



Piezoelektrische Aktoren

BAUELEMENTE, TECHNOLOGIE, ANSTEUERUNG

Inhalt

| | |
|---|----|
| PI Ceramic – Führend in Piezotechnologie | 3 |
| Piezoaktoren | |
| PICMA® Stack Multilayer-Piezoaktoren P-882 – P-888 | 6 |
| Kundenspezifische Ausführungen | 8 |
| Gekapselte PICMA® Stack Piezoaktoren P-885 • P-888 | 9 |
| PICMA® Chip Miniatur Multilayer-Piezoaktoren PL0xx • PD0xx | 10 |
| PICMA® Bender Biegeaktoren PL112 – PL140 • PD410 | 11 |
| Kundenspezifische Ausführungen | 13 |
| DuraAct Flächenwandler P-876 | 14 |
| PT-Tube Piezorohre PT120 – PT140 | 16 |
| PICA Stack Piezoaktoren P-007 – P-056 | 18 |
| PICA Power Piezoaktoren P-010.xxP – P-056.xxP | 20 |
| PICA Thru Ringaktoren P-00.xxH – P-025.xxH | 22 |
| PICA Shear Scheraktoren P-111 – P-151 | 24 |
| Picoactuator® P-405 | 26 |
| Integrierte Baugruppen | 27 |
| Piezoverstärker für die Ansteuerung von Piezoaktoren | |
| Produktübersicht | 28 |
| Technische Daten der Piezoverstärker | 32 |
| Piezotechnologie | |
| Inhaltsübersicht | 34 |
| Grundlagen der Piezoelektrizität | 35 |
| Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren | 45 |
| Verstärkertechnik: Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren | 61 |
| Handhabungshinweise | 64 |
| Physik Instrumente (PI): Weltbewegende Antriebe | |
| Präzisionspositionierung für Industrie und Forschung | 66 |
| Produktübersicht PI | 68 |

Impressum

PI Ceramic GmbH, Lindenstrasse, 07589 Lederhose
Registration: HRB 203.582, Amtsgericht Jena
USt-IdNr.: DE 155932487
Geschäftsführung: Albrecht Otto, Dr. Peter Schittenhelm, Dr. Karl Spanner
Tel. +49 36604 / 882-0, Fax +49-36604-882-4109
info@piceramic.de, www.piceramic.de

Die folgenden aufgeführten Firmennamen oder Marken sind eingetragene Warenzeichen der Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG:
PI®, PIC®, PICMA®, PLine®, PIFOC®, PiezoWalk®, NEXACT®, NEXLINE®, Plnano®, NanoCube®, Picoactuator®, Nanoautomation®

Die folgenden aufgeführten Firmennamen oder Marken sind eingetragene Warenzeichen Ihrer Inhaber:
µManager, LabVIEW, Leica, Linux, MATLAB, MetaMorph, Microsoft, National Instruments, Nikon, Olympus, Windows, Zeiss

PI Ceramic

FÜHREND IN PIEZOTECHNOLOGIE

PI Ceramic, kurz PIC, ist eines der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte. PIC bietet alles von piezokeramischen Bauelementen bis hin zu Systemlösungen für Forschung und Industrie in allen High-Tech Märkten, wie z.B. der Medizintechnik, dem Maschinen- und Automobilbau, oder der Halbleitertechnik.

Kundenspezifische Entwicklungen

Die besondere Ausrichtung von PI Ceramic macht es möglich, in kürzester Zeit auf Kundenwünsche zu reagieren.

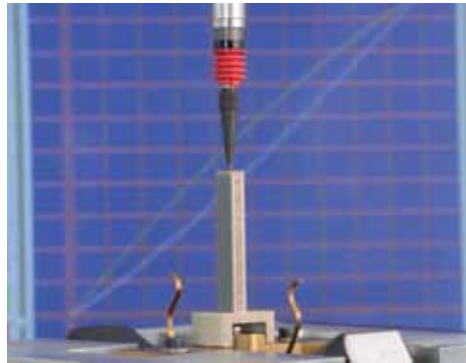
PIC hat sich dabei auf Stückzahlen von einigen 100 bis zu mehreren 100.000 spezialisiert. Unsere Entwicklungs- und Beratungsingenieure verfügen über einen enormen Erfahrungsreichtum bezüglich der Anwendung von Piezoaktorik und Sensorik und arbeiten schon im Vorfeld eines Projektes sehr eng mit den Entwicklern unserer Kunden zusammen. Dadurch ermöglichen sie ihnen, erfolgreichere Produkte schneller auf den Markt zu bringen.

Materialforschung und Entwicklung

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

Flexible Fertigung

Zusätzlich zum breiten Spektrum an Standardprodukten nimmt die schnellstmögliche



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

Zertifizierte Qualität

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

Kernkompetenzen von PI Ceramic

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



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



Zuverlässigkeit und Kundennähe

UNSER LEITBILD



PI Ceramic bietet

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

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

Beratung durch die Piezo-Spezialisten

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

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

After-Sales Service

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

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

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

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

Erfahrung und Know-how

FERTIGUNGSTECHNOLOGIE AUF NEUESTEM STAND

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

Rapid Prototyping

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

Präzisions-Bearbeitungstechnologie

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

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

Automatisierte Serienfertigung – Vorsprung für OEM Kunden

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



Automatisierte Abläufe optimieren den Durchsatz



PICMA® Stack Multilayer-Piezoaktoren

KERAMISCH ISOLIERTE HOCHLEISTUNGSAKTOREN



P-882 – P-888

- Überlegene Lebensdauer
- Hohe Steifigkeit
- UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa
- μ s-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Patentierte PICMA® Stack Multilayer-Piezoaktoren mit hoher Zuverlässigkeit

Betriebsspannung -20 bis 120 V. Keramische Isolierung, polymerfrei. Unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit. UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa, kein Ausgasen, hohe Ausheiztemperatur. Gekapselte Varianten für Betrieb in Spritzwasser oder Öl

Sonderausführungen mit geänderten Spezifikationen

- Für hohe Betriebstemperatur bis 200 °C
- Sonderelektroden für Ströme bis zu 20 A
- Variable Geometrie: Innenbohrung, rund, rechteckig
- Keramische oder metallische Endstücke in vielen Varianten
- Applizierte DMS-Sensoren für Positionsstabilität

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Kryogene Umgebung bei reduzierter Auslenkung. Für schnelle Schalter, Präzisionspositionierung, aktive und adaptive Systeme

Geeignete Verstärker

E-610 Piezoverstärker / Servocontroller
E-617 Hochleistungs-Piezoverstärker
E-831 OEM-Piezoverstärkermodul

Geltende Patente

Deutsches Patent Nr. 10021919C2
Deutsches Patent Nr. 10234787C1
Deutsches Patent Nr. 10348836B3
Deutsches Patent Nr. 102005015405B3
Deutsches Patent Nr. 102007011652B4
US-Patent Nr. 7,449,077
Japan-Patent Nr. 4667863
China-Patent Nr. ZL03813218.4

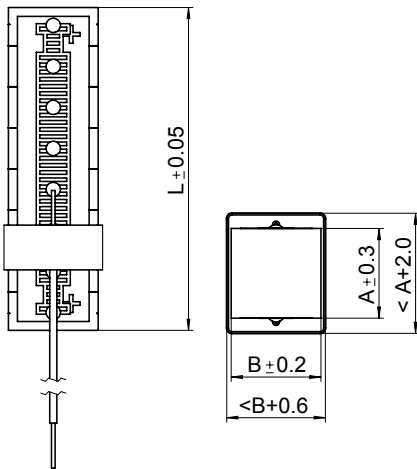
| Bestellnummern* | Abmessungen A x B x L [mm] | Nominalstellweg [μm] (0 – 100 V) | Max. Stellweg [μm] (0 – 120 V) | Blockierkraft [N] (0 – 120 V) | Steifigkeit [N/μm] | Elektrische Kapazität [μF] ±20 % | Resonanzfrequenz [kHz] ±20 % |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 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 | 3 x 2 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 |

* Optional mit lötbaren Kontakten erhältlich; dazu die letzte Ziffer der Bestellnummer in 0 ändern (z. B. P-882.10)
Piezokeramik PIC 252
Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-isolierte Anschlusslitzen, P-882, P-883:

AWG 32 (Ø 0,49 mm); P-885, P-887, P-888:
AWG 30 (Ø 0,61 mm)
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, RT
Betriebsspannungsbereich: -20 bis +120 V

Betriebstemperaturbereich: -40 bis +150 °C
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



PICMA® Stack Aktoren, L, A, B siehe Tabelle

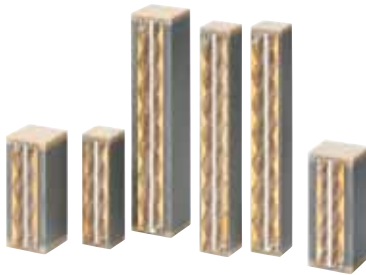
Kundenspezifische Ausführungen

PICMA® STACK PIEZOAKTOREN



Verschiedene Kopfstücke

Sphärische Endstücke. PI Ceramic hält passende Kopfstücke in Standardabmessungen vor und montiert sie vor Auslieferung. Applikationsspezifische Endstücke sind auf Anfrage fertigbar.



PICMA® Aktoren für höchste Dynamik

Für hochdynamische Anwendungen sind die Multilayeraktoren mit Elektroden für besonders hohe Ströme bis 20 A versehen. Zusammen mit einem geschalteten Hochleistungsverstärker wie z. B. dem E-618 sind hohe Betriebsfrequenzen im kHz-Bereich erreichbar. Die Anstiegszeiten bis zur Nominalauslenkung liegen bei einigen zehn Mikrosekunden.



PICMA® Multilayeraktoren mit vollkeramisch isolierter Innenbohrung

Durch eine neuartige Fertigungstechnologie können Multilayer-Piezoaktoren auch mit Innenbohrungen hergestellt werden. Mit speziellen Bearbeitungstechniken werden die Löcher bereits in den ungesinterten Aktor eingebracht. Wie bei den PICMA® Standardaktoren entsteht im Co-Firing-Prozess von Keramik und Innenelektroden die durchgehende keramische Isolierschicht, die den Piezoaktor vor Luftfeuchtigkeit schützt und seine Lebensdauer gegenüber herkömmlich polymerisolierten Aktoren deutlich erhöht. PICMA® Piezostapelaktoren mit zusätzlicher Innenbohrung sind ideal geeignet z.B. für Fiber-Stretching Anwendungen. PICMA® Aktoren mit Bohrung werden auf Anfrage gefertigt.

Hohe Betriebstemperatur bis 200 °C

Für besonders hochdynamische Anwendungen bzw. hohe Umgebungstemperaturen gibt es Varianten von PICMA® Multilayeraktoren, die bei Temperaturen bis zu 200 °C zuverlässig arbeiten können.

Gekapselte PICMA® Stack Piezoaktoren

FÜR RAUE INDUSTRIEUMGEBUNGEN



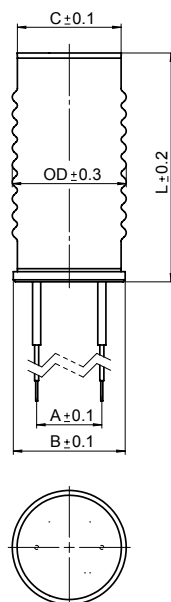
P-885 • P-888

- Wassergeschützte Vollkapselung
- Überlegene Lebensdauer
- Hohe Steifigkeit
- UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa
- μ s-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Gekapselte PICMA® Stack Multilayer-Piezoaktoren mit Inertgasfüllung

Betriebsspannung -20 bis 120 V. UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa. Variante für Betrieb in Spritzwasser, Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit oder Öl

| | A [mm] | B [mm] | C [mm] |
|----------|--------|--------|--------|
| P-885.XX | 6.40 | 11.00 | 10.25 |
| P-888.XX | 12.00 | 17.50 | 16.85 |



| Bestellnummern | Abmessungen OD x L [mm] | Nominalstellweg [μ m] (0-100 V) | Max. Stellweg [μ m] (0-120 V) | Blockierkraft [N] (0-120 V) | Steifigkeit [N/ μ m] | Elektrische Kapazität [μ F] $\pm 20\%$ | Resonanzfrequenz [kHz] 20% |
|----------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|
| P-885.55 | 11,2 x 22,5 | 14 $\pm 10\%$ | 17 $\pm 10\%$ | 850 | 50 | 1,5 | 60 |
| P-885.95 | 11,2 x 40,5 | 30 $\pm 10\%$ | 36 $\pm 10\%$ | 900 | 25 | 3,1 | 35 |
| P-888.55 | 18,6 x 22,5 | 14 $\pm 10\%$ | 17 $\pm 10\%$ | 3400 | 200 | 6,0 | 60 |

Piezokeramik PIC 252
Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-isolierte Anschlusslitzen, AWG 30 (\varnothing 0,61 mm)
Resonanzfrequenz gemessen bei $1 V_{pp}$ unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger

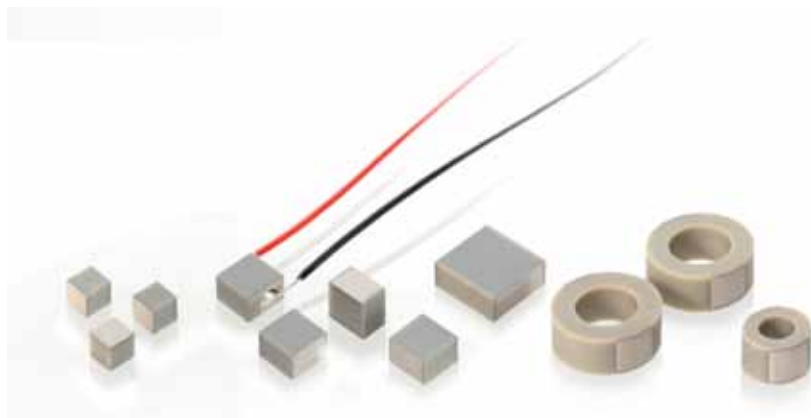
Einspannung halbiert sich der Wert Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT
Betriebsspannungsbereich: -20 bis +120 V
Betriebstemperaturbereich: -40 bis +150 °C
Sonderausführungen auf Anfrage!



Gekapselte PICMA® Stack Aktoren können auch dann verwendet werden, wenn Öl, Spritzwasser oder dauerhaft hohe Luftfeuchtigkeit die Applikationsumgebung bestimmen. Die Piezoaktoren sind von Inertgas umgeben

PICMA® Chip Aktoren

MINIATUR MULTILAYER-PIEZOAKTOREN



PL0xx • PDOxx

- Überlegene Lebensdauer
- Ultrakompakt:
ab 2 x 2 x 2 mm
- Ideal für den dynamischen Betrieb
- µs-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezolinearaktor mit PICMA® Multilayer-Technologie

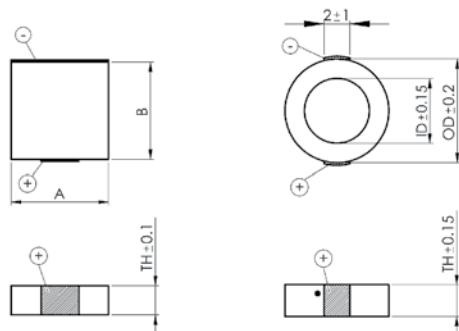
Betriebsspannung -20 bis 100 V. Keramische Isolierung, polymerfrei. Unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit. UHV-kompatibel bis 10⁻⁹ hPa, kein Ausgasen, hohe Ausheiztemperatur. Varianten mit quadratischem oder ringförmigem Querschnitt

Mögliche Modifikationen

PTFE-isolierte Anschlusslitzen. Verschiedene Geometrien, Innenbohrung. Überschliffene Keramikendflächen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Für Lasertuning, Mikrodosierung, LifeScience



PICMA® Chip Miniatur Piezoaktor, A, B, TH siehe Tabelle. Toleranzen A, B für PL022, PL033 ±0,10 mm, für PL055 ±0,15 mm, für PL088 ±0,20 mm. Toleranz OD für PD080 ±0,30 mm

Geeignete Verstärker

- E-610 Piezoverstärker/Servocontroller
- E-617 Hochleistungs-Piezoverstärker
- E-831 Piezoverstärker

| Bestellnummer* | Abmessungen A x B x TH [mm] | Auslenkung** [µm] ±20 % (0 – 100 V) | Blockierkraft [N] (0 – 100 V) | Elektrische Kapazität [nF] ±20 % (0 – 100 V) | Axiale Resonanzfrequenz [kHz] |
|----------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| PL022.30 | 2 x 2 x 2 | 2,2 | > 120 | 25 | 600 |
| PL033.30 | 3 x 3 x 2 | 2,2 | > 300 | 75 | 600 |
| PL055.30 | 5 x 5 x 2 | 2,2 | > 500 | 250 | 600 |
| PL088.30 | 10 x 10 x 2 | 2,2 | > 2000 | 1100 | 600 |

| Bestellnummer* | Abmessungen OD x ID x TH [mm] | Auslenkung** [µm] ±20 % (0 – 100 V) | Blockierkraft [N] (0 – 100 V) | Elektrische Kapazität [nF] ±20 % (0 – 100 V) | Axiale Resonanzfrequenz [kHz] |
|----------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| PD050.30 | 5 x 2,5 x 2,45 | 2,0 | >400 | 110 | 500 |
| PD080.30 | 8 x 4,5 x 2,45 | 2,0 | >1000 | 300 | 500 |

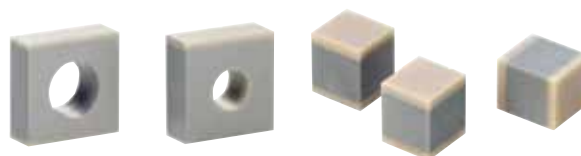
* Optional mit 100 mm PTFE-isolierten Anschlusslitzen, AWG 32 (Ø 0,49 mm); dazu die letzte Ziffer der Bestellnummer in 1 ändern (z. B. PL022.31)

** Die Werte beziehen sich auf das freie Bauelement und können sich im verklebten Zustand reduzieren.

Piezokeramik PIC 252

Standardanschlüsse: Lötbare Kontakte
Empfohlene Vorspannung für den dynamischen Betrieb: 15 MPa

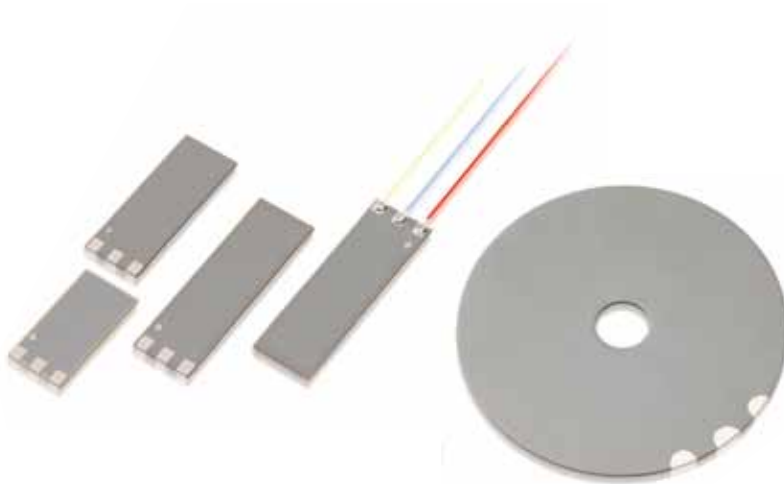
Maximale Vorspannung für konstante Kraftausübung: 30 MPa
Axiale Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert. Laterale Resonanzfrequenzen können je nach Einbausituation unterhalb der axialen liegen.
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT
Betriebsspannungsbereich: -20 bis +100 V
Betriebstemperaturbereich: -40 bis 150 °C



Auf Anfrage können PICMA® Chip Piezoaktoren mit vollkeramisch isolierter Innenbohrung (links) oder mit überschliffenen Keramikendflächen gefertigt werden (rechts)

PICMA® Bender

VOLLKERAMISCHE BIEGEAKTOREN MIT GROSSEM HUB



PL112 – PL140 • PD410

- Auslenkung bis 2 mm
- Kurze Ansprechzeit im ms-Bereich
- Nanometer-Auflösung
- Niedrige Betriebsspannung

PICMA® Multilayer-Piezoelemente mit hoher Zuverlässigkeit

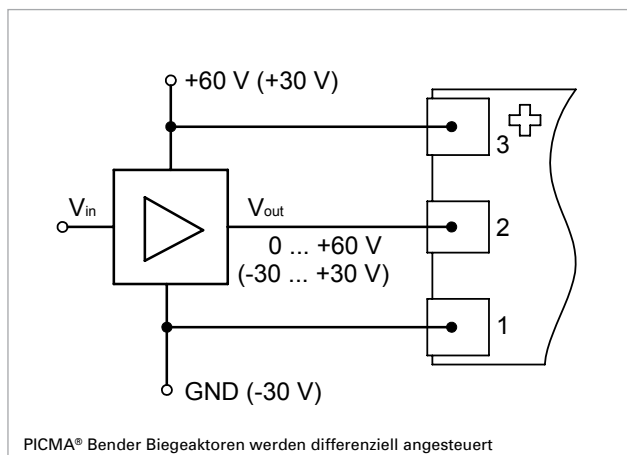
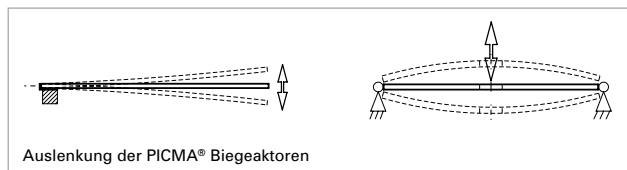
Betriebsspannung 0 bis 60 V. Bidirektionale Auslenkung. Keramische Isolierung, polymerfrei. UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa, kein Ausgasen, hohe Ausheiztemperatur. Zuverlässig auch unter extremen Bedingungen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung, Vakuum. Für Medizintechnik, Lasertechnik, Sensorik, Automatisierung, pneumatische Ventile

Geeignete Verstärker

E-650 Piezoverstärker für Multilayer-Biegeaktoren



Rechteckige Bieger

| Bestellnummer | Betriebsspannung [V] | Auslenkung [μm] $\pm 20\%$ | Freie Länge L_f [mm] | Abmessungen L x W x TH [mm] | Blockierkraft [N] $\pm 20\%$ | El. 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 • 1,1 | 2000 |
| PL122.10 | 0-60 (± 30) | ± 250 | 22 | 25,0 x 9,6 x 0,65 | $\pm 1,1$ | 2 • 2,4 | 660 |
| PL127.10 | 0-60 (± 30) | ± 450 | 27 | 31,0 x 9,6 x 0,65 | $\pm 1,0$ | 2 • 3,4 | 380 |
| PL128.10* | 0-60 (± 30) | ± 450 | 28 | 35,5 x 6,3 x 0,75 | $\pm 0,5$ | 2 • 1,2 | 360 |
| PL140.10 | 0-60 (± 30) | ± 1000 | 40 | 45,0 x 11,0 x 0,6 | $\pm 0,5$ | 2 • 4,0 | 160 |

Runde Bieger

| Bestellnummer | Betriebsspannung [V] | Auslenkung [μm] $\pm 20\%$ | Freie Länge L_f [mm] | Abmessungen OD x ID x TH [mm] | Blockierkraft [N] $\pm 20\%$ | El. Kapazität [μF] $\pm 20\%$ | Resonanzfrequenz [Hz] $\pm 20\%$ |
|---------------|----------------------|---|------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|----------------------------------|
| PD410.10* | 0-60 (± 30) | ± 270 | - | 44 x 7 x 0,65 | ± 20 | 2 • 10,5 | 1000 |

Optional erhältlich mit 100 mm PTFE-isolierten Anschlusslitzen, AWG 32 (\varnothing 0,49 mm); dazu die letzte Ziffer der Bestellnummer in 1 ändern (z. B. PL112.11)

Piezokeramik PIC 251, *PIC252

Standardanschlüsse: lötbare Kontakte

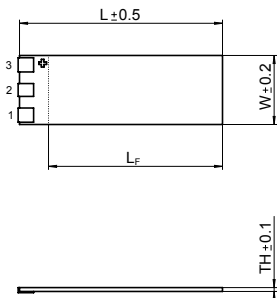
Resonanzfrequenz bezogen auf 1 V_{pp} , einseitig eingespannt mit freier Länge L_f , ohne Masselast. Für PD410.10: Einspannung mit drehbarer Lagerung am Außenumfang

Kapazität gemessen bei 1 V_{pp} , 1 kHz, RT

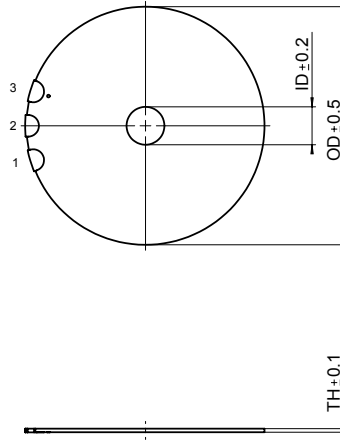
Betriebstemperaturbereich: -20 °C bis +85 °C; * -20 °C bis +150 °C

Empfohlene Montage: Epoxidharzklebung. Alle Spezifikationen sind abhängig von den realen Einspannbedingungen und der aufgetragenen mechanischen Last.

Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



PL112 - PL140.10 Abmessungen in mm.
L, L_f, W, TH siehe Datentabelle



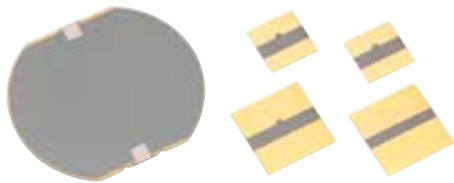
PD410 runder PICMA® Bender, Abmessungen in mm.
ID, OD, TH siehe Datentabelle

Kundenspezifische Ausführungen

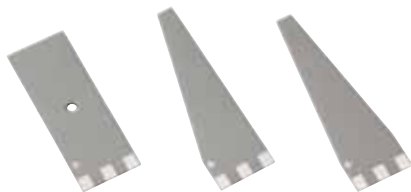
PICMA® BENDER PIEZOAKTOREN



Die Biegeaktoren P-871 mit aufgebracht DMS-Positionssensoren bieten geregelte Auslenkungen bis 1,6 mm mit Ansprechzeiten im Millisekundenbereich. Die integrierten Sensoren ermöglichen im positionsgeregelten Betrieb eine wesentlich bessere Linearität und Wiederholbarkeit. Zur einfachen Installation werden die Aktoren mit Kabeln, Steckern und einem Montageadapter ausgeliefert.



Multilayer-Kontraktorplatten sind in verschiedenen Geometrien, z.B. quadratisch oder als Scheibe fertigbar und auf Anfrage erhältlich. Diese Platten können z.B. auf Metall- oder Siliziumsubstraten appliziert werden, um Biege- oder Pumpen-elemente mit niedrigen Ansteuerspannungen zu realisieren.



Multilayer-Biegeaktoren sind in nahezu beliebigen Konturen fertigbar. Das Herstellungsverfahren ermöglicht u.a. auch Innenbohrungen mit vollständiger keramischer Isolierung. Die Höhe der aktiven Schichten ist variabel ab einer Mindesthöhe von 15 µm, so dass mit Ansteuerspannungen von nur 10 V gearbeitet werden kann.



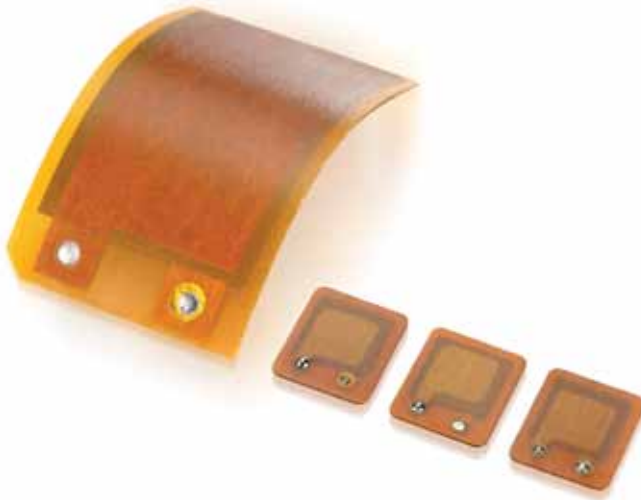
Bieger mit unidirektionaler Auslenkung bestehen aus einer einzigen aktiven Piezokeramikschiicht, die mit einem Substrat aus Al₂O₃-Keramik oder aus Edelstahl verklebt wird. Verglichen mit dem bimorphen Aufbau erreichen diese Aktoren eine höhere Steifigkeit und eine größere Auslenkung, die allerdings nur in einer Richtung erfolgt.



PICMA Bender sind in kleinsten Abmessungen von wenigen Millimetern fertigbar. Abgebildet ist eine mit Anschlussdrähten versehene Ausführung mit 4 x 10 mm Kantenlänge, im Vergleich zu einem PL127.10.

DuraAct Flächenwandler

BIEGSAM UND ROBUST



P-876

- Einsatz als Aktor, Sensor oder Energieerzeuger
- Kostengünstig
- Minimale Biegeradien bis 12 mm

Flächenwandler

Funktionalität als Aktor- und Sensorkomponente. Nominale Betriebsspannung von 100 bis zu 1000 V, je nach aktiver Schichthöhe. Mögliche Energieerzeugung für autarke Systeme bis in den Milliwattbereich. Applizierbar auch auf gekrümmten Flächen

Robuster, kostengünstiger Aufbau

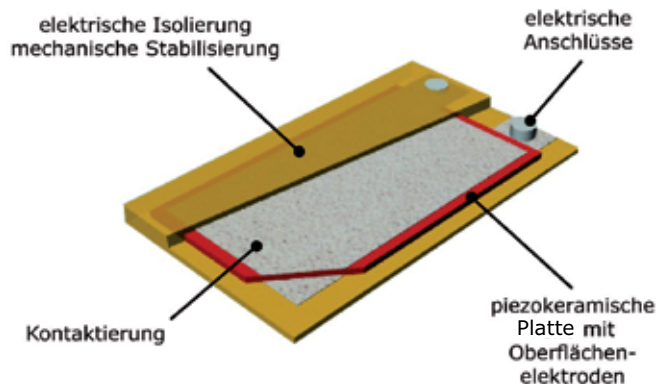
Laminierte Struktur aus einer piezokeramischen Platte, Elektroden und Polymermaterialien. Herstellung durch blasenfreies Injektionsverfahren. Die Polymerummantelung dient gleichzeitig als elektrische Isolierung und als mechanische Vorspannung, so dass der DuraAct biegsam ist

Kundenspezifische DuraAct Flächenwandler

- Flexible Wahl der Größe
- Flexible Wahl der Dicke und damit der Biegsamkeit
- Flexible Wahl des piezokeramischen Materials
- Variable Gestaltung der elektrischen Anschlüsse
- Kombinierte Aktor/Sensor-Applikationen, auch mit mehreren Piezokeramiksichten
- Multilayer-Piezoelemente
- Feldanordnungen (Array)

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Applizierbar auch auf gekrümmten Flächen, oder zur Integration in Strukturen. Für adaptive Systeme, Energy Harvesting, Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)



Schematischer Aufbau des Aktors

Geltende Patente

Deutsches Patent Nr. 10051784C1
US-Patent Nr. 6,930,439

Geeignete Verstärker

E-413 DuraAct und PICA Shear Piezoverstärker
E-835 DuraActPiezoverstärker

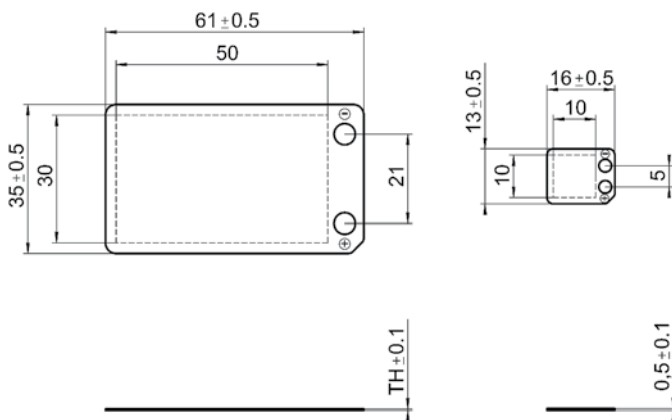
| | Betriebsspannungsbereich [V] | Min. laterale Kontraktion [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Rel. laterale Kontraktion [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$] | Blockierkraft [N] | Abmessungen [mm] | Min. Biegeradius [mm] | Piezokeramikhöhe [μm] | Elektrische Kapazität [nF] $\pm 20\%$ |
|-----------|------------------------------|--|---|-------------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| P-876.A11 | -50 bis +200 | 400 | 1,6 | 90 | 61 x 35 x 0,4 | 12 | 100 | 150 |
| P-876.A12 | -100 bis +400 | 650 | 1,3 | 265 | 61 x 35 x 0,5 | 20 | 200 | 90 |
| P-876.A15 | -250 bis +1000 | 800 | 0,64 | 775 | 61 x 35 x 0,8 | 70 | 500 | 45 |
| P-876.SP1 | -100 bis +400 | 650 | 1,3 | 280 | 16 x 13 x 0,5 | - | 200 | 8 |

Piezokeramik PIC 255

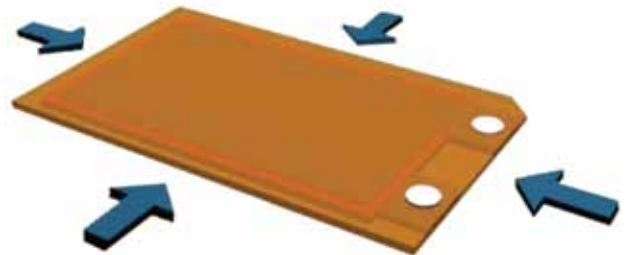
Standardanschlüsse: Lötunkte

Betriebstemperaturbereich: -20 bis +150 °C

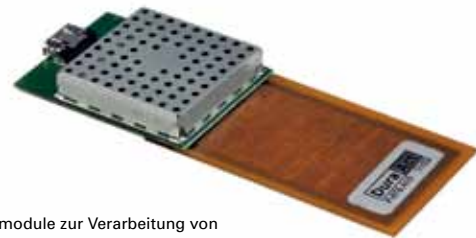
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



P-876.A (links), P-876.SP1 (rechts), Abmessungen in mm



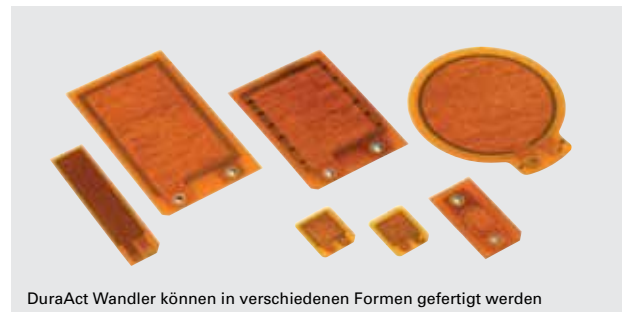
Beim Anlegen einer Spannung kontrahiert der DuraAct Flächenwandler in lateraler Richtung



Elektronikmodule zur Verarbeitung von Sensordaten, zur Ansteuerung des DuraAct Aktors oder für Energy Harvesting können wandlernah angebracht werden



Angeordnet als Array ermöglichen DuraAct Wandler z.B. die zuverlässige Überwachung bzw. Ansteuerung größerer Bereiche



DuraAct Wandler können in verschiedenen Formen gefertigt werden

PT-Tube Piezorohre

HOCHDYNAMISCHER BETRIEB MIT GERINGEN LASTEN



PT120 – PT140

- Radiale, laterale und axiale Bewegung
- Sub-nm-Auflösung
- Ideal für OEM-Anwendungen
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezoaktor/Scannerrohr

Betriebsspannung bis 1000 V oder bipolar bis ± 250 V. Monolithischer piezokeramischer Aktor mit minimalen geometrischen Toleranzen. Radiale und axiale Kontraktion, geringe Belastbarkeit. UHV-kompatible Versionen mit mehrfach segmentierten Elektroden

Sonderausführungen mit geänderten Spezifikationen

- Materialien
- Spannungsbereich, Auslenkung
- Toleranzen
- Applizierte Sensoren
- Erweiterter Temperaturbereich
- Segmentierung der Elektroden, Umkontakte, umlaufende Isolierstege
- Nichtmagnetisch

Mögliche Abmessungen

- Länge L max. 70 mm
- Außendurchmesser OD 2 bis 80 mm
- Innendurchmesser ID 0,8 bis 74 mm
- min. Wanddicke 0,30 mm



Sonderversionen der PT-Tube Piezoscannerrohre mit mehrfach segmentierten äußeren Elektroden und Umkontakten

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung, UHV-Umgebung bis 10^{-9} hPa. Für Mikrodosierung, Mikromanipulation, Scanning Mikroskopie (AFM, STM, etc.), Faserstrecke

| Bestellnummer | Abmessungen [mm] L x OD x ID | Max. Betriebsspannung [V] | Elektrische Kapazität [nF] $\pm 20\%$ | Max. axiale Kontraktion [μm] | Max. radiale Kontraktion [μm] |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|--|
| PT120.00 | 20 x 2,2 x 1,0 | 500 | 3 | 5 | 0,7 |
| PT130.90 | 30 x 3,2 x 2,2 | 500 | 12 | 9 | 0,9 |
| PT130.10 | 30 x 6,35 x 5,35 | 500 | 18 | 9 | 1,8 |
| PT130.20 | 30 x 10,0 x 9,0 | 500 | 36 | 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 |

Angaben für max. Auslenkung jeweils bei max. Betriebsspannung.

Piezokeramik PIC 151

Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT

Innenelektrode positiv. Standard: innen und außen eingebrannte Silberelektroden. Optional: Außenelektrode Dünnschicht (CuNi, Au)

Scannerrohre

Vierfachsegmentierte Elektroden für XY-Auslenkung, UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa

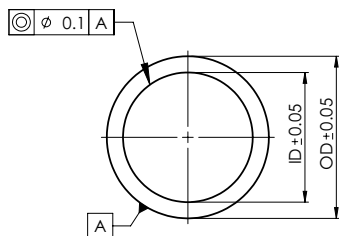
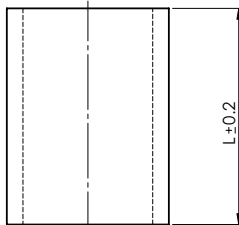
| Bestellnummer | Abmessungen [mm] L x OD x ID | Max. Betriebsspannung [V] | Elektrische Kapazität [nF] $\pm 20\%$ | Max. axiale Kontraktion [μm] | Max. radiale Kontraktion [μm] | Max. XY-Auslenkung [μm] |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| PT230.94 | 30 x 3,2 x 2,2 | ± 250 | 3,6 x 2,2 | 9 | 0,9 | ± 35 |
| PT230.14 | 30 x 6,35 x 5,35 | ± 250 | 3,6 x 3,4 | 9 | 1,8 | ± 16 |
| PT230.24 | 30 x 10,0 x 9,0 | ± 250 | 3,6 x 7,7 | 9 | 3 | ± 10 |

Angaben für max. Auslenkung jeweils bei max. Betriebsspannung. Max. XY-Auslenkung bei gleichzeitiger Ansteuerung mit $+250 / -250$ V an gegenüberliegenden Elektroden.

Piezokeramik PIC 255. Ausheizbar bis 150°C .

Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT

Vierfachsegmentierte Elektroden für XY-Auslenkung. Außenelektrode Dünnschicht (CuNi, Au), innen eingebrannte Silberelektroden



PT-Tube Aktoren, Abmessungen in mm. L, OD, ID siehe Datentabelle

PICA Stack Piezoaktoren

HOHE KRÄFTE, GROSSE AUSLENKUNGEN, FLEXIBEL FERTIGBAR



P-007 – P-056

- Stellwege bis 300 µm
- Hohe Belastbarkeit
- Krafterzeugung bis 80 kN
- Sehr zuverlässig: >10⁹ Zyklen
- µs-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezolinearaktor in gestapelter Bauweise

Betriebsspannung 0 bis 1000 V. Lange Lebensdauer ohne Leistungseinbußen. Große spezifische Auslenkung. Hohe Kräfte. Betriebstemperaturbereich -20 bis 85 °C

Mögliche Modifikationen

- DMS-Sensoren für Positionsstabilität
- Piezokeramikmaterial
- Spannungsbereich, Auslenkung, Lagendicke
- Belastbarkeit, Krafterzeugung
- Geometrie: rund, rechteckig
- Endstücke: flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.
- Integrierte piezoelektrische Kraftdetektorscheiben
- Erweiterter Temperaturbereich, Temperatursensor
- Unmagnetische Ausführungen
- Verringerte Längentoleranzen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Für Hochlast-Präzisionspositionierung, Präzisionsmechanik und -fertigung, Schaltanwendungen



Sonderaktor mit kundenspezifischem Kopfstück und applizierten DMS-Sensoren. Die Polymerschicht kann unterschiedlich gefärbt sein. Standardversionen werden mit Anschlusslitzen und schwarz umhüllt ausgeliefert

Geeignete Verstärker

E-464 PICA Piezoverstärker
E-481 PICA Höchstleistungs-Piezoverstärker/Servocontroller
E-470 • E-472 • E-421 PICA Controller

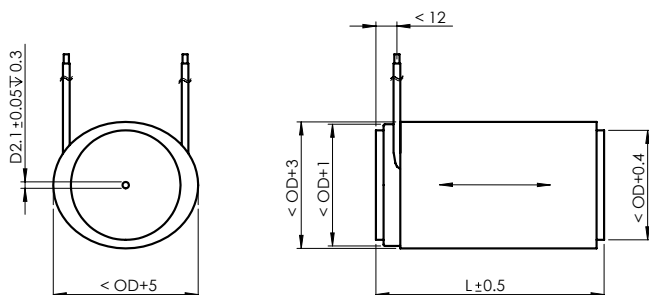
| Bestellnummer | Stellweg (0–1000 V) [µm] -10/+20% | Durchmesser OD [mm] | Länge L [mm] ±0,5 | Blockierkraft (0–1000 V) [N] | Steifigkeit [N/µm] | Kapazität [nF] ±20% | Resonanzfrequenz [kHz] |
|---------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| 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 |

Piezokeramik PIC 151
 Standardanschlüsse: 100 mm PTFE
 isolierte Anschlusslitzen, AWG 24
 (Ø 1,15 mm)
 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 einseitig
 ger Einspannung halbiert sich der Wert
 Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT

Betriebsspannungsbereich: 0 bis 1000 V
 Betriebstemperaturbereich: -20 bis
 +85 °C
 Standardendstücke: Stahlscheiben,
 je nach Modell 0,5 bis 2 mm dick
 Mantelflächen: Schrumpfschlauch

Polyolefin, schwarz
 Sonderausführungen und andere
 Spezifikationen auf Anfrage.



PICA Stack, Abmessungen in mm. L, OD s. Datentabelle

PICA Power Piezoaktoren

FÜR HOCHDYNAMISCHE ANWENDUNGEN



P-010.xxP – P-056.xxP

- Betriebstemperatur bis zu 150 °C
- Hohe Ansteuerfrequenzen
- Hohe Belastbarkeit
- Krafterzeugung bis 70 kN
- μ s-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezolinearaktor in gestapelter Bauweise

Betriebsspannung 0 bis 1000 V. Lange Lebensdauer ohne Leistungseinbußen. Große Auslenkung bei kleiner elektrischer Kapazität. Integrierter Temperatursensor zum Schutz vor Überhitzung. Sehr zuverlässig: $>10^9$ Zyklen

Mögliche Modifikationen

- Bipolare Ansteuerung
- DMS-Sensoren für Positionsstabilität
- Piezokeramikmaterial
- Spannungsbereich, Auslenkung, Lagendicke
- Belastbarkeit, Krafterzeugung
- Geometrie: rund, rechteckig, Innenbohrung
- Endstücke: flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.
- Integrierte piezoelektrische Kraftdetektorscheiben
- Betriebstemperatur bis 200 °C
- UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa
- Unmagnetische Ausführungen
- Verringerte Längentoleranzen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Für aktive Schwingungsdämpfung, Präzisionsmechanik und -fertigung, aktive Strukturen (Adaptronik)

Geeignete Verstärker

E-481 PICA Höchstleistungs-Piezoverstärker/Servocontroller
E-470 • E-472 • E-421 PICA Controller
E-464 PICA Piezoverstärker

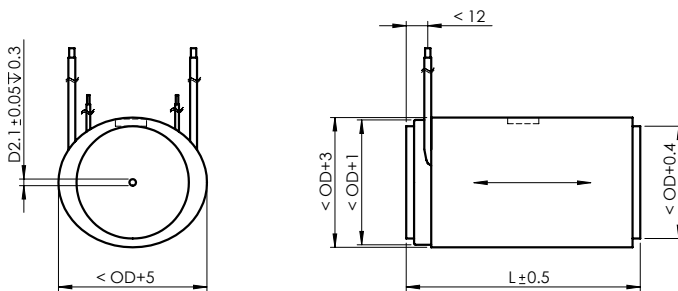
| Bestellnummer | Stellweg (0–1000 V) [µm] -10/+20% | Durchmesser OD [mm] | Länge L [mm] ±0,5 | Blockierkraft (0–1000 V) [N] | Steifigkeit [N/µm] | Kapazität [nF] ±20% | Resonanzfrequenz [kHz] |
|---------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| P-010.00P | 5 | 10 | 9 | 1200 | 240 | 17 | 129 |
| P-010.10P | 15 | 10 | 18 | 1800 | 120 | 46 | 64 |
| P-010.20P | 30 | 10 | 31 | 2100 | 68 | 90 | 37 |
| P-010.40P | 60 | 10 | 58 | 2200 | 37 | 180 | 20 |
| P-010.80P | 120 | 10 | 111 | 2300 | 19 | 370 | 10 |
| P-016.10P | 15 | 16 | 18 | 4500 | 300 | 130 | 64 |
| P-016.20P | 30 | 16 | 31 | 5400 | 180 | 250 | 37 |
| P-016.40P | 60 | 16 | 58 | 5600 | 94 | 510 | 20 |
| P-016.80P | 120 | 16 | 111 | 5900 | 49 | 1000 | 10 |
| P-016.90P | 180 | 16 | 163 | 6000 | 33 | 1600 | 7 |
| P-025.10P | 15 | 25 | 20 | 9900 | 660 | 320 | 58 |
| P-025.20P | 30 | 25 | 33 | 12000 | 400 | 630 | 35 |
| P-025.40P | 60 | 25 | 60 | 13000 | 220 | 1300 | 19 |
| P-025.80P | 120 | 25 | 113 | 14000 | 120 | 2600 | 10 |
| P-025.90P | 180 | 25 | 165 | 14000 | 80 | 4000 | 7 |
| P-035.10P | 15 | 35 | 21 | 18000 | 1200 | 530 | 55 |
| P-035.20P | 30 | 35 | 34 | 23000 | 760 | 1200 | 34 |
| P-035.40P | 60 | 35 | 61 | 26000 | 430 | 2500 | 19 |
| P-035.80P | 120 | 35 | 114 | 28000 | 230 | 5200 | 10 |
| P-035.90P | 180 | 35 | 166 | 29000 | 160 | 7800 | 7 |
| P-045.20P | 30 | 45 | 36 | 36000 | 1200 | 2100 | 32 |
| P-045.40P | 60 | 45 | 63 | 41000 | 680 | 4300 | 18 |
| P-045.80P | 120 | 45 | 116 | 44000 | 370 | 8800 | 10 |
| P-045.90P | 180 | 45 | 169 | 45000 | 250 | 13000 | 7 |
| P-056.20P | 30 | 56 | 36 | 54000 | 1800 | 3300 | 32 |
| P-056.40P | 60 | 56 | 63 | 66000 | 1100 | 6700 | 18 |
| P-056.80P | 120 | 56 | 116 | 68000 | 570 | 14000 | 10 |
| P-056.90P | 180 | 56 | 169 | 70000 | 390 | 21000 | 7 |

Piezokeramik PIC 255
 Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-
 isolierte Anschlusslitzen, AWG 24
 (Ø 1,15 mm). Temperatursensor PT 1000
 Empfohlene Vorspannung für den
 dynamischen Betrieb: 15 MPa

Maximale Vorspannung für konstante
 Kraftausübung: 30 MPa
 Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}
 unbelastet. Bei einseitiger Einspannung
 halbiert sich der Wert
 Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT

Betriebsspannungsbereich: 0 bis 1000 V
 Betriebstemperaturbereich: -20 bis
 +150 °C
 Standardendstücke: Stahlscheiben,
 je nach Modell 0,5 bis 2 mm dick
 Mantelflächen: Schrumpfschlauch

FEP, transparent
 Sonderausführungen und andere Spezi-
 fikationen auf Anfrage.



PICA Power, Abmessungen in mm. L, OD siehe Datentabelle

PICA Thru Ringaktoren

HOCHBELASTBARE PIEZOAKTOREN MIT INNENBOHRUNG



P-010.xxH – P-025.xxH

- Hohe Belastbarkeit
- Sehr zuverlässig: $>10^9$ Zyklen
- μ s-Ansprechzeit
- Sub-nm-Auflösung
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezolinearaktor in gestapelter Bauweise

Betriebsspannung 0 bis 1000 V. Lange Lebensdauer ohne Leistungseinbußen. Große spezifische Auslenkung. Aufbringen einer mechanischen Vorspannung über Innenbohrung möglich

Mögliche Modifikationen

- DMS-Sensoren für Positionsstabilität
- Piezokeramikmaterial
- Spannungsbereich, Auslenkung, Lagendicke
- Belastbarkeit, Krafterzeugung
- Geometrie: rechteckig, andere Durchmesser
- Endstücke: flach, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.
- Integrierte piezoelektrische Kraftdetektorscheiben
- Erweiterter Temperaturbereich
- UHV-kompatible Versionen bis 10^{-9} hPa
- Unmagnetische Ausführungen
- Verringerte Längentoleranzen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung. Für Optik, Präzisionsmechanik und -fertigung, Lasertuning



PICA Thru werden in vielen Größen hergestellt. Standardversionen werden mit Anschlusslitzen und schwarz umhüllt ausgeliefert. Sonderausführungen sind auf Anfrage erhältlich

Geeignete Verstärker

E-464 PICA Piezoverstärker
E-481 PICA Höchstleistungs-Piezoverstärker/Servocontroller
E-462 PICA Piezoverstärker

| Bestellnummer | Stellweg [μm] (0–1000 V) -10/+20 % | Durchmesser OD [mm] | Durchmesser ID [mm] | Länge L [mm] $\pm 0,5$ | Blockierkraft [N] (0–1000 V) | Steifigkeit [N/ μm] | Kapazität [nF] ± 20 % | Resonanz- frequenz [kHz] |
|---------------|--|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| P-010.00H | 5 | 10 | 5 | 7 | 1200 | 230 | 15 | 144 |
| P-010.10H | 15 | 10 | 5 | 15 | 1700 | 110 | 40 | 67 |
| P-010.20H | 30 | 10 | 5 | 27 | 1800 | 59 | 82 | 39 |
| P-010.40H | 60 | 10 | 5 | 54 | 1800 | 29 | 180 | 21 |
| P-016.00H | 5 | 16 | 8 | 7 | 2900 | 580 | 42 | 144 |
| P-016.10H | 15 | 16 | 8 | 15 | 4100 | 270 | 120 | 67 |
| P-016.20H | 30 | 16 | 8 | 27 | 4500 | 150 | 230 | 39 |
| 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 |

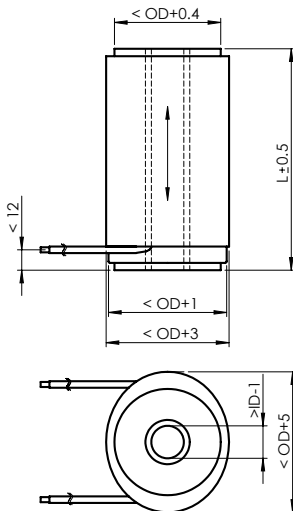
Piezokeramik PIC151
Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-
isolierte Anschlusslitzen, AWG 24
(\varnothing 1,15 mm)
Empfohlene Vorspannung für den
dynamischen Betrieb: 15 MPa

Maximale Vorspannung für konstante
Kraftausübung: 30 MPa
Resonanzfrequenz gemessen bei $1 V_{pp}$,
unbelastet, beidseitig frei. Bei einseiti-
ger Einspannung halbiert sich der Wert
Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT

Betriebsspannungsbereich: 0 bis 1000 V
Betriebstemperaturbereich: -20 bis
+85 °C
Standardendstücke: Keramikringe
(passives PZT)
Mantelflächen: außen Schrumpf-

schlauch Polyolefin, schwarz; innen
Epoxidharz

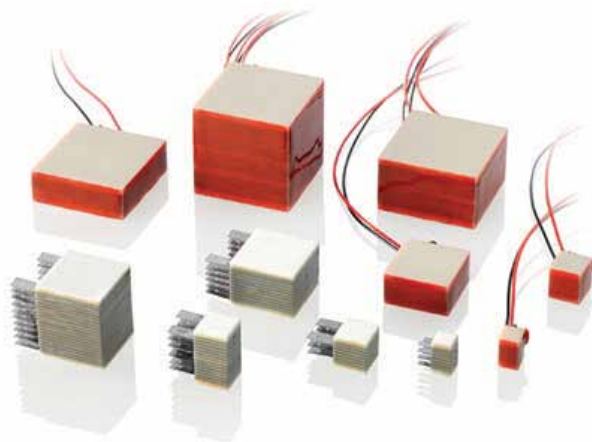
Sonderausführungen und andere
Spezifikationen auf Anfrage.



PICA Thru, Abmessungen in mm

PICA Shear Scheraktoren

KOMPAKTE MEHRACHSEN-AKTOREN



P-111 – P-151

- X-, XY-, XZ- und XYZ-Versionen
- Stellwege bis 10 μm
- Sehr zuverlässig: $>10^9$ Zyklen
- Picometer-Auflösung
- μs -Ansprechzeit
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Piezo-Scheraktoren

Betriebsspannung -250 bis +250 V. Laterale Bewegung basiert auf dem piezoelektrischen Schereffekt. Hervorragende dynamische Eigenschaften bei minimalem elektrischem Leistungsbedarf. Varianten mit Innenbohrung oder für den Einsatz in kryogener Umgebung und UHV bis 10^{-9} hPa

Mögliche Modifikationen:

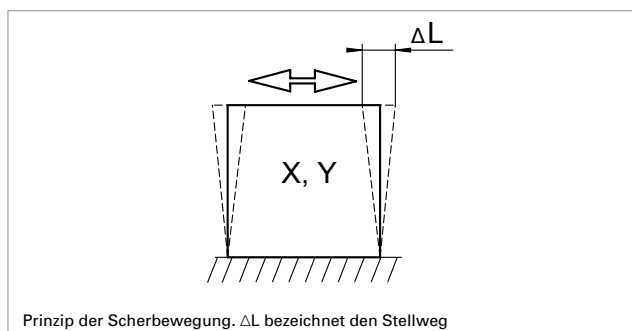
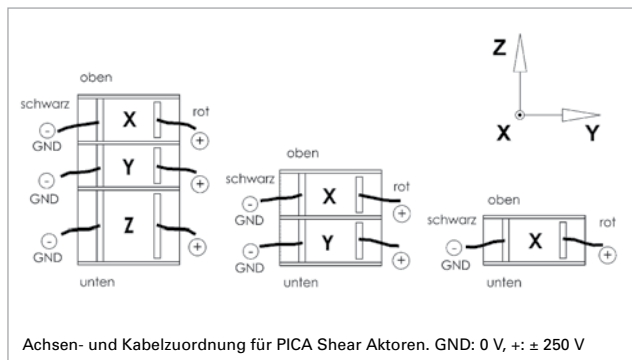
- Piezokeramikmaterial
- Unmagnetische Ausführungen
- Spannungsbereich, Auslenkung, Lagendicke, Querschnittsabmessung
- Belastbarkeit, Krafterzeugung
- Endstücke: flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.
- Verringerte Längentoleranzen

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung, Tieftemperatur-/Vakuumversionen bis 10^{-9} hPa. Für Scanning-Anwendungen, Mikroskopie, Präzisionsmechanik, Schaltanwendungen

Geeignete Verstärker

E-413 DuraAct und PICA Shear Piezoverstärker
E-508 PICA Piezoverstärker Modul



| Bestellnummer | Aktive Achsen | Stellweg [µm] (-250 bis +250V) -10/+20% | Querschnitt A x B / ID [mm] | Länge L [mm] ±0,3 | Max. Scherbelastung [N] | Axiale Steifigkeit [N/µm] | Kapazität [nF] ±20% | Axiale 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 | 920 | 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 | 20 | 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 |

Varianten mit Innenbohrung

| | | | | | | | | |
|-----------|-----|--------------|--------------|-----|-----|-----|---------------|-----|
| 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 |

Varianten für kryogene und UHV-Umgebung

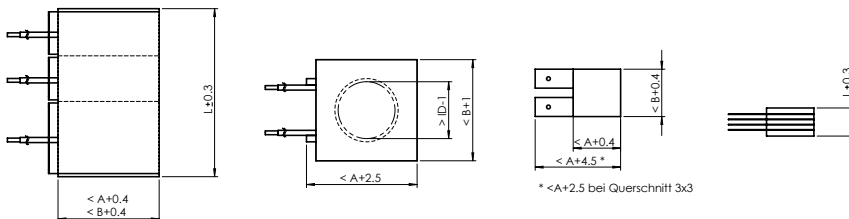
| | | | | | | | | |
|-----------|---|----|-------|-----|----|-----|----------|-----|
| P-111.01T | X | 1* | 3 x 3 | 2,2 | 20 | 110 | 2 x 0,25 | 530 |
| P-111.03T | X | 3* | 3 x 3 | 4,4 | 20 | 55 | 6 x 0,25 | 260 |
| P-121.01T | X | 1* | 5 x 5 | 2,2 | 50 | 310 | 2 x 0,70 | 530 |
| P-121.03T | X | 3* | 5 x 5 | 4,4 | 50 | 150 | 6 x 0,70 | 260 |

* Toleranzen ± 30%
 Piezokeramik PIC 255
 Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-isolierte Anschlusslitzen, AWG 32 (Ø 0,49 mm)
 Axiale Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger

ger Einspannung halbiert sich der Wert.
 Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT
 Betriebsspannungsbereich: -250 V bis +250 V
 Betriebstemperaturbereich: -20 °C bis +85 °C
 Standardendstücke: Keramik (passives PZT)
 Mantelfläche: Epoxidharz

Varianten für kryogene und UHV-Umgebung
 Betriebstemperaturbereich: -269 °C bis +150 °C
 Standardanschlüsse: Ta. Kontaktierung mit leitfähigem Klebstoff oder Schweißen möglich. Auslenkung gemessen bei Raum-

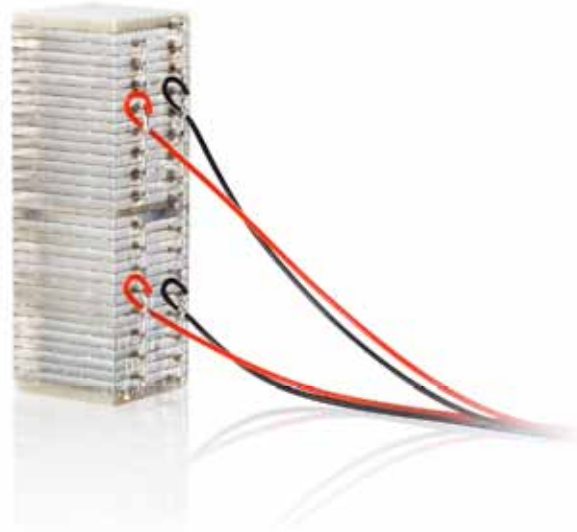
temperatur. Wert reduziert sich bei tiefen Temperaturen.
 Standardendstücke: Keramik (Al₂O₃, 96 % rein)
 Mantelfläche: Epoxidharz
 Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



PICA Shear Aktoren, A, B, L siehe Datentabelle, Abmessungen in mm. Die Achsen- und Litzenzahl ist vom Typ abhängig.
 Links: P-1xx.xx und P-1xx.xxH (mit Innenbohrung), rechts: P-1xx.xxT, * <A+2,5 bei Querschnitt 3 x 3

Picoactuator®

MEHRACHS-AKTOREN MIT HOCHLINEARER AUSLENKUNG



P-405

- Bleifreies, kristallines Aktormaterial
- Hohe Dynamik
- Ideal für den Betrieb ohne Positionsregelung
- Geringer elektrischer Leistungsbedarf
- Minimale Längstoleranzen

Aktor in Stapelbauweise

Betriebsspannung bipolar bis ± 500 V. Nahezu hysteresefreie Auslenkung ($< 0,2\%$).

Kein Kriechen. Picoactuatoren sind als Longitudinal- und Scheraktoren konfigurierbar bis zu Höhen von 20 mm und maximalen Stellwegen von $\pm 3 \mu\text{m}$

Mögliche Modifikationen

- UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa
- Innenbohrung
- Kopfstücke

Anwendungsgebiete

Industrie und Forschung. Vakuum. Für hochdynamische, ungerichtete Scananwendungen, Kompensation von ungewollten Querbewegungen bei Nanopositioniersystemen ("out-of-plane", "out-of-line")

| Bestellnummer | Aktive Achsen | Abmessungen A x B x L [mm] | Max. Stellweg* (-500 bis +500 V) [μm] | Aximale Steifigkeit [N/ μm] | Max. Scherbelastung [N] | Elektrische Kapazität [nF] $\pm 10\%$ | Aximale Resonanzfrequenz [kHz] |
|---------------|---------------|----------------------------|--|---|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|---------------|---------------|----------------------------|--|---|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|

Longitudinalaktoren

| | | | | | | | |
|----------|---|----------------|---|-----|-----|------|-----|
| P-405.05 | Z | 5 x 5 x 12,5 | 1 | 140 | 10 | 0,95 | 160 |
| P-405.08 | Z | 10 x 10 x 12,5 | 1 | 550 | 100 | 3,75 | 160 |

Scheraktoren

| | | | | | | | |
|----------|---|---------------|---|-----|-----|------|---|
| P-405.15 | X | 5 x 5 x 7,5 | 1 | 230 | 20 | 0,7 | - |
| P-405.18 | X | 10 x 10 x 7,5 | 1 | 900 | 150 | 2,75 | - |

XZ-Aktoren

| | | | | | | | |
|----------|----|--------------|-------|-----|----|-------------|-----|
| P-405.28 | XZ | 10 x 10 x 19 | 1 / 1 | 350 | 50 | 2,75 / 3,75 | 105 |
|----------|----|--------------|-------|-----|----|-------------|-----|

* Toleranzen $\pm 20\%$

Piezomaterial PIC 050

Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-isolierte Anschlusslitzen, AWG 32 ($\varnothing 0,76$ mm)

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

Kapazität gemessen bei $1 V_{pp}$, 1 kHz, RT

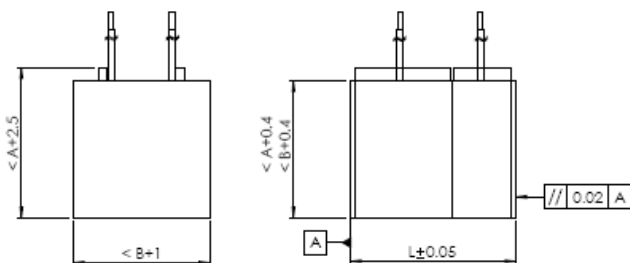
Betriebsspannungsbereich: -500 V bis +500 V

Betriebstemperaturbereich: -20 °C bis +85 °C

Standardendstücke: Keramik

Mantelflächen: Epoxidharz

Sonderausführungen auf Anfrage!



P-405, Abmessungen in mm. A, B, L s. Datentabelle



Picoactuatoren® sind in verschiedenen Konfigurationen herstellbar

Integrierte Baugruppen

VON DER KERAMIK ZUR KOMPLETTLÖSUNG

Keramik in verschiedenen Integrationsstufen

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

Sensorkomponenten – Transducer

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

Konfektionierte Piezoaktoren

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

Vorgespannte Aktoren – Hebel – Nanopositionierung

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

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

Piezomotoren

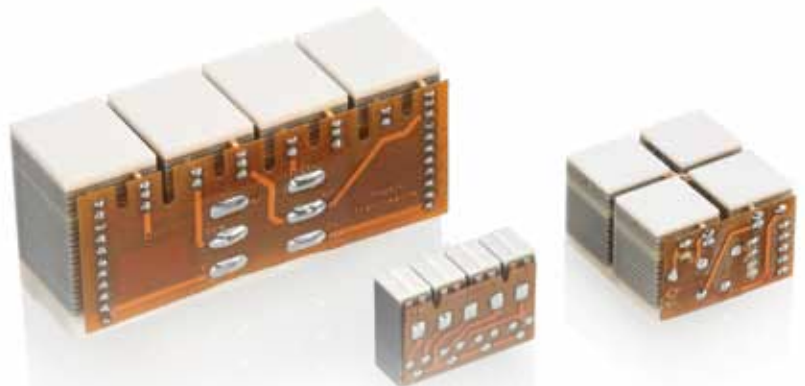
Piezokeramiken sind das Antriebselement für Piezomotoren von Physik Instrumente (PI), die es ermöglichen, die besonderen Eigenschaften der Piezoaktoren auch über längere Verstellwege zu nutzen. PILine® Ultraschall-Piezomotoren ermöglichen sehr dynamische Zustellbewegungen und sind dabei so kompakt herstellbar, dass sie bereits in vielen neuen Anwendungen eingesetzt werden. Piezoschreitantriebe wiederum bieten über mehrere Millimeter die hohen Kräfte, die Piezoaktoren entwickeln. Die patentierten NEXLINE® und NEXACT® Antriebe von PI mit ihrem komplexen Aufbau aus Longitudinal-, Scher- und Biegeelementen sowie entsprechender Kontaktierung werden komplett bei PI Ceramic gefertigt.



PICMA® Piezobiegeaktoren mit applizierten DMS-Sensoren zur Messung der Auslenkung



Hebelübersetztes System



Aktormodule für NEXLINE® und NEXACT® Piezoschreitantriebe

Piezoverstärker für die Ansteuerung von Piezoaktoren

AUSGANGSSPANNUNGSBEREICH -30 BIS 130 V

Einkanaliger Controller E-610

Die Piezoverstärker / Servocontroller E-610 verfügen über einen rauscharmen integrierten Piezoverstärker, der Spitzenströme von 180 mA im Niederspannungsbereich abgeben und aufnehmen kann.

- Preisgünstige einkanalige OEM-Lösung
- Ungeregelte Versionen oder Positionsregelung für DMS- & Kapazitivsensoren
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- 180 mA Spitzenstrom



Miniatur-Modul E-831

- Ungeregelte Ansteuerung
- Separate Stromversorgung für bis zu drei Elektroniken mit bis zu -30 / +130 V Ausgangsspannung
- Bandbreite bis zu mehreren kHz
- Für Kapazitäten bis zu 20 μF
- Weiter miniaturisierbar: Extrem kleine OEM-Varianten

OEM-Modul E-660 für quasistatische Ansteuerung

- +5 bis +110 V
- Steckkontakte für Platinenmontage
- Stromversorgung inklusive; Batteriebetrieb möglich



Leistungsstarkes Piezoverstärkermodul E-505.10

Speziell für hochdynamische Schaltanwendungen optimiertes Einschubmodul für das modulare Piezocontrollersystem E-500.

Der integrierte rauscharme Verstärker liefert Spitzenströme bis zu 10 A im Spannungsbereich von -30 bis +130 V.

- 10 A Spitzenstrom, Spitzenleistung bis zu 1000 W
- Kleinsignalbandbreite > 15 kHz
- Rauschen 1,0 mV_{rms}
- Positionsregelung (optional)
- Digitale Schnittstellen- / Displaymodule (optional)



Hochlineares Verstärkermodul mit Ladungssteuerung E-506.10

Das Verstärkermodul E-506.10 kann Spitzenströme von 2 A in einem Spannungsbereich von -30 bis 130 V abgeben und aufnehmen, und ist für den Einsatz im Piezocontrollersystem E-500 vorgesehen.

- 280 W Spitzenleistung
 - Integrierte Temperaturüberwachung zum Schutz vor Überhitzung
 - Optional: Positionsregelung, digitale Schnittstellen, Display
- Die elektrische Schaltung erfordert einen masselosen Aufbau der Piezosysteme und entsprechende Anschlüsse.



Geschalteter Verstärker mit Energierückgewinnung E-617

Leistungsstark und gleichzeitig sparsam ermöglicht der E-617 den hochdynamischen Dauerbetrieb von Piezoaktoren mit großer Kapazität. Versionen zur Hutschienenmontage und OEM-Modul erhältlich.

- Spitzenstrom bis 2 A
- Hoher Dauerstrom bis 1 A
- Bandbreite bis 3,5 kHz



Hochleistungs-Piezoverstärker E-618

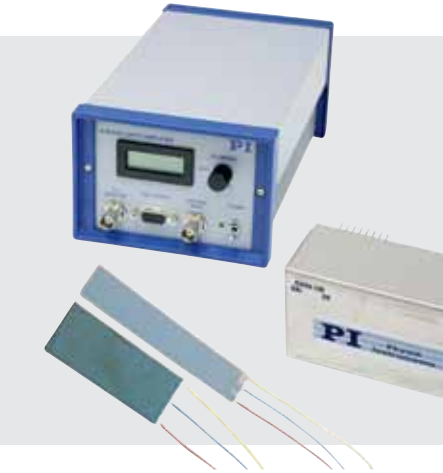
Der E-618 ist speziell auf PICMA® Piezoaktoren mit Anschlüssen für hohe Ströme abgestimmt. Die Kombination ist vor allem für hochdynamische Daueranwendungen wie z.B. Prüfeinrichtungen für Einspritzventile geeignet.

- Spitzenstrom bis 20 A
- Dauerstrom bis 0,8 A
- Bandbreite bis 15 kHz
- Integrierte Auswertung für Temperatursensor
- Optional mit digitalen Schnittstellen



Piezoverstärker für die Ansteuerung von Biege-, Scheraktoren und DuraAct

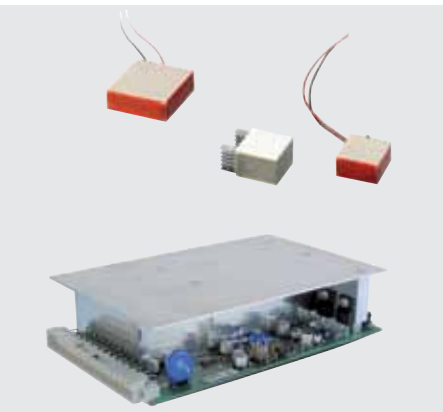
FÜR BIEGE- UND SCHERAKTOREN, DURAAct WANDLER



Piezoverstärker E-650 für Multilayer-Biegeaktoren

Biegeaktoren mit Multilayer-Aufbau bieten große Stellwege mit mittleren Kräften, z.B. für dynamische Schaltanwendungen

- Speziell für den Betrieb von dynamischen Multilayer-Piezobiegeaktoren ohne Positionssensor
- Ausgangsspannungsbereich 0 bis 60 V
- Zweikanalige Tischausführung oder OEM-Version zum Auflöten auf Platine
- 300 mA Spitzenstrom



Piezoverstärker E-413 für DuraAct und PICA Shear

Scheraktoren bieten hohe Linearität, hohe Steifigkeit und Dynamik.

- Ausgangsspannungsbereich bis -100 bis +400 V oder $\pm 250V$
- 100 mA Spitzenstrom
- OEM-Modul und Tischgerät für PICA Shear Scherpiezoaktoren
- OEM-Modul für piezoelektrische DuraAct Flächenwandler



OEM-Modul E-835: Bipolarer Betrieb für piezoelektrische DuraAct Flächenwandler

DuraAct Elemente können als Aktor, Sensor oder Energy Harvester eingesetzt werden.

- 120 mA Spitzenstrom
- Ausgangsspannungsbereich -100 bis +250 V
- Kompakt: 87 x 50 x 21 mm
- Hohe Bandbreite bis über 4 kHz

Piezoverstärker für die Ansteuerung von PICA Piezoaktoren

AUSGANGSSPANNUNGSBEREICH BIS 1100 V

Modularer Hochleistungs-Piezoverstärker / Controller E-421, E-471

Hochlast-Piezoaktoren sind für den dynamischen Betrieb vorgesehen. Sie erreichen Stellkräfte bis zu 30 000 N.

- 0,5 A Spitzenstrom
- Ausgangsspannungsbereich 3 bis 1100 V oder bipolar
- Optional: Positionsregelung, digitale Schnittstellen, Display



Hochleistungs-Piezoverstärker E-481

Geschalteter Verstärker für hochdynamischen Betrieb von PICA Piezoaktoren mit hoher Kapazität. Um die unregelmäßige Positioniergenauigkeit zu verbessern, können zusätzlich digitale Linearisierungsalgorithmen implementiert werden. Damit werden dann Linearitätswerte um 99% erreicht.

- Spitzenstrom bis 2 A
- Dauerstrom > 0,6 A
- Bandbreite > 10 kHz
- Integrierte Auswertung für Temperatursensor
- Optional: Positionsregelung, digitale Schnittstellen, Display



Kompaktes Tischgerät oder OEM-Modul E-462 (oben)

- Kompakter Einkanalverstärker
- Ausgangsspannungsbereich 10 bis 1000 V
- Netz- oder 12 V Batteriebetrieb
- Für statischen oder quasi-statischen Betrieb

PICA Piezoverstärkermodul E-508

- Spitzenstrom bis zu 50 mA
- Ausgangsspannungsbereich 3 bis ±1100 V oder bipolar
- Einschubmodul für E-500 System
- Für Schaltanwendungen: Spezialversion E-508.OE (400 mA)
- Positionsregelung (optional)
- Schnittstellen-/Displaymodule (optional)



Piezoverstärker

TECHNISCHE DATEN

| | E-610 | E-831 | E-503 / E-505 / E-505.10 | E-506 | E-617 / E-504 | E-618 |
|-------------------------|-----------------------|---|---|---|--|---|
| | OEM-Modul | Miniatur-OEM-Modul | Einschubmodule für E-500 Controllersystem | Ladungsgesteuert, E-500 Controller-system | geschalteter Verstärker, mit Energierückgewinnung, verschiedene Ausführungen | Leistungsverstärker mit hohem Ladestrom |
| Ausgangsspannung | -30 bis 130 V | -20 bis 120 V / -30 bis 130 V (abh. vom Netzteil) | -30 bis 130 V | -30 bis 130 V | -30 bis 130 V | -30 bis 130 V |
| Eingangsspannung | -2 bis 12 V | -2 bis 12 V | -2 bis 12 V | -2 bis 12 V | -2 bis 12 V | -2 bis 12 V |
| Spitzenstrom | 180 mA (<15 ms) | 100 mA | 140 mA / 2 A / 10 A | 2 A | 2 A | 20 A |
| Dauerstrom | 100 mA | 50 mA | 40 / 215 / 215 mA | 215 mA | 1 A | 0,8 A |
| Rauschen, 0 bis 100 kHz | 1,6 mV _{rms} | 1 mV _{rms} | <0,5. / <0,7 / 1,0 mV _{rms} | <0,6 mV _{rms} | <30 mV _{rms} , <100 mV _{pp} | 2 mV _{rms} (1 µF) |
| Bandbreite, Kleinsignal | 1 kHz | 3,5 kHz | 3 / 5 / 10 kHz | 5 kHz | 3,5 kHz | 15 kHz |
| Linearität | 10 bis 15% | 10 bis 15% | 10 bis 15% | 2 bis 5% | 10 bis 15% | 10 bis 15% |
| Piezoanschluss | LEMO, Steckerleiste | Lötstifte | LEMO | LEMO, 3-polig, potentialfrei | Klemmen / Steckerleiste, LEMO | LEMO |
| Abmessungen | 7TE/3HE | 50 x 30 x 14 mm | 14TE/3HE | 14TE/3HE | 7 bis 14TE/3HE | 42TE/3HE |
| Betriebsspannung | 12–30 V | -27 V, +127 V. ±15 V | E-500 System | E-500 System | 23-26 V / E-500 System | 100–110 / 220–240 V bis 160 W |
| Leistungsaufnahme, max. | <30 W | <15 W | 30 / 45 / 55 W | 55 W | 30 W | |

alle: kurzschlussfest
Vollständige Beschreibung und alle technischen Daten s. www.pi.ws

Die Entscheidung für eine Piezoelektronik hängt von der konkreten Applikation ab. Die Anforderungen an Genauigkeit, Spitzenstrom und -spannung, Dynamik und Linearität sind unterschiedlich, hinzu kommen Kriterien wie zum Beispiel ein eingeschränkter Bauraum, die Anzahl der Achsen, oder auch die Forderung nach Steuerung über PC. Daher gibt es

keine Universalelektronik, die sich für alle Anwendungsbereiche gleich gut eignet.

Neben einer großen Auswahl analoger und digitaler Verstärker und Controller bietet PI auch kundenspezifische Produktentwicklungen und Anpassungen.

Das umfasst:

- Die komplette Breite unseres Produktspektrums von der elektronischen Komponente über Komplettergeräte als OEM-Platine bis hin zum modularen, gehausten System
- Fertigung in kleinen Stückzahlen wie auch in großen Serien
- Die Entwicklung anhand spezieller Produktnormen (landes- oder marktspezifische Standards wie z.B. Medizinproduktegesetz) und die entsprechende Zertifizierung
- Anpassung der Systeme an spezielle Umgebungsbedingungen (Vakuum, Welt-raum, Reinraum)
- Copy-Exactly Vereinbarungen

| Ihre Applikation ist hochdynamisch ... | Welcher Hochleistungs-Piezoverstärker ist geeignet? |
|--|---|
| Positionieren mit Sub-Nanometergenauigkeit und hervorragender Stabilität | E-505 Verstärkermodul im Controllersystem E-500; für Langzeitstabilität optional Positionsregelung mit kapazitiven oder Dehnmessstreifen-Sensoren |
| Dynamisches Scannen mit hoher Linearität | E-506 Linearisierter Verstärker mit Ladungssteuerung für maximale Dynamik; E-505 Leistungsverstärker mit Positionsregelung |
| Dynamisches Scannen im Dauerbetrieb | E-617, E-504 geschalteter Verstärker mit Energierückgewinnung für möglichst geringen Energiebedarf |
| Dynamisches Scannen im Dauerbetrieb, hohe kapazitive Lasten | E-618 mit besonders hohem Ladestrom bis 20 A für sehr steile Anstiegsflanken E-505.10 Verstärker mit hohem Ladestrom bis 10 A |
| Schnelles Schalten, geringe Zyklenzahl | E-505.10 Verstärker mit hohem Ladestrom bis 10 A; E-617, E-504 geschalteter Verstärker mit Energierückgewinnung |

| | E-650 | E-413 | E-835 | E-421 / E-47x | E-481 | E-462 |
|-------------------------|---|--------------------------------|--------------------|---|---|---------------------------|
| | für Multilayer-Bieger, auch als OEM-Modul | für Scheraktoren / für DuraAct | für DuraAct | Modul oder im Chassis, optionale Schnittstellen | geschalteter Verstärker, mit Energierückgewinnung | auch als OEM-Gerät |
| Ausgangsspannung | 0 bis 60 V | -250 bis +250 / -100 bis 400 V | -100 bis 250 V | 3 bis 1100 V oder bipolar | bis 1100 V oder bipolar | 10 bis 1000 V |
| Eingangsspannung | -5 bis 5 V | -5 bis 5 V / -2 bis 8 V | -4 bis 10 V | 0 bis 11 V | 0 bis 11 V | 0 bis 10 V |
| Spitzenstrom | 18 mA | 100 mA | 120 mA | 500 mA | 2 A | 0,5 mA |
| Dauerstrom | 6 mA | 24 mA | 40 mA | 100 mA | 600 mA | 0,3 mA |
| Rauschen, 0 bis 100 kHz | 5 mV _{rms} | 100 mV _{pp} (100 nF) | 2 mV _{pp} | <25 mV _{rms} | 150 mV _{rms} | 50 mV _{rms} |
| Bandbreite, Kleinsignal | bis 6 kHz | 10 kHz | bis 4,2 kHz | >10 kHz | <5 kHz | für statische Anwendungen |
| Spannungsverstärkung | 6 ±0,1 | 50 ±1 | 25 | 100 ±1 | 100 ±1 | 100 ±1 |
| Piezoanschluss | D-Sub | D-Sub / Steckerleiste | Lötunkte | HV-LEMO | HV-LEMO | HV-LEMO |
| DC-Offset | - | externes Pot. | - | Pot. | Pot. | Pot. |
| Abmessungen | 160 x 125 x 50 mm | 14 TE/3HE, 220 x 105 x 54 mm | 87 x 50 x 21 mm | 42TE/3HE-Modul bis 19" Rack | 288 x 450 x 158 mm (19" Rack) | 205 x 150 x 73 mm |
| Betriebsspannung | 90–240 V | 24 V | 12 V | 100–120/220–240 V | 100–120/220–240 V | 10–15 V |
| Leistungsaufnahme, max. | 30 W | 48 W | 18 W | 150 W | 150 W | 1 W |

alle: kurzschlussfest
Vollständige Beschreibung und alle technischen Daten s. www.pi.ws

Die vollständige Beschreibung der in dieser Übersicht vorgestellten Produkte finden Sie bei uns im Internet unter www.pi.ws sowie im PI Hauptkatalog, den wir auf Wunsch gerne zusenden.

OEM-Shakerelektronik für Ultraschallwandler

Je nach benötigtem Hub kann der Spannungsbereich angepasst werden.

- Kleine Abmessung: 35 x 65 x 50 mm
- Bandbreite bis 20 kHz
- Leistung bis 5 W
- 24/7 Betrieb



Mikropumpen antreiben

Piezoelemente sind ideale Antriebe für miniaturisierte Pump- und Dosiersysteme.

- Kompakte OEM-Elektronik
- Geeignet zur Platinenmontage (Lab-on-a-chip)
- Frequenz- und Amplitudensteuerung
- Optional mit Display



Piezotechnologie

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Grundlagen der Piezoelektrizität | 35 |
| Piezoelektrischer Effekt, ferroelektrische Polarisierung, Ausdehnung der polarisierten Piezokeramik | |
| Piezoelektrische Aktormaterialien | 36 |
| Werkstoffe und Eigenschaften | |
| Auslenkungsarten piezoelektrischer Aktoren | 37 |
| Longitudinale Stapelaktoren 37 – Scheraktoren, Picoactuator® 38 PT-Tube Rohraktoren 39 – Kontraktoren 40 – Biegeaktoren 41 | |
| Herstellung von Piezoaktoren | 42 |
| Multilayer-Folientechnologie 42 – Presstechnologie 43 PT-Tube Rohraktoren, DuraAct 44 | |
| Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren | 45 |
| Auslenkungsverhalten | 45 |
| Nichtlinearität 45 – Hysterese, Kriechen 46 – Positionsregelung 47 | |
| Temperaturabhängiges Verhalten | 48 |
| Kräfte und Steifigkeiten | 50 |
| Vorspannung, Belastbarkeit, Steifigkeit 50 – Kräfteerzeugung und Auslenkung, Typische Lastfälle 51 – Aktordimensionierung und energetische Betrachtung 53 | |
| Dynamischer Betrieb | 54 |
| Resonanzfrequenz, Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen? Dynamische Kräfte | |
| Elektrische Ansteuerung | 55 |
| El. Verhalten, El. Kapazität, Positionierbetrieb 55 – Leistungsaufnahme des Piezo- aktors, Wärmeenergieerzeugung im Piezoelement, Kontinuierlicher dynamischer Betrieb 56 Schaltanwendungen, Pulsbetrieb 57 | |
| Umgebungsbedingungen | 58 |
| Vakuumumgebung, Edelgase, Magnetfelder, Gammastrahlung, Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit, Flüssigkeiten | |
| Zuverlässigkeit von PICMA® Multilayeraktoren | 59 |
| Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung 59 – Lebensdauer im dynamischen Dauerbetrieb 60 | |
| Verstärkertechnik: Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren | 61 |
| Charakteristisches Verhalten von Piezoverstärkern | 61 |
| Leistungsanforderungen für den Piezobetrieb, Aussteuerkurve, Einstellen der Steuerspannung | |
| Lösungen für dynamische Daueranwendungen | 62 |
| Geschaltete Verstärker mit Energierückgewinnung, Schutz des Piezoaktors durch Temperaturüberwachung, geltende Patente 62 – Linearisierter Verstärker für Piezo- auslenkung ohne Hysterese, Ladungssteuerung, Ladung und Auslenkung 63 | |
| Handhabung von Piezoaktoren | 64 |
| Mechanischer Einbau 64 – Elektrischer Anschluss, sicherer Betrieb 65 | |

Piezoelektrizität

GRUNDLAGEN

Piezoelektrischer Effekt

In piezoelektrischen Materialien bewirkt eine Druckeinwirkung, dass Ladungen an den Oberflächen entstehen. Dieser direkte piezoelektrische Effekt, auch Generator- oder Sensoreffekt genannt, wandelt mechanische in elektrische Energie um. Umgekehrt bewirkt in diesen Materialien der inverse piezoelektrische Effekt eine Längenänderung beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Dieser Aktoreffekt wandelt elektrische in mechanische Energie um.

Der piezoelektrische Effekt tritt sowohl in einkristallinen Materialien als auch in polykristallinen ferroelektrischen Keramiken auf. In Einkristallen genügt als Voraussetzung eine Unsymmetrie im Aufbau der Elementarzellen des Kristallgitters, d.h. eine polare Achse, die sich unterhalb der Curie-Temperatur T_c herausbildet.

Piezoelektrische Keramiken weisen zusätzlich eine spontane Polarisation auf, d.h. der positive und der negative Ladungsschwerpunkt der Elementarzellen sind voneinander getrennt. Gleichzeitig verlängert sich die Achse der Elementarzelle in Richtung der spontanen Polarisation und es kommt zu einer spontanen Dehnung (Abb. 1).



Abb. 2: Der Schnitt durch eine ferroelektrische Keramik zeigt deutlich die unterschiedlich polarisierten Domänen innerhalb der einzelnen Kristallite (Quelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden)

Ferroelektrische Polarisation

Zur Minimierung der inneren Energie des Materials bilden sich in den Kristalliten der Keramik ferroelektrische Domänen (Abb. 2). Innerhalb dieser Volumenbereiche sind die Orientierungen der spontanen Polarisation gleich. Die unterschiedlichen Ausrichtungen aneinandergrenzender Domänen sind durch Domänenwände getrennt. Um die Keramik auch makroskopisch piezoelektrisch zu machen, ist ein ferroelektrischer Polungsprozess nötig.

Dabei wird ein starkes elektrisches Feld von einigen kV/mm angelegt, das im zuvor ungeordneten Keramikverbund eine Unsymmetrie erzeugt. Das elektrische Feld sorgt für eine Umorientierung der spontanen Polarisation. Gleichzeitig wachsen Domänen mit günstiger Orientierung zur Polungsfeldrichtung, solche mit ungünstigerer Orientierung schrumpfen. Die Domänenwände werden dabei im Gitterverband verschoben. Nach dem Polungsprozess bleibt der größte Teil der Umorientierungen auch ohne elektrisches Feld erhalten (Abb. 3). Ein geringerer Teil der Domänenwände wird jedoch beispielsweise durch innere mechanische Spannungen zurück verschoben.

Ausdehnung der polarisierten Piezokeramik

Das erneute Anlegen eines Feldes unterhalb der Polungsfeldstärke führt zu einer Ausdehnung der Keramik. Ein Teil dieses Effekts ist auf die piezoelektrische Ionenverschiebung im Kristallgitter zurückzuführen und heißt intrinsisch.

Der extrinsische Anteil beruht auf einer reversiblen ferroelektrischen Umorientierung der Elementarzellen. Er erhöht sich mit wachsender Ansteuerfeldstärke und ist für den wesentlichen Teil der nichtlinearen Hysterese- und Drifteigenschaften von ferroelektrischen Piezokeramiken verantwortlich.

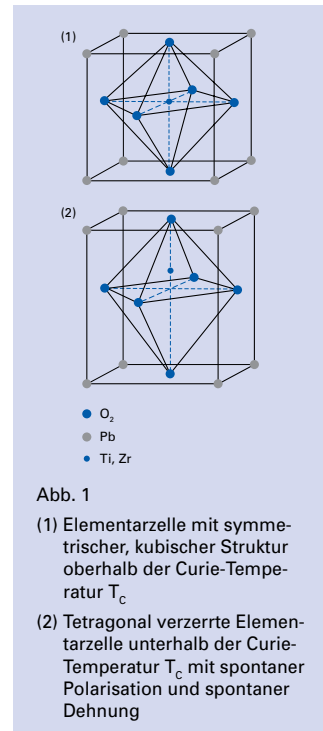


Abb. 1

- (1) Elementarzelle mit symmetrischer, kubischer Struktur oberhalb der Curie-Temperatur T_c
- (2) Tetragonal verzerrte Elementarzelle unterhalb der Curie-Temperatur T_c mit spontaner Polarisation und spontaner Dehnung

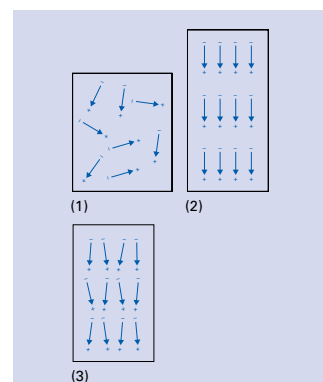


Abb. 3

- Ausrichtung der spontanen Polarisation innerhalb einer piezo-ferroelektrischen Keramik
- (1) Unpolarisierte Keramik
 - (2) Keramik während der Polung
 - (3) Keramik nach der Polung

Piezelektrische Aktormaterialien

WERKSTOFFE UND EIGENSCHAFTEN

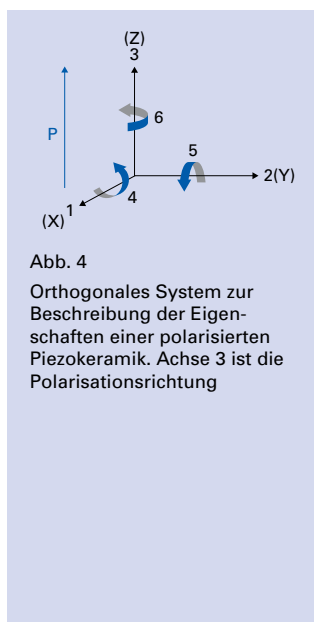


Abb. 4
Orthogonales System zur Beschreibung der Eigenschaften einer polarisierten Piezokeramik. Achse 3 ist die Polarisationsrichtung

Kommerziell verfügbare piezokeramische Werkstoffe basieren meist auf dem Materialsystem Bleizirkonat-Bleititanat (PZT). Zusätze anderer Materialien beeinflussen die Eigenschaften der PZT-Zusammensetzungen.

Für aktorische Anwendungen kommen ferroelektrisch weiche Piezokeramiken mit niedrigen Umpolfeldstärken zum Einsatz, da hier die extrinsischen Domänenbeiträge zu hohen Gesamt-Piezomodulen führen. Dazu gehören die Piezokeramiken PIC151, PIC153, PIC255, PIC252 und PIC251.

Ferroelektrisch harte PZT-Materialien wie PIC181 und PIC300 werden vorwiegend in Leistungsschallanwendungen eingesetzt. Sie besitzen eine höhere Umpolfestigkeit, hohe mechanische Güten sowie geringere Hysteresewerte bei reduzierten piezoelektrischen Deformationskoeffizienten. Die Picoactuator®-

Serie basiert auf dem einkristallinen Material PIC050, das eine hochlineare, hysteresefreie Kennlinie bei allerdings kleinen piezoelektrischen Koeffizienten aufweist.

Aktormaterialien von PI Ceramic

PIC151 Modifizierte PZT-Keramik mit ausgewogenen Aktoreigenschaften. Hohe piezoelektrische Kopplung, mittlere Permittivität, relativ hohe Curie-Temperatur. Standardwerkstoff für die Produktlinien PICA Stack, PICA Thru und PT Tube

PIC153 Modifizierte PZT-Keramik für große Auslenkungen. Hohe piezoelektrische Deformationskoeffizienten, hohe Permittivität, relativ geringe Curie-Temperatur. Sonderwerkstoff für die Produktlinien PICA Stack und PICA Thru sowie für verklebte Biegeaktoren

PIC255 Modifizierte PZT-Keramik, die sich besonders für den bipolaren Betrieb, in Scheraktoren sowie bei hohen Umgebungstemperaturen eignet. Hohe Umpolfeldstärke (>1kV/mm), hohe Curie-Temperatur. Standardwerkstoff für die Produktlinien PICA Power, PICA Shear, PT-Tube und DuraAct

PIC252 Variante des PIC255-Werkstoffes mit niedrigerer Sintertemperatur für den Einsatz im Multilayer-Foliensprozess. Standardwerkstoff für die Produktlinien PICMA® Stack, PICMA® Chip, PICMA® Bender sowie einiger DuraAct-Produkte

PIC050 Kristalliner Werkstoff für lineare, hysteresefreie Positionierung mit kleinen Auslenkungen im offenen Regelkreis. Hervorragende Stabilität, hohe Curie-Temperatur. Standardwerkstoff für die Picoactuator®-Produktlinie

| | PIC151 | PIC153 | PIC255/252 | PIC050 |
|---|--------|--------|------------|--------|
| Physikalische und dielektrische Eigenschaften | | | | |
| Dichte ρ [g/cm ³] | 7,80 | 7,60 | 7,80 | 4,70 |
| Curie-Temperatur T_c [°C] | 250 | 185 | 350 | >500 |
| Relative Permittivitätszahl in Polarisationsrichtung $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ | 2400 | 4200 | 1750 | 60 |
| quer zur Polung ϵ_{11}/ϵ_0 | 1980 | | 1650 | 85 |
| Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ [10 ⁻³] | 20 | 30 | 20 | <1 |
| Elektromechanische Eigenschaften | | | | |
| Piezoelektrischer Deformationskoeffizient, Piezomodul* | | | | |
| d_{31} [pm/V] | -210 | | -180 | |
| d_{33} [pm/V] | 500 | 600 | 400 | 40 |
| d_{15} [pm/V] | | | 550 | 80 |
| Akustomechanische Eigenschaften | | | | |
| Elastische Nachgiebigkeitskonstante | | | | |
| s_{11}^E [10 ⁻¹² m ² /N] | 15,0 | | 16,1 | |
| s_{33}^E [10 ⁻¹² m ² /N] | 19,0 | | 20,7 | |
| Mechanischer Gütefaktor Q_m | 100 | 50 | 80 | |

Erläuterungen und weitere Daten siehe Katalog „Piezokeramische Materialien und Bauelemente“
* Der Deformationskoeffizient entspricht dem Ladungskoeffizienten bei Piezokomponenten. Der Wert ist von der Ansteuerfeldstärke abhängig (Abb. 22, S. 45). Die Angabe in der Tabelle bezieht sich auf sehr geringe Feldstärken (Kleinsignal).

PI Ceramic bietet eine große Vielfalt weiterer Materialien an, darunter bleifreie Piezokeramiken, die derzeit vor allem als Ultraschallwandler eingesetzt werden.

Für anwendungsspezifische Eigenschaften können Aktoren aus Sondermaterialien hergestellt werden, wobei die technische Umsetzung individuell geprüft werden muss. www.piceramic.de

Piezelektrische Aktoren

AUSLENKUNGSARTEN



Longitudinale Stapelaktoren

In longitudinalen Piezoaktoren wird das elektrische Feld in der Keramikschiicht parallel zur Richtung der Polarisierung angelegt. Dadurch wird eine Dehnung oder Auslenkung in Richtung der Polarisierung induziert. Einzelne Schichten liefern relativ geringe Auslenkungen. Um technisch nutzbare Auslenkungswerte zu erreichen, werden Stapel-

Bei Ansteuerung mit einem elektrischen Feld parallel zur Richtung der Polarisierung findet im Piezoaktor neben der Verlängerung in Polarisationsrichtung, die bei Longitudinalaktoren genutzt wird, gleichzeitig immer eine Kontraktion orthogonal zur Polarisierung statt. Dieser sogenannte transversale piezoelektrische Effekt wird bei Kontraktoren, Piezorohren oder Biegeaktoren ausgenutzt.

aktoren aufgebaut, in denen viele Einzelschichten mechanisch in Reihe und elektrisch parallel verschaltet sind (Abb. 5).

Die Wandlungseffizienz elektrischer in mechanische Energie ist für longitudinale Stapelaktoren hoch. Sie erzielen Nominalauslenkungen von etwa 0,1 bis 0,15 % der Aktorlänge. Die Nominalblockierkräfte liegen in der Größenordnung von 30 N/mm² bezogen auf die Aktorquerschnittsfläche. Im Aktor können damit Werte bis zu mehreren 10.000 Newton erreicht werden.

Longitudinale Stapelaktoren eignen sich durch ihre hohen Resonanzfrequenzen hervorragend für den hochdynamischen Betrieb. Eine mechanische Vorspannung des Aktors unterdrückt dynamisch induzierte Zugkräfte im spröden Keramikmaterial, so dass Ansprechzeiten im Mikrosekundenbereich und hohe mechanische Leistungen erzielt werden können.

Beispiele für longitudinale Stapelaktoren sind die Multilayer-Piezoaktoren PICMA® Stack, PICMA® Gekapselt, PICMA® Chip, sowie die aus Einzelplatten geklebten Stapelaktoren PICA Stack, PICA Power, PICA Thru, und der kristalline Picoaktor®.

| | |
|-------------------|---|
| ΔL_{long} | longitudinale Auslenkung [m] |
| $d_{33(GS)}$ | longitudinaler piezoelektrischer Großsignal-Deformationskoeffizient [m/V] |
| n | Anzahl der gestapelten Keramiksichten |
| V | Betriebsspannung [V] |

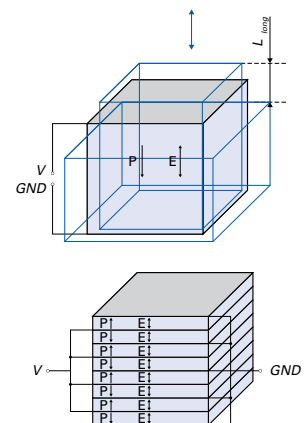


Abb. 5

$$\Delta L_{long} = n d_{33(GS)} V \quad (\text{Gleichung 1})$$

Auslenkungsarten (Fortsetzung)

Ein typischer Einsatzfall für Scheraktoren sind Antriebselemente für sog. Stick-Slip-Motoren. Scheraktoren von PI Ceramic werden in den Produktlinien PICA Shear und Picoactuator angeboten.

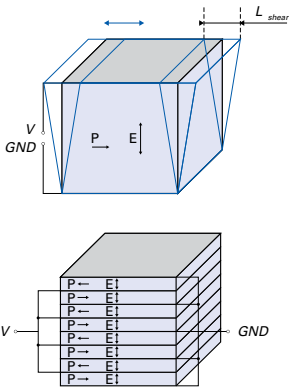


Abb. 6

$$\Delta L_{shear} = n d_{15(GS)} V \quad (\text{Gleichung 2})$$

Scheraktoren

In piezoelektrischen Scheraktoren wird das elektrische Feld in der Keramikscheibe orthogonal zur Richtung der Polarisation angelegt und die Auslenkung in Richtung der Polarisation ausgenutzt. Auch hier summieren sich in gestapelten Aktoren die Auslenkungen der einzelnen Schichten auf (Abb. 6).

Die Scherdeformationskoeffizienten d_{15} sind in der Regel die größten der piezoelektrischen Koeffizienten. Bei Ansteuerung mit den nominalen Spannungen erreichen PIC-Keramiken Werte $d_{15(GS)}$ bis zu 2000 pm/V. Die zulässige Ansteuerfeldstärke ist begrenzt, um ein Umpolen der senkrecht orientierten Polarisation zu vermeiden.

Wenn Querkräfte auf den Aktor wirken, wird die Scherbewegung zusätzlich durch eine Biegung überlagert. Derselbe Effekt tritt beim dynamischen Betrieb in der Nähe der Resonanzfrequenz auf.



Außerdem können Scherspannungen nicht durch eine mechanische Vorspannung kompensiert werden. Beides begrenzt die sinnvolle Aufbauhöhe von Scherstapeln.

Scheraktoren kombiniert mit Longitudinalaktoren ergeben sehr kompakte XYZ-Stapel mit hohen Resonanzfrequenzen.

Picoactuator® Technologie

Picoactuator® Longitudinal- und Scheraktoren bestehen aus dem kristallinen piezoelektrischen Material PIC050. Die spezifische Auslenkung liegt bei $\pm 0,02\%$ (Scheraktoren) bzw. $\pm 0,01\%$ (Longitudinaler Piezoaktor) der Aktorlänge und ist damit 10 mal geringer als für klassische Piezoaktoren aus Bleizirkonatbleititanat (PZT). Die Auslenkung ist dabei hochlinear mit einer Abweichung von nur 0,2 %.

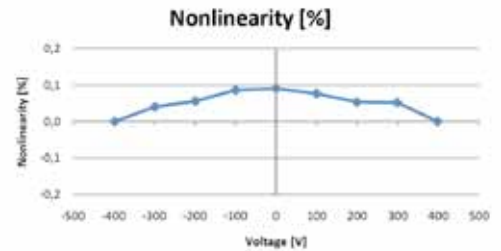


Abb. 7: Gemessene Nichtlinearität eines Picoactuator®





Rohraktoren

Rohraktoren sind radial polarisiert. Die Elektroden sind auf den Mantelflächen aufgebracht, so dass das Feld parallel zur Polarisation ebenfalls in radialer Richtung verläuft. Rohraktoren nutzen den transversalen piezoelektrischen Effekt, um Auslenkungen zu erzeugen. Möglich sind axiale Auslenkungen bzw. Längenänderungen (Abb. 8), laterale Bewegungen wie Änderungen des Radius (Abb. 9), sowie Biegungen (Abb. 10).

Um die Biegung eines Rohres zu erzeugen, wird die äußere Elektrode in mehrere Abschnitte segmentiert. Durch Ansteuerung der jeweils gegenüber liegenden Elektroden verbiegt sich das Rohr in lateraler Richtung.

Dabei auftretende unerwünschte Verkippen oder axiale Bewegungen können durch komplexere Elektrodenanordnungen vermieden werden. So erzeugt eine 8-Elektrodenanordnung eine Gegenbiegung und erreicht insgesamt eine laterale Verschiebung ohne Verkippen.

PI Ceramic bietet Präzisionsrohraktoren in der Produktgruppe PT-Tube an.

Rohraktoren werden häufig in Raster-sondenmikroskopen zur Erzeugung dynamischer Scan-Bewegungen im offenen Regelkreis sowie als Fiberstretcher angewendet.

Weitere Anwendungsbeispiele finden sich in der Mikrodosierung zum Aufbau von Nanoliterpumpen oder Tintenstrahldruckern.

Axiale Auslenkung

$$\Delta L_{axial} = d_{31(GS)} \frac{l}{t} V$$

(Gleichung 3)

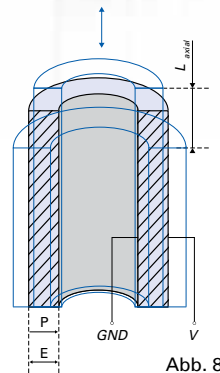


Abb. 8

Radiale Auslenkung

Für große Radien gilt folgende Abschätzung:

$$\Delta L_{radial} \approx d_{31(GS)} \frac{ID}{2t} V$$

(Gleichung 4)

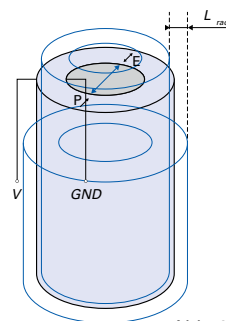


Abb. 9

Biegeaktoren, XY-Scannerrohre

$$\Delta L_{lateral} = 0.9 d_{31(GS)} \frac{l^2}{ID} V$$

(Gleichung 5)

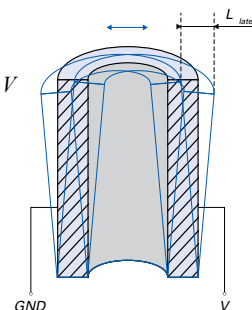


Abb. 10

| | |
|------------------------------------|--|
| ΔL_{shear} | Scherauslenkung [m] |
| $d_{15(GS)}$ | piezoelektrischer Großsignal-Scher-Deformationskoeffizient [m/V] |
| n | Anzahl der gestapelten Keramikschichten |
| V | Betriebsspannung [V] |
| ΔL_{axial} | axiale Rohrauslenkung [m] |
| ΔL_{radial} | radiale Rohrauslenkung [m] |
| $\Delta L_{lateral}$ | laterale Rohrauslenkung [m] |
| $d_{31(GS)}$ | transversaler piezoelektrischer Großsignal-Deformationskoeffizient [m/V] |
| l | Rohrlänge [m] |
| ID | Rohrinnendurchmesser [m] |
| t | Rohrwandstärke (= (OD-ID)/2) [m] |
| Alle Rohrabmessungen s. Datenblatt | |

Auslenkungsarten (Fortsetzung)

ΔL_{trans} transversale Auslenkung [m]

$d_{31(GS)}$ transversaler piezoelektrischer Großsignal-Deformationskoeffizient [m/V]

l Länge der Piezokeramik in Auslenkungsrichtung [m]

h Dicke einer Keramikschicht [m]

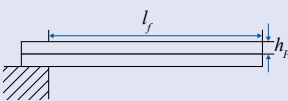
n Anzahl der gestapelten Keramikschichten

V Betriebsspannung [V]

ΔL_{bend} Biegeauslenkung [m]

l_f freie Biegeerlänge [m] (s. S. 12)

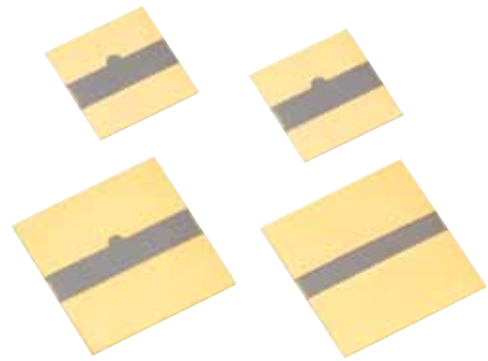
h_p Höhe Piezokeramikelement [m]



R_h Verhältnis der Höhen von Substrat (h_s) und Piezokeramikelement (h_p) in einem Verbundbieger ($R_h = h_s/h_p$)

R_E Verhältnis der Elastizitätsmodule von Substrat (E_s) und Piezokeramikelement (E_p) in einem Verbundbieger ($R_E = E_s/E_p$)

V_F Festspannung zur Biegeansteuerung [V] (V und V_F können mit einer Offsetspannung überlagert werden)



Kontraktoren

Piezokontraktoren sind typischerweise flache Bauelemente. Ihre Auslenkung erfolgt quer zur Polarisationsrichtung und zum elektrischen Feld. Die Auslenkung von Kontraktoren beruht auf dem transversalen piezoelektrischen Effekt, wobei nominal bis ca. 20 μm erreicht werden.

Multilayerelemente bieten gegenüber einschichtigen Piezoelementen entscheidende Vorteile für die technische Realisierung: Aufgrund der größeren Querschnittsfläche erzeugen sie höhere Kräfte bzw. können sie mit niedrigerer Ansteuerspannung betrieben werden (Abb. 11).

Durch die Kontraktion entstehen in der Piezokeramik Zugspannungen, die in der spröden Keramik Schäden verursachen können. Eine Vorspannung ist daher empfehlenswert.

Für die Patchaktoren der Produktgruppe DuraAct wird ein Piezokontraktor in einem

Polymer einlaminiert. Dadurch wird eine mechanische Vorspannung erreicht, die die Keramik vor Bruch schützt (s. S. 14)

Multilayer-Kontraktoren können als Sonderversionen der PICMA® Bender-Produktlinie angefragt werden (s. S. 13).

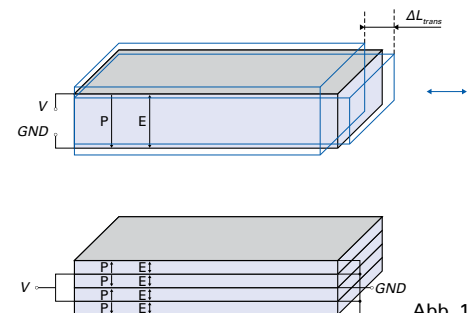


Abb. 11

$$\Delta L_{trans} = d_{31(GS)} \frac{l}{h} V$$

(Gleichung 6)



Biegeaktoren

Aufgebracht auf ein Substrat wirken Kontraktoren als Biegeaktoren (Abb. 12). Für den Aufbau von Vollkeramikbiegern werden zwei aktive Piezokeramikelemente zusammengefügt und elektrisch angesteuert. Wird ein passives Substrat z.B. aus Metall oder Keramikmaterial verwendet, spricht man von Verbundbiegern. Die Piezokeramikelemente können sowohl als Einzelschichten als auch als Multilayer-Elemente ausgeführt sein.

Piezoelektrische Biegeaktoren funktionieren nach dem Prinzip von Thermobimetallen. Durch die Kopplung eines flächigen Piezokontraktors mit einer zweiten Schicht ent-

steht bei der Ansteuerung und Kontraktion der Keramik ein Biegemoment, welches die geringe transversale Längenänderung in eine große Biegeauslenkung senkrecht zur Kontraktion umwandelt. Je nach Geometrie sind Übersetzungsfaktoren von 30 bis 40 erreichbar, allerdings auf Kosten der Wandlungseffizienz und der Krafterzeugung.

Mit piezoelektrischen Biegeaktoren können Auslenkungen bis zu einigen Millimetern bei Ansprechzeiten im Millisekundenbereich erzielt werden. Die Blockierkräfte sind jedoch relativ gering. Sie liegen typischerweise im Bereich von Millinewton bis zu wenigen Newton.

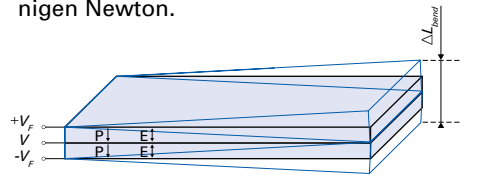


Abb. 12: Auslenkung von Biegeaktoren

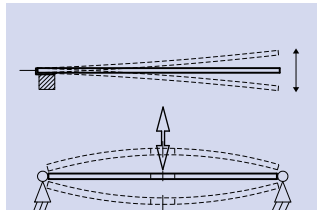


Abb. 17

Durch die Wahl einer zweiseitigen Einspannung mit drehbarer Lagerung (unten) statt einer einseitigen festen Einspannung (oben) kann das Verhältnis zwischen Auslenkung und Kraft des Biegers verändert werden. Die Auslenkung reduziert sich um den Faktor vier während sich die Blockierkraft um den Faktor vier erhöht. Besonders hohe Kräfte können erreicht werden, wenn man statt streifenförmiger Bieger zweiseitig eingespannte flächige Biegeplatten bzw. -scheiben einsetzt.

Vollkeramikbieger für die Parallelschaltung

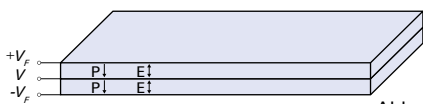


Abb. 13

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d \frac{l_f^2}{h_p^2} V \quad (\text{Gleichung 7})$$

Vollkeramikbieger für die Reihenschaltung

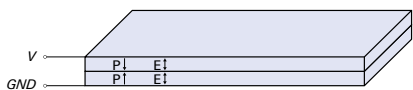


Abb. 14

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{31(GS)} \frac{l_f^2}{h_p^2} V \quad (\text{Gleichung 8})$$

(Betrieb gegen die Polarisationsrichtung nur mit reduzierter Spannung bzw. Feldstärke möglich, vgl. S. 45ff.)

Zweischicht-Verbundbieger mit einseitiger Auslenkung

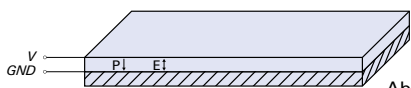


Abb. 15

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{31(GS)} \frac{l_f^2}{h_p^2} \frac{2R_h R_E (1+R_h)}{R_h R_E (1+R_h)^2 + 0.25(1-R_h^2 R_E^2)} V$$

(Gleichung 9)

Anwendung DuraAct, PICMA® Bender (Sonderversionen)

Symmetrischer Dreischicht-Verbundbieger für die Parallelschaltung

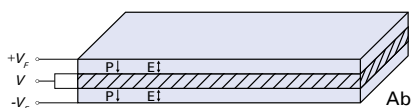


Abb. 16

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{31(GS)} \frac{l_f^2}{h_p^2} \frac{1+R_h}{1+1.5R_h+0.75R_h^2+0.125R_E R_h^3} V$$

(Gleichung 10)

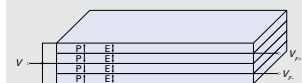
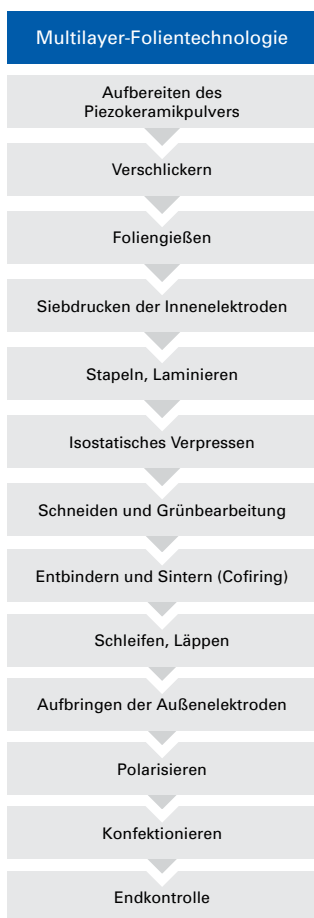


Abb. 18: Die Produkte des PICMA® Bender-Sortiments sind Vollkeramikbieger, deren zwei Piezokeramikelemente jeweils aus mehreren aktiven Schichten bestehen (Multilayeraktoren s. S. 11).

Herstellung

VON PIEZOAKTOREN



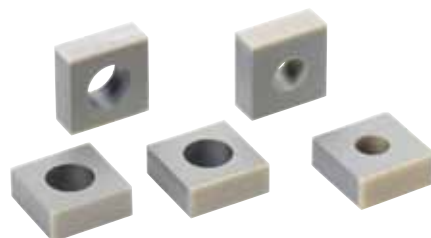
Multilayer-Folientechnologie

Die Technologien zur Herstellung piezoelektrischer Aktoren tragen entscheidend zu deren Funktion, Qualität und Effizienz bei. PI Ceramic beherrscht ein breites Spektrum an Techniken, von der Multilayer-Folientechnologie für PICMA® Stapel- und Biegeaktoren über geklebte Stapelaktoren für Longitudinal- und Scherauslenkungen bis hin zum Aufbau kristalliner Picoactuator® Aktoren, der DuraAct Flächenwandler und piezokeramischer Rohre.

PI Ceramic Multilayeraktoren, kurz PICMA®, werden in größeren Chargen in Folientechnik gefertigt. Zunächst werden dünne PZT-Folien hergestellt, die noch im ungesinterten Zustand mit dem Innenelektrodenmuster bedruckt und anschließend zu einem Multilayerverbund laminiert werden. Im darauffolgenden Cofiring-Prozess werden Keramik und Innenelektroden gemeinsam gesintert. Das fertige, monolithische Multilayer-Piezoelement hat keinerlei Polymeranteile mehr.

Die Innenelektroden aller PICMA® Aktoren sind keramisch isoliert (Abb. 19). PICMA® Stack-Aktoren verwenden dazu einen patentierten Aufbau, bei dem eine dünne keramische Isolierfolie die Elektroden abdeckt, ohne die Auslenkung signifikant einzuschränken.

Je feinkörniger das verwendete Keramikpulver ist, umso dünnere Multilayer-Schichten können hergestellt werden. In PICMA® Stack Stapelaktoren beträgt die Höhe der aktiven Schichten 60 µm, in PICMA® Biegeaktoren 20 bis 30 µm, so dass die Bieger mit einer sehr geringen Nominalspannung von nur 60 V betrieben werden können.



In den vergangenen Jahren wurden die Techniken zur Bearbeitung der Aktoren im ungesinterten Zustand kontinuierlich weiterentwickelt. Daher können auch runde Geometrien bzw. PICMA® Aktoren mit Innenbohrung hergestellt werden



Für Anwendungen in extrem hohen Luftfeuchtigkeiten bzw. in rauen Industrieumgebungen wurden hermetisch gekapselte PICMA® entwickelt. Sie sind mit korrosionsfesten Edelstahlbälgen, Inertgasfüllung, Glasdurchführungen und Laserschweißungen ausgerüstet

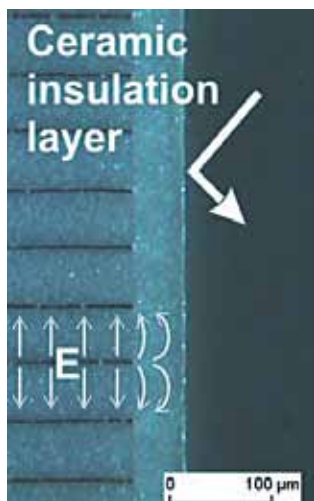
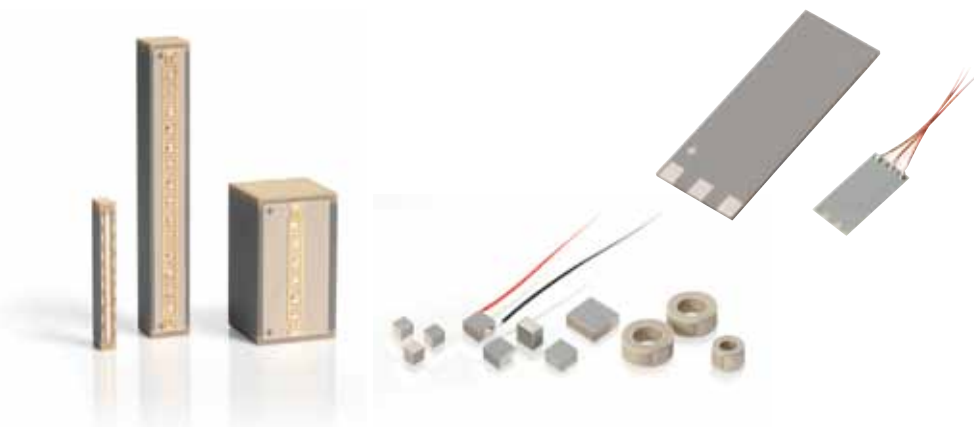


Abb. 19: In PICMA® Stack Aktoren deckt eine keramische Isolierfolie die inneren Elektroden ab



PICMA® Multilayeraktoren werden in unterschiedlichsten Formen hergestellt. Je nach Anwendungsfall können sie zusätzlich mit angepassten keramischen oder metallischen Endstücken, zusätzlicher Umhüllung, Temperatursensoren usw. konfektioniert werden

Presstechnologie

PICA Stapelaktoren wie PICA Stack, Thru oder Shear bestehen aus dünnen piezokeramischen Platten mit einer Standardschichtdicke von 0,5 mm. Zur Herstellung werden piezokeramische Zylinder oder Blöcke in Presstechnologie geformt, gesintert und anschließend mit Hilfe von Diamant-Wafersägen in Platten getrennt. Metallische Elektroden werden je nach Material mit Dünn- oder Dickschichtverfahren aufgebracht, anschließend wird die Keramik polarisiert.

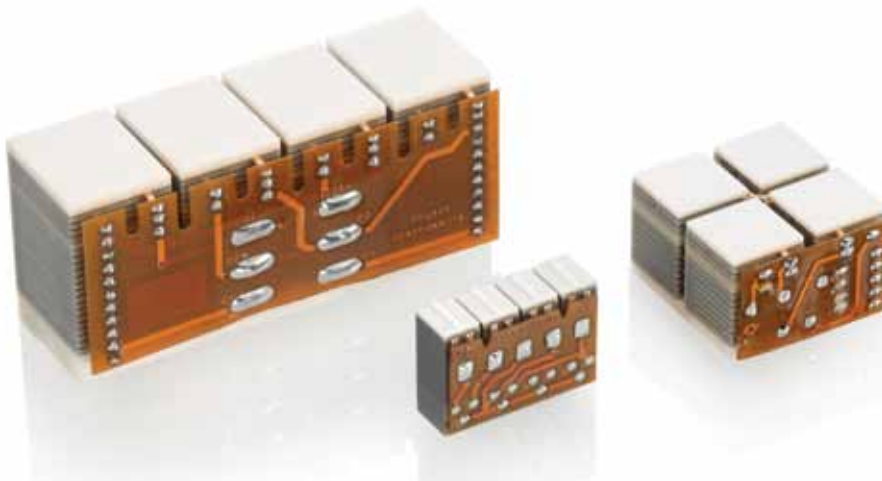
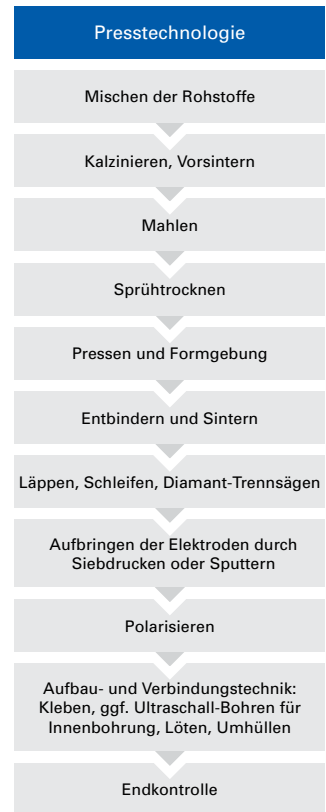
Der Aufbau zu Stapelaktoren erfolgt durch Verkleben der Platten, wobei zur Kontaktierung der aufgetragenen Elektroden jeweils ein dünnes metallisches Kontaktplättchen zwischen zwei Keramikplatten liegt. Ein Lötprozess verbindet die Kontaktplättchen miteinander, anschließend wird der fertige Stapel mit einer Polymerschuttschicht und gegebenenfalls mit einem zusätzlichen Schrumpfschlauch versehen.

Picoactuator® Piezoaktoren bestehen aus kristallinen Schichten mit einer Dicke von 0,38 mm. Im Unterschied zur Keramik wird die Orientierung der spontanen Polarisati-

on nicht durch eine ferroelektrische Polung sondern durch die Schnitttrichtung im Einkristall bestimmt. Alle weiteren Verarbeitungs- und Montageschritte ähneln denen gestapelter PICA Aktoren.



Fertig konfektionierte Stapelaktoren mit Metallendstück und DMS-Ausdehnungssensor (links), mit Anschlusslitzen, Temperatursensor und transparentem FEP-Schrumpfschlauch (rechts)



Die Endverarbeitung der in Presstechnologie hergestellten piezokeramischen Platten ist auf den künftigen Einsatz abgestimmt. Im Bild verschiedene Piezoaktormodule

Herstellung von Piezoaktoren (Fortsetzung)



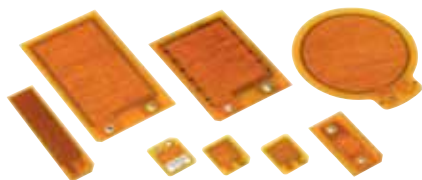
Strukturierte Elektroden erlauben die gezielte Ansteuerung der Rohraktoren

PT-Tube Rohraktoren

PT-Tube-Aktoren werden aus piezokeramischen Zylindern gefertigt, die zuvor in Press-technologie hergestellt wurden. Der Außendurchmesser und die Endflächenparallelität werden durch spitzenloses Rundschleifen und Planschleifen präzise eingestellt. Das Innenloch wird mit einem Ultraschallverfahren gebohrt.

Anschließend erfolgt die Metallisierung mit Dünn- bzw. Dickschichtelektroden und gegebenenfalls die Strukturierung der Elektroden mit einem Laserabtragsverfahren.

Neben dem beschriebenen Ablauf zur Herstellung von Präzisionsrohren mit engsten geometrischen Toleranzen steht auch das preisgünstigere Extrusionsverfahren bei kleinen Durchmessern zur Verfügung.



Verschiedene Formen von DuraAct Aktoren mit Keramikplatten in Press- und Multilayertechnologie

DuraAct Flächenaktoren/-wandler

Ausgangsprodukt zur Herstellung von DuraAct Patch-Aktoren sind Piezokeramik-Kontraktorplatten. Je nach Piezokeramikhöhe werden diese Platten in Presstechnologie ($> 0,2$ mm) oder Folientechnologie (0,05 bis 0,2 mm) gefertigt. Die Platten werden mit leitfähigen Gewebelagen, Positionierfolien und Polyimid-Abdeckfolien zu einem Komposit verbunden.

Der Verbindungsprozess erfolgt in einem Autoklaven im Vakuum mithilfe eines Injektionsverfahrens. Dadurch entstehen völlig blasenfreie Lamine höchster Qualität.

Das Aushärtetemperaturprofil des Autoklaven ist so gewählt, dass eine definierte interne Vorspannung der Piezokeramikplatten aufgrund der unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten der beteiligten Materialien entsteht.

Das Ergebnis dieser patentierten Technologie sind robuste, biegbare Wandlerelemente, die in großen Stückzahlen gefertigt werden können.



Einlamierte Keramikschichten in einer DuraAct Wandleranordnung (Array)

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

AUSLENKUNGSVERHALTEN

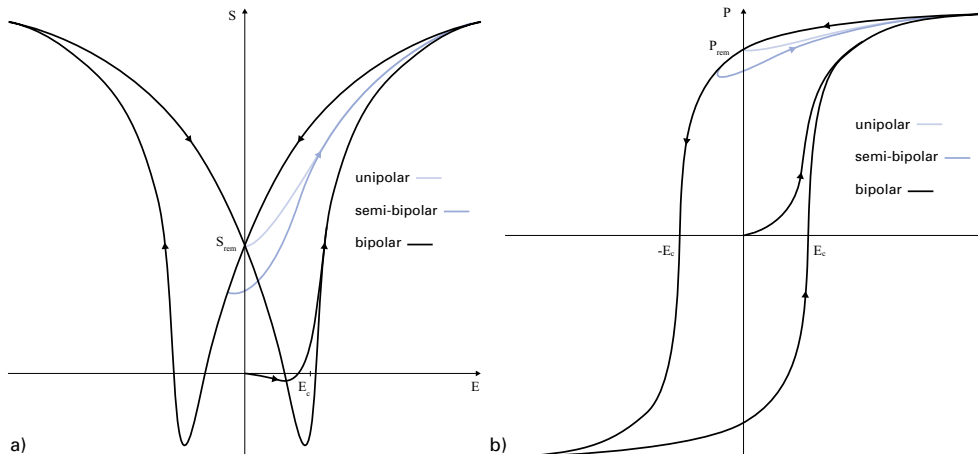


Abb. 20: Auslenkung ferroelektrischer Piezokeramiken bei verschiedenen Ansteueramplituden parallel zur Polarisationsrichtung. Großsignalkennlinien in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke E
 a) elektromechanisches Verhalten der longitudinalen Dehnung S , b) dielektrisches Verhalten der Polarisation P

Nichtlinearität

Die spannungsabhängigen Auslenkungskurven von Piezoaktoren haben aufgrund der extrinsischen Domänenanteile einen stark nichtlinearen und hysteresebefahenen Verlauf. Aus der Nominalauslenkung kann daher nicht linear auf Zwischenpositionen

bei bestimmter Ansteuerung interpoliert werden. Die elektromechanischen und dielektrischen Großsignalkennlinien von Piezokeramiken verdeutlichen die Charakteristik (Abb. 20). Der Ursprung der Diagramme wird jeweils durch den thermisch depolarisierten Zustand definiert.

Die Form beider bipolaren Großsignalkennlinien wird vom ferroelektrischen Umpolvorgang beim Erreichen der Koerzitivfeldstärke E_C im Gegenfeld bestimmt. Die dielektrische Kennlinie zeigt die sehr großen Polarisationsänderungen an diesen Umschaltpunkten. Gleichzeitig schlägt die Kontraktion der Keramik nach der Umpolung wieder in eine Ausdehnung um, da die Polarisation und die Feldstärke erneut die gleiche Orientierung besitzen. Diese Eigenschaft verleiht der elektromechanischen Kennlinie ihre charakteristische Schmetterlingsform. Ohne elektrisches Feld verbleiben die remanenten Polarisierungen $P_{rem}/-P_{rem}$ bzw. die remanente Dehnung S_{rem} .

Piezoaktoren werden in der Regel unipolar angesteuert. Eine semibipolare Ansteuerung erhöht die Dehnungsamplitude, verursacht aber eine stärkere Nichtlinearität und Hysteresis, die sich aus den zunehmenden extrinsischen Domänenanteilen am Auslenkungssignal ergeben (Abb. 21).

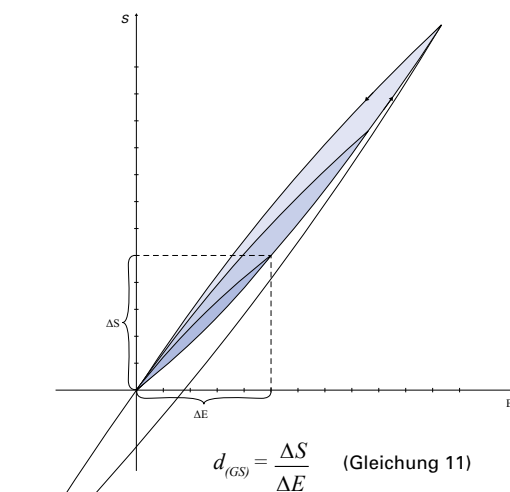


Abb. 21: Unipolare und semibipolare elektromechanische Kennlinien ferroelektrischer Piezokeramiken und Definition des piezoelektrischen Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ als Anstieg zwischen den Umkehrpunkten einer Teilhysteresekurve

In den PI- und PIC-Datenblättern werden die freien Auslenkungen der Aktoren bei Nominalspannung angegeben.

Piezoelektrischer Deformationskoeffizient (Piezomodul)

Die Anstiege $\Delta S/\Delta E$ zwischen den beiden Umkehrpunkten der nichtlinearen Hysteresekurven werden als piezoelektrische Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ definiert (Abb. 21). Wie der progressive Verlauf der Kurven zeigt, nehmen diese Koeffizienten gewöhnlich mit steigender Feldamplitude zu (Abb. 22).

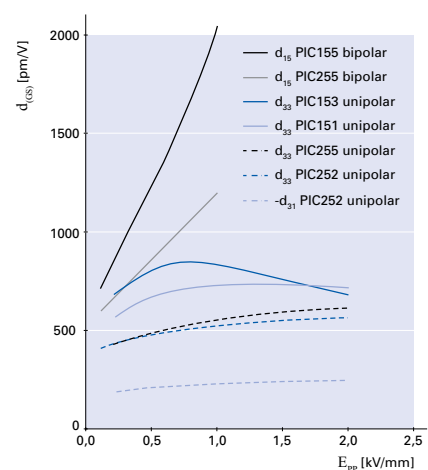


Abb. 22: Piezoelektrische Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Bei sehr kleinen Feldamplituden stimmen die Werte der Koeffizienten mit den Materialkonstanten von S. 36 überein

Auslenkungsverhalten (Fortsetzung)

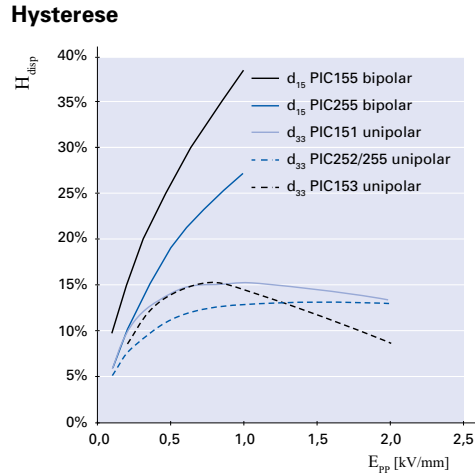
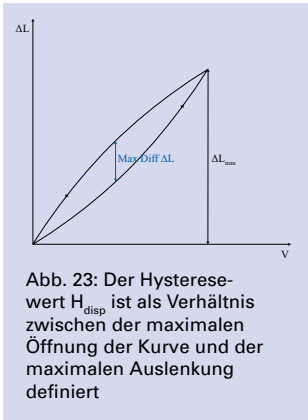


Abb. 24: Auslenkungshysterese H_{disp} verschiedener Aktormaterialien im ungeregelten, spannungsgesteuerten Betrieb für verschiedene Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung

Im ungeregelten, spannungsgesteuerten Betrieb zeigen die Auslenkungskennlinien piezokeramischer Aktoren eine starke Hysterese (Abb. 24), die mit zunehmender Spannung bzw. Feldstärke in der Regel ansteigt. Besonders hohe Werte entstehen bei Scheraktoren bzw. bei bipolarer Ansteuerung. Verantwortlich für diese Zunahme ist die steigende Beteiligung extrinsischer Umpolungsvorgänge am Gesamtsignal.

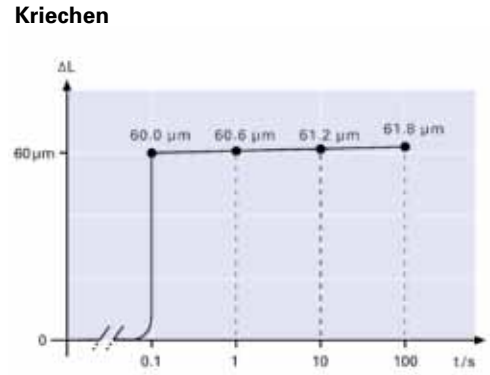


Abb. 25: Auslenkung eines Piezoaktors nach Ansteuerung mit einer Sprungfunktion. Das Kriechen verursacht ungefähr 1% Auslenkungsänderung pro logarithmischer Zeitdekade

Das Kriechen beschreibt die Änderung der Auslenkung mit der Zeit bei unveränderter Ansteuerungsspannung. Die Kriechgeschwindigkeit nimmt logarithmisch mit der Zeit ab. Die gleichen Materialeigenschaften, die für die Hysterese verantwortlich sind, erzeugen auch das Kriechverhalten:

$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{t=0,1s} \left[1 + \gamma \lg \left(\frac{t}{0,1s} \right) \right] \quad (\text{Gleichung 12})$$

| | |
|---------------------|--|
| t | Zeit [s] |
| $\Delta L(t)$ | Auslenkung als Funktion der Zeit [m] |
| $\Delta L_{t=0,1s}$ | Auslenkung bei 0,1 Sekunden nach dem Ende der Spannungsänderung [m] |
| γ | Kriechfaktor, abhängig von den Materialeigenschaften (ungefähr 0,01 bis 0,02, entspricht 1% bis 2% pro Zeitdekade) |

Abschätzung der zu erwartenden Auslenkung

Setzt man die Werte aus Abb. 22 in die Gleichungen 3 bis 10 (s. S. 39–41) ein, so kann man daraus die erreichbare Auslenkung bei einer bestimmten Ansteuerungsspannung abschätzen. Die Feldstärke kann aus den Schichthöhen des konkreten Bauelementes und der Ansteuerungsspannung V_{pp} berechnet werden. Die Schichthöhen der PI Ceramic-Standardprodukte sind ab S. 42 angegeben.

Die tatsächlich erreichbare freie Auslenkung des Bauelementes hängt von weiteren Faktoren ab, wie der mechanischen Vorspannung, der Temperatur, der Ansteuerfrequenz, den Abmessungen und dem passiven Materialanteil.

Positionsregelung

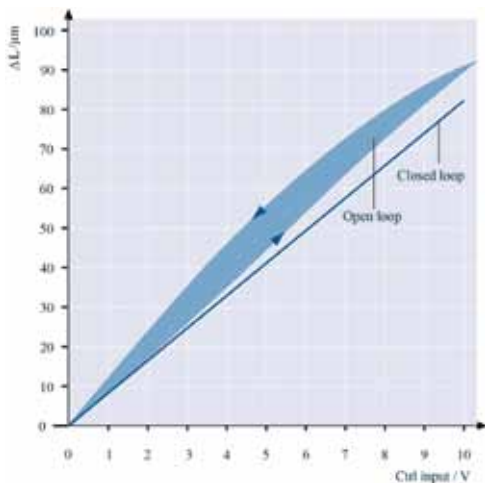


Abb. 26: Eliminieren von Hysterese und Kriechen im piezokeramischen Aktor durch Positionsregelung

Hysterese und Kriechen der piezokeramischen Aktoren lassen sich am wirkungsvollsten durch eine Positionsregelung im geschlossenen Regelkreis beseitigen. Zum Aufbau von positionsgeregelten Systemen

können die PI Ceramic-Piezoaktoren der PICA Stack und PICA Power Produktreihe optional mit applizierten Dehnungsmessstreifen angeboten werden.

In Anwendungen mit rein dynamischer Ansteuerung kann die Hysterese auch ohne Regelung durch die Verwendung eines Ladungsverstärkers wirkungsvoll auf Werte von 1 bis 2 % reduziert werden (s. S. 63).

PI bietet eine breite Palette von positionsgeregelten Piezosystemen mit kapazitiven Sensoren oder Dehnungsmessstreifen an. Durch Kombination von Aktor und Sensor mit einer geeigneten Führungsmechanik, einem rauscharmen Verstärker sowie entsprechenden Regelalgorithmen erreichen diese Systeme Positioniergenauigkeiten im Sub-Nanometer-Bereich.

www.pi.ws

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

TEMPERATURABHÄNGIGES VERHALTEN

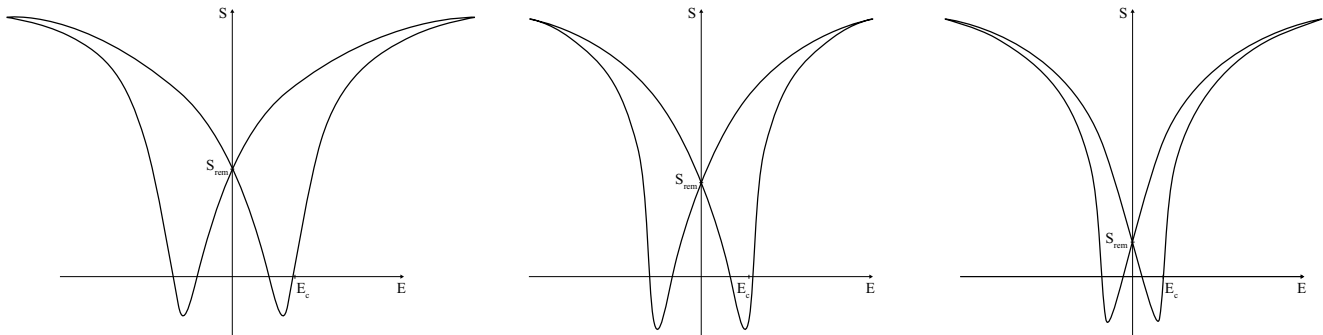


Abb. 27: Bipolare elektromechanische Großsignal-Kennlinie piezokeramischer Aktoren bei verschiedenen Temperaturen. Von links: Verhalten bei tiefen Temperaturen, bei Raumtemperatur, bei hohen Temperaturen

Maßgeblich ist die Temperaturabhängigkeit der remanenten Dehnung und der Koerzitivfeldstärke unterhalb der Curie-Temperatur. Dadurch ändern sich zum einen die erreichbare Auslenkung bei elektrischer Ansteuerung und zum anderen die Abmessungen des Piezokeramikelements.

Je kühler der Piezoaktor ist, umso größer sind die remanente Dehnung S_{rem} und die Koerzitivfeldstärke E_{rem} (Abb. 27). Die Kennlinien verlaufen bei abnehmenden Temperaturen immer flacher, wodurch der durch eine unipolare Ansteuerung induzierbare Dehnungsanteil immer geringer wird, obwohl die Gesamtamplitude der bipolaren Dehnungskurve sich über weite Temperaturbereiche kaum verändert. Die remanente Dehnung ist umso größer je geringer die Temperatur ist. Insgesamt hat die Piezokeramik einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, d.h. die Piezokeramik verlängert sich. Zum Vergleich: Eine Strukturkeramik zieht sich bei Abkühlung mit einem relativ geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zusammen. Dieser überraschende Effekt ist umso stärker, je vollständiger die Piezokeramik polarisiert ist.

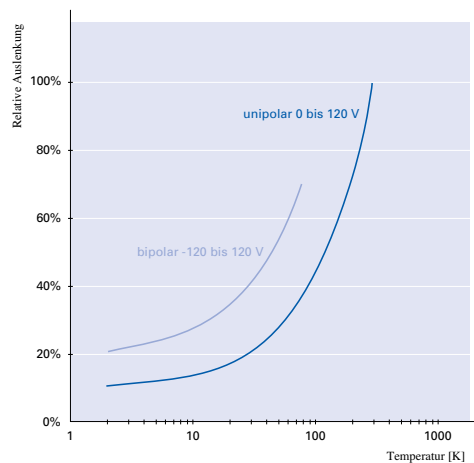


Abb. 28: Relative Abnahme der Auslenkung am Beispiel eines PICMA® Stack Aktors im kryogenen Temperaturbereich bei verschiedenen Ansteuersignalen bezogen auf die Raumtemperatur-Nominalauslenkung

Auslenkung in Abhängigkeit von der Temperatur

Wie stark sich eine Kenngröße des Piezoaktors mit der Temperatur ändert, ist vom Abstand zur Curie-Temperatur abhängig. PICMA® Aktoren besitzen eine relativ hohe Curie-Temperatur von 350 °C. Ihre Auslenkung ändert sich zu hohen Einsatztemperaturen nur um den Faktor 0,05 %/K.

Bei kryogenen Temperaturen verringert sich die Auslenkung. Piezoaktoren erreichen bei unipolarer Ansteuerung im Temperaturbereich von flüssigem Helium noch 10 bis 15 % der Auslenkung bei Raumtemperatur. Deutlich höhere Auslenkungen bei tiefen Temperaturen können durch eine bipolare Ansteuerung erzielt werden. Da die Koerzitivfeldstärke bei Abkühlung ansteigt (Abb. 27), ist es möglich, den Aktor mit höheren Spannungen auch entgegen seiner Polarisationsrichtung anzusteuern.

Abmessung in Abhängigkeit von der Temperatur

Der Temperatureausdehnungskoeffizient eines vollkeramischen PICMA® Stack Aktors beträgt näherungsweise -2,5 ppm/K. Dagegen führen in einem PICA Stack-Aktor die zusätzlichen Metall-Kontaktplättchen sowie die Klebstoffschichten zu einer nichtlinearen Charakteristik mit einem positiven Gesamtkoeffizienten (Abb. 29).

Wird ein Positioniersystem im geschlossenen Regelkreis betrieben, so eliminiert dies neben Nichtlinearität, Hysterese und Kriechen auch die Temperaturdrift. Die dafür vorzuhaltende Regelreserve reduziert jedoch die nutzbare Auslenkung.

Daher wird häufig die Temperaturdrift durch eine geeignete Auswahl der beteiligten Materialien, der Aktortypen oder des Systemdesigns passiv kompensiert. Beispielsweise haben vollkeramische PICMA® Bender Aktoren aufgrund ihres symmetrischen Aufbaus eine minimale Temperaturdrift in Auslenkungsrichtung.

Temperatureinsatzbereich

Der Standardtemperatureinsatzbereich verklebter Aktoren beträgt -20 bis 85 °C. Durch die Wahl von Piezokeramiken mit hohen Curie-Temperaturen und geeigneten Klebstoffen kann dieser Bereich erweitert werden. Die meisten PICMA® Multilayer-Produkte sind für den erweiterten Bereich von -40 bis 150 °C spezifiziert. Mit speziellen Loten kann der Temperaturbereich noch weiter nach oben ausgedehnt werden, so dass Sondermodelle von PICMA® Aktoren von -271 °C bis 200 °C, d.h. über eine Spanne von nahezu 500 K einsetzbar sind.

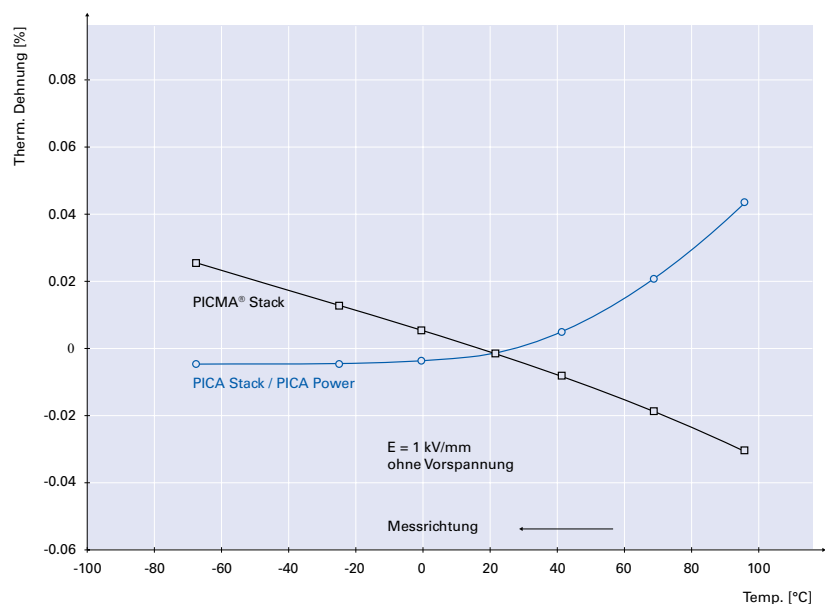


Abb. 29: Temperatureausdehnungsverhalten von PICMA® und PICA Aktoren bei elektrischer Großsignalansteuerung

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

KRÄFTE UND STEIFIGKEITEN

| | |
|-------|---|
| E^* | effektiver Elastizitätsmodul: linearer Anstieg einer Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Probekörpers oder -aktors aus dem entsprechenden Piezokeramikmaterial (Abb. 30) |
| A | Aktorquerschnittsfläche |
| l | Aktorlänge |

Vorspannung und Belastbarkeit

Die Dauerzugfestigkeiten spröder Piezokeramik- und Einkristallaktoren sind mit Werten im Bereich von 5 bis 10 MPa relativ gering. Daher wird empfohlen, die Aktoren in der Anwendung mechanisch vorzuspannen. Die Vorspannung sollte so niedrig wie möglich gewählt werden. Erfahrungsgemäß genügen zur Kompensation von dynamischen Kräften 15 MPa (s. S. 54), bei konstanter Belastung sollten 30 MPa nicht überschritten werden.

Querkräfte bewirken in kurzen Aktoren hauptsächlich Scherspannungen. Bei längeren Aktoren mit größerem Aspektverhältnis werden zusätzlich Biegespannungen erzeugt. Die Summe beider Spannungen ergeben maximale Querbelastbarkeiten, die für die PICA Shear-Aktoren im Datenblatt angegeben sind (s. S. 24). Die Werte können auf Aktoren mit ähnlicher Geometrie übertragen werden. Grundsätzlich wird jedoch empfohlen, die Aktoren durch Führungselemente vor Querkräften zu schützen.

Steifigkeit

Die Aktorsteifigkeit k_A ist ein wichtiger Parameter zur Berechnung von Krafterzeugung, Resonanzfrequenz und Systemverhalten. Piezokeramische Stapelaktoren zeichnen sich durch sehr hohe Steifigkeitswerte bis zu einigen Hundert Newton pro Mikrometer aus. Zur Berechnung dient folgende Gleichung:

$$k_{A \text{ Stack}} = \frac{E^* A}{l} \quad (\text{Gleichung 13})$$

Biegeaktoren hingegen haben um mehrere Größenordnungen geringere Steifigkeiten

von einigen Newton pro Millimeter. Neben der Geometrie hängt die Steifigkeit auch bei ihnen vom effektiven Elastizitätsmodul E^* ab. Die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurven (Abb. 30) ist aufgrund mechanischer Depolarisationsvorgänge ähnlich nicht-linear und hysteresebehaftet wie die der elektromechanischen Kennlinien (Abb. 21). Darüber hinaus hängt die Kurvenform von den jeweiligen elektrischen Ansteuerbedingungen, der Ansteuerfrequenz und der mechanischen Vorspannung ab, so dass Werte in einem Bereich von 25 bis 60 GPa gemessen werden können. In der Folge ist es daher schwer, einen allgemeingültigen Steifigkeitswert zu definieren.

Für die Angabe der technischen Daten für Piezoaktoren wird die quasistatische Großsignalsteifigkeit bei gleichzeitiger Ansteuerung mit einer hohen Feldstärke bzw. Spannung und geringer mechanischer Vorspannung bestimmt. Damit wird ein ungünstiger Betriebsfall betrachtet, d.h. in einer Anwendung ist die reale Aktorsteifigkeit häufig höher.

Die Klebeschichten in den PICA Aktoren reduzieren die Steifigkeiten nur wenig. Durch den Einsatz optimierter Technologien sind die Klebespalte nur wenige Mikrometer hoch, so dass die Großsignalsteifigkeit gegenüber Multilayeraktoren ohne Klebstoffschichten nur um ca. 10 bis 20 % geringer ist.

Einen weit stärkeren Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit hat das Aktordesign, z. B. ballige Kopfstücke mit einem relativ nachgiebigen Punktkontakt zur Gegenfläche.

Grenzen der Vorspannung

Bereits bei einigen Zehn MPa beginnt der Aktor mechanisch zu depolarisieren. Eine Großsignalansteuerung repolarisiert den Aktor, wodurch einerseits zwar die induzierte Auslenkung zunimmt, andererseits aber die effektiven Kapazitäts- und Verlustwerte ansteigen, was nachteilig für die Lebensdauer des Bauelementes ist.

Eine Druckvorspannung erzeugt partiell auch Zugspannungen (s. S. 64). Daher besteht bei sehr hohen Vorspannungen die Gefahr, dass die Zugspannungsfestigkeit lokal überschritten wird. Die Größe der möglichen Vorspannung wird nicht durch die Festigkeit des keramischen Materials bestimmt. Piezoaktoren erreichen Druckfestigkeiten von mehr als 250 MPa.

Krafterzeugung und Auslenkung

Die Erzeugung von Kraft oder Auslenkung im Piezoaktor lässt sich am besten aus dem Arbeitsdiagramm entnehmen (Abb. 32). Jede Kennlinie wird durch zwei Werte bestimmt: die Nominalauslenkung und die Blockierkraft.

Nominalauslenkung

Die Nominalauslenkung ΔL_0 ist in den technischen Daten eines Aktors spezifiziert. Zur Ermittlung des Wertes wird der Aktor frei, d. h. ohne Vorspannung durch eine Feder, betrieben, so dass bei der Auslenkung keine Kraft erzeugt werden muss. Nach dem Anlegen der entsprechenden Spannung wird die Auslenkung gemessen.

Blockierkraft

Die Blockierkraft F_{max} ist die maximal vom Aktor erzeugte Kraft. Diese Kraft wird erzielt, wenn man die Auslenkung des Aktors vollständig blockiert, d. h. er arbeitet gegen eine Last mit unendlich hoher Steifigkeit.

Da eine solche Steifigkeit real nicht existiert, wird die Blockierkraft folgendermaßen gemessen: Die Aktorlänge vor Ansteuerung wird erfasst. Anschließend wird der Aktor ohne Last bis zur Nominalauslenkung ausgelenkt und mit einer ansteigenden externen Kraft bis auf die Ausgangsposition zu-

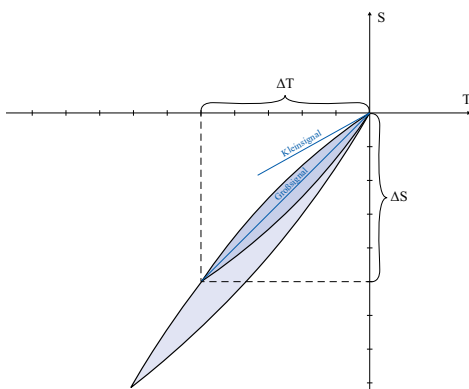


Abb. 30: Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eines piezokeramischen Stapelaktors bei Ansteuerung mit einer hohen Feldstärke, um mechanische Depolarisationen zu vermeiden. Der lineare Anstieg $\Delta T/\Delta S$ definiert den effektiven Großsignal-Elastizitätsmodul $E^*_{(GS)}$. Kleinsignalwerte der Elastizitätsmodule sind immer größer als Großsignalwerte

rück gedrückt. Die dafür notwendige Kraft ist die Blockierkraft.

Typische Lastfälle

Die Aktorsteifigkeit k_A kann aus dem Arbeitsdiagramm (Abb. 32) entnommen werden:

$$k_A = \frac{F_{max}}{\Delta L_0} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Sie entspricht dem invertierten Anstieg der Kennlinie. Mit dem Aktor kann bei entsprechender Last und Ansteuerung jeder Auslenkung-Kraft-Punkt auf und unterhalb der Nominalspannungs-Kennlinie erreicht werden.

Auslenkung ohne Vorspannung, Last mit geringer Steifigkeit

Arbeitet der Piezoaktor gegen eine Federkraft, verringert sich seine induzierte Auslenkung, da sich bei der Stauchung der Feder eine Gegenkraft aufbaut. Bei den meisten Anwendungen von Piezoaktoren ist die effektive Steifigkeit der Last k_L deutlich geringer als die des Aktors k_A . Die resultierende Auslenkung ΔL liegt daher nahe an der Nominalauslenkung ΔL_0 :

$$\Delta L \approx \Delta L_0 \left(\frac{k_A}{k_A + k_L} \right) \quad (\text{Gleichung 15})$$

Die Auslenkung-Kraft-Kurve in Abb. 31 rechts wird als Arbeitskennlinie des Aktor-Feder-Systems bezeichnet. Der Anstieg der Arbeitskennlinie $F_{eff}/\Delta L$ entspricht der Laststeifigkeit k_L .

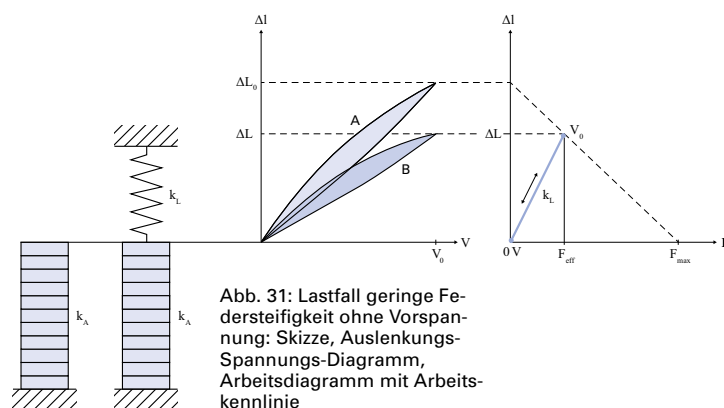


Abb. 31: Lastfall geringe Federsteifigkeit ohne Vorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

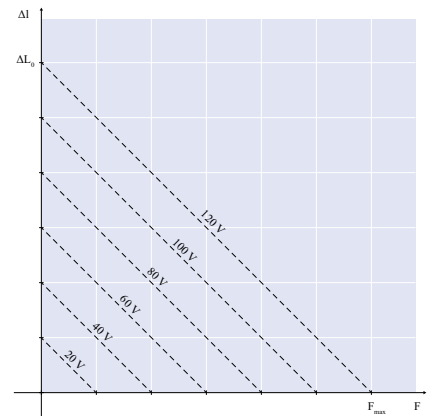


Abb. 32: Arbeitsdiagramm eines PICMA® Stack Aktors bei unipolarer Ansteuerung mit verschiedenen Spannungen

Kräfte und Steifigkeiten (Fortsetzung)

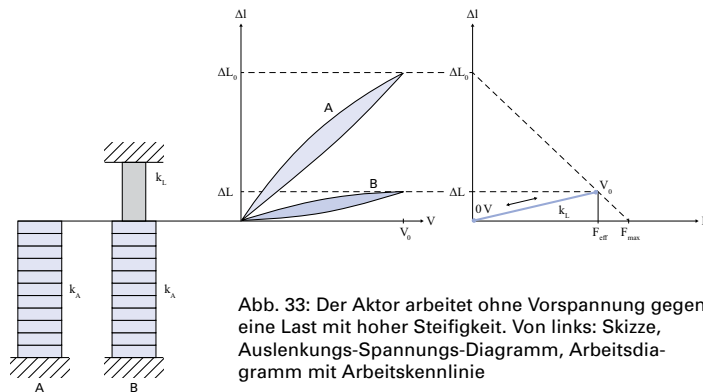


Abb. 33: Der Aktor arbeitet ohne Vorspannung gegen eine Last mit hoher Steifigkeit. Von links: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Krafterzeugung ohne Vorspannung, Last mit hoher Steifigkeit

Wenn große Kräfte erzeugt werden sollen, muss die Laststeifigkeit k_L größer als die des Aktors k_A sein (Abb. 33):

$$F_{eff} \approx F_{max} \left(\frac{k_L}{k_A + k_L} \right) \quad (\text{Gleichung 16})$$

Die sorgfältige Kraftereinleitung ist bei diesem Lastfall besonders wichtig, da im Aktor große mechanische Spannungen entstehen. Um eine hohe Lebensdauer zu erreichen, müssen lokale Zugspannungen unbedingt vermieden werden (s. S. 50).

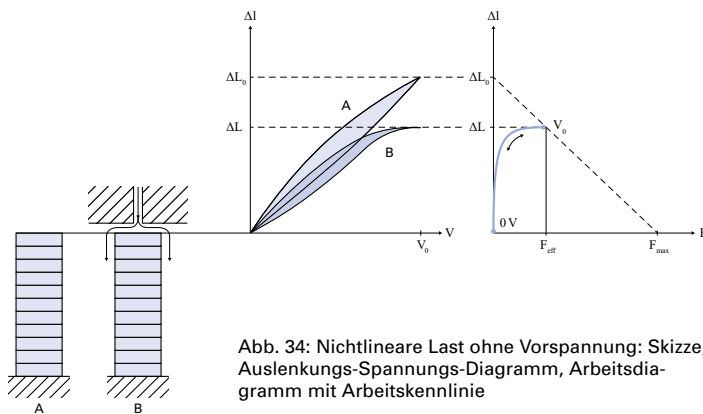


Abb. 34: Nichtlineare Last ohne Vorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Nichtlineare Last ohne Vorspannung, Öffnen und Schließen eines Ventils

Als Beispiel eines Lastfalls, bei dem eine nichtlineare Arbeitskennlinie entsteht, ist in Abb. 34 eine Ventilsteuerung skizziert. Der Start der Auslenkung entspricht dem Betrieb ohne Last. In der Nähe des Ventilschlusses wirkt eine stärkere Gegenkraft durch die Fluidströmung. Beim Erreichen des Ventilsitzes wird die Auslenkung nahezu vollständig blockiert, so dass sich nur die Kraft erhöht.

Große konstante Last

Wird auf den Aktor eine Masse gelegt, führt die Gewichtskraft F_V zu einer Stauchung des Aktors.

Die Nullposition bei Beginn der darauffolgenden Ansteuerung verschiebt sich entlang der Steifigkeitskennlinie des Aktors. Während der darauffolgenden Ansteuerung entsteht keine zusätzliche Kraft, so dass die Arbeitskennlinie näherungsweise dem Verlauf ohne Vorspannung entspricht.

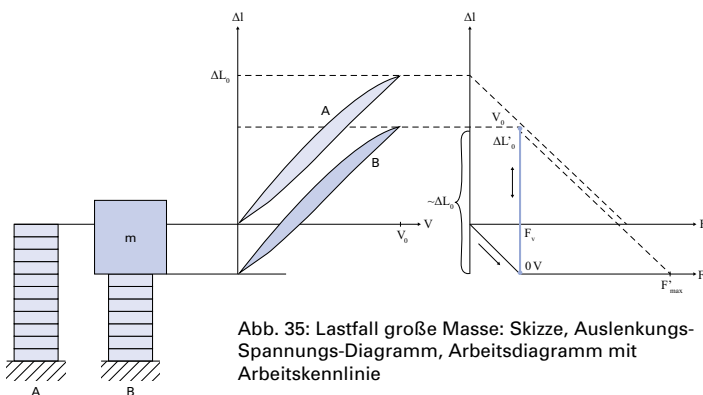


Abb. 35: Lastfall große Masse: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist die Dämpfung von Schwingungen einer Maschine mit großer Masse.

Beispiel: Die Steifigkeit steigt deutlich, wenn der Aktor elektrisch mit einer hohen Impedanz betrieben wird, wie sie bei Ladungsverstärkern gegeben ist (s. S. 63). Bei mechanischer Belastung wird eine Ladung generiert, die aufgrund der hohen Impedanz nicht abfließen kann, und daher ein versteifendes Gegenfeld erzeugt.

Federvorspannung

Wird die mechanische Vorspannung durch eine relativ weiche Feder in einem Gehäuse aufgebracht, findet die gleiche Verschiebung auf der Steifigkeitskennlinie wie beim Auflegen der Masse statt (Abb. 36). Bei elektrischer Ansteuerung erzeugt der Aktor jedoch eine kleine zusätzliche Kraft und die Auslenkung wird durch die Vorspannfeder gegenüber dem Fall ohne Last etwas reduziert (Gleichung 15). Die Steifigkeit der Vorspannfeder sollte daher mindestens eine Größenordnung unter der des Aktors liegen.

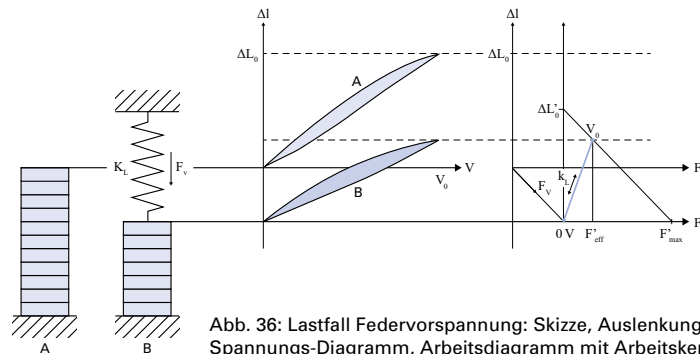


Abb. 36: Lastfall Federvorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Aktordimensionierung und energetische Betrachtung

Bei longitudinalen Stapelaktoren ist die Aktorlänge die bestimmende Größe für die Auslenkung ΔL_0 . Bei Nominalfeldstärken von 2 kV/mm sind Auslenkungen von etwa 0,10 bis 0,15 % der Länge erzielbar. Die Querschnittsfläche bestimmt die Blockierkraft F_{max} . Hier können etwa 30 N/mm² erreicht werden.

Für die erzielbare mechanische Energie $E_{mech} = (\Delta L_0 \cdot F_{max})/2$ ist demzufolge das Aktorvolumen der bestimmende Parameter.

Die Energiemenge E_{mech} , die beim Betrieb eines Aktors von elektrischer in mechanische Energie umgewandelt wird, entspricht der Fläche unter der Kennlinie in Abb. 37. Von dieser Gesamtmenge kann jedoch nur ein Bruchteil E_{out} an die mechanische Last abgegeben werden. Das mechanische System ist energetisch optimiert, wenn die Fläche ihr Maximum erreicht. Dieser Fall tritt ein, wenn die Laststeifigkeit und die Aktorsteifigkeit gleich sind. Die im Arbeitsdiagramm hellblau dargestellte Fläche entspricht diesem Betrag. Ein longitudinaler Piezoaktor kann ca. 2 bis 5 mJ/cm³ mechanische Arbeit verrichten, ein Biegeaktor erreicht etwa 10fach geringere Werte.

Wirkungsgrad und Energiebilanz eines piezoaktorischen Systems

Die Berechnung und Optimierung des Gesamtwirkungsgrades eines piezoaktorischen Systems hängt von der Effizienz der Verstärkerelektronik, der elektromechanischen Wandlung, des mechanischen Energietransfers und der möglichen Energierückgewinnung ab. Grundsätzlich handelt es sich bei dem Großteil der elektrischen und mechanischen Energien um Blindenergien, die unter Abzug der Verluste, z.B. durch Wärmeentwicklung, wieder zurückgewonnen werden können. Damit können, vor allem in dynamischen Anwendungen, sehr effiziente Piezosysteme aufgebaut werden.

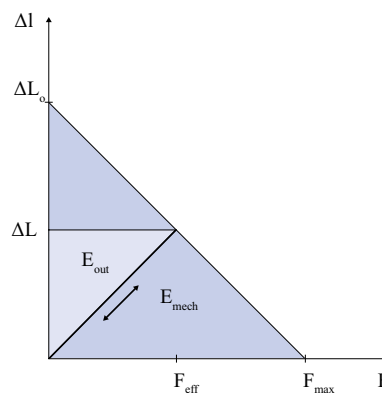


Abb. 37: Mechanische Energiebeträge im Arbeitsdiagramm eines Piezoaktors mit Federlast: gewandelte mechanische Energie E_{mech} und abgegebene mechanische Energie E_{out}

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

DYNAMISCHER BETRIEB

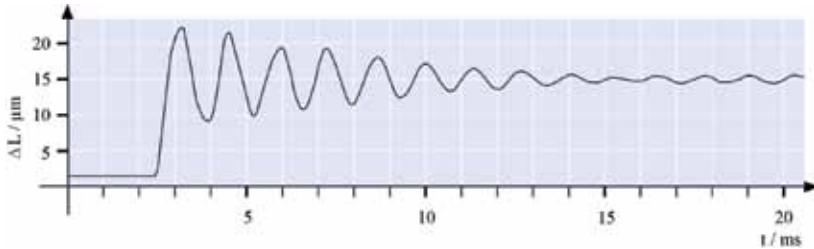


Abb. 38: Auslenkung eines ungedämpften Piezosystems nach Ansteuerung mit einem Spannungssprung. Die Nominalauslenkung wird nach etwa einem Drittel der Periodendauer erreicht

| | |
|------------|--|
| m | Masse des Piezoaktors |
| M | zusätzliche Last |
| φ | Phasenwinkel [Grad] |
| f_0 | Resonanzfrequenz ohne Last [Hz] |
| f_0' | Resonanzfrequenz mit Last [Hz] |
| F_{dyn} | dynamische Kraft [N] |
| m_{eff} | effektive Masse Piezostapelaktor [kg] |
| m_{eff}' | effektive Masse Piezostapelaktor mit Last [kg] |
| ΔL | Auslenkung (Spitze-Spitze) [m] |
| f | Ansteuerfrequenz [Hz] |

Resonanzfrequenz

Die in den technischen Daten angegebenen Resonanzfrequenzen von longitudinalen Stapelaktoren beziehen sich auf den beidseitig freien Betrieb. In einer Anordnung mit einseitiger Einspannung muss der Wert halbiert werden.

Der reduzierende Einfluss einer zusätzlichen Last auf die Resonanzfrequenz kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$f_0' = f_0 \sqrt{\frac{m_{eff}}{m_{eff}'}} \quad (\text{Gleichung 17})$$

Piezoaktoren werden in Positionieranwendungen deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz betrieben, um die Phasenverschiebung zwischen Ansteuersignal und Auslenkung gering zu halten. Der Phasengang eines Piezosystems entspricht ungefähr dem eines Systems zweiter Ordnung:

$$\varphi \approx 2 \arctan \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (\text{Gleichung 18})$$

Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen?

Schnelles Ansprechverhalten ist eine charakteristische Eigenschaft von Piezoaktoren. Eine schnelle Änderung der Betriebsspan-

nung bewirkt eine schnelle Positionsänderung. Dieses Verhalten ist besonders bei dynamischen Anwendungen wie z. B. in der Scanning-Mikroskopie, der Bildstabilisierung, in Ventilsteuerungen, bei der Erzeugung von Schockwellen oder in der aktiven Schwingungsdämpfung erwünscht. Ein Piezoaktor kann bei schlagartigem Anstieg der Steuerspannung seine nominale Auslenkung in ungefähr einem Drittel der Periodendauer seiner Resonanzfrequenz f_0 erreichen (Abb. 38).

$$T_{min} \approx \frac{1}{3f_0} \quad (\text{Gleichung 19})$$

In diesem Fall kommt es zu starkem Überschwingen, das durch entsprechende Steuertechnik teilweise kompensiert werden kann.

Beispiel: Ein Piezoaktor mit einer Resonanzfrequenz bei einseitiger Einspannung $f_0 = 10$ kHz kann seine nominale Auslenkung in 30 μ s erreichen.

Dynamische Kräfte

Bei geeigneter Ansteuerelektronik können Piezoaktoren hohe Beschleunigungen von einigen Zehntausend m/s^2 erzeugen. Durch die Trägheit evtl. angekoppelter Massen sowie der Aktoren selbst entstehen dynamische Zugkräfte, die durch mechanische Vorspannungen kompensiert werden müssen (vgl. S. 50 ff).

Im Sinusbetrieb können die maximalen Kräfte wie folgt abgeschätzt werden:

$$F_{dyn} \approx \pm 4\pi^2 m_{eff} \frac{\Delta L}{2} f^2 \quad (\text{Gleichung 20})$$

Beispiel: Die dynamischen Kräfte bei 1.000 Hz, 2 μ m Auslenkung (Spitze-Spitze) und 1 kg Masse betragen ungefähr ± 40 N.

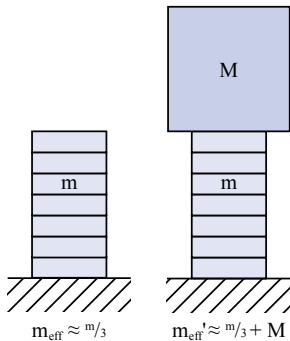


Abb. 39: Berechnung der effektiven Masse m_{eff} und m_{eff}' eines einseitig eingespannten Piezostapelaktors ohne und mit Last

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

ELEKTRISCHE ANSTEUERUNG

Betriebsspannung

PI Ceramic bietet verschiedene Typen von Piezoaktoren mit unterschiedlichen Schichthöhen an. Daraus ergeben sich nominale Betriebsspannungen von 60 V für PICMA® Bender bis zu 1000 V für Aktoren der PICA-Serien.

Elektrisches Verhalten

Bei Betriebsfrequenzen weit unterhalb der Resonanzfrequenz verhält sich ein Piezoaktor wie ein Kondensator. Die Auslenkung ist in erster Näherung proportional zur gespeicherten elektrischen Ladung.

Die Kapazität des Aktors hängt dabei von der Fläche und Dicke der Keramik sowie den Materialeigenschaften ab. Bei Aktoren, die aus mehreren elektrisch parallel geschalteten Keramikschichten aufgebaut sind, wird die Kapazität auch durch die Anzahl der Schichten bestimmt.

In den Aktoren gibt es Leckstromverluste, die aufgrund des hohen Innenwiderstandes im µA-Bereich oder darunter liegen.

Elektrische Kapazitätswerte

Die Kapazitätswerte in den technischen Daten sind Kleinsignalwerte, d.h. sie sind gemessen bei Ansteuerung mit 1 V, 1.000 Hz, 20 °C, lastfrei. Die Kapazität der Piezokeramik ändert sich mit der Spannungsamplitude, der Temperatur und der Last auf bis zu

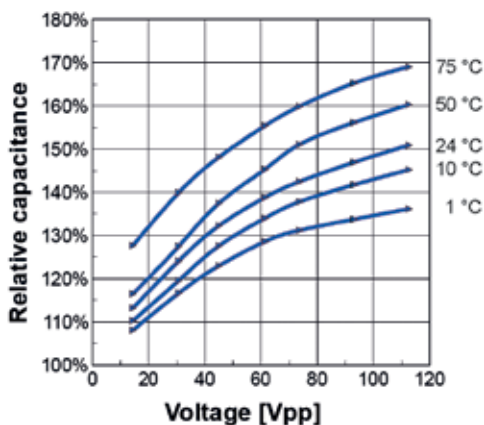


Abb. 40: Die elektrische Kapazität wächst mit steigender Ansteuerspannung und Temperatur

200 % des unbelasteten Kleinsignalwertes bei Raumtemperatur. Für Berechnungen unter Großsignalbedingungen genügt häufig ein Sicherheitsfaktor von 70 %, der zur Kleinsignalkapazität addiert wird (Abb. 40).

Die Kleinsignalkapazität C eines Stapelaktors kann wie beim Kondensator abgeschätzt werden:

$$C = n \epsilon_{33}^T \frac{A}{h_L} \quad (\text{Gleichung 21})$$

Bei fester Aktorlänge l gilt mit $n \approx l/h_L$:

$$C = l \epsilon_{33}^T \frac{A}{h_L^2} \quad (\text{Gleichung 22})$$

Demnach hat ein PICMA® Stack-Aktor mit einer Schichthöhe von 60 µm eine ca. 70 mal höhere Kapazität als ein volumengleicher PICA Stack-Aktor mit einer Schichthöhe von 500 µm. Die elektrische Leistungsaufnahme P beider Typen ist aufgrund der Beziehung $P \sim C V^2$ etwa gleich, da sich die Ansteuerspannung proportional zur Schichthöhe verändert.

Positionierbetrieb, statisch und mit geringer Dynamik

In einem elektrisch geladenen Piezoaktor ist etwa die Energie $E = \frac{1}{2} CV^2$ gespeichert. Jede Ladungsänderung und damit Auslenkungsänderung ist mit einem Ladungstransport verbunden, der den folgenden Strom I benötigt:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dV}{dt} \quad (\text{Gleichung 23})$$

Für langsame Positionsänderungen wird nur ein geringer Strom benötigt. Zum Halten der Position ist selbst bei hohen Lasten nur die Kompensation der sehr geringen Leckströme nötig. Die Leistungsaufnahme ist entsprechend gering.

Wenn ein geladener Piezoaktor plötzlich von der elektrischen Quelle getrennt wird, kommt es zu keiner rapiden Positionsänderung. Die Entladung und damit die Rückkehr zur Nullposition geschieht kontinuierlich und sehr langsam.

| | |
|-------------------|---|
| C | Kapazität [C] |
| n | Anzahl der Keramikschichten im Aktor |
| ϵ_{33}^T | Permittivität = ϵ_{33}/ϵ_0 (vgl. Tabelle S. 36) [As/Vm] |
| A | Aktorquerschnittsfläche [m ²] |
| l | Aktorlänge [m] |
| h_L | Schichthöhe im Aktor [m] |
| I | Strom [A] |
| Q | Ladung [C, As] |
| V | Spannung am Piezoaktor [V] |
| t | Zeit [s] |

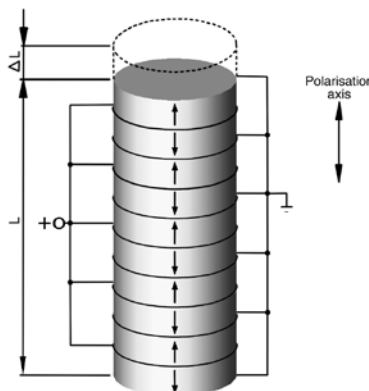


Abb. 41: Aufbau und Kontaktierung eines gestapelten Piezotranslators

Elektrische Ansteuerung (Fortsetzung)

Dauerstrom, Spitzenstrom und Kleinsignalbandbreite für jeden Piezoverstärker von PI können den technischen Daten entnommen werden.

- P Leistung, die in Wärme umgewandelt wird [W]
- $\tan \delta$ dielektrischer Verlustfaktor (Verhältnis von Wirk- zu Blindleistung)
- f Arbeitsfrequenz [Hz]
- C Aktorkapazität [F]
- V_{pp} Ansteuerspannung (Spitze-Spitze) [V]

Betrieb mit Positionsregelung

Beim Betrieb im geschlossenen Regelkreis wird die maximale Arbeitsfrequenz auch durch Phasen- und Amplitudengang des Systems begrenzt. Es gilt: je höher die Resonanzfrequenz der Mechanik, desto höher kann die Regelbandbreite eingestellt werden. Auch die Sensorbandbreite und Leistungsfähigkeit des Reglers (digital/analog, Filter- und Reglertyp, Bandbreite) begrenzen die Betriebsbandbreite des Positioniersystems.

Leistungsaufnahme des Piezoaktors

In dynamischen Anwendungen nimmt die Leistungsaufnahme des Aktors linear mit Frequenz und Aktorkapazität zu. Ein kompakter Piezotranslator mit ca. 100 N Belastbarkeit benötigt bei 1.000 Hz und 10 µm Hub weniger als 10 Watt Blindleistung, während ein Hochlastaktor (>10 kN Belastbarkeit) bei gleichen Bedingungen einige 100 Watt erfordert.

Wärmeerzeugung in einem Piezoelement bei dynamischem Betrieb

Da sich Piezoaktoren wie kapazitive Lasten verhalten, steigen ihre Lade- und Entladeströme mit der Arbeitsfrequenz an. Die dabei im Aktor erzeugte thermische Leistung P kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$P \approx \frac{\pi}{4} \cdot \tan \delta \cdot f \cdot C \cdot V_{pp}^2 \quad (\text{Gleichung 24})$$

Bei Aktor-Piezokeramik liegt der Verlustfaktor unter Kleinsignalbedingungen in der Größenordnung von 0,01–0,02. Dadurch werden bis zu 2 % der elektrischen Leistung, die in den Aktor fließt, in Wärme umgewandelt. Bei Großsignalbedingungen kann dieser auf deutlich höhere Werte ansteigen. (Abb. 42) Die maximale Arbeitsfrequenz hängt deshalb auch von der zulässigen Betriebstemperatur ab. Bei hohen Frequenzen und Spannungsamplituden können Kühlungsmaßnahmen notwendig werden. PI Ceramic bietet für diese Anwendungen auch Piezoaktoren mit integrierten Temperatursensoren zur Überwachung der Keramiktemperatur an.

Kontinuierlicher dynamischer Betrieb

Um einen Piezoaktor mit gewünschter Dynamik betreiben zu können, muss der Piezoverstärker bestimmten Mindestanforderungen genügen. Zu deren Abschätzung betrachtet man die Beziehung zwischen Verstärker Ausgangsstrom, Betriebsspannung des Piezoaktors und Arbeitsfrequenz.

Ansteuerung mit Sinusfunktion

Bestimmend für den kontinuierlichen Betrieb mit einer Sinusfunktion ist der Effektiv- oder Dauerstrom I_a des Verstärkers, der in den entsprechenden Datenblättern genannt ist. Die Dauerstromwerte werden unter den definierten Umgebungsbedingungen zeitlich unbegrenzt garantiert.

$$I_a \approx f \cdot C \cdot V_{pp} \quad (\text{Gleichung 25})$$

Für sinusförmige Einzelpulse, die nur für kurze Dauer ausgeführt werden, kann Gl. 26 angewendet werden. Sie ergibt den notwendigen Spitzenstrom für eine Halbwelle. Der Verstärker muss diesen Spitzenstrom mindestens für eine halbe Periodendauer liefern können. Für wiederholte Einzelpulse darf das zeitliche Mittel der Spitzenströme den erlaubten Dauerstrom nicht überschreiten.

$$I_{max} \approx f \cdot \pi \cdot C \cdot V_{pp} \quad (\text{Gleichung 26})$$

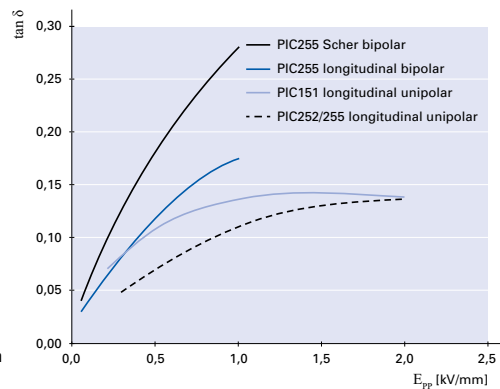


Abb. 42: Dielektrische Verlustfaktoren $\tan \delta$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Die Umrechnung zwischen Spannung und Feldstärke für konkrete Aktoren erfolgt mit den Schichthöhen, die ab S. 42 angegeben werden. Der tatsächliche Verlustfaktor im Bauelement hängt von weiteren Faktoren ab, wie der mechanischen Vorspannung, der Temperatur, der Ansteuerfrequenz und dem passiven Materialanteil.

Ansteuerung mit Dreiecksfunktion

Für die Ansteuerung eines Piezoaktors mit einer symmetrischen Dreiecksfunktion sind sowohl der Dauerstrom als auch der Spitzenstrom des Verstärkers maßgeblich. Die maximale Betriebsfrequenz eines Verstärkers kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$f_{max} \approx \frac{I}{C} \cdot \frac{I_a}{V_{pp}} \quad (\text{Gleichung 27})$$

Dabei gilt zusätzlich die Nebenbedingung, dass der Verstärker wenigstens $I_{max} = 2 I_a$ für die Ladezeit, d.h. für die halbe Periodendauer, liefern kann. Sofern das nicht möglich ist, sollte die maximale Arbeitsfrequenz entsprechend niedriger gewählt werden. Für Verstärker, die keinen höheren Spitzenstrom liefern können oder nicht ausreichend lange, sollte stattdessen mit dieser Gleichung gerechnet werden:

$$f_{max} \approx \frac{I}{2 \cdot C} \cdot \frac{I_a}{V_{pp}} \quad (\text{Gleichung 28})$$

Signalform und Bandbreite

Neben der Leistungsabschätzung des Piezoverstärkers ist bei allen von der Sinusform abweichenden Signalformen die Betrachtung der Kleinsignalbandbreite wichtig.

Je mehr Oberwellen des Ansteuersignals nicht mehr übertragen werden, umso mehr nähert sich die resultierende Form wieder der Grundwelle, also einer Sinusform an. Die Bandbreite sollte daher mindestens zehnmal so hoch sein wie die Grundfrequenz, um eine Signalverfälschung aufgrund der nicht mehr übertragenen Harmonischen zu vermeiden.

Die nutzbare Grenze der Frequenzanteile, denen das mechanische Piezosystem noch folgen kann, ist in der Praxis die mechanische Resonanzfrequenz. Das elektrische Ansteuersignal muss daher aber auch keine deutlich höheren Frequenzanteile enthalten.

Schaltanwendungen, Pulsbetrieb

Die schnellstmögliche Auslenkung eines Piezoaktors kann in 1/3 der Periode seiner Resonanzfrequenz erfolgen (vgl. S. 54). Anstiegszeiten im Mikrosekundenbereich und Beschleunigungen von mehr als 10.000 g sind möglich, erfordern aber vom Piezoverstärker besonders hohe Spitzenströme.

Dadurch werden schnelle Schaltanwendungen wie z.B. Einspritzventile, Hydraulikventile, Schaltrelais, optische Schalter und adaptive Optik möglich.

Für Ladungsvorgänge mit konstantem Strom kann mit folgender Gleichung die Mindestanstiegszeit im Pulsbetrieb ermittelt werden:

$$t \approx C \cdot \frac{V_{pp}}{I_{max}} \quad (\text{Gleichung 29})$$

Auch hier ist die Kleinsignalbandbreite des Verstärkers bestimmend. Die Anstiegszeit des Verstärkers muss deutlich kürzer als die Piezo-Ansprechzeit sein, um die Auslenkung nicht durch den Verstärker zu begrenzen. Für die Praxis gilt die Faustregel, die Bandbreite des Verstärkers zwei- bis dreimal höher als die Resonanzfrequenz zu wählen.

Vor- und Nachteile einer Positionsregelung

Ein Positionsregler arbeitet immer im linearen Aussteuerbereich der Spannungen und Ströme. Da der Spitzenstrom zeitlich begrenzt und daher nicht linear ist, kann er für eine stabile Wahl der Regelparameter nicht genutzt werden. Dadurch begrenzt die Positionsregelung die Bandbreite und lässt einen Pulsbetrieb, wie beschrieben, nicht zu.

In Schaltanwendungen kann daher häufig eine erforderliche Positionsstabilität und Linearität nicht durch Positionsregelung erreicht werden. Eine Linearisierung kann z.B. durch die Ladungssteuerung der Verstärker (s. S. 63) oder durch numerische Korrekturverfahren erreicht werden.

| | |
|-----------|--|
| I_a | Dauerstrom des Verstärkers (Source / Sink) [A] |
| I_{max} | Spitzenstrom des Verstärkers (Source / Sink) [A] |
| f | Arbeitsfrequenz [Hz] |
| f_{max} | maximale Arbeitsfrequenz [Hz] |
| C | Aktorkapazität, Großsignal [Farad (As/V)] |
| V_{pp} | Ansteuerspannung (Spitze-Spitze) [V] |
| t | Zeit bis V_{pp} am Piezoaktor anliegt [s] |

Dauerstrom und Spitzenstrom für jeden Piezoverstärker von PI können den technischen Daten entnommen werden.



Abb. 43: PICMA® Aktoren mit patentierten, mäanderförmigen Außenelektroden für bis zu 20 A Ladestrom

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

UMGEBUNGSBEDINGUNGEN

Bei Fragen zum Einsatz in besonderen Umgebungen wenden Sie sich an info@piceramic.de.

Piezoaktoren eignen sich für den Betrieb in verschiedensten, teilweise extremen Umgebungsbedingungen. Hinweise zur Anwendung bei hohen Temperaturen bis 200 °C sowie in kryogenen Umgebungen befinden sich ab S. 48.

Vakuumumgebung

Dielektrische Stabilität

Die Durchschlagsspannung eines Gases hängt nach dem Paschen-Gesetz vom Produkt aus dem Druck p und dem Elektrodenabstand s ab. Luft hat sehr gute Isolationswerte bei atmosphärischem Druck und bei sehr geringen Drücken. Die minimale Durchschlagsspannung von 300 V liegt bei einem ps-Produkt von 1000 Pa mm. PICMA® Stack-Aktoren mit Nominalspannungen deutlich unterhalb von 300 V können deshalb bei jedem Zwischendruck betrieben werden. PICA Piezoaktoren mit Nominalspannungen oberhalb von 300 V sollten hingegen bei Luft im Druckbereich 100 bis 50000 Pa nicht oder nur bei stark reduzierten Spannungen angesteuert werden, um Durchschläge zu vermeiden.

Ausgasen

Das Ausgasverhalten hängt von der Bauform und der Konstruktion der Piezoaktoren ab. Hervorragend für den UHV-Einsatz geeignet sind PICMA® Aktoren, da sie ohne Polymeranteile hergestellt und bis zu 150 °C ausgeheizt werden können. UHV-Optionen mit minimalen Ausgasraten werden auch für verschiedene PICA Aktoren angeboten.

Edelgase

Piezoaktoren sind für den Einsatz in Edelgasen wie z. B. Helium, Argon oder Neon geeignet. Allerdings müssen auch hier die druckabhängigen Überschlagsfestigkeiten der Paschen-Kurven beachtet werden. Für den Einsatz werden die keramisch isolierten PICMA® Aktoren empfohlen, da deren Nominalspannung unterhalb der minimalen Durchschlagsspannungen aller Edelgase liegt. Bei PICA Aktoren mit höheren Nominalspannungen sollte zur Reduktion des Überschlagsrisikos die Betriebsspannung in bestimmten Druckbereichen herabgesetzt werden.

Magnetfelder

Piezoaktoren eignen sich hervorragend für den Einsatz in sehr hohen Magnetfeldern, z.B. auch bei kryogenen Temperaturen. PICMA® Aktoren werden komplett ohne ferromagnetische Materialien gefertigt. PICA Stack-Aktoren können optional ohne ferromagnetische Anteile angeboten werden. Bei diesen Produkten wurden Restmagnetismen im Bereich weniger Nanotesla gemessen.

Gammastrahlung

PICMA® Aktoren können auch in hochenergetischer, kurzweiliger Strahlung betrieben werden, wie sie beispielsweise an Elektronen-Beschleunigern auftritt. In Langzeituntersuchungen wurde der problemfreie Einsatz bei Gesamtdosen von 2 MegaGray nachgewiesen.

Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit

Beim Betrieb in trockener Umgebung ist die Lebensdauer von Piezoaktoren grundsätzlich höher als in hoher Luftfeuchtigkeit. Bei der Ansteuerung mit Wechselspannungen höherer Frequenz tritt eine Eigenerwärmung der Aktoren ein, so dass die Feuchtigkeit lokal sehr gering ist.

Dauerbetrieb mit hohen Gleichspannungen in feuchter Umgebung kann Piezoaktoren schädigen (s. S. 59). Dies gilt insbesondere für die Aktoren der PICA Produktreihen, da hier die aktiven Elektroden nur durch eine Polymerschicht geschützt sind, die von der Luftfeuchtigkeit durchdrungen werden kann. Die Aktoren der PICMA® Produktreihen besitzen eine vollkeramische Isolation, welche die Lebensdauer bei feuchten Umgebungsbedingungen im Vergleich zu polymerumhüllten Aktoren wesentlich verbessert (s. S. 59).

Flüssigkeiten

Für den Einsatz in Flüssigkeiten werden gekapselte PICMA® bzw. speziell gehauste PICA Aktoren angeboten. Bei allen anderen Aktortypen sollte der direkte Kontakt mit Flüssigkeiten vermieden werden. Ausnahmen können hochisolierende Flüssigkeiten sein. In der Regel muss die Kompatibilität der Aktoren mit diesen Flüssigkeiten jedoch in Lebensdauertests geprüft werden.

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

ZUVERLÄSSIGKEIT VON PICMA® MULTILAYERAKTOREN

Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung

In Nanopositionieranwendungen liegen am Piezoaktor häufig konstante Spannungen über längere Zeit an. In diesem Gleichspannungs-Betriebsmodus wird die Lebensdauer vor allem durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst.

Bei sehr hohen Feuchte- und Spannungswerten kommt es zu elektrochemischen Reaktionen, die Wasserstoffmoleküle freisetzen, welche anschließend den Keramikverbund durch Versprödung zerstören.

Vollkeramische Schutzschicht

Mit dem patentierten PICMA® Design wird diese Reaktion wirkungsvoll unterdrückt. Die anorganische keramische Schutzschicht (s. S. 42) verhindert im Gegensatz zu rein polymeren Umhüllungen den Kontakt der Wassermoleküle mit den Innenelektroden und erhöht auf diese Weise die Lebensdauer um mehrere Größenordnungen (s. Abb. 43).

Quasistatische Bedingungen: Beschleunigte Lebensdauerprüfung

Die hohe Zuverlässigkeit macht es praktisch unmöglich, die Lebensdauer von PICMA® Aktoren bei realen Anwendungsbedingungen experimentell zu ermitteln. Zur Abschätzung der Lebensdauer dienen daher Prüfungen unter extremen Belastungsbedingungen: erhöhte relative Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitig hohen Umgebungstemperaturen und Ansteuerspannungen.

In Abb. 44 werden die Ergebnisse eines Tests bei einer stark erhöhten Luftfeuchtigkeit von 90 % RH bei 100 V DC und 22 °C gezeigt. Die extrapolierte mittlere Lebensdauer (MTTF, "Mean Time To Failure") für PICMA® Aktoren liegt bei mehr als 400.000 h (ca. 47 Jahre) während Vergleichsaktoren mit Polymerumhüllung unter diesen Bedingungen nur eine MTTF von ca. einem Monat erreichen.

Tests unter realitätsnahen Bedingungen bestätigen bzw. übertreffen diese Ergebnisse noch.

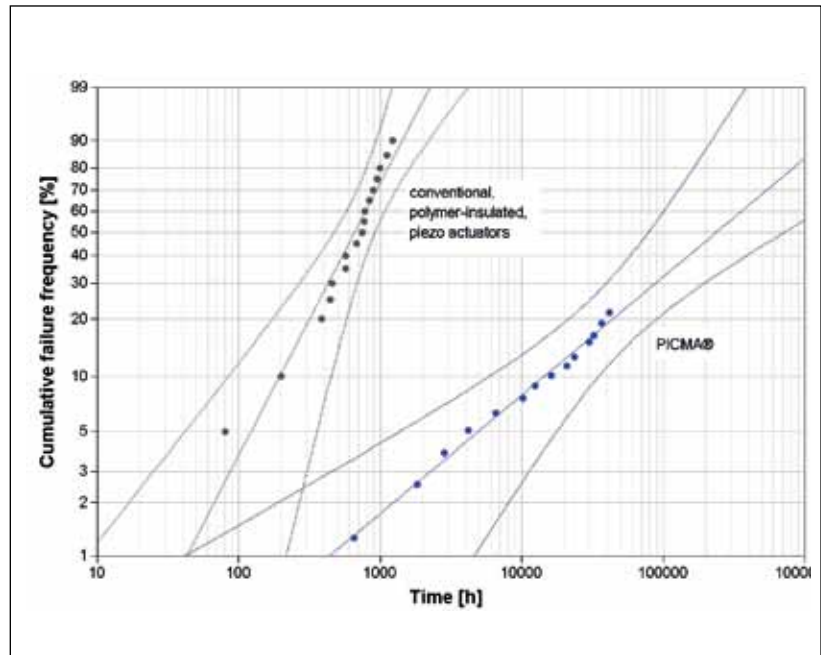


Abb. 44: Ergebnisse eines beschleunigten Lebensdauertests mit erhöhter Luftfeuchtigkeit (Testbedingungen: PICMA® Stack und polymerumhüllte Aktoren, Abmessungen: 5 x 5 x 18 mm³, 100 V DC, 22 °C, 90 % RH)

Berechnung der Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung

In aufwändigen Untersuchungen wurde für die PICMA® Stack-Aktoren ein Modell zur Berechnung der Lebensdauer entwickelt. Unter konkreten Anwendungsbedingungen müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden: die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchte und die Höhe der angelegten Spannung.

Die einfache Formel

$$MTTF = A_U \cdot A_T \cdot A_F \quad (\text{Gleichung 30})$$

erlaubt die schnelle Abschätzung der mittleren Lebensdauer in Stunden. Die Faktoren A_U in Abhängigkeit von der Betriebsspannung, A_T für die Umgebungstemperatur und A_F für die relative Luftfeuchtigkeit können aus dem Diagramm (Abb. 45) abgelesen werden.

Wichtig: Mit sinkenden Spannungswerten steigt die Lebensdauer exponentiell an. Beispielsweise ist die zu erwartende Lebensdauer bei 80 V DC 10mal so hoch wie bei 100 V DC.

Mit dieser Berechnung kann eine neue Applikation bereits in der Designphase bezüglich ihrer Lebensdauer optimiert werden. Das Absenken der Ansteuerspannung, die Kontrolle von Temperatur und Luftfeuchtigkeit mittels Spülluft oder die Einkapselung des Aktors spielen hier eine große Rolle.

Zuverlässigkeit von PICMA® Multilayeraktoren (Fortsetzung)

Abb. 45: Diagramm zur Berechnung der Lebensdauer von PICMA® Stack Aktoren bei Gleichspannungsbelastung. Für einen Dauerbetrieb bei 100 V DC mit 75 % Luftfeuchtigkeit (RH) und einer Umgebungstemperatur von 45 °C kann man folgende Werte aus dem Diagramm ablesen: $A_F = 14$ (Luftfeuchte, blaue Kurve), $A_T = 100$ (Temperatur, rote Kurve) und $A_U = 75$ (Betriebsspannung, schwarze Kurve). Das Produkt ergibt eine mittlere Lebensdauer von 105.000 h, also über 11 Jahren.

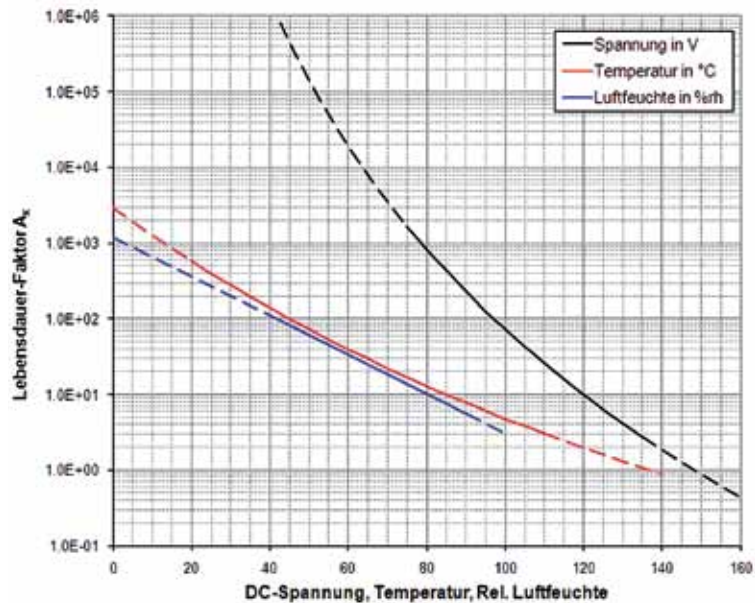


Abb. 46: Deutlich sichtbar ist das patentierte PICMA® Aktordesign mit definierten Schlitzen („Slots“), das unkontrollierte Dehnungsrisse bei dynamischer Ansteuerung verhindert

Lebensdauer im dynamischen Dauerbetrieb

Zyklische Beanspruchung mit einem schnellen Wechselfeld und hohen Ansteuerspannungen (typisch >50 Hz; >50 V) tritt häufig bei Anwendungen z.B. in Ventilen oder Pumpen auf. Piezoaktoren können unter diesen Bedingungen extrem hohe Lastwechselzahlen erreichen.

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Piezoaktoren sind dabei die elektrische Spannung und die Signalform. Die Luftfeuchtigkeit ist kaum relevant, weil diese lokal durch die Eigenerwärmung der Piezokeramik reduziert wird.

Industrietauglich: 10¹⁰ Arbeitszyklen

Prüfungen mit besonders hoher Ansteuerfrequenz belegen die Robustheit der PICMA® Piezoaktoren. Vorgespannte PICMA® Aktoren der Größe 5 x 5 x 36 mm wurden dazu bei Raumtemperatur und Druck-

luftkühlung mit einem Sinussignal von 120 V unipolarer Spannung bei 1157 Hz belastet, was 10⁸ Zyklen täglich entspricht. Auch nach über 10¹⁰ Arbeitszyklen gab es keinen einzigen Ausfall und die Aktoren zeigten keine signifikanten Auslenkungsänderungen.

Patentiertes Design reduziert die mechanische Spannung

PICMA® Aktoren verwenden ein besonderes, patentiertes Design. Seitliche Schlitze („Slots“) verhindern wirksam die Überhöhung der mechanischen Zugspannungen in den passiven Bereichen des Stapels und die Ausbildung unkontrollierter Risse (Abb. 46), die zu elektrischen Durchschlägen und damit Schäden am Aktor führen könnten. Der patentierte mäanderförmige Aufbau der äußeren Kontaktstreifen (Abb. 43) sichert den stabilen elektrischen Kontakt aller Innenelektroden selbst bei extremen dynamischen Belastungen.

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

CHARAKTERISTISCHES VERHALTEN VON PIEZOVERSTÄRKERN

Schnelles Einschwingen oder langsame Geschwindigkeit mit hoher Konstanz, hohe Positionsstabilität und –auflösung, hohe Dynamik – die Anforderungen an Piezosysteme sind höchst unterschiedlich und erfordern ein hohes Maß an Flexibilität der Steuerung und Regelung.

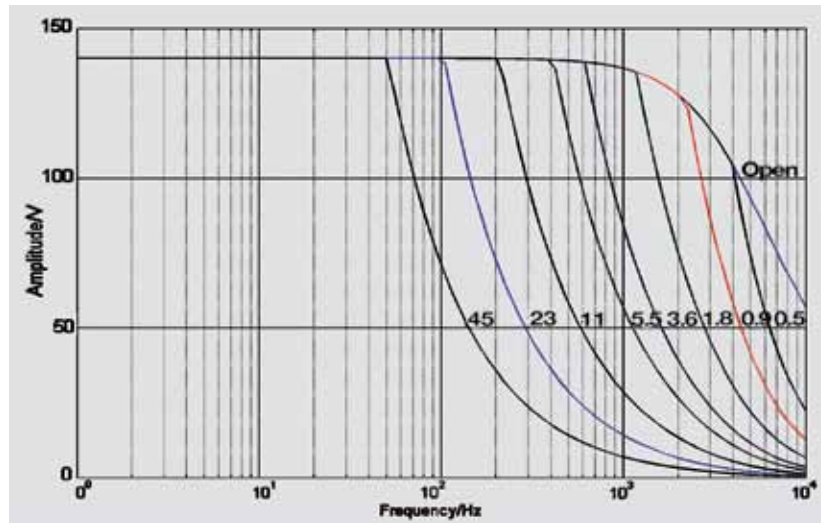
Die Ansteuerlektronik spielt eine Schlüsselrolle für die Leistungsfähigkeit piezoelektrischer Aktoren und Nanopositioniersysteme. Für die präzise Positionierung werden besonders rauscharme, hochstabile Linearverstärker benötigt, denn Piezoaktoren reagieren auf die geringste Spannungsänderung mit einer Auslenkung. Ein „Rauschen“ oder Driften gilt es so weit wie möglich zu vermeiden. Voraussetzung für die hochdynamische Auslenkung des Aktors ist, dass die Spannungsquelle genügend Strom liefert, um die Kapazität zu laden.

Leistungsanforderungen für den Piezobetrieb

Die Aussteuergrenze eines Verstärkers mit einem gegebenen Piezoaktor hängt von der Verstärkerleistung, dem Verstärkerdesign und der Kapazität der Piezokeramik ab (vgl. S. 56–57). In hochdynamischen Anwendungen benötigen Piezoaktoren hohe Lade- und Entladeströme. Dabei kommt, speziell bei sinusförmigem Betrieb oder bei Pulsbetrieb, dem Spitzenstrom eine besondere Bedeutung zu. Piezoverstärker von PI sind deshalb so ausgelegt, dass sie hohe Spitzenströme abgeben und aufnehmen können. Wird ein Verstärker mit einer kapazitiven Last und Frequenz betrieben, bei der er nicht mehr den erforderlichen Strom aufbringen kann, kommt es zur Verzerrung des Ausgangssignals. Als Folge davon kann die volle Auslenkung nicht mehr erreicht werden.

Aussteuerkurve

Für jedes Verstärkermodell werden die Aussteuergrenzen mit verschiedenen Piezolasten in Abhängigkeit von der Frequenz und Ausgangsspannung gemessen und als Aussteuerkurven grafisch dargestellt, um die Auswahl zu erleichtern. Die Messungen werden nach 15 Minuten Dauerbetrieb (Piezo und Verstärker) bei Raumtemperatur durchgeführt. Im kalten Zustand nach dem Einschalten kann kurzzeitig mehr Leistung zur Verfügung stehen.



Der Leistungsverstärker arbeitet innerhalb seiner Aussteuergrenzen linear, so dass das Steuersignal unverzerrt verstärkt wird. Insbesondere tritt keine thermische Begrenzung ein, d.h. der Verstärker überhitzt nicht, was Verzerrungen der Sinuskurve verursachen könnte. Der Verstärker liefert die Ausgangsspannung kontinuierlich auch über längere Zeit. Für Spitzenwerte, die nur über einen kurzen Zeitraum zur Verfügung stehen, kann die Aussteuerkurve nicht verwendet werden.

Die Kurven beziehen sich auf den unregulierten Betrieb (open-loop); im geregelten Betrieb begrenzen andere Faktoren die Dynamik.

Einstellung der Steuerspannung

Nachdem die Aussteuergrenze des Verstärkers erreicht ist, muss bei weiter ansteigenden Frequenzen die Amplitude der Steuerspannung im gleichen Verhältnis reduziert werden, wie die Ausgangsspannung abfällt. Dies ist wichtig, da der Strombedarf kontinuierlich mit der Frequenz ansteigt. Ansonsten wird das Ausgangssignal verzerrt.

Beispiel: Der E-503 (E-663) Verstärker kann bei einer Ausgangsspannung von 100 V eine Piezokapazität von 23 μF mit einer maximalen Frequenz von ca. 15 Hz betreiben (bei Sinusansteuerung). Bei höheren Frequenzen sinkt die Aussteuergrenze, z.B. bei 20 Hz auf 80 V. Um bei dieser Frequenz ein verzerrungsfreies Ausgangssignal zu erhalten, muss die Eingangssteuerspannung auf 8 V (Spannungsverstärkung = 10) reduziert werden.

Abb. 47: Aussteuerkurve, ermittelt mit verschiedenen Piezolasten, Kapazitätswerte in μF . Ansteuersignal Sinus, Betriebsdauer > 15 min, 20 °C. Hier: E-617, ein geschalteter Verstärker mit Energierückgewinnung

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

LÖSUNGEN FÜR DYNAMISCHE DAUERANWENDUNGEN

Geschaltete Verstärker mit Energierückgewinnung

Häufig werden Piezoaktoren für eine besonders präzise Materialbearbeitung eingesetzt, zum Beispiel im Maschinenbau zur Feinpositionierung in Fräs- und Drehmaschinen. Dabei sind sowohl hohe Kräfte als auch Dynamik gefragt. Für die großen Kräfte sind die Piezoaktoren entsprechend dimensioniert, das heißt, hier werden Piezoaktoren mit hoher Kapazität verwendet. Um sie mit der geforderten Dynamik zu be- oder entladen, werden besonders hohe Ströme benötigt. Ähnliche Eigenschaften erfordert auch die Ansteuerung von Ventilen.

Energierückgewinnung minimiert den Energieverbrauch im Dauerbetrieb

Da diese Anwendungen häufig sieben Tage die Woche rund um die Uhr arbeiten, ist der Energieverbrauch des Verstärkers wichtig. PI bietet hierfür geschaltete Verstärkerelektroniken an, bei denen die Pulsweite des Ansteuerungssignals moduliert (PWM) und dadurch die Ausgangsspannung geregelt wird. Ein besonders hoher Wirkungsgrad ist die Folge. Zusätzlich ist eine patentierte Schaltung zur Energierückgewinnung integriert: Sie speichert beim Entladen des

Piezos einen Teil der zurückfließenden Energie in einem kapazitiven Speicher und stellt sie für den nächsten Ladevorgang wieder zur Verfügung. Auf diese Weise lassen sich Energieeinsparungen von bis zu 80 % realisieren. Außerdem erwärmt sich der Verstärker nicht so stark, und beeinflusst somit die eigentliche Anwendung weniger.

Im Gegensatz zu konventionellen Class-D-Schaltverstärkern sind PI Schaltverstärker für Piezoelemente strom- und spannungsgeregelt. Produktbeispiele sind E-617 für PICMA® Aktoren (S. 29) und E-481 für die PICA Aktorserien (S. 31).

Schutz des Piezoaktors durch Temperaturüberwachung

Beim Dauerbetrieb ist die Wärmeentwicklung im Piezoaktor nicht zu vernachlässigen (vgl. S. 56). Entsprechende Elektronik können deshalb die Signale eines Temperatursensors am Piezo auswerten. Auf diese Weise wird die Keramik vor Überhitzung und Depolarisation geschützt.

Geltende Patente

Deutsches Patent Nr. 19825210C2
Internationales Patent Nr. 1080502B1
US-Patent Nr. 6617754B1



Abb. 48: Piezoaktor im Gehäuse mit Anschlüssen für Temperatursensor und Kühlluft

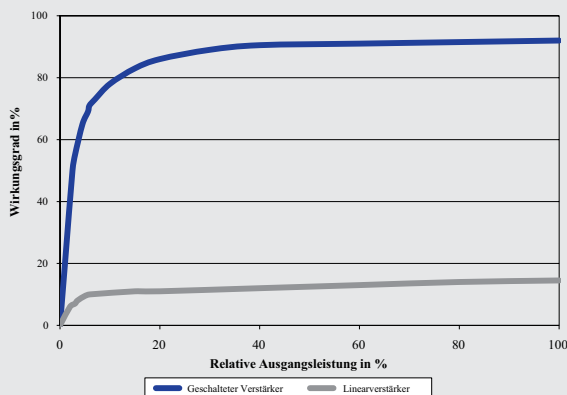


Abb. 49: Bei gleicher Ausgangsleistung verbrauchen PI Verstärker mit patentierter Energierückgewinnung nur ca. 20 % des Bedarfs eines entsprechenden Linearverstärkers.

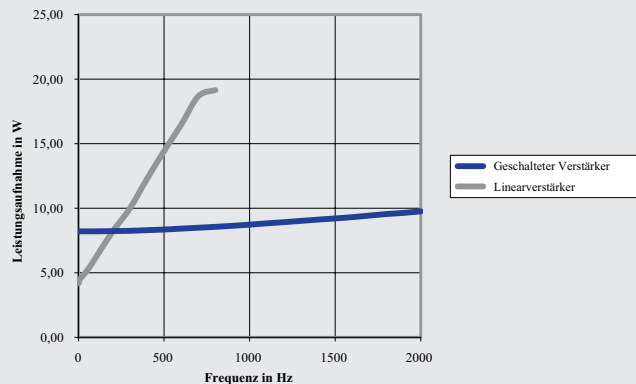


Abb. 50: Leistungsaufnahme eines Piezoverstärkers mit linearer und geschalteter Endstufe am Piezoausgang, kapazitive Last 1 µF. Die Messwerte zeigen deutlich, dass der pulsweiten-modulierte Verstärker eine wesentlich höhere Dynamik erlaubt als der klassisch linear arbeitende. Der Linearverstärker erreicht bei Frequenzen bis ca. 700 Hz die Obergrenze seiner Leistungsaufnahme, der geschaltete erst bei weit über 2 kHz

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

LINEARISIERTER VERSTÄRKER FÜR PIEZOAUSLENKUNG OHNE HYSTERESE

Ladungssteuerung

Ein typischer Anwendungsbereich für Piezoaktoren bzw. Nanopositioniersysteme ist das dynamische Scannen. Hier kann man zwischen zwei Methoden unterscheiden: dem Step-and-Settle-Betrieb, bei dem eine Position präzise und wiederholbar angefahren wird und dem Rampenbetrieb mit besonders linearem Verlauf der Piezoauslenkung. Im ersten Fall ist ein geschlossener Positionsregelkreis erforderlich, der dafür sorgt, dass Positionen zuverlässig wiederholbar angefahren und die Schrittgrößen konstant gehalten werden.

Natürlich lässt sich auch der Rampenbetrieb mit linearem Verlauf der Piezoauslenkung über Positionsrückmeldung und Regelkreis steuern. Allerdings bestimmt dann der Regelkreis die Dynamik des Gesamtsystems, was in manchen Fällen die Anzahl der Zyklen, die pro Zeiteinheit gefahren werden können, deutlich einschränkt. Dies umgeht man bei

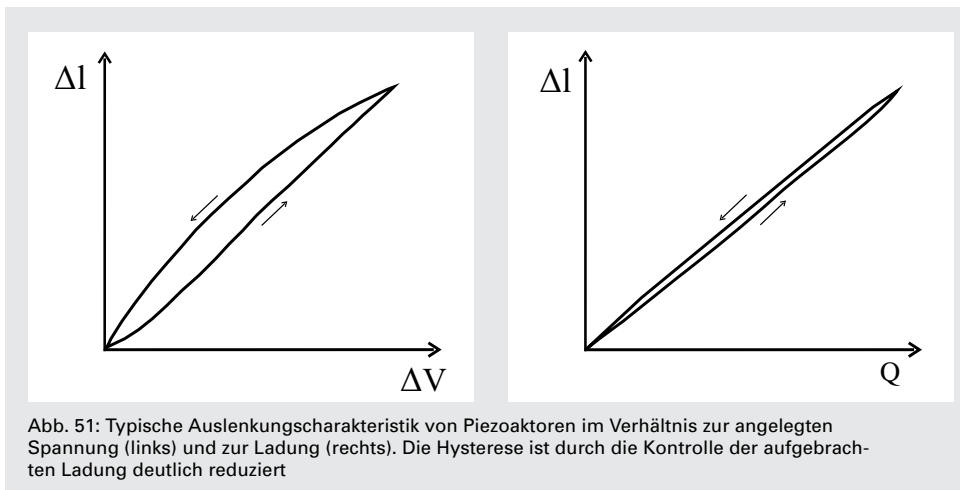
einem alternativen Verstärkerprinzip: der Ladungssteuerung.

Ladung und Auslenkung

Die Ladungssteuerung nutzt die Tatsache, dass bei Piezoaktoren der Zusammenhang zwischen elektrischer Ladung und Auslenkung sehr viel linearer ist, als der zwischen angelegter Spannung und Auslenkung. Die Hysterese beträgt im ersten Fall nur etwa 2 %, während sie bei unregelter Spannungssteuerung etwa zwischen 10 bis 15 % liegt (Abb. 51). Mit der Ladungssteuerung ist es daher in vielen Fällen möglich, die notwendige Präzision auch ohne Regelkreis zu erreichen. Das verbessert die Dynamik und ist preiswerter. Von der Ladungssteuerung profitiert man aber keineswegs nur bei hochdynamischen Anwendungen, sondern bereits bei sehr geringen Betriebsfrequenzen. Für Aufgaben, bei denen Positionen über längere Zeit gehalten werden müssen, ist sie jedoch ungeeignet.

Für dynamische Anwendungen:

- Aktive Schwingungsdämpfung
- Adaptronik
- Schnelle mechanische Schalter
- Ventilsteuerung (z.B. Pneumatik)
- Dosieren



Der ladungsgesteuerte Verstärker E-506.10 bietet hochlineare, dynamische Steuerung für PICMA® Piezoaktoren

Handhabung

VON PIEZOAKTOREN

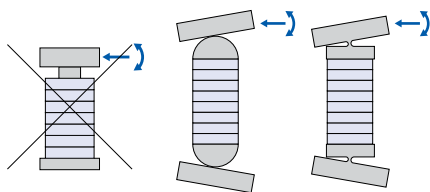


Abb. 52: Vermeiden von Querkräften und Momenten

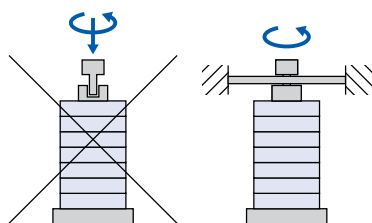


Abb. 53: Vermeiden von Drehmomenten

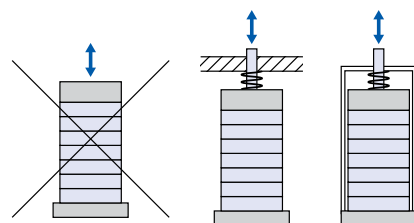


Abb. 54: Vermeiden von Zugspannungen durch mechanische Vorspannung

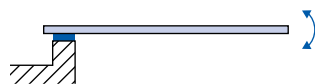


Abb. 55: Montage eines einseitig vorgespannten Biegeaktors durch Klebung

Piezoaktoren sind hohen mechanischen und elektrischen Belastungen ausgesetzt. Die spröden keramischen oder kristallinen Materialien erfordern zudem eine sorgfältige Handhabung.

▶ Vermeiden Sie mechanische Stöße auf den Aktor, wie sie z.B. beim Herunterfallen entstehen können.

▶ Verwenden Sie beim Einbau keine metallischen Werkzeuge.

▶ Vermeiden Sie beim Einbau und während der Anwendung ein Zerkratzen der Keramik- bzw. Polymerumhüllung und der Endflächen.

▶ Vermeiden Sie den Kontakt der Keramik- oder Polymerisolierung zu leitfähigen Flüssigkeiten (u.a. Fingerschweiß) sowie zu Metallstaub.

▶ Wenn der Aktor im Vakuum betrieben wird: Beachten Sie die Hinweise zu den zulässigen Ansteuerspannungen in bestimmten Druckbereichen (s. S. 58).

▶ Wenn der Aktor in Kontakt mit isolierenden Flüssigkeiten, wie Silikon- oder Hydrauliköle, kommen kann, wenden Sie sich an info@piceramic.de.

▶ Wenn der Aktor versehentlich verunreinigt wurde, reinigen Sie den Aktor vor der Wiederinbetriebnahme sorgfältig mit Isopropanol bzw. Ethanol. Anschließend trocknen Sie ihn vollständig in einem Trockenschrank. Verwenden Sie zur Reinigung keinesfalls Aceton. Reduzieren Sie bei der Reinigung im Ultraschallbad den Energieeintrag auf das notwendige Minimum.

▶ Empfehlung: Tragen Sie während des Einbaus und der Inbetriebnahme Handschuhe und Schutzbrille.

DuraAct-Patch-Aktoren und gekapselte PICMA® Piezoaktoren sind besonders robust aufgebaut. Für sie gelten Ausnahmen von diesen allgemeinen Handlungshinweisen.

Mechanischer Einbau (Abb. 52, 53, 54)

▶ Vermeiden Sie Momente und Querkräfte während der Montage und im Betrieb des Aktors durch geeignete Konstruktionen bzw. Führungselemente.

▶ Wenn der Aktor dynamisch betrieben wird: Bauen Sie den Aktor möglichst so ein, dass der Masseschwerpunkt des bewegten Systems mit der Aktorachse übereinstimmt, und verwenden Sie bei sehr großen Massen eine Führung.

▶ Stellen Sie an den Endflächen eines Stapelaktors einen möglichst vollflächigen Kontakt her.

▶ Wählen Sie Gegenflächen mit einer Ebenheit von wenigen Mikrometern.

Verkleben

▶ Bei unebenen Montageflächen verwenden Sie Epoxidharzklebstoffe zum Einkleben der Aktoren. Gut geeignet sind kalthärtende 2K-Klebstoffe, um die thermomechanischen Spannungen zu reduzieren.

▶ Halten Sie bei der Aushärtung den für den Aktor spezifizierten Temperaturbereich ein und beachten Sie die Temperaturexpansionskoeffizienten der beteiligten Materialien.

Unebene Montageflächen gibt es beispielsweise bei PICMA® Bender- und PICMA® Chip-Aktoren, da diese Flächen nach der Sinterung nicht überschliffen werden (Abb. 55).

Vorspannung aufbringen (Abb. 54)

- ▶ Erzeugen Sie die Vorspannung entweder extern im mechanischen Aufbau oder intern in einem Gehäuse.
- ▶ Bringen Sie die Vorspannung achsenah im Kernquerschnitt des Aktors auf.
- ▶ Wenn der Aktor dynamisch betrieben und die Vorspannung mit einer Feder erzeugt wird: Verwenden Sie eine Feder, deren Gesamtsteifigkeit um etwa eine Größenordnung unter der des Aktors liegt.

Last homogen einleiten (Abb. 56)

Parallelitätstoleranzen der Mechanik und des Aktors führen zu einer inhomogenen Lastverteilung. Dabei können im Aktor bei Druckbelastung Zugspannungen entstehen. Es stehen verschiedene konstruktive Lösungen zur homogenen Lasteinleitung zur Verfügung, die sich hinsichtlich der axialen Steifigkeit, der Lösbarkeit der Verbindung, sowie der Drehbarkeit im Betrieb, z. B. bei Hebelübersetzung, unterscheiden.

- Einkleben des Aktors (vgl. S. 64 Abschnitt Verkleben)
- Gehärtetes Kugelkopfstück mit Punktkontakt zu ebener Gegenfläche
- Gehärtetes Kugelkopfstück mit Ringkontakt zu einer Kalotte
- Verbindung über ein Festkörpergelenk
- ▶ Wenn die Ankopplung des Aktors in einer Frästasche erfolgt, stellen Sie sicher, dass an der Endfläche des Aktors vollflächiger Kontakt besteht. Wählen Sie dazu die Abmessungen der Frästasche entsprechend oder bringen Sie in der Frästasche Freischnitte an. (Abb. 57)
- ▶ Wenn eine Punktlast auf das Endstück des Aktors einwirkt: Dimensionieren Sie das Endstück so, dass seine Dicke der halben Querschnittsabmessung entspricht, um Zugspannungen am Aktor zu vermeiden. (Abb. 58)

Elektrischer Anschluss (Abb. 59)

Elektrisch gesehen sind Piezoaktoren Kondensatoren, die sehr viel Energie speichern können. Ihre hohen Innenwiderstände füh-

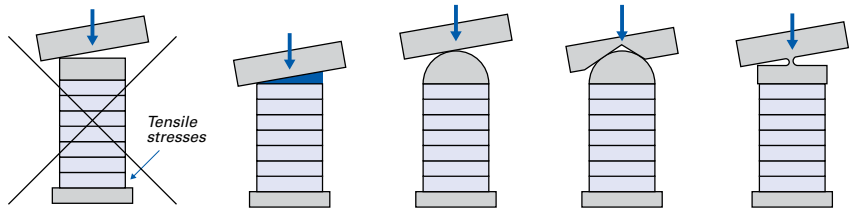


Abb. 56: Vermeiden einer inhomogenen Lasteinleitung

ren zu sehr langsamen Entladungen mit Zeitkonstanten im Bereich von Stunden. Mechanische oder thermische Belastungen laden den Aktor elektrisch auf.

- ▶ Schließen Sie das Gehäuse bzw. die umgebende Mechanik normgerecht an einen Schutzleiter an.
- ▶ Isolieren Sie den Aktor elektrisch gegen die umgebende Mechanik. Beachten Sie dabei die gesetzlichen Vorschriften für die jeweilige Anwendung.
- ▶ Beachten Sie beim Anschließen die Polarität des Aktors.
- ▶ Montieren Sie den Aktor nur im kurzgeschlossenen Zustand.
- ▶ Wenn sich der Aktor aufgeladen hat, entladen Sie den Aktor kontrolliert mit einem 10 k-Widerstand. Vermeiden Sie das direkte Kurzschließen der Anschlusskontakte des Aktors.
- ▶ Ziehen Sie das Anschlusskabel zum Verstärker nicht bei anliegender Spannung ab. Der dadurch ausgelöste mechanische Impuls könnte den Aktor schädigen.

Sicherer Betrieb

- ▶ Reduzieren Sie im Betrieb des Aktors die DC-Spannung soweit wie möglich (s. S. 59). Offsetspannungen können Sie durch einen semi-bipolaren Betrieb verringern.
- ▶ Schalten Sie den Aktor immer ab, wenn er nicht benötigt wird.
- ▶ Vermeiden Sie steile Flanken im Ansteuer-signal, da sie bei fehlender Vorspannung des Aktors starke dynamische Kräfte auslösen können. Steile Flanken können z.B. beim Einschalten von digitalen Funktionsgeneratoren auftreten.

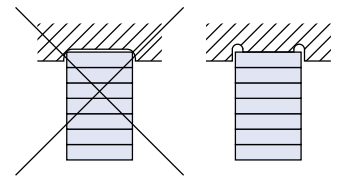


Abb. 57: Vollflächiger Kontakt des Aktors

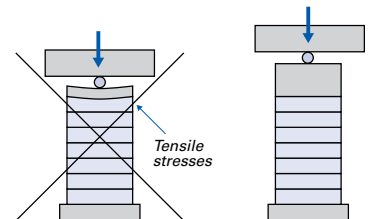


Abb. 58: Richtiges Dimensionieren der Endstücke bei punktförmigem Kontakt

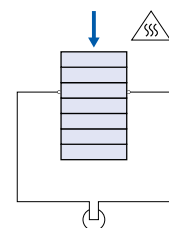


Abb. 59: Mechanische Belastungen laden den Aktor elektrisch auf. Montage nur im kurzgeschlossenen Zustand

Weltbewegende Antriebe

FÜR INDUSTRIE UND FORSCHUNG



Lösungen für High-Tech-Märkte

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

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

Physik Instrumente (PI) ist der weltweit führende Anbieter piezobasierter Positioniersysteme mit Genauigkeiten im Bereich einzelner Nanometer.

Das umfangreiche Produktangebot basiert auf einem breiten Technologiespektrum mit elektromotorischen oder piezoelektrischen Antrieben für bis zu sechs Bewegungsachsen. Hexapoden, Nanometersensorik, Ansteuerelektroniken sowie Software werden durch kundenspezifische Lösungen ergänzt.

Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung und jede Komponente kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensorik und die Piezokeramiken bzw. -aktoren. Letztere werden bei der Tochterfirma PI Ceramic gefertigt.

Damit ist PI der einzige Hersteller von Nanopositioniertechnik, der seine eigenen piezokeramischen Antriebe verwendet. Dies gewähr-

leistet ein hohes Maß an Flexibilität für die Entwicklung kundenspezifischer piezokeramischer Komponenten.

Über 100 Patente und zum Patent angemeldete Technologien stehen für über 40 Jahre Erfahrung und Pionierarbeit. Produkte von PI werden überall dort eingesetzt, wo Technologie in Industrie und Forschung vorangetrieben wird, und das weltweit.

Mit vier Sitzen in Deutschland und zehn ausländischen Vertriebs- und Serviceniederlassungen ist die PI-Gruppe international vertreten.

PI steht für Qualität in Produkten, Prozessen und Service. Die ISO-9001-Zertifizierung, bei der nicht nur die Produktqualität, sondern auch die Erwartungen und Zufriedenheit des Kunden im Vordergrund stehen, wurde bereits 1994 erreicht.

PI ist außerdem nach den ISO 14001 (Umweltmanagement) und OHSAS 18001 (Arbeitssicherheit) Standards zertifiziert, die zusammen ein integriertes Managementsystem (IMS) bilden.

Milestones

EINE ERFOLGSGESCHICHTE



- 1970** Gründungsjahr von PI
- 1977** Umzug nach Waldbronn
- 1987** Gründung der Niederlassung in den USA
- 1991** Gründung der Niederlassung in Japan
- 1991** Markteinführung von 6-achsigen, parallelkinematischen Positioniersystemen (Hexapoden)
- 1992** Gründung von PI Ceramic in Thüringen, Grundstein für die Marktführerschaft in der Nanostelltechnik
- 1993** Gründung der Niederlassungen in Großbritannien und Frankreich
- 1994** Markteinführung kapazitiver Positionssensoren
- 1995** Gründung der Niederlassung in Italien
- 1998** Markteinführung von digitalen Regelungselektroniken
- 2001** Markteinführung von PILine® Ultraschall-Piezomotoren
- 2001** Neues Firmengebäude in Karlsruhe
- 2002** Erweiterungsgebäude für PI Ceramic
- 2002** Gründung der Niederlassung in China
- 2002** Markteinführung der PICMA® Multilayer-Piezoaktoren
- 2004** Markteinführung der NEXLINE® Hochleistungs-Piezolinearantriebe
- 2007** Markteinführung der NEXACT® Piezolinearantriebe
- 2010** Kauf des Erweiterungsgrundstücks neben dem heutigen Firmensitz von PI
- 2011** Gründung der Niederlassung in Korea
- 2011** Gründung der Niederlassung in Singapur
- 2011** Übernahme Mehrheitsanteile der miCos GmbH, Eschbach
- 2012** Erweiterungsgebäude in Karlsruhe und Lederhose



Produktportfolio

NANOPOSITIONIERSYSTEME, MIKROSTELLTECHNIK & NANOMESSTECHNIK



Nanopositionierung

Auflösung bis in den Picometer-Bereich

Nanopositioniersysteme bieten Bewegungsauflösung und Positioniergenauigkeit im Bereich von Nanometern und darunter. Die Zielposition wird innerhalb weniger Millisekunden erreicht und stabil gehalten. Als Antrieb werden Piezoaktoren oder Piezoschreitantriebe eingesetzt. Eine Optimierung der Systemperformance wird durch digitale Motion Controller erzielt. Benötigt werden diese Systeme beispielsweise in der optischen Messtechnik, Mikroskopie oder Chipherstellung. Um die erforderliche Positionsauflösung und Stabilität zu erzielen, entwickelt und fertigt PI die Sensorik selbst und bietet diese als eigenständige Produktlinie an.

- Von linearen Achsen bis hin zu 6 Freiheitsgraden der Bewegung
- Parallelkinematisches Prinzip für mehrachsige Systeme
- Versionen mit direkter Positionsmessung
 - kapazitive Sensoren: Sub-Nanometer-Auflösung
 - Inkrementelle Sensoren: Nanometer-Auflösung, große Messbereiche
- Variabel in Bauform, Stellweg und Präzisionsklasse



PiezoWalk® Schreitantriebe

Über Millimeter präzise positionieren

Piezoschreitantriebe übertragen die Vorteile von Piezoaktoren auf Anwendungen mit größeren Stellwegen. Das Zusammenspiel der Bewegung einzelner Aktoren bewirkt eine Schreitbewegung mit hoher Auflösung und Dynamik innerhalb eines Schritts und ermöglicht dabei prinzipiell unbegrenzte Stellwege. Die Aktoren sind gegen den bewegten Läufer vorgespannt. Der Antrieb ist somit im ausgeschalteten Zustand selbsthemmend ohne Halteströme oder zusätzliche mechanische Komponenten. Dadurch treten keine Erwärmung oder Regelzittern auf, der Antrieb steht stabil.

- Zwei Prinzipien:
 - NEXLINE®: bis zu 600 N Stellkraft
 - NEXACT®: schnelle Bewegung und bis zu 10 N Stellkraft
- Integrationsstufen vom preisgünstigen OEM-Antrieb bis zum mehrachsigen Positioniersystem
- Kompakte Bauform, variabler Stellweg durch variable Läuferlänge
- Nanometer-Auflösung
- Vakuumkompatibel und nichtmagnetisch



PILine® Ultraschall-Piezomotoren

Klein und schnell über große Strecken

Ultraschall-Piezomotoren können klassische Motor-Spindel-Kombinationen oder magnetische Antriebe ersetzen und ermöglichen bei der Integration in Positioniersysteme besonders niedrige Profilhöhen. Sie bieten auf kleinstem Bauraum dynamisches Start-/Stoppverhalten, hohe Geschwindigkeit und Selbsthemmung. PI bietet miniaturisierte Varianten, OEM-Motoren und -Antriebe sowie komplette Positioniersysteme mit Controller an. Piezomotoren von PI sind im Prinzip vakuumtauglich und für den Betrieb unter starken Magnetfeldern geeignet.

- Integrationsstufen vom preisgünstigen OEM-Antrieb bis zum mehrachsigen Positioniersystem
- Beliebige, unbegrenzte Stellwege
- Mechanisch einfach integrierbar
- Selbsthemmend im Ruhezustand
- Haltekraft bis 15 N
- Geschwindigkeit bis 500 mm/s



Hexapoden – Parallelkinematische Positioniersysteme

Hochpräzise Positionierung in bis zu sechs Bewegungsachsen

Überall dort, wo eine mehrachsige und hochpräzise Bewegung erforderlich ist, setzt PI auf parallelkinematische Designs. Alle Antriebe wirken unmittelbar auf dieselbe bewegte Plattform. Dadurch ergeben sich Vorteile in der Präzision und Dynamik im Vergleich zu seriell gestapelten Achsen, bei denen sich die Fehler der Einzelachsen aufsummieren und dynamische Einbußen durch das Mitführen der oberen Achsen entstehen. Das parallelkinematische Prinzip ist dabei unabhängig vom verwendeten Antrieb. So können Mikro- und Nanostellensysteme mit bis zu sechs Freiheitsgraden der Bewegung umgesetzt werden.

- Geringe bewegte Masse, geringe Trägheit
- Gutes dynamisches Verhalten, schnelles Einschwingen
- Geringer Bauraum
- Hohe Steifigkeit
- Frei definierbarer Drehpunkt
- Minimiertes Achsübersprechen
- Sehr gute Wiederholbarkeit



Digitale Steuer- und Regeltechnik

Das Optimum an Performance erreichen

Die Leistungsmerkmale eines Präzisions-Positioniersystems hängt in gleichen Maßen von der Verstellmechanik wie von der Ansteuerung ab. Digitalcontroller verarbeiten Prozesswerte wie Sensorsignal oder Positionswertvorgabe mit speziell abgestimmten Algorithmen. So können Bewegungen auf Bahnkurven, Einschwingzeiten oder Bahnabweichungen während schneller Scanvorgänge optimiert werden.

- Für alle Antriebssysteme
- Hochauflösende D/A- und A/D-Wandler neueste Prozessoren
- Digitale Echtzeit-Schnittstellen
- Umfangreiche Software und Treiber
- Koordinateninformation für parallele Kinematiken/Hexapoden



Mikropositionierung

Präzisionspositionierung auf langen Wegen

Mikropositioniersysteme bieten Bewegungsaufösungen und Positioniergenauigkeiten im Bereich zwischen einigen 10 µm bis zu 0,1 µm. Als Antrieb stehen bürstenlose DC- oder Schrittmotoren zur Verfügung wie auch Linearantriebe wie PILine® Ultraschall-Piezomotoren oder NEXACT® Piezoschreitantriebe. Die Präzision des Systems hängt ab von den verwendeten Komponenten für Antrieb, Positionssensor und Führung. Bei klassischen Motoren spielt außerdem die Qualität des Getriebes, der Spindel bzw. des Schneckenriebs eine wesentliche Rolle. Digitale Steuerungen ermöglichen durch geeignete Regelungs- und Linearisierungsverfahren eine Verbesserung der Systemeigenschaften.

- Linearpositionierer
 - Stellwege von 5 bis 1000 mm
 - Geschwindigkeit bis zu 150 mm/s
 - Preisgünstige Designs, Varianten als Baukastensystem
- DC- und Stepper-Mikrometerantriebe
 - Stellwege bis 50 mm und Geschwindigkeit bis zu 30 mm/s
 - Auflösung bis <100 nm
- Rotationsversteller mit uneingeschränktem Drehbereich
 - bis 720 °/s
 - Auflösung bis 1 µrad
 - Optionale Encoder für die direkte Positionsmessung

Der PI Gesamtkatalog

Jetzt anfordern!

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



Hauptsitze

DEUTSCHLAND

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

PI miCos GmbH
Freiburger Str. 30
79427 Eschbach
Tel. +49 (7634) 5057-0
Fax +49 (7634) 5057-99
info@pimicos.de
www.pimicos.de

PI Ceramic GmbH

Lindenstr.
07589 Lederhose
Tel. +49 (36604) 882-0
Fax +49 (36604) 882-4109
info@piceramic.de
www.piceramic.de

Niederlassungen

USA (Ost) & KANADA

PI (Physik Instrumente) L.P.
Auburn, MA 01501
info@pi-usa.us
www.pi-usa.us

USA (West) & MEXIKO

PI (Physik Instrumente) L.P.
Irvine, CA 92620
info@pi-usa.us
www.pi-usa.us

JAPAN

PI Japan Co., Ltd.
Tachikawa
info@pi-japan.jp
www.pi-japan.jp

PI Japan Co., Ltd.
Osaka
info@pi-japan.jp
www.pi-japan.jp

ENGLAND & IRLAND

PI (Physik Instrumente) Ltd.
Cranfield, Bedford
uk@pi.ws
www.physikinstrumente.co.uk

ITALIEN

Physik Instrumente (PI) S. r. l.
Bresso
info@pionline.it
www.pionline.it

FRANKREICH

PI France S.A.S.
Montrouge
info.france@pi.ws
www.pifrance.fr

CHINA

Physik Instrumente (PI Shanghai) Co., Ltd.
Shanghai, China
info@pi-china.cn
www.pi-china.cn

SÜDOSTASIEN

PI (Physik Instrumente) Singapore LLP
Singapore
info-sg@pi.ws
www.pi-singapore.sg
For ID / MY / PH / SG / TH

KOREA

PI Korea Ltd.
Seoul
info-kr@pi.ws
www.pi-korea.ws