

# Piezokeramische Materialien und Bauelemente

GRUNDLAGEN, EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGEN



# Inhalt

<b>PI Ceramic – Führend in Piezotechnologie</b>	<b>3</b>
<b>Produktübersicht</b>	<b>6</b>
<b>Grundlagen der Piezotechnologie</b>	
Piezoeffekt und Piezotechnologie	8
Elektromechanik	10
Dynamisches Verhalten	12
<b>Piezokeramik – Werkstoffe, Bauelemente, Materialien</b>	
Materialeigenschaften und Klassifizierung	14
Weiche und harte Piezokeramiken	14
Bleifreie Werkstoffe und Materialien	15
Übersicht	16
Werkstoffdaten	18
Temperaturabhängigkeit der Koeffizienten	20
Fertigungstechnologie	
Pressverfahren	22
Cofiring, Folientechnik, Multilayer	23
Flexibilität in der Formgebung	24
PICMA® Multilayer-Aktoren mit hoher Lebensdauer	25
Verbindungstechnik	26
Piezokeramische Bauelemente: Abmessungen	27
Prüfverfahren	30
Integrierte Baugruppen, Sub-Assemblies	31
<b>Applikationen</b>	
Anwendungsbeispiele für Piezokeramiken	32
Pump- und Dosiertechnik mit Piezoantrieben	33
Ultraschallanwendungen in der Medizintechnik	34
Ultraschall-Sensoren	35
Piezoelektrische Aktoren	37
Schwingungsdämpfung	39
Adantronik	40



## PI Ceramic

FÜHREND IN PIEZOTECHNOLOGIE

PI Ceramic ist eines der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte.

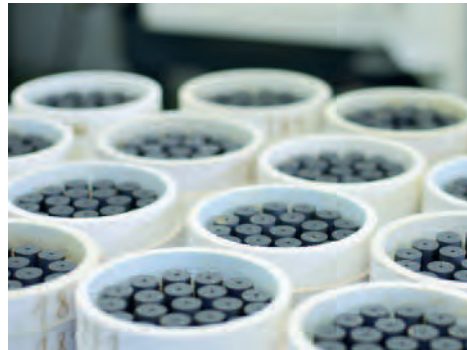
PI Ceramic, kurz PIC, bietet alles rund um die Piezokeramik, vom Werkstoff über Bauelemente bis hin zur fertigen Integration. PI Ceramic bietet Systemlösungen für Forschung und Industrie in allen High-Tech Märkten, wie z.B. der Medizintechnik, dem Maschinen- und Automobilbau, oder der Halbleitertechnik.

### Materialforschung und Entwicklung

PIC entwickelt alle piezokeramischen Materialien selbst. Dafür unterhält PIC eigene Laboratorien, Prototypenbau sowie Mess- und Prüfeinrichtung. Zudem arbeitet PIC im In- und Ausland eng mit den führenden Hochschulen und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Piezoelektrizität zusammen.

### Flexible Fertigung

Zusätzlich zum breiten Spektrum an Standardprodukten nimmt die schnellstmögliche Umsetzung kundenspezifischer Anforderungen einen wichtigen Stellenwert ein. Die Formgebung in Press- und Multilayer-Technologie ist jederzeit kurzfristig möglich. Dabei können einzelne Prototypen wie auch große Serien gefertigt werden. Alle Prozessschritte finden im Haus statt und unterliegen ständigen Kontrollen, wodurch Qualität und Termintreue gesichert sind.



### Zertifizierte Qualität

Bereits seit 1997 ist PI Ceramic nach der Norm ISO 9001 zertifiziert, bei der neben der Produktqualität vor allem die Erwartungen und Zufriedenheit des Kunden im Vordergrund stehen. Außerdem ist PIC nach ISO 14001 (Umweltmanagement) und OHSAS 18001 (Arbeitssicherheit) zertifiziert, die zusammen ein Integriertes Management System (IMS) bilden. PI Ceramic ist ein Tochterunternehmen von Physik Instrumente (PI) und entwickelt und produziert alle Piezoaktoren für die Nanopositioniersysteme von PI. Auch die Antriebe für PILine® Piezo-Ultraschallmotoren und NEX-LINE® Hochlast-Schreitantriebe stammen aus dem Hause PIC.



### Kernkompetenzen von PI Ceramic

- Standard-Piezokomponenten für Aktor-, Ultraschall- und Sensoranwendungen
- Systemlösungen
- Fertigung von piezoelektrischen Bauelementen bis zu mehreren 1.000.000 Stück pro Jahr
- Entwicklung kundenspezifischer Lösungen
- Hohe Flexibilität im technologischen Prozess, kurze Lieferzeiten, Fertigung von Einzelstücken und Kleinstmengen
- Alle Schlüsseltechnologien und modernste Ausrüstungen für die Keramikfertigung im Haus
- Zertifiziert nach ISO 9001, ISO 14001 und OHSAS 18001

Firmengebäude von PI Ceramic in Lederhose, Thüringen. Zum Jahresende 2011, rechtzeitig zum 20-jährigen Firmenjubiläum, vergrößert ein Anbau die Gesamtfläche für Fertigung, Entwicklung, Vertrieb und Verwaltung (links im Bild). Damit einher geht eine Steigerung der Fertigungskapazitäten um 150%.



# Zuverlässigkeit und Kundennähe

## UNSER LEITBILD



### PI Ceramic bietet

- Piezokeramische Werkstoffe (PZT)
- Piezokeramische Bauelemente
- Kunden- und anwendungsspezifische Ultraschallwandler / Transducer
- PICMA® Monolithische Multilayer-Piezoaktoren
- Miniatur-Piezoaktoren
- PICMA® Multilayer-Biegeelemente
- PICA Hochlast-Piezoaktoren
- PT-Tube Piezorohre
- Vorgespannte Aktoren mit Gehäuse
- Piezokomposite – DuraAct Flächenwandler

Unser Ziel ist die gleichbleibend hohe, geprüfte Qualität sowohl bei unseren Standardprodukten als auch bei kundenspezifischen Bauelementen. Wir möchten, dass Sie, unsere Kunden, mit der Leistung unserer Produkte zufrieden sind. Für uns beginnt Kundenservice mit dem ersten informativen Vorgespräch und reicht weit über die Auslieferung der Produkte hinaus.

### Beratung durch die Piezo-Spezialisten

Sie möchten komplexe Probleme lösen – wir lassen Sie damit nicht allein. Mit unserer langjährigen Erfahrung bei der Konzeption, Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von individuellen Lösungen begleiten wir Sie von der Idee bis zur Serienreife.

Wir nehmen uns die Zeit, die für ein fundiertes Verständnis der Thematik notwendig ist, und erarbeiten frühzeitig einen umfassenden und optimalen Lösungsweg, sei es mit bestehenden oder mit neuen Technologien.

### After-Sales Service

Auch nach dem Verkauf stehen unsere Fachleute für Sie bereit und beraten Sie, z. B. bei Systemerweiterungen oder technischen Fragen.

Damit erreichen wir als PI Ceramic unser Ziel: Lang anhaltende Geschäftsbeziehungen und eine vertrauensvolle Kommunikation mit Kunden und Lieferanten, die wichtiger sind als jeder kurzzeitige Erfolg.

### PI Ceramic liefert piezokeramische Lösungen für alle wichtigen High-Tech Märkte:

- Industrieautomation
- Halbleiterindustrie
- Medizintechnik
- Maschinenbau und Feinwerktechnik
- Luft- und Raumfahrt
- Automobilbereich
- Telekommunikation



## Erfahrung und Know-how

### FERTIGUNGSTECHNOLOGIE AUF NEUESTEM STAND

Der Entwicklungs- und Herstellungsprozess von piezokeramischen Komponenten ist sehr komplex. Hier verfügt PI Ceramic über langjährige Erfahrung und ausgereifte Fertigungsverfahren. Maschinen und Vorrichtungen entsprechen dem neuesten Stand der Technik.

#### Rapid Prototyping

In enger Absprache mit dem Kunden werden die Anforderungen schnell und flexibel umgesetzt. Prototypen und Kleinserien kundenspezifischer Piezobaugruppen stehen bereits nach sehr kurzen Bearbeitungszeiten zur Verfügung. Die Produktionsbedingungen, wie z.B. die Materialkomposition oder die Sinter Temperatur, werden dabei individuell auf das Keramikmaterial abgestimmt, um optimale Werkstoffparameter zu erreichen.

#### Präzisions-Bearbeitungstechnologie

PIC setzt Bearbeitungstechniken aus der Halbleiterindustrie ein, um die empfindlichen Piezokeramiken besonders präzise zu

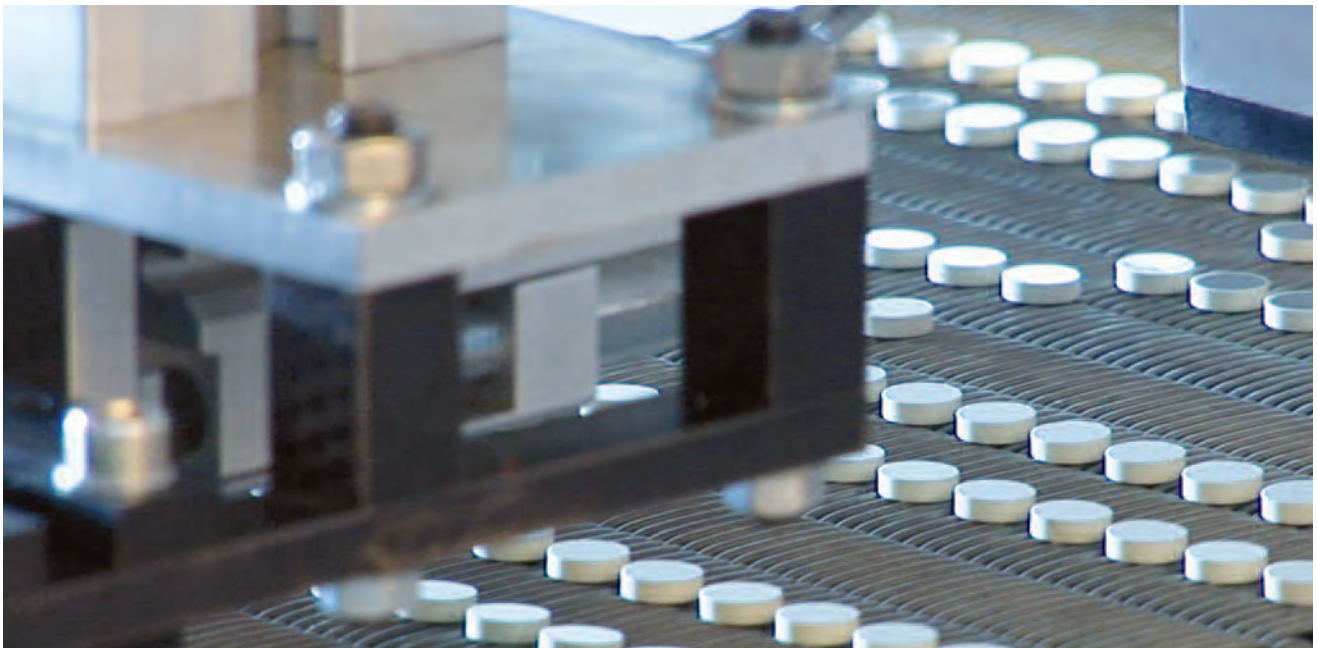
bearbeiten. Bereits im „Grünzustand“, also noch vor dem Sintern, sorgen spezielle Fräsmaschinen für exakte Formgebung. Gesinterte Keramikblöcke werden mit Präzisionssägen bearbeitet, wie sie auch für die Trennung einzelner Wafer verwendet werden. Feinste Bohrungen, strukturierte Keramikoberflächen, selbst komplexe, dreidimensionale Konturen sind herstellbar.

#### Automatisierte Serienfertigung – Vorsprung für OEM Kunden

Die industrielle Anwendung erfordert häufig hohe Stückzahlen kundenspezifischer Bauelemente. Der Übergang zur Großserienfertigung ist bei PI Ceramic sicher und kostengünstig möglich, bei gleichzeitig konstant hoher Qualität der Produkte. PIC besitzt die Kapazitäten für die Herstellung und Bearbeitung mittlerer und großer Serien in verketteten automatisierten Linien. Die Metallisierung der Keramikkörper übernehmen dabei Siebdruckautomaten und modernste PVD-Anlagen.



Automatisierte Abläufe optimieren den Durchsatz



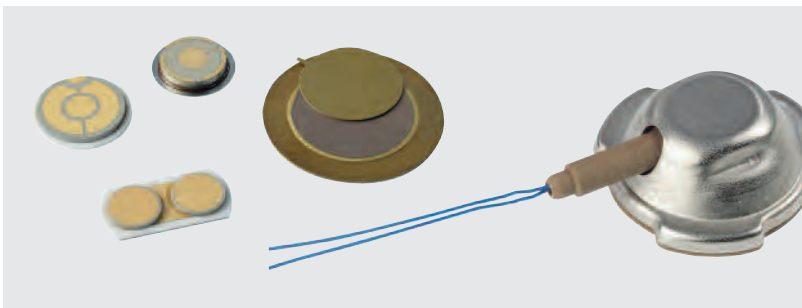
# Produktübersicht

## EIGENTWICKLUNG UND -FERTIGUNG



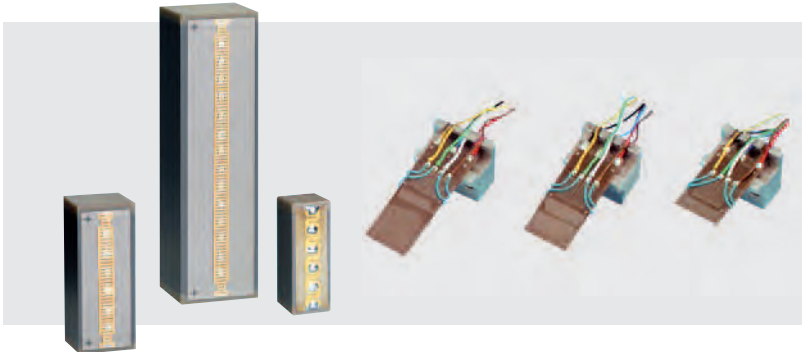
### Piezokeramische Materialien und Komponenten

- Vielseitige Geometrien
- Große Auswahl an Materialien
- Längsaktoren und Scheraktoren
- Rohre, Scheiben und Biegeelemente



### OEM Sensorkomponenten

- Durchflussmessung
- Füllstandsmessung
- Kraft- und Beschleunigungsmessung



### PICMA® Multilayer-Aktoren

- Hohe Lebensdauer, unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit
- Flexible Querschnitte und Auslenkungen
- Auflösung von unter einem Nanometer
- Ansprechzeit von unter einer Millisekunde
- Biegeelemente



### Piezokeramische Stapelaktoren

- Vielseitige Geometrien
- Kräfte bis zu mehreren 10000 Newton
- Stellwege bis 300  $\mu\text{m}$
- Hohe Resonanzfrequenzen für schnelle Ansprechzeiten

## Gehauste und geführte Aktoren

Für besseren Schutz und höhere Lebensdauer

- Einfache Integration in Bewegungssysteme
- Vielseitige Querschnitte und Längen bzw. Stellwege
- Optional mit Positionssensoren

- Hermetisch abgeschlossene Varianten
- Versionen mit Spülluftanschluss
- Geführte Aktoren mit Hebelübersetzung für Stellwege bis 400 µm
- Hohe Resonanzfrequenzen für schnelle Ansprechzeiten
- Für hohe Lasten bis 4 Tonnen

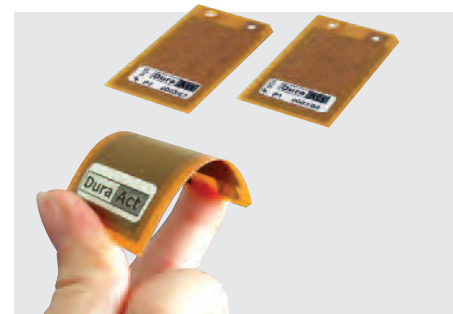


## DuraAct Patch Flächenwandler / Transducer

Vielseitige Piezoelemente für die Adaptronik

- Laminierte Piezokeramik für mechanische Flexibilität
- In verschiedenen Formen und Größen herstellbar
- Einsetzbar als Verbundwerkstoff oder zur Applikation

- Verwendbar als Aktor für aktive Schwingungskompensation
- Verwendbar als Sensor z.B. für Structural Health Monitoring
- Verwendbar für Energy Harvesting; Umwandlung von Schwingung und Deformation in elektrische Energie



## Piezomotoren

Über Millimeter präzise positionieren

- Piezoschreitantrieb NEXLINE® bis 600 N Antriebskraft
- Piezoschreitantriebe NEXACT® mit 10 N Kraft und 10 mm/s Geschwindigkeit

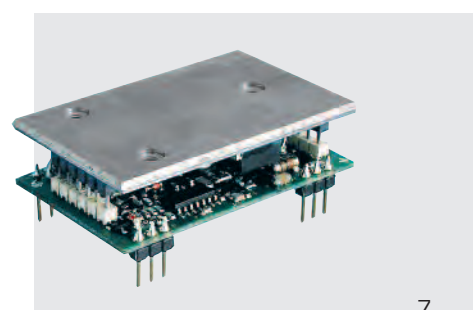
- PILine® Ultraschallantriebe mit bis zu 400 mm/s
- Selbsthemmend im ausgeschalteten Zustand
- Für Handling und Automatisierung
- Stellwege bis 125 mm



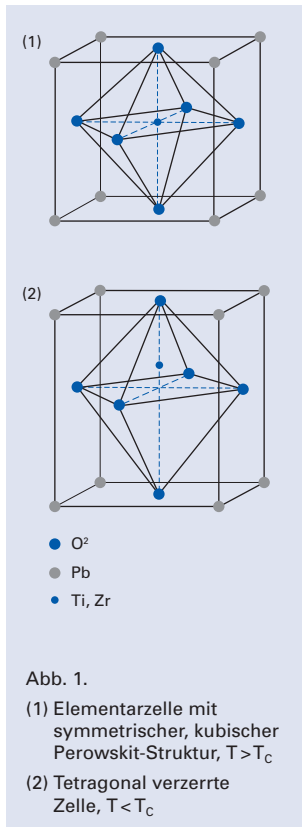
## Elektronik & Controller

Hohe Auflösung und schnelles Ansprechen

- Ein- und mehrkanalig
- Kostengünstige OEM Elektronik und leistungsfähige Digitalcontroller
- Rauscharm und stabil
- Kundenspezifische Entwicklungen



# Piezeffekt und Piezotechnologie



Piezelektrische Materialien wandeln elektrische Energie in mechanische und umgekehrt. Der Piezeffekt wird heute in vielen alltäglichen Produkten angewendet, zum Beispiel in Feuerzeugen, Lautsprechern und Signalgebern. Auch in der Kraftfahrzeugtechnik hat sich die Piezoaktuatorik durchgesetzt, denn piezoegetriebene Einspritzventile in Verbrennungsmotoren verkürzen die Stellzeiten und verbessern die Laufruhe und Abgasqualität erheblich.

## Vom physikalischen Effekt zur industriellen Nutzung

Das Wort „Piezo“ ist vom griechischen Wort für Druck abgeleitet. 1880 entdeckten Jacques und Pierre Curie, dass Druck in verschiedenen Kristallen wie Quarz und Turmalin elektrische Ladungen erzeugt; sie nannten dieses Phänomen den „Piezeffekt“. Später stellten sie fest, dass elektrische Felder piezelektrische Materialien verformen können. Dieser Effekt heißt „inverser Piezeffekt“.

Der industrielle Durchbruch kam mit den piezelektrischen Keramiken, als Wissenschaftler entdeckten, dass Barium-Titanat durch Anlegen eines elektrischen Feldes piezelektrische Eigenschaften in nutzbaren Größenordnungen annimmt.

## Piezelektrische Keramik ...

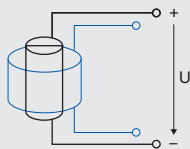
Der Piezeffekt natürlicher monokristalliner Materialien wie z.B. Quarz, Turmalin und Seignette-Salz ist verhältnismäßig klein. Polykristalline ferroelektrische Keramiken wie z.B. Barium-Titanat ( $BaTiO_3$ ) und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) zeigen höhere Auslenkungen bzw. induzieren größere elektrische Spannungen. PZT-Piezokeramik ist in vielen Variationen verfügbar und die am häufigsten verwendete Keramik für Aktor- oder Sensoranwendungen. Spezielle Dotierungen der PZT-Keramiken z.B. mit Ni-, Bi-, Sb-, Nb-Ionen ermöglichen es, die piezelektrischen und dielektrischen Parameter gezielt zu optimieren.

## ... mit polykristalliner Struktur

Unterhalb der Curie-Temperatur  $T_c$  wird die Gitterstruktur der PZT-Kristallite verzerrt und asymmetrisch. Es entstehen Dipole und die für die Piezotechnologie interessanten rhomboedrischen bzw. tetragonalen Kristallitphasen bilden sich heraus. Die Keramik weist eine spontane Polarisierung auf (s. Abb. 1). Oberhalb der Curie-Temperatur verliert eine Piezokeramik ihre piezelektrischen Eigenschaften.

## Direkter Piezeffekt

Mechanische Spannungen durch Krafteinwirkung von außen auf den piezelektrischen Körper induzieren Verschiebungen der elektrischen Dipole. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, das eine entsprechende elektrische Spannung erzeugt. Der direkte Piezeffekt wird auch Sensor- oder Generatoreffekt genannt.



## Inverser Piezeffekt

Das Anlegen einer elektrischen Spannung an ein ungeklemmtes piezelektrisches

Bauteil bewirkt dessen geometrische Verformung. Die dabei erzielte Bewegung ist abhängig von der Polarität der angelegten Spannung und der Richtung der Polarisierung im Bauteil. Das Anlegen einer Wechselspannung erzeugt eine Schwingung, also eine zyklische Änderung der Geometrie, beispielsweise die Zunahme und Verringerung des Durchmessers einer Scheibe. Wird der Körper geklemmt, d. h. an einer freien Deformation gehindert, wird eine mechanische Spannung bzw. Kraft erzeugt. Dieser Effekt wird auch Aktor- oder Motoreffekt genannt.



## Ferroelektrische Domänenstruktur

Eine Auswirkung der spontanen Polarisation ist, dass die diskreten PZT-Kristallite piezoelektrisch werden. Gruppen von Kristalliten mit gleicher Orientierung werden ferroelektrische Domänen genannt. Durch die statistische Verteilung der Domänen in der Keramik entsteht jedoch nach außen ein nicht-piezoelektrisches Verhalten. Wegen der ferroelektrischen Natur des Materials ist es möglich, unter Einwirkung starker elektrischer Felder (Polung), die unterschiedliche Gitterausrichtung einzelner Domänen permanent in Richtung des polenden Feldes zu ändern (s. Abb. 2).

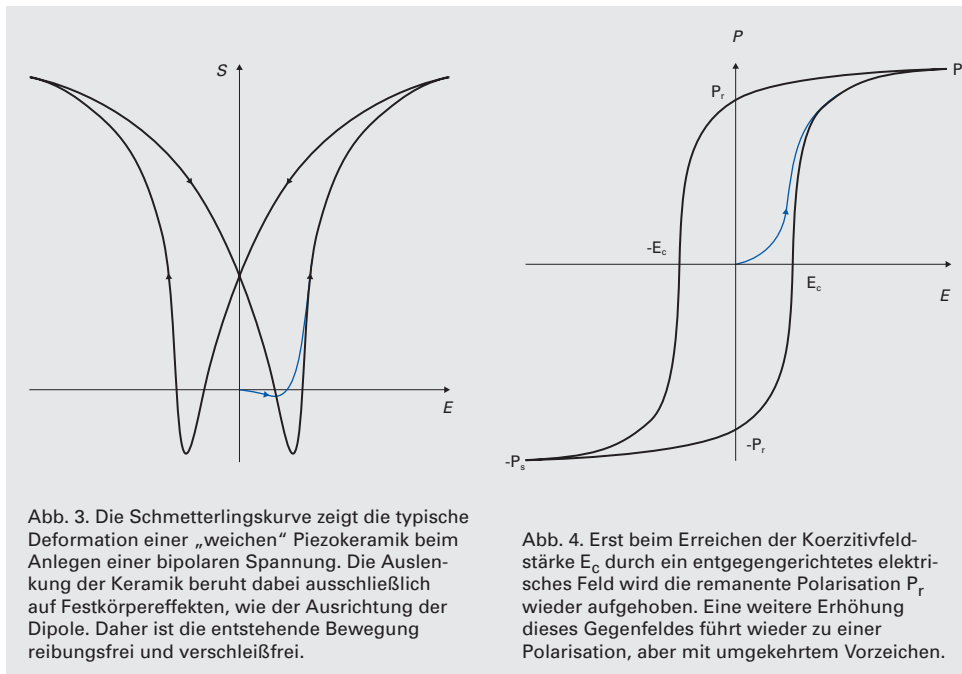
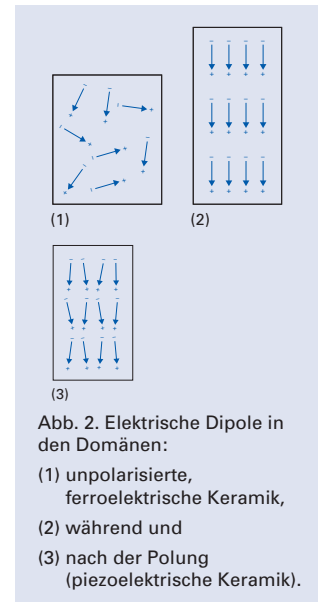
## Polung der Piezokeramik

Der Polungsprozess resultiert in einer remanenten Polarisation, die mit einer Dehnung des Materials einhergeht und bei Über-

schreiten der mechanischen, thermischen und elektrischen Grenzwerte des Materials wieder abgebaut wird (s. Abb. 3). Die Keramik besitzt jetzt piezoelektrische Eigenschaften und verändert beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Dimensionen. Für manche PZT Keramiken muss der Polungsprozess bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden.

Beim Überschreiten der zulässigen Betriebstemperatur depolarisiert die polarisierte Keramik, wobei der Grad der Depolarisation von der Curie-Temperatur des Materials abhängt.

Ein ausreichend starkes elektrisches Feld kann die Polarisationsrichtung umkehren (s. Abb. 4). Die Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Größen ist von entscheidender Bedeutung für die breite technische Nutzung von Piezokeramiken.



# Elektromechanik

## GRUNDGLEICHUNGEN UND PIEZOELEKTRISCHE KONSTANTEN

$D$	elektrische Flussdichte
$T$	mechanische Spannung
$E$	elektrisches Feld
$S$	mechanische Dehnung
$d$	piezoelektrische Ladungskonstante
$\varepsilon^T$	Permittivität (für $T = \text{konstant}$ )
$s^E$	Nachgiebigkeits- bzw. Elastizitätskonstante (für $E = \text{konstant}$ )

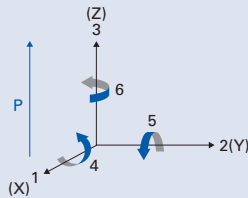


Abb. 5. Orthogonales System zur Beschreibung der Eigenschaften einer polarisierten Piezokeramik. Achse 3 ist die Polarisationsrichtung

Polarisierte piezoelektrische Materialien werden durch verschiedene Parameter und Zusammenhänge charakterisiert.

In vereinfachter Form sind die Grundzusammenhänge der elektrischen und elastischen Eigenschaften wie folgt darstellbar:

$$D = dT + \varepsilon^T E$$

$$S = s^E T + dE$$

Diese Beziehungen gelten nur für kleine elektrische und mechanische Amplituden, sogenannte Kleinsignalwerte. In diesem Bereich sind die Zusammenhänge zwischen den elastischen Deformations- ( $S$ ) bzw. Spannungs- ( $T$ ) Komponenten und den Komponenten des elektrischen Feldes  $E$  bzw. der elektrischen Flussdichte  $D$  linear.

### Zuordnung der Achsen

Zur Festlegung der Richtungen werden die Achsen 1, 2 und 3 eingeführt, analog zu den X-, Y- und Z-Achsen des kartesischen Koordinatensystems. Die Drehachsen werden mit 4, 5 und 6 bezeichnet. (s. Abb. 5).

Die Polarisationsrichtung (Achse 3) wird während der Polung durch ein starkes Feld zwischen den Elektroden festgelegt.

Da das piezoelektrische Material anisotrop ist, werden die entsprechenden physikalischen Größen durch Tensoren beschrieben. Die piezoelektrischen Konstanten werden daher entsprechend indiziert.

### Permittivitätszahl $\varepsilon$

Die Permittivitätszahl  $\varepsilon$  bzw. die relative Dielektrizitätskonstante (DK) ist das Verhältnis aus der absoluten Permittivität des Keramikmaterials und der Permittivität im Vakuum ( $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ), wobei die absolute Permittivität ein Maß für die Polarisierbarkeit im elektrischen Feld darstellt. Die Abhängigkeit der DK von der Richtung des elektrischen Feldes und der dielektrischen Verschiebung wird durch entsprechende Indizes angezeigt.

### Beispiele

$\varepsilon_{33}^T$  DK-Wert in Polungsrichtung bei anliegendem elektrischem Feld in Polungsrichtung (3-Richtung) bei einer konstanten mechanischen Spannung ( $T = 0$ : „freie“ Permittivität).

$\varepsilon_{11}^S$  Elektrisches Feld und dielektrische Verschiebung in 1-Richtung, bei konstanter Deformation ( $S = 0$ : „geklemmte“ Permittivität).

### Piezoelektrische Ladungskonstante, Piezomodul $d_{ij}$

Der Piezomodul ist das Verhältnis von induzierter elektrischer Ladung zu mechanischer Spannung bzw. von erzeugter mechanischer Dehnung zu anliegendem elektrischem Feld ( $T = \text{konstant}$ ).

### Beispiel

$d_{33}$  Erzeugte Dehnung pro Einheit angelegtem elektrischem Feld in V/m oder Ladungsdichte in C/m<sup>2</sup> pro Einheit Druck in N/m<sup>2</sup>, jeweils in Polungsrichtung.

### Piezoelektrische Spannungskonstante $g_{ij}$

Die Spannungskonstante  $g$  ist das Verhältnis von elektrischer Feldstärke  $E$  zur wirkenden mechanischen Spannung  $T$ . Dividiert man die jeweilige piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{ij}$  durch die zugehörige Permittivitätszahl erhält man die entsprechende  $g_{ij}$ -Konstante.

### Beispiel

$g_{31}$  Induziertes elektrisches Feld in 3-Richtung pro in 1-Richtung wirkender mechanischer Spannung = Kraft pro Fläche, nicht unbedingt orthogonal.

## Elastische Nachgiebigkeit $s_{ij}$

Die Nachgiebigkeits- oder Elastizitätskonstante  $s$  ist das Verhältnis der relativen Deformation  $S$  zur mechanischen Spannung  $T$ . Mechanische und elektrische Energie bedingen einander gegenseitig, daher müssen die elektrischen Grenzbedingungen wie die elektrische Flussdichte  $D$  und die Feldstärke  $E$  berücksichtigt werden.

### Beispiele

$s_{33}^E$  Verhältnis der mechanischen Dehnung in 3-Richtung zu in 3-Richtung wirkender mechanischer Spannung, bei konstantem elektrischem Feld ( $E = 0$ : Kurzschluss).

$s_{55}^D$  Das Verhältnis einer Scherung zur wirkenden Scherspannung bei konstanter dielektrischer Verschiebung ( $D = 0$ : Leerlauf).

Der häufig verwendete Elastizitäts- oder Young-Modul  $Y_{ij}$  entspricht in erster Näherung dem reziproken Wert der entsprechenden Elastizitätskonstanten.

## Frequenzkonstante $N_i$

Die Frequenzkonstante  $N$  beschreibt den Zusammenhang zwischen der Geometrie eines Körpers und der entsprechenden (Serien-) Resonanzfrequenz. Die Indizes bezeichnen die entsprechende Schwingungsrichtung,  $A$  = Abmessung;  $N = f_s A$ .

### Beispiele

$N_3$  die Frequenzkonstante für die Longitudinalschwingung eines schlanken Stabes, welcher in der Längsrichtung polarisiert ist.

$N_1$  die Frequenzkonstante für die transversale Schwingung eines schlanken Stabes, welcher in der 3-Richtung polarisiert ist.

$N_5$  die Frequenzkonstante der Dickenschwingung einer dünnen Platte.

$N_P$  die Frequenzkonstante der planaren Flächenschwingung einer runden Scheibe.

$N_t$  die Frequenzkonstante der Dicken-schwingung einer dünnen Scheibe, die über die Dicke polarisiert ist.

## Mechanische Güte $Q_m$

Die mechanische Güte  $Q_m$  charakterisiert die „Resonanzschärfe“ eines piezoelektrischen Körpers oder Resonators und wird vorrangig aus der 3 dB-Bandbreite der Serienresonanz des schwingfähigen Systems bestimmt (s. Abb. 7 Typischer Impedanzverlauf). Der reziproke Wert des mechanischen Gütefaktors ist der mechanische Verlustfaktor, das Verhältnis aus Wirk- und Blindwiderstand im Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Resonators im Resonanzfall.

## Kopplungsfaktoren $k$

Der Kopplungsfaktor  $k$  ist ein Maß für die Ausprägung des piezoelektrischen Effektes (**k e i n** Wirkungsgrad!). Er beschreibt das Vermögen eines piezoelektrischen Materials, aufgenommene elektrische in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt. Der Kopplungsfaktor berechnet sich aus der Quadratwurzel des Verhältnisses von gespeicherter mechanischer Energie zur gesamten aufgenommenen Energie. Unter dynamischen Bedingungen (Resonanzfall) hängt  $k$  von der entsprechenden Schwingungsform des piezoelektrischen Körpers ab.

### Beispiele

$k_{33}$  Kopplungsfaktor der Longitudinalschwingung.

$k_{31}$  Kopplungsfaktor der transversalen Längsschwingung.

$k_P$  Kopplungsfaktor der planaren Radialschwingung einer runden Scheibe.

$k_t$  Kopplungsfaktor der Dickenschwingung einer Platte.

$k_{15}$  Kopplungsfaktor der Dickenscherschwingung einer Platte.

# Dynamisches Verhalten

## SCHWINGUNGSFORMEN VON PIEZOKERAMISCHEN KÖRPERN

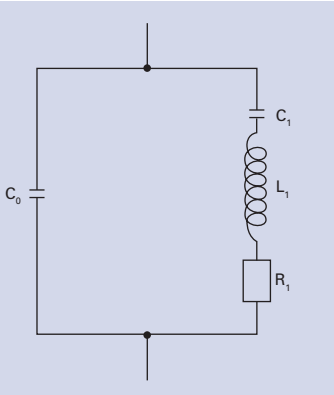


Abb. 6.  
Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Resonators

Das elektromechanische Verhalten eines zu Schwingungen angeregten piezoelektrischen Körpers lässt sich mit einem elektrischen Ersatzschaltbild darstellen (s. Abb. 6).

$C_0 + C_1$  ist dabei die Kapazität des Dielektrikums. Die Reihenschaltung aus  $C$ ,  $L$ , und  $R$  beschreibt die Änderung der mechanischen Eigenschaften, wie elastische Deformation, effektive Masse (Trägheit) und mechanische Verluste, durch innere Reibung. Diese Schwingkreis-Beschreibung ist allerdings nur für Frequenzen in der Nähe der tiefsten mechanischen Eigenresonanz anwendbar.

Die meisten piezoelektrischen Materialparameter werden über Impedanzmessungen an speziellen Prüfkörpern nach der Norm EN 50324-2 im Resonanzfall bestimmt.

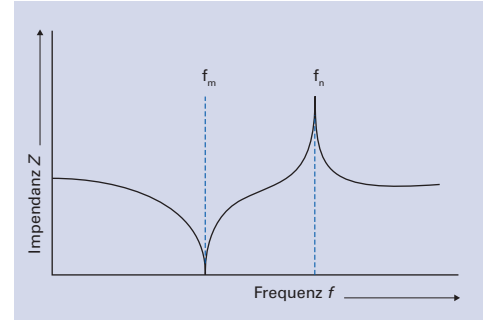


Abb. 7. Typischer Impedanzverlauf

Geometrie	Schwingungen		
	Typ	mechanische Deformation	Serienresonanzfrequenz
<b>Scheibe</b> 	Radial		$f_s = \frac{N_P}{OD}$
	Dicke		$f_s = \frac{N_t}{TH}$
<b>Platte</b> 	Transversal		$f_s = \frac{N_1}{L}$
<b>Stab</b> 	Longitudinal		$f_s = \frac{N_3}{L}$
<b>Scherplatte</b> 	Dickenscher		$f_s = \frac{N_5}{TH}$
<b>Rohr</b> 	Transversal		$f_s \approx \frac{N_1}{L}$
	Wanddicke		$f_s \approx \frac{N_t}{TH}$



Abbildung 7 zeigt einen typischen Impedanzverlauf. Für die Bestimmung der piezoelektrischen Kennwerte werden die Serien- und Parallelresonanz  $f_s$  und  $f_p$  herangezogen. Diese entsprechen in guter Näherung dem Impedanzminimum  $f_m$  und -maximum  $f_n$ .

## Schwingungszustände piezoelektrischer Komponenten

Schwingungszustände bzw. -formen und Deformation werden maßgebend von der Geometrie des Körpers, mechano-elastischen Eigenschaften und der Polarisationsrichtung bestimmt. Koeffizienten s. S. 10, spezifische Werte s. S. 18, Abmessungen s. S. 27. Die Formeln dienen zur Berechnung von Näherungswerten.

Elektrisch induzierte Auslenkung (Kleinsignal)	Mechanisch induzierte elektr. Spannung (Kleinsignal)
$\Delta OD = \frac{d_{31} OD}{TH} U$	
$\Delta TH = d_{33} U$	$U = -\frac{4g_{33} TH}{\pi OD^2} F_3$
$\Delta L = \frac{d_{31} L}{TH} U$	$U = -\frac{g_{31}}{W} F_1$
$\Delta L = d_{33} U$	$U = -\frac{g_{33} L}{W TH} F_3$
$\Delta L = d_{15} U$	$U = -\frac{g_{15} TH}{L W} F_3$
$\Delta L = \frac{d_{31} L}{TH} U$	
$\Delta TH = d_{33} U$	



# Materialeigenschaften und Klassifizierung

PI Ceramic bietet eine breite Auswahl piezoelektrischer Keramikmaterialien auf der Basis von Bleizirkonat-Bleititanat (PZT) und Bariumtitanat an. Die Klassifizierung der Materialeigenschaften erfolgt nach der europäischen Norm EN 50324.

Außer den hier im Detail beschriebenen Standardtypen steht eine Vielzahl von Modifikationen zur Verfügung, die auf die verschiedensten Anwendungen zugeschnitten sind.

International gebräuchlich werden Piezokeramiken in zwei Gruppen eingeteilt; die Bezeichnungen „weiche“ und „harte“ PZT-Keramiken beziehen sich auf die Dipol- bzw. Domänenbeweglichkeit und damit auch auf das Polarisations- und Depolarisationsverhalten.

## „Weiche“ Piezokeramiken

Kennzeichen sind eine vergleichsweise hohe Domänenbeweglichkeit und ein daraus resultierendes „ferroelektrisch weiches“ Verhalten, das bedeutet eine relativ leichte Polarisierbarkeit. Die Vorteile der „weichen“ PZT-Materialien liegen im großen Piezo-

modul, in mittleren Permittivitäten und hohen Kopplungsfaktoren.

Wichtige Einsatzgebiete für „weiche“ Piezokeramiken sind **Aktoren** für die Mikro- und Nanopositionierung, **Sensoren** wie klassische Schwingungsaufnehmer, Ultraschallsender und -empfänger z.B. zur Durchfluss- oder Füllstandsmessung, Objektidentifikation bzw. -überwachung sowie **elektroakustische Anwendungen** als Schallgeber und Mikrofone, bis hin zum Einsatz als Tonabnehmer an Musikinstrumenten.

## „Harte“ Piezokeramiken

Ferroelektrische „Hart“-PZT-Materialien können hohen elektrischen und mechanischen Belastungen standhalten. Ihre Eigenschaften ändern sich dabei nur wenig, was sie vor allem für Leistungsanwendungen prädestiniert. Die Vorteile dieser PZT-Materialien liegen in der moderaten Permittivität, großen piezoelektrischen Kopplungsfaktoren, hohen Güten und sehr guter Stabilität bei hohen mechanischen Belastungen und Betriebsfeldstärken. Niedrige dielektrische Verluste ermöglichen den Dauereinsatz im Resonanzbetrieb mit nur geringer Eigenerwärmung des Bauteiles. Diese Piezoelemente werden z.B. eingesetzt in der Ultraschallreinigung (typischerweise kHz-Frequenzbereich), der Materialbearbeitung (Ultraschallschweißen, -bilden, -bohren, usw.), für Ultraschallprozessoren (z.B. zum Dispergieren flüssiger Medien), im medizinischen Bereich (Ultraschall-Zahnstein Entfernung, chirurgische Instrumente usw.) und auch in der Sonartechnik.



## Bleifreie Werkstoffe und Materialien

Piezelektrische Keramiken, die heute zum großen Teil auf Bleizirkonat-Bleititanat-Verbindungen basieren, unterliegen einer Ausnahmeregelung der EU-Richtlinie zur Verringerung von Gefahrstoffen (RoHS) und können daher unbedenklich eingesetzt werden. PI Ceramic ist dennoch bestrebt, leistungsfähige, bleifreie Piezomaterialien bereitzustellen und so Zukunftssicherheit zu bieten. Derzeit qualifiziert PI Ceramic Technologien, um bleifreie Keramikkomponenten zuverlässig in Serie zu fertigen.

### Erste Schritte zum industriellen Einsatz mit PIC 700

PI Ceramic stellt mit dem Werkstoff PIC 700 eine erste bleifreie Piezokeramik aus der Laborfertigung zur Verfügung.

PIC 700 basiert auf Bismut-Natrium-Titanat (BNT) und zeigt sehr ähnliche Eigenschaften wie Bariumtitanat-Werkstoffe. PIC 700 ist geeignet für Ultraschallwandler im MHz-Bereich sowie für Sonar- und Hydrofonanwendungen.

### Eigenschaften der bleifreien Piezokeramik

Die maximale Einsatztemperatur der BNT-basierten Keramik liegt bei ca. 200 °C. Im Vergleich zu klassischen, bleihaltigen Werkstoffen sind Permittivität und piezoelektrische Kopplungsfaktoren von BNT-Komponenten geringer. Wenngleich PIC 700 für verschiedene Applikationen gut geeignet ist, ist ein genereller Ersatz von bleihaltigen PZT-Piezoelementen in technischen Anwendungen derzeit nicht abzusehen.



Typische Maße aktueller PIC 700 Komponenten liegen bei Durchmessern bis 20 mm und Dicken bis 2 mm

## Kristalliner Piezowerkstoff für Aktoren

### Bleifrei und mit hoher Linearität

Piezokeramische Aktoren zeigen ein nicht-lineares Verhalten der Auslenkung: Die angelegte Spannung ist daher kein wiederholbares Maß für die erreichte Position. Für Anwendungen, in denen die Position relevant ist, müssen daher Sensoren eingesetzt werden.

Das kristalline Material PIC 050 zeigt demgegenüber eine deutlich um den Faktor 10 verbesserte Linearität, so dass auf den Positionssensor verzichtet werden kann.

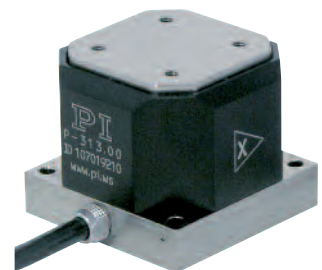
PIC 050 wird verwendet für Aktoren und Nanopositioniersysteme mit dem Handelsnamen Picoactuator®. Sie weisen ebenso hohe Steifigkeit und Dynamik wie Aktoren aus PZT-Material auf, allerdings ist die Auslenkung beschränkt: Bei einer maximalen Bauhöhe von 20 mm ergibt sich ein Stellweg bis zu  $\pm 3 \mu\text{m}$ .

### Picoactuator® in der Nanopositionierung

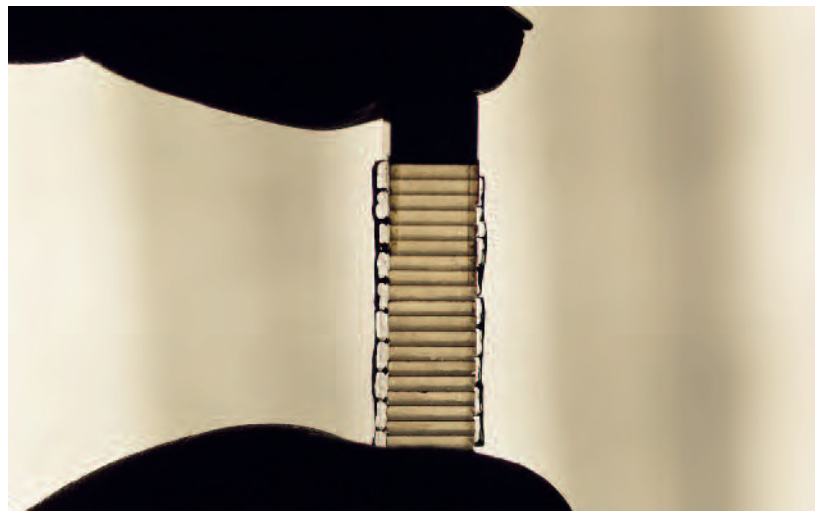
In der Präzisions-Positioniertechnik setzt Physik Instrumente (PI) diese Aktoren genau dort ein, wo diese geringe Auslenkung mit hoher Dynamik und Genauigkeit erforderlich ist. Die hohe Linearität ermöglicht den Be-

trieb ohne Positionsregelung, die aufgrund der beschränkten Regelbandbreite die Dynamik des Systems nach oben begrenzt.

Aufgrund seiner Verwendung in Positioniersystemen wird der Werkstoff PIC 050 nur als Translations- oder Scheraktor in vorgegebenen Formen angeboten. Die Standard-Abmessungen orientieren sich an denen der PICA-Shear-Aktoren (s. [www.piceramic.de](http://www.piceramic.de)).



Hochdynamisches Nanopositioniersystem mit Picoactuator® Technologie



Der Kristall PIC 050 bildet durchscheinende Schichten im Picoactuator®.

## Materialeigenschaften und Klassifizierung

Werkstoff- bezeichnung	Allgemeine Eigenschaften der Werkstoffe „Weich“-PZT	Klassifizierung nach EN 50324-1	MIL-Standard DOD-STD-1376A
<b>PIC151</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> hohe Permittivität, hoher Kopplungsfaktor, hohe piezoelektrische Ladungskonstante <b>Geeignet für:</b> Aktorik, Ultraschallwandler geringer Leistung, niederfrequente Schallwandler Standardmaterial für Aktoren der PICA Serie: PICA Stack, PICA Thru	<b>600</b>	<b>II</b>
<b>PIC255</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> sehr hohe Curie-Temperatur, hohe Permittivität, hoher Kopplungsfaktor, hohe Ladungskonstante, niedriger mechanischer Gütefaktor, niedriger Temperaturkoeffizient <b>Geeignet für:</b> Aktoranwendungen bei dynamischen Einsatzbedingungen und hohen Umgebungstemperaturen (PICA Power Serie), Ultraschallwandler mit geringer Leistung, nichtresonante Breitbandsysteme, Kraft- und Schallsensoren, DuraAct Patch Transducer, PICA Shear Scheraktoren	<b>200</b>	<b>II</b>
<b>PIC155</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> sehr hohe Curie-Temperatur, niedriger mechanischer Gütefaktor, niedrige Permittivität, hohe Empfindlichkeit (g-Konstanten) <b>Geeignet für:</b> Anwendungen, die eine hohe g-Konstante (piezoelektrische Spannungskonstante) erfordern, z. B. für Mikrophone und Schwingungsaufnehmer mit Vorverstärker, Schwingungsmessungen bei tiefen Frequenzen	<b>200</b>	<b>II</b>
<b>PIC153</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> extrem hohe Werte für Permittivität, Kopplungsfaktor, hohe Ladungskonstante, Curie-Temperatur ca. 185 °C <b>Geeignet für:</b> Hydrophone, Wandler in der medizinischen Diagnostik, Aktorik	<b>600</b>	<b>VI</b>
<b>PIC152</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> speziell niedriger Temperaturkoeffizient der Permittivität <b>Geeignet für:</b> Kraft- und Beschleunigungsaufnehmer	<b>200</b>	<b>II</b>



Werkstoff-bezeichnung	Allgemeine Eigenschaften der Werkstoffe „Hart“-PZT	Klassifizierung nach EN 50324-1	MIL-Standard DOD-STD-1376A
<b>PIC181</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> extrem hoher mechanischer Gütefaktor, gute Temperatur- und Zeitkonstanz der dielektrischen und elastischen Werte <b>Geeignet für:</b> Leistungsschallanwendungen, Anwendungen im Resonanzbetrieb	<b>100</b>	<b>I</b>
<b>PIC141</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> hoher mechanischer Gütefaktor, Permittivität liegt zwischen PIC181 und PIC241 (austauschbar für Vergleichstypen) <b>Geeignet für:</b> Leistungsschallanwendungen, u. a. Verneblung von Medikamenten	<b>100</b>	<b>I</b>
<b>PIC241</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> hoher mechanischer Gütefaktor, höhere Permittivität im Vergleich zu PIC181 <b>Geeignet für:</b> Leistungsschallanwendungen, Piezomotor-Antriebe	<b>100</b>	<b>I</b>
<b>PIC300</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> sehr hohe Curie-Temperatur <b>Geeignet für:</b> Anwendungen bei Temperaturen bis 250 °C (kurzzeitig bis 300 °C)	<b>100</b>	<b>I</b>

	Barium - Bleititanat		
<b>PIC110</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bariumtitanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> Curie-Temperatur 150 °C, niedrige akustische Impedanz <b>Geeignet für:</b> Sonar- und Hydrophonapplikationen	<b>400</b>	<b>IV</b>

	Bleifreie Werkstoffe		
<b>PIC050</b>	<b>Material:</b> kristalliner Spezialwerkstoff <b>Eigenschaften:</b> hervorragende Stabilität, Curie-Temperatur > 500 °C <b>Geeignet für:</b> Hochgenaue, hysteresefreie Positionierung im offenen Regelkreis, Picoactuator®		
<b>PIC700</b>	<b>Material:</b> modifizierter Bismut-Natrium-Titanat-Werkstoff <b>Eigenschaften:</b> Maximale Einsatztemperatur 200 °C, niedrige Dichte, hoher Kopplungsfaktor der Dickenschwingung, niedriger planarer Kopplungsfaktor <b>Geeignet für:</b> Ultraschallwandler > 1MHz		

# Werkstoffdaten

## STANDARMATERIALIEN

„Weich“							
		Einheit	PIC151	PIC255	PIC155	PIC153	PIC152
<b>Physikalische und dielektrische Eigenschaften</b>							
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	7,80	7,80	7,80	7,60	7,70
Curie-Temperatur	$T_c$	°C	250	350	345	185	340
Relative Permittivitätszahl	in Polungsrichtung	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	2400	1750	1450	4200	1350
	⊥ zur Polung	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1980	1650	1400		
Dielektrischer Verlustfaktor	$\tan \delta$	10 <sup>-3</sup>	20	20	20	30	15
<b>Elektromechanische Eigenschaften</b>							
Kopplungsfaktor	$k_p$		0,62	0,62	0,62	0,62	0,48
	$k_t$		0,53	0,47	0,48		
	$k_{31}$		0,38	0,35	0,35		
	$k_{33}$		0,69	0,69	0,69		0,58
	$k_{15}$			0,66			
Piezoelektrische Ladungskonstante	$d_{31}$		-210	-180	-165		
	$d_{33}$	10 <sup>-12</sup> C/N	500	400	360	600	300
	$d_{15}$			550			
Piezoelektrische Spannungskonstante	$g_{31}$		-11,5	-11,3	-12,9		
	$g_{33}$	10 <sup>-3</sup> Vm/N	22	25	27	16	25
<b>Akustomechanische Eigenschaften</b>							
Frequenzkonstante	$N_p$		1950	2000	1960	1960	2250
der Serienresonanzfrequenz	$N_1$		1500	1420	1500		
	$N_3$		1750		1780		
	$N_t$	Hz · m	1950	2000	1990	1960	1920
Elastische Nachgiebigkeitskonstante	$S_{11}^E$		15,0	16,1	15,6		
	$S_{33}^E$	10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N	19,0	20,7	19,7		
Elastische Steifigkeitskonstante	$C_{33}^D$	10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>	10,0		11,1		
Mechanischer Gütefaktor	$Q_m$		100	80	80	50	100
<b>Temperaturstabilität</b>							
Temperaturkoeffizient von $\epsilon_{33}^T$ (im Bereich -20 °C bis +125 °C)	$TK \epsilon_{33}$	10 <sup>-3</sup> /K	6	4	6	5	2
<b>Zeitstabilität</b> (relative Änderung des Parameters pro Zeitdekade in %)							
Relative Dielektrizitätszahl	$C_\epsilon$	%		-1,0	-2,0		
Kopplungsfaktor	$C_K$			-1,0	-2,0		

„Hart“						Bleifreie Materialien	
	PIC181	PIC141	PIC241	PIC300	PIC110	PIC050 <sup>1)</sup>	PIC700 <sup>2)</sup>
	7,80	7,80	7,80	7,80	5,50	4,7	5,6
	330	295	270	370	150	>500	200 <sup>3)</sup>
	1200	1250	1650	1050	950	60	700
	1500	1500	1550	950		85	
	3	5	5	3	15	<1	30
	0,56	0,55	0,50	0,48	0,30		0,15
	0,46	0,48	0,46	0,43	0,42		0,40
	0,32	0,31	0,32	0,25	0,18		
	0,66	0,66	0,64	0,46			
	0,63	0,67	0,63	0,32			
	-120	-140	-130	-80	-50		
	265	310	290	155	120	40	120
	475	475	265	155		80	
	-11,2	-13,1	-9,8	-9,5			
	25	29	21	16	-11,9		
	2270	2250	2190	2350	3150		
	1640	1610	1590	1700	2300		
	2010	1925	1550	1700	2500		
	2110	2060	2140	2100			
	11,8	12,4	12,6	11,1			
	14,2	13,0	14,3	11,8			
	16,6	15,8	13,8	16,4			
	2000	1500	1200	1400	250		
	3	5		2			
		-4,0			-5,0		
		-2,0			-8,0		

Empfohlene Einsatztemperatur: 50% der Curie-Temperatur.

1) kristalliner Werkstoff

2) vorläufige Daten, Änderungen vorbehalten

3) maximale Einsatztemperatur

Folgende Werte gelten näherungsweise für alle PZT-Materialien von PI Ceramic:

Spezifische Wärmekapazität:

$WK = \text{ca. } 350 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Spezifische Wärmeleitfähigkeit:

$WL = \text{ca. } 1,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Poisson'sche Querkontraktion:

$\sigma = \text{ca. } 0,34$

Thermische Ausdehnungskoeffizienten:

$\alpha_3 = \text{ca. } -4 \text{ bis } -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

(in Polungsrichtung, kurzgeschlossen)

$\alpha_1 = \text{ca. } 4 \text{ bis } 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

(orthogonal zur Polungsrichtung, kurzgeschlossen)

Statische Druckfestigkeit:

größer 600 MPa

Die Daten wurden an Prüfkörpern mit den nach der Norm EN 50324-2 festgelegten geometrischen Abmessungen bestimmt und sind typische Werte.

Alle angegebenen Daten werden 24 h bis 48 h nach dem Zeitpunkt der Polarisation bei einer Umgebungstemperatur von  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  bestimmt.

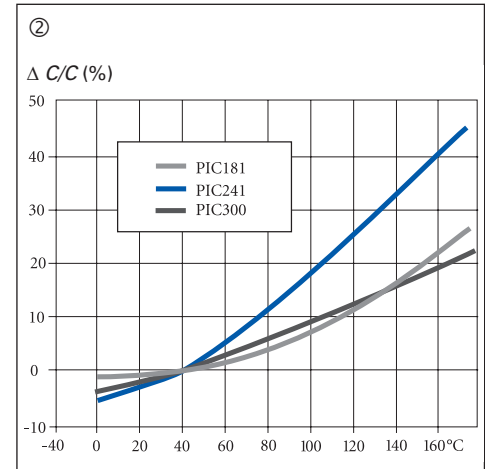
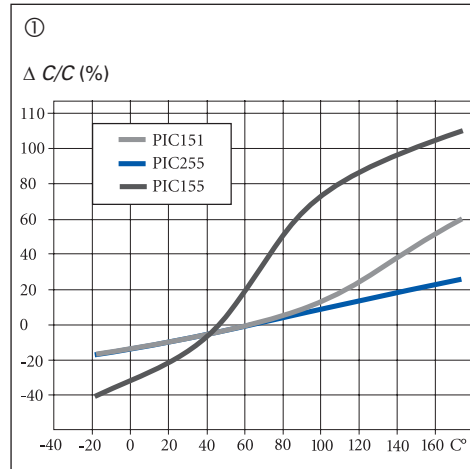
Eine vollständige Koeffizientenmatrix der einzelnen Werkstoffe ist auf Anfrage erhältlich. Bei Fragen zur Interpretation der Materialkennwerte wenden Sie sich an PI Ceramic ([info@piceramic.de](mailto:info@piceramic.de)).

# Temperaturabhängigkeit der Koeffizienten

## Temperaturgang der Kapazität C

① Werkstoffe: PIC151, PIC255 und PIC155

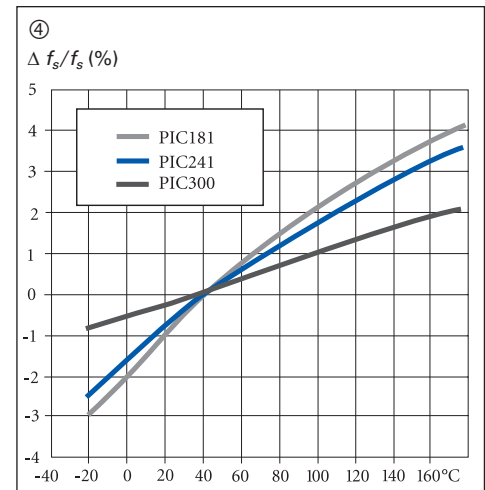
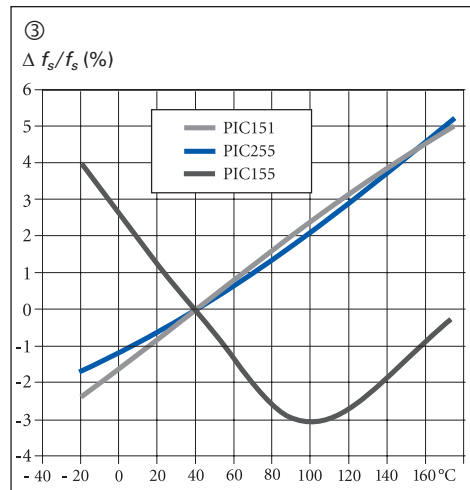
② Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300



## Temperaturgang der Resonanzfrequenz der Längsschwingung $f_s$

③ Werkstoffe: PIC151, PIC255 und PIC155

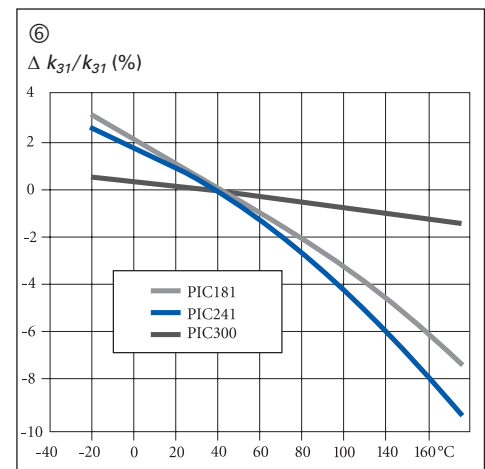
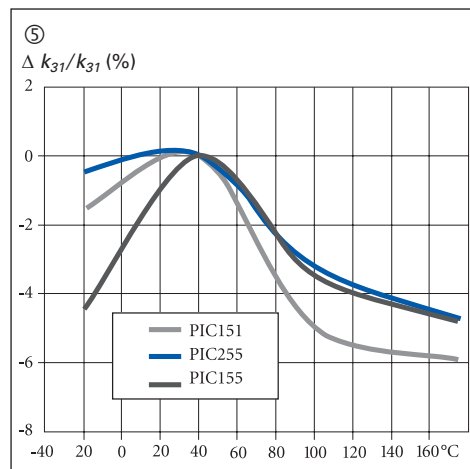
④ Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300



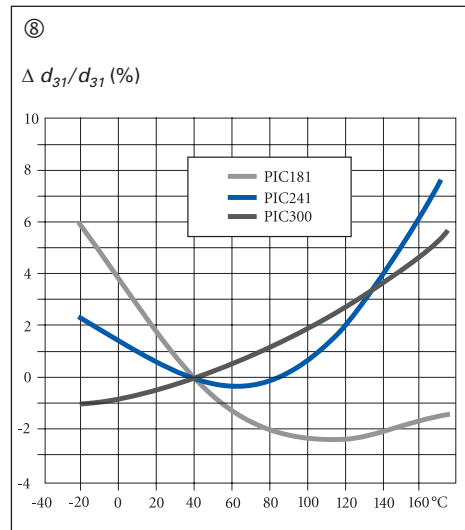
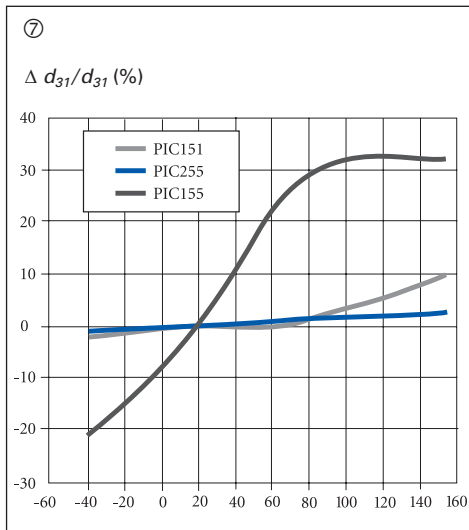
## Temperaturgang des Kopplungsfaktors der Längsschwingung $k_{31}$

⑤ Werkstoffe: PIC151, PIC255 und PIC155

⑥ Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300







Temperaturgang der piezoelektrischen Ladungskonstanten  $d_{31}$

⑦ Werkstoffe: PIC151, PIC255 und PIC155

⑧ Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300

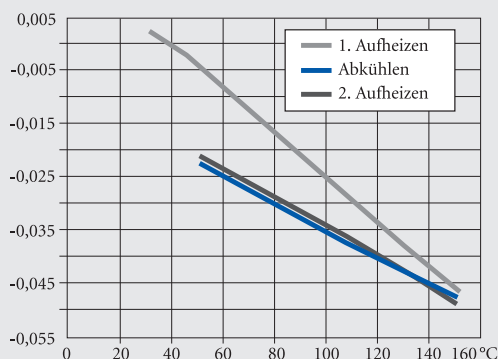
## Spezifische Eigenschaften

Thermische Eigenschaften am Beispiel der PZT-Keramik PIC 255

- Die thermische Dehnung zeigt in Polungsrichtung und senkrecht zur Polungsachse unterschiedliches Verhalten.
- Die Vorzugsorientierung der Domänen in einem gepolten PZT-Körper führt zur Anisotropie und ist Ursache für das unterschiedliche Wärme-Ausdehnungsverhalten.

Thermische Dehnung in Polungsrichtung

$\Delta d_{31}/d_{31} (\%)$



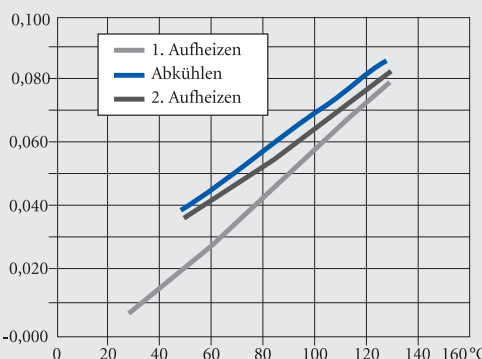
- Nicht gepolte Piezokeramik ist isotrop. Der Ausdehnungskoeffizient ist annähernd linear mit einem TK von ca.  $2 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ .

- Der Einfluss von aufeinander folgenden Temperatureinwirkungen ist insbesondere in der Anwendung zu beachten. Speziell im ersten Temperaturzyklus können große Änderungen im Verlauf auftreten.

- Abhängig vom Werkstoff können die Verläufe stark von den dargestellten abweichen.

Thermische Dehnung senkrecht zur Polung

$\Delta L/L (\%)$



# Fertigungstechnologie

EFFIZIENTE VERFAHREN FÜR KLEINE, MITTLERE UND GROSSE SERIEN



## Herstellung von Piezokomponenten durch Pressverfahren

Mischen und Mahlen  
der Rohstoffe

Vorsintern (Kalzinieren)

Mahlen

Sprühgranulierung

Pressen und Formgebung

Thermische Prozesse  
Sintern bei bis zu 1300 °C

Läppen, Schleifen, Planschleifen,  
Diamant-Trennsägen

Aufbringen der Elektroden: Siebdruck,  
PVD-Verfahren, z. B. Sputtertechnik

Polarisieren

Aufbau- und Verbindungstechnik  
für Aktoren, Schallwandler, Transducer

Endprüfung

## Piezokomponenten in Presstechnologie

Die Basis für die Herstellung von piezokeramischen Formkörpern ist das Sprühgranulat. Mechanisch-hydraulische Pressen stellen daraus Formkörper her. Die Presslinge werden entweder maßgenau unter Berücksichtigung der Sinterschwindung geformt, oder mit Bearbeitungsaufmaßen für eine Präzisionsnachbearbeitung gepresst.

Die gesinterte Keramik ist hart und kann bei Bedarf gesägt und mechanisch nachbearbeitet werden. Die Metallisierung der Piezoelemente erfolgt mithilfe von Siebdruckverfahren oder, für dünne Metallisierungsschichten, mit Sputter- (PVD-) Verfahren. Anschließend werden die Bauelemente polarisiert.

## Stapelaufbau für Aktoren

Piezoaktoren werden durch Aufstapeln mehrerer piezokeramischer Elemente aufgebaut, mit Kontaktelektroden und einer äußeren Isolierschicht aus Polymermaterial versehen.

Piezokeramische Scheiben  
mit Innenbohrung



## Cofiring-Verfahren / Multilayer-Technik / Piezokomponenten in Folientechnik

Feinstmahlen der Rohstoffe

Verschlickern

Foliengießen

Aufbringen der Elektroden  
durch Siebdruckverfahren

Laminieren

Isostatisches Verpressen

Thermische Prozesse  
Binder-BurnOut und Sintern  
bei bis zu 1100 °C

Schleifen

Aufbringen der Anschlusselektroden,  
Termination

Polarisieren

Endprüfung

PICMA® Aktoren mit patentierten,  
mäanderförmigen Außenelek-  
troden für bis zu 20 A Ladestrom

## Folientechnik für dünne Keramiken

Dünne keramische Schichten werden durch Foliengießen hergestellt. Mit diesem Verfahren können minimale Einzelfolien-Stärken von nur 50 µm erreicht werden.

Anschließend werden die Elektroden mit speziellen Siebdruck- bzw. PVD-Verfahren aufgebracht.

## Multilayer-Piezoaktoren: PICMA®

Ein besonders innovatives Herstellungsverfahren ist die Multilayer-Cofiring-Technologie. Hier werden zunächst Folien aus Piezokeramikmaterial gegossen, die anschließend noch im Grünzustand mit Elektroden versehen werden. Das Bauelement wird anschließend aus Einzelfolien laminiert, und Elektroden und Keramik werden gemeinsam in einem einzigen Prozessschritt gesintert.

Das patentierte Design dieses Aufbaus bewirkt eine vollkeramische Außenschicht des Aktors, die isolierend wirkt. Auf weitere Ummantelungen durch z.B. Polymermaterialien kann dadurch verzichtet werden. Damit bleiben PICMA® Piezoaktoren stabil auch unter hoher dynamischer Belastung. Sie erreichen eine höhere Zuverlässigkeit und um einen Faktor 10 längere Lebensdauer als herkömmliche Multilayer-Piezoaktoren.

Erst nach der mechanischen Nachbearbeitung werden die Multilayer-Aktoren mit Anschlusselektroden versehen und polarisiert.

## Flexibilität in der Formgebung

### Formgebung von Presskörpern

Komponenten wie Scheiben oder Platten sind bereits ab einer minimalen Dicke von 0,2 mm kostengünstig herstellbar. Innenboard-Trennsägeautomaten erzeugen die entsprechenden Körper in großen Stückzahlen.

Durch moderne CNC-Technik ist die Bearbeitung der gesinterten Keramikelemente mit höchster Präzision möglich. Damit sind Bohrungen mit Durchmessern bis zu 0,3 mm herstellbar. Nahezu beliebige Konturen können bis auf den Zehntelmillimeter genau geformt werden. Oberflächen lassen sich strukturieren und die Komponenten können dreidimensional passend gefräst werden.

Dünnwandige Rohre mit Wandstärken von 0,5 mm werden mit Ultraschallbearbeitungsverfahren hergestellt.

### Roboterunterstützte Serienfertigung

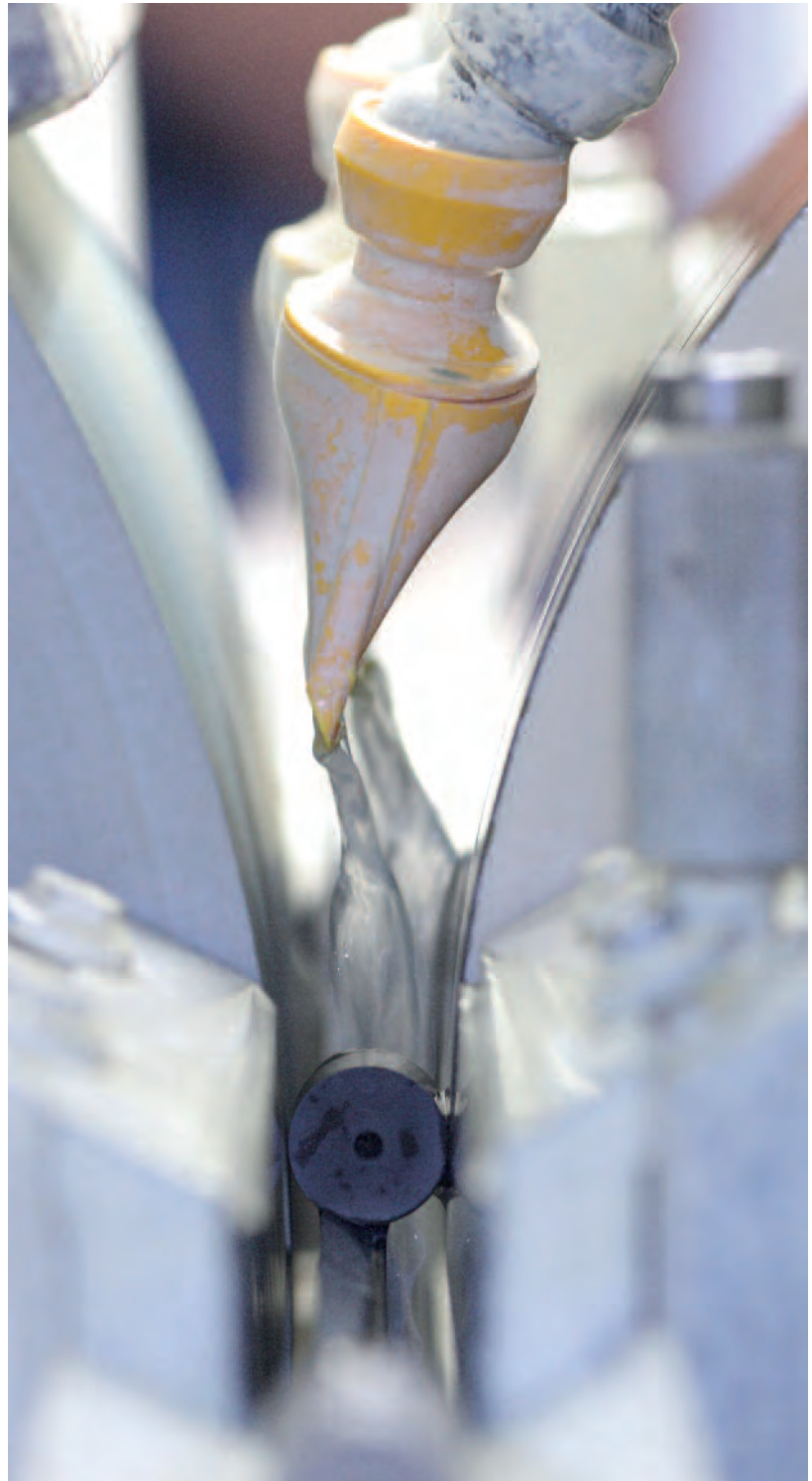
Automatisierte Montage- und Fertigungsstrecken beinhalten beispielsweise schnelle Pick-and-Place-Vorrichtungen und maschinengesteuerte Lötvorgänge. Die Fertigung von piezoelektrischen Bauelementen bis zu mehreren Millionen Stück pro Jahr ist damit problemlos möglich.

### Beliebige Formen auch mit keramischer Rundumversiegelung

Mit modernster Produktionstechnik ist PI Ceramic in der Lage, nahezu beliebige Formen von PICMA® Multilayer-Piezoaktoren zu fertigen. Dabei sind alle Flächen von einer vollkeramischen Isolierschicht umgeben.

Fertigbar sind nicht nur variable Grundformen, z.B. runde oder dreieckige Querschnitte, sondern auch isolierte Innenbohrungen an Biegern, Chips oder Stapelaktoren, wodurch die Integration vereinfacht werden kann.

Spezielle Fräsmaschinen bearbeiten die empfindlichen Keramikfolien bereits im Grünzustand, also vor dem Sintern. Anschließend werden die einzelnen Schichten mit Elektroden versehen und laminiert. Wie bei den PICMA® Standardaktoren wird die Keramik im Cofired-Prozess gemeinsam mit den Innenelektroden gesintert.



Spitzenloses Rundschleifen von piezokeramischen Stäben



## PICMA® Multilayer-Aktoren mit hoher Lebensdauer



Lötautomat mit PICMA® Aktoren

Die inneren Elektroden und die Keramik von PICMA® Multilayer-Aktoren werden gemeinsam gesintert (Cofired-Technologie), wodurch ein monolithischer Piezokeramikblock entsteht. Durch dieses Verfahren entsteht eine vollkeramische Isolierschicht, die vor Luftfeuchtigkeit und gegen Ausfälle durch erhöhten Leckstrom schützt. PICMA® Aktoren sind dadurch konventionellen, polymerisolierten Multilayer-Piezoaktoren in Zuverlässigkeit und Lebensdauer weit überlegen. Der vollkeramische Aufbau bedingt außerdem eine hohe Resonanzfrequenz, wodurch sich die Aktoren ideal für den hochdynamischen Betrieb eignen.

### **Großer Temperaturbereich – optimale UHV Kompatibilität – minimales Ausgasen – neutral in Magnetfeldern**

Die besonders hohe Curie-Temperatur von 320 °C ermöglicht einen nutzbaren Temperaturbereich von bis zu 150 °C, weit jenseits der 80 °C Grenze, die für konventionelle Multilayeraktoren gilt. Damit, und durch die ausschließliche Verwendung anorganischer Materialien, ergeben sich optimale Voraussetzungen für den Einsatz im Ultra-Hochvakuum: kein Ausgasen, und hohe

Ausheiztemperaturen. PICMA® Piezoaktoren arbeiten, bei reduziertem Stellweg, sogar im kryogenen Temperaturbereich. Durch den Aufbau aus ausnahmslos nicht-ferromagnetischen Materialien besitzen die Aktoren einen extrem geringen Restmagnetismus im Bereich weniger Nanotesla.

### **Niedrige Betriebsspannung**

Im Gegensatz zu den meisten handelsüblichen Multilayer-Piezoaktoren erreichen PICMA® Aktoren bei Betriebsspannungen deutlich unter 150 V ihre Nennauslenkung. Diese Eigenschaft wird durch die Verwendung eines besonders feinkörnigen Keramikmaterials erreicht, welches eine geringere Höhe der Innenschichten zulässt.

Die PICMA® Aktoren fallen zumindest teilweise unter den Schutz der folgenden Patente:

Deutsches Patent Nr. 10021919  
 Deutsches Patent Nr. 10234787  
 Deutsches Patent Nr. 10348836  
 Deutsches Patent Nr. 102005015405  
 Deutsches Patent Nr. 102007011652  
 US Patent Nr. 7,449,077

# Verbindungstechnik

## ALLE PROZESSSCHRITTE UNTER EINEM DACH

### Dickschichtelektroden

Die metallischen Elektroden werden mit Siebdrucktechnik auf die Piezokeramik aufgebracht. Die typischen Schichtdicken liegen dabei bei ca. 10 µm. Hierfür werden verschiedene Silberpasten verwendet. Nach dem Siebdruck werden diese Pasten bei Temperaturen oberhalb 800 °C eingebrannt.

### Dünnschichtelektroden

Dünnschichtelektroden werden mit modernen PVD-Verfahren (Sputtering) auf die Keramik aufgebracht. Die typische Dicke der Metallisierung liegt im Bereich von 1 µm. Scherelemente müssen im gepolten Zustand metallisiert werden und sind generell mit Dünnschichtelektroden versehen.

PI Ceramic verfügt über hochproduktive Sputteranlagen, die das Aufbringen von Leitschichten aus Metalllegierungen, vorzugsweise CuNi-Zusammensetzungen und Edelmetallen wie Gold und Silber, ermöglichen.

### Lötverfahren

Konfektionierte Piezobaulemente mit Anschlussdrähten werden im Handlötverfahren durch speziell geschultes Personal hergestellt. Für Lötungen auf miniaturisierten

Komponenten und in Großserien stehen moderne Lötautomaten zur Verfügung.

Lötstellen für erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit werden speziellen visuellen Kontrollen unterzogen. Die hierfür eingesetzten optischen Techniken reichen vom Stereomikroskop bis zum Kamera-Inspektionssystem.

### Aufbau- und Verbindungstechnik

Das Fügen von Produkten durch Klebprozesse erfolgt in der Serienproduktion mit automatisierten Vorrichtungen, die das erforderliche Temperatur-Zeit-Regime (z.B. Aushärtung von Epoxy-Klebstoffen) realisieren und damit eine gleichmäßige Qualität garantieren. Die Klebstoffauswahl und das Aushärtereime werden unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften und der vorgesehenen Einsatzbedingungen für jedes Produkt optimiert. Für komplexe Sonderfertigungen kommen eigens entwickelte Dosier- und Positioniersysteme zur Anwendung.

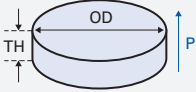
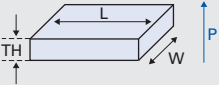
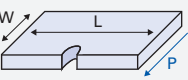
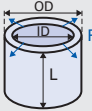
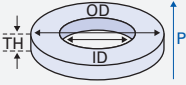
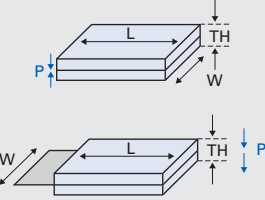
Piezokeramische Stapelaktoren der PICA Serie, Hochvolt-Biegeaktoren und Ultraschall-Transducer sind mit dieser Fügetechnik aufgebaut und haben sich im Einsatz in der Halbleiterindustrie und Medizintechnik durch ihre hohe Zuverlässigkeit bewährt.



Gefüllte Sputteranlage

## Piezokeramische Bauelemente




### ABMESSUNGEN

	<b>Scheibe / Stab / Zylinder</b>	Außendurchmesser OD: 2 bis 80 mm Dicke TH: 0,15 bis 30 mm
	<b>Platte / Block</b>	Länge L: 1 bis 80 mm, Breite W: 1 bis 60 mm, Dicke TH: 0,1 bis 30 mm
	<b>Scherplatte</b>	Länge L: max. 75 mm, Breite W: max. 25 mm, Dicke TH: 0,2 bis 10 mm
	<b>Rohr</b>	Außendurchmesser OD: 2 bis 80 mm, Innendurchmesser ID: 0,8 bis 74 mm, Länge L: max. 30 mm
	<b>Ring</b>	Außendurchmesser OD: 2 bis 80 mm, Innendurchmesser ID: 0,8 bis 74 mm, Dicke TH: max. 70 mm
	<b>Seriell / parallel aufgebaute Biegeelemente</b>	Länge L: 3 bis 50 mm, Breite W: 1 bis 25 mm, Dicke TH: 0,4 bis 1,5 mm Runde Biegeelemente auf Anfrage. Vorzugsabmessungen: Durchmesser: 5 bis 50 mm, Dicke: 0,3 bis 2 mm

- P zeigt die Polungsrichtung an.
- Die Abmessungen bedingen sich gegenseitig und sind nicht beliebig wählbar.
- Die minimalen Abmessungen werden durch physikalische und technologische Grenzen bestimmt. Beispielsweise wird die Dicke bzw. Wandstärke durch die Bruchfestigkeit der Keramik bei mechanischer Bearbeitung begrenzt.
- Maximale Dicke für Polarisierung: 30 mm

#### Kennzeichnung der Polarität

Die während der Polarisation an positivem Potential liegenden Elektrode ist durch einen Punkt oder ein Kreuz auf der Elektrodenfläche gekennzeichnet. Alternativ wird insbesondere bei Dünnschichtelektroden die Richtung der Polarisierung durch die Färbung der Elektrodenmaterialien markiert: Eine rötliche Farbe zeigt die Elektrode an, die bei der Polarisation an positivem Potential lag.

Standardtoleranzen	Dimension	Toleranz
<b>Abmessungen, wie gesintert</b> ± 0,3 mm bzw. ± 3 %	Abweichung von der Ebenheit  (kleine Durchbiegung dünner Scheiben oder Platten bleibt unberücksichtigt)	< 0,02 mm
<b>Länge L, Breite W</b> (Abmessung; Toleranz) < 15 mm; ± 0,15 mm    < 40 mm; ± 0,25 mm < 20 mm; ± 0,20 mm    < 80 mm; ± 0,30 mm	Abweichung von der Parallelität 	< 0,02 mm
<b>Außendurchmesser OD, Innendurchmesser ID</b> (Abmessung; Toleranz) < 15 mm; ± 0,15 mm    < 40 mm; ± 0,25 mm < 20 mm; ± 0,20 mm    < 80 mm; ± 0,30 mm	Abweichung von der Konzentrität 	≤ 0,4 mm
<b>Dicke TH</b> (Abmessung; Toleranz) < 15 mm; ± 0,05 mm    < 40 mm; ± 0,15 mm < 20 mm; ± 0,10 mm    < 80 mm; ± 0,20 mm	Frequenztoleranz	± 5 % (< 2 MHz) ± 10 % (≥ 2 MHz)
	Toleranz der elektrischen Kapazität	± 20 %

## Standardabmessungen

① Elektroden: Silber (Dickschicht) oder PVD-Dünnschicht (verschiedene Materialien: z. B. CuNi, Au, etc.)

② Punkte: Resonanzfrequenzen > 1 MHz  
Kreise: Resonanzfrequenzen < 1 MHz  
Elektroden: Silber (Dickschicht) oder PVD-Dünnschicht (verschiedene Materialien: z. B. CuNi, Au, etc.)

③ Elektroden: Silber (Dickschicht) oder Dünnschicht (CuNi oder Au)

Komponenten mit Standardabmessungen können auf Basis vorrätiger Halbzeuge sehr kurzfristig geliefert werden. Extremwerte

können nicht kombiniert werden. Über die Standardabmessungen hinaus gehende Geometrien sind auf Anfrage erhältlich.

### ① Scheibe / Stab / Zylinder

TH in mm	OD in mm									
	3	5	10	16	20	25	35	40	45	50
0,20	●	●	●	●	●					
0,25	●	●	●	●	●					
0,30	●	●	●	●	●	●				
0,40	●	●	●	●	●	●	●			
0,50	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
0,75	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10,0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
20,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

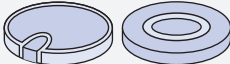
### ② Scheibe/Stab mit definierter Resonanzfrequenz

Frequenz in MHz	OD in mm									
	3	5	10	16	20	25	35	40	45	50
10,00	●	●	●	●	●					
5,00	●	●	●	●	●	●				
4,00	●	●	●	●	●	●	●			
3,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
2,00		●	●	●	●	●	●	●	●	●
1,00			●	●	●	●	●	●	●	●
0,75			○	○	○	○	○	○	○	○
0,50				○	○	○	○	○	○	○
0,40					○	○	○	○	○	○
0,25							○	○	○	○
0,20								○	○	○

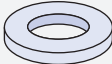
### ③ Platte / Block

TH in mm	L x W in mm <sup>2</sup>									
	4 x 4	5 x 5	10 x 10	15 x 15	20 x 20	25 x 20	25 x 25	50 x 30	50 x 50	75 x 25
0,20	●	●	●	●	●					
0,25	●	●	●	●	●					
0,30	●	●	●	●	●	●	●			
0,40	●	●	●	●	●	●	●			
0,50	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
0,75	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
20,00	●	●	●	●	●	●	●	●		


## Scheibe mit Sonderelektroden (Umkontakt)

Design	OD in mm	TH in mm	Elektroden
	10 / 16 / 20 / 20 / 25 / 40	0,5 / 1,0 / 2,0	Silber (Dickschicht) PVD-Dünnschicht



## Ringe

Design	OD in mm	ID in mm	TH in mm	Elektroden
  *Toleranzen wie gesintert, s. Tabelle S. 27	10	2,7	0,5 / 1,0 / 2,0	Silber
	10*	4,3*	0,5 / 1,0 / 2,0	(Dickschicht)
	10*	5*	0,5 / 1,0 / 2,0	oder CuNi
	12,7	5,2*	0,5 / 1,0 / 2,0	(Dünnschicht)
	25	16*	0,5 / 1,0 / 2,0	
	38	13*	5,0 / 6,0	
	50	19,7*	5,0 / 6,0 / 9,5	

## Rohre

Design	OD in mm	ID in mm	L in mm	Elektroden
	76	60	50	Innen: Silber
	40	38	40	(Dickschicht)
	20	18	30	Außen: Silber
	10	9	30	(Dickschicht)
	10	8	30	oder CuNi
	6,35	5,35	30	bzw. Au
	3,2	2,2	30	(Dünnschicht)
	2,2	1,0	20	

## Rohre mit Sonderelektroden

Design	OD in mm	ID in mm	L in mm	Elektroden
 vierfach segmen- tierte Elektrode	20	18	30	Innen: Silber
	10	9	30	(Dickschicht)
	10	8	30	Außen: Silber
	6,35	5,53	30	(Dickschicht)
 Umkontakt	3,2	2,2	30	oder CuNi
	2,2	1,0	30	bzw. Au
				(Dünnschicht)

## Löthinweise für Anwender

Alle unsere Metallisierungen sind RoHS-konform lötlbar.

Wir empfehlen die Verwendung eines Lotes in der Zusammensetzung Sn 95,5, Ag 3,8, Cu 0,7.

Die durchgehende Erwärmung der Piezokeramik über die Curie-Temperatur hinaus führt zur Depolarisation, und damit zum Verlust oder zur Herabsetzung der piezoelektrischen Kennwerte. Um dies zu verhindern, müssen beim Löten folgende Bedingungen unbedingt eingehalten werden:

- Alle Lötkontakte müssen punktförmig ausgeführt werden.
- Die Lötzeit muss möglichst kurz sein ( $\leq 3$  sec).
- Die spezifische Löttemperatur darf nicht überschritten werden.



# Prüfverfahren

## STANDARDISIERTE VERFAHREN GEBEN SICHERHEIT



Ein umfassendes Qualitätsmanagement kontrolliert sämtliche Produktionsprozesse bei PIC, von der Qualität der Rohstoffe bis hin zum Endprodukt. Damit ist sichergestellt, dass nur freigegebene Teile, die den Qualitätsanforderungen entsprechen, zur Weiterverarbeitung und Lieferung gelangen.

### Elektrische Prüfverfahren

#### *Kleinsignalmessungen*

Daten zu den piezoelektrischen und dielektrischen Eigenschaften wie Frequenzen, Impedanzen, Kopplungsfaktor, Kapazität und Verlustfaktor werden in Kleinsignalmessungen erfasst.

#### *Großsignalmessungen*

DC-Messungen mit Spannungen bis zu 1200 V werden an Aktoren zur Bestimmung von Dehnung, Hysterese und Spannungsfestigkeit in automatisierter Stückprüfung durchgeführt.

### Geometrische und visuelle Prüfverfahren

Für komplexe Messungen stehen Bildverarbeitungsmessgeräte und Weißlichtinterferometer zur Topografie-Untersuchung zur Verfügung.

#### **Visuelle Grenzwerte**

Keramische Komponenten müssen bestimmten visuellen Anforderungen entsprechen.

PIC hat eigene Kriterien zur Qualitätsbewertung der Oberflächen festgelegt, die sich am ehemaligen MIL-STD-1376 orientieren. Dabei sind die verschiedensten Anwen-

dungsfälle berücksichtigt, für besondere Anforderungen gibt es gestaffelte Sortierkategorien. Grundsätzlich gilt, dass visuelle Auffälligkeiten keinen negativen Einfluss auf die Funktion der Komponente haben dürfen.

Die Oberflächenkriterien betreffen:

- Oberflächenbeschaffenheit der Elektrode,
- Poren in der Keramik,
- Kantenabsplittierungen, Kratzer, etc.

### Qualitätsniveau

Alle Prüfungen werden nach dem standardisierten Verfahren DIN ISO 2859 an Stichproben durchgeführt. Für die elektrische Bewertung gilt z. B. das Prüfniveau AQL 1,0. Für kundenspezifische Produkte kann eine gesonderte Liefervorschrift vereinbart werden. Diese umfasst beispielsweise die jeweiligen Freigabeprotokolle, Messwertplots oder Einzelmesswerte bestimmter Prüflinge, bis hin zu Prüfungen jedes Einzelstücks.

### Messung von Werkstoffdaten

Die Daten werden an Prüfkörpern mit den nach der Norm EN 50324-2 festgelegten geometrischen Abmessungen bestimmt und sind typische Werte (s. S. 14 ff.). Die Einhaltung dieser typischen Kennwerte wird durch ständige Freigabeprüfungen der einzelnen Werkstoffchargen dokumentiert.

Die Eigenschaften des einzelnen Produkts können davon abweichen und werden von der Geometrie, Variationen in den Herstellungsverfahren und Mess- bzw. Ansteuerbedingungen bestimmt.



## Integrierte Baugruppen, Sub-Assemblies

VON DER KERAMIK ZUR KOMPLETTLÖSUNG

### Keramik in verschiedenen Integrationsstufen

PI Ceramic sorgt für die Integration von Piezokeramiken in das Kundenprodukt. Dazu gehören sowohl die elektrische Kontaktierung der Elemente nach Kundenvorgaben als auch die Montage in beigestellte Bauelemente, das Verkleben oder der Verguss. Für den Kunden beschleunigt das den Herstellungsprozess und verkürzt die Lieferzeiten.

### Sensorkomponenten – Transducer

PI Ceramic liefert in großen Serien komplette Schallwandler für die unterschiedlichsten Einsatzbereiche. Dazu gehören unter anderem OEM Baugruppen für die Ultraschall-Durchflussmesstechnik, Füllstands-, Kraft- und Beschleunigungsmessung.

### Piezoaktoren

Die einfachste Form eines Piezoaktors ist eine Piezoscheibe bzw. -platte, aus der wiederum Stapelaktoren mit entsprechend höherer Auslenkung aufgebaut werden können. Alternativ werden Multilayer-Aktoren in unterschiedlichen Längen aus Piezofolien mit Schichtstärken unter 100 µm gefertigt. Scheraktoren werden aus Scherplatten gestapelt und sind so polarisiert, dass sie orthogonal zur anliegenden Spannung auslenken. Biegeaktoren in verschiedenen Grundformen sind in Multilayer-Technik zweischichtig (bimorph)

aufgebaut und bieten dadurch eine symmetrische Auslenkung.

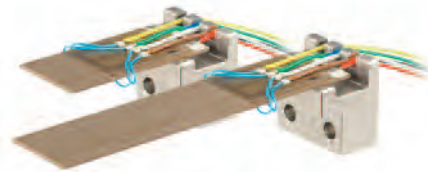
Piezoaktoren können mit Sensoren zur Messung der Auslenkung versehen werden, und eignen sich dann zur wiederholbaren Positionierung mit Nanometergenauigkeit. Häufig werden Piezoaktoren in ein mechanisches System integriert, wobei eine Hebelübersetzung die Stellwege verlängert. Festkörperführungen sorgen dann für hohe Steifigkeit und minimieren den seitlichen Versatz.

### Piezomotoren

Piezokeramiken sind das Antriebselement für Piezomotoren von Physik Instrumente (PI), die es ermöglichen, die besonderen Eigenschaften der Piezoaktoren auch über längere Verstellwege zu nutzen.

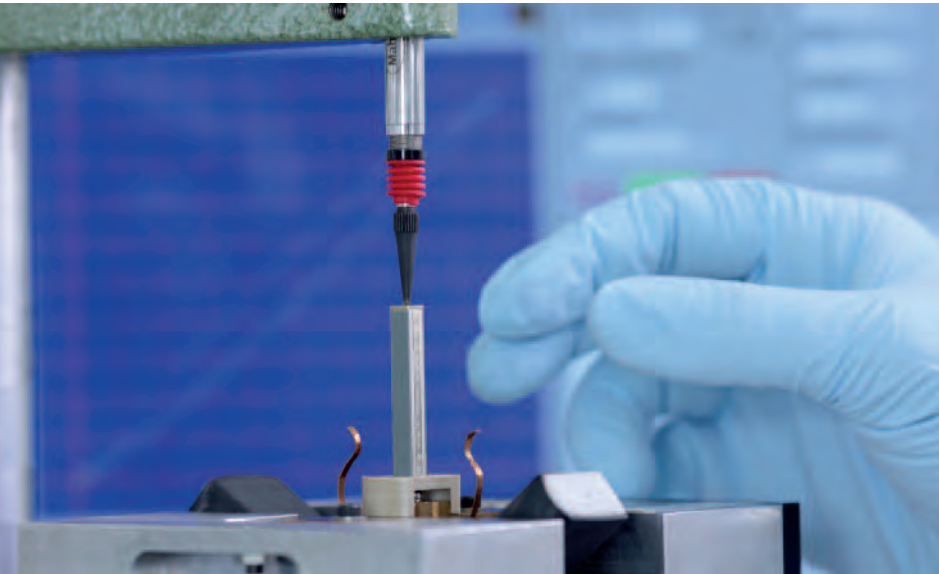
PILine® Piezo-Ultraschallmotoren ermöglichen sehr dynamische Zustellbewegungen und sind dabei so kompakt herstellbar, dass sie bereits in vielen neuen Anwendungen eingesetzt werden.

Piezoschreitantriebe wiederum bieten über mehrere Millimeter die hohen Kräfte, die Piezoaktoren entwickeln. Die patentierten NEXLINE® und NEXACT® Antriebe von PI mit ihrem komplexen Aufbau aus Longitudinal-, Scher- und Biegeelementen sowie entsprechender Kontaktierung werden komplett bei PI Ceramic gefertigt.



# Anwendungsbeispiele für Piezokeramiken

## VIELSEITIG UND FLEXIBEL



Sei es in der Medizintechnik, Biotechnologie im Maschinenbau oder in der Fertigungstechnik bis hin zur Halbleitertechnologie – unzählige Felder profitieren von den piezoelektrischen Eigenschaften der Bauelemente. Dabei werden sowohl der direkte als auch der inverse Piezoeffekt industriell genutzt.

### Direkter Piezoeffekt

Das Piezoelement wandelt mechanische Kräfte wie Druck, Dehnung oder Beschleunigung in eine messbare elektrische Spannung um.

#### *Mechano-elektrische Wandler*

- Sensoren für Beschleunigung und Druck
- Schwingungsaufnehmer, z.B. zur Detektion von Unwuchten an rotierenden Maschinenteilen oder Crash-Detektoren im Automobilbereich
- Zündelemente
- Piezotastaturen
- Generatoren, z. B. autarke Energiequellen (Energy Harvesting)
- Passive Dämpfung

#### *Akusto-elektrische Wandler*

- Schall- und Ultraschall-Empfänger, z. B. Mikrofone, Füllstands- und Durchflussmessung
- Geräuschanalyse
- Acoustic Emission Spectroscopy

#### *Inverser Piezoeffekt*

Das Piezoelement verformt sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung; es entstehen mechanische Bewegungen oder Schwingungen.

#### *Elektro-mechanische Wandler*

Aktoren, wie Translatoren, Biegeelemente, Piezomotoren für z. B.

- Mikro- und Nanopositionierung
- Laser-Tuning
- Schwingungsdämpfung
- Mikropumpen
- Pneumatikventile

#### *Elektro-akustische Wandler*

- Signalgeber (Buzzer)
- Hochspannungsquellen / Transformatoren
- Verzögerungsleitungen (Delay Lines)
- Leistungsultraschall-Generatoren: Reinigen, Schweißen; Vernebeln, etc.

Die **Ultraschall-Signalverarbeitung** nutzt beide Effekte und wertet Laufzeiten, Reflexion und Phasenverschiebung von Ultraschallwellen in einem Frequenzbereich von einigen Hertz bis zu einigen Megahertz aus. Die Anwendungen sind z. B.

- Füllstandsmessung
- Durchflussmessung
- Objekterkennung und -überwachung
- Medizinische Diagnostik
- Hochauflösende Materialprüfung
- Sonar und Echolote
- Adaptive Strukturen

## Pump- und Dosiertechnik mit Piezoantrieben

Die fortschreitende Miniaturisierung stellt stetig steigende Anforderungen an die verwendeten Komponenten, so auch an die Antriebe für Mikrodosiersysteme. Hier bieten piezoelektrische Elemente die Lösung: Sie arbeiten zuverlässig, schnell und präzise, und können für den kleinsten Bauraum passend ausgeformt werden. Gleichzeitig ist ihr Energieverbrauch gering und sie sind klein und preiswert.

Die Dosiermengen reichen vom Milli-, Mikro-, Nano- bis in den Picoliterbereich. Die Anwendungsbereiche für piezoelektrische Pumpen liegen in der Labor- und Medizintechnik, der Biotechnologie, der chemischen Analytik und der Verfahrenstechnik, wo häufig kleinste Mengen Flüssigkeit und Gase zuverlässig dosiert werden müssen.

### **Mikro-Membranpumpen, Mikro-Dosierventile**

Der Pumpenantrieb besteht aus einem piezoelektrischen Aktor und einer damit verbundenen Pumpmembran, meist aus Metall oder Silizium. Die Deformation des Piezoelements verändert das Volumen in der Pumpenkammer, wobei der Antrieb durch die Membran vom Fördermedium abgetrennt ist.

Abhängig von der Tropfengröße und dem damit erforderlichen Membranhub, aber auch von der Viskosität des Mediums, kann der Antrieb mit Piezoscheiben, mit Piezostapelaktoren oder mit Hilfe hebelübersetzter Systeme erfolgen.

Wegen ihrer kompakten Abmessungen sind diese Dosiervorrichtungen auch für Lab-on-a-chip Anwendungen geeignet.

Piezoantriebe werden auch zum Öffnen und Schließen von Ventilen eingesetzt. Hier reicht das Spektrum vom einfachen Piezoelement oder Biegeaktor für ein Membranventil über vorgespannte Piezostapelaktoren für viel Dynamik und Kraft bis zum Piezohebel, der Feinstdosierungen auch bei hohem Gegen- druck vornimmt.

Auch Kraftstoff-Einspritzsysteme im Automobilbereich, angetrieben mit Multilayer-Stapelaktoren, sind Mikro-Dosierventile.

### **Schlauch- oder Peristaltikpumpen, Jet-Dispenser**

Wenn Flüssigkeiten oder Gase präzise und möglichst gleichmäßig und stoßfrei dosiert werden sollen, bieten sich so genannte Schlauch- oder Peristaltikpumpen an. Bei ihnen wird das zu fördernde Medium durch äußere mechanische Verformung eines Schlauches durch diesen hindurchgedrückt. Die Pumprichtung wird durch die Ansteuerung der einzelnen Aktoren bestimmt.

Als Antriebselement sind – je nach Anforderungen an Kraft und Bauraum – flache Piezobiegeelemente, kompakte Piezochipaktoren oder Piezostapelaktoren eingesetzt. Biegewandler eignen sich dabei hauptsächlich für Anwendungen mit niedrigem Gegendruck, z. B. für Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität.

Höhere Gegendruckfähigkeit bieten die Piezoaktoren, die sich zur Dosierung von Stoffen höherer Viskosität eignen, jedoch mehr Raum beanspruchen.

### **Piezoelektrische Mikrodispenser, Drop-on-Demand**

Piezoelektrische Mikrodispenser bestehen aus einer flüssigkeitsgefüllten Kapillare, die zu einer Düse ausgeformt ist, und einem umgebenden Piezorohr.

Bei Anlegen einer Spannung kontrahiert das Piezorohr und erzeugt in der Kapillare eine Druckwelle. Dadurch werden Einzeltropfen abgeschnürt und auf eine Geschwindigkeit von einigen Metern pro Sekunde beschleunigt, so dass sie einige Zentimeter zurücklegen können.

Das Tropfenvolumen variiert mit den Eigenschaften des geförderten Mediums, den Dimensionen der Pumpenkapillaren und den Ansteuerparametern des Piezoaktors. Als Düsen können auch in Silizium geätzte Mikrokanäle verwendet werden.

## Ultraschallanwendungen in der Medizintechnik

Der Piezoeffekt wird für eine Vielzahl von Anwendungen im Life Science Bereich genutzt: zur Bildgebung in der medizinischen Diagnostik, in der Therapie zur Schmerzbehandlung, zur Aerosolerzeugung oder zur Zahnsteinentfernung, für Skalpelle in der Augen Chirurgie, zur Überwachung von Flüssigkeiten, wie z. B. zur Detektion von Luftblasen bei der Dialyse, oder auch als Antriebe für Dispenser und Mikropumpen.

Wenn hohe Leistungsdichten gefordert sind, wie z. B. bei der Ultraschall-Zahnstein-Entfernung oder für chirurgische Instrumente, kommen hier „harte“ PZT-Materialien zum Einsatz.

### Ultraschallwerkzeuge in der Chirurgie und Kosmetik

Ultraschallgetriebene Werkzeuge ermöglichen heute minimalinvasive Operationstechniken beispielsweise in der Augen- und Kieferchirurgie. Auch Geräte zur Liposuktion basieren häufig auf Ultraschalltechnik. Bereits seit längerer Zeit werden Piezoelemente als Ultraschallerzeuger zur Entfernung von mineralischen Belägen an menschlichen Zähnen eingesetzt.

Das Prinzip ist jeweils ähnlich und funktioniert analog zur Ultraschall-Materialbearbeitung: Piezokeramische Verbundsysteme, die aus miteinander verspannten Ringscheiben bestehen, sind in einer Sonotrode in Form eines medizinischen Werkzeuges integriert. Damit werden Schwingungsamplituden im  $\mu\text{m}$ -Bereich bei Arbeitsfrequenzen um die 40 kHz übertragen.

### Bildgebung mit Ultraschall – Sonografie

Der große Vorteil der Sonografie liegt in der Unschädlichkeit der Schallwellen, weshalb das Verfahren weit verbreitet ist. Der Schallkopf enthält ein Piezoelement, das Ultraschallwellen erzeugt und auch wieder nachweist. Der Schallkopf sendet kurze, gerichtete Schallwellenimpulse aus, die in den Gewebeschichten unterschiedlich stark reflektiert und gestreut werden. Über die Messung der Laufzeit und der Stärke der Reflexionen wird ein Bild der untersuchten Struktur erzeugt.



Werkzeug für die Zahnsteinentfernung mit Ultraschall, OEM-Produkt. Die Piezoscheiben sind deutlich erkennbar.

## Ultraschalltherapie

Bei diesem Verfahren wird das Gewebe über einen Schallkopf mit Ultraschallwellen bestrahlt. Mechanische Längswellen erzeugen zum einen mechanische Vibrationen im Gewebe, zum anderen wird ein Teil der Ultraschallenergie in Wärme umgewandelt. Typische Arbeitsfrequenzen liegen im Bereich 0,8 bis über 3 MHz, wobei in der Anwendung sowohl Dauer- als auch Impulsschallverfahren zum Einsatz kommen. Die übertragenen Schwingungsamplituden liegen im Bereich um 1 µm.

Abhängig vom Energiegehalt der Strahlung werden unterschiedliche Effekte erzielt. Hochenergetische Stoßwellen werden z. B. zur Zertrümmerung von Nierensteinen genutzt. Stoßwellen niedriger Energie bewirken eine Art von Mikromassage, und werden unter anderem zur Knochen- und Gewebebehandlung und in der Physiotherapie eingesetzt.

Im kosmetischen Bereich gewinnt die Ultrasonophorese, also das Einbringen von Medikamenten unter die Haut, immer mehr an Bedeutung.

## Aerosolerzeugung

Ultraschall ermöglicht die Verneblung von Flüssigkeiten ohne Erhöhung des Druckes oder der Temperatur, was speziell für empfindliche Substanzen wie Medikamente von entscheidender Bedeutung ist.

Analog zur hochfrequenten Ultraschallreinigung erzeugt eine im Flüssigkeitsgefäß befestigte und in Resonanz schwingende Piezokeramikscheibe Ultraschallwellen großer Intensität. Die Flüssigkeitströpfchen entstehen oberflächennah durch Kapillarwellen. Der Durchmesser der Aerosoltröpfchen wird von der Frequenz der Ultraschallwellen bestimmt: Je höher die Frequenz ist, desto kleiner sind die Tröpfchen.

Bei der Direktverneblung, wo das hochfrequent schwingende Piezoelement im direkten Kontakt mit der Flüssigkeit steht, wird die Piezooberfläche speziell für aggressive Substanzen veredelt.

## Ultraschall-Sensoren: Piezoelemente in der Messtechnik

### Durchflussmessung

Die Messung von Durchflussmengen ist in vielen Bereichen die Basis für einen geregelten Ablauf von Prozessen. Beispielsweise wird in der modernen Gebäudetechnik der Verbrauch von Wasser, Warmwasser oder Heizenergie erfasst, und damit sowohl die Versorgung als auch die Abrechnung gesteuert.

In der Industrieautomation und speziell in der Chemieindustrie kann die Volumensmessung das Abwiegen von Stoffmengen ersetzen.

Nicht nur die Fließgeschwindigkeit, sondern auch die Konzentration bestimmter Stoffe kann erfasst werden.

Die **Laufzeitmessung** basiert auf dem wechselseitigen Senden und Empfangen von Ultraschallimpulsen in und gegen die Strömungsrichtung. Dabei werden zwei Piezowandler, die sowohl als Sender als auch als Empfänger arbeiten, in einer Schallstrecke schräg zur Strömungsrichtung angeordnet.

Beim **Doppler-Prinzip** wird die Phasen- bzw. Frequenzverschiebung der Ultraschallwellen, die von Flüssigkeitspartikeln gestreut bzw. reflektiert werden, ausgewertet. Die Frequenzverschiebung zwischen abgestrahlter und am gleichen Piezowandler empfangener, reflektierter Wellenfront ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit.



# Ultraschall-Sensoren: Piezoelemente in der Messtechnik

## Füllstandsmessung

Bei der **Laufzeitmessung** arbeitet der Piezowandler außerhalb des zu messenden Mediums sowohl als Sender als auch Empfänger. Er sendet einen Luftultraschallimpuls aus, der vom Füllgut reflektiert wird. Die benötigte Laufzeit ist ein Maß für den zurückgelegten Weg im leeren Behälterteil.

Damit sind berührungslose Messungen möglich, bei denen der Füllstand von Flüssigkeiten, aber auch von Feststoffen, z. B. in Silos, gemessen werden kann. Die Auflösung bzw. Genauigkeit hängt davon ab, wie gut der Ultraschallimpuls von der jeweiligen Oberfläche reflektiert wird.

**Tauchschwinger**, oder **Stimmgabelsensoren**, werden fast ausschließlich als Niveauschalter eingesetzt; eine Messung des Füllstandes erfordert mehrere dieser Sensoren in verschiedenen Höhen.

Der Piezowandler regt eine Stimmgabel in ihrer Eigenfrequenz an. Bei Kontakt mit dem zu messenden Medium verschiebt sich die Resonanzfrequenz, was elektronisch ausgewertet wird. Diese Methode funktioniert zuverlässig und ist kaum anfällig für Störungen. Sie ist außerdem unabhängig von der Art des Füllmediums.

## Partikel und Luftblasen detektieren

Der Ultraschall-Luftblasensensor bietet eine zuverlässige Kontrolle des Flüssigkeitstrans-

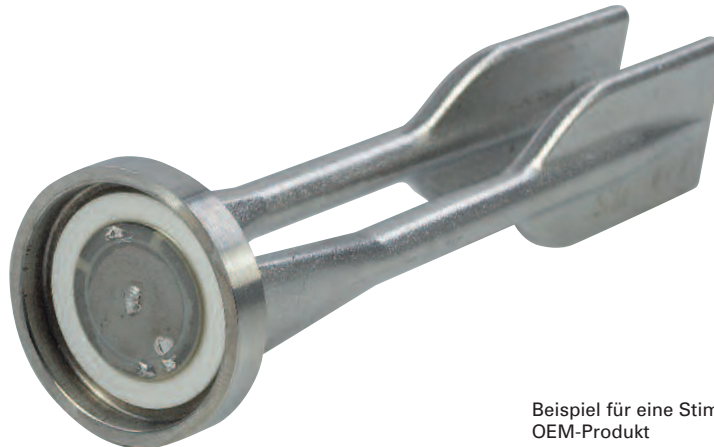
ports in Schlauchleitungen. Der Sensor erkennt Luft- und Gasblasen in der Flüssigkeit berührungslos durch die Schlauchwand, und ermöglicht so eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung.

Die Einsatzmöglichkeiten liegen im medizinischen, pharmazeutischen und lebensmitteltechnischen Bereich. So dienen die Sensoren zur Überwachung von Dialysemaschinen, Infusionspumpen oder Transfusionen. Industrielle Anwendungen liegen in der Steuerung und Regeltechnik, wie z. B. in der Überwachung von Dosier- und Abfüllanlagen.

## Beschleunigungs- und Kraftsensoren, Kraftaufnehmer

Das Kernstück des piezoelektrischen Beschleunigungssensors ist eine Scheibe aus piezoelektrischer Keramik, die mit der seismischen Masse verbunden ist. Wird das Gesamtsystem beschleunigt, so verstärkt diese Masse die mechanische Deformation der Piezoscheibe, und erhöht damit die messbare Spannung. Die Sensoren erfassen Beschleunigungen in einem breiten Frequenz- und Dynamikbereich bei nahezu linearem Verhalten über den gesamten Messbereich.

Piezoelektrische Kraftsensoren eignen sich zur Messung dynamischer Zug-, Druck und Scherkräfte. Sie können sehr steif ausgelegt werden und können auch hochdynamische Kräfte messen. Typisch ist die sehr hohe Auflösung.



Beispiel für eine Stimmgabel zur Füllstandsmessung, OEM-Produkt

## Piezelektrische Aktoren

Piezelektrische Translatoren sind keramische Festkörperaktoren, die elektrische Energie mit theoretisch unbegrenzter Auflösung direkt in lineare Bewegung umsetzen.

Die Länge des Aktors ändert sich dabei um bis zu 0,15%. Die Aktoren entwickeln gleichzeitig große statische und dynamische Kräfte.

Ihre besonderen Eigenschaften prädestinieren Piezoaktoren für den Einsatz im Halbleiterbereich, in der Optik und der Telekommunikation. Auch im Automobilbereich, in der pneumatischen Ventiltechnik und Schwingungsdämpfung oder für Mikropumpen finden sie Verwendung.

PI Ceramic liefert neben Hunderten von Standardausführungen auch schnell und zuverlässig Sonderanfertigungen nach Kundenwunsch.

Für Anwendungen, die eine hohe Linearität der Bewegung im geschlossenen Regelkreis erfordern, können die Aktoren mit Positionssensoren versehen werden.

### Piezosysteme mit hoher Kraftentwicklung: PICA

PICA-Hochlast-Piezoaktoren werden aus Piezokeramik-Scheiben in Stapelbauweise gefertigt. Die einzelnen Schichten sind dabei in Presstechnologie hergestellt. Anwendungen der Hochlastaktoren finden sich z. B. im Maschinenbau beim Unrunddrehen, in der aktiven Schwingungsdämpfung oder bei Schaltanwendungen.

Viele Modifikationen sind möglich:

- Materialien
- Schichthöhe und damit Spannungsbereich
- Abmessungen und Grundform
- Krafterzeugung bzw. Belastbarkeit
- Form und Material der Endstücke
- Verringerte Längentoleranzen
- Integrierte piezelektrische Sensorscheiben
- Erweiterter Temperaturbereich
- Vakuumkompatible und unmagnetische Versionen

### Piezoaktoren von PI Ceramic

- Bewegung mit Sub-Nanometer-Auflösung
- Große Kräfte bis 80.000 N, hohe Belastbarkeit bis zu 100 MPa
- Ansprechzeit im Mikrosekunden-Bereich
- Spiel- und reibungsfrei
- Minimale Leistungsaufnahme beim Halten der Position
- Verschleißfrei
- Hohe Zuverlässigkeit (> 10<sup>9</sup> Schaltzyklen)
- Vakuum- und raumkompatibel
- Betrieb bei kryogenen Temperaturen möglich
- Magnetische Felder haben keinen Einfluss und werden auch selbst nicht beeinflusst

Weitere Informationen auf [www.piceramic.de](http://www.piceramic.de)



Auswahl von Piezostapelaktoren

## Piezelektrische Aktoren

### Zuverlässige Piezoaktoren mit niedriger Betriebsspannung: PICMA®

PICMA® Multilayer-Aktoren sind in Folientechnik aufgebaut und werden anschließend im Multilayer-Cofiring-Verfahren gesintert. Die spezielle PICMA® PZT-Keramik und -Fertigungstechnik kombiniert Eigenschaften wie Steifigkeit, Kapazität, Auslenkung, Temperaturstabilität und Lebensdauer ideal. Die typische Betriebsspannung der PICMA® Multilayer-Aktoren beträgt 100–120 V.

PICMA® Piezoaktoren sind die weltweit einzigen Multilayeraktoren mit vollkeramischer Isolation. Diese Technologie schützt die PICMA® Aktoren vor Umwelteinflüssen, insbesondere Feuchtigkeit, und sorgt für die extrem hohe Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit selbst unter harten industriellen Einsatzbedingungen. Die Lebensdauer von PICMA® Aktoren liegt deutlich über der von Piezoaktoren mit herkömmlicher Polymerisolation.

Da PICMA® Piezoaktoren keine zusätzliche Polymerisolation benötigen und bis 150 °C betrieben werden können, bieten sie optimale Voraussetzungen für den Einsatz im Hochvakuum. Sie arbeiten bis in den kryogenen Temperaturbereich, dann bei reduziertem Stellweg.

Viele Applikationsbereiche profitieren von dieser Zuverlässigkeit: Präzisionsmechanik und -fertigung ebenso wie Schalter und pneumatische oder hydraulische Ventile.

Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der aktiven Schwingungsdämpfung, in der Nanotechnologie, Messtechnik, Optik und Interferometrie.

### Vorgespannte Aktoren – Hebel – Nanopositionierung

PICMA® Piezoaktoren von PI Ceramic sind das Kernstück für Nanopositioniersysteme von Physik Instrumente (PI). Sie werden in verschiedenen Stufen der Integration angeboten: als einfache Aktoren optional mit Positionssensor versehen, im Gehäuse mit oder ohne Vorspannung, mit Hebelübersetzung für einen vergrößerten Stellweg, bis hin zum Hochleistungs-Nanopositioniersystem, in dem Piezoaktoren bis zu sechs Achsen über verschleiß- und reibungsfreie Festkörpergelenke antreiben.

Allen gemeinsam ist die Bewegungsauflösung im Nanometerbereich und die lange Lebensdauer und außergewöhnliche Zuverlässigkeit. Die Kombination der PICMA® Aktoren mit Festkörperführungen und Präzisionsmesssystemen ergibt Geräte zur Nanopositionierung in der höchsten Performanceklasse.

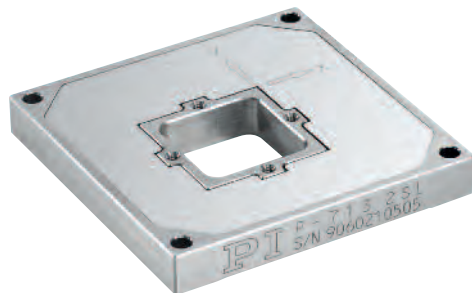
Die Anwendungsbereiche reichen von der Halbleitertechnik, Messtechnik, Mikroskopie, Photonik, bis hin zu Biotechnologie, Raumfahrt, Astronomie und kryogenen Umgebungen.



Piezelektrische PICMA® Aktoren



Hebelübersetztes System



Piezo-Nanopositioniersystem mit Parallelkinematik und Positionssensoren

## Schwingungsdämpfung

Wenn ein mechanisches System aus dem Gleichgewicht gebracht wird, kann es zu Schwingungen kommen. Bei Anlagen, Maschinen und empfindlichen Geräten wirken diese funktionsstörend und beeinflussen somit die Qualität der Produkte. So lange zu warten, bis Umgebungseinflüsse die Schwingung dämpfen und zum Stillstand bringen, ist in vielen Anwendungen nicht möglich; zudem überlagern sich meist mehrere Störungen zeitlich und ergeben ein mehr oder weniger konfuse Schwingungsbild mit unterschiedlichsten Frequenzen.

Hier ist es notwendig, die Schwingungen zu isolieren, um das Objekt von seiner Umgebung dynamisch zu entkoppeln und damit die Übertragung von Erschütterungen und von Körperschall zu verringern. Dadurch steigt die Präzision bei Mess- oder Fertigungsabläufen und die Einschwingzeiten reduzieren sich erheblich, wodurch höhere Durchsatzraten realisierbar sind. Piezoelektrische Bauelemente können Schwingungen besonders im unteren Frequenzbereich entweder aktiv oder passiv dämpfen.

### Passive Schwingungsisolierung

Elastische Materialien nehmen die Schwingungen auf und mindern sie. Hierfür können auch Piezoelemente eingesetzt werden: Sie nehmen die mechanische Energie der Strukturschwingungen auf und wandeln sie gleichzeitig in elektrische Energie um. Anschließend wird diese z.B. über parallelgeschaltete elektrische Widerstände in Wärme umgewandelt.

Passive Elemente werden möglichst nahe am zu entkoppelnden Objekt angebracht.

Die zur Schwingungsisolierung üblichen passiven Verfahren reichen allerdings für viele der heutigen Technologien nicht mehr aus.

Bewegungen und Stöße durch Trittschall, Lüfter, Kühlsysteme, Motoren, Bearbeitungsvorgänge etc. können z.B. bei der Mikrobearbeitung Muster so verfälschen, dass das Ergebnis unbrauchbar wird.

### Aktive Schwingungsisolierung

Hier kompensieren oder minimieren Gegenbewegungen die störenden Schwingungen, und dies möglichst nahe an der Quelle. Dazu müssen in einem geeigneten Regelkreis zunächst die Strukturschwingungen erfasst und anschließend die Gegenbewegungen aktiv erzeugt werden.

Adaptive Materialien, wie piezokeramische Platten oder Scheiben, können sowohl Sensor- als auch Aktorfunktionen übernehmen. Der Frequenzbereich und die zu dämpfende Masse entscheiden über die Auswahl der geeigneten Piezoaktoren. Dafür sind außerdem eine externe Spannungsquelle und passende Steuerungselektronik erforderlich.

Mehrschichtige Keramikaufbauten ermöglichen höhere Effizienz. Beispielsweise können auch mehrlagige piezoelektrische Aktoren, wie die PICMA® Multilayer Translatoren, überall dort eingesetzt werden, wo genau dosierte Wechselkräfte auf Strukturen einwirken sollen.

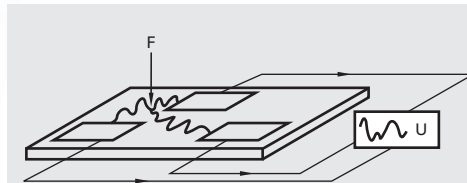
Die Anwendungsbereiche liegen vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt, wo z. B. Treibstoff eingespart werden soll, oder die Schwingungen von Gitteraufbauten für Antennen gedämpft werden sollen. Im Fahrzeugbau, sei es Automobil- oder Schiffsbau, ist eines der Ziele, die Geräusche im Innenraum zu minimieren. In zunehmendem Maß werden auch z. B. die Vibrationen rotierender Antriebe im Maschinenbau isoliert und aktiv unterdrückt.



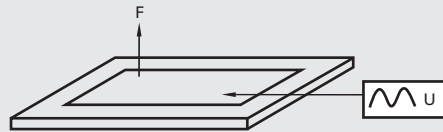
## Adaptronik

### Industrielle Anwendungen der Zukunft

Für die moderne Industrie nimmt die Entwicklung selbstanpassender, adaptiver Systeme zunehmend größeren Raum ein. Immer wichtiger werden dabei intelligente Werkstoffe, so genannte „Smart Materials“, die sowohl sensorische als auch aktorische Eigenschaften besitzen. Sie stellen geänderte Umfeldbedingungen wie zum Beispiel



Eine Verformung des Substrats bewirkt ein elektrisches Signal. Damit kann der DuraAct Wandler präzise und hochdynamisch Deformationen feststellen.



Der DuraAct Flächenwandler kontrahiert beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Aufgebracht auf ein Substrat arbeitet er hier als Biegeelement.

Stoß-, Druck- oder Biegebeanspruchungen fest und reagieren darauf.

Piezokeramiken gehören zu diesen adaptiven Werkstoffen. Eine kompakte Lösung bieten die piezoelektrischen DuraAct Flächenwandler. Grundlage ist eine dünne piezokeramische Folie, die mit elektrisch leitendem Material zur elektrischen Kontaktierung bedeckt und anschließend in einen duktilen Polymerverbundstoff eingebettet wird. Die an sich spröde Piezokeramik wird dadurch mechanisch vorgespannt und elektrisch isoliert und ist so robust, dass sie sogar auf gekrümmten Oberflächen mit Biegeradien von einigen Millimetern aufgebracht werden kann.

Die Wandler werden einfach auf das entsprechende Substrat aufgeklebt oder bereits beim Herstellungsprozess in eine Struktur integriert, wo sie Vibrationen oder Konturverformungen im Bauteil selbst erkennen oder erzeugen. Die Größe der Konturänderung ist dabei stark von den Substrateigenschaften abhängig und reicht vom Nanometer- bis in den Millimeterbereich.

Auch bei hoher dynamischer Belastung stellt die Bauweise eine hohe Schadenstoleranz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von über  $10^9$  Zyklen sicher. Verschleiß und Störanfälligkeit sind sehr gering, da die Wandler als Festkörperaktoren keine beweglichen Teile enthalten.

## Energie aus Vibration – Energy Harvesting

Um auf Batterien und den damit verbundenen Service-Aufwand zu verzichten, gibt es die Möglichkeit, Energie aus der Umgebung zu nutzen. Piezoelemente wandeln die kinetische Energie aus Schwingungen oder Erschütterungen in elektrische Energie.

Auch hier können die robusten und kompakten DuraAct Wandler eingesetzt werden. Ver-

formungen des Substrats verursachen eine Deformation der DuraAct Flächenwandler und erzeugen damit ein elektrisches Signal. Eine entsprechende Wandler- und Speicherelektronik kann damit beispielsweise Überwachungssysteme, die an schwer zugänglichen Stellen angebracht sind, dezentral versorgen



## Materialbearbeitung mit Ultraschall

Ultraschallanwendungen in der Materialbearbeitung sind vor allem durch die hohe Leistungsdichte gekennzeichnet. Die Anwendungen finden typischerweise im Resonanzbetrieb statt, um eine möglichst hohe mechanische Leistung bei kleiner Anregungsamplitude zu erhalten.

Besonders geeignet für diese Leistungs-schallanwendungen sind die ferroelektrisch „harten“ PZT-Materialien. Sie zeigen nur niedrige dielektrische Verluste selbst bei Dauereinsatz, und damit einhergehend nur eine geringe Eigenerwärmung.

Bei den hohen mechanischen Belastungen und Betriebsfeldstärken kommen ihre typischen piezoelektrischen Eigenschaften besonders zum Tragen: moderate Permittivität, große piezoelektrische Kopplungsfaktoren, hohe mechanische Güten und sehr gute Stabilität.

### Ultraschall verbindet: Fügeverfahren

Unterschiedliche Materialien, wie thermoplastische Kunststoffe und metallische Werkstoffe wie Aluminium, Kupfer und deren Legierungen miteinander zu verbinden, ge-

lingt mit Ultraschall-Fügeverfahren. Nach diesem Prinzip arbeiten z. B. Drahtbonder in der Halbleiterindustrie und Ultraschall-Schweißsysteme.

Die Ultraschallenergie wird vorwiegend über mechanisch verspannte Piezo-Ringscheiben generiert, über eine sogenannte Sonotrode verstärkt und der Fügestelle zugeführt. Die Reibung der Fügepartner erzeugt dann die benötigte Wärme, um die Werkstoffe im Bereich der Fügestelle miteinander zu verschmelzen (verschweißen).

### Formgebung durch spanende Verfahren

Neben den Schweißprozessen gewinnt die Ultraschall-Materialbearbeitung harter mineralischer oder kristalliner Werkstoffe wie Keramik, Graphit oder Glas, speziell durch Ultraschall-Bohren und durch spanabhebende Verfahren wie das Schwing-Läppen, immer mehr an Bedeutung. Damit können geometrisch komplexe Formen und dreidimensionale Konturen erzeugt werden, wobei nur ein geringer Anpressdruck nötig ist. Auch hier werden speziell geformte Sonotroden als Bearbeitungswerkzeug verwendet.

## Sonartechnik und Hydroakustik

Systeme der Sonartechnik (engl.: sonar = sound navigation and ranging) und der Hydroakustik werden für Mess- und Ortungsaufgaben speziell im maritimen Bereich eingesetzt. Die bisher vorwiegend militärisch vorangetriebene Entwicklung hochauflösender Sonarsysteme wird in zunehmendem Maße durch zivile Anwendungen ersetzt. Neben den immer noch aktuellen Unterseeboot-Ortungssonaren werden Systeme zum

Beispiel für die Tiefenmessung, für die Ortung von Fischschwärmen, für die Untergrundrelief-Vermessung in Flachgewässern oder für die Unterwasser-Kommunikation, etc. eingesetzt. Die Palette der eingesetzten Piezokomponenten ist vielfältig und reicht von der einfachen Scheibe oder Platte, über gestapelte Wandler bis zu Sonararrays, welche eine zeilenförmige Ablenkung der Richtcharakteristik der Ultraschallwellen ermöglichen.



# PI: Piezotechnologie und Precision Motion Control

## PRÄZISIONSPositionIERUNG FÜR INDUSTRIE UND FORSCHUNG

### Lösungen für High-Tech-Märkte

PI entwickelt und fertigt Präzisions-Positioniersysteme für alle wichtigen High-Tech-Märkte:

- Halbleitertechnologie
- Optische Messtechnik, Mikroskopie
- Biotechnologie und Medizingerätetechnik
- Präzisionsautomatisierung und Handling
- Präzisionsfertigungstechnik
- Datenspeichertechnik
- Photonik, Telekommunikation
- Nanotechnologie
- Mikrosystemtechnik
- Luft- und Raumfahrtstechnik
- Astronomie

PI ist Markt- und Technologieführer für Präzisions-Positioniersysteme, deren Genauigkeit bis weit unter einen Nanometer reicht. Die nanogenaue Steuerung von Bewegung ist der Schlüssel zu Welten, in denen Millionen von Transistoren auf einem Quadratmillimeter integriert werden, Moleküle manipuliert oder Zellen in tausenden Ebenen betrachtet werden und haarfeine optische Faserbündel in sechs Freiheitsgraden justiert werden.

### Welten, die wir Nanowelten nennen

Durch kontinuierliche Innovation und Reinvestition der Unternehmensgewinne hat PI über die vergangenen Jahrzehnte seine heutige Stellung am Markt erlangt. Eine Position, die auf langfristige Kundenbeziehungen baut und auf die Freiheit, Ideen in die Wirklichkeit umzusetzen.

### 30 Jahre voraus

Als PI vor über 30 Jahren piezoelektrische Nanopositioniertechnik auf den Markt brachte,

waren die typischen Kunden Wissenschaftler und Forscher, die sich mit Lasern und Interferometrie beschäftigten. Nur wenige konnten damals vorhersehen, wie sehr die Fortschritte in der Nanostelltechnik ganze Industriezweige beeinflussen würden, z.B. die Halbleitertechnik oder die Biotechnologie.

Selbst Teilbereiche der Werkzeugmaschinen-Industrie können heute nicht mehr auf nanometergenaue Positioniersysteme verzichten.

### Schlüsseltechnologien im Hause

PI's Strategie ist die vertikale Integration, d.h. alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt und gepflegt. Dadurch kann jeder Schritt von der Designphase bis zur Auslieferung kontrolliert werden: Präzisionsmechanik, Digital- und Analogelektronik, sub-nanometergenaue kapazitive Positionssensoren, Piezokeramik und -Aktoren. Dies gewährleistet höchste Qualität bei geringen Kosten.



## Literatur



B. Jaffe, W. Cook und H. Jaffe

**Piezoelectric Ceramics**

Copyright 1971 by Academic Press Ltd.

Setter, N. (Hrsg.):

**Piezoelectric materials in devices**

EPFL, Lausanne, 2002, [www.electroceramics.ch](http://www.electroceramics.ch), ISBN: 2-9700346-0-3

A. Bauer, D. Bühlung, H.-J. Gesemann G. Helke, W. Schreckenbach

**Technologie und Anwendung von Ferroelektrika**

Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig Leipzig 1976

K. Ruschmeyer, u. a.

**Piezokeramik - Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen**

Renningen, Expert Verlag, 1995.

G. Gautschi

**Piezoelectric Sensorics**

Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001

T. Ikeda

**Fundamentals of piezoelectricity**

Oxford, Oxford University Press, 1990

P. Pertsch

**Das Großsignalverhalten elektro-mechanischer Festkörperaktoren**

Ilmenau, ISLE-Verlag, 2003

Heywang, W.; Lubitz, K.; Wersing, W. (Hrsg.):

**Piezoelectricity – evolution and future of a technology**

Springer-Verlag, Berlin, 2008

Safari, A.; Akdogan, E. K. (Hrsg.):

**Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications**

Springer Science + Business Media, New York, 2008

**Standards / Richtlinien**

Europäische Norm EN 50324, IEC 60483 und IEC 60302, DOD-STD-1376(A), ROHS 2002/95/EG





## Der PI Gesamtkatalog

## Jetzt anfordern!

Auf über 500 Seiten präsentiert der PI Gesamtkatalog Grundlagen und Technologie von Nanopositionierung, Piezosystemen und Mikropositionierung. Mehr als 200 Produktfamilien werden vorgestellt und mit über 1000 Abbildungen, Messkurven und Prinzipskizzen illustriert.



## Hauptsitze

## DEUTSCHLAND

**Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG**  
 Auf der Römerstraße 1  
 76228 Karlsruhe/Palmbach  
 Tel: +49 (721) 4846-0  
 Fax: +49 (721) 4846-1019  
 Email: info@pi.ws  
 www.pi.ws

**PI Ceramic GmbH**  
 Lindenstraße  
 07589 Lederhose  
 Tel: +49 (36604) 882-0  
 Fax: +49 (36604) 882-4109  
 Email: info@piceramic.de  
 www.piceramic.de

## Niederlassungen

## USA (OST) &amp; KANADA

**PI (Physik Instrumente) L.P.**  
 16 Albert St.  
 Auburn, MA 01501  
 Tel: +1 (508) 832 3456  
 Fax: +1 (508) 832 0506  
 Email: info@pi-usa.us  
 www.pi-usa.us

## USA (WEST) &amp; MEXIKO

**PI (Physik Instrumente) L.P.**  
 5420 Trabuco Rd., Suite 100  
 Irvine, CA 92620  
 Tel: +1 (949) 679 9191  
 Fax: +1 (949) 679 9292  
 Email: info@pi-usa.us  
 www.pi-usa.us

## JAPAN

**PI Japan Co., Ltd.**  
 Akebono-cho 2-38-5  
 Tachikawa-shi  
 Tokyo 190-0012  
 Tel: +81 (42) 526 7300  
 Fax: +81 (42) 526 7301  
 Email: info@pi-japan.jp  
 www.pi-japan.jp

**PI Japan Co., Ltd.**  
 Hanahara Dai-Ni Building #703  
 4-11-27 Nishinakajima,  
 Yodogawa-ku, Osaka-shi,  
 Osaka 532-0011  
 Tel: +81 (6) 6304 5605  
 Fax: +81 (6) 6304 5606  
 Email: info@pi-japan.jp  
 www.pi-japan.jp

## ENGLAND &amp; IRLAND

**PI (Physik Instrumente) Ltd.**  
 Trent House, University Way,  
 Cranfield Technology Park,  
 Cranfield, Bedford MK43 0AN  
 Tel: +44 (1234) 756 360  
 Fax: +44 (1234) 756 369  
 Email: uk@pi.ws  
 www.physikinstrumente.co.uk

## ITALIEN

**Physik Instrumente (PI) S. r. l.**  
 Via G. Marconi, 28  
 20091 Bresso (MI)  
 Tel: +39 (02) 665 011 01  
 Fax: +39 (02) 610 396 56  
 Email: info@pionline.it  
 www.pionline.it

## FRANKREICH

**PI France S.A.S.**  
 244 bis, avenue Marx Dormoy  
 92120 Montrouge  
 Tel: +33 (1) 55 22 60 00  
 Fax: +33 (1) 41 48 56 62  
 Email: info.france@pi.ws  
 www.pifrance.fr

## CHINA

**Physik Instrumente (PI Shanghai) Co., Ltd.**  
 Building No. 7-106  
 Longdong Avenue 3000  
 201203 Shanghai  
 Tel: +86 (21) 518 792 98  
 Fax: +86 (21) 687 900 98  
 Email: info@pi-china.cn  
 www.pi-china.cn