohl der Kleinsignal- Werte als auch der Großsignal- Werte der Kapazität im Temperaturbereich  $- 50 \dots + 150^\circ\text{C}$  bei wenig ausgeprägter thermischer Hysterese (Bild 13).

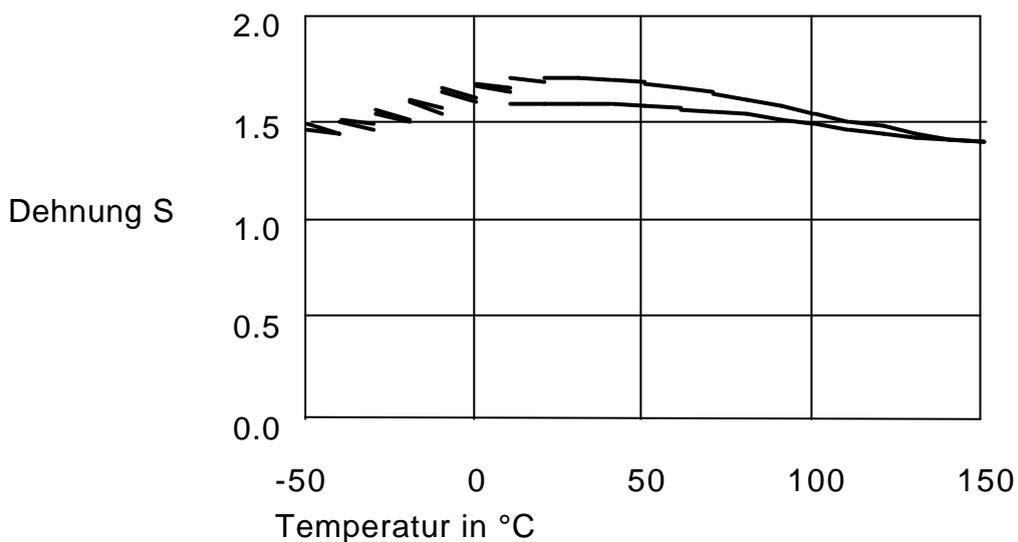


**Bild 13: Temperaturabhängigkeit der Kapazität,  
a) Kleinsignalwerte,  
b) Großsignalwerte**

Einen der Temperaturabhängigkeit der Großsignal- Kapazität entsprechenden Verlauf der statischen Dehnung gibt das Bild 14 wieder. Mit dieser Charakteristik ist auch die in Bild 15 dargestellte Temperaturabhängigkeit der dynamischen Dehnung vergleichbar.



**Bild 14: Temperaturabhängigkeit der (relativen) statischen Dehnung**

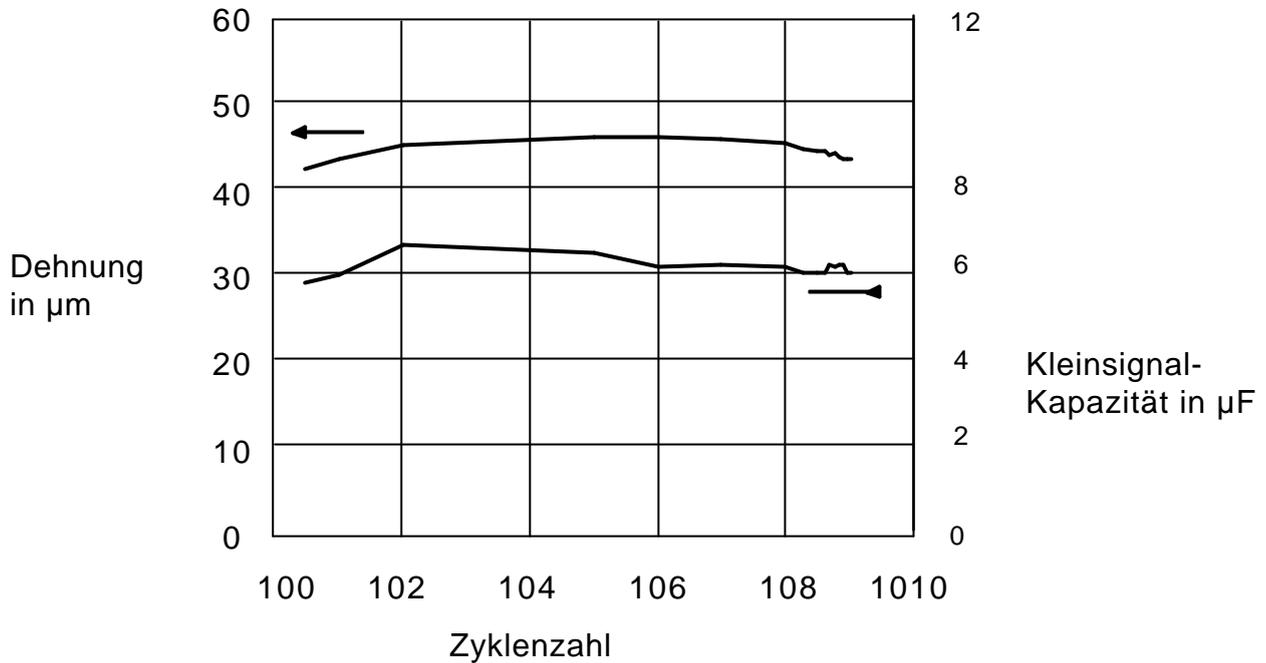


**Bild 15: Temperaturabhängigkeit der dynamischen Dehnung**

Mit dem Verhalten der piezokeramischen Multilayer- Aktoren bei mechanischer Vorspannung in einem weiten Temperaturbereich (Erwärmung infolge dielektrischer und mechanischer Hysterese- Verluste) sind die notwendigen Voraussetzungen für Lebensdauertests im dynamischen (Impuls-) Betrieb zu erfüllen.

Beim dynamischen Betrieb treten im Inneren eines piezokeramischen Multilayer- Aktors erhebliche Zugspannungen auf, denen durch eine mechanische Vorspannung von etwa 30...40 MPa begegnet werden kann. Vorgespannte Aktoren erreichen eine Lebensdauer von  $10^9$  Zyklen

(Bild 16): nach  $>10^9$  Zyklen sind keine wesentlichen Änderungen bei Dehnung und Kapazität festzustellen.



**Bild 16: Lebensdauer von monolithischen Multilayer- Aktoren  $10 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$**

## 7. Systemeigenschaften und Anwendungsgebiete piezokeramischer monolithischer Multilayer- Aktoren

Bedeutende Systemeigenschaften piezokeramischer Multilayer- Aktoren sind

- Deformationsverhalten der spannungsgesteuerten Bewegungsquellen
- hohe Auflösung der Deformation
- direkte Wirkung als spannungsgesteuerte Kraftquelle, im Bereich von cN bis kN
- hohe Steifigkeit
- hoher Wirkungsgrad
- geringe Ansprechzeit,  $< 10 \mu\text{s}$
- geringe geometrische Abmessungen
- hohe mechanische Belastbarkeit, bis zu 100 MPa

Mit dieser Spezifikation werden die piezokeramischen Multilayer- Aktoren anspruchsvollen Anforderungen neuer Einsatzgebiete in der Hochtechnologie gerecht. Die Anwendungen mit

Multilayer- Aktoren sind breit gefächert und vielfach noch im Entwicklungsstadium. Vorwiegend werden hohe Stellgeschwindigkeit und Steifigkeit, hohe Leistungsdichte oder fein regelbare Dehnung genutzt für

- Feinwerktechnik: Stellantriebe , Schrittmotoren, Positioniertische, Schreiber- Antriebe.
- Maschinenbau: Pneumatik- und Hydraulik- Ventile, Schwingungsdämpfung, Gravierköpfe für Tiefdruck, Dosierpumpen.
- Optik: CCD- Kamerasysteme, LWL- Spleißgeräte, Mikroskoptische, Feinverstellungen aller Art.
- Fahrzeugbau: Kraftstoff- Einspritzventile, Ventile für ABS, Hilfsantriebe, akustische Schwingungsdämpfung
- Luftfahrt: Steuerklappen an Rotorblättern, Adaptive Tragflächen, Schwingungsdämpfung

### **Zusammenfassung**

Die Funktion piezokeramischer Aktoren beruht auf der Tatsache, daß durch den Einfluß elektrischer Feldstärken in der Größenordnung der Polungsfeldstärke (2 kV/mm) relative Längenänderungen) bis zu 1,7 ‰ erzeugt werden können.

Diese Eigenschaften der piezoelektrischen Keramiken werden von der stofflichen Zusammensetzung und von strukturellen Besonderheiten bestimmt, die eine Erklärung von Polarisationsmechanismen und des daraus resultierenden Deformationsverhaltens zulassen.

Die Entwicklung von piezokeramischen monolithischen Multilayer- Aktoren eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten in der Fahrzeugtechnik, in der Mikromechanik und Optik- Technologie und Medizintechnik. Interessante Anwendungsbeispiele sind Antriebe für Kraftstoff- Injektoren, hydraulische und pneumatische Ventile, Systeme zur Feinpositionierung im Mikrometerbereich, Mikromanipulatoren und Dosiersysteme für Flüssigkeiten und Gase.

### **Literatur**

- [1] Jaffe, B. Cook, W. R., Jaffe, H., „Piezoelectric Ceramics,, Academic Press London New York ,1971.
- [2] Xu, Y. „Ferroelectric Materials and Their Applications,, North Holland 1991.
- [3] Uchino, K. Ceramic Actuators and Ultrasonic Motors,, Kluwer, Dordrecht 1997.