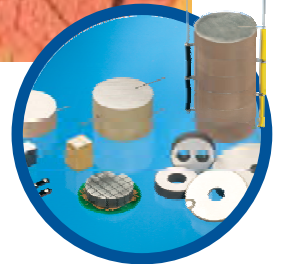
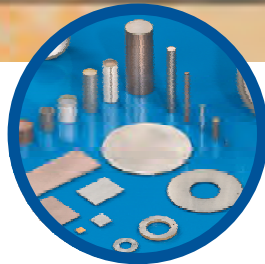
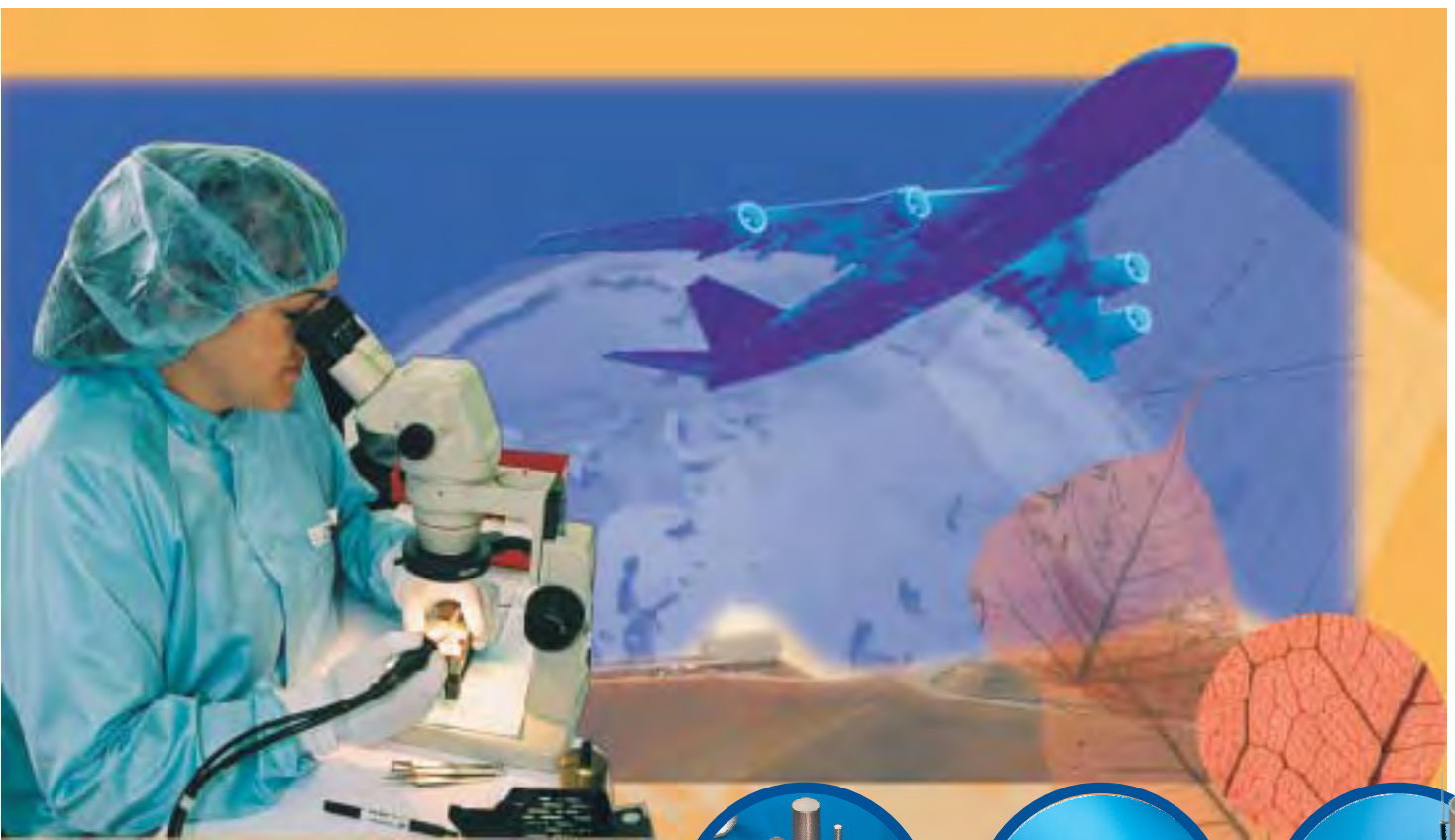


PIEZOKERAMISCHE MATERIALIEN UND BAUELEMENTE

CEEI



INHALTSVERZEICHNIS

Wir stellen uns vor.....	5-7
Über uns	
Unsere Stärken	
Unser Leitbild	
Physikalische Grundlagen.....	8-13
Geschichtlicher Rückblick	
Der Piezoeffekt	
Elektromechanische Zusammenhänge	
Parameterdefinition	
Piezokeramische Werkstoffe.....	14-21
Allgemeine Beschreibung	
Werkstoffdaten	
Spezifische Eigenschaften	
Fertigungstechnologie.....	22-23
Piezokeramische Bauelemente.....	24-30
Produktübersicht	
Anwendungshinweise	
Prüfverfahren an PZT-Komponenten	
Anwendungen der PZT-Bauelemente.....	31-32
OEM Anwendungen.....	33-37
Literaturempfehlungen.....	38



ÜBER UNS

PI Ceramic, gegründet im Jahre 1992, ist ein Tochterunternehmen der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.KG, eines der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet hochpräziser piezoelektrischer Nanopositioniersysteme.

In der Tradition der ehemaligen Hermsdorf-Schomburger Isolatorengesellschaft (HESCHO AG, bis 1945) und in Fortsetzung der Arbeiten der ehemaligen Keramischen Werke Hermsdorf (KWH, bis 1990), vereinen unsere Mitarbeiter mehr als 40 Jahre Wissen und Erfahrung auf den Gebieten der Piezotechnik und Keramiktechnologie.

Unser Know-how eröffnet Möglichkeiten der kunden- bzw. anwendungsspezifischen Entwicklung und Fertigung von aktorischen und sensorischen Piezoprodukten, die weit über das klassische piezokeramische Bauelement hinausgehen.

Seit 1992 entwickelt und produziert PI Ceramic eigene piezokeramische Materialien, weltweit bekannt unter dem Namen **PI** als Synonym für **PI piezo Ceramics**.



UNSERE STÄRKEN

- State-of-the-Art Piezokomponenten, Ultraschallwandler, Aktoren u. Systemlösungen.
- Entwicklung & Fertigung von hochzuverlässigen Bauelementen für die wichtigsten Zielmärkte unserer Zeit.
- Kundenspezifische und Standardlösungen verfügbar
- Hohe Flexibilität im technologischen Prozess garantiert kurze Lieferzeiten.
- Schlüsseltechnologien und entsprechende Ausrüstungen für die Keramikfertigung im Haus verfügbar.
- ISO 9001-2000 zertifiziert.

einige 100 Tausend Stück) ausgelegt und garantieren höchste Qualität und Zuverlässigkeit in den verschiedensten Anwendungen. Faire Preise, auch in kleinen Seriengrößen, werden durch Flexibilität in den Prozessabläufen garantiert. Ein nach ISO 9001-2000 zertifiziertes Qualitätsmanagement garantiert eine kontinuierliche Verbesserung aller Abläufe im Unternehmen.

Auf fast 7000 m² Gebäudefläche, ausgestattet mit modernster Technik in Produktion und Labor, stehen ausgezeichnete Entwicklungs- und Fertigungsvoraussetzungen zur Verfügung.

Eine enge Zusammenarbeit mit namhaften Forschungseinrichtungen und Hochschulen aus dem In- und Ausland garantiert zusätzlich eine stetige Weiterentwicklung unseres Potentials und eine effiziente Lösung anwendungsspezifischer Aufgabenstellungen.

PI Ceramic ist ein kundenorientiertes Unternehmen. Der frühzeitige Kontakt zwischen dem Anwender und unseren Applikations- und Entwicklungsingenieuren garantiert optimale technische und kommerzielle Lösungen. Unsere Entwicklungsabteilung ist ständig bemüht, neue Ideen und Konzepte in Technologien und marktgerechte Produkte umzusetzen.

Zusätzlich zum breiten Spektrum an Standardprodukten steht die schnellstmögliche Umsetzung kundenspezifischer Lösungen an vorderster Stelle. Unsere Entwicklungs- und Fertigungsprozesse sind optimal auf mittlere Seriengrößen (bis

Märkte und Applikationen
PI Ceramic liefert piezokeramische Lösungen für alle wichtigen High-Tech Märkte

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



UNSER LEITBILD

Unsere Mission sehen wir in der zuverlässigen Bereitstellung von Produkten, ob als Standard- oder kundenspezifisches Bauelement, mit dem größten Nutzen für die Anwendung und zufriedene Kunden. Dies wird durch eine enge Kooperation zwischen unseren Entwicklungs- und Applikationsabteilungen mit den technischen Bereichen unserer Kunden erreicht. Umso wichtiger ist ein frühzeitiger Kontakt bereits in der Design- und Prototypenphase des Projektes, fortführend bis zur Serienreife und darüber hinaus.

Unser Maßstab orientiert sich nicht allein am Stand der Technik. Unser Maßstab liegt in der Vision des zukünftig Notwendigen und Machbaren!

Beziehungen zu unseren Kunden

Alle Mitarbeiter von PI Ceramic sind ständig bemüht, ein enges Vertrauensverhältnis mit unserer Kundenklientel in der täglichen Arbeit aufzubauen und zu pflegen. Wir fühlen uns verpflichtet zu Professionalität, absoluter Kundenzufriedenheit und Qualität unserer Produkte.

Kunden kaufen keine Produkte sie kaufen nur, was unsere Produkte, ob als Standardprodukt oder kundenspezifische Applikation, leisten.

Der Erfolg unserer Kunden ist der Erfolg von PI Ceramic. Im Vordergrund unserer täglichen Arbeit steht die Unterstützung unserer Kunden beim weiteren Ausbau ihrer Wettbewerbsfähigkeit mit bestehenden und neuen Technologien. Das hierfür notwendige Vertrauen erarbeiten wir uns durch Zuverlässigkeit, Kundennähe und Schnelligkeit von der Angebotserstellung bis zur Lieferung.



„Lang anhaltende Geschäftsbeziehungen, Zuverlässigkeit, offene und freundliche Kommunikation mit Kunden und Lieferanten sind das Wichtigste für PI Ceramic und alle Mitarbeiter der weltweit tätigen PI-Gruppe und sind wichtiger als jeder kurzzeitige Erfolg.“

Dr. Karl Spanner,
Geschäftsführer



GESCHICHTLICHER RÜCKBLICK

Die Entwicklung der piezoelektrischen Materialien, Bauelemente und ihre Anwendungen werden durch Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Isolierstoffe und Dielektrika bestimmt. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften dieser Materialien sind bereits seit langem bekannt.

Carl Wilcke entdeckte 1758 die Polarisation der Dielektrika, allerdings so früh, dass diese Erkenntnis bald wieder verloren ging. Die Leydener Flasche, eine Urform eines Kondensatorbauelementes wurde von *van Musschenbroek* um 1750 beschrieben. Im Jahre 1837 zeigte *Faraday* die Wirkung eines Dielektrikums auf elektrostatische Vorgänge.

Der piezoelektrische Effekt wurde im Jahre 1880 durch die Gebrüder *Jaques* und *Pierre Curie* an natürlichen Kristallen (Seignette-Salz, Turmalin und Quarz) entdeckt. Sie konnten nachweisen, dass bestimmte Kristalle sich bei mechanischer Beanspruchung (Deformation) elektrisch unterschiedlich aufladen (elektrisch polarisiert werden), und umgekehrt.

Zu jeder Zeit war und ist die technische Nutzung dielektrischer Materialien ein diffiziles Werkstoffproblem. Eine rasche Entwicklung setzte nach entscheidenden Fortschritten in der keramischen Industrie ein. Speziell in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde mit der Entwicklung keramischer Kondensatoren, u.a. auf Bariumtitanat-Basis, der entscheidende Grundstein gelegt. Eine führende Rolle dabei kommt der HESCHO AG (Hermisdorf-Schomburger-Isolatoren-Gesellschaft), dem bis 1945 weltweit führenden Unternehmen auf diesem Gebiet, zu.

Die PI Ceramic GmbH am Standort Lederhose / Thüringen setzt diese regionale Tradition seit ihrer Gründung im Jahre 1992 fort.

Die ersten praktischen Nutzungen des piezoelektrischen Effektes wurden durch militärische Anwendungen forciert. Im Jahre 1916 wurden durch *Langevin* Sandwich-Transducer, bestehend aus Seignette-Salz und Stahl, entwickelt, welche als Schallwandler ihren Einsatz bis in die 40er Jahre hinein als Echolote und in der U-Boot-Ortung fanden. Nachrichtentechnische Anwendungen mit Quarz-Oszillatoren waren ein weiteres breites Einsatzgebiet.

Der Siegeszug des Einsatzes der piezoelektrischen Keramiken begann mit der Entdeckung der piezo-ferro-elektrischen Eigenschaften des Bariumtitanat in den Jahren 1945/46 durch russische und amerikanische Wissenschaftler und der Synthesierung der ersten PZT (Blei-Zirkonat-Titanat) Verbindungen Mitte der 50er Jahre, welche bis heute auf Grund ihrer hervorragenden Eigenschaften die dominierenden piezoelektrischen Materialien sind...



DER PIEZOEFFEKT

Piezelektrische Keramiken zählen zur Gruppe der ferroelektrischen Materialien. Ferroelektrika sind Kristalle, die ohne ein angelegtes elektrisches Feld polar sind. Dieser Zustand wird auch als spontane Polarisation bezeichnet. Charakteristisch ist die thermodynamisch stabile Umkehrbarkeit ihrer Polarisationsachse unter Einwirkung eines elektrischen Feldes, beschrieben durch den Verlauf einer Hystereseschleife (siehe Seite 10). Die Umkehrbarkeit der Polarisation bzw. die Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Größen ist von entscheidender Bedeutung für die breite technische Nutzung der Piezokeramiken.

Aus kristallografischer Sicht zeigen diese piezelektrischen Materialien eine sog. Perowskit-Kristallstruktur. Diese beschreibt eine Reihe von Verbindungen mit drei Atomarten der allgemeinen Formel ABC_3 .

Die heute gebräuchlichen Piezokeramiken werden vorzugsweise aus Blei-, Zirkon- und Titanoxiden als Hauptbestandteile zum $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ -Typ, und auch $BaTiO_3$ synthetisiert.

Spezielle Dotierungen dieser Blei-Zirkonat-Titanat-Keramiken (PZT) mit z. B. Ni-, Bi-, Sb-, Nb-Ionen usw., ermöglichen das gezielte Einstellen der geforderten piezelektrischen und dielektrischen Parameter.

Oberhalb einer charakteristischen Temperatur, der sog. Curietemperatur, sind diese Materialien nicht ferroelektrisch. Es liegen paraelektrische Eigenschaften vor, d.h. es sind keine Dipole vorhanden. Die relative Dielektrizitätskonstante besitzt in der Umgebung dieser Temperatur ein ausgeprägtes Maximum.

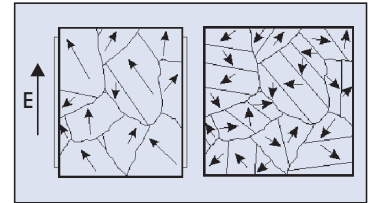
Unterhalb des Curiepunktes des Materials treten, ausgehend von einem kubischen und elektrisch neutralen Kristallaufbau, Gitterverzerrungen auf. Mit Aufhebung der damit verbundenen Ladungssymmetrie entstehen Dipole und die für die Piezotechnologie interessanten rhomboedrischen bzw. tetragonalen Kristallitphasen bilden sich heraus.

Ferroelektrische Domänen und Polarisation der Piezokeramik

Ein ferroelektrischer Kristall kann in Raumgebiete unterschiedlicher Polarisationsrichtung eingeteilt werden, sog. ferroelektrische Domänen. Unter einer Domäne in einem Festkörper versteht man allgemein ein physikalisch abgegrenztes Raumgebiet, in dem eine den Zustand des Festkörpers charakterisierende vektorielle Größe überall die gleiche Richtung hat. Diese charakteristische Größe einer ferroelektrischen Domäne besteht in gleicher Ausrichtung und gleichem Absolutbetrag der spontanen Polarisation. Je nach Korngröße des polykristallinen Keramikmaterials enthalten die Einzelkristallite nur einige wenige Domänen, abgegrenzt durch sog. Domänenwände.

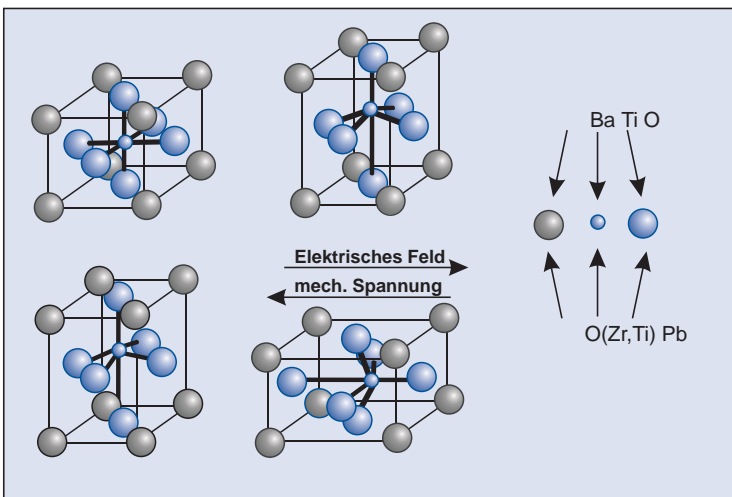
Bei großen Änderungen der elektrischen Feldstärke bzw. mechanischen Spannung kommt es zu Domänenwand-Schaltprozessen, d.h. einzelne Raumbereiche werden durch Domänen-Neubildung umgepolt. Diese Schaltprozesse sind irreversible Domänenwandverschiebungen sind u.a. die Ursachen der

bekanntesten ferroelektrischen Hysteresekennlinien.

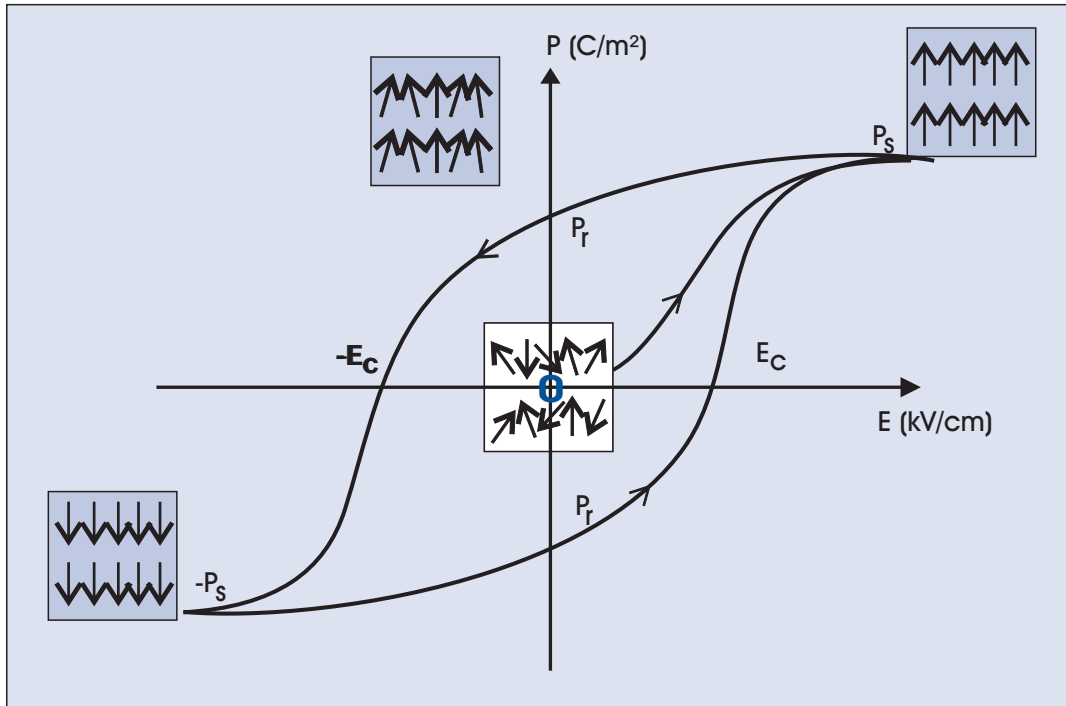


Symbolische Darstellung der elektrischen Orientierungsvorgänge in piezelektrischer Keramik, am Beispiel der Korn- und Domänenstruktur

Im Herstellungsprozess piezelektrischer Keramiken sind diese polykristallinen Materialien nach dem Sinterprozess im sog. thermisch-depolarisierten Zustand. Statistisch gesehen existiert eine nahezu gleichverteilte Ausrichtung der spontanen Polarisationsrichtungen in den Domänen und das Material ist isotrop, d.h. nicht piezelektrisch. Durch das Anlegen eines starken elektrischen Feldes E werden diese spontanen Domänenpolarisationen bis zur Sättigung P_s umorientiert. Es entsteht ein resultierender remanenter Polarisationsvektor parallel zur Richtung des Polungsfeldes und das Material ist anisotrop bzw. Piezelektrisch.



Kubische (paraelektrische) und tetragonale (ferroelektrische) Struktur von PZT und $BaTiO_3$ vor und nach dem Anlegen eines elektrischen Feldes bzw. Einwirken einer mechanischen Spannung



Erst beim Erreichen der Koerzitivfeldstärke E_C durch ein entgegengerichtetes elektrisches Feld wird die Polarisation wieder aufgehoben. Eine weitere Erhöhung dieses Gegenfeldes führt wieder zu einer Polarisation, aber mit umgekehrtem Vorzeichen.

Ferroelektrische Hysterese

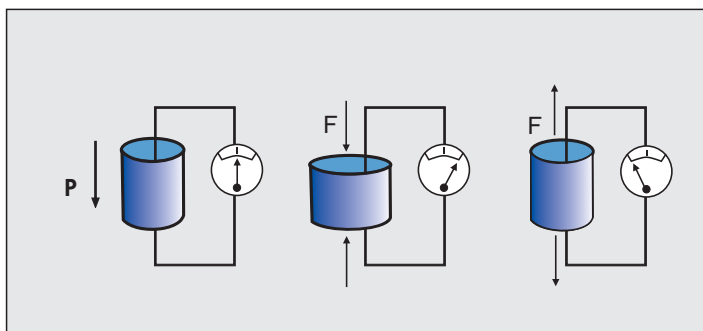
Direkter Piezoeffekt

Mechanische Spannungen durch Kräfteinwirkung von außen auf den piezoelektrischen Körper induzieren Verschiebungen der positiven und negativen Gitterbausteine, welche in Dipolmomenten zum Ausdruck kommen. Der damit verbundene Aufbau eines elektrischen Feldes erzeugt elektrische Spannungen. Vielfach wird dieser direkte Piezoeffekt in der Literatur auch Generatoreffekt genannt.

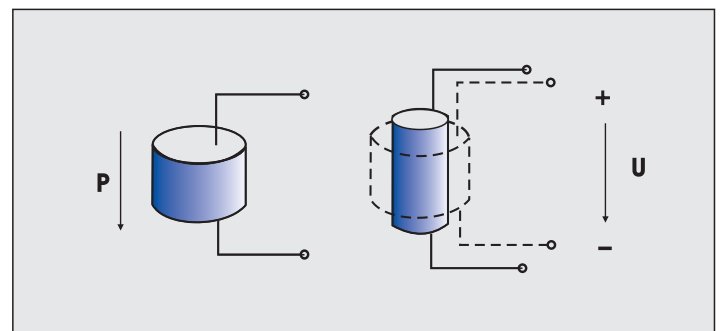
Inverser Piezoeffekt

Das Anlegen einer elektrischen Spannung an einen piezoelektrischen Körper bewirkt dessen geometrische Deformation im ungeklemm-ten Zustand. Die erzielte Bewegung ist abhängig von der Polarität der angelegten Spannung und der Richtung des Vektors der Polarisation. Das Anlegen einer Wechsel-spannung erzeugt eine zyklische Änderung der

Geometrie (z. B. Zunahme bzw. Verringerung des Durch-messers einer Scheibe). Wird der Körper geklemmt, d.h. Behinderung einer freien Deformation, wird eine mechanische Spannung bzw. Kraft generiert. Dieser Effekt wird vielfach auch Motoreffekt genannt.



Kräfteinwirkung auf Zylinder mit Voltmeter



Deformation eines piezokeramischen Körpers bei anliegender Spannung

ELEKTROMECHANISCHE ZUSAMMENHÄNGE

Im Folgenden soll in Kurzform eine quantitative Beschreibung der wichtigsten dielektrischen, elektromechanischen und piezoelektrischen Zusammenhänge, einschließlich einer Parameterdefinition dargestellt werden. Auf detaillierte mathematische und festkörperphysikalische Beziehungen, Methoden der Parameterbestimmung, etc. wird verzichtet. Dazu wird auf die entsprechende Fachliteratur (siehe Empfehlungen auf Seite 38) verwiesen.

Elektromechanische Grundgleichungen

Die nachstehenden Beziehungen gelten nur für kleine elektrische und mechanische Amplituden, sogenannte Kleinsignalwerte.

Nur in diesem Bereich können polarisierte piezoelektrische Keramiken durch lineare Zusammenhänge zwischen den elastischen Deformationen (S) - bzw. Spannungs (T) -Komponenten und den Komponenten des elektrischen Feldes E bzw. der dielektrischen Verschiebung D beschrieben werden. Diese linearen Beziehungen werden durch dielektrische, piezoelektrische und elastische "Konstanten" vermittelt. Bedingt durch die Anisotropie eines piezoelektrischen Materials sind diese physikalischen Größen nur durch entsprechende Tensoren definierbar, welche die Richtungsabhängigkeiten des elektrischen Feldes, der mechanischen Spannungen, usw. beschreiben.

In vereinfachter Form sind die Grundzusammenhänge der elektrischen und elastischen Eigenschaften (für eine statische bzw. quasistatische Anwendung), wie folgt darstellbar

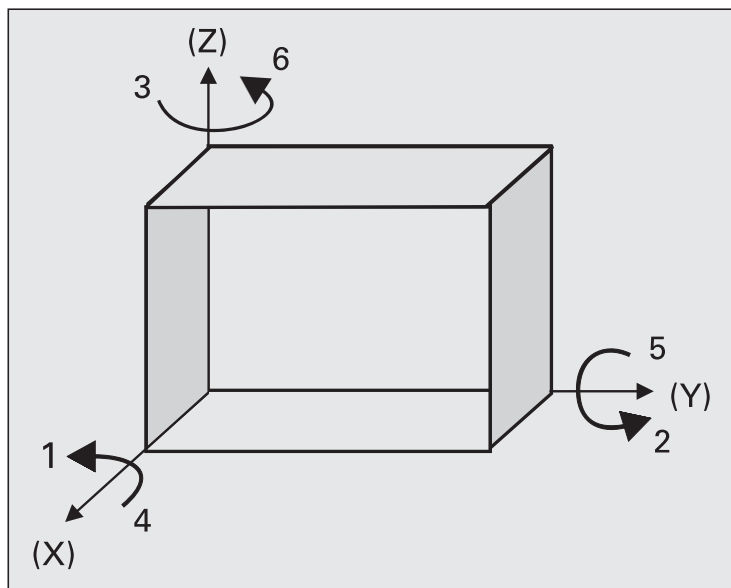
$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \mathbf{d} * \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T * \mathbf{E} \\ \mathbf{S} &= \mathbf{s}^E * \mathbf{T} + \mathbf{d} * \mathbf{E} \end{aligned}$$

wobei

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

Die bereits oben erwähnten Richtungsabhängigkeiten der piezoelektrischen Konstanten bezüglich des elektrischen Feldes E, der elektrischen Flussdichte D, der mechanischen Spannung T und der Dehnung S erfordern eine entsprechende Indizierung dieser Koeffizienten. Dazu wird in Analogie zu kristallografischen Beschreibungen bei piezo-ferroelektrischen Keramiken der Polarisationsvektor gewöhnlich parallel zur z- bzw. 3- Achse eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems gelegt.

Entsprechend den Richtungen x, y und z werden die entsprechenden Parameter mit den Ziffern 1, 2 und 3 definiert. Mechanische Spannungen, tangential zu den das kartesische Koordinatensystem aufspannenden Flächen bzw. auch sogenannte Scherungen an den Achsen, werden durch die Ziffern 4, 5 bzw. 6 gekennzeichnet.



Orthogonalsystem zur Beschreibung piezoelektrischer Materialien

PARAMETERDEFINITION

Permittivitätszahl ϵ

Die **Permittivitätszahl** ϵ bzw. die relative Dielektrizitäts-konstante (DK) ist das Verhältnis aus der absoluten Permittivität des Keramik-materials und der Permittivität im Vakuum ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m), wobei die absolute Permittivität ein Maß für die Polarisierbarkeit im elektrischen Feld darstellt. Die Richtungsabhängigkeit der DK von der Richtung des elektrischen Feldes und der dielektrischen Verschiebung wird durch entsprechende Indizes symbolisiert.

Zum Beispiel beschreibt

ϵ_{33}^T den DK-Wert in Polungsrichtung bei anliegenden elektrischen Feld in Polungsrichtung (3-Richtung, siehe oben) unter der Bedingung einer konstanten mechanischen Spannung ($T=0$: "freie" Permittivität)

ϵ_{11}^S elektrisches Feld und dielektrische Verschiebung in 1-Richtung, bei konstanter Deformation ($S=0$: "geklemmte" Permittivität)

Piezelektrische Ladungskonstanten d_i

Die **piezelektrische Ladungs- oder Deformationskonstante** d_i ist ein Maß für die induzierte elektrische Ladung bei Wirkung einer mechanischen Spannung bzw. erzielbare mechanische Dehnung bei Wirkung eines elektrischen Feldes (T =konstant). Zum Beispiel beschreibt

d_{31} die induzierte elektrische Verschiebungsdichte pro mechanische Spannung bzw. alternativ die induzierte Dehnung pro definierten elektrischen Feld, jeweils in Polungsrichtung.

Piezelektrische Spannungskonstanten g_i

Die **piezelektrischen Spannungskonstanten** g_i definieren das Verhältnis von elektrischer Feldstärke E zur wirkenden mechanischen Spannung T . Dividiert man die jeweiligen piezelektrischen Ladungskonstanten d_i durch die zugehörige Permittivitätszahl erhält man die entsprechenden g_i -Koeffizienten.

Zum Beispiel beschreibt

g_{31} das induzierte elektrische Feld in 3-Richtung bei in 1-Richtung wirkender mechanischer Spannung.

Elastische Nachgiebigkeit s_{ij}

Die **Nachgiebigkeitskonstanten** s (auch Elastizitäts-Konstanten genannt) sind ein Maß für das Verhältnis der relativen Deformation S zur mechanischen Spannung T . Bedingt durch die Wechselwirkung von mechanischer und elektrischer Energie sind die jeweiligen elektrischen Grenzbedingungen zu berücksichtigen.

Zum Beispiel beschreibt

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

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

Hinweis:

Der im englischsprachigen Raum oftmals verwendete Young-Modul Y_{ij} entspricht dem reziproken Wert des entsprechenden Elastizitätskoeffizienten.

Frequenzkonstante N_i

Die **Frequenzkonstante** N entspricht der halben Geschwindigkeit der sich im keramischen Körper ausbreitenden Schallwelle (mit Ausnahme N_p , der sog. planaren Schwingung). Die Indizes bezeichnen die entsprechende Schwingungsrichtung, wobei die jeweilige Abmessung A die zugehörige (Serien-) Resonanzfrequenz f_r bestimmt ($N = f_r \cdot A$). Zum Beispiel beschreibt

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_p die Frequenzkonstante der Flächenschwingung (planar) einer runden Scheibe

N_t die Frequenzkonstante der Dickenschwingung einer dünnen Scheibe, die über die Dicke polarisiert ist.

Mechanische Güte Q_m

Die **mechanische Güte** Q_m charakterisiert die "Resonanzschärfe" eines piezelektrischen Körpers (Resonator) und wird vorrangig aus der 3 dB-Bandbreite der Serienresonanz des schwingfähigen Systems bestimmt. Der reziproke Wert des mechanischen Gütefaktors ist das Verhältnis aus Wirk- und Blindwiderstand, der mechanische Verlustfaktor \tan

Kopplernfaktoren k

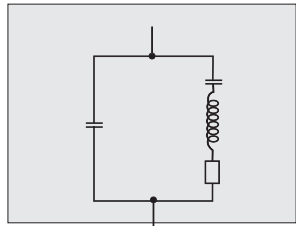
Der **Kopplernfaktor** k ist ein Maß für den Grad des piezelektrischen Effektes (k ein Wirkungsgrad, wie fälschlicherweise oft genannt!) Er beschreibt das Vermögen eines piezelektrischen Materials, aufgenommene elektrische in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt. Mathematisch bestimmt sich die Höhe des Kopplernfaktors aus der Quadratwurzel des Verhältnisses gespeicherte mechanische Energie zu der gesamten aufgenommenen Energie. Unter dynamischen Bedingungen (Resonanzfall) hängt k von der entsprechenden Schwingungsform des piezelektrischen Körpers ab.

Zum Beispiel beschreibt

k_{33} der Kopplernfaktor der Longitudinalschwingung
 k_{31} der Kopplernfaktor der transversalen Längsschwingung
 k_p der Kopplernfaktor der Radialschwingung (planar) einer runden Scheibe
 k_t der Kopplernfaktor der Dickenschwingung einer Platte
 k_{tp} der Kopplernfaktor der Dickenschwingung einer Platte

Das dynamische Verhalten

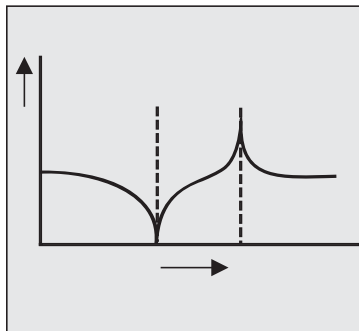
Das elektromechanische Verhalten eines zu Schwingungen angeregten piezoelektrischen Körpers lässt sich in seinen Eigenschaften mit einem elektrischen Ersatzschaltbild darstellen.



Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Resonators

C₀ + C₁ ist dabei die Kapazität des Dielektrikums. Die aus C, L, und R bestehende Reihenschaltung 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 (siehe Seite 17, Anmerkungen zur Tabelle) im Resonanzfall bestimmt. Einen typischen Impedanzverlauf zeigt nachstehende Abbildung.



Typischer Impedanzverlauf

Für die Bestimmung bzw. Berechnung der piezoelektrischen Kennwerte werden die Serien- und Parallelresonanz herangezogen. Diese entsprechen in guter Näherung dem Impedanzminimum f_m und - maximum f_n .

Schwingungszustände bzw. -formen werden maßgebend von Geometrie des Körpers, mechanoelastischen Eigenschaften und der Polarisationsrichtung bestimmt.

Die wichtigsten Schwingungszustände an definierten Resonatoren werden mit den zugehörigen Konstanten in der nachstehenden Grafik dargestellt.

Achsen	Wandlertyp	Konstanten
	Dickenschwingung Polung ↑ ↓ Feld ↔ Deformation ↔ ↓ ↔ ↔ Längsschwingung ↓ ↔ ↔	d_{33}, g_{33}, k_{33} s_{33}, e_{33} 33 d_{31}, g_{31}, k_{31} s_{11}, e_{11} 33
	Radialschwingung ↓ ↔ ↔ Dickenschwingung ↓ ↔ ↔	d_{31}, g_{31}, k_{p} s_{11}, e_{11} 33 d_{33}, g_{33}, k_{33} s_{33}, e_{33} 33
	Scherschwingung ↓ ↔ ↔ ↔ ↔ ↓ ↔ ↔ ↔ ↔	d_{15}, g_{15}, k_{15} s_{44}, s_{55}, e_{15}
	(Wand-) Dickenschwingung Radialschwingung Längsschwingung 	d_{33}, g_{33}, k_{33} s_{33}, e_{33} 33 d_{31}, g_{31}, k_{31} s_{11}, e_{11} 33

Schwingungszustände piezoelektrischer Komponenten

PIEZOKERAMISCHE WERKSTOFFE

Allgemeine Beschreibung

PI Ceramic bietet eine breite Auswahl piezoelektrischer Keramikmaterialien auf der Basis von modifizierten Bleizirkonat-Titanat (PZT) und Bariumtitanat, zugeschnitten auf die verschiedenartigsten Anwendungen, an. Neben den nachstehend detailliert beschriebenen Standardtypen steht eine Vielzahl anwendungs- und kundenspezifischer Modifikationen zur Verfügung. PIC-Werkstoffe sind vergleichbar mit den international aktuellen Spitzenwerkstoffen. Die Eigenschaften sind in der Europäischen Norm EN 50324 klassifiziert.

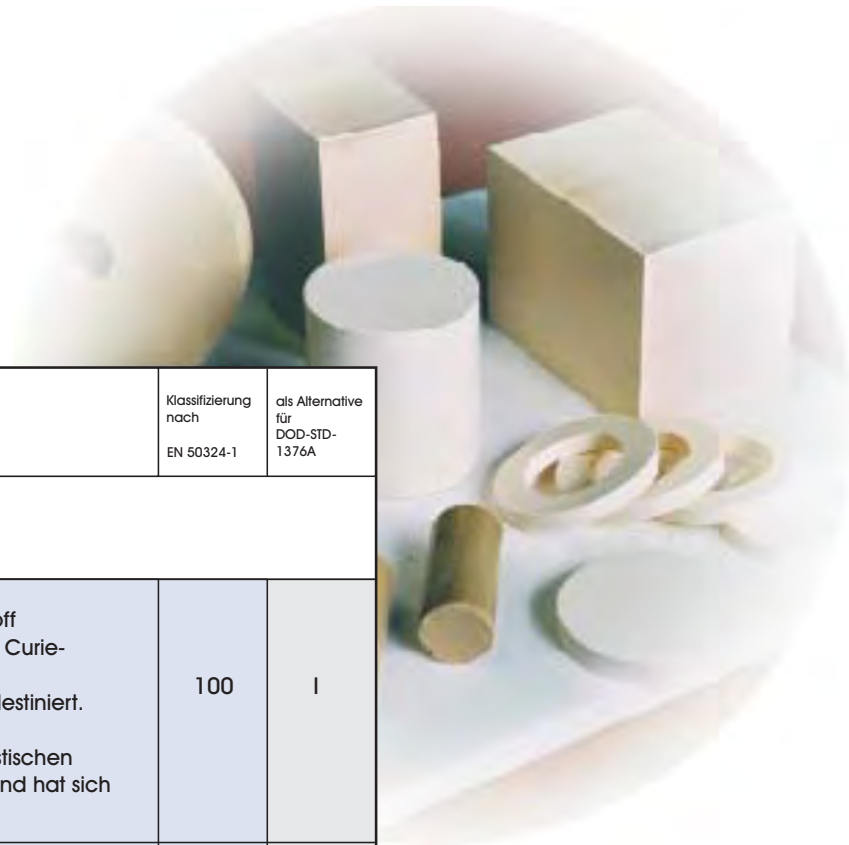
International gebräuchlich werden Piezokeramiken in zwei Gruppen eingeteilt. Die Synonyme „Weiche“ und „Harte“ PZT-Keramiken beziehen sich auf die Dipol- bzw. Domänenbeweglichkeit und damit auch das Polarisations- / Depolarisationsverhalten.

„Weiche“ Piezokeramiken sind gekennzeichnet durch eine vergleichsweise hohe Domänenbeweglichkeit und einem daraus resultierendem „ferroelektrisch weichem“ Verhalten, d.h. relativ leichte Polarisierbarkeit.

Im Gegensatz dazu können

ferroelektrische „Harte“-PZT-Materialien hohen elektrischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt werden. Die dabei geringe Änderung ihrer Eigenschaften macht sie damit speziell für Leistungsanwendungen prädestiniert.

Werkstoffbezeichnung	Allgemeine Beschreibung der Werkstoffeigenschaften	Klassifizierung nach EN 50324-1	als Alternative für DOD-STD-1376A
„Weich“- PZT			
PIC 151	PIC 151 ist ein modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff mit hoher Permittivität, hohem Kopplungsfaktor und hoher piezoelektrischer Ladungskonstante. Dieser Werkstoff ist das Standardmaterial für Aktoren (PICA Serie) und geeignet für Ultraschallwandler geringer Leistung und niederfrequente Schallwandler.	600	II
PIC 255	PIC 255 ist ein modifiziertes PZT Material mit sehr hoher Curie-temperatur, hoher Permittivität, hohem Kopplungsfaktor und hoher Ladungskonstante. Der Werkstoff wurde für Aktoranwendungen bei dynamischen Einsatzbedingungen und hohen Umgebungstemperaturen optimiert. Infolge seines hohen Kopplungsfaktors, des niedrigen mechanischen Gütefaktors und des niedrigen Temperaturkoeffizienten ist der Werkstoff besonders für Ultraschallwandler geringer Leistung, nichtresonante Breitbandsysteme und für Kraft- und Schallsensoren geeignet.	200	II
PIC 155	PIC 155 ist eine Modifikation des PIC 255 Werkstoffes, ausgezeichnet durch hohe piezoelektrische Spannungskoeffizienten und niedrigere Frequenzkonstanten. Er findet dort Anwendung, wo eine hohe g-Konstante gefordert wird, wie z. B. in Mikrofonen und Schwingungsaufnehmern mit Vorverstärker.	200	II
PIC 153	PIC 153 ist ein modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff mit extrem hohen Werten von Permittivität, Kopplungsfaktor und hoher Ladungskonstante, bei einer Curietemperatur von ca. 185 °C. Der Werkstoff ist geeignet für Hydrophone, Wandler der medizinischen Diagnostik und Piezoaktoren.	600	VI
PIC 152	PIC 152 ist ein PZT-Werkstoff mit speziell niedrigem Temperaturkoeffizient der Permittivität.	200	II



Werkstoffbezeichnung	Allgemeine Beschreibung der Werkstoffeigenschaften	Klassifizierung nach EN 50324-1	als Alternative für DOD-STD-1376A
"Hart"- PZT			
PIC 181	PIC 181 ist ein modifizierter Bleizirkonat-Bleittitanat-Werkstoff mit extrem hohem mechanischem Gütefaktor und hoher Curietemperatur. Dieser Werkstoff ist für Leistungsschallanwendungen prädestiniert. Darüber hinaus eignet er sich auf Grund seiner guten Temperatur- und Zeitkonstanz der dielektrischen und elastischen Werte für Ultraschallanwendungen im Resonanzbetrieb und hat sich speziell in Piezomotor-Antrieben bewährt.	100	I
PIC 141	PIC 141 ist ein modifiziertes PZT-Material mit hohem mechanischem Gütefaktor und vergleichsweise moderater Permittivität. Dieser Werkstoff ist für Leistungsschallanwendungen vorgesehen und wird bei der Verneblung von Medikamenten eingesetzt.	100	I
PIC 241	Die PZT Keramik PIC 241 zeichnet sich durch eine hohe mechanische Güte und eine vergleichsweise hohe Permittivität aus. Die Anwendungsgebiete liegen im Leistungsschall und bei Antriebselementen für Piezomotoren.	100	I
PIC 300	PIC 300 ist ein modifizierter Bleizirkonat-Bleittitanat-Werkstoff mit sehr hoher Curietemperatur und ist für Anwendungen bei Temperaturen bis zu 250°C (kurzzeitig 300°C) geeignet.	100	I
Barium-Bleittitanat			
PIC 110	PIC 110 ist ein modifizierter Bariumtitanat-Werkstoff mit einer Curietemperatur von 150°C. Die niedrige akustische Impedanz macht diesen Werkstoff speziell für Sonar- und Hydrophonapplikationen geeignet.	400	IV

Werkstoffdaten

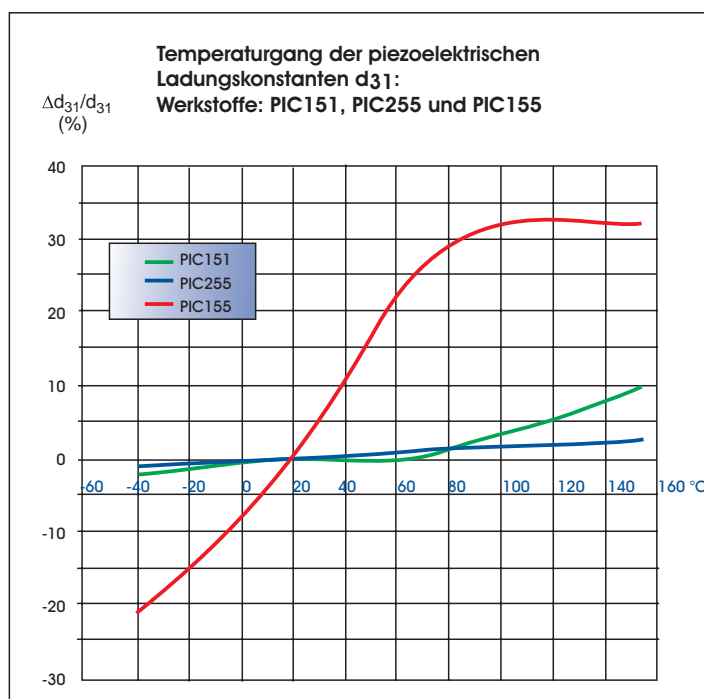
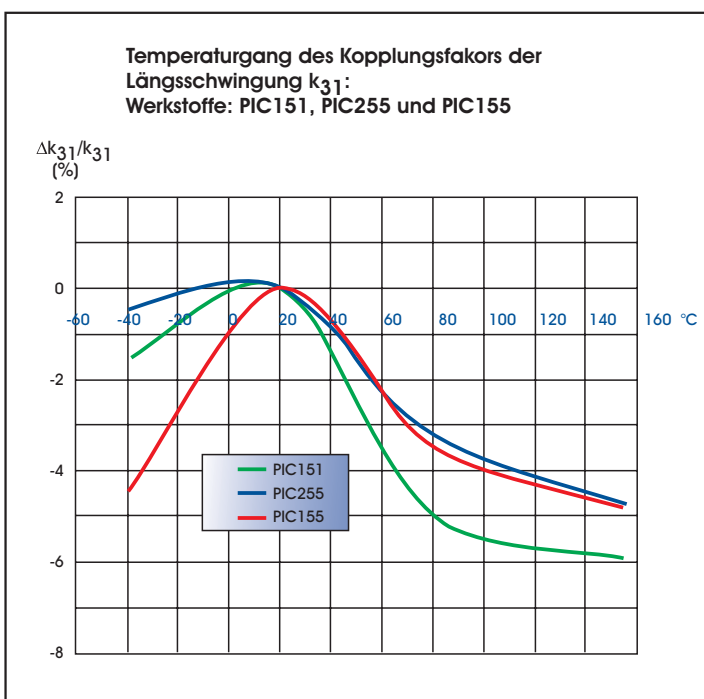
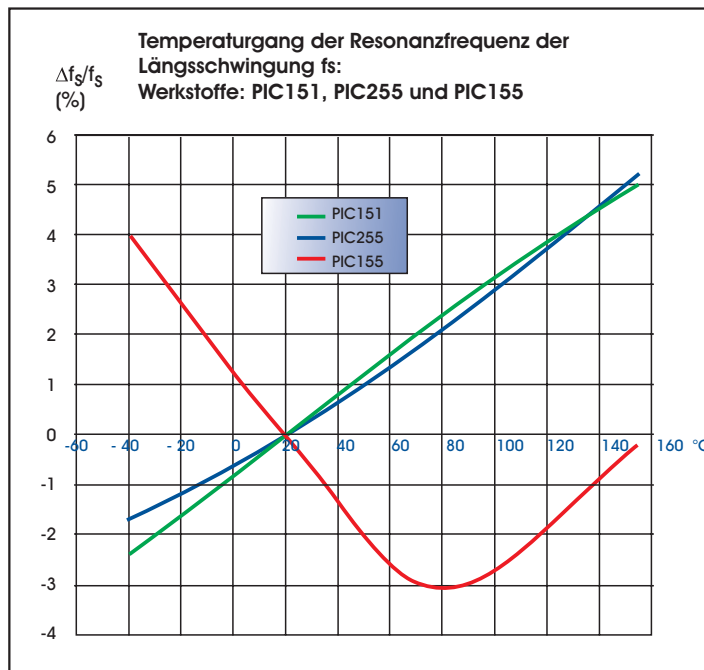
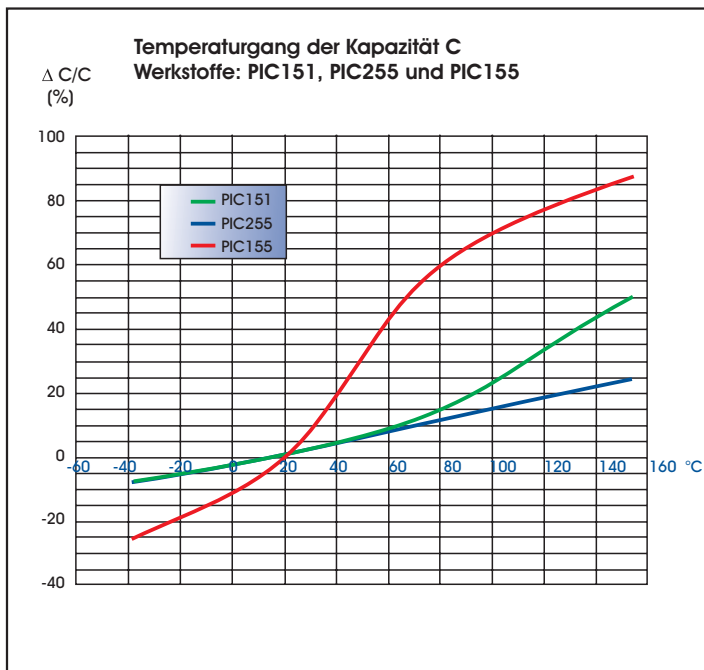
Materialtyp	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	PI-C	
	151	255	155	153	152	181	141	241	300	110				
Parameter														
Physikalische und dielektrische Eigenschaften														
Dichte	7,80	7,80	7,80	7,60	7,70	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	5,50	
Cure-Temperatur	250	350	345	185	340	330	295	270	370	150				
relative Permittivitätszahl	In Polungsrichtung 1 zur Polung		ϵ_{33}^{T/E_0}	2400	1750	1450	4200	1350	1200	1250	1450	1050	950	
			ϵ_{11}^{T/E_0}	1980	1650	1400	1500	1500	1500	1500	1550	950		
dielektrischer Verlustfaktor			$\tan\delta$ (10^{-3})	20	20	20	30	15	3	5	5	3	15	
Elektronenmechanische Eigenschaften														
Kopplungsfaktor	k_p	0,62	0,62	0,62	0,62	0,48	0,56	0,55	0,50	0,48	0,48	0,30		
	k_l	0,53	0,47	0,48			0,46	0,48	0,46	0,43	0,43	0,42		
	k_{31}	0,38	0,35	0,35			0,32	0,31	0,32	0,25	0,25	0,18		
	k_{33}	0,69	0,69	0,69	0,58		0,66	0,66	0,64	0,64	0,46			
	k_{15}		0,66				0,63	0,67	0,63	0,32				
piezoelektrische Ladungskonstante	d_{31}	-210	-180	-165			-120	-140	-130	-80			-50	
	d_{33} (10^{-12} C/N)	500	400	360	600	300	265	310	290	265	155		120	
piezoelektrische Spannungskonstante	d_{15}		550				475	475	265	155				
	g_{31} (10^{-3} Vm/N)	-11,5	-11,3	-12,9			-11,2	-13,1	-9,8	-9,5				
Akustomechanische Eigenschaften	Frequenzkonstante	N_b	1950	2000	1960	1960	2250	2250	2190	2350			3150	
		N_l (Hzm)	1500	1420	1500			1640	1610	1590	1700		2300	
elastische Nachgiebigkeitskonstante	mechanischer Gütefaktor	N_b	1750	2000	1990	1960	1920	2110	2060	2140	2100			2500
		S_{11}^E (10^{-12} m ² /N)	15,0	16,1	15,6			11,8	12,4	12,6	11,1			
		S_{33}^E (10^{-12} m ² /N)	19,0	20,7	19,7			14,2	13,0	14,3	11,8			
		C_{33}^{32} (10^{10} N/m ²)	10,0		11,1			16,6	15,8	13,8	16,4			
		G_m	100	80	80	50	100	2000	1500	1200	1400			250
Temperaturstabilität														
Temperaturkoeffizient von $\epsilon^{T,33}$ (im Bereich -20°C bis +125°C)	$TK_{\epsilon_{33}}$ (10^{-3} /K)	6	4	6	5	2	3	5		2				
Zeitstabilität (relative Änderung des Parameters pro Zahlencode in %)														
relative Dielektrizitätszahl	C_{33}		-1,0	-2,0									-5,0	
	C_k		-1,0	-2,0									-8,0	
Kopplungsfaktor	C_k													
	C_k													

Zusätzliche Angaben:

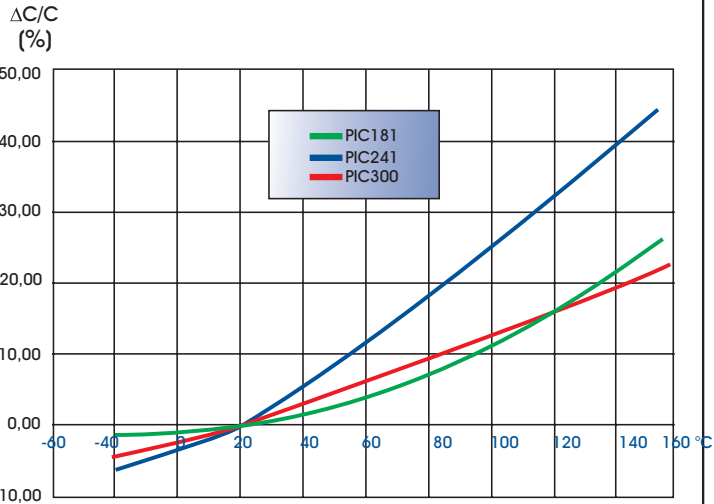
Nachstehende Werte sind Orientierungswerte und gelten näherungsweise für alle PZT-Materialien von PI Ceramic:

- Spezifische Wärmekapazität $WK = ca. 350 \text{ J/kg} \cdot K$
- spezifische Wärmeleitfähigkeit $WL = ca. 1,1 \text{ Wm}^{-1} \cdot K^{-1}$
- Polisonische Querkontraktion $\sigma = ca. 0,34$
- thermische Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_3 = ca. -4 \text{ bis } -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (in Polungsrichtung, kurzgeschlossen)
- $\alpha_{11} = ca. 4 \text{ bis } 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Luzur Polungsrichtung, kurzgeschlossen)
- statische Druckfestigkeit größer 600 MPa

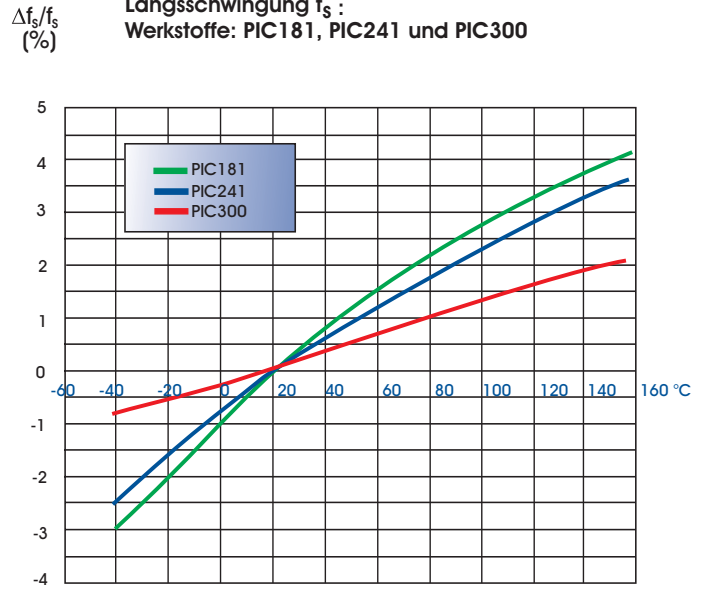
- Die Daten in den nachfolgenden Tabellen wurden an Prüfkörpern mit den nach der Europäischen Norm EN 50324-2 festgelegten geometrischen Abmessungen bestimmt und sind typische Werte
- Die angegebenen Daten sind Nennwerte die 24 h - 48 h nach dem Zeitpunkt der Polarisierung und bei einer Umgebungstemperatur von $23 \pm 2^\circ \text{C}$ an diesen Prüfkörpern bestimmt wurden.
- Die Einheiten dieser typischen Kennwerte wird durch ständige Freigabeprüfungen der einzelnen Werkstoffchargen dokumentiert
- Die Eigenschaften am Produkt werden abhängig von Geometrie, Variationen in den Herstellungsverfahren und Mess- bzw. Ansteuerbedingungen bestimmt.
- Fragen die sich aus der Interpretation der Materialkennwerte am Produkt ergeben, sind zweckmäßigerweise mit den Spezialisten von PI Ceramic zu klären.
- Eine komplette Koeffizientenmatrix der Werkstoffe ist auf Anfrage erhältlich



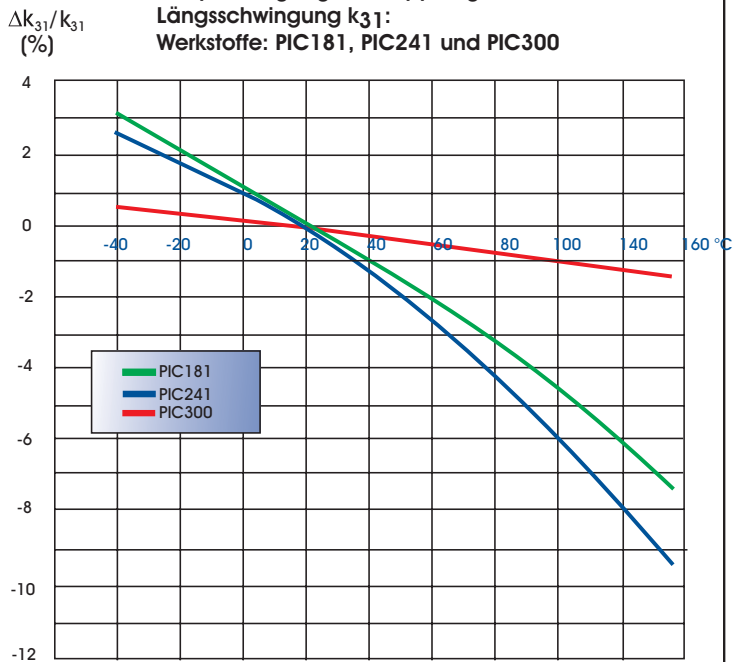
Temperaturgang der Kapazität C:
Werkstoffe: PIC181, PI 241 und PIC300



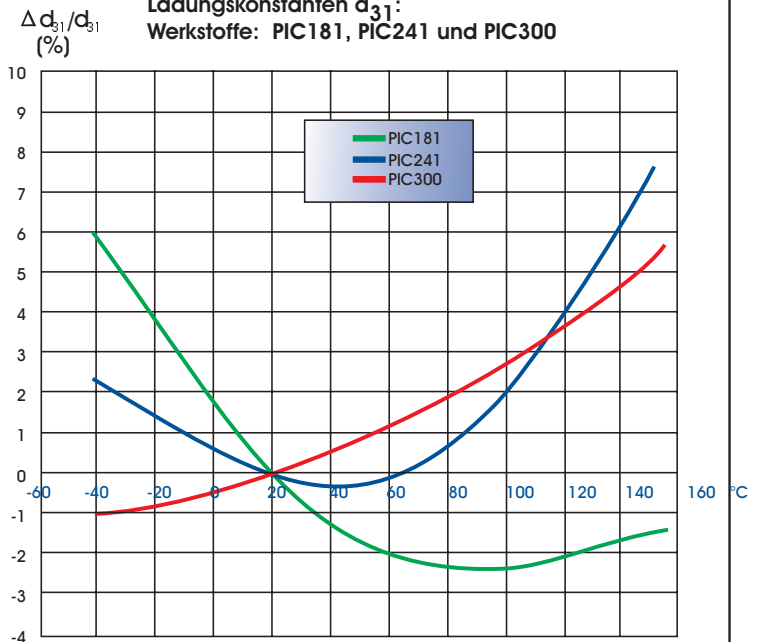
Temperaturgang der Resonanzfrequenz der Längsschwingung f_s :
Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300



Temperaturgang des Kopplungsfaktors der Längsschwingung k_{31} :
Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300



Temperaturgang der piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{31} :
Werkstoffe: PIC181, PIC241 und PIC300



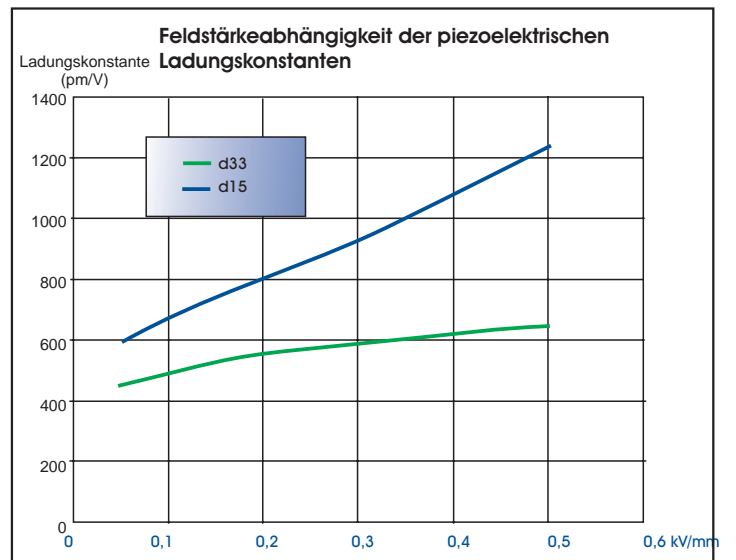
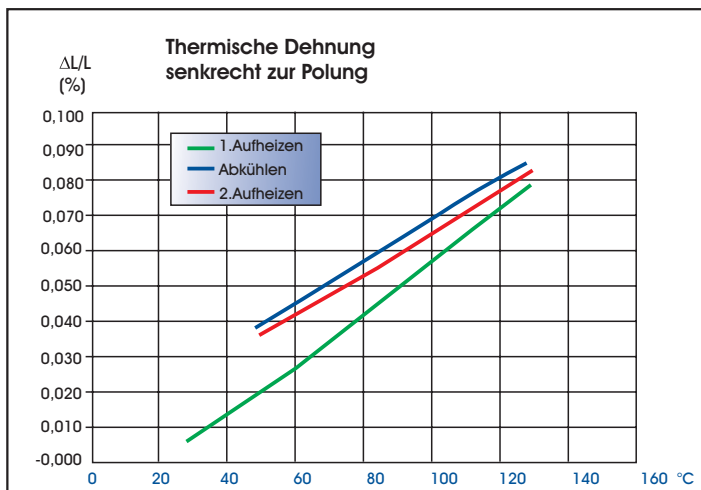
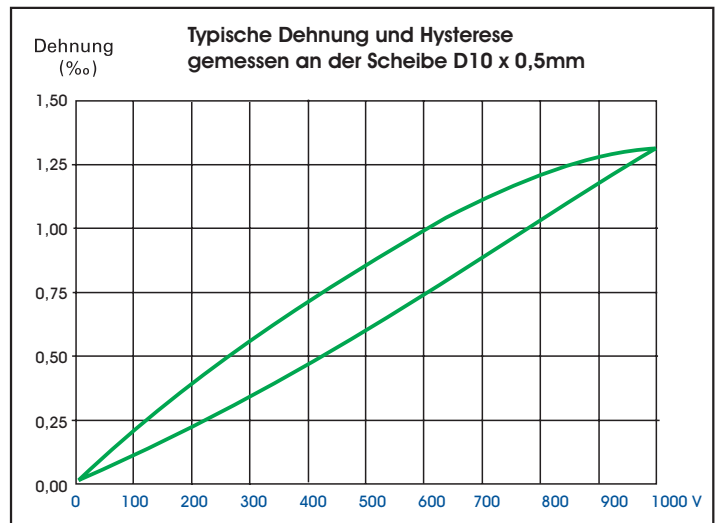
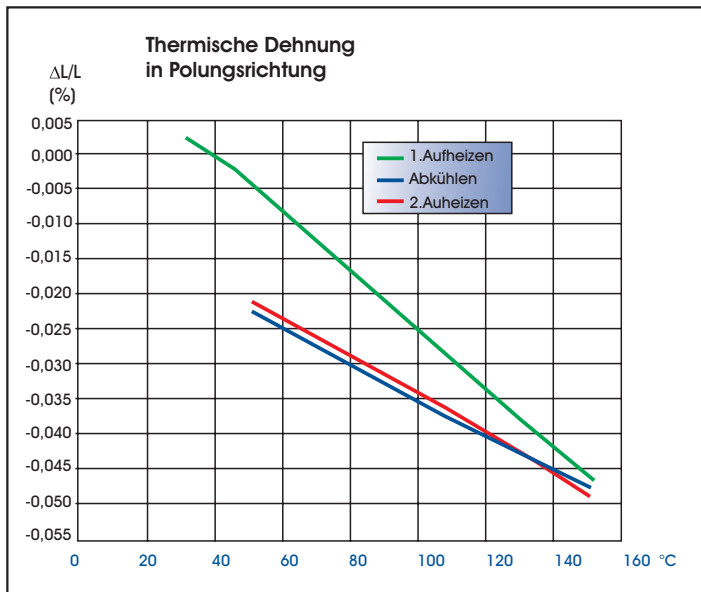
Spezifische Eigenschaften

Thermische Ausdehnung 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
- Nicht gepolte Piezokeramik ist isotrop. Der Ausdehnungskoeffizient ist annähernd linear mit einem TK von ca. $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- 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.

Deformationsverhalten am Beispiel der PZT-Keramik PIC 255

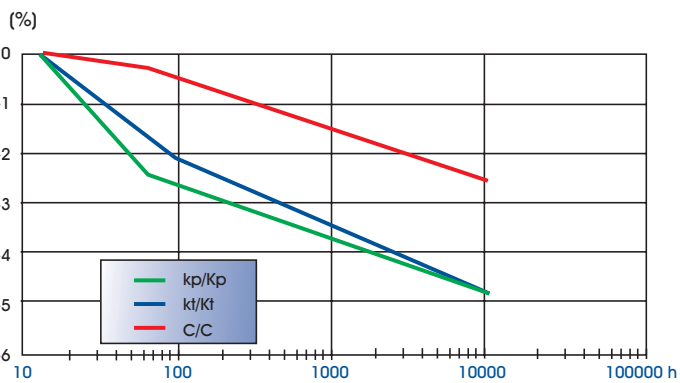
- Die Dehnung einer Piezokeramik ist bei Großsignalfeldstärken (max. 2kV/mm) mit reversiblen und irreversiblen Domänen-Umorientierungsprozessen verbunden.
- Die Domänen-Umorientierungen bedingen größere Deformationen an den Keramikelementen, als sich aus den Piezoeffizienten gemäß Tabelle errechnen lässt.
- Die irreversiblen Domänen-Umorientierungen führen zu einer Hysterese in der Dehnung.



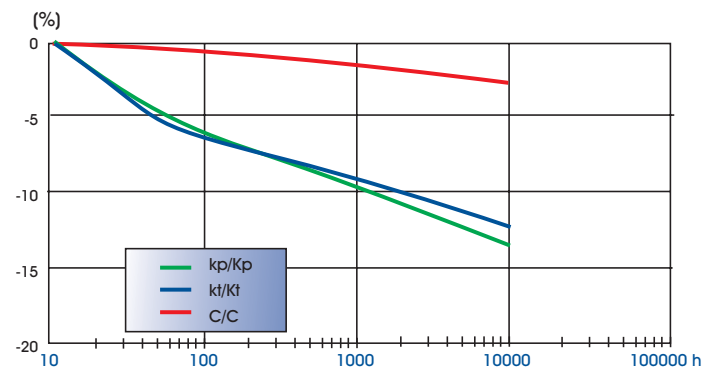
Stabilität der Parameter bei hohen Temperaturen am Beispiel PIC 300

- PIC 300 ist zum Einsatz bei Temperaturen bis zu 250 °C (kurzzeitig bis zu 300 °C) geeignet.
- Die Messwertdrift für Kopplungsfaktor und Kapazität kann drastisch verringert werden, wenn eine Voralterung über 12 h bei 300 °C erfolgt.
- Die zu erwartenden prozentualen Änderungen sind in den Diagrammen A und B dargestellt.
- PIC 300 zeigt eine geringe Temperaturabhängigkeit der Kapazität im Einsatztemperaturbereich bis 250 °C (Diagramm C).

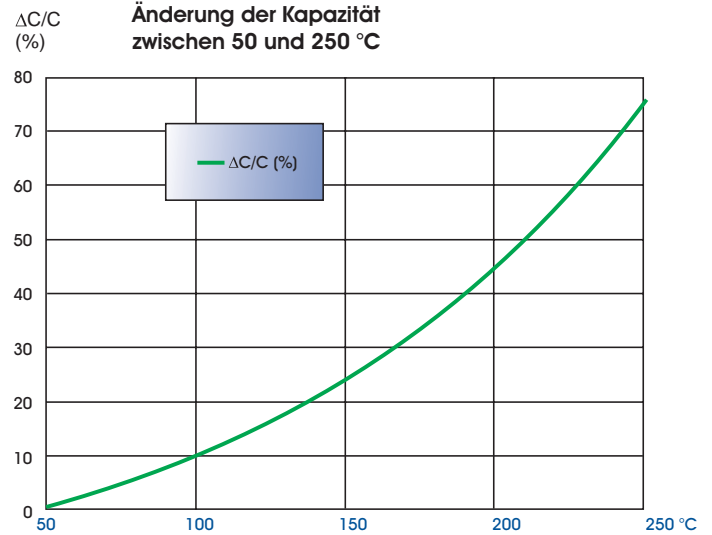
Messwertdrift nach Lagerung bei 250 °C an vorgealterten Proben (300 °C/12h)



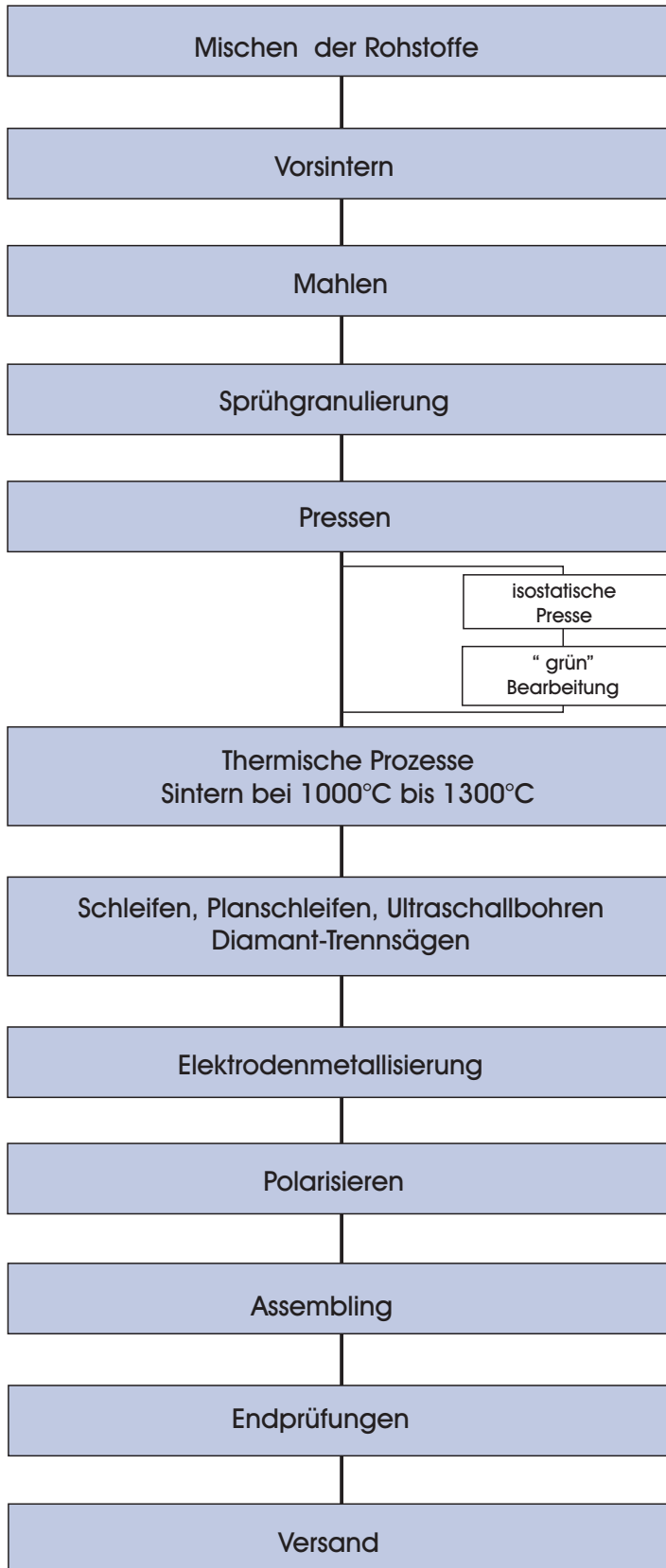
Messwertdrift nach Lagerung bei 300 °C an vorgealterten Proben (300 °C/12h)



Änderung der Kapazität zwischen 50 und 250 °C



FERTIGUNGSTECHNOLOGIE

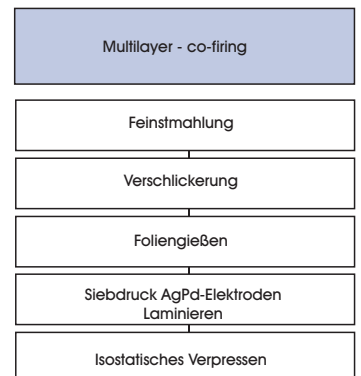


PI Ceramic verfügt über eine Vielzahl moderner Fertigungsverfahren, die es erlauben, kundenspezifische Forderungen für mittlere und Kleinserien in sehr kurzen Bearbeitungszeiten umzusetzen und den Übergang zur Großserienfertigung sicher und kostengünstig zu gestalten.

Keramische Formgebungsverfahren

Basistechnologie zur Herstellung von piezokeramischen Körpern ist das Pressen von Formkörpern unter Verwendung von Sprühgranulat. Hierfür stehen hochproduktive Pressen mit bis zu 1 MN-Presskraft zur Verfügung. Die Preßkörper werden entweder unter Berücksichtigung der Sinterschwindung maßgenau oder mit Bearbeitungsaufmaßen für eine Präzisionsnachbearbeitung hergestellt. Durch den Einsatz von produktiven Innenboard-Trennsägeautomaten sind Komponenten (Scheiben, Platten, etc.) mit einer minimalen Dicke von 0,2 mm kostengünstig herstellbar. Zur Herstellung dünnwandiger Rohre mit Wandstärken von standardmäßig 0,5 mm kommen moderne Ultraschallbearbeitungsverfahren zur Anwendung.

Speziell für die Fertigung von Multilayer-Bauelementen (PICMA-Serie) steht eine sog. co-firing Technologie zur Verfügung. Die durch Folien gießen hergestellten, minimal 25 µm dicken Keramikfolien werden nach dem Aufbringen von Edelmetall-Elektroden durch spezielle Siebdrucktechniken und anschließender Laminierung in einem Prozessschritt gesintert.



Füge- und Verbindungstechnik bei PI Ceramic

PI Ceramic verfügt über umfangreiches Know-how und langjährige Erfahrungen bei der Fertigung konfektionierter piezokeramischer Komponenten und Sub-Systeme.

Lötverfahren bei PI Ceramic: Konfektionierte Piezobau-elemente mit Anschlußdrähten werden im Handlötverfahren durch geschultes Personal hergestellt. Für Lötungen auf miniaturisierten Komponenten steht ein moderner Lichtlöt-automat zur Verfügung. Lötstellen für erhöhte Zuverlässigkeitsanforderungen werden speziellen visuellen Kontrollen unterworfen. Hierfür kommen optische Techniken zur Anwendung, die, den jeweiligen Erfordernissen entsprechend, vom Stereo-mikroskop bis zum Kamera-Inspektionssystem reichen.

Aufbau- und Verbindungstechnik bei PI Ceramic: Das Fügen von Produkten, z. B. durch Klebprozesse, erfolgt in der Serienproduktion mit automatisierten Vorrichtungen, die das erforderliche Verbindungsregime (z. B. Aushärtung von Epoxy-Klebstoffen) realisieren und damit eine gleichmäßige Qualität garantieren. Die Klebstoffauswahl und das Aushärtere-gime v unter Berücksichtigung Materialeigenschaften Verbindungspartner u vorgesehenen Einsatzbedingungen für jede optimiert. Für komplizierte Sonderfertigungen ko-eigenentwickelte Dosier-Positioniergeräte zur Anwendung.

Unsere eigenen piezokeramischen Stapelaktuatoren (PICA Serie), Hochvolt-Biegeaktoren und Leistungsschallkomponenten, die in Füge-technik aufgebaut sind, haben sich im Einsatz in der Halbleiterindustrie und Medizintechnik durch ihre hohe Zuverlässigkeit vielfach bewährt.



PIEZOKERAMISCHE BAUELEMENTE

Abmessungen

Geometrische Fertigungsgrenzen

Die maximalen Abmessungen werden durch die zur Verfügung stehenden Ausrüstungen und Vorrichtungen bestimmt

Max. Durchmesser OD 80 mm

Max. Länge / Höhe L 70 mm

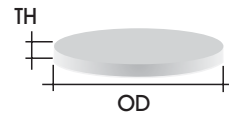
Max. Dicke (Polarisation) H 20 mm


Die minimalen Abmessungen werden durch physikalische und Verfahrensgrenzen bestimmt, z. B. wird die minimale Dicke durch die Bruchfestigkeit der Keramik bei mechanischer Bearbeitung bestimmt.

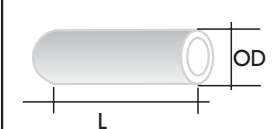
Min. Durchmesser OD 1,50 mm

Min. Dicke TH 0,15 mm

Die geometrischen Fertigungsgrenzen sind in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Abmessungskombinationen dargestellt

	Scheibe / Stab	
	TH (mm)	OD (mm)
max. Dicke	30	10...80
	20	5...80
	10	2...5
min. Dicke	0,15	2...20
	0,3	2...60
	0,5	2...80

	Platte / Block		
	TH (mm)	L (mm)	W (mm)
max. Dicke	40	1...80	1...20
	40	1...60	1...60
min. Dicke	0,15	1...20	1...20
	0,3	1...80	1...30
	0,5	1...60	1...60

	Rohr	
	OD (mm)	ID (mm)
max. Durchmesser	< 78	< 70
min. Durchmesser	> 2	> 0,8
Länge	1.....70 mm	

Vorzugsabmessungen

Innerhalb der Fertigungsgrenzen empfehlen wir die Verwendung von Komponenten mit Vorzugsabmessungen, die auf Basis vorrätiger Standardhalbzeuge, Montagevorrichtungen, wie Sputtermasken, Siebdruckschablonen, Klebelehren u.a. ohne Sonderkosten für Werkzeuge sehr kurzfristig lieferbar sind.

Vorzugsabmessungen: Scheiben vs. Geometrie

Dicke TH / mm	OD / 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										
10,00										
20,00										

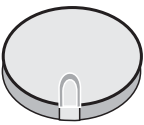
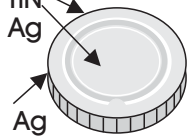
Option Elektrodensystem
Silber (Dickschicht)
oder
Dünnschicht (CuNi, Au, ect.)

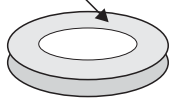
Vorzugsabmessungen: Scheiben vs. Frequenz (Dickenschwingung)


Frequenz in MHz	OD / 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										

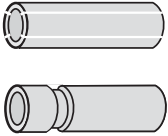
Option Elektrodensystem
Silber (Dickschicht)
oder
Dünnschicht (CuNi, Au, ect.)

Eine Kombination von Extremwerten ist nicht möglich!
Über die Vorzugsabmessung hinaus gehende Geometrien sind auf Anfrage möglich.

Vorzugsabmessung: Scheiben mit Sonderelektroden			
Design	Durchmesser OD / mm	Dicke TH / mm	Optionen Elektrodensystem
Umkontakt 	10	0,5 1,0 2,0	Silber Dickschicht
	16		
	20		
	25		
	40		
Sonderausführung Zerstäuber-Scheibe 	10	1 MHz	Elektrodenschicht = Silber Funktionsschicht = TiN
	16	2,5 MHz und 1,7 MHz	
	20		
	25		

Vorzugsabmessung: Ringe				
Design	Außen- durchmesser OD/mm	Innen- durchmesser ID/mm	Dicke TH / mm	Optionen Elektrodensystem
Ag (CuNi) 	3	0,85	0,5	CuNi / Ag
	10	2,7	0,5; 1,0; 2,0	Silber Dickschicht oder CuNi Dünnschicht
	10*	4,3*		
	10*	5*		
	12,7	5,2*		
	25	16*		
	38	13*	5,0; 6,0	
	50	19,7*	5,0; 6,0; 9,5	
	Toleranzen wie gesintert, siehe Tabelle Seite 29			

Vorzugsabmessungen: Rohre				
Design	Außen- durchmesser OD / mm	Innendurch- messer ID / mm	Länge L / mm	Optionen Elektroden- system
	76	60	50	innen Silber außen: Silber oder CuNi
	40	38	40	
	20	18	30	
	10	9	30	
	10	8	30	
	6,35	5,35	30	
	3,2	2,2	30	
	2,2	1,0	20	

Vorzugsabmessungen: Rohre				
Design	Außen- durchmesser OD / mm	Innen- durchmesser ID / mm	Länge L / mm	Optionen Elektroden- system
	20	18	30	innen Silber außen: Silber oder CuNi
	10	9	30	
	10	8	30	
	6,35	5,35	30	
	3,2	2,2	30	
	2,2	1,0	20	

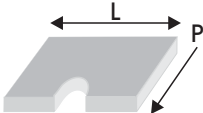
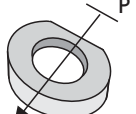
Vorzugsabmessungen: Platten

Dicke	L x W / mm ²									
	4x4	5x5	10x10	15x15	20x20	25x20	25x25	50x30	50x50	70x25
TH										
mm										
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										

Optionen
Elektroden-
system

Silber (Dick-
schicht)
oder Dünn-
schicht
(CuNi oder
Au)

Eine Kombination von Extremwerten ist nicht möglich
Die lateralen Abmessungen werden u.a. Durch ein Trennsägeverfahren an großen Standardgeometrien erzeugt. Damit sind auch über die Vorzugsabmessungen hinaus gehende Geometrien auf Anfrage möglich.

Vorzugsabmessungen: (Quadratische) Scherplatten und Scherringe				
Design	Breite W / mm	Länge L / mm	Dicke TH / mm	Optionen Elektroden- system
Scherplatte 	3	3	0,5; 0,75; 1,0	CuNi oder Gold Dünnschicht
	4	4		
	5	5		
	10	10		
	16	16		
		(20; 30; 40;)		
Scherring 	Außen- durchmesser OD / mm	Innen- durchmesser ID / mm	Dicke TH / mm	
	38	19	6	
	36	19	6	

Anwendungshinweise

Dickschichtelektroden

Ein Standardverfahren zum Aufbringen metallischer Elektroden auf Piezokeramik stellt die Siebdrucktechnik dar. Zur Anwendung kommen verschiedene Silberpasten. Nach dem Siebdruck werden diese Pasten bei Temperaturen oberhalb 500°C eingebrannt, wobei die Elektrodenhaftung durch das Aufschmelzen der enthaltenen Glasfritte realisiert wird. Die typischen Elektrodendicken liegen um die 10 µm. Bei dünnen Keramikfolien ist der Einfluss der Glasfritte unbedingt zu berücksichtigen. Die Natur dieser Dickschichtelektroden führt hier im allgemeinen zu einer Abnahme der piezoelektrischen Werte.

Die Elektrodenhaftfestigkeit liegt um die 5 MPa.

Dünnschichtelektroden

Dünnschichtelektroden, hergestellt mittels moderner Sputtering-Verfahren sind eine Ergänzung zu den Standard-Dickschichtelektroden. Die typische Dicke der Metallisierung liegt im Bereich um 1 µm. Scherelemente, die im gepolten Zustand metallisiert werden, sind prinzipiell mit Dünnschichtelektroden hergestellt.

PI Ceramic verfügt über hochproduktive Sputteranlagen, die das Aufbringen von Elektroden aus Metalllegierungen, vorzugsweise CuNi Zusammensetzungen und Edelmetallen, wie Gold ermöglichen. Für die erreichbaren Haftfestigkeitswerte der Elektroden gelten ähnliche Werte wie bei Dickschichtelektroden.

Löthinweise für Anwender




Für das elektrische Kontaktieren piezokeramischer Bauelemente sind Lötprozesse die gebräuchlichsten Verfahren. Alle unsere Standardmetallisierungen sind mit der Anwendung von bleifreien Loten kompatibel. Wir empfehlen zum Beispiel die Verwendung eines Lotes in der Zusammensetzung Sn 95,5 Ag 3,8 Cu 0,7. Alle Lötkontakte sind punktuell auszuführen und die vorgegebene spezifische Löttemperatur und eine möglichst kurze Lötzeit unbedingt einzuhalten. Eine kurzzeitige, punktförmige Lötung bei Temperaturen oberhalb des Curiepunktes der PZT Keramik führt nicht zu signifikanten Depolarisationsverlusten in den piezoelektrischen Kennwerten.

Kennzeichnung der Polarität

Die zum Zeitpunkt der Polarisierung an positiven Potential liegende Elektrode ist entsprechend gekennzeichnet (markiert). Dies wird durch einen Punkt bzw Kreuz auf der Elektrodenfläche, oder auch durch eine (rötliche) Färbung der Elektroden selbst, definiert.

Standardtoleranzen

Parameter	Symbol	Toleranz
Länge / Breite	L / W	<15 mm: $\pm 0,15$ mm <20 mm: $\pm 0,20$ mm <40 mm: $\pm 0,25$ mm <80 mm: $\pm 0,30$ mm
Durchmesser, außen	OD	<15 mm: $\pm 0,15$ mm <20 mm: $\pm 0,20$ mm
Durchmesser, innen	ID	<40 mm: $\pm 0,25$ mm <80 mm: $\pm 0,30$ mm
Dicke	TH	<10 mm: $\pm 0,05$ mm <20 mm: $\pm 0,10$ mm <40 mm: $\pm 0,15$ mm <80 mm: $\pm 0,20$ mm
Abmessungen, wie gesintert (as fired):		$\pm 0,3$ mm oder 3%

Abweichung von der Ebenheit		< 0,02 mm , kleine Durchbiegung dünner Scheiben oder Platten bleibt unberücksichtigt !
Abweichung von der Parallelität		< 0,02 mm
Abweichung von der Konzentrität		< 0,2 mm
Frequenztoleranzen		$\pm 5\%$ bis 2 MHz $\pm 10\%$ ab 2 Mhz
Kapazitätstoleranzen		$\pm 20\%$

Prüfverfahren an PZT-Komponenten

Elektrische Prüfverfahren

Kleinsignalmessungen

Als Referenzmessgerät für die Messungen von piezoelektrischen und dielektrischen Kleinsignaldaten, wie Frequenzen, Impedanzen, Kopplungsfaktor, Kapazität und Verlustfaktor dient das Messgerät 4194A (Precision Impedance Analyzer) von der Firma Agilent Technologies (HP).

Großsignalmessungen

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

Geometrische und visuelle Prüfverfahren

Ganz allgemein werden zur Prüfung der Geometrie von Komponenten kalibrierte Messmittel mit angepasster Genauigkeit verwendet.

Für komplizierte Messungen und visuelle Prüfungen stehen moderne 3D-Messmikroskope zur Verfügung.

Visuelle Grenzwerte

Keramische Komponenten müssen visuellen Anforderungen entsprechen.

PI Ceramic hat in Anlehnung an die hierfür im MIL-STD-1376 getroffenen Regeln eigene Oberflächenkriterien zur Qualitätsbewertung für die verschiedensten Anwendungs-

fälle geschaffen und für besondere Anforderungen gestaffelte Sortierkategorien festgelegt. Die Oberflächenkriterien betreffen:

- Oberflächenbeschaffenheit der Elektrode
- Poren in der Keramik
- Kantenabsplittierungen

Werden keine besonderen Vereinbarungen getroffen, so gilt grundsätzlich, dass visuelle Auffälligkeiten keinen negativen Einfluss auf die Funktion des Bauelementes haben dürfen. Die internen Oberflächenkriterien beinhalten die Umsetzung dieses Prinzips für konkrete visuelle Grenzwerte. Die Aufnahme dieser Vorschriften in diesen Katalog würde die Möglichkeiten quantitativ überschreiten.

Qualitätsüberwachung, Qualitätsniveau

PI Ceramic arbeitet mit Qualitätsmanagementsystemen und ist nach ISO 9001-2000 zertifiziert.



Die Zertifizierung gibt unseren Kunden die Sicherheit für qualitätsgerechte Lieferungen bei hoher Produktionssicherheit. Die Qualität der Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte wird nach Qualitätsplänen kontrolliert. Über Qualitätsdokumentationen wird sicher-

Gestellt, dass nur freigegebene Teile, die den Qualitätsvorgaben entsprechen, zur Verarbeitung und Lieferung gelangen.

Qualitätsniveau

Alle Prüfungen der elektrischen, mechanischen und visuellen Eigenschaften werden von uns nach standardisierten Stichproben-Verfahren durchgeführt. Das Prüfniveau wird nach DIN ISO 2859 Teil 1 festgelegt.

Für das in diesem Katalog aufgeführte Lieferprogramm piezokeramischer Bauelemente kommen folgende AQL-Werte zur Anwendung.

Prüfung	AQL- Wert	Prüfniveau
elektrisch	1,0	I
geometrisch	1,5	I
visuell	2,5	I

Für kundenspezifische Produkte wird die gemeinsame Vereinbarung einer gesonderten Liefervorschrift angestrebt. Darin können auf Kundenwunsch auch das Beifügen von Kopien der jeweiligen Freigabeprotokolle, Messwertplots bestimmter Prüflinge oder in besonderen Fällen auch Einzelmesswerte der Prüflinge bzw. Stückprüfung vereinbart werden.

ANWENDUNGEN DER PZT-BAUELEMENTE

Speziell mit der Entwicklung und weiteren Modifikation der Bleizirkonat-Bleitanat Keramikmaterialien (PZT) und darauf basierender Komponenten setzte eine rasante Zunahme der Anwendungen ein, welche bis heute anhält.

Eine umfassende Darstellung aller Anwendungen ist nahezu unmöglich. Es sollen im Folgenden nur die Grundzüge typischer Applikationen dargestellt und an ausgewählten OEM-Produktlinien bei PI Ceramic illustriert werden.

Anwendungen aus Sicht des Piezoeffektes

Piezoelektrische Keramikbauelemente sind elektromechanische Wandlerkomponenten. Wie bereits in den vorstehenden Abschnitten des Kataloges erläutert, sind diese in der Lage

Mechanische Kräfte wie Druck, Dehnung oder Beschleunigung in eine elektrische Spannung bzw. Ladungen umzuwandeln (*Direkter Piezoeffekt*)

und

Eine elektrische Spannung in mechanische Bewegung oder Schwingungen umzuwandeln (*Inverser Piezoeffekt*)

Unter Nutzung dieser Effekte eröffnen sich die vielfältigsten Applikationsmöglichkeiten in allen Bereichen der Technik.

Neben der Umwandlung von elektrischen Spannungen in mechanische Bewegungen (piezoelektrische Aktoren) bzw. Schwingungen (Schall- und Ultraschallgeber) wird ebenso die Umwandlung von mechanischen Kräften und Beschleunigungen (Sensoren) oder akustischen Signalen (Schall- und Ultraschallempfänger) in elektrische Signale genutzt. Die Ultraschall-Signalverarbeitung, mit Nutzung sowohl des direkten als auch inversen Piezoeffektes, beruht auf der Auswertung von Laufzeiten, Reflexion und Phasenverschiebung, etc. von Ultraschallwellen. Die Einsatzmöglichkeiten liegen dabei in einem weiten Frequenzbereich (einige Hz bis einige MHz).

Wichtig für die Auswahl einer optimalen Lösung bei Anwendung unserer Piezobauelemente und Baugruppen in neuen Projekten ist ein frühzeitiger Kontakt zwischen den Entwicklungs- und Technologiebereichen der Kunden und dem potentiellen Hersteller und Lieferanten PI Ceramic. Mit unserer langjährigen Erfahrung bei der Konzeption, Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von kundenspezifischen Lösungen, begleiten wir Sie von der Idee bis zur fertigen Systemumsetzung.

Ausnutzung des Direkten Piezoeffektes	Ausnutzung des Inversen Piezoeffektes
Mechano - elektrisch	Elektro - mechanisch
<ul style="list-style-type: none"> - Sensoren für Beschleunigung - Zündelemente - Piezotastaturen - Generatoren (autarke Energiequellen) - passive Dämpfung - usw. 	Aktoren, z. B. Translatoren, Biegeelemente, Piezomotoren für zum Beispiel: <ul style="list-style-type: none"> - Micro- und Nanopositionierung - Laser-Tuning - aktive Schwingungsdämpfung - Mikropumpen - Pneumatikventile - usw.
Akusto - elektrisch	Elektro - akustisch
<ul style="list-style-type: none"> - Schall- und Ultraschall-Empfänger - Geräuschanalyse - Acoustic Emission Spectroscopy - usw. 	<ul style="list-style-type: none"> - Signalgeber (Buzzer) - Hochspannungsquellen / Transformator - Verzögerungsleitungen (delay lines) - Leistungsultraschall-Generatoren (Reinigungen, Schweißen, Aerosolherzeugung) - usw.

Ausnutzung beider Effekte

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

Anwendungen aus Sicht der Auswahl des Keramikmaterials

Wie bereits im Abschnitt "Piezokeramische Werkstoffe" dargestellt, unterscheidet man zwischen "weichen" und "harten" PZT-Keramiken. Die Unterschiede in den Parametern finden ihren Ausdruck auch in den entsprechenden Applikationen.

Wichtigste Einsatzgebiete der "weichen" piezoelektrischen Keramiken sind Aktoren für die Mikro- und Nanopositionierung, Sensoren und elektro-akustische Anwendungen (Schallgeber und -aufnehmer). Vorteile der „weichen“ PZT-Materialien liegen im großen Piezomodul, moderat hohen Permittivitäten und hohen Koppelfaktoren.

Piezokeramische Aktoren nutzen den Effekt der Deformation des Piezokristalls bei Anlegen eines elektrischen Feldes. Eine damit verbundene hohe Auflösung der Längenänderung und große mechanische Belastbarkeit machen diese Elemente prädestiniert für den Einsatz in Gebieten der Hochtechnologien (Halbleitersbereich, Optik und Telekommunikation, etc.), aber auch im zunehmenden Maße im Automobilbereich (Kraftstoff-Einspritzsysteme), für Mikropumpen, der pneumatischen Ventiltrichteknik und Schwingungsdämpfung.

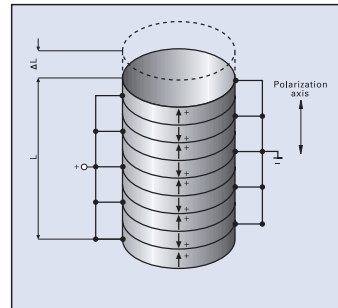
Sensoren nehmen einen weiteren breiten Raum in den Anwendungen ein. Neben den klassischen Schwingungsaufnehmern, wie z. B. zur Detektion von Unwuchten an rotierenden Maschinenteilen oder auch Crash-Detektoren im Automobilbereich, kommen Anwendungen in der Füllstands- und Durchflussmessung mittels Ultraschall, immer häufiger zum Einsatz. Dabei wird

z. B. die Laufzeit des reflektierten Echos einer Ultraschallwelle an der Medienoberfläche ausgewertet.

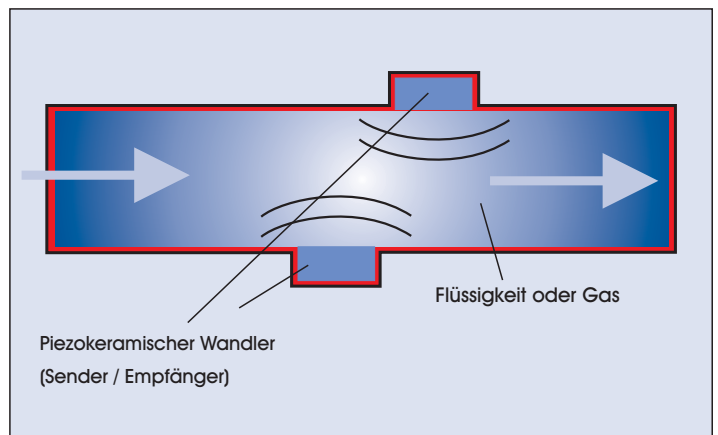
Durchflussmessungen basieren auf Laufzeitmessungen oder dem sog. Doppler-Prinzip (Phasendifferenz-Messung). Weitere typische Applikationen liegen in der Objektidentifikation bzw. -Überwachung (z. B. Parkflächen-Überwachungssensoren, Glasbruchdetektoren, etc.), Schallgeber (Buzzer) und Schallaufnehmer (Mikrofone), bis hin zum Einsatz als Tonabnehmer an Musikinstrumenten.

Wichtigste Anwendungen der „harten“ Piezokeramikmaterialien liegen auf den Gebieten der Generierung hoher Ultraschall-Leistungen. Die Vorteile dieser PZT-Materialien sind gekennzeichnet durch eine moderate Permittivität, große piezoelektrische Koppelfaktoren, hohe Güten und sehr gute Stabilität bei hohen mechanischen Belastungen und Betriebsfeldstärken. Niedrige dielektrische Verluste ermöglichen den Dauereinsatz im Resonanzbetrieb mit nur geringer Eigenerwärmung des Bauteiles.

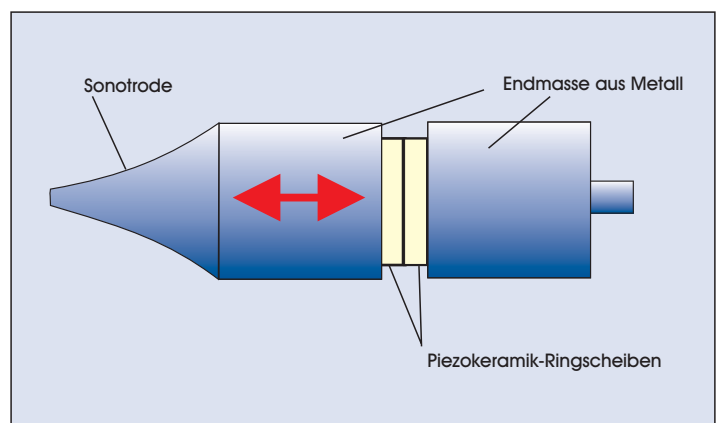
Praktische Beispiele der Anwendungen findet man in den Bereichen der Ultraschallreinigung (typischerweise kHz Bereich), der Materialbearbeitung (Ultraschallschweißen, -bilden, -bohren, usw.), Ultraschallprozessoren (z. B. zum Dispergieren flüssiger Medien), im medizinischen Bereich (Ultraschall-Zahnstein-Entfernung, chirurgische Instrumente, usw.) und auch der Sonartechnik. Die klassischen Piezo-Zünderelemente sind im täglichen Leben nicht mehr wegzudenken.



Piezokeramischer Stapelaktuator



Durchflussmessprinzip



Prinzipaufbau eines Verbundschwingers

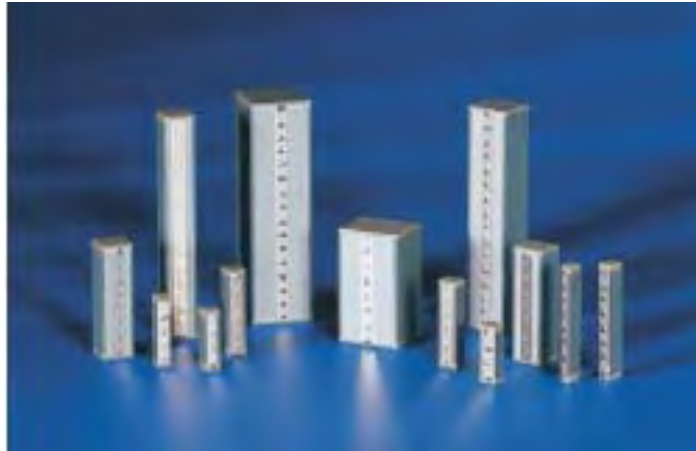
MEM-ANWENDUNGEN

Piezokeramische Aktoren

Piezokeramische Aktoren nutzen den Effekt der relativen Längenänderung (bis zu ca. 1,5 ‰) bei Anlegen eines elektrischen Feldes. Sie zeichnen sich im Besonderen durch hohe mechanische Belastbarkeiten (bis zu 100 MPa), extrem niedrige Leistungsaufnahme bzw. sehr gute Energiebilanz (praktisch stromlos im geschalteten Zustand), kürzeste Ansprechzeiten (im sub-msec Bereich), extrem hohe Auflösung der Bewegung (im sub-nm Bereich) und hohe Zuverlässigkeit (mehr als 10^8 Schaltzyklen) aus.

Damit sind diese Elemente prädestiniert für den Einsatz in Gebieten der Hochtechnologien (Halbleiterbereich, Optik und Telekommunikation, etc.), aber auch im zunehmenden Maße im Automobilbereich (Kraftstoff-Einspritzsysteme), für Mikropumpen, der pneumatischen Ventiltechnik und Schwingungsdämpfung.

(siehe auch spezieller Katalog "Piezo Ceramic Actuators & Custom Subassemblies" @ PI Ceramic, 2003)



Sortiment piezokeramischer Multilayeraktoren (PICMA-Serie)

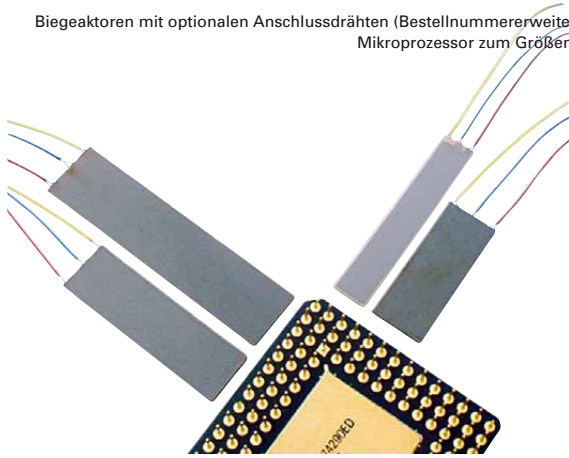


Sortiment piezokeramischer Stapelaktoren (Hochvolt-Ausführung)

PL112 · PL140 PICMA® Bender Biegeaktoren

Multilayer-Piezoelemente mit großem Hub und geringer Betriebsspannung

Biegeaktoren mit optionalen Anschlussdrähten (Bestellnummererweiterung .x1); Mikroprozessor zum Größenvergleich



- **Keramische Isolation**
- **Auslenkung bis 2 mm**
- **Kurze Ansprechzeit (10 msec)**
- **Nanometer-Auflösung**
- **Geringe Betriebsspannung**
- **Vakuumkompatible Versionen bis 10^{-9} hPa**
- **Optionale integrierte Positionssensoren**
- **Spezielle OEM- und Tischverstärker verfügbar**

PICMA® Bender Multilayer-Biegeaktoren (Biegewandler) bieten Stellwege bis 2 mm, Kräfte bis 2 N und Ansprechzeiten im Millisekundenbereich. Die monolithischen Aktoren werden aus 20 bis 50 µm dicken Piezokeramikschieben mit internen Silber-Palladium-Elektroden und keramischer Isolation im „Cofiring“ Verfahren hergestellt.

Durch eine Aufteilung des Elementes in zwei gegeneinander geschaltete Segmente gleicher Kapazität wird ein Verhalten wie bei klassischen Parallelbimorph-Biegeelementen erreicht.

Vorteile

PICMA® Bender Piezo-Biegeaktoren bieten verschiedene Vorteile gegenüber klassischen Bimorph-Elementen, die durch Verkleben von zwei Keramikplatten (0,1 mm bis 1 mm) hergestellt werden: schnellere Ansprechzeit und höhere Steifigkeit. Der Hauptvorteil liegt jedoch in der drastisch reduzierten Betriebsspannung von 60 V, durch die neue Anwendungen wie z. B. in der Medizintechnik bedient werden können.

Höhere Lebensdauer durch keramische Isolation

Durch die vollkeramische Isolation sind die PICMA® Aktoren hervorragend gegen Umwelteinflüsse geschützt und erreichen eine weit höhere Lebensdauer als konventionelle Piezoaktoren. Durch die hohe Resonanzfrequenz sind die Aktoren ideal für den hochdynamischen Betrieb mit kleinen Lasten geeignet; je nach Belastung wird eine externe Vorspannung für dynamische Anwendungen empfohlen. Die hohe Curietemperatur von 320 °C ermöglicht einen nutzbaren Temperaturbereich von bis zu 150 °C, weit jenseits der 80 °C Grenze, die für konventionelle Multilayeraktoren gilt. PICMA® Piezoaktoren arbeiten bei reduziertem Stellweg bis in den kryogenen Temperaturbereich.

Geregelte Version

Zum Positionieren im geschlossenen Regelkreis stehen die P-871 Versionen mit integrierten DMS-Sensoren zur Verfügung (s. S. 1-84).

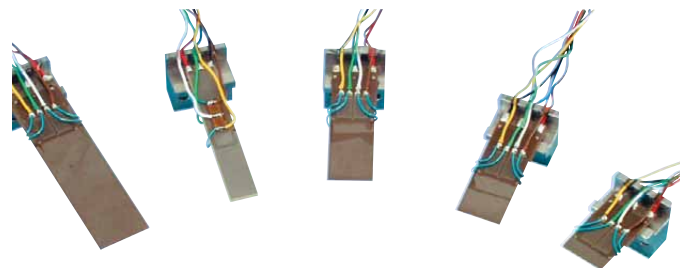
Elektronik

PI bietet eine große Auswahl an rauscharmen Verstärkern und Controllern für Piezoaktoren an (s. Kapitel „Piezoverstärker und Controller“) und entwickelt auch kundenspezifische Piezoelektroniken.

Speziell für den Betrieb von PICMA® Bender Biegeaktoren stehen die Piezoverstärker E-650.00 und E-650.OE zur Verfügung (s. S. 2-122).

Optimale UHV Kompatibilität – minimales Ausgasen

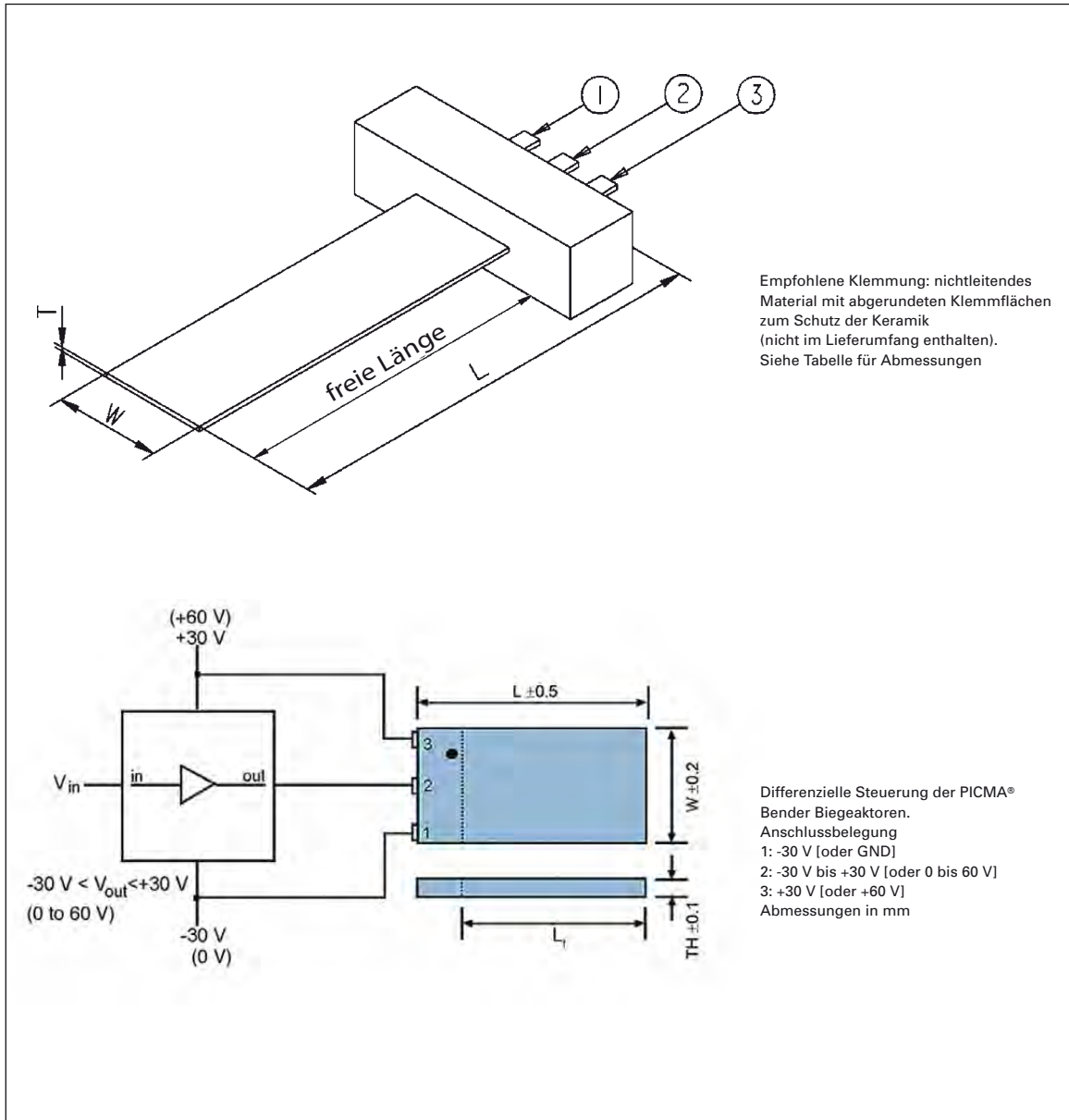
Das monolithische Design ohne Polymerisolation und die hohe Curietemperatur von 320 °C (Ausheizbarkeit bis 150 °C) stellen optimale Voraussetzungen für den Einsatz im Hochvakuum dar.



Die Biegeaktoren sind unter der Produktnummer P-871 mit aufgebrachtten DMS-Positionssensoren verfügbar

Anwendungsbeispiele

- **Wire-Bonder**
- **Pneumatische Ventile**
- **Faseroptische Schalter**
- **(Laser)-Strahlsteuerung**
- **Mikropositionierung**
- **Beschleunigungssensoren**



Technische Daten / Bestellnummern

Bestellnummer*	Betriebsspannung [V]	Auslenkung [μm] $\pm 20\%$	Freie Länge [mm]	Abmessungen L x W x T [mm]	Blockierkraft [N] $\pm 20\%$	EI. Kapazität [μF] $\pm 20\%$	Resonanzfrequenz [Hz] $\pm 20\%$
PL112.10**	0-60 (± 30)	± 80	12	17,8 x 9,6 x 0,65	$\pm 2,0$	2 x 1,1	>1000
PL122.10	0-60 (± 30)	± 250	22	25,0 x 9,6 x 0,65	$\pm 1,1$	2 x 2,4	660
PL127.10	0-60 (± 30)	± 450	27	31,0 x 9,6 x 0,65	$\pm 1,0$	2 x 3,4	380
PL128.10**	0-60 (± 30)	± 450	28	35,5 x 6,3 x 0,75	$\pm 0,5$	2 x 1,2	360
PL140.10	0-60 (± 30)	± 1000	40	45,0 x 11,0 x 0,60	$\pm 0,5$	2 x 4,0	160

*Optional mit Teflonlitze erhältlich; dazu die letzte Ziffer der Bestellnummer in 1 ändern (z. B. PL112.11)
Betriebstemperaturbereich: -20 °C bis +85 °C;

**bis +150 °C Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz

Alle Spezifikationen sind abhängig von den realen Einspannbedingungen und der aufgebrachtten mechanischen Last. Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

PT120 · PT140 PT-Tube Piezorohre

Piezokeramische Tubusaktoren mit geringen Toleranzen und vielen Optionen



Verschiedene Piezorohre

- Standard und Sondergrößen
- XYZ-Positionierung
- Sub-nm Auflösung
- Ideal für OEM-Anwendungen

Piezokeramische Rohre der PT-Serie sind monolithische Aktoren, die radial und axial kontrahieren, wenn eine Spannung zwischen der inneren und äußeren Elektrode angelegt wird. Je nach Ausführung können sie z. B. zum Mikrodosieren von Flüssigkeiten (Medizintechnik) oder, bei vierfach segmentierten Außenelektroden, als YXZ-Scanner in Rastersonden-Mikroskopen und zur Nanomanipulation eingesetzt werden.

Anwendungsbeispiele

- Mikropositionierung
- Scanning Mikroskopie (AFM, STM, etc.)
- Faserstrecke / Modulation
- Mikropumpen
- Mikromanipulation
- Ultraschallanwendungen

Präzision und Flexibilität

Die PT-Piezorohre werden mit engsten Toleranzen gefertigt (0,05 mm) und können mit kleinsten Durchmessern von nur 0,8 mm hergestellt werden. Alle Fertigungsprozesse bei PI sind auf maximale Flexibilität ausgerichtet, weshalb auch Sonderbauformen zu einem sehr attraktiven Preis angeboten werden können. Folgende Modifikationen sind möglich:

- Materialien
- Spannungsbereich / Auslenkung
- Abmessungen
- Toleranzen
- Applizierte Sensoren
- Temperaturbereiche

Kurze Lieferzeiten

Weil alle piezoelektrischen Materialien im Hause entwickelt werden, sind die Lieferzeiten auch für Sonderversionen kurz und die Qualität hervorragend.

Abmessungen

max. L: 50 mm
 max. AD: 80 mm
 min. Wanddicke: 0,30 mm

Elektroden

Standard: innen und außen eingebrannte Silberelektroden. Dünnschichtelektroden, z. B. CuNi oder Gold als Außenelektroden möglich.

Optionen

Einfach oder doppelt von innen nach außen umkontaktiert, Bänder um den Außendurchmesser oder axiale Segmentierung (vierfach segmentierte Außenelektroden).

Polarisierung

Innenelektrode positiv
 Piezorohre sind nicht für große Kräfte ausgelegt wie z. B. Ringaktoren (s. PICA™ Thru-Aktoren S. 1-90), aber durch die hohen Resonanzfrequenzen sind sie hervorragend für den hochdynamischen Betrieb mit kleinen Lasten geeignet.

Anwendungsbeispiele sind Mikrodosierung, Nanoliterpumpen, Scanning-Mikroskopie, Mikropositionierung, Tintenstrahldrucker, Sonar- und Ultraschallgeber.

Piezoelektronik und Verstärker

Hochauflösende Verstärker und Regelelektroniken in digi-

taler und analoger Technik finden Sie im Kapitel „Piezo-verstärker und Controller“.

Berechnungsformeln

Die axiale Kontraktion und radiale Auslenkung von Piezorohren kann wie folgt abgeschätzt werden:

(Gleichung 1)

$$\Delta L \approx d_{31} \cdot L \cdot \frac{U}{d}$$

mit:

d_{31} = Piezo-Modul (Auslenkung orthogonal zur Polarisationsrichtung) [m/V]

L = Länge des Piezorohrs [m]

U = Betriebsspannung [V]

d = Wanddicke [m]

(Gleichung 2)

$$\Delta d \approx d_{33} \cdot U$$

mit:

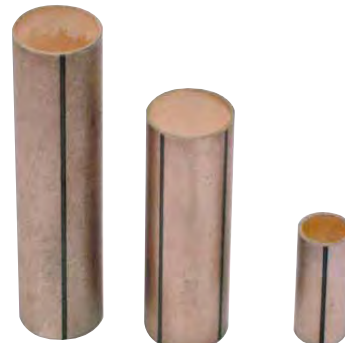
Δd = Änderung der Wanddicke [m]

d_{33} = Piezo-Modul (Feld und Auslenkung in Polarisationsrichtung) [m/V]

U = Betriebsspannung [V]

Typische Werte für d_{31} und d_{33} liegen bei -200 pm/V bzw. 500 pm/V.

Bei der radialen Kontraktion überlagern sich der Effekt der tangentialen Kontraktion und die Zunahme der Wanddicke. Sie kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:



XY Scanner-Rohre mit segmentierten äußeren Elektroden; siehe Tabelle für Spezifikationen

(Gleichung 3)

$$\frac{\Delta r}{r} \approx d_{31} \frac{U}{d}$$

mit:

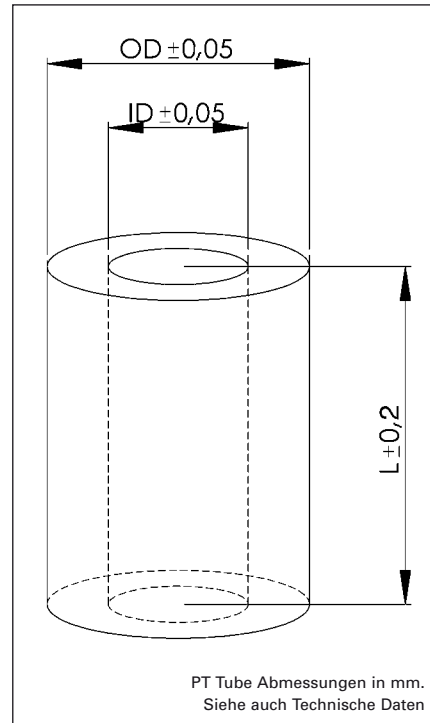
 r = Radius des Piezorohrs d_{31} = Piezo-Modul (Auslenkung orthogonal zur Polarisationsrichtung) [m/V] U = Betriebsspannung [V] d = Wanddicke [m]

Sind die Außenelektroden eines Piezorohrs in vier 90° Segmente aufgeteilt, führt die differenzielle Ansteuerung ($\pm U$) gegenüberliegender Elektroden durch Überlagerung radialer und axialer Kontraktion zur Biegung eines der Enden. Solche Röhre werden als XY-Scanner in Scanning-Probe Mikroskopen wie z. B. Rasterkraftmikroskopen eingesetzt. Der Scanbereich lässt sich wie folgt abschätzen:

(Gleichung 4)

$$\Delta x \approx \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot U}{\pi \cdot ID \cdot d}$$

mit:

 Δx = Scanbereich in X und Y (bei symmetrischen Elektroden) [m] d_{31} = Piezo-Modul (Auslenkung orthogonal zur Polarisationsrichtung) [m/V] U = Betriebsspannung [V] L = Länge [m] ID = Innendurchmesser [m] d = Wanddicke [m]**Technische Daten / Bestellnummern**

Bestellnummer	Abmessungen [mm] L x OD x ID**	Max. Betriebs- spannung [V]	Elektrische Kapazität [nF] ±20 %	Axiale Kontraktion [µm] bei max. V	Radiale Kontraktion [µm] bei max. Spannung	XY-Aus- lenkung [µm] bei ±200 V
PT120.00	20 x 2,2 x 1,0	500	3	5	0,7	-
PT130.00	30 x 3,2 x 2,2	500	10	9	0,9	-
PT130.90	30 x 3,2 x 2,2	500	12	9	0,9	-
PT130.94*	30 x 3,2 x 2,2	±200	4 x 2,4	9	0,9	±35
PT130.10	30 x 6,35 x 5,35	500	18	9	1,8	-
PT130.14*	30 x 6,35 x 5,35	±200	4 x 3,8	9	1,8	±16
PT130.20	30 x 10,0 x 9,0	500	36	9	3	-
PT130.24*	30 x 10,0 x 9,0	±200	4 x 8,5	9	3	±10
PT130.30	30 x 10,0 x 8,0	1000	18	9	3	-
PT130.40	30 x 20,0 x 18,0	1000	35	9	6	-
PT140.70	40 x 40,0 x 38,0	1000	70	15	12	-

*Vierfachsegmentierte Elektroden für XY-Auslenkung.

**OD (Außendurchmesser), ID (Innendurchmesser) ±0,05 mm. PT120 / PT130.00: ID ±0,1 mm

Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

P-882 · P-888 PICMA® Multilayer-Piezoaktoren

Keramisch isolierte Hochleistungsaktoren



PICMA® Piezoaktoren sind mit Querschnitten von 2 x 3, 3 x 3, 5 x 5, 7 x 7 und 10 x 10 mm² verfügbar

- Überlegene Lebensdauer auch unter extremen Bedingungen
- Sehr großer Betriebstemperaturbereich
- Unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit
- Hervorragende Temperaturstabilität
- Hohe Steifigkeit
- Spitzenströme bis 20 A
- UHV-Kompatibel bis 10⁻⁹ hPa
- Sub-ms Ansprechzeit / Sub-nm Auflösung
- Ideal für den dynamischen Betrieb

PICMA® (PI Ceramic Monolithic Multilayer Actuator) Piezoaktoren sind die weltweit ersten Multilayeraktoren mit

vollkeramischer Isolation. Sie zeichnen sich durch extrem hohe Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit selbst unter harten industriellen Einsatzbedingungen aus. Dieser technologische Durchbruch beruht auf jahrzehntelanger Erfahrung und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der Piezotechnik.

Neuer Fertigungsprozess, optimierte Piezokeramik

PICMA® Aktoren basieren auf einer speziellen PZT-Keramik und Fertigungstechnik, die Eigenschaften wie Steifigkeit, Kapazität, Auslenkung, Temperaturstabilität und Lebensdauer ideal kombiniert. Dadurch erreichen die Aktoren Positionsaufösungen im Sub-Nanometerbereich und Reaktionszeiten im Mikrosekundenbereich!

Anwendungsbeispiele

- Präzisionsmechanik / -fertigung
- Schnelle Schalter
- Aktive und adaptive Optik
- Aktive Schwingungsdämpfung
- Pneumatische und Hydraulische Ventile
- Metrologie / Interferometrie
- Life-Science, Biotechnologie
- Nanotechnologie

Höhere Lebensdauer durch keramische Isolation

Durch die vollkeramische Isolation sind die PICMA® Aktoren hervorragend gegen Umwelteinflüsse geschützt und erreichen eine weit höhere Lebensdauer als konventionelle Piezoaktoren. Durch die hohe Resonanzfrequenz sind die Aktoren ideal für den hochdynamischen Betrieb mit kleinen Lasten geeignet; je nach Belastung wird eine externe Vorspannung für dynamische Anwendungen empfohlen. Die hohe Curietemperatur von 320 °C ermöglicht einen nutzbaren Temperaturbereich von bis zu 150 °C, weit jenseits der 80 °C Grenze, die für konventionelle Multilayeraktoren gilt. PICMA® Piezoaktoren arbeiten bei reduziertem Stellweg bis in den kryogenen Temperaturbereich.

Optimale UHV Kompatibilität – minimales Ausgasen

Das monolithische Design ohne Polymerisolation und die hohe Curietemperatur von 320 °C (Ausheizbarkeit bis 150 °C) stellen optimale Voraussetzungen für den Einsatz im Hochvakuum dar.



PICMA® Aktor mit 100 mm Teflonlitzen und sphärischem Kopfstück zur Entkopplung von lateralen Kräften

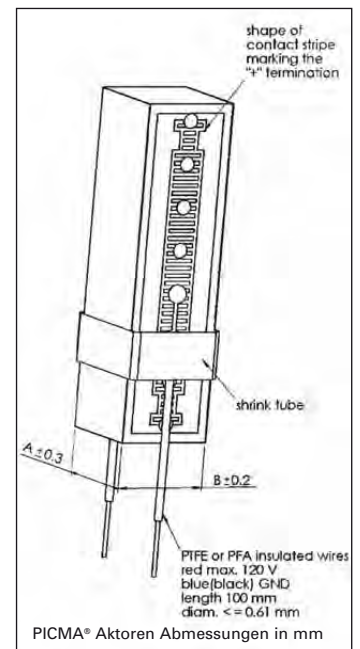
Ideal für den positionsgeregelten Betrieb

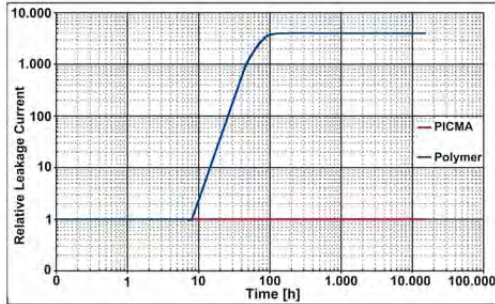
Die keramische Oberfläche der Aktoren ist hervorragend für das Aufbringen von Sensoren (DMS, LWL, etc.) geeignet. Durch den Wegfall der Polymerisolation können die Sensoren in besseren Kontakt zum Aktor gebracht werden und ermöglichen dadurch höhere Stabilität, Linearität und Messgenauigkeit.

Hinweis

Hochauflösende Verstärker und Regelelektroniken in digitaler und analoger Technik finden Sie im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“ (s. S. 2-99 ff).

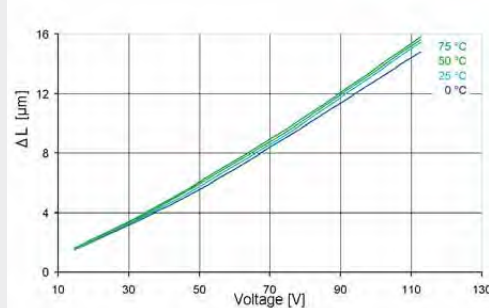
Siehe auch Seite 1-65 ff zur PICMA®-Lebensdauer.





PICMA® Piezoaktoren (untere Kurve) im Vergleich mit konventionellen Multilayer-Piezoaktoren (Polymerisolation). PICMA® Aktoren reagieren nicht auf die hohe Luftfeuchtigkeit im Test. Bei konventionellen Aktoren steigt der Leckstrom schon nach wenigen Stunden an, ein Hinweis auf eine Reduktion der Isolationsstärke und der zu erwartenden Lebensdauer.

Testbedingungen: U = 100 VDC, T = 25 °C, RH = 70 %



Die Auslenkung von PICMA® Piezokeramiken zeigt eine geringe Temperaturabhängigkeit. Dadurch und wegen der hohen Curie-Temperatur eignen sie sich ideal für dynamische Anwendungen

Index

Technische Daten / Bestellnummern

Bestellnummer*	Abmessungen A x B x L [mm]	Nominalstellweg [µm] ±20 % (0 – 100 V)	Max. Stellweg [µm] ±20 % (0 – 120 V)	Blockierkraft [N] (0 – 120 V)	Steifigkeit [N/µm]	Elektrische Kapazität [µF] ±20 %	Resonanzfrequenz [kHz] ±20 %
P-882.11	3 x 2 x 9	6,5 ±20 %	8 ±20 %	190	24	0,15	135
P-882.31	3 x 2 x 13,5	11 ±20 %	13 ±20 %	210	16	0,22	90
P-882.51	2 x 3 x 18	15 ±10 %	18 ±10 %	210	12	0,31	70
P-883.11	3 x 3 x 9	6,5 ±20 %	8 ±20 %	290	36	0,21	135
P-883.31	3 x 3 x 13,5	11 ±20 %	13 ±20 %	310	24	0,35	90
P-883.51	3 x 3 x 18	15 ±10 %	18 ±10 %	310	18	0,48	70
P-885.11	5 x 5 x 9	6,5 ±20 %	8 ±20 %	800	100	0,6	135
P-885.31	5 x 5 x 13,5	11 ±20 %	13 ±20 %	870	67	1,1	90
P-885.51	5 x 5 x 18	15 ±10 %	18 ±10 %	900	50	1,5	70
P-885.91	5 x 5 x 36	32 ±10 %	38 ±10 %	950	25	3,1	40
P-887.31	7 x 7 x 13,5	11 ±20 %	13 ±20 %	1700	130	2,2	90
P-887.51	7 x 7 x 18	15 ±10 %	18 ±10 %	1750	100	3,1	70
P-887.91	7 x 7 x 36	32 ±10 %	38 ±10 %	1850	50	6,4	40
P-888.31	10 x 10 x 13,5	11 ±20 %	13 ±20 %	3500	267	4,3	90
P-888.51	10 x 10 x 18	15 ±10 %	18 ±10 %	3600	200	6,0	70
P-888.91	10 x 10 x 36	32 ±10 %	38 ±10 %	3800	100	13,0	40

Piezokeramik Typ 252

Standardanschlüsse: 100 mm Anschlussdrähte

*Optional mit lötbaren Kontakten erhältlich; dazu die letzte Ziffer der Bestellnummer in 0 ändern (z. B. P-882.10).

Empfohlene Vorspannung für den dynamischen Betrieb: 15 MPa

Maximale Vorspannung für konstante Kraftausübung: 30 MPa

Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert

Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz

Betriebsspannungsbereich: -30 bis +130 V; die Lebensdauer ist von der angelegten Spannung abhängig.

Betriebstemperaturbereich: -40 bis +150 °C

Standardendstücke: Keramik

Mögliche Modifikationen: Applikation von DMS-Sensoren, spezielle Endstücke etc.

Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

P-010.xxH – P-025.xxH PICA™ Thru Ringaktoren

Hochbelastbare Stapel-Piezoaktoren mit Apertur



PICA™ Thru Piezoaktoren mit Apertur

- Freier Durchgang für Durchlicht-Anwendungen
- Sehr zuverlässig: >10⁹ Zyklen
- Große Querschnitte bis 56 mm
- Verschiedene Geometrien
- Sub-ms Ansprechzeit, Sub-nm Auflösung
- Vakuumkompatible und unmagnetische Versionen

PICA™ Thru Ringpiezoaktoren basieren auf den PICA™ Stack Stapeltranslatoren und kombinieren die hohe Belastbarkeit der Stapelbauweise mit dem freien Durchgang von Piezoroehren. Neben einer großen Anzahl von Standardausführungen können auch kundenspezifische Sonderversionen geliefert werden.

Ringaktoren sind besonders gut geeignet für die hochdynamische oder statische Feinpositionierung optischer Kom-

ponenten und für Präzisionsmechanik-Anwendungen. Die axiale Bohrung erleichtert Anwendungen im Strahlengang und reduziert außerdem den elektrischen Leistungsbedarf durch die geringere elektrische Kapazität.

Höchste Zuverlässigkeit bei großen Auslenkungen

PICA™ Piezoaktoren wurden speziell für den Dauerbetrieb mit höchsten Anforderungen entwickelt. Durch jahrzehntelange Erfahrung in der Piezoentwicklung ist es PI gelungen, Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und Lebensdauer ideal miteinander zu kombinieren. Dauertests mit PICA™ Aktoren haben gezeigt, dass auch nach mehreren Milliarden Zyklen keine Leistungseinbußen auftreten. Die Kombination aus relativ hoher Auslenkung und geringer elektrischer Kapazität ermöglicht hervorragende dynamische Eigenschaften bei

minimiertem elektrischen Leistungsbedarf.

Flexibilität / kurze Lieferzeiten

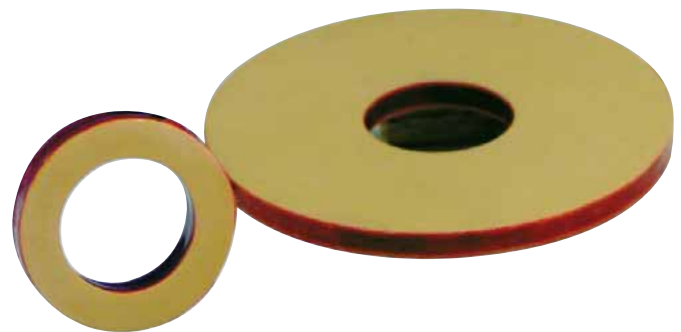
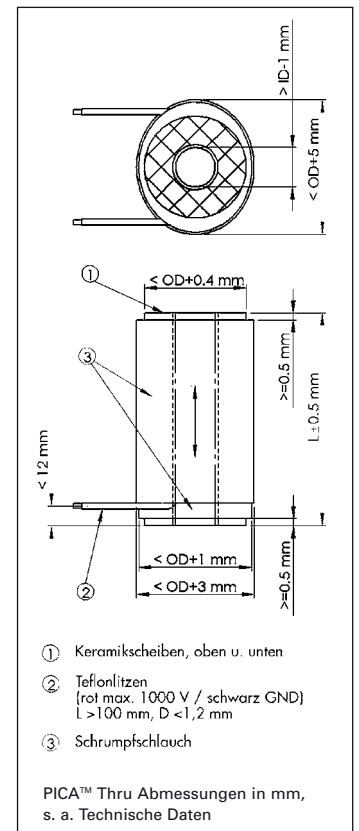
Alle Fertigungsprozesse bei PI sind auf Flexibilität und kurze Lieferzeiten ausgerichtet. Weil die piezoelektrischen Materialien im Hause entwickelt werden, können auch Sonderausführungen zu einem sehr attraktiven Preis und hervorragender Qualität angeboten werden. Folgende Modifikationen sind möglich:

- Materialien
- Spannungsbereich / Auslenkung, Lagendicke
- Abmessungen: rund, rechteckig, dreieckig, Apertur
- Belastbarkeit / Krafterzeugung
- Endstücke (flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.)
- verringerte Längentoleranzen
- integrierte piezoelektrische Sensorscheiben
- erweiterter Temperaturbereich
- vakuumkompatible und unmagnetische Versionen

Sowohl Standard- als auch Sonderaktoren der PICA™ Baureihen werden mit einem eigenen Testprotokoll ausgeliefert.

Piezoelektronik und Verstärker

Hochauflösende Verstärker und Regelelektroniken in digitaler und analoger Technik finden Sie im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“ (s. S. 2-99 ff).



PICA™ Thru Sonderausführungen

Anwendungsbeispiele

- Optik
- Bildstabilisierung
- Lasertuning
- Laserbehandlung
- Präzisionsmechanik / -fertigung
- Konfokale Mikroskopie
- Nanopositionierung



Der Standardaktor wird mit schwarzem Schrumpfschlauch ausgeliefert (hier P-010.20H)



Sonderversion eines PICA™ Thru Piezoaktors mit 56 mm Außendurchmesser, 8 mm Innendurchmesser und 250 µm Auslenkung. Kugelschreiber zum Größenvergleich

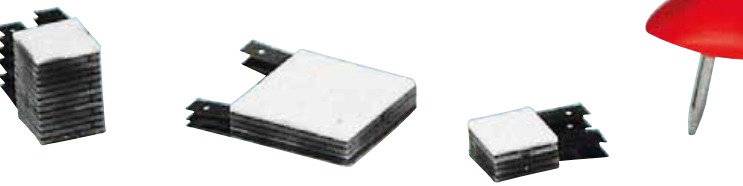
Technische Daten / Bestellnummern

Bestellnummern	Stellweg [µm] -10/+20 %	Durchmesser OD [mm]	Durchmesser ID [mm]	Länge L [mm] ±0,5	Blockierkraft [N]	Steifigkeit [N/µm]	Kapazität [nF] ±20 %	Resonanzfrequenz [kHz]
P-010.00H	5	10	5	7	1200	230	15	144
P-010.05H	10	10	5	12	1300	130	29	84
P-010.10H	15	10	5	15	1700	110	40	67
P-010.15H	20	10	5	21	1500	76	59	48
P-010.20H	30	10	5	27	1800	59	82	39
P-010.30H	40	10	5	40	1600	40	120	28
P-010.40H	60	10	5	54	1800	29	180	21
P-016.00H	5	16	8	7	2900	580	42	144
P-016.05H	10	16	8	12	3400	340	83	84
P-016.10H	15	16	8	15	4100	270	120	67
P-016.15H	20	16	8	21	3800	190	170	48
P-016.20H	30	16	8	27	4500	150	230	39
P-016.30H	40	16	8	40	4000	100	340	28
P-016.40H	60	16	8	52	4700	78	490	21
P-025.10H	15	25	16	16	7400	490	220	63
P-025.20H	30	25	16	27	8700	290	430	39
P-025.40H	60	25	16	51	9000	150	920	22
P-025.50H	80	25	16	66	9600	120	1200	17

Piezokeramik Typ PIC 151
Empfohlene Vorspannung für den dynamischen Betrieb: 15 MPa
Maximale Vorspannung für konstante Kraftausübung: 30 MPa
Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei.
Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert.
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz
Blockierkraft gemessen bei 1000 V
Betriebsspannungsbereich: 0 bis 1000 V
Betriebstemperaturbereich: -20 bis +85 °C
Standardendstücke: Keramik, je nach Modell 0,5 bis 2 mm dick
Standardanschlüsse: Zwei 100 mm lange Teflonlitzen
Mögliche Modifikationen: Integrierte Piezo-Kraftsensoren oder DMS-Sensoren; unmagnetisch; Vakuumausführung etc.
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

P-111 · P-151 PICA™ Shear Scheraktoren

Kompakte Mehrachssysteme basierend auf dem Piezo-Schereffekt



PICA™ Shear Scheraktoren sind mit Querschnitten von 3 x 3 mm bis 16 x 16 mm verfügbar, im Bild mit Sonderelektroden

- Kompakte Mehrachsen-Aktoren
- X-, XY-, XZ- und XYZ-Versionen
- Hohe Resonanzfrequenzen
- Sehr zuverlässig: >10⁹ Zyklen
- Pikometer-Auflösung / Sub-ms Ansprechzeit
- UHV Versionen bis 10⁻⁹ hPa
- Optionen: Unmagnetische Versionen, Apertur

PICA™ Shear Scherpiezoaktoren sind extrem kompakt und erlauben Sub-Nanometer Auflösung, schnellste Ansprechzeiten und hohe Stellkräfte. Ausführungen mit ein, zwei und drei Achsen für Stellwege bis zu 10 µm sind erhältlich. Sie eignen sich u.a. auch für Scananwendungen, z.B. in der Rastermikroskopie, oder als motorische Antriebe.

Hohe Steifigkeit und große Auslenkungen

PICA™ Shear Scherpiezoaktoren sind sehr steif in Bewegungsrichtung und senkrecht dazu. Sie basieren auf dem Scher-Piezoeffekt und ermöglichen etwa den doppelten Stellweg vergleichbarer Axialaktoren. Dadurch sind geringere Baugrößen und höhere Resonanzfrequenzen möglich.

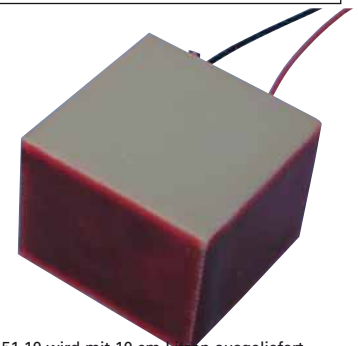
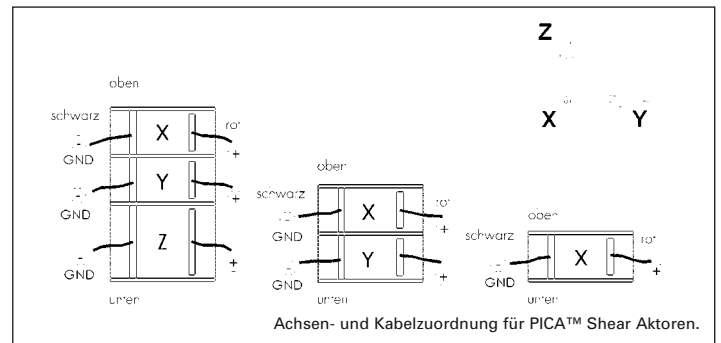
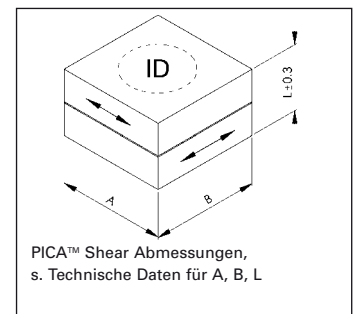
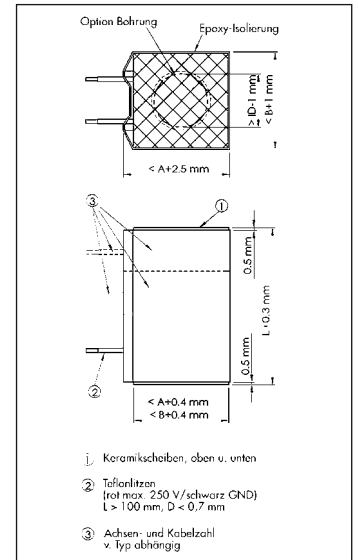
Hohe Zuverlässigkeit und Dynamik

PICA™ Shear Aktoren wurden speziell für den industriellen Dauerbetrieb mit höchsten Anforderungen an die Lebensdauer entwickelt. Dauertests mit PICA™ Shear Aktoren haben gezeigt, dass auch nach mehreren Milliarden Zyklen keine Leistungseinbußen auftreten. Die Kombination aus relativ hoher Auslenkung und geringer elektrischer Kapazität ermöglicht hervorragende dynamische Eigenschaften bei minimiertem elektrischem Leistungsbedarf.

Flexibilität / kurze Lieferzeiten

Alle Fertigungsprozesse bei PI sind auf Flexibilität und kurze Lieferzeiten ausgerichtet. Weil die piezoelektrischen Materialien im Hause entwickelt werden, können auch Sonderausführungen zu einem sehr attraktiven Preis und hervorragender Qualität angeboten werden. Folgende Modifikationen sind möglich:

- Materialien
- Spannungsbereich / Auslenkung, Lagendicke
- Apertur
- Belastbarkeit / Krafterzeugung
- Endstücke (flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.), optische Endflächenbehandlung
- verringerte Längentoleranzen
- integrierte piezoelektrische Scher-Sensorscheiben ohne pyroelektrischen Effekt
- für Tieftemperaturen bis 4 K
- vakuumkompatible und un-magnetische Versionen



Der Standardaktor P-151.10 wird mit 10 cm Litzen ausgeliefert

© Physik-Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2009. Änderungen vorbehalten. Dieses Datenblatt verliert seine Gültigkeit mit Erscheinen einer neuen Revision. Die jeweils aktuelle Revision ist unter www.pi.ws zum Herunterladen verfügbar. Cat120D Inspirationen2009/09/02.10

Anwendungsbeispiele

- Nanopositionierung
- Präzisionsmechanik / -Fertigung
- Aktive Schwingungsdämpfung
- Halbleiterfertigung / Testsysteme
- Lasertuning
- Rastermikroskopie
- Schaltanwendungen
- Scanning-Anwendungen
- Mikroschritt-Motoren
- Nanotechnologie

Sowohl Standard- als auch Sonderaktoren der PICA™ Bau-reihen werden mit einem eigenen Testprotokoll ausgeliefert.

Sie im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“.

Piezoelektronik und Verstärker

Hochauflösende Verstärker und Regelelektroniken in digitaler und analoger Technik finden

Technische Daten/Bestellnummern

Bestellnummern	Aktive Achsen	Stellweg [µm] -10/+20% bei -250 bis +250 V	Querschnitt A x B / ID [mm]	Länge L [mm] ±0,3	Max. Scherbelastung [N]	Axiale Steifigkeit [N/µm]	Kapazität [nF] ±20%	Resonanzfrequenz [kHz]
P-111.01	X	1*	3 x 3	3,5	20	70	0,5	330
P-111.03	X	3*	3 x 3	5,5	20	45	1,5	210
P-111.05	X	5	3 x 3	7,5	20	30	2,5	155
P-121.01	X	1*	5 x 5	3,5	50	190	1,4	330
P-121.03	X	3*	5 x 5	5,5	50	120	4,2	210
P-121.05	X	5	5 x 5	7,5	40	90	7	155
P-141.03	X	3*	10 x 10	5,5	200	490	17	210
P-141.05	X	5	10 x 10	7,5	200	360	28	155
P-141.10	X	10	10 x 10	12	200	230	50	100
P-151.03	X	3*	16 x 16	5,5	300	1300	43	210
P-151.05	X	5	16 x 16	7,5	300	920	71	155
P-151.10	X	10	16 x 16	12	300	580	130	100
P-112.01	XY	1 x 1*	3 x 3	5	20	50	0,5 / 0,5	230
P-112.03	XY	3 x 3*	3 x 3	9,5	10	25	1,5 / 1,5	120
P-122.01	XY	1 x 1*	5 x 5	5	50	140	1,4 / 1,4	230
P-122.03	XY	3 x 3*	5 x 5	9,5	40	70	4,2 / 4,2	120
P-122.05	XY	5 x 5	5 x 5	14	30	50	7 / 7	85
P-142.03	XY	3 x 3*	10 x 10	9,5	200	280	17 / 17	120
P-142.05	XY	5 x 5	10 x 10	14	100	190	28 / 28	85
P-142.10	XY	10 x 10	10 x 10	23	50	120	50 / 50	50
P-152.03	XY	3 x 3*	16 x 16	9,5	300	730	43 / 43	120
P-152.05	XY	5 x 5	16 x 16	14	300	490	71 / 71	85
P-152.10	XY	10 x 10	16 x 16	23	100	300	130 / 130	50
P-123.01	XYZ	1 x 1 x 1*	5 x 5	7,5	40	90	1,4 / 1,4 / 2,9	155
P-123.03	XYZ	3 x 3 x 3*	5 x 5	15,5	10	45	4,2 / 4,2 / 7,3	75
P-143.01	XYZ	1 x 1 x 1*	10 x 10	7,5	200	360	5,6 / 5,6 / 11	155
P-143.03	XYZ	3 x 3 x 3*	10 x 10	15,5	100	170	17 / 17 / 29	75
P-143.05	XYZ	5 x 5 x 5	10 x 10	23	50	120	28 / 28 / 47	50
P-153.03	XYZ	3 x 3 x 3*	16 x 16	15,5	300	450	43 / 43 / 73	75
P-153.05	XYZ	5 x 5 x 5	16 x 16	23	100	300	71 / 71 / 120	50
P-153.10	XYZ	10 x 10 x 10	16 x 16	40	60	170	130 / 130 / 230	30
P-153.10H	XYZ	10 x 10 x 10	16 x 16 / 10	40	20	120	89 / 89 / 160	30
P-151.03H	X	3*	16 x 16 / 10	5,5	200	870	30	210
P-151.05H	X	5	16 x 16 / 10	7,5	200	640	49	155
P-151.10H	X	10	16 x 16 / 10	12	200	400	89	100

Piezokeramik Typ 255

*Toleranzen ±30 %

Longitudinale Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert.

Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz

Betriebsspannungsbereich: -250 V bis +250 V

Betriebstemperaturbereich: -20 bis +85 °C

Standardendstücke: Keramik

Standardanschlüsse: 100 mm lange Teflonlitzen

Mögliche Modifikationen: integrierte Piezo-Kraftsensoren, Vakuum- und unmagnetische Ausführungen, Apertur etc.

Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

P-007 – P-056 PICA™ Stack

Piezoaktoren für hochdynamische Anwendungen



Verschiedene Standard- und Sonderausführungen von PICA-Stack Piezoaktoren

- Hohe Belastbarkeit bis 100 kN
- Hohe Krafterzeugung bis 80 kN
- Große Querschnitte bis 56 mm Durchmesser
- Verschiedene Geometrien
- Sehr zuverlässig: >10⁹ Zyklen
- Sub-ms Ansprechzeit, Sub-nm Auflösung
- Vakuumkompatible und unmagnetische Versionen

PICA™ Stack Piezoaktoren werden in einer großen Auswahl von Durchmessern und Bau-längen gefertigt und sind für fast jede Aktorikanwendung einsetzbar.

Höchste Zuverlässigkeit bei großen Auslenkungen

PICA™ Piezoaktoren wurden speziell für den Dauerbetrieb mit höchsten Anforderungen entwickelt. Durch jahrzehnte-

lange Erfahrung in der Piezo-entwicklung ist es PI gelungen, Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und Lebensdauer ideal miteinander zu kombinieren. Dauertests mit PICA™ Aktoren haben gezeigt, dass auch nach mehreren Milliarden Zyklen keine Leistungseinbußen auftreten. Die Kombination aus relativ hoher Auslenkung und geringer elektrischer Kapazität ermöglicht hervorragende dynamische Eigenschaften bei minimiertem elektrischen Leistungsbedarf.

Flexibilität / kurze Lieferzeiten

Alle Fertigungsprozesse bei PI sind auf Flexibilität und kurze Lieferzeiten ausgerichtet. Weil die piezoelektrischen Materialien im Hause entwickelt werden, können auch Sonderausführungen zu einem sehr attraktiven Preis und hervorragender Qualität angeboten werden. Folgende Modifikationen sind möglich:

- Materialien
- Spannungsbereich / Auslenkung, Lagendicke
- Abmessungen: rund, rechteckig, dreieckig, Apertur
- Belastbarkeit / Krafterzeugung
- Endstücke (flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.)
- verringerte Längentoleranzen
- integrierte piezoelektrische Sensorscheiben
- erweiterter Temperaturbereich
- vakuumkompatible und unmagnetische Versionen

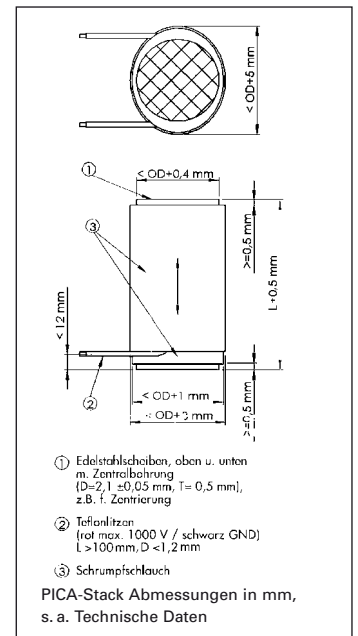
Sowohl Standard- als auch Sonderaktoren der PICA™ Bau-reihen werden mit einem eigenen Testprotokoll ausgeliefert.

Piezoelektronik und Verstärker

Hochauflösende Verstärker und Regelelektroniken in digitaler und analoger Technik finden Sie im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“ (s. S. 2-99 ff).



Sonderversion eines PICA-Stack Piezoaktors mit 350 µm Hub



Anwendungsbeispiele

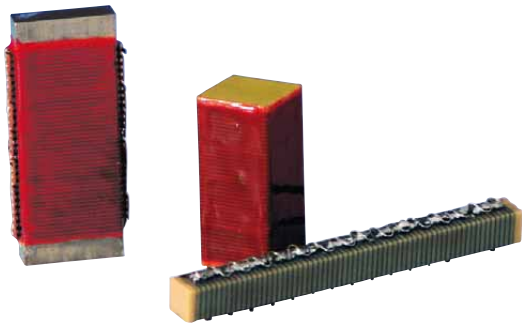
- Nanopositionierung
- Hochlast-Präzisionspositionierung
- Präzisionsmechanik / -Fertigung
- Halbleiterfertigung / Testsysteme
- Lasertuning
- Schaltanwendungen
- Aktive Strukturen (Adaptronik)



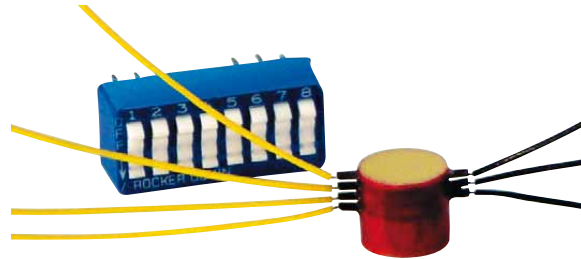
Die Standardversionen sind mit schwarzem Schrumpfschlauch versehen, hier P-025.40

PICA™ Stack Piezoaktoren sind mit Endstücken aus Metall versehen. Beachten Sie die Montagehinweise für Piezoaktoren (s. S. 1-67).

Vorgespannte Ausführungen mit Stahlgehäuse, (s.S. 1-78, 1-80).



PICA-Stack Sonderausführungen
mit rechteckigem Querschnitt



Sonderausführung eines PICA-Stack Piezoaktors,
jede Lage separat verdrahtet.
DIP-Schalter zum Größenvergleich

Technische Daten / Bestellnummern

Bestellnummer	Stellweg [μm] -10/+20%	Durchmesser D [mm]	Länge L [mm] $\pm 0,5$	Blockier- kraft [N]	Steifigkeit [N/ μm]	Kapazität [nF] $\pm 20\%$	Resonanz- frequenz [kHz]
P-007.00	5	7	8	650	130	11	126
P-007.10	15	7	17	850	59	33	59
P-007.20	30	7	29	1000	35	64	36
P-007.40	60	7	54	1150	19	130	20
P-010.00	5	10	8	1400	270	21	126
P-010.10	15	10	17	1800	120	64	59
P-010.20	30	10	30	2100	71	130	35
P-010.40	60	10	56	2200	38	260	20
P-010.80	120	10	107	2400	20	510	10
P-016.10	15	16	17	4600	320	180	59
P-016.20	30	16	29	5500	190	340	36
P-016.40	60	16	54	6000	100	680	20
P-016.80	120	16	101	6500	54	1300	11
P-016.90	180	16	150	6500	36	2000	7
P-025.10	15	25	18	11000	740	400	56
P-025.20	30	25	30	13000	440	820	35
P-025.40	60	25	53	15000	250	1700	21
P-025.80	120	25	101	16000	130	3400	11
P-025.90	180	25	149	16000	89	5100	7
P-025.150	250	25	204	16000	65	7100	5
P-025.200	300	25	244	16000	54	8500	5
P-035.10	15	35	20	20000	1300	700	51
P-035.20	30	35	32	24000	810	1600	33
P-035.40	60	35	57	28000	460	3300	19
P-035.80	120	35	104	30000	250	6700	11
P-035.90	180	35	153	31000	170	10000	7
P-045.20	30	45	33	39000	1300	2800	32
P-045.40	60	45	58	44000	740	5700	19
P-045.80	120	45	105	49000	410	11000	10
P-045.90	180	45	154	50000	280	17000	7
P-050.20	30	50	33	48000	1600	3400	32
P-050.40	60	50	58	55000	910	7000	19
P-050.80	120	50	105	60000	500	14000	10
P-050.90	180	50	154	61000	340	22000	7
P-056.20	30	56	33	60000	2000	4300	32
P-056.40	60	56	58	66000	1100	8900	19
P-056.80	120	56	105	76000	630	18000	10
P-056.90	180	56	154	78000	430	27000	7

Index

Piezokeramik Typ PIC 151
Empfohlene Vorspannung für
den dynamischen Betrieb:
15 MPa
Maximale Vorspannung für kon-
stante Kraftausübung: 30 MPa
Resonanzfrequenz gemessen bei
 $1 V_{pp}$, unbelastet, beidseitig frei.
Bei einseitiger Einspannung
halbiert sich der Wert
Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$,
1 kHz
Blockierkraft gemessen bei
1000 V
Betriebsspannungsbereich:
0 bis 1000 V
Betriebstemperaturbereich:
-20 bis +85 °C
Standardendstücke:
Stahlscheiben, je nach Modell
0,5 bis 2 mm dick
Standardanschlüsse: zwei
100 mm lange Teflonlitzen
Mögliche Modifikationen:
integrierte Piezo-Kraftsensoren
oder DMS-Sensoren, Vakuum
und unmagnetische
Ausführungen etc.
Sonderausführungen und ande-
re Spezifikationen auf Anfrage.

Piezelektrische Mikropumpen

Es gibt zur Zeit zwei Grundprinzipien im Aufbau von Mikropumpen bzw. -Dosiersystemen. Neben dem sog. drop-on-demand-Verfahren, das auch von Tintenstrahldruckern bekannt ist, setzen sich piezelektrische Membranpumpen immer mehr durch.

Piezelektrische Mikrodispenser (nach dem drop-on-demand-Verfahren) bestehen aus einer Kapillare, die zu einer Düse mit definiertem Durchmesser ausgezogen ist. Die Kapillare ist von einem piezokeramischen Rohr als Aktor umgeben, das bei Anlegen einer Spannung kontrahiert.

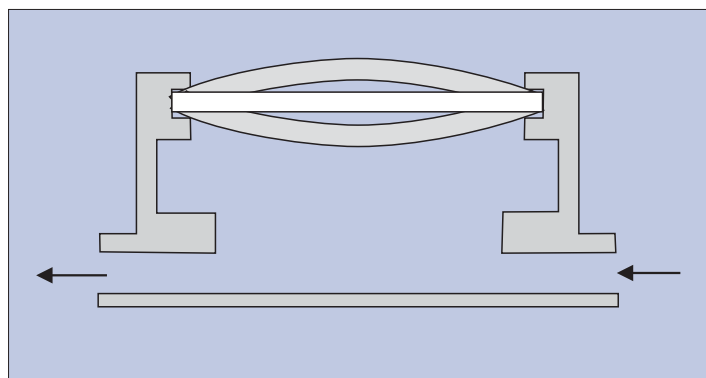
Dadurch wird in der Flüssigkeitssäule eine Druckwelle erzeugt, die sich bis zum Kapillarende fortpflanzt. Die Druckenergie wird in Bewegungsenergie transformiert. Einzeltropfen werden abge schnürt und auf eine Geschwindigkeit von einigen Metern pro Sekunde beschleunigt, so dass sie in eine beliebige Richtung abgegeben, einen Weg von einigen Zentimetern zurücklegen können. Das Volumen der emittierten Tropfen (Picoliter) hängt von den Eigenschaften

des zu fördernden Mediums, den Dimensionen der Kapillaren und den Ansteuerparametern des Piezo-Aktors ab.

Eine Mikromembranpumpe besteht aus einer Ventileinheit und aus der Pumpmembran, die zusammen mit dem piezelektrischen Aktor den Pumpenantrieb bildet. Das Prinzip beruht auf der Deformation eines mit der Membran verbundenen Piezoelementes (Scheibe, Platte, etc.). Bei Anlegen einer Spannung kommt es zu einer Verwölbung der Membran (Biegeeffekt).

Die Verbiegung der Membran (Metall oder auch Silizium) bewirkt damit eine Volumenänderung in der Pumpenkammer, so dass es, gesteuert durch das Ein- und Auslaßventil, zu einer Förderung des Mediums kommt.

Die Anwendungsbereiche für piezelektrische Pumpen liegen in der Medizintechnik, der Biotechnologie, der chemischen Analytik und der Verfahrenstechnik, wo häufig kleinste Mengen Flüssigkeit und Gase zuverlässig dosiert werden müssen. Auch Kraftstoff-Einspritzsysteme im Automobilbereich, angetrieben mit Multilayer Stapelaktoren sind Mikropumpen!



Skizze einer Membranpumpe

Aktive Schwingungsdämpfung

Die Dämpfung unerwünschter Schwingungen in mechanischen Strukturen mittels piezelektrischer Bauelemente erfolgt entweder nach aktiven oder nach passiven Wirkprinzipien. Diese zeichnen sich durch nachstehende Grundlagen aus.

Aktive Schwingungsdämpfung:

- Externe Spannungsquelle und Steuerungselektronik erforderlich
- Aufbringen von Gegenbewegungen im Regelkreis

Passive Schwingungsdämpfung:

- Energieumwandlung im Werkstoff selbst
- die durch Strukturschwingungen (mechanische Energie) in den Piezoelementen erzeugte elektrische Energie wird z. B. über parallelgeschaltete elektrische Widerstände in Wärme umgewandelt

Beim Prinzip der aktiven Schwingungsdämpfung wird eine mechanische Struktur, die unerwünschte schwach gedämpfte Eigenresonanzen aufweist, um spezielle Aktoren und Sensoren erweitert, die Elemente eines Regelkreises bilden. Der Regler wird so ausgewählt, dass der Aktor sich im Frequenzbereich der störenden Eigenformen wie ein viskoser Dämpfer verhält.

Integriert man, auch als adaptive Materialien bezeichnete, piezelektrische Elemente, z. B. Aktoren in Form von piezokeramischen Platten oder Scheiben in eine derartige Struktur, so kann diese mit Sensor- und Aktorfunktionen ausgestattet werden und sich bei geeigneter Steuerung oder Regelung den geforderten Bedingungen anpassen. Das Prinzip besteht darin, dass ein Piezokristall durch einen

Bedingungen anpassen.

Das Prinzip besteht darin, dass ein Piezokristall durch einen elektronischen Verstärker zum Schwingen angeregt wird und dabei in enger Kopplung mit der Masse der zu dämpfenden Konstruktion einen definierten zeitlichen Kraftverlauf erzeugt. Bei gegenphasiger Einleitung dieser Kraft bzw. Umkehrung des Anregeeffektes können in Zusammenhang mit einer geeigneten Regelung störende Vibrationen neutralisiert oder minimiert werden. Piezelektrische Aktoren, auch als mehrlagige Elemente (z. B. PICMA Multilayer Translatoren) können überall dort eingesetzt werden, wo genau dosierte Wechselkräfte auf Strukturen einwirken sollen.



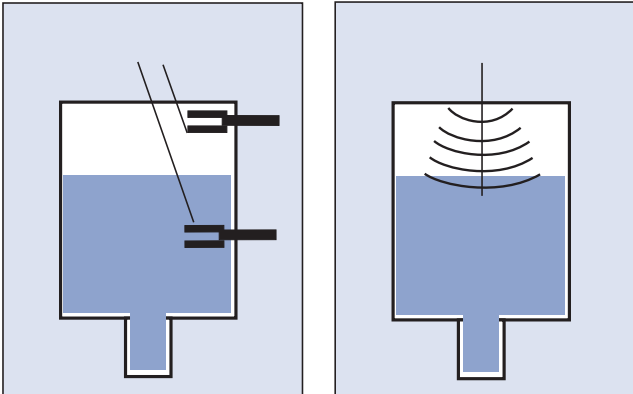
PICMA Aktor in CFK Struktur

Die Anwendungen liegen zur Zeit vor allem im Bereich Luft- und Raumfahrt (z. B. Ziel der Einsparung von Treibstoffen; Schwingungsdämpfung von Gitteraufbauten für Antennen, usw.), Fahrzeugbau (z. B. Geräuschminimierung), aber auch in zunehmenden Maße im Maschinenbau (rotierende Antriebe), etc.

Füllstandsmessung mittels Ultraschall

Es gibt zwei grundlegende Messprinzipien zur Füllstandsmessung. Zum einen sind es die sogenannten Stimmgabelsensoren bzw. Tauchschwinger. Diese werden fast ausschließlich als Niveauschalter eingesetzt. Dabei wird das in Eigenresonanz freischwingende System verstimmt (Resonanzverschiebung), wenn es mit dem zu messenden Medium in Kontakt steht. Der Vorteil dieser Lösung liegt in der Robustheit und einer gewissen Unabhängigkeit von der Art des Füllmediums.

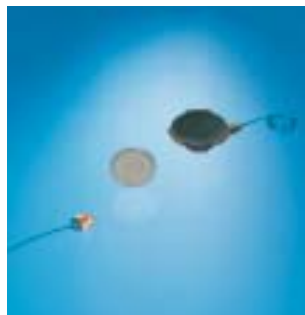
Das am meisten verbreitete andere Messprinzip beruht auf der Laufzeitmessung eines ausgesandten und vom Füllgut reflektierten Luftultraschallimpulses, d.h. berührungslos arbeitende in-situ-Messungen sind möglich. Ein Piezowandler arbeitet bei dieser Lösung sowohl als Sender als auch Empfänger. Nachteilig erweist sich, dass die Auflösung bzw. Genauigkeit der Bestimmung der Füllhöhe von der Wellenlänge in Verbindung mit dem Reflexionseigenschaften der Medienoberfläche abhängt.



Wirkprinzipien der Ultraschall-Füllstandsmessung



OEM-Produkte



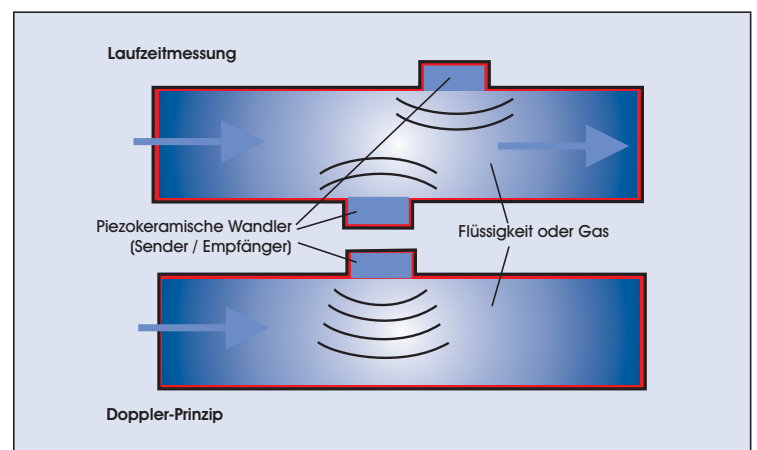
Durchflußmessung mittels Ultraschall

Die Laufzeitmessung und das sog. Doppler-Prinzip sind die zwei grundlegenden Messverfahren in der Ultraschall-Durchflussmessung. Die jeweilig verwendeten Piezoschwinger erzeugen Ultraschallwellen, die schräg zur Strömungsrichtung in die Flüssigkeit eingekoppelt werden.

Die Laufzeitmessung, mitunter auch, 'Mitführprinzip' genannt, basiert auf dem wechselseitigen Senden und Empfangen von Ultraschallimpulsen in und gegen die Strömungsrichtung. Dabei werden zwei Piezowandler, die sowohl als Sender als auch Empfänger arbeiten, in einer Schallstrecke schräg zur Strömungsrichtung angeordnet. Die Mitführung des Wellenpaketes im strömenden Medium (flüssig oder gasförmig) bewirkt eine Überlagerung von Schallausbreitungsgeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit.

Die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt sich proportional zum Kehrwert der Laufzeitdifferenz mit und gegen die Strömung.

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 Piezo-Wandler empfangener (reflektierter) Wellenfront ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit ($\Delta f \sim v$).



Prinzipien der Ultraschall-Durchflussmessung

Sonartechnik und Hydroakustik

Systeme der Sonartechnik (engl.: *sonar = sound navigation and ranging*) und Hydroakustik werden für Mess- und Ortungsaufgaben speziell im maritimen Bereich eingesetzt. Die lange Zeit vorwiegend militärisch vorangetriebene Entwicklung hochauflösender Sonarsysteme (siehe auch Historie der Piezoentwicklung) wird im zunehmenden Maße durch zivile Anwendungen, auch im Freizeitbereich, ergänzt.

Neben den immer noch aktuellen Unterseeboot-Ortungssonaren werden Systeme zum Beispiel für die Ortung von Fischschwärmen, für die Untergrundrelief-Vermessung in Flachgewässern, Unterwasserkommunikation, etc. eingesetzt.

Die Palette der verwendeten 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.



OEM-Produkte für die Hydroakustik

Ultraschallanwendungen in der Medizintechnik

Der inverse Piezoeffekt, d.h. die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Schwingungen, wird für eine Vielzahl von Anwendungen im Life Science Bereich genutzt. Neben den bekannten Systemen zur medizinischen Diagnostik, Zahnsteinentfernung, Skalpelle in der Augenchirurgie oder auch Aerosolerzeugung, gewinnen ultraschallbasierte Systeme zur Detektion von Luftblasen immer mehr an Bedeutung.

Aerosolerzeugung

Ultraschall ermöglicht die Verneblung von Flüssigkeiten ohne Erhöhung des Druckes oder der Temperatur, was speziell für empfindliche Substanzen z. B. Medikamente, von entscheidender Bedeutung ist. Zwei Verfahren werden zur Zeit angewendet. Wie analog in der hochfrequenten Ultraschallreinigung (MHz Bereich) eingesetzt, erzeugt eine am Boden des Flüssigkeitsgefäßes befestigte und in Resonanz schwingende PZT-Scheibe Ultraschallwellen großer Intensität im zu vernebelnden Medium. Die sich an der Flüssigkeitsoberfläche bildenden Kapillarwellen ermöglichen das Ablösen kleinster Tröpfchen.

Bei der sogenannten Direktverneblung steht das hochfrequent schwingende (1 bis 3 MHz) Piezoelement im Direktkontakt mit der Flüssigkeit. Dafür werden für aggressive Substanzen spezielle Oberflächenveredlungen eingesetzt. Die sich ausbreitenden Ultraschallwellen im Medium erreichen ihre maximale Intensität in einer bestimmten Höhe der

Flüssigkeit, bei welcher ein "Abriss" der Flüssigkeitströpfchen erfolgt. In beiden Verfahren wird der Durchmesser der Aerosoltröpfchen von der Frequenz der Ultraschallwellen bestimmt. Je höher die Frequenz ist, desto kleiner sind die Tröpfchen.

Zahnsteinentfernung

Die in Vergangenheit oft schmerzhaft entfernung von mineralischen Belägen an menschlichen Zähnen wird heute mittels ultraschallgetriebener Werkzeuge gründlich erledigt. Dafür werden piezokeramische Verbundsysteme, bestehend aus miteinander verspannten Ringscheiben, eingesetzt. Analog den Ultraschall-Materialbearbeitungssystemen (siehe Seite 37) werden Schwingungsamplituden im μm -Bereich bei Arbeitsfrequenzen um die 40 kHz über eine Sonotrode in Form eines zahnmedizinischen Werkzeuges übertragen. Das Verfahren zur Zahnstein-Entfernung gehört damit zum Gebiet der medizinischen Ultraschall-Therapien.



OEM-Produkte für die Medizintechnik

Ultraschalltherapie

So wird ein Therapieverfahren bezeichnet, bei dem mittels Ultraschallwellen das Gewebe bestrahlt wird, als eine Art von Mikromassage. Bei der Ultraschallanwendung pflanzt sich die Auslenkung der schwingenden Teilchen in Flüssigkeiten und weichem Gewebe in einer Längswelle fort. Mechanische Längswellen erzeugen zum einen mechanische Vibrationen im Gewebe, zum anderen wird ein Teil der Ultraschallenergie in Wärme umgewandelt. Das Herzstück des Therapiesystems ist der sog. Schallkopf, bestehend aus der mit einer metallischen Schallübertragungsmembran verbundenen Piezokeramikscheibe. Typische Arbeitsfrequenzen liegen im Bereich 0,8 (größere Eindringtiefe) 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 . Damit Schall überhaupt auf das Gewebe übertragen werden kann, ist eine spezielle Ankoppelsubstanz notwendig. Der Schall würde sonst am Schallkopf-Luft-Übergang zu 100 % reflektiert werden (Die akustische Impedanz von z. B. Aluminium ist 34600 mal größer als die von Luft!).

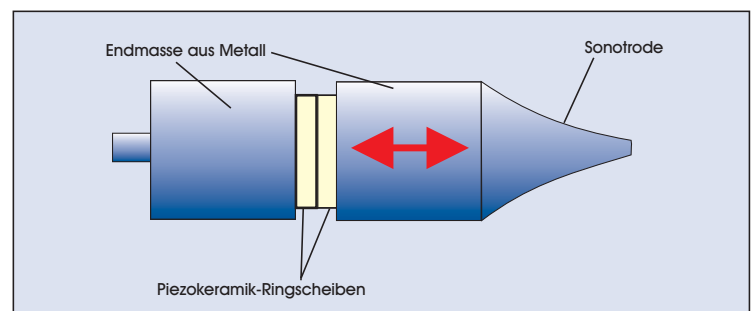
Neben der Therapie von Knochen- und Gewebeproblemen gewinnt die Ultrasonophorese, d.h. das Einbringen von Medikamenten unter die Haut, insbesondere auch im kosmetischen Bereich, immer mehr an Bedeutung. Dabei dienen Salben bzw. Medikamenten-Gels gleichzeitig als Ankoppelschicht.

Leistungsschall in der Materialbearbeitung

Ultraschall-Fügeverfahren, wie z. B. Drahtbinder in der Halbleiterindustrie und Ultraschallschweißsysteme basieren auf dem Effekt des Fügens unterschiedlicher Materialien durch Verschmelzung im Bereich der Fügestelle. Die Verschmelzung wird durch Reibungswärme erzielt. In einem analogen Aufbau zum Zahnsteinentferner wird die, über mechanisch verspannte Piezo-Ringscheiben generierte, Ultraschallenergie über eine

spezielle Sonotrode verstärkt und der Fügestelle zugeführt.

Neben den Schweißprozessen gewinnt die Ultraschall-Materialbearbeitung harter mineralischer oder kristalliner Werkstoffe, speziell durch Bohren oder spanabhebende Verfahren, immer mehr an Bedeutung. Die speziell geformten Sonotroden dienen dabei als Bearbeitungswerkzeug.



LITERATUREMPFEHLUNGEN

Für das bessere Verständnis der festkörperphysikalischen Zusammenhänge piezoelektrischer Materialien, die Grundlage der mathematischen Beschreibung der piezoelektrischen Effekte und die Anwendungen von piezoelektrischen Bauelementen verweisen wir auf folgende Publikationen:

B. Jaffe, W. Cook und H. Jaffe.

Piezoelectric Ceramics

Copyright © 1971 by Academic

Press Limited

N. Setter

Piezoelectric Materials in Devices

Veröffentlicht von N. Setter, EPFL-CH © 05/2002

H.-J. Martin

Die Ferroelektrika

Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig Leipzig © 1964

A. Bauer, D. Bühling, H.-J. Geesemann

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 elektromechanischer Festkörperaktoren

Ilmenau, ISLE-Verlag, 2003

Diverse Standards

Europäische Norm EN 50324

IEC 60483 und IEC 60302

DOD-STD-1376(A)

ROHS 2002/95/EG

Darüber hinaus stellen wir eine umfangreiche Sammlung eigener Veröffentlichungen, Applikationsbeispiele und -beschreibungen, etc. auf Anfrage gern zur Verfügung.

Hauptsitze

DEUTSCHLAND

PI Ceramic GmbH

Lindenstr.
07589 Lederhose
Tel: +49 (36604) 882-0
Fax: +49 (36604) 882-25
info@piceramic.de
www.piceramic.de

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

Auf der Römerstr. 1
76228 Karlsruhe
Tel: +49 (721) 4846-0
Fax: +49 (721) 4846-100
info@pi.ws · www.pi.ws

Niederlassungen

USA (Ost) & KANADA

PI (Physik Instrumente) L.P.

16 Albert St.
Auburn, MA 01501
Tel: +1 (508) 832 3456
Fax: +1 (508) 832 0506
info@pi-usa.us
www.pi-usa.us

USA (West) & MEXIKO

PI (Physik Instrumente) L.P.

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

JAPAN

PI Japan Co., Ltd.

Akebono-cho 2-38-5
Tachikawa-shi
Tokyo 190
Tel: +81 (42) 526 7300
Fax: +81 (42) 526 7301
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
Tel: +81 (6) 6304 5605
Fax: +81 (6) 6304 5606
info@pi-japan.jp
www.pi-japan.jp

CHINA

Physik Instrumente (PI Shanghai) Co., Ltd.

Building No. 7-301
Longdong Avenue 3000
201203 Shanghai, China
Tel: +86 (21) 687 900 08
Fax: +86 (21) 687 900 98
info@pi-china.cn
www.pi-china.cn

UK & 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
uk@pi.ws
www.physikinstrumente.co.uk

FRANKREICH

PI France S.A.S.

32 rue Delizy
93694 Pantin Cedex
Tel: +33 (1) 57 14 07 10
Fax: +33 (1) 41 71 18 98
info@pifrance.fr
www.pifrance.fr

ITALIEN

Physik Instrumente (PI) S.r.l.

Via G. Marconi, 28
20091 Bresso (MI)
Tel: +39 (02) 665 011 01
Fax: +39 (02) 873 859 16
info@pionline.it
www.pionline.it

„Lang anhaltende Geschäftsbeziehungen,
Zuverlässigkeit, offene und freundliche
Kommunikation mit Kunden
und Lieferanten sind das Wichtigste für
PI Ceramic und alle Mitarbeiter
der weltweit tätigen PI-Gruppe und sind
wichtiger als jeder kurzzeitige Erfolg.“

Dr. Karl Spanner, Geschäftsführer