

PI



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.picceramic.de

Die folgenden aufgeführten Firmennamen oder Marken sind eingetragene Warenzeichen der Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG:
PI®, PIC®, PICMA®, PILINE®, 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

FÜHRENDE 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.

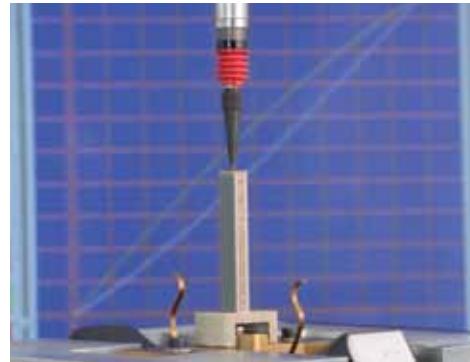
PIC hat sich dabei auf Stückzahlen von einigen 100 bis zu mehreren 100,000 spezialisiert. Unsere Entwicklungs- und Beratungsingenieure verfügen über einen enormen Erfahrungsreichtum bezüglich der Anwendung von Piezoaktorik und Sensorik und arbeiten schon im Vorfeld eines Projektes sehr eng mit den Entwicklern unsererer 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 Sensorsanwendungen
- 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 Kleininstmengen
- Alle Schlüsseltechnologien und moderne 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 kunden-spezifischer Piezobaugruppen stehen bereits nach sehr kurzen Bearbeitungszeiten zur Verfügung. Die Produktionsbedingungen, wie z.B. die Materialkomposition oder die Sinter-temperatur, werden dabei individuell auf das Keramikmaterial abgestimmt, um optimale Werkstoffparameter zu erreichen.

Präzisions-Bearbeitungstechnologie

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

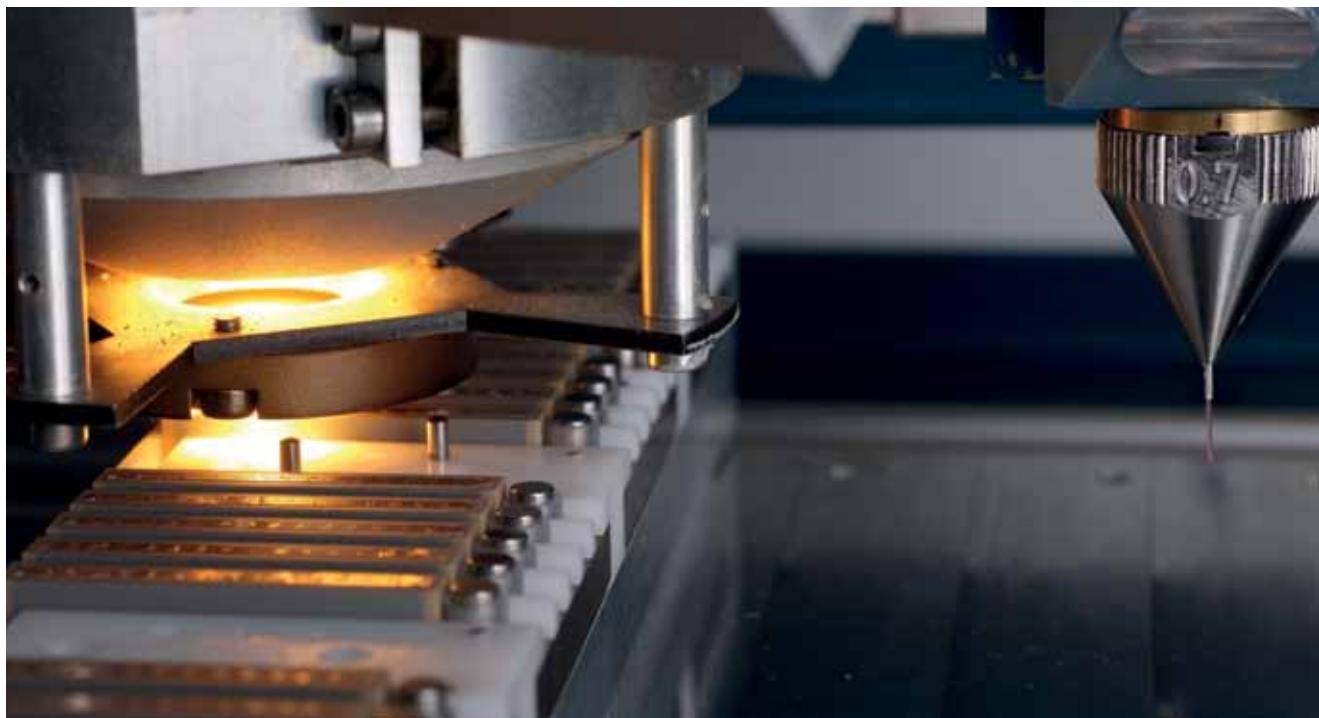
bearbeiten. Bereits im „Grünzustand“, also noch vor dem Sintern, sorgen spezielle Fräsmaschinen für exakte Formgebung. Gesinterte Keramikblöcke werden mit Präzisionssägen bearbeitet, wie sie auch für die Trennung einzelner Wafer verwendet werden. Feinste Bohrungen, strukturierte Keramikoberflächen, selbst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

Automatisierte Serienfertigung – Vorsprung für OEM Kunden

Die industrielle Anwendung erfordert häufig hohe Stückzahlen kundenspezifischer Bau-elemente. 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.

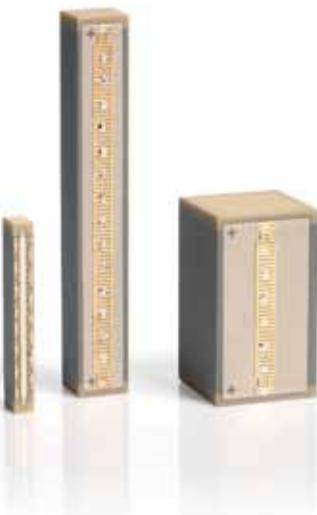


Automatisierte Abläufe optimieren den Durchsatz



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 V_{pp} unbelastet, beidseitig frei.

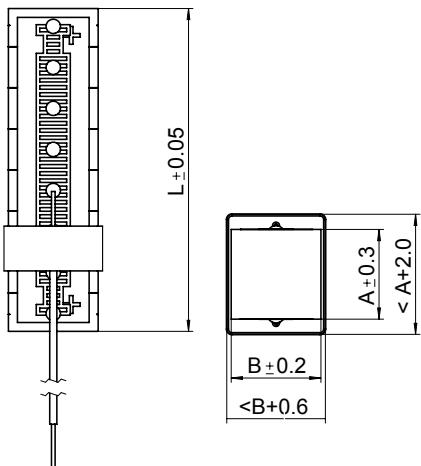
Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert

Kapazität gemessen bei 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

PICMA® PLUS Stack Multilayer-Piezoaktoren mit höheren Stellwegen

Für höhere Nominalstellwege sind PICMA® PLUS Aktoren verfügbar. Mehr Informationen finden Sie hier:
www.picceramic.de/de/produkte/piezokeramische-aktoren/linearaktoren/picma-plus-stack-multilayer-piezoaktoren

	PICMA®	PICMA® Plus
Material	PIC252	PIC252
Isolierung	Keramik	Keramik
Stellweg (5x5x36 mm)	(32 µm)	+ 12 % (36 µm)
Elektrische Kapazität (5x5x36 mm)	3,1 µF	+ 15% (3,6 µF)
DC-Lebensdauer (MTTF)	60 Jahre ¹⁾	60 Jahre ¹⁾
AC-Lebensdauer	1×10^9 ²⁾	1×10^9 ³⁾

¹⁾ Testbedingungen: relative Luftfeuchtigkeit = 70% RH | Temperatur = 22°C | Spannung = 100 VDC

²⁾ 1×10^9 Zyklen getestet, Testbedingungen: 0 - 100 V, Sinuswelle, Frequenz > 10 Hz ... < xxx Hz (begrenzt auf Eigenerwärmung des Aktors)

³⁾ 1×10^9 Zyklen geschätzt, 3×10^8 Zyklen getestet, Testbedingungen: 0 - 100 V, Sinuswelle, Frequenz > 10 Hz ... < xxx Hz (begrenzt auf Eigenerwärmung des Aktors)

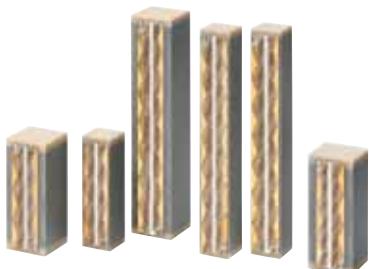
Kundenspezifische Ausführungen

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

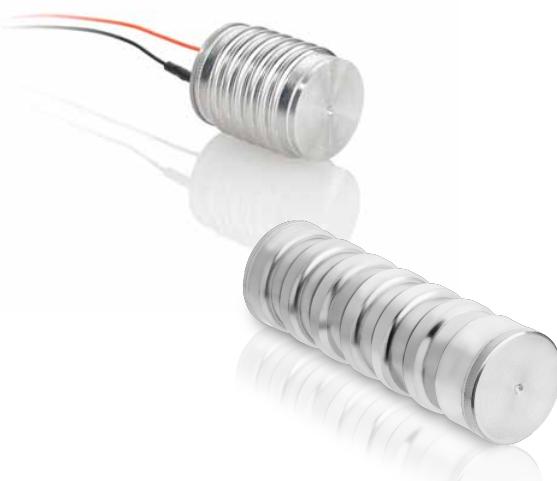
Durch eine neuartige Fertigungstechnologie können Multilayer-Piezoeaktoren auch mit Innenbohrungen hergestellt werden. Mit speziellen Bearbeitungstechniken werden die Löcher bereits in den ungesinterten Aktor eingebracht. Wie bei den PICMA® Standardaktoren entsteht im Co-Firing-Prozess von Keramik und Innenelektroden die durchgehende keramische Isolierschicht, die den Piezoeaktor vor Luftfeuchtigkeit schützt und seine Lebensdauer gegenüber herkömmlich polymerisierten 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



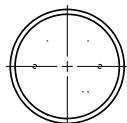
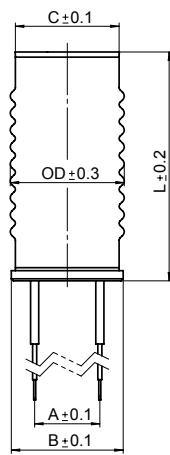
Gekapselte PICMA®

- Wassergeschützte Vollkapselung
- Überlegene Lebensdauer
- Hohe Steifigkeit
- UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa
- μ s-Ansprachzeit
- 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
000122370	7,20	12,90	12,90
000127370	7,20	12,90	12,90
000128370	7,20	12,90	12,90
000129370	7,20	12,90	12,90



Gekapselte PICMA® Aktoren, Abmessungen in mm

Bestellnummern	Abmessungen OD x L [mm]	Nominal- stellweg [μ m] (0–100 V)	Max. Stellweg [μ m] (0–120 V)	Blockier- kraft [N] (0–120 V)	Steifig- keit [N/ μ m]	Elektri- sche Kapä- zität [μ F] ±20 %	Reso- nanz- frequenz [kHz] 20 %
P-885.55	11,2 x 22,5	14 ±10 %	17 ±10 %	850	50	1,5	60
P-885.95	11,2 x 40,5	30 ±10 %	36 ±10 %	900	25	3,1	35
P-888.55	18,6 x 22,5	14 ±10 %	17 ±10 %	3400	200	6,0	60

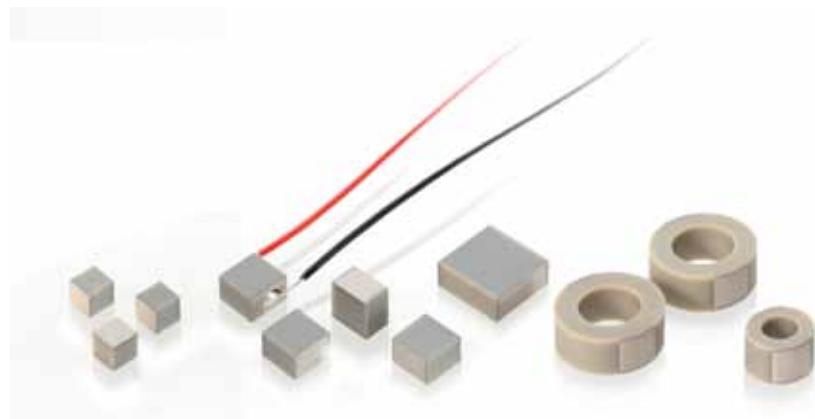
Piezokeramik PIC 252
Standardanschlüsse: 100 mm PTFE-isolierte Anschlusslitzen, AWG 30 (\varnothing 0,61 mm)
Resonanzfrequenz gemessen bei 1 V_{pp}, unbelastet, beidseitig frei. Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT
Betriebsspannungsbereich: -20 bis +120 V
Betriebstemperaturbereich: -40 bis +150 °C
Sonderausführungen auf Anfrage!

Bestellnummern	Abmessungen OD x L [mm]	Nominal- stellweg [μ m] (0–150 V)	Empfohlene Vorspannung [MPa]	Blockier- kraft [N] (0–150 V)	Steifig- keit [N/ μ m]	Elektri- sche Kapä- zität [μ F] ±20 %	Reso- nanz- frequenz [kHz] 20 %
000122370	12,9 x 40,4	60	15	1200	20	3,4	35
000127370	12,9 x 44,4	66	15	1200	18	3,9	32
000128370	12,9 x 64,4	96	15	1200	13	5,7	22
000129370	12,9 x 84,4	132	15	1200	9	7,7	17

Nominalstellweg: ungeregelt, bei 0 bis 150 V, Toleranz +° / -10%.
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT
Resonanzfrequenz, unbelastet gemessen bei 1 V_{pp}, beidseitig frei. Bei einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert.
Leckstrom: < 1 μ A, typisch < 100 nA, gemessen bei 100 V, nach 5 min, RT, 60 % relative Luftfeuchtigkeit.
Widerstand: > 10 G Ω , Labormessung bei RT bis zu 100 °C.
AC-Lebensdauer: > 6×10^8 Zyklen, gemessen unter Vorspannung 8 MPa, 0 bis 120 V, 116 Hz Sinus. DC-Lebensdauer (MTTF): > 7×10^4 h, extrapoliert bei 150 V, Raumtemperatur.
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

PICMA® Chip Aktoren

MINIATUR MULTILAYER-PIEZOAKTOREN



PLOxx • 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

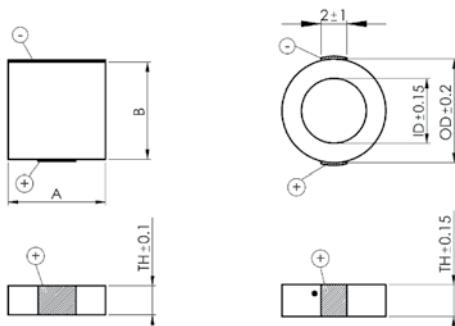
Betriebsspannung -20 bis 100 V. Keramische Isolierung, polymerfrei. Unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit. UHV-kompatibel bis 10⁻⁹ hPa, kein Ausgasen, hohe Ausheiztemperatur. Varianten mit quadratischem oder ringförmigem Querschnitt

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 %	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 %	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.

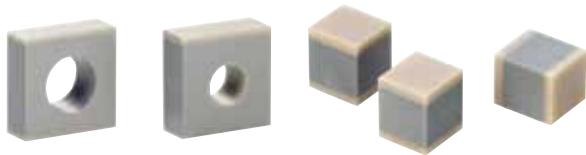
Piezokeramik PIC 252

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.

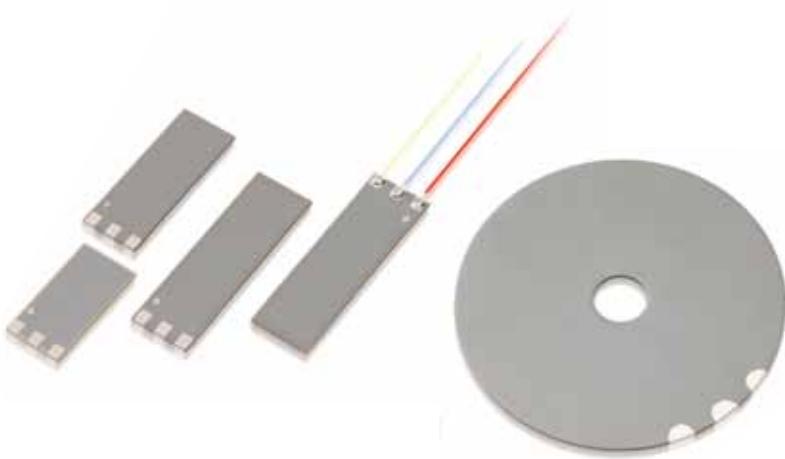
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT
Betriebsspannungsbereich: -20 bis +100 V
Betriebstemperaturbereich: -40 bis 150 °C



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

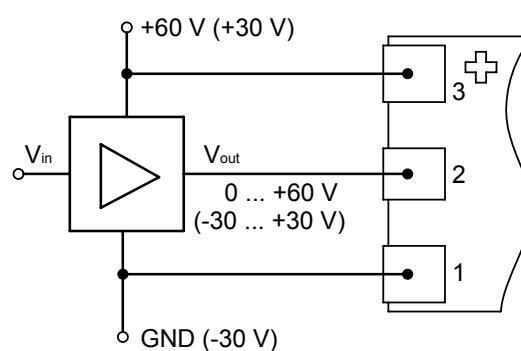
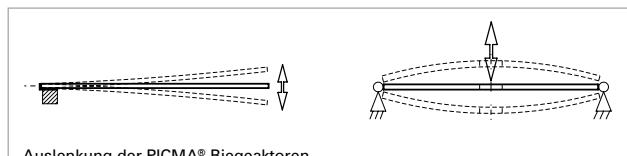
- Auslenkung bis 2 mm
- Kurze Ansprechzeit im ms-Bereich
- Nanometer-Auflösung
- Niedrige Betriebsspannung

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

PICMA® Bender Biegeaktoren werden differenziell angesteuert

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

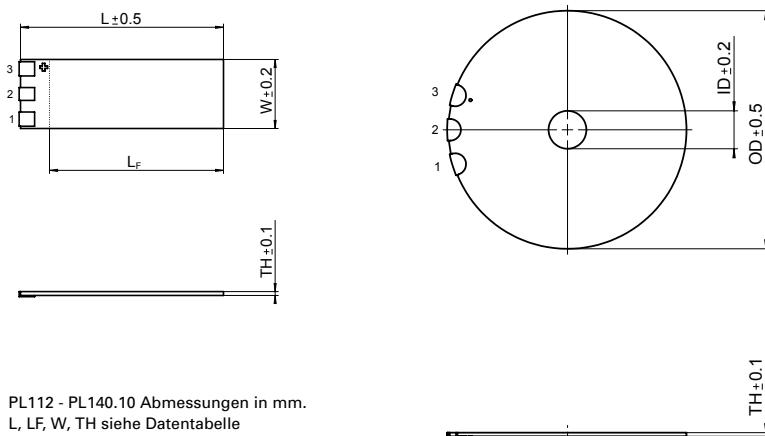
Resonanzfrequenz bezogen auf 1 V_{pp} , einseitig eingespannt mit freier Länge L_f , ohne Masselast. Für PD410.10: Einspannung mit drehbarer Lagerung am Außenumfang

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 aufgebrachten mechanischen Last.

Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



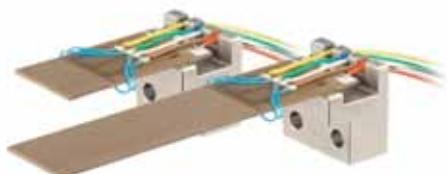
PL112 - PL140.10 Abmessungen in mm.

L, LF, W, TH siehe Datentabelle

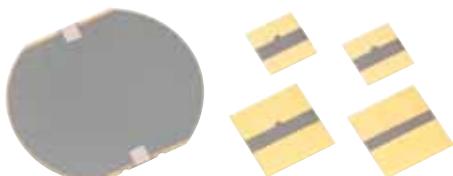
PD410 runder PICMA® Bender, Abmessungen in mm.
ID, OD, TH siehe Datentabelle

Kundenspezifische Ausführungen

PICMA® BENDER PIEZOAKTOREN



Die Biegeaktoren P-871 mit aufgebrachten 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.



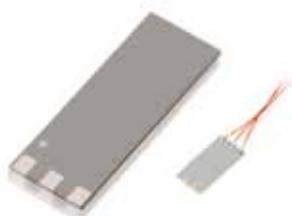
Multilayer-Kontraktorplatten sind in verschiedenen Geometrien, z.B. quadratisch oder als Scheibe fertigbar und auf Anfrage erhältlich. Diese Platten können z.B. auf Metall- oder Siliziumsubstraten appliziert werden, um Biege- oder Pumpenelemente mit niedrigen Ansteuerspannungen zu realisieren.



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.



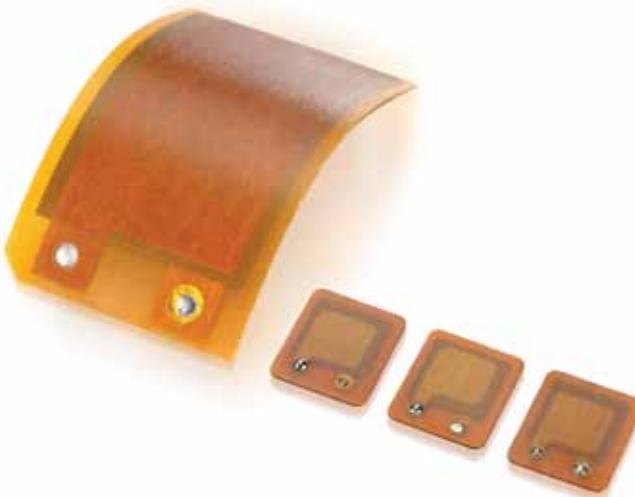
Bieger mit unidirektionaler Auslenkung bestehen aus einer einzigen aktiven Piezokeramikschicht, die mit einem Substrat aus Al₂O₃-Keramik oder aus Edelstahl verklebt wird. Verglichen mit dem bimorphen Aufbau erreichen diese Aktoren eine höhere Steifigkeit und eine größere Auslenkung, die allerdings nur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

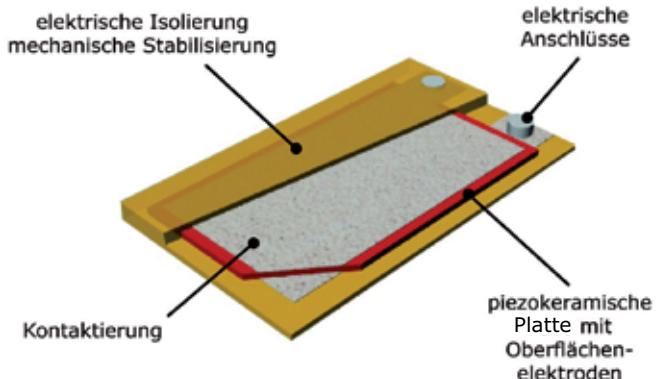
Laminierte Struktur aus einer piezokeramischen Platte, Elektroden und Polymermaterialien. Herstellung durch blasenfreies Injektionsverfahren. Die Polymerummantelung dient gleichzeitig als elektrische Isolierung und als mechanische Vorspannung, so dass der DuraAct biegsam ist

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-835 DuraActPiezoverstärker

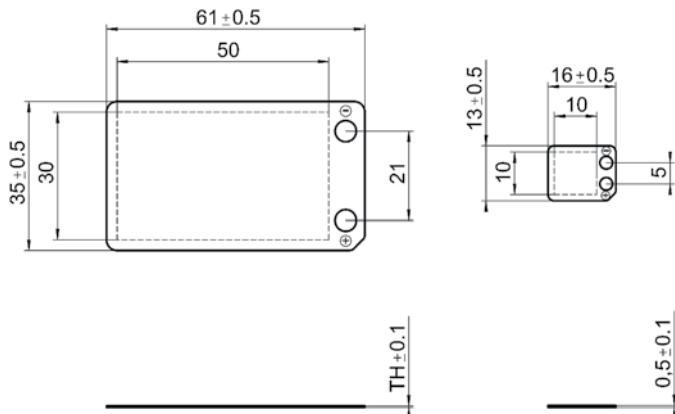
	Betriebs- spannungs- bereich [V]	Min. laterale Kontraktion [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Rel. laterale Kontraktion [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$]	Blockierkraft [N]	Abmessungen [mm]	Min. Biege- radius [mm]	Piezokeramik- höhe [μm]	Elektrische Kapazität [nF] $\pm 20\%$
P-876.A11	-50 bis +200	400	1,6	90	61 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

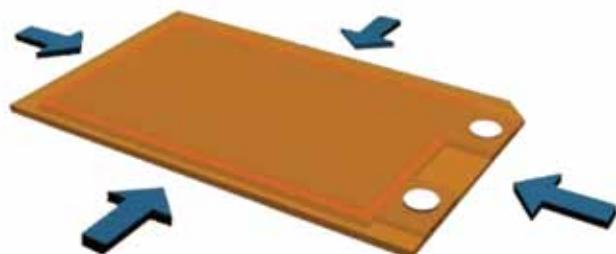
Standardanschlüsse: Lötpunkte

Betriebstemperaturbereich: -20 bis +150 °C

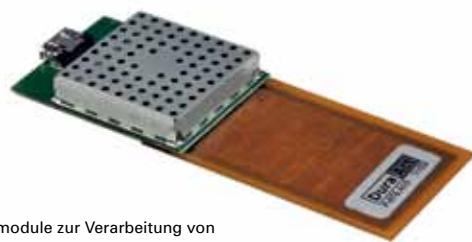
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



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



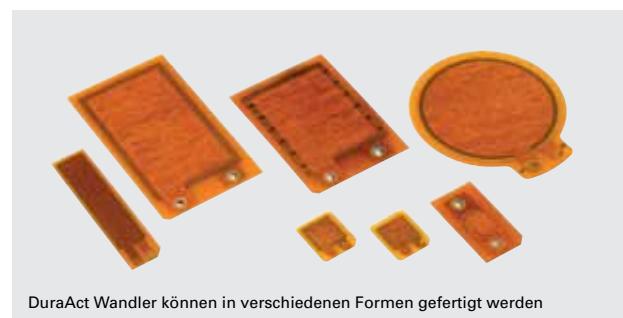
Beim Anlegen einer Spannung kontrahiert der DuraAct Flächenwandler in lateraler Richtung



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.), Faserstretcher

Bestellnummer	Abmessungen [mm] L x OD x ID	Max. Betriebsspannung [V]	Elektrische Kapazität [nF] ±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
PT130.50	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 Dünnfilm (CuNi, Au)

Scannerrohre

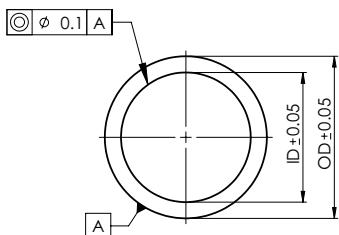
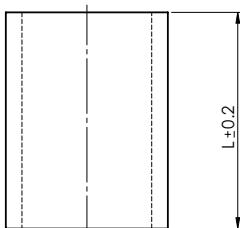
Vierfachsegmentierte Elektroden für XY-Auslenkung, UHV-kompatibel bis 10⁻⁹ hPa

Bestellnummer	Abmessungen [mm] L x OD x ID	Max. Betriebsspannung [V]	Elektrische Kapazität [nF] ±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 Dünnfilm (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 Kraftdetektorschichten
- 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 Polymerschutzschicht kann unterschiedlich gefärbt sein. Standardversionen werden mit Anschlusslitzten 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

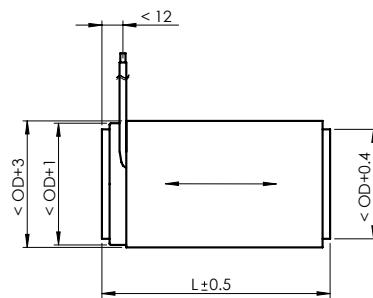
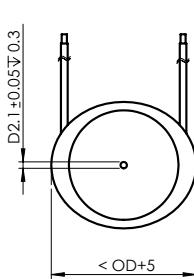
Standardanschlüsse: 100 mm PTFE isolierte Anschlusslitzen, AWG 24 (\varnothing 1,15 mm)

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 einseitiger 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
- µs-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: >10⁹ 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

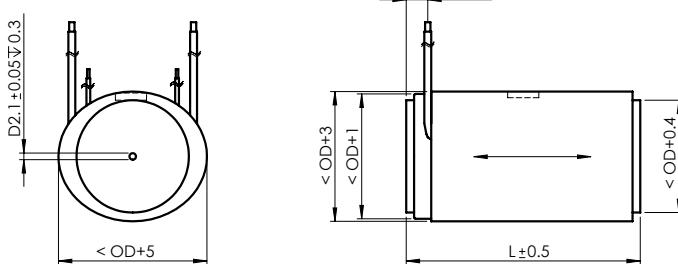
Bestellnummer	Stellweg (0–1000 V) [µm] -10/+20%	Durchmesser OD [mm]	Länge L [mm] ±0,5	Blockierkraft (0–1000 V) [N]	Steifigkeit [N/µm]	Kapazität [nF] ±20%	Resonanzfrequenz [kHz]
P-010.00P	5	10	9	1200	240	17	129
P-010.10P	15	10	18	1800	120	46	64
P-010.20P	30	10	31	2100	68	90	37
P-010.40P	60	10	58	2200	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
Standardstücke: Stahlscheiben, je nach Modell 0,5 bis 2 mm dick
Mantelflächen: Schrumpfschlauch

FEP, transparent
Sonderausführungen und andere Spezifikationen 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
- 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. 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 Kraftdetektorschichten
- 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 Anschlusslitsen 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] ±0,5	Blockierkraft [N] (0–1000 V)	Steifigkeit [N/µm]	Kapazität [nF] ±20 %	Resonanzfrequenz [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 (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 einseitiger Einspannung halbiert sich der Wert
Kapazität gemessen bei 1 V_{pp}, 1 kHz, RT

Betriebsspannungsbereich: 0 bis 1000 V

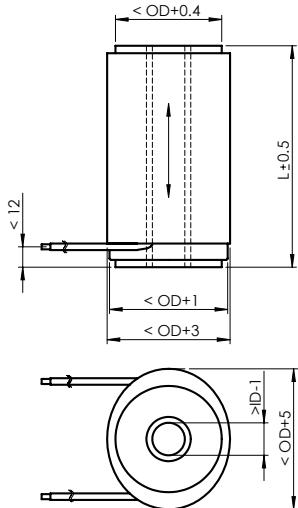
Betriebstemperaturbereich: -20 bis +85 °C

Standardendstücke: Keramikringe (passives PZT)
Mantelflächen: außen Schrumpf-

schlauch Polyolefin, schwarz; innen

Epoxidharz

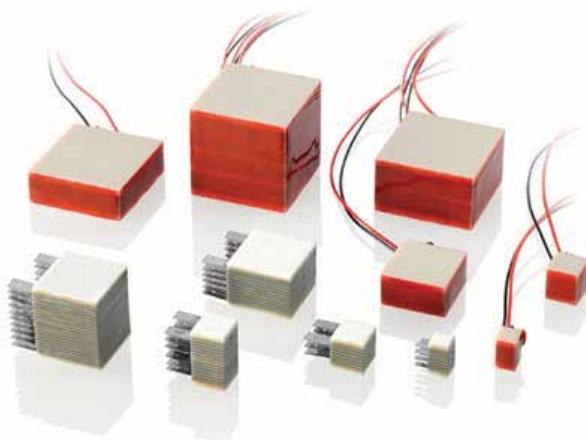
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.



PICA Thru, Abmessungen in mm

PICA Shear Scheraktoren

KOMPAKTE MEHRACHSEN-AKTOREN



P-111 – P-151

- X-, XY-, XZ- und XYZ-Varianten
- 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:

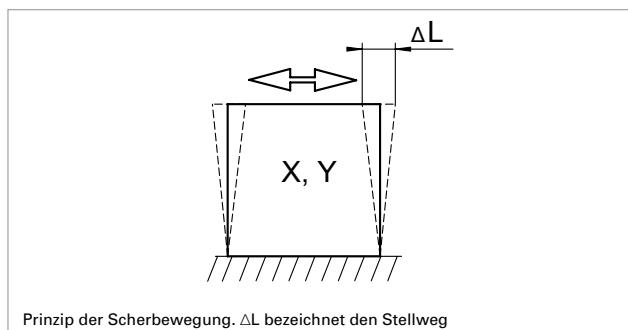
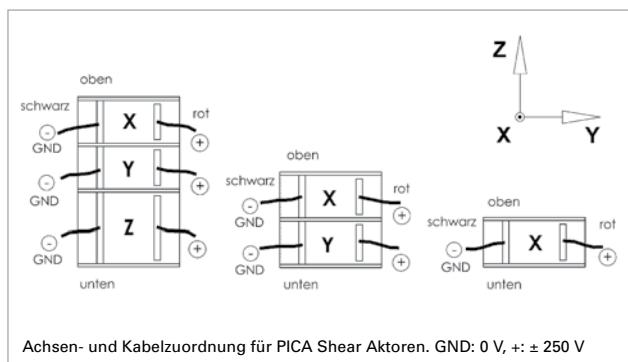
- Piezokeramikmaterial
- Unmagnetische Ausführungen
- Spannungsbereich, Auslenkung, Lagendicke, Querschnittsabmessung
- Belastbarkeit, Krafterzeugung
- Endstücke: flach, sphärisch, Metall, Keramik, Glas, Saphir etc.
- Verringerte Längentoleranzen

Einsatzgebiete

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

Geeignete Verstärker

E-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 einseiti-

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

Standardendstücke: Ta. Kontaktierung

mit leitfähigem Klebstoff oder Schweißen

möglich. Auslenkung gemessen bei Raum-

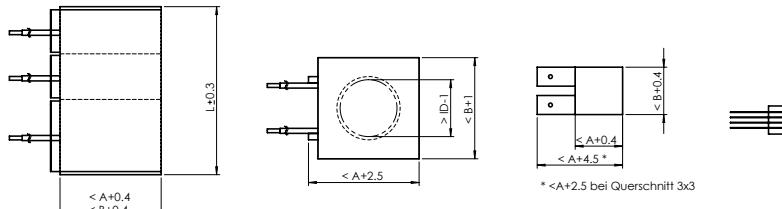
temperatur. Wert reduziert sich bei tiefen Temperaturn.

Standardendstücke: Keramik (Al₂O₃, 96 % rein)

Mantelfläche: Epoxidharz

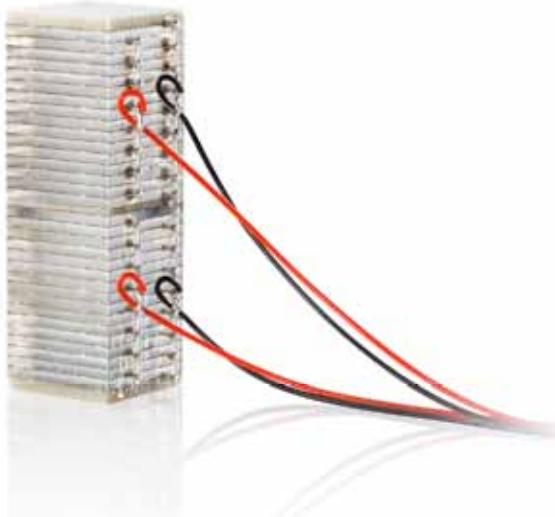
Sonderausführungen und andere Spezifikationen auf Anfrage.

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 3x3



Picoactuator®

MEHRACHS-AKTOREN MIT HOCHLINEARER AUSLENKUNG



P-405

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

Aktor in Stapelbauweise

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

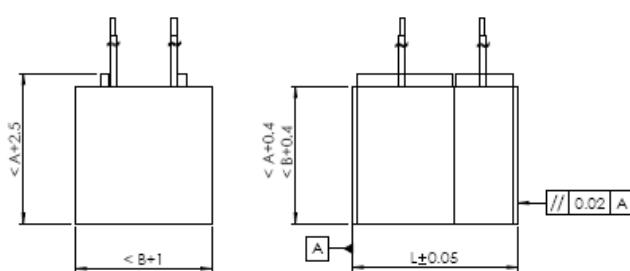
Kein Kriechen. Picoactuatoren sind als Longitudinal- und Scheraktoren konfigurierbar bis zu Höhen von 20 mm und maximalen Stellwegen von $\pm 3 \mu\text{m}$

Mögliche Modifikationen

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

Anwendungsgebiete

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



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

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



Picoactuator® 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 komplette 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 Festkörperelemente 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

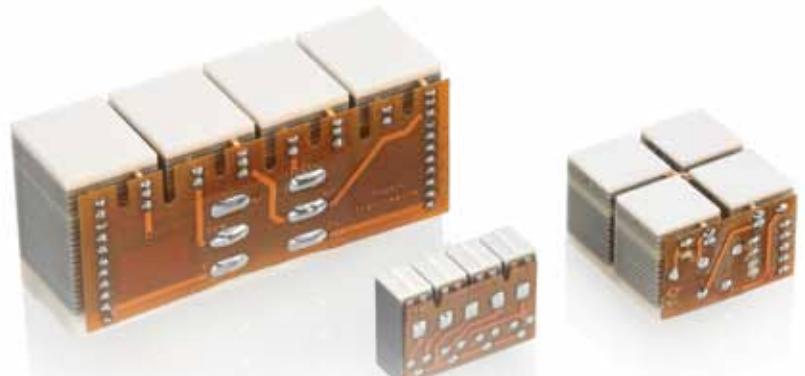
Piezokeramiken sind das Antriebselement für Piezomotoren von Physik Instrumente (PI), die es ermöglichen, die besonderen Eigenschaften der Piezoaktoren auch über längere Verstellwege zu nutzen. PILine® Ultraschall-Piezomotoren ermöglichen sehr dynamische Zustellbewegungen und sind dabei so kompakt herstellbar, dass sie bereits in vielen neuen Anwendungen eingesetzt werden. Piezoschreitantriebe wiederum bieten über mehrere Millimeter die hohen Kräfte, die Piezoaktoren entwickeln. Die patentierte 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



Miniaturl-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 μ F
- 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 Spaltenströme 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 massefreien Aufbau der Piezosysteme und entsprechende Anschlüsse.



Geschalteter Verstärker mit Energie-rückgewinnung 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

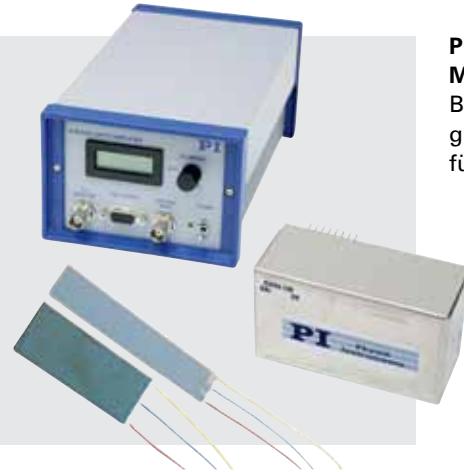
Der E-618 ist speziell auf PICMA® Piezoaktoren mit Anschlüssen für hohe Ströme abgestimmt. Die Kombination ist vor allem für hochdynamische Daueranwendungen wie z.B. Prüfeinrichtungen für Einspritzventile geeignet.

- 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

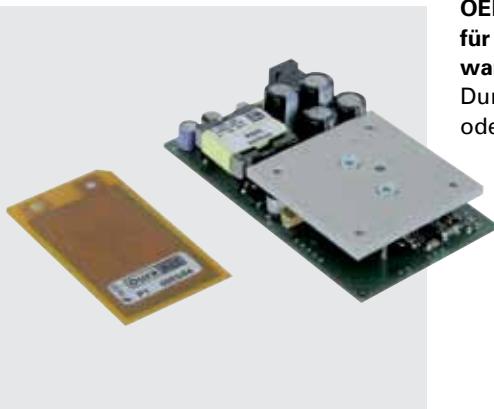
FÜR BIEGE- UND SCHERAKTOREN, DURAACT WANDLER



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



OEM-Modul E-835: Bipolarer Betrieb für piezoelektrische DuraAct Flächen- wandler

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 ungeregelte 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
Leistungsaufnahme, max.	<30 W	<15 W	30 / 45 / 55 W	55 W	30 W	bis 160 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 Komplettgeräte als OEM-Platine bis hin zum modularen, gehäusten 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, Weltraum, Reinraum)
- Copy-Exactly Vereinbarungen

Ihre Applikation ist hochdynamisch ...	Welcher Hochleistungs-Piezoverstärker ist geeignet?
Positionieren mit Sub-Nanometer-Genauigkeit und hervorragender Stabilität	E-505 Verstärkermodul im Controllersystem E-500; für Langzeitstabilität optional Positionsregelung mit kapazitiven oder Dehmessstreifen-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-835	E-421 / E-47x	E-481	E-462
	für Multilayer-Bieger, auch als OEM-Modul	für DuraAct	Modul oder im Chassis, optionale Schnittstellen	geschalteter Verstärker, mit Energierückgewinnung	auch als OEM-Gerät
Ausgangsspannung	0 bis 60 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	-4 bis 10 V	0 bis 11 V	0 bis 11 V	0 bis 10 V
Spitzenstrom	18 mA	120 mA	500 mA	2 A	0,5 mA
Dauerstrom	6 mA	40 mA	100 mA	600 mA	0,3 mA
Rauschen, 0 bis 100 kHz	5 mV _{rms}	2 mV _{pp}	<25 mV _{rms}	150 mV _{rms}	50 mV _{rms}
Bandbreite, Kleinsignal	bis 6 kHz	bis 4,2 kHz	>10 kHz	<5 kHz	für statische Anwendungen
Spannungsverstärkung	6 ±0,1	25	100 ±1	100 ±1	100 ±1
Piezoeinschaltung	D-Sub	Lötpunkte	HV-LEMO	HV-LEMO	HV-LEMO
DC-Offset	-	-	Pot.	Pot.	Pot.
Abmessungen	160 x 125 x 50 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	12 V	100–120/220–240 V	100–120/220–240 V	10–15 V
Leistungsaufnahme, max.	30 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 Polarisation, 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 – Krafterzeugung 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, Wärmeerzeugung 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 ungünstiger 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 geringer 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.

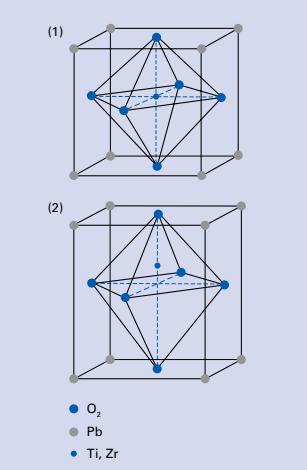


Abb. 1

- (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

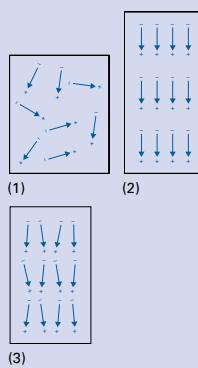


Abb. 3

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

Piezoelektrische Aktormaterialien

WERKSTOFFE UND EIGENSCHAFTEN

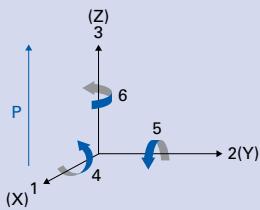


Abb. 4

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

Kommerziell verfügbare piezokeramische Werkstoffe basieren meist auf dem Materialsystem Bleizirkonat-Bleitanat (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.

Beispiel-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-Folienprozess. Standardwerkstoff für die Produktlinien PICMA® Stack, PICMA® Chip, PICMA® Bender sowie einiger DuraAct-Produkte

PIC181 Modifizierte PZT-Keramik mit extrem hohem mechanischen Gütfaktor, guter Temperatur- und Zeitkonstanz der dielektrischen und elastischen Werte. Standardmaterial für Leistungsschall und Anwendungen im Resonanzmodus.

	PIC151	PIC153	PIC255/252	PIC181
Physikalische und dielektrische Eigenschaften				
Dichte ρ [g/cm³]	7,80	7,60	7,80	7,85
Curie-Temperatur T_c [°C]	250	160	350	330
Relative Permittivitätszahl in Polarisationsrichtung $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ quer zur Polung ϵ_{11}/ϵ_0	2500 1980	4500 3500	1800 1750	1200 1250
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ [10⁻³]	20	30	20	3
Elektromechanische Eigenschaften				
Piezoelektrischer Deformationskoeffizient, Piezomodul*	-210	-295	-180	-120
d_{31} [pm/V]	500	600	400	265
d_{33} [pm/V]	610	780	550	475
Akustomechanische Eigenschaften				
Elastische Nachgiebigkeitskonstante s_{11}^E [10^{-12} m² / N]	16,4	17,42	16	11,8
s_{33}^E [10^{-12} m² / N]	19,4	20	19	13,3
Mechanischer Gütfaktor Q_m	100	50	80	2000

Erläuterungen, erweiterte Daten und weitere Materialien siehe <https://www.picericamic.de/de/expertise/piezotechnologie/piezoelektrische-materialien>

* 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.picericamic.de

Piezoelektrische Aktoren

AUSLENKUNGSSARTEN



Longitudinale Stapelaktoren

In longitudinalen Piezoaktoren wird das elektrische Feld in der Keramikschicht parallel zur Richtung der Polarisation angelegt. Dadurch wird eine Dehnung oder Auslenkung in Richtung der Polarisation 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 Polarisation findet im Piezoaktor neben der Verlängerung in Polarisationsrichtung, die bei Longitudinalaktoren genutzt wird, gleichzeitig immer eine Kontraktion orthogonal zur Polarisation statt.

Dieser sogenannte transversale piezoelektrische Effekt wird bei Kontraktoren, Piezoröhren 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 erzeugt 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 Picoactuator®.

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

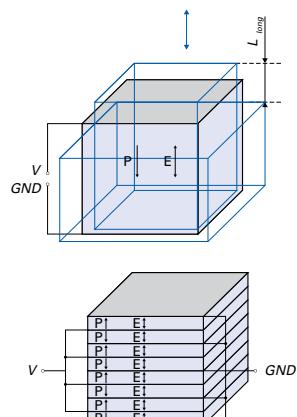


Abb. 5

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

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.

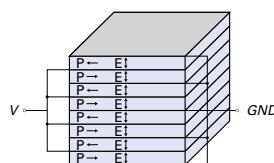
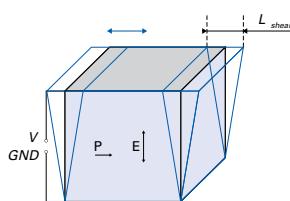


Abb. 6

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



Scheraktoren

In piezoelektrischen Scheraktoren wird das elektrische Feld in der Keramikschicht 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 $d_{15(\text{GS})}$ 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 Bleizirkonat-Bleitanat (PZT). Die Auslenkung ist dabei hochlinear mit einer Abweichung von nur 0,2 %.

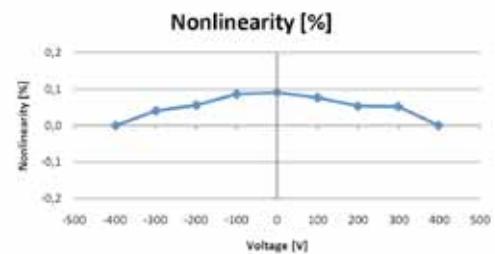


Abb. 7:
Gemessene Nichtlinearität eines Picoactuator®





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 Verkippungen oder axiale Bewegungen können durch komplexere Elektrodenanordnungen vermieden werden. So erzeugt eine 8-Elektrodenanordnung eine Gegenbiegung und erreicht insgesamt eine laterale Verschiebung ohne Verkipfung.

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

Rohraktoren werden häufig in Rastersondenspektroskopien 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

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

(Gleichung 3)

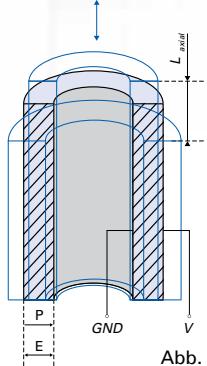


Abb. 8

Radiale Auslenkung

Für große Radien gilt folgende Abschätzung:

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

(Gleichung 4)

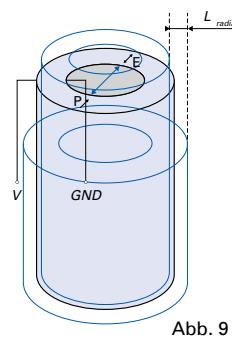


Abb. 9

Biegeaktoren, XY-Scannerrohre

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

(Gleichung 5)

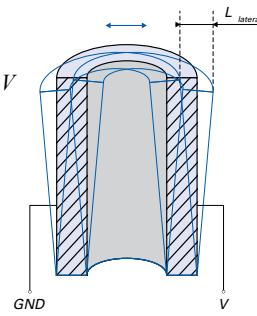


Abb. 10

ΔL_{shear} Scherauslenkung [m]

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

n Anzahl der gestapelten Keramikschichten

V Betriebsspannung [V]

ΔL_{axial} axiale Rohrauslenkung [m]

ΔL_{radial} radiale Rohrauslenkung [m]

$\Delta L_{\text{lateral}}$ laterale Rohrauslenkung [m]

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

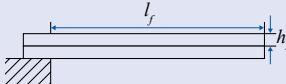
l Rohrlänge [m]

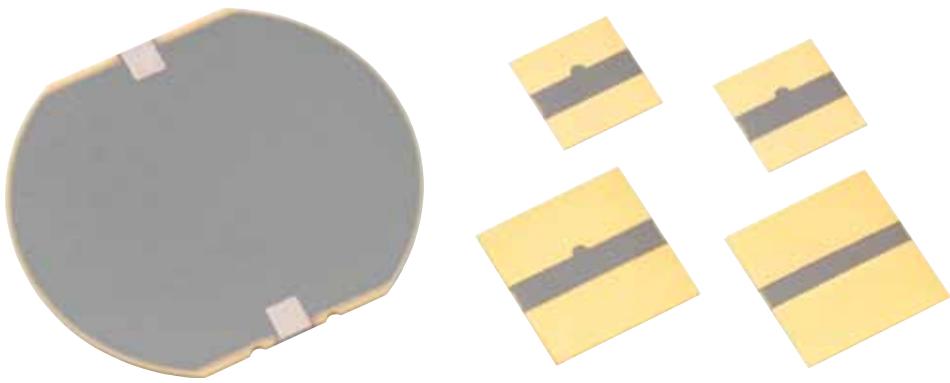
ID Rohrinnendurchmesser [m]

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 Biegerlänge [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 Biegeransteuerung [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).

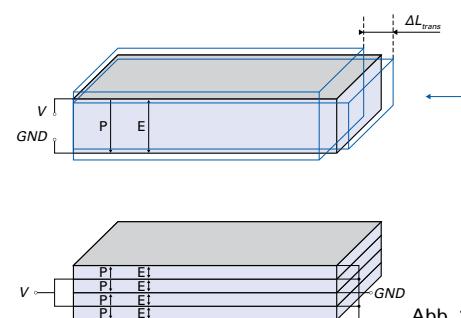
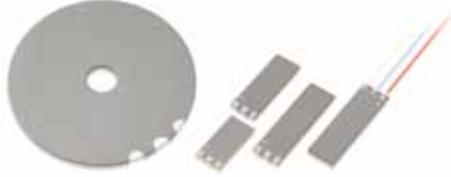


Abb. 11

$$\Delta L_{trans} = d_{31(GS)} \frac{l}{h} V \quad (\text{Gleichung 6})$$



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.

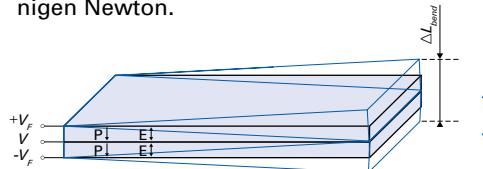


Abb. 12: Auslenkung von Biegeaktoren

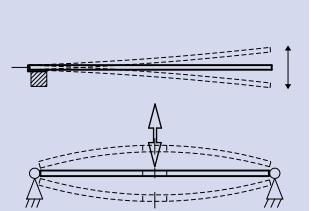


Abb. 17

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

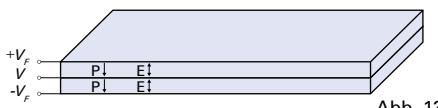


Abb. 13

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

Vollkeramikbieger für die Reihenschaltung

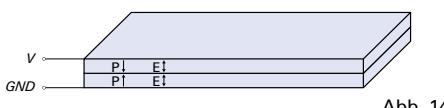


Abb. 14

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

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

PI Ceramic bietet vollkeramische Multilayer-Biegeaktoren mit sehr niedrigen Ansteuerspannungen in der Produktlinie PICMA® Bender an. Verbundbieger können als Sonderversionen hergestellt werden, sowohl in Multilayer- als auch in Einzelschichtausführung bzw. mit DuraAct-Aktoren.

Zweischicht-Verbundbieger mit einseitiger Auslenkung

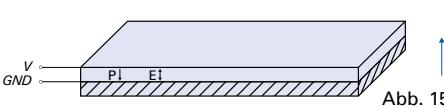


Abb. 15

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{3I(GS)} \frac{l_f^2}{h_p^2} \frac{2R_h R_E (1+R_h)}{R_h R_E (1+R_h)^2 + 0.25 (1-R_h^2 R_E^2)^2} V \quad (\text{Gleichung 9})$$

Anwendung DuraAct, PICMA® Bender (Sonderversionen)

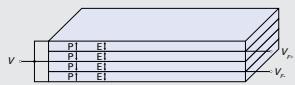


Abb. 18: Die Produkte des PICMA® Bender-Sortiments sind Vollkeramikbieger, deren zwei Piezokeramikelemente jeweils aus mehreren aktiven Schichten bestehen (Multilayeraktoren s. S. 11).

Symmetrischer Dreischicht-Verbundbieger für die Parallelschaltung



Abb. 16

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{3I(GS)} \frac{l_f^2}{h_p^2} \frac{1+R_h}{1+1.5R_h+0.75R_h^2+0.125R_E R_h^3} V \quad (\text{Gleichung 10})$$

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 darauf folgenden 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 dünner Multilayer-Schichten können hergestellt werden. In PICMA® Stack Stapelaktoren beträgt die Höhe der aktiven Schichten 60 µm, in PICMA® Bender-Aktoren 20 bis 30 µm, so dass die Bieger mit einer sehr geringen Nominalspannung von nur 60 V betrieben werden können.

Mittels Einzelfolientechnologie können sogar Schichtendicken zwischen 10 und 200 µm erreicht werden mit nahezu unbegrenztem Elektrodendesign.



Auch runde Geometrien bzw. PICMA® Aktoren mit Innenbohrung können 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

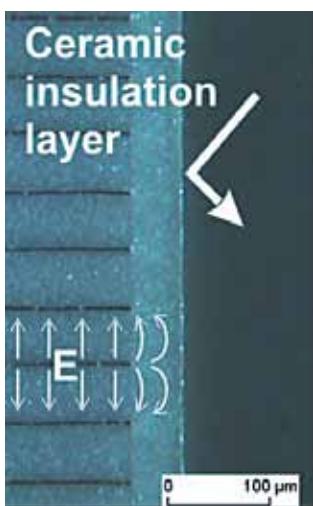
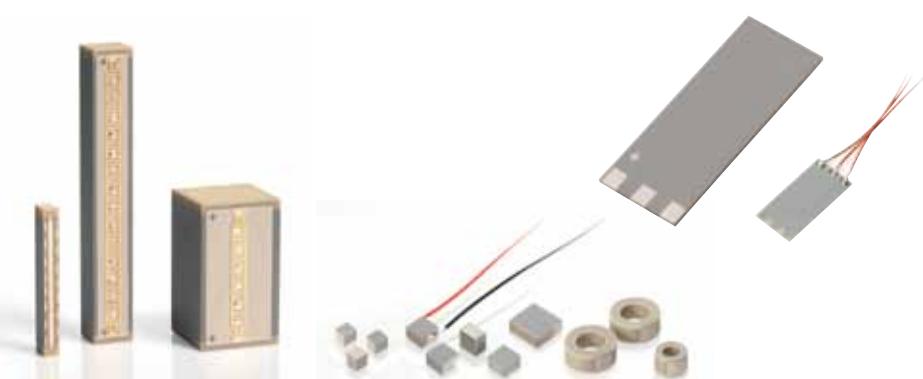


Abb. 19: In PICMA® Stack Aktoren deckt eine keramische Isolierfolie die inneren Elektroden ab



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.

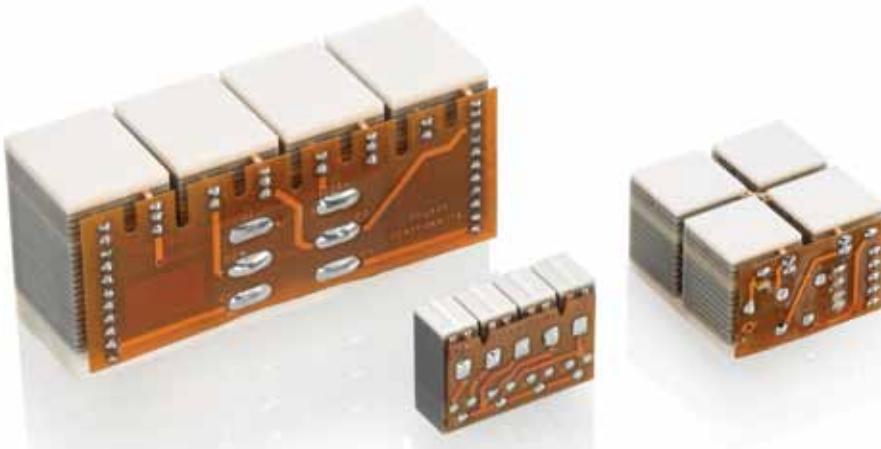
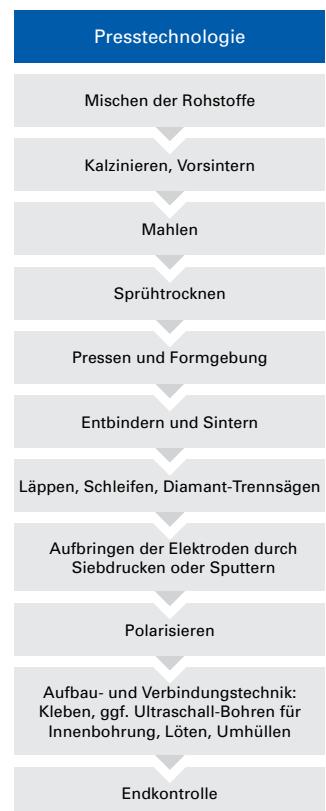
Der Aufbau zu Stapelaktoren erfolgt durch Verkleben der Platten, wobei zur Kontaktierung der aufgebrachten Elektroden jeweils ein dünnes metallisches Kontaktplättchen zwischen zwei Keramikplatten liegt. Ein Lötschritt verbindet die Kontaktplättchen miteinander, anschließend wird der fertige Stapel mit einer Polymerschutzschicht 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 Schnittrichtung im Einkristall bestimmt. Alle weiteren Verarbeitungs- und Montageschritte ähneln denen gestapelter PICA Aktoren.



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



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

Herstellung von Piezoaktoren (Fortsetzung)



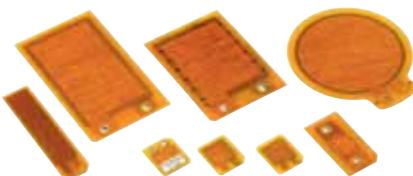
Strukturierte Elektroden erlauben die gezielte Ansteuerung der Rohraktoren

PT-Tube Rohraktoren

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

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

Neben dem beschriebenen Ablauf zur Her-stellung von Präzisionsrohren mit engsten geometrischen Toleranzen steht auch das preisgünstigere Extrusionsverfahren bei kleinen Durchmessern zur Verfü-gung.



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 Piezokeramikhö-he 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 Injek-tionsverfahrens. Dadurch entstehen völlig blasenfreie Laminate höchster Qualität.

Das Aushärtetemperaturprofil des Autokla-vens ist so gewählt, dass eine definierte interne Vorspannung der Piezokeramikplatten aufgrund der unterschiedlichen Tempera-turausdehnungskoeffizienten der beteilig-ten Materialien entsteht.

Das Ergebnis dieser patentierten Technolo-gie sind robuste, biegbare Wandlereleme-nte, die in großen Stückzahlen gefertigt wer-den können.



Einlaminierte Keramiksichten in einer DuraAct Wandleranordnung (Array)

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

AUSLENKUNGSVERHALTEN

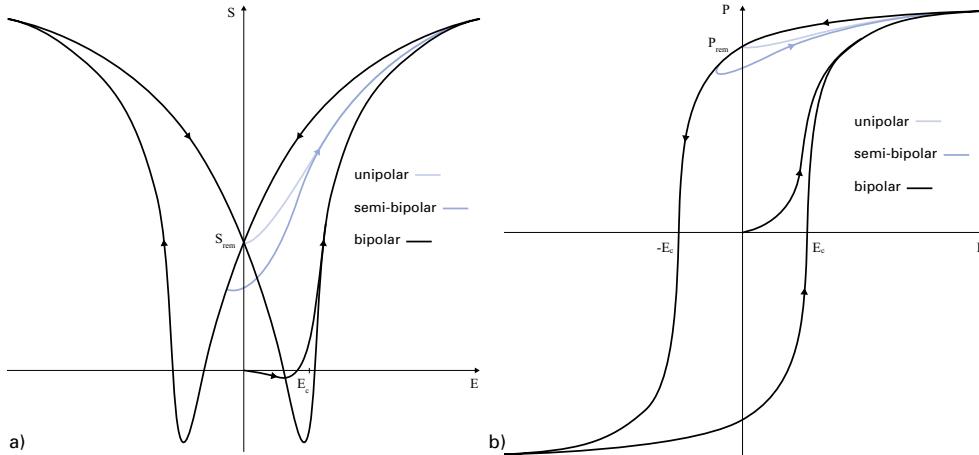


Abb. 20: Auslenkung ferroelektrischer Piezokeramiken bei verschiedenen Ansteueramplituden parallel zur Polarisationsrichtung. Großsignalkennlinien in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke E
a) elektromechanisches Verhalten der longitudinalen Dehnung S , b) dielektrisches Verhalten der Polarisation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

Nichtlinearität

Die spannungsabhängigen Auslenkungskurven von Piezoaktoren haben aufgrund der extrinsischen Domänenanteile einen stark nichtlinearen und hysteresebehafteten 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 depolarierten 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 Polarisationen P_{rem} / $-P_{rem}$ bzw. die remanente Dehnung S_{rem} .

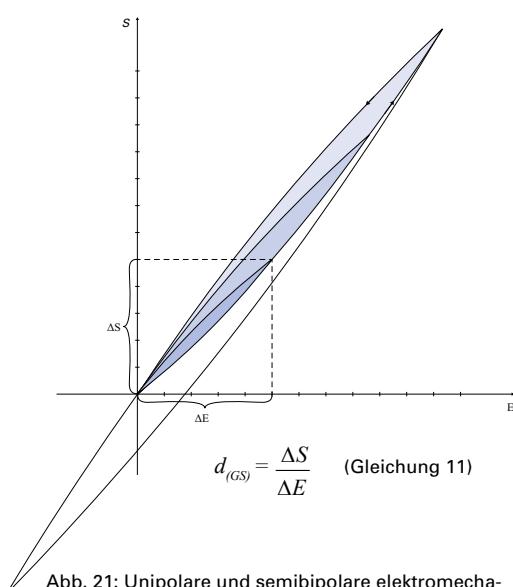


Abb. 21: Unipolare und semibipolare elektromechanische Kennlinien ferroelektrischer Piezokeramiken und Definition des piezoelektrischen Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ als Anstieg zwischen den Umkehrpunkten einer Teilhysteresekurve

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).

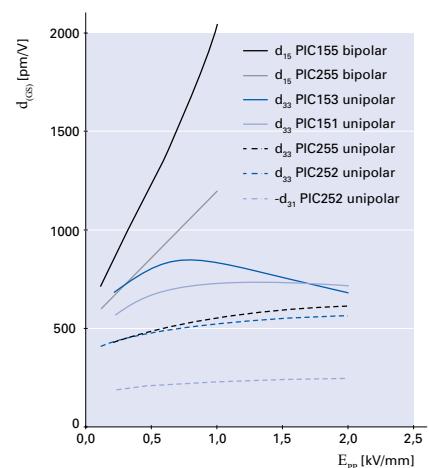
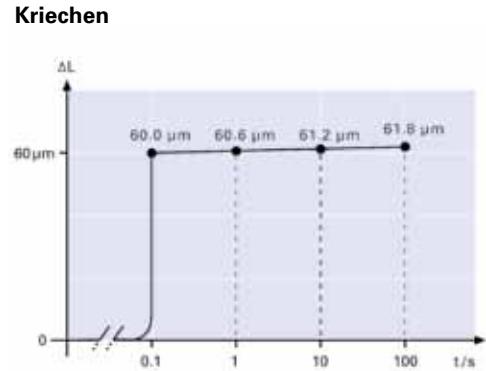
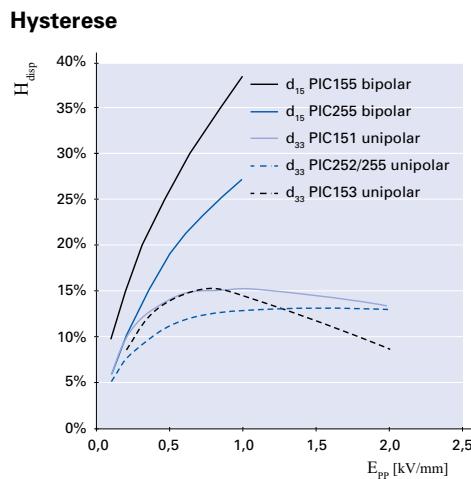
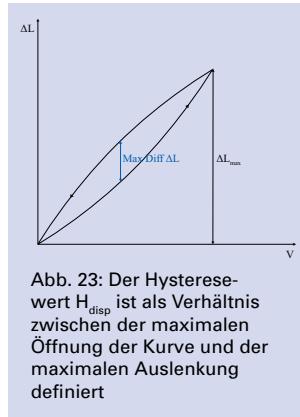


Abb. 22: Piezoelektrische Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Bei sehr kleinen Feldamplituden stimmen die Werte der Koeffizienten mit den Materialkonstanten von S. 36 überein

Auslenkungsverhalten (Fortsetzung)



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)

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 logarithmischem Zeitdekade

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

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

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 Ansteuerspannung abschätzen. Die Feldstärke kann aus den Schichthöhen des konkreten Bauelementes und der Ansteuerspannung 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

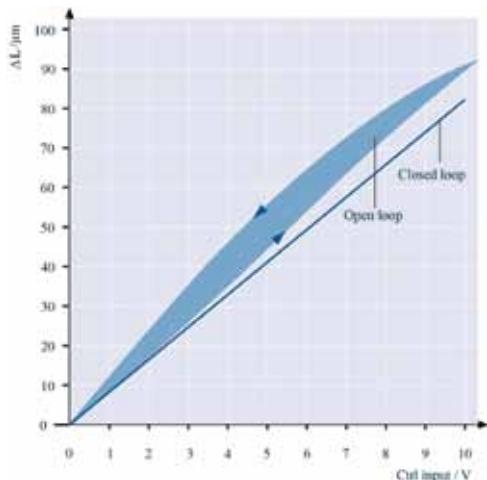


Abb. 26: Eliminieren von Hysterese und Kriechen im piezokeramischen Aktor durch Positionsregelung

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 positions-geregelten 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

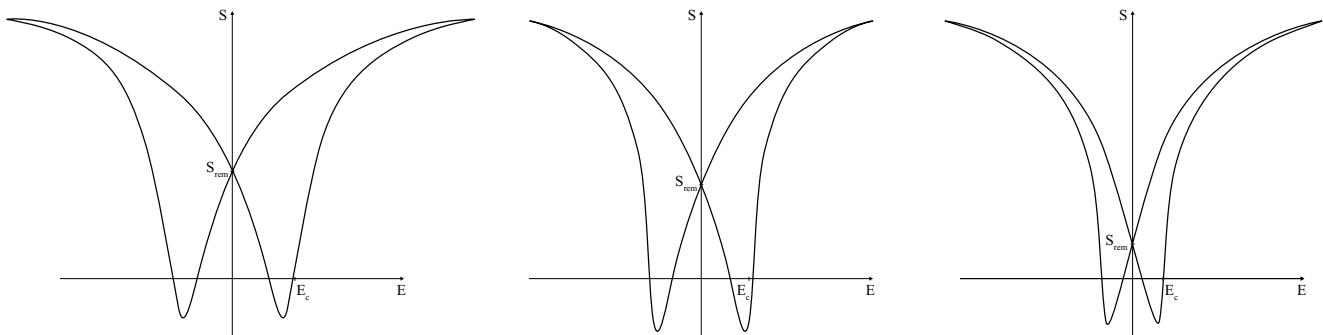


Abb. 27: Bipolare elektromechanische Großsignal-Kennlinie piezokeramischer Aktoren bei verschiedenen Temperaturen. Von links: Verhalten bei tiefen Temperaturen, bei Raumtemperatur, bei hohen Temperaturen

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.

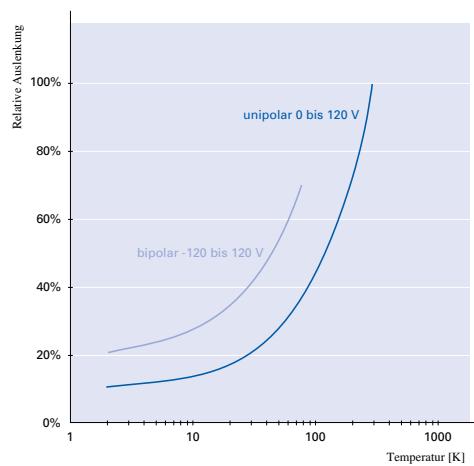


Abb. 28: Relative Abnahme der Auslenkung am Beispiel eines PICMA® Stack Aktors im kryogenen Temperaturbereich bei verschiedenen Ansteuersignalen bezogen auf die Raumtemperatur-Nominalauslenkung

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 Temperaturausdehnungskoeffizient eines vollkeramischen PICMA® Stack Aktors beträgt näherungsweise -2,5 ppm/K. Dagegen führen in einem PICA Stack-Aktor die zusätzlichen Metall-Kontaktplättchen sowie die Klebstoffsschichten 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.

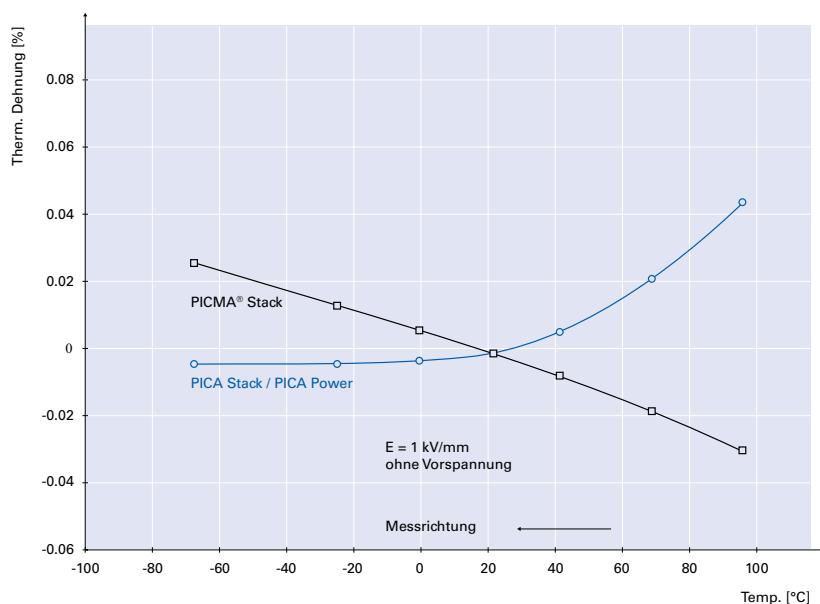


Abb. 29: Temperaturausdehnungsverhalten von PICMA® und PICA Aktoren bei elektrischer Großsignalansteuerung

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 nichtlinear 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-

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 .

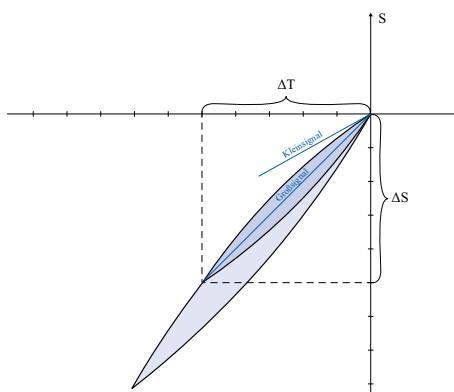


Abb. 30: Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eines piezokeramischen Stapelaktors bei Ansteuerung mit einer hohen Feldstärke, um mechanische Depolarisationen zu vermeiden. Der lineare Anstieg $\Delta T/\Delta S$ definiert den effektiven Großsignal-Elastizitätsmodul $E^*_{(GS)}$. Kleinsignalwerte der Elastizitätsmodule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

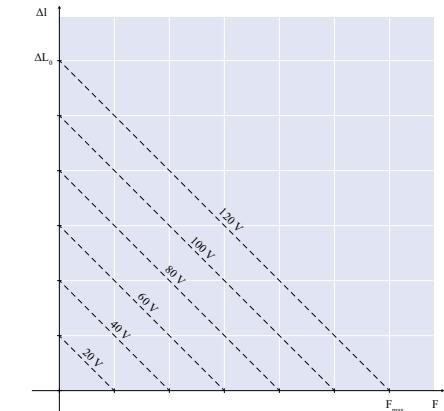
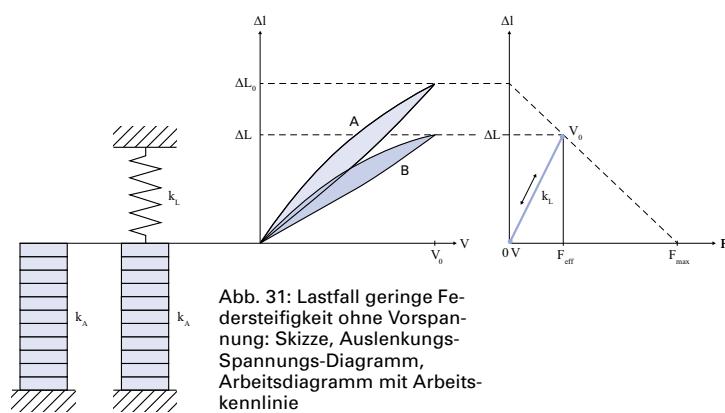


Abb. 32: Arbeitsdiagramm eines PICMA® Stack Aktors bei unipoler Ansteuerung mit verschiedenen Spannungen

Kräfte und Steifigkeiten (Fortsetzung)

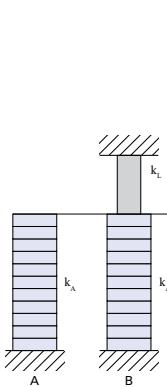


Abb. 33: Der Aktor arbeitet ohne Vorspannung gegen eine Last mit hoher Steifigkeit. Von links: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

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 Krafeinleitung 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).

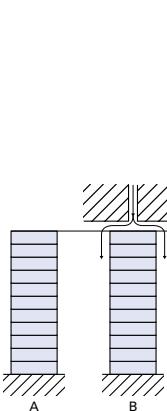


Abb. 34: Nichtlineare Last ohne Vorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

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.

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

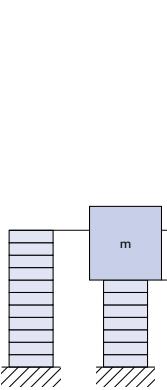


Abb. 35: Lastfall große Masse: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

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 verstiefendes 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.

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 $E_{\text{mech}} = (\Delta L_0 \cdot F_{\max})/2$ 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.

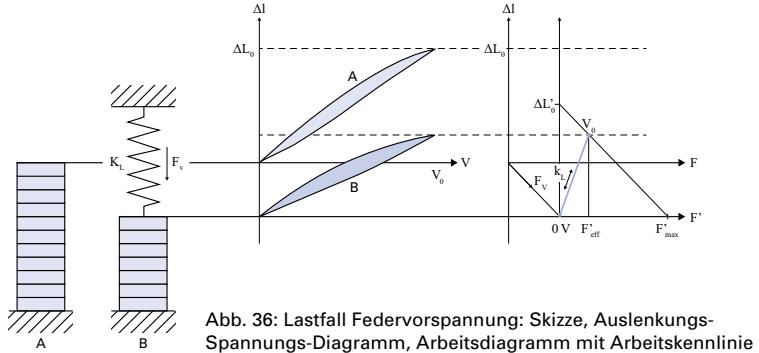


Abb. 36: Lastfall Federvorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

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.

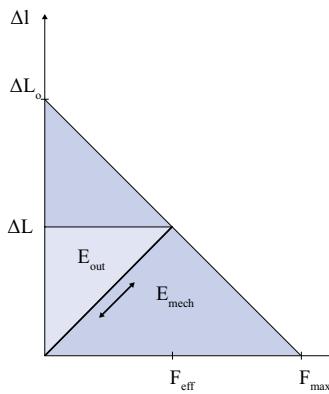


Abb. 37: Mechanische Energiebeträge im Arbeitsdiagramm eines Piezoaktors mit Federlast: gewandelte mechanische Energie E_{mech} und abgegebene mechanische Energie E_{out}

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

DYNAMISCHER BETRIEB

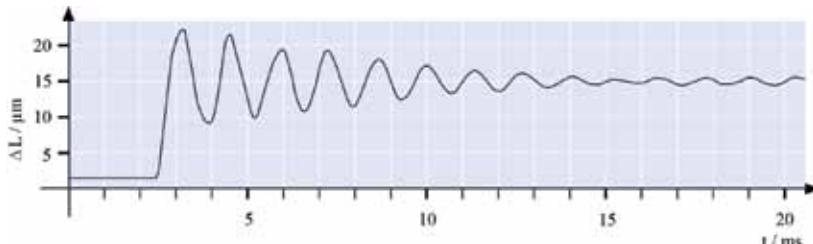


Abb. 38: Auslenkung eines ungedämpften Piezosystems nach Ansteuerung mit einem Spannungssprung. Die Nominalauslenkung wird nach etwa einem Drittel der Periodendauer erreicht

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]

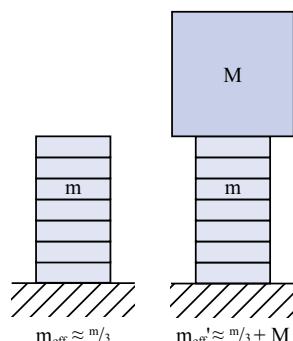


Abb. 39: Berechnung der effektiven Masse m_{eff} und m'_{eff} eines einseitig eingespannten Piezostapelaktors ohne und mit Last

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:

$$f'_0 = f_0 \sqrt{\frac{m_{eff}}{m'_{eff}}} \quad (\text{Gleichung 17})$$

Piezoelemente 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).

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

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 $f_0 = 10 \text{ kHz}$ kann seine nominale Auslenkung in $30 \mu\text{s}$ 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 , $2 \mu\text{m}$ Auslenkung (Spitze-Spitze) und 1 kg Masse betragen ungefähr $\pm 40 \text{ N}$.

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 Keramiksichten 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

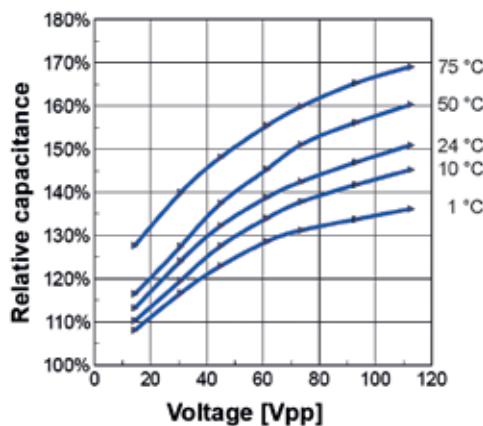


Abb. 40: Die elektrische Kapazität wächst mit steigender Ansteuerspannung und Temperatur

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 Stapelektors kann wie beim Kondensator abgeschätzt werden:

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

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

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

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 = $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ (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]

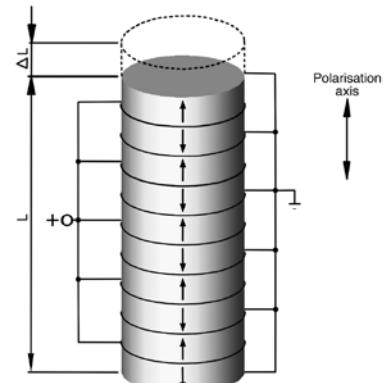


Abb. 41: Aufbau und Kontaktierung eines gestapelten Piezotranslators

Elektrische Ansteuerung (Fortsetzung)

Dauerstrom, Spitzstrom 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

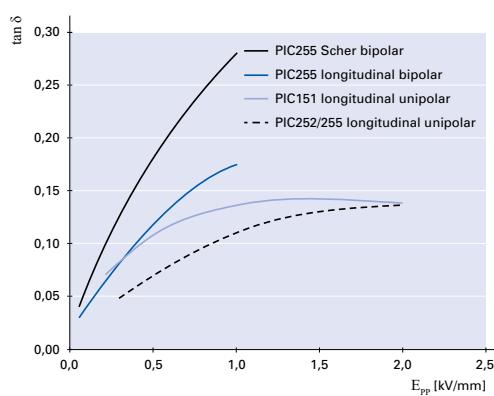
In dynamischen Anwendungen nimmt die Leistungsaufnahme des Aktors linear mit Frequenz und Aktorkapazität zu. Ein kompakter Piezotranslator mit ca. 100 N Belastbarkeit benötigt bei 1.000 Hz und 10 µm Hub weniger als 10 Watt Blindleistung, während ein Hochlastaktor (>10 kN Belastbarkeit) bei gleichen Bedingungen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

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

Abb. 42: Dielektrische Verlustfaktoren $\tan \delta$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Die Umrechnung zwischen Spannung und Feldstärke für konkrete Akto- ren erfolgt mit den Schichthöhen, die auf 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.



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 Verstärkerausgangsstrom, 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 Spitzstrom für eine Halbwelle. Der Verstärker muss diesen Spitzstrom mindestens für eine halbe Periodendauer liefern können. Für wiederholte Einzelpulse darf das zeitliche Mittel der Spitzeströme den erlaubten Dauerstrom nicht überschreiten.

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

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:

$$f_{max} \approx \frac{1}{C} \cdot \frac{I_a}{V_{pp}} \quad (\text{Gleichung 27})$$

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:

$$f_{max} \approx \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \frac{I_a}{V_{pp}} \quad (\text{Gleichung 28})$$

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 Frequanzanteile, denen das mechanische Piezosystem noch folgen kann, ist in der Praxis die mechanische Resonanzfrequenz. Das elektrische Ansteuersignal muss daher aber auch keine deutlich höheren Frequanzanteile 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 bestimmd. Die Anstiegszeit des Verstärkers muss deutlich kürzer als die Piezo-Ansprachzeit 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@picericamic.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 Überschlagrisikos 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, kurzwelliger 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 gehäuste 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.

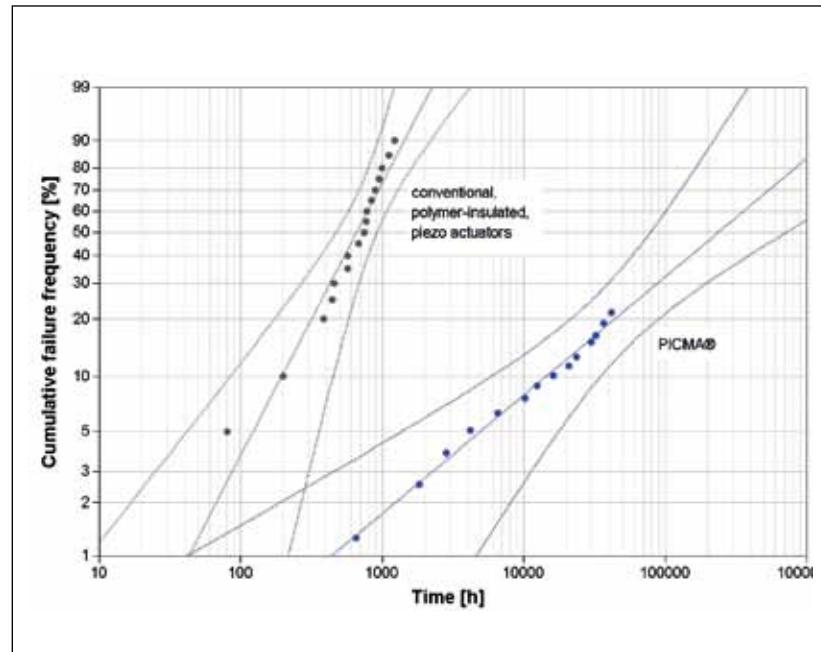


Abb. 44: Ergebnisse eines beschleunigten Lebensdauertests mit erhöhter Luftfeuchtigkeit (Testbedingungen: PICMA® Stack und polymerumhüllte Aktoren, Abmessungen: 5 x 5 x 18 mm³, 100 V DC, 22 °C, 90 % RH)

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.

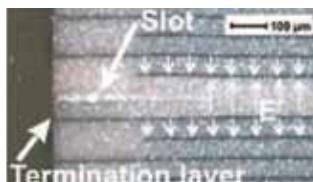
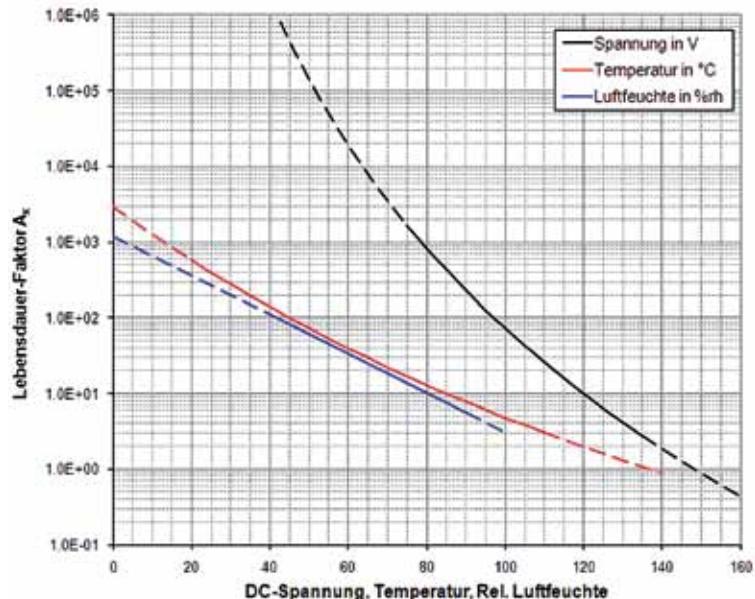


Abb. 46: Deutlich sichtbar ist das patentierte PICMA® Aktordesign mit definierten Schlitzten („Slots“), das unkontrollierte Dehnungsrisse bei dynamischer Ansteuerung verhindert

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 Ansteuervolllenz 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 Schlitzte („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.

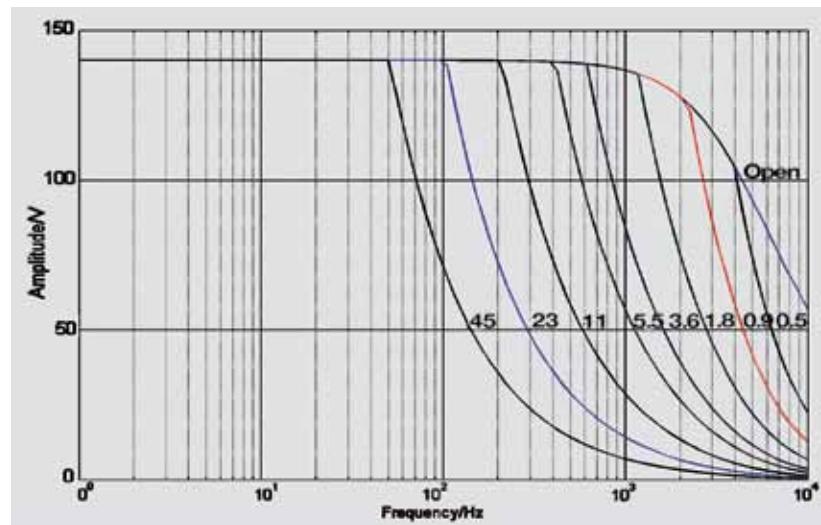
Die Ansteuerelektronik spielt eine Schlüsselrolle für die Leistungsfähigkeit piezoelektrischer Aktoren und Nanopositioniersysteme. Für die präzise Positionierung werden besonders rauscharme, hochstabile Linearverstärker benötigt, denn Piezoaktoren reagieren auf die geringste Spannungsänderung mit einer 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 ungeregelten 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 μ F mit einer maximalen Frequenz von ca. 15 Hz betreiben (bei Sinus-Ansteuerung). 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 μ F. 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 Energie- rückgewinnung

Häufig werden Piezoaktoren für eine besonders präzise Materialbearbeitung eingesetzt, zum Beispiel im Maschinenbau zur Feinpositionierung in Fräsen- 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.



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

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 Verstärker elektroniken 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 spannungs-geregelt. 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 Elektroniken 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

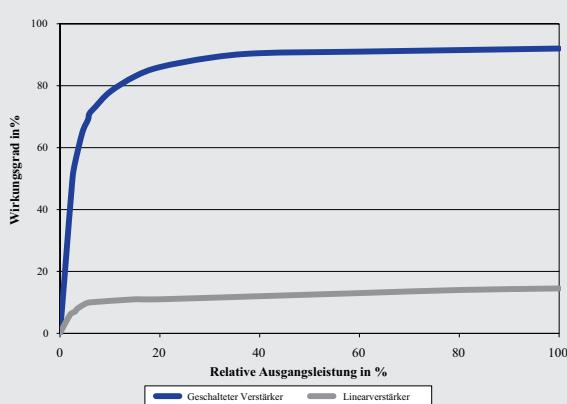


Abb. 49: Bei gleicher Ausgangsleistung verbrauchen PI Verstärker mit patentierter Energierückgewinnung nur ca. 20 % des Bedarfs eines entsprechenden Linearverstärkers.

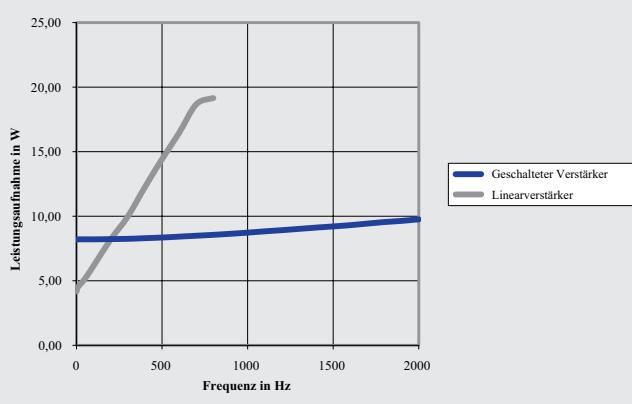


Abb. 50: Leistungsaufnahme eines Piezoverstärkers mit linearer und geschalteter Endstufe am Piezoausgang, kapazitive Last 1 µF. Die Messwerte zeigen deutlich, dass der pulsweiten-modulierte Verstärker eine wesentlich höhere Dynamik erlaubt als der klassisch linear arbeitende. Der Linearverstärker erreicht 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 ungeregelter 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

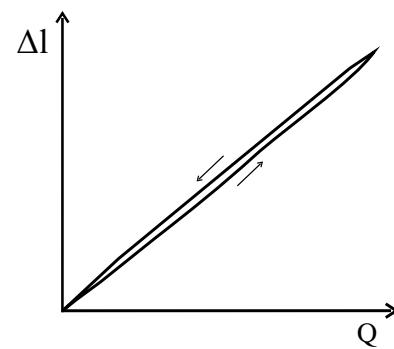
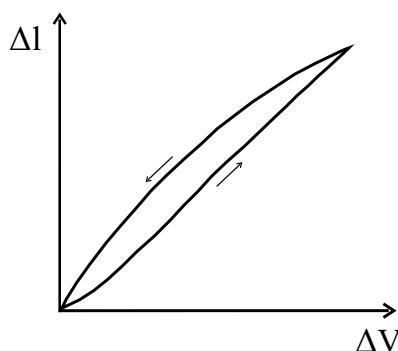


Abb. 51: Typische Auslenkungscharakteristik von Piezoaktoren im Verhältnis zur angelegten Spannung (links) und zur Ladung (rechts). Die Hysterese ist durch die Kontrolle der aufgebrachten Ladung deutlich reduziert



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

Handhabung

von Piezoaktoren

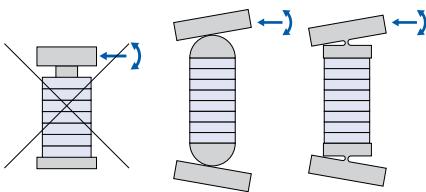


Abb. 52: Vermeiden von Querkräften und Momenten

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

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 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.

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 Betriebstemperaturbereich ein und beachten Sie die Temperaturausdehnungskoeffizienten 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).

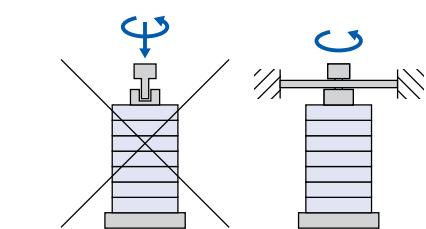


Abb. 53: Vermeiden von Drehmomenten

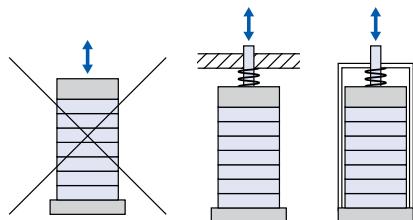


Abb. 54: Vermeiden von Zugspannungen durch mechanische Vorspannung

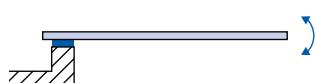


Abb. 55: Montage eines einseitig vorgespannten Biegeaktors durch Klebung

Vorspannung aufbringen (Abb. 54)

- ▶ Erzeugen Sie die Vorspannung entweder extern im mechanischen Aufbau oder intern in einem Gehäuse.
- ▶ Bringen Sie die Vorspannung achsennah 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-

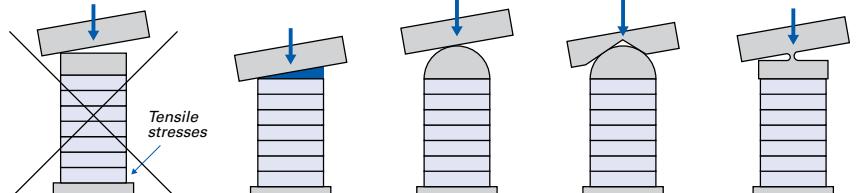


Abb. 56: Vermeiden einer inhomogenen Lasteinleitung

ren zu sehr langsamem 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.

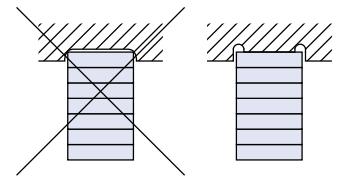


Abb. 57: Vollflächiger Kontakt des Aktors

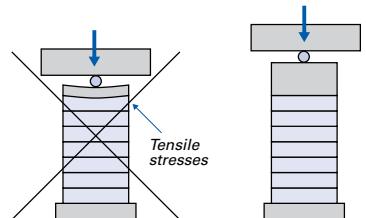


Abb. 58: Richtiges Dimensionieren der Endstücke bei punktförmigem Kontakt

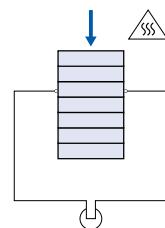


Abb. 59: Mechanische Belastungen laden den Aktor elektrisch auf. Montage nur im kurzgeschlossenen Zustand

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 Bewegungssachsen. 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 Nano-positioniertechnik, 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 | 2001 Neues Firmengebäude in Karlsruhe |
| 1977 Umzug nach Waldbronn | 2002 Erweiterungsgebäude für PI Ceramic |
| 1987 Gründung der Niederlassung in den USA | 2002 Gründung der Niederlassung in China |
| 1991 Gründung der Niederlassung in Japan | 2002 Markteinführung der PICMA® Multilayer-Piezoaktoren |
| 1991 Markteinführung von 6-achsigen, parallelkinematischen Positioniersystemen (Hexapoden) | 2004 Markteinführung der NEXLINE® Hochleistungs-Piezolinearantriebe |
| 1992 Gründung von PI Ceramic in Thüringen, Grundstein für die Marktführerschaft in der Nanostelltechnik | 2007 Markteinführung der NEXACT® Piezolinearantriebe |
| 1993 Gründung der Niederlassungen in Großbritannien und Frankreich | 2010 Kauf des Erweiterungsgrundstücks neben dem heutigen Firmensitz von PI |
| 1994 Markteinführung kapazitiver Positionssensoren | 2011 Gründung der Niederlassung in Korea |
| 1995 Gründung der Niederlassung in Italien | 2011 Gründung der Niederlassung in Singapur |
| 1998 Markteinführung von digitalen Regelungselektroniken | 2011 Übernahme Mehrheitsanteile der miCos GmbH, Eschbach |
| 2001 Markteinführung von PILine® Ultraschall-Piezomotoren | 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 Positions-messung
 - kapazitive Sensoren: Sub-Nanometer-Auflösung
 - Inkrementelle Sensoren: Nano-meter-Auflösung, große Mess-bereiche
- 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 preis-günstigen 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-Spin-del-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 miniatürisierte Varianten, OEM-Motoren und -Antriebe sowie komplettete Positioniersysteme mit Controller an. Piezomotoren von PI sind im Prinzip vakuumtauglich und für den Betrieb unter starken Magnetfeldern geeignet.

- Integrationsstufen vom preis-günstigen 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 Bewegungssachsen

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 Nanostelltechniksysteme 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 Positionsverfügung mit speziell abgestimmten Algorithmen. So können Bewegungen auf Bahnkurven, Einschwingzeiten oder Bahnabweichungen während schneller Scancvorgänge 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 Bewegungsauflösungen 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 Schneckentriebs 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@picericamic.de
 www.picericamic.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