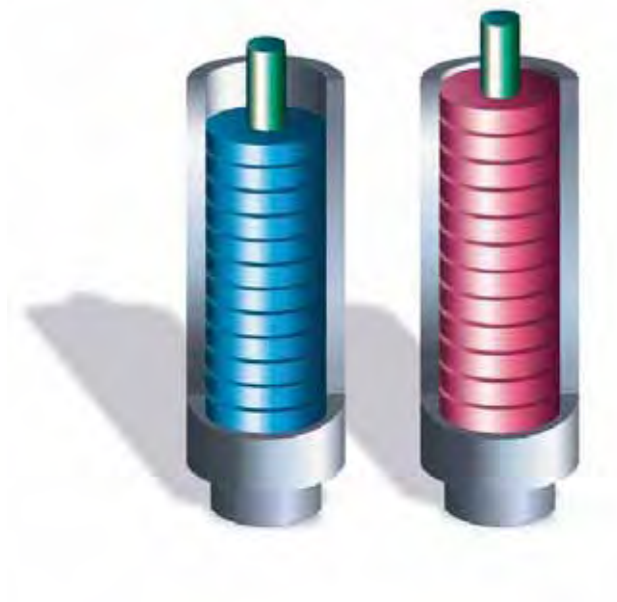


Grundlagen der Nanostechnik



Inhaltsverzeichnis

Tutorium: Grundlagen der Nanostelltechnik

Inhaltsverzeichnis	2-172
Eigenschaften, Vorteile und Anwendungen piezoelektrischer Positioniersysteme	2-174
Glossar	2-175
Einführung	2-177
Nanopositionierung mit Piezotechnologie	2-177
Vorteile und Eigenschaften von Piezoaktoren	2-177
Überblick	2-178
Aktor-Bauformen	2-178
Eigenschaften und Betrieb piezoelektrischer Aktoren	2-179
Grundlagen der Piezoelektrizität	2-181
Materialeigenschaften	2-181
Herstellungsprozess der Piezokeramik	2-182
Definition der piezoelektrischen Koeffizienten und Richtungen	2-182
Auflösung	2-183
Grundlagen der Piezoaktorik	2-184
Auslenkung von Piezoaktoren (Translatoren und Kontraktoren)	2-184
Hysterese (nur unregelter Betrieb)	2-185
Kriechen / Drift (nur unregelter Betrieb)	2-186
Altern	2-186
Aktorik und Messtechnik	2-187
Positionsmesstechnik und Sensoren für die Nanopositionierung	2-187
Indirekte Metrologie	2-187
Direktmetrologie	2-187
Parallel- und Seriellmetrologie	2-187
Hochauflösende Sensoren – Dehnungsmessstreifen (DMS)	2-187
LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	2-188
Kapazitive Positionssensoren	2-188
Mechanische Grundlagen der Piezoaktorik	2-189
Kräfte und Steifigkeit	2-189
Maximal zulässige Kräfte (Druckbelastbarkeit, Zugbelastbarkeit)	2-189
Steifigkeit	2-189
Krafterzeugung	2-190
Auslenkung bei externen Kräften	2-191
Grundlagen für den dynamischen Betrieb	2-192
Dynamische Kräfte	2-192
Resonanzfrequenz	2-193
Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen?	2-194

Elektrische Grundlagen der Piezoaktorik	2-195
Elektrische Anforderungen für den Piezobetrieb	2-195
Statischer Betrieb	2-195
Dynamischer Betrieb (Linear)	2-196
Dynamischer Stromkoeffizient (DSK)	2-197
Dynamischer Betrieb (Schaltanwendungen)	2-197
Wärmeerzeugung in einem Piezoelement bei dynamischem Betrieb	2-198
Steuerung und Regelung von Piezomechaniken	2-199
Positionsgeregelter Betrieb	2-199
Auflösung geregelt / ungeregelt	2-200
Controllerabgleich	2-200
Methoden zur Verbesserung der Dynamik und Linearität	2-201
InputShaping®	2-201
Signal-Preshaping / Dynamic Digital Linearization	2-202
Dynamic Digital Linearization (DDL)	2-203
Umgebungsbedingungen und -einflüsse	2-204
Temperatureffekte	2-204
Lineare thermische Ausdehnung	2-204
Temperaturabhängigkeit des Piezoeffektes	2-204
Einsatz von Piezoaktoren bei hoher Luftfeuchtigkeit	2-204
Einsatz von Piezoaktoren in Edelgasen	2-205
Einsatz von Piezoaktoren im Vakuum	2-205
Lebensdauer von Piezoaktoren	2-206
Bauformen piezomechanischer Antriebe / Positioniersysteme	2-207
Stapeltranslatoren (Linearaktoren)	2-207
Streifenaktoren (Kontraktoren)	2-207
Rohraktoren (Tuben)	2-208
Biegeaktoren (Bimorph- und Multimorphaktoren)	2-209
Scheraktoren	2-209
Piezomechaniken mit integrierter Hebelübersetzung	2-210
Piezostellische mit Festkörpergelenken (Flexures)	2-211
Parallelkinematik und Seriellkinematik	2-212
Positionsmessung mit Direktmetrologie und indirekter Metrologie	2-212
Parallel- und Seriellkinematiken	2-213
PMN im Vergleich mit PZT	2-214
Elektrostriktive Aktoren (PMN)	2-214
Ausblick	2-215
Montagehinweise für Piezoaktoren	2-216
Symbole und Einheiten	2-217

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / PiezoelektronikPiezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Eigenschaften / Anwendungen

Eigenschaften piezoelektrischer Positioniersysteme

Unbegrenzte Auflösung

Piezoaktoren wandeln elektrische Energie direkt in mechanische Energie um und ermöglichen Bewegungen im Sub-Nanometerbereich. Es gibt keine reibenden Teile, die die Auflösung begrenzen.

Schnelles Ansprechverhalten

Piezoaktoren ermöglichen Ansprechzeiten von wenigen Mikrosekunden. Beschleunigungen von mehr als 10.000 g sind erreichbar.

Große Kräfteerzeugung

Hochlast-Piezoaktoren für Lasten von mehreren Tonnen sind heute verfügbar. Sie erreichen Stellwege bis zu 300 µm und Auflösungen im Sub-Nanometerbereich (Beispiele siehe P-056, im Kapitel „Piezoaktoren / Piezokomponenten“).

Kein Einfluss von Magnetfeldern

Der Piezoeffekt basiert auf elektrischen Feldern, daher erzeugen Piezoaktoren weder Magnetfelder noch werden sie davon beeinflusst. Sie sind besonders gut für

magnetfeldfreie Anwendungen geeignet.

Geringer Energiebedarf

Im statischen Betrieb benötigen Piezoaktoren praktisch keine Energie, selbst wenn schwere Lasten dauerhaft gehalten werden. Das Verhalten ist etwa mit dem eines elektrischen Kondensators vergleichbar. Im statischen Zustand wird keine Wärme erzeugt.

Keine Abnutzung

Piezoaktoren besitzen keine beweglichen Teile wie Zahnräder oder Lager. Ihre Bewegung basiert auf kristallinen Festkörpereffekten und ist daher verschleißfrei. Bei Langzeituntersuchungen haben Piezoaktoren von PI mehrere Milliarden Zyklen ohne messbare Veränderung des Verhaltens durchlaufen.

Vakuum- und Reinraumtauglich

Piezoaktoren benötigen weder Schmiermittel noch verursachen sie Abrieb. Die neuen vollkera-

misch isolierten PICMA® Aktoren kommen darüber hinaus ohne Polymerisolation aus und sind deshalb ideal für UHV-Anwendungen geeignet.

Betrieb bei kryogenen Temperaturen

Der Piezoeffekt existiert auch bei geringsten Temperaturen bis nahe 0 Kelvin. PI bietet speziell vorbereitete Aktoren für den Einsatz bei kryogenen Temperaturen an.



Piezoelektrische Nanopositioniersysteme:
groß (z. B. für Präzisionsbearbeitung)
mittel (z. B. für Interferometrie)
klein (z. B. für Massenspeichertest)

Anwendungen von Piezoaktuatorik

Massenspeicher

- Schreib- / Lesekopftest
- Spin-Stands
- Disk-Testsysteme
- Aktive Vibrationsdämpfung
- Pole-Tip Recession Test

Halbleiter, Mikroelektronik

- Mikrolithographie
- Nanometrologie
- Wafer- und Masken-Positionierung
- Critical-Dimension-Messung
- Inspektionssysteme
- Aktive Vibrationsdämpfung

Präzisionsbearbeitung

- Schnelle aktive Werkzeuge
- Unrunddrehen, -bohren, -schleifen
- Aktive Vibrationsdämpfung
- Strukturelle Verformung

- Werkzeugjustage
- Verschleißkompensation
- Ventilsteuerung
- Mikropumpen
- Linearantriebe
- Schlitzdüsensteuerung in Extrusionsmaschinen
- Mikrogravursysteme
- Schockwellenerzeugung

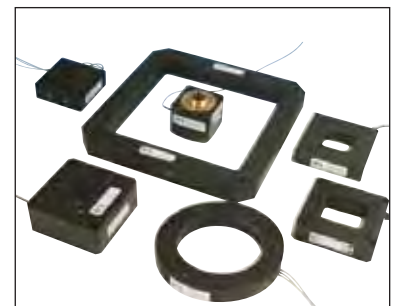
Life Science, Medizintechnik

- Rastermikroskopie
- Patch Clamp
- Nanoliterpumpen
- Genmanipulation
- Mikromanipulation
- Zellpenetration
- Mikrodosiergeräte

Optik, Photonik, Nanometrologie

- Spiegelscanner
- Bildstabilisierung, Pixelmultiplikation

- Scanning-Mikroskopie
- Auto-Fokussysteme
- Interferometrie
- Faseroptische Positionierung
- Faserschalter
- Adaptive und Aktive Optik
- Lasertuning
- Anregung von Vibrationen



Verschiedene Piezo-Nanopositioniertische

Glossar

Siehe auch „Glossar der Mikro-positionierung“ (S. 4-128).

Aktor / Aktuator:

Ein Stellelement, das eine Kraft oder Bewegung erzeugen kann.

Blockierkraft:

Die maximale Kraft, die ein Aktor bei unendlich steifer Einspannung erzeugen kann.

Curie-Temperatur:

Die Temperatur, bei der sich die kristalline Struktur von einer piezoelektrischen (nicht-symmetrischen) in eine nicht-piezoelektrische (symmetrische) Phase ändert. Bei dieser Temperatur verliert eine Piezokeramik ihre piezoelektrischen Eigenschaften.

Drift:

Siehe „Kriechen“

Domäne:

Eine Region von elektrischen Dipolen mit gleicher Orientierung.

Geregelter Betrieb:

Die Aktorauslenkung wird von einem Regler (Servo-Controller) kontrolliert. Dazu wird die Information eines Positionssensors

ausgewertet (s. a. „Ungeregelter Betrieb“).

Keramik:

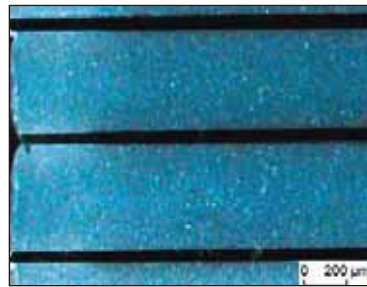
Ein polykristallines, anorganisches Material.

Kriechen:

Eine unerwünschte Positionsänderung in Abhängigkeit von der Zeit.

HVPZT:

Abkürzung für High Voltage PZT (Hochvolt-Piezoaktor).



Piezokeramik-Schichten in einem „klassischen“ Stapelaktor (HVPZT)

Hysterese:

Hysterese bei Piezoaktoren basiert auf kristallinen Polarisierungseffekten und molekularer Reibung. Sie tritt auf, wenn die Bewegungsrichtung umgekehrt wird. Hysterese darf nicht mit Umkehrspiel verwechselt werden.

LVPZT:

Abkürzung für Low Voltage PZT (Niedervolt-Piezoaktor).



Piezokeramik-Schichten in einem monolithischen Aktor (LVPZT)

Monolithischer (Multilayer) Aktor:

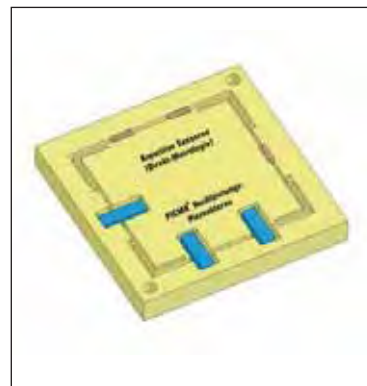
Ein Piezoaktor, der in einem ähnlichen Prozess wie Multilayer-Keramik Kondensatoren hergestellt wird. PZT-Keramik und Elektrodenmaterial werden in einem Schritt zusammen gebrannt („co-fired“). Die typische Dicke der einzelnen Lagen liegt zwischen 20 und 100 µm.

Nachgiebigkeit:

Auslenkung pro einwirkende Kraft. Entspricht dem reziproken Wert der Steifigkeit.

Parallelkinematik:

Im Gegensatz zur seriellen Kinematik wirken hier alle Aktoren unmittelbar auf die gleiche bewegte Plattform. Vorteile: Geringere Massenträgheit, keine bewegten Kabel, niedrigerer Schwerpunkt, keine Akkumulation von Führungsfehlern und kompakterer Aufbau.



Nanopositioniersystem auf Basis von Parallelkinematik und Parallelmetrologie



Siebdruckmaschine für Piezokeramik

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostechnik

Index

Glossar

Parallelmetrologie:

Im Gegensatz zur seriellen Metrologie messen alle Sensoren die Position der gleichen bewegten Plattform in mehreren Freiheitsgraden. Dadurch können Abweichungen von der vorgegebenen Bahn erkannt und automatisch ausgeglichen werden (aktive Führung).

Piezoelektrische Materialien:

Materialien, die durch ein elektrisches Feld ihre Abmessungen ändern und bei Kräfteinwirkung eine Ladung erzeugen.

Polung / Polarisation:

Der Vorgang, bei dem die piezoelektrischen Eigenschaften in ein Material eingepreßt werden; die elektrische Orientierung von Elementarzellen in einem piezoelektrischen Material.

PZT:

Abkürzung für Plumbum-Zirkonat-Titanat. Polykristallines Keramikmaterial mit piezoelektrischen Eigenschaften. PZT wird oft auch alternativ zu Piezoaktor oder Piezotranslator verwendet.

Seriellkinematik:

Im Gegensatz zur Parallelkinematik wirkt jeder Aktor auf eine eigene Stellplattform. Es ist eine klare Zuordnung Aktor / Achse vorhanden. Vorteile: Einfacherer mechanischer Aufbau und einfacheres Reglerkonzept. Nachteile: Schlechtere dynamische Eigenschaften, keine



Prinzipdarstellung eines gestapelten XY-Piezostellstisches (Seriellkinematik)

integrierte Parallelmetrologie möglich, Akkumulation von Führungsfehlern, geringere Genauigkeit.

Seriellmetrologie:

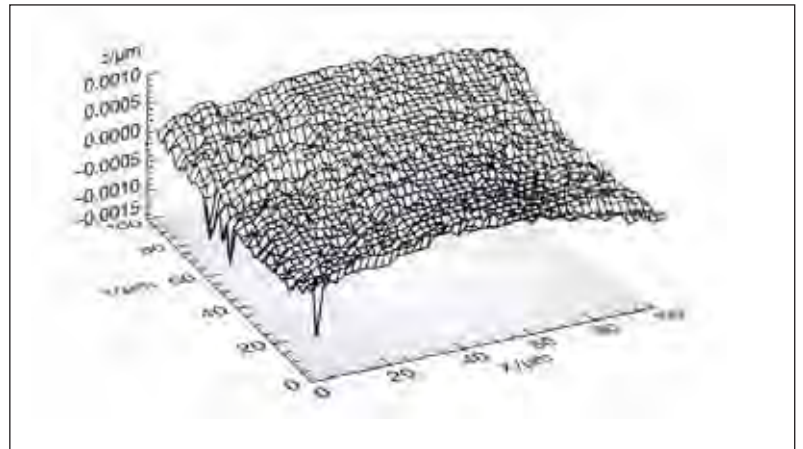
Jedem kontrollierten Freiheitsgrad ist ein Sensor zugeordnet. Unerwünschte Beiträge (Führungsfehler) der anderen Stellachsen zu diesem Freiheitsgrad können nicht erkannt und ausgeglichen werden (s. a. „Parallelmetrologie“).

Steifigkeit:

Die Federkonstante, bei Piezomaterialien nichtlinear.

Trajectory-Control:

Vorkehrung, um Abweichungen von der vorgegebenen Bahn zu verhindern. Es gibt passive (z. B. Flexure-Führungen) und aktive Systeme (z. B. mittels zusätzlicher aktiver Achsen).



Abblaufebene eines Nanopositioniertisches mit aktiver Führung über einen Betrieb von 100 x 100 µm. Die Ebenheit liegt bei ca. 1 Nanometer

Translator:

Ein Linearaktor.

Ungeregelter Betrieb:

Der Piezoaktor wird ohne Positionssensor und Regelkreis betrieben. Die Auslenkung ist ungefähr proportional zur Betriebsspannung. Kriechen, Nichtlinearität und Hysterese werden nicht kompensiert (s. a. „Geregelter Betrieb“).

Einführung

Nanopositionierung mit Piezotechnologie

Allgemeines

Der Piezoeffekt wird heute in vielen alltäglichen Produkten angewendet, zum Beispiel in Feuerzeugen, Lautsprechern und Summern. Beim Einsatz im Gasanzünder erzeugt der Druck auf eine Piezokeramik eine elektrische Ladung, die einen Funken erzeugt. Auch die meisten elektronischen Wecker nutzen keine elektromagnetischen Summer mehr, weil piezoelektrische Keramiken kompakter und effizienter sind. Neben diesen einfacheren Anwendungen hat sich die Piezoaktorik seit kurzem auch in der Kraftfahrzeugtechnik durchgesetzt. Piezogetriebene Einspritzventile in Dieselmotoren erreichen wesentlich kürzere Stellzeiten als die klassischen Magnetventile und verbessern die Laufruhe und Abgasqualität erheblich.

Das Wort „Piezo“ ist vom griechischen Wort für Druck abgeleitet. 1880 entdeckten Jacques und Pierre Curie, dass Druck in Quarzkristallen elektrische Ladungen erzeugt; sie nannten dieses Phänomen den „Piezoeffekt“. Später stellten sie fest, dass elektrische Felder piezoelektrische Materialien verformen können. Dieser Effekt wird der „inverse Piezoeffekt“ genannt. Die ersten kommerziellen Anwendungen des inversen Piezoeffektes waren Sonarsysteme, die im ersten Weltkrieg eingesetzt wurden. Der Durchbruch kam in den 40er Jahren, als Wissenschaftler entdeckten, dass Barium-Titanat durch Anlegen eines elektrischen Feldes piezoelektrische Eigenschaften annimmt.

Vorteile und Eigenschaften von Piezoaktoren

- Piezoaktoren können Bewegungen im Sub-Nanometerbereich mit hoher Geschwindigkeit durchführen; ihre Bewegung beruht auf kristallinen Festkörpereffekten. Es gibt keine rotierenden oder reibenden Teile.
- Piezoaktoren können große Lasten bis zu mehreren Tonnen bewegen.
- Piezoaktoren wirken elektrisch wie kapazitive Lasten und benötigen praktisch keine Leistung im statischen Betrieb.
- Piezoaktoren sind wartungs- und verschleißfrei, weil sie keine bewegten Teile im klassischen Sinne besitzen.

Piezoelektrische Materialien werden eingesetzt, um elektrische Energie in mechanische umzuwandeln und umgekehrt. Für die Nanopositionierung ist die präzise Bewegung, die entsteht, wenn eine elektrische Spannung an ein piezoelektrisches Material angelegt wird, von großer Bedeutung. Aktoren, die auf dem Piezoeffekt basieren, sind erst seit ca. 35 Jahren kommerziell verfügbar und haben seitdem die Welt der Präzisionspositionierung stark verändert.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Überblick

Aktor-Bauformen

Hinweis

Der Abschnitt „Überblick“ fasst die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Piezoantrieben knapp zusammen. Für Grundlagen und detaillierte Informationen s. S. 2-181 ff.

Stapelaktoren (Translatoren) sind am weitesten verbreitet und können die größten Kräfte erzeugen. Elemente mit Stellwegen bis zu 500 µm sind verfügbar. Zum Schutz der Piezokeramik gegen externe Einflüsse kann sie in ein Metallgehäuse mit integrierter Vorspannung eingebaut werden und damit auch Zugkräfte aufnehmen.

Piezorohre nutzen die radiale Kontraktion aus und werden oft für Scanning-Mikroskope und als Mikropumpen eingesetzt.

Bieger und Bimorphaktoren erreichen Stellwege bis in den Millimeterbereich (bei kompakten Abmessungen) aber relativ geringe Kräfte (wenige N).

Scherelemente nutzen den Schereffekt aus und erreichen große Auslenkungen und Kräfte.

Weitere Informationen s. S. 2-207 ff.

Geführte Piezomechaniken (1 – 6 Achsen) sind komplexe Nanostelltsche mit integriertem Piezoantrieb und reibungsfreien Festkörperführungen (Flexures). Sie werden bei folgenden Anforderungen eingesetzt:

- Extrem geradlinige Bewegungen oder Mehrachsen-Bewegung mit Führungsgenauigkeiten bis in den Sub-Nanometer- bzw. Sub-µm Bereich
- Entkopplung von externen Kräften und Drehmomenten vom Aktor, Schutz vor Feuchtigkeit und Fremdkörpern

Hierbei wird häufig durch eine integrierte Übersetzung der Stellweg

des Piezoantriebes bis zu 20-fach auf mehrere 100 µm vergrößert.

Piezomotoren werden für größere Stellwege eingesetzt. Man unterscheidet zwei Typen:

- Ultraschallmotoren (s. Abb. 2a)
- PiezoWalk® Antriebe (s. Abb. 2b)

Ultraschallmotoren sind Reibungsantriebe, die auf mikroskopisch kleinen Oszillationen basieren. Linear- motoren sind sehr kompakt und erlauben hohe Verstellgeschwindigkeiten sowie Auflösungen von 0,1 µm oder darunter. Rotations-

motoren verfügen über hohe Drehmomente bei niedrigen Drehzahlen. Piezo-Walk-Linearantriebe zeichnen sich durch hohe Stell- und Haltekräfte (bis einige 100 N) bei moderaten Geschwindigkeiten und Auflösungen im Sub-Nanometerbereich aus (s. S. 1-3 ff).

Alle Ausführungen sind selbsthemmend.



Abb. 1a. Verschiedene Piezoaktoren in „klassischem“ (geklebten) Aufbau

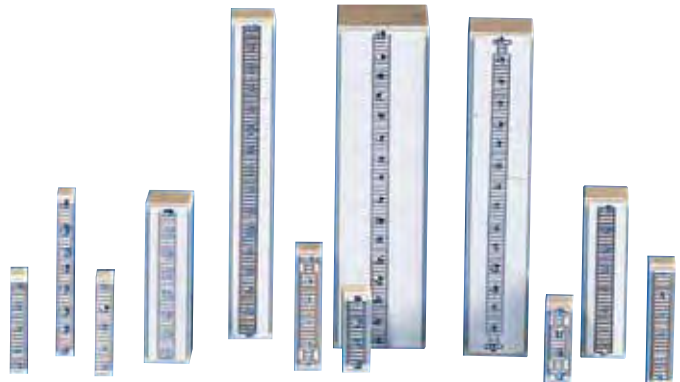


Abb. 1b. Verschiedene monolithische Piezoaktoren in PICMA® Technologie

Eigenschaften und Betrieb piezoelektrischer Aktoren

Betriebsspannung

Es haben sich zwei Typen von Piezoaktoren durchgesetzt: Monolithisch gesintert aufgebaute Niedervoltaktoren (LVPZT) arbeiten bei Spannungen bis ca. 100 V und bestehen aus Keramiklagen von 20 bis 100 μm Dicke. Klassische Hochvoltaktoren (HVPZT) dagegen sind aus 0,5 bis 1 mm dicken Schichten aufgebaut und werden bei Spannungen bis zu 1.000 V betrieben. Hochvoltaktoren können mit größeren Querschnitten und daher für größere Belastbarkeit gefertigt werden als die kompakteren monolithischen Piezoaktoren.

Steifigkeit, Belastbarkeit, Kraft-erzeugung

In erster Näherung ist ein Piezoaktor ein Feder-Masse-System. Die Steifigkeit des Aktors hängt u.a. vom Elastizitätsmodul der Keramik (ca. 25 % von Stahl), dem Querschnitt und der Länge des aktiven Materials und einer weiteren Anzahl nichtlinearer Parameter ab (s. S. 2-189). Gängige Aktoren bieten Steifigkeiten zwischen 1 und 2.000 N/ μm und Druck-Belastbarkeiten zwischen 10 und 100.000 N. Für Zugbelastungen sind vorgespannte Ge-

häuse oder externe Federn notwendig. Scherkräfte, Biege- und Drehmomente müssen über geeignete Maßnahmen abgefangen werden.

Stellweg

Stellwege von Piezoaktoren liegen typischerweise bei einigen 10 bis einigen 100 μm für Linearaktoren. Bieger und hebelübersetzte Systeme erreichen einige Millimeter. Ultraschall-Piezomotoren und Piezo-Walk-Antriebe werden für längere Stellwege eingesetzt.

Positionsauflösung

Piezokeramik arbeitet reibungsfrei und bietet theoretisch eine unbegrenzte Auflösung. In der Praxis wird die tatsächliche Auflösung durch elektrische und mechanische Faktoren begrenzt:

- Sensor- und Regelelektronik, Verstärker: Rauschen sowie Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern beeinflussen die Positionsstabilität.
- Mechanische Parameter: Konstruktion und Montagepräzision von Sensor, Aktor und Vorspannung können mikroskopische Reibung verursachen und

die Auflösung und Genauigkeit begrenzen.

Piezoaktoren und Piezo-Positioniersysteme von PI erreichen eine Auflösung und Stabilität im Sub-Nanometerbereich. Weitere Informationen s. S. 2-183 ff.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index



Abb. 2b.
Sonderausführung eines Antriebs mit
integrierten PiezoWalk® Piezomotoren

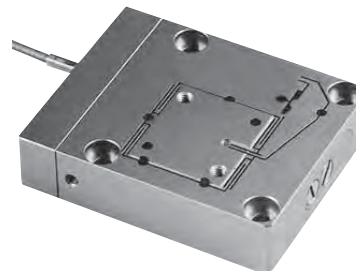


Abb. 3. Beispiel eines kompakten Piezo-
Nanopositionier- und Scansystems
mit integrierten Flexureführungen,
Sensoren und Hebelübersetzung



Abb. 2a. Ultraschall-Piezolinearmotoren

Überblick

Betrieb im offenen und geschlossenen Regelkreis

Im Gegensatz zu vielen anderen Antrieben können Piezoaktoren auch ohne Regelung betrieben werden. Die Auslenkung ist dann in etwa proportional zur Steuerungspannung. Hysterese, Nichtlinearität und Kriecheffekte begrenzen hier die Absolutgenauigkeit. Bei Positionieranwendungen, die hohe Linearität, Langzeit-Stabilität, Wiederholbarkeit und Absolutgenauigkeit erfordern, werden positionsgezielte Piezoaktoren und Mechaniken eingesetzt (s. S. 2-199). Mit entsprechenden Controllern sind damit Reproduzierbarkeiten im Sub-Nanometerbereich möglich.

Hochauflösende Sensoren für den geregelten Betrieb

LVDT (Linear Variable Differential Transformer), Dehnungsmessstreifen und kapazitive Sensoren werden am häufigsten zum positionsgeregelten Betrieb eingesetzt. Die höchste Genauigkeit wird von kapazitiven Sensoren erreicht. Weitere Informationen s. S. 2-187 ff.

Dynamisches Verhalten

Ein Piezoaktor kann seine nominale Auslenkung in ungefähr 1 / 3 der Periode der Resonanzfrequenz erreichen. Anstiegszeiten im Mikrosekundenbereich und Beschleunigungen von mehr als 10.000 g sind möglich. Dadurch werden schnelle Schaltanwendungen wie z. B. Einspritzventile, Hydraulikventile, Schaltrelais, optische Schalter und adaptive Optik möglich. Weitere Informationen s. S. 2-192 ff.

Leistungsaufnahme

Piezoaktoren verhalten sich elektrisch ähnlich wie kapazitive Lasten. Im statischen Betrieb benötigen sie praktisch keine Energie, selbst beim Halten hoher Lasten. In dynamischen Anwendungen nimmt der Energieverbrauch 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 Leistung, während ein Hochlastaktor (> 10 kN Belastbarkeit) bei gleichen Bedingungen einige 100 Watt verbraucht. Weitere Informationen siehe Seite 2-195 ff.

Schutz vor Beschädigung

Piezokeramik ist spröde und verträgt keine hohen Zug- oder Scherkräfte. Daher muss bei der mechanischen Konstruktion des Aktors oder bei dessen Einbau darauf geachtet werden, dass unerwünschte Kräfte von der Keramik ferngehalten werden. Dies kann durch Federvorspannungen, Ankopplung über Kugelkopfstücke, flexible Kopplungen usw. geschehen (weitere Hinweise s. S. 2-216). Außerdem muss die Keramik vor Feuchtigkeit und dem Eindringen von Fremdkörpern geschützt werden. Ein enger Kontakt zwischen dem Piezomechanikerhersteller und dem Anwender ermöglicht die optimale Anpassung des Piezosystems an die Anwendungsumgebung.

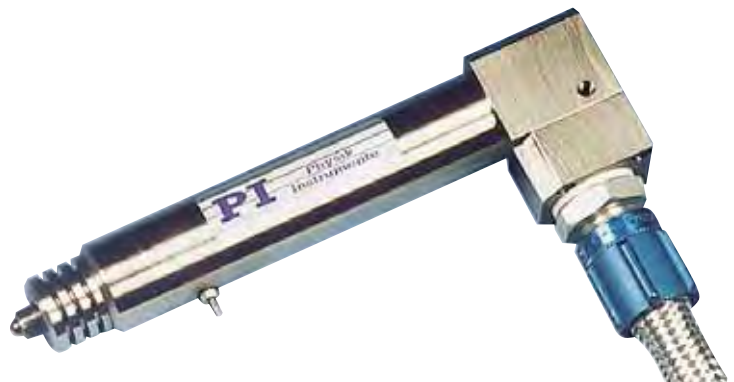


Abb. 4. Piezoaktor mit flüssigkeitgeschütztem Gehäuse und Kühlluft- / Sperrluftanschluss

Grundlagen der Piezoelektrizität

Materialeigenschaften

Hinweis

Der folgende Abschnitt enthält detaillierte Informationen über die Grundlagen der Piezoaktuatorik. Eine knappe Zusammenfassung wird im Abschnitt „Überblick“ ab S. 2-178 gegeben. Weitere Informationen siehe „Glossar“ und „Symbole und Einheiten“ auf S. 2-217 und S. 2-175.

Der Piezoeffekt natürlicher monokristalliner Materialien wie z. B. Quarz, Turmalin und Seignette-Salz ist sehr gering. Deshalb wurden polykristalline ferroelektrische Keramiken wie z. B. BaTiO₃ (Barium-Titanat) und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) mit verbesserten Eigenschaften entwickelt.

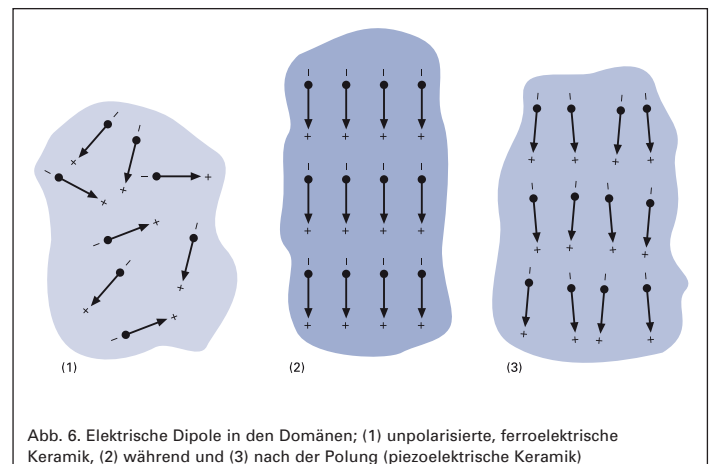
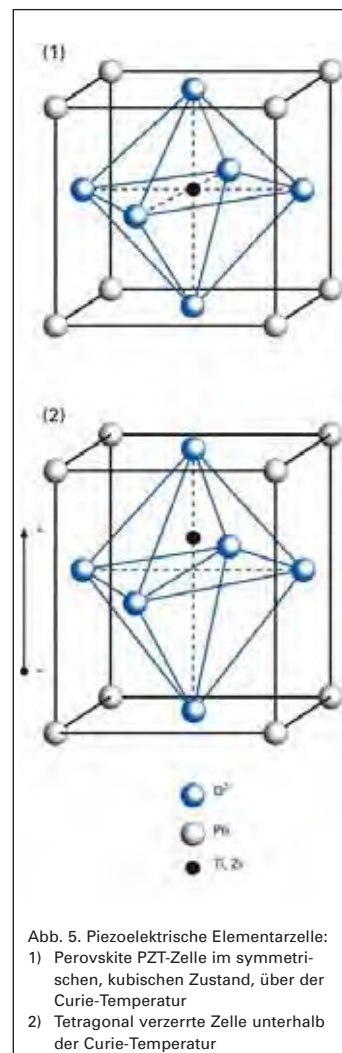
PZT-Piezokeramik ist in vielen Variationen verfügbar und die am häufigsten verwendete Keramik für Aktor- oder Sensoranwendungen.

PZT-Kristallite sind vor der Polarisation zentrosymmetrisch kubisch. Unterhalb der sogenannten Curie-Temperatur T_c wird die Gitterstruktur der PZT-Kristallite verzerrt und asymmetrisch. Sie weist eine spontane Polarisation auf (s. Abb. 5).

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

polenden Feldes zu ändern (s. Abb. 6).

Für manche PZT-Keramiken muss der Polungsprozess bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden. Das Resultat ist eine remanente Polarisation, die mit einer Dehnung des Materials einhergeht und bei Überschreiten der mechanischen, thermischen und elektrischen Grenzwerte des Materials wieder abgebaut wird. Die Keramik besitzt jetzt piezoelektrische Eigenschaften und verändert beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Dimensionen.



Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Grundlagen der Piezoelektrizität Herstellungsprozess der Piezokeramik

PI entwickelt und fertigt speziell für die Aktorik optimierte Piezokeramiken bei der Tochterfirma PI Ceramic in Thüringen. Der Herstellungsprozess von Hochvoltkeramik beginnt mit dem Mischen und Mahlen der Rohmaterialien. Zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit wird die Mixtur auf ca. 75% der Sintertemperatur erhitzt und dann nochmals gemahlen. Danach erfolgt die Granulation mit einem Binder, um die Verarbeitungseigenschaften zu verbessern. Nach dem Formen und Pressen wird die („grüne“) Keramik zum Ausbrennen des Binders auf ca. 750 °C erhitzt. Die nächste Phase ist die Sinterung bei Temperaturen zwischen 1.250 und 1.350 °C. Um die ge-

wünschte Form und Genauigkeit zu erhalten, werden die Keramikblöcke danach geschliffen, poliert und geläpft. Anschließend werden die Elektroden durch Sputtern oder Siebdruck aufgebracht. Der letzte Schritt ist die Polung, die bei elektrischen Feldern von bis zu mehreren kV/mm stattfindet. Erst dadurch wird die ferroelektrische Keramik piezoelektrisch.

Multilayer-Piezoaktoren entstehen in einem anderen Prozess. Nach dem Mahlen wird ein Schlicker hergestellt, aus dem sich Lagen mit einer Dicke ab 20 µm gießen lassen. Danach werden Elektroden aufgedruckt und die Folien laminiert. Zum Entfernen der eingeschlosse-

nen Luft zwischen den Lagen wird die „grüne“ Keramik dann verdichtet. Nach dem Ausbrennen des Binders und Sintern bei Temperaturen unter 1.100 °C folgen das Anbringen der Anschlüsse und die Polung.

Alle technologischen Prozesse der Keramikfertigung müssen

extrem genau kontrolliert werden, da die geringste Abweichung die Qualität und Eigenschaften des Piezomaterials beeinflusst. Für höchstmögliche Produktqualität werden alle Piezokomponenten bei PI Ceramic einer hundertprozentigen Ausgangsprüfung unterzogen.



Vakuumbeschichtungsanlage (Sputtering) für Piezokeramiken bei PI Ceramic

Definition der piezoelektrischen Koeffizienten und Richtungen

Der Piezoeffekt ist wegen der anisotropen Natur von Piezokeramik richtungsabhängig. Zur Festlegung der Richtungen werden die Achsen 1, 2 und 3 eingeführt (analog zu den X-, Y- und Z-Achsen des kartesischen Koordinatensystems). Die Drehachsen θ_x , θ_y , θ_z (auch U, V, W) werden mit 4, 5 und 6 bezeichnet.

Die Polarisationsrichtung (Achse 3) wird während der Polung durch ein starkes Feld zwischen den Elektroden festgelegt. Für Linearaktoranwendungen sind die Piezoeigenschaften in dieser Richtung normalerweise am wichtigsten, da dort die größte Auslenkung erreicht wird.

Piezoelektrische Materialien werden durch verschiedene Parameter charakterisiert.

Beispiele:

- d_{ij} : Piezomodul [m/V] oder Ladungskoeffizienten [C/N]:

Erzeugte Dehnung [m/m] pro Einheit angelegtem elektrischen Feld [V/m] oder (wegen der Sensor- / Aktoreigenschaften des PZT-Materials) Ladungsdichte [C/m²] pro Einheit Druck [N/m²].

- g_{ij} : Spannungskoeffizienten oder Feldkoeffizienten [Vm/N]: erzeugtes elektrisches Feld (offen) [V/m] pro Einheit Druck [N/m²] oder (wegen der Sensor- / Aktoreigenschaften des PZT-Materials) erzeugte Dehnung [m/m] pro Einheit Ladungsdichte [C/m²].
- k_{ij} : Koppelkoeffizienten [dimensionslos]: Die Koeffizienten stellen Energieverhältnisse dar, welche die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie oder umgekehrt beschreiben. Das Verhältnis von gespeicherter Energie (mechanisch oder elektrisch) zu aufgewendeter Energie

(mechanisch oder elektrisch) wird durch k^2 ausgedrückt.

Andere wichtige Parameter sind der Elastizitätsmodul und die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r (bestimmt die Kapazität des Materials).

Um elektrische und mechanische Größen miteinander zu verbinden, werden doppelte Indizes (z.B. d_{ij}) eingeführt. Der erste Index gibt die Richtung der Erregung, der zweite die Richtung der Reaktion des Systems an.

Beispiel: Der Modul d_{33} ist entscheidend, wenn ein elektrisches Feld in Richtung der Polarisierung (Achse 3) anliegt und die Auslenkung in der gleichen Richtung betrachtet wird. Der Modul d_{31} kommt zum Tragen, wenn ein elektrisches Feld in der gleichen Richtung wie zuvor anliegt aber die Auslenkung in Richtung der Achse 1 (also orthogonal zur Polarisationsachse) betrachtet wird.

Zusätzlich können die elektrischen oder mechanischen Randbedingungen durch die hochgestellten Indizes „S“, „T“, „E“, „D“ beschrieben werden.

Definition:

- S = Dehnung = konstant (mechanisch geklemmt)
- T = Druck = konstant (nicht geklemmt)
- E = Feld = konstant (kurzgeschlossen)
- D = dielektrische Verschiebung = konstant (elektrisch offen)

Die einzelnen piezoelektrischen Koeffizienten sind darüber hinaus durch verschiedene Gleichungssysteme miteinander gekoppelt, die hier nicht betrachtet werden sollen.

Hinweis

Die hier beschriebenen piezoelektrischen „Koeffizienten“ werden oft als Konstanten bezeichnet. Für die Aktorik ist

es wichtig zu verstehen, dass es sich dabei nicht um unabhängige Konstanten handelt. Sie beschreiben vielmehr nur die Materialeigenschaften unter Kleinsignalbedingungen. Ihre Größe variiert jedoch mit Temperatur, Druck, elektrischem Feld, Abmessungen, mechanischen und elektrischen Randbedingungen etc. Das Verhalten komplexer Komponenten wie z.B. Piezostapelaktoren, vorgespannter Aktoren oder Hebelübersetzer Systeme unter realen Einsatzbedingungen kann dadurch nicht ausreichend vorhergesagt werden. Alle von PI gefertigten

Komponenten und Systeme werden deshalb durch eine Reihe von Messgrößen wie z.B. Steifigkeit, Belastbarkeit, Auslenkung, Resonanzfrequenz usw. charakterisiert. Die einzelnen Werte sind den technischen Tabellen zu entnehmen. Wichtig: Es gibt für die Ermittlung keine internationalen Standards, weshalb Angaben verschiedener Hersteller nicht unbedingt vergleichbar sind.

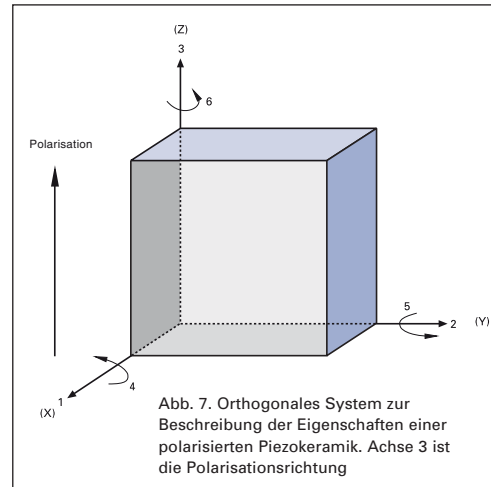


Abb. 7. Orthogonales System zur Beschreibung der Eigenschaften einer polarisierten Piezokeramik. Achse 3 ist die Polarisationsrichtung

Auflösung

Die Auslenkung von Piezoaktoren basiert auf molekularen Effekten und ist vom angelegten elektrischen Feld abhängig. Die Auflösung ist theoretisch unbegrenzt. Da es keine Schwellspannungen gibt, ist die Stabilität der Spannungsquelle entscheidend, weil selbst ein Spannungsrauschen im μV -Bereich Positionsänderungen hervorruft. Piezoaktoren können deshalb in Tunnel- oder Raster-Kraftmikroskopen eingesetzt werden, wo Bewegungen von weniger als einem Atomdurchmesser ausgeführt werden müssen (s. Abb. 8).

Verstärkerrauschen

Die Positionsstabilität (Auflösung) eines Piezoaktors hängt u. a. vom Rauschen der Spannungsquelle ab. Die Spezifikation des Verstärkerrauschens als reiner Spannungswert ohne die Spektralinformation ist in der Praxis jedoch von geringer Aussagekraft. Wenn das elektrische Rauschen in einem Frequenzband weit über der Resonanzfrequenz des mechanischen Systems auftritt, kann

sein Einfluss auf die mechanische Auflösung und Stabilität vernachlässigt werden. Fällt das Rauschen mit der Resonanzfrequenz zusammen, hat es einen bedeutend größeren Einfluss. Aussagekräftige Daten über die Stabilität und Auflösung eines Piezo-Positioniersystems können deshalb nur über die Auflösungsmessung des kompletten Systems – Piezomechanik mit Steuerungselektronik – getroffen werden und zwar nicht als Spannungsangabe, sondern als Positionswert (weitere Informationen siehe S. 2-10 und S. 2-199 ff).

Hinweis

Die in Abbildung 8 gezeigte stufenlose Bewegung im Sub-Nanometerbereich kann nur mit reibungsfreien Aktoren und Führungssystemen erreicht werden. Traditionelle Mikropositionierelemente (Schritt- oder Servomotoren in Verbindung mit reibungsbehafteten Kugel- oder Kreuzrollenlagern etc.) weisen alle eine deutlich zu hohe Reibung auf. Sie begrenzt die Auflösung, verursacht Hys-

terese, Umkehrspiel, Taumelfehler und reduziert die Wiederholbarkeit. Die praktisch nutzbare Präzision dieser Systeme liegt deshalb um einige Größenordnungen niedriger als die der Piezo-Nanopositioniersysteme von PI.

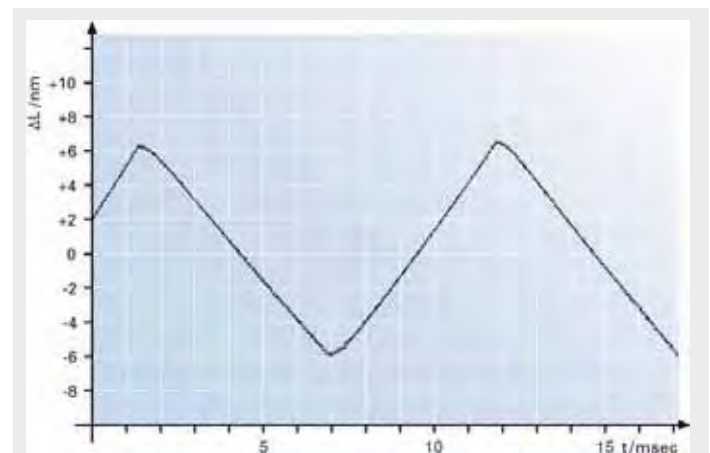


Abb. 8. Stufenlose Bewegung im Sub-Nanometerbereich mit einem P-170 Piezo-Translator bei Anlegen eines 200 Hz Dreiecksignals mit 1 V Amplitude. Man beachte, dass eine Gitterlinie nur zwei Nanometern entspricht

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Grundlagen der Piezoaktoris

Auslenkung von Piezoaktoren (Translatoren und Konraktoren)

Die in der Praxis häufig eingesetzten Stapelaktoren erreichen relative Auslenkungen von bis zu 0,2%. Die Ausdehnung einer Piezokeramik ist abhängig von der elektrischen Feldstärke E , ihrer Länge L , der auf sie wirkenden Kraft F und den piezoelektrischen Materialeigenschaften. Die Materialeigenschaften können durch den Tensor d_{ij} beschrieben werden, der die Beziehung zwischen dem angelegten elektrischen Feld und der daraus resultierenden mechanischen Dehnung ausdrückt.

Die Längenänderung ΔL einer unbelasteten einzelnen Lage Piezokeramik kann mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

(Gleichung 1)

$$\Delta L = S \cdot L_o \approx \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_o$$

mit:

S = Dehnung (relative Längenänderung $\Delta L/L$, dimensionslos)

L_o = Keramiklänge [m]

E = elektrische Feldstärke [V/m]

d_{ij} = Piezomodul (Materialeigenschaften) [m/V]

d_{33} beschreibt die Dehnung parallel zum Polarisationsvektor der Keramik (Dicke) und wird für die Berechnung der Ausdehnung von Stapeltranslatoren angewendet, d_{31} beschreibt die Geometrieänderung orthogonal zur Polarisation (Breite) und wird für die Berechnung der Kontraktion von Piezostreifen und Piezorohren verwendet (s. Abb. 9). d_{33} und d_{31} werden auch „PiezoGain“ genannt.

Hinweis:

Die Materialien, die in Piezoaktoren von PI eingesetzt werden,

weisen d_{33} -Werte von etwa 250 bis 550 pm/V und d_{31} -Werte von etwa -180 bis -210 pm/V auf. Die höchsten Werte sind mit Scheraktoren im d_{15} -Modus zu erreichen. Die obigen Angaben gelten nur für das Rohmaterial bei Raumtemperatur unter Kleinsignalbedingungen.

Die maximal zulässige Feldstärke für Piezoaktoren liegt zwischen 1 bis 2 kV/mm in Polarisationsrichtung und bis zu 300 V/mm in Gegenrichtung (Semibipolarbetrieb, nur kurzzeitig), s. a. Abb. 10. Die maximalen Spannungen hängen von der Keramik und den Isolationsmaterialien ab.

Das Überschreiten der maximalen Spannung kann zur Depolarisation, zu Durchschlägen und zur Zerstörung der Piezokeramik führen.

Viele Piezoaktoren und Nanopositioniersysteme von PI können kurzzeitig mit einem inversen Feld bis zu 300 V/mm betrieben werden, was zu einer negativen Ausdehnung führt und den Gesamtstellbereich um etwa 20% erhöht. Dadurch kann die durchschnittliche Spannung am Piezoaktor ohne Auslenkungsverlust reduziert und die Lebensdauer erhöht werden.

Stapeltranslatoren sind bis zu einem Verhältnis Länge/Durchmesser von ca. 12:1 mechanisch stabil. Der maximale Stellweg eines Piezotranslators mit 15 mm Durchmesser ist deshalb auf ungefähr 200 μm begrenzt. Größere Stellwege lassen sich durch mechanische Übersetzungen realisieren (s. a. „Piezomechaniken mit integrierter Hebelübersetzung“, S. 2-210).

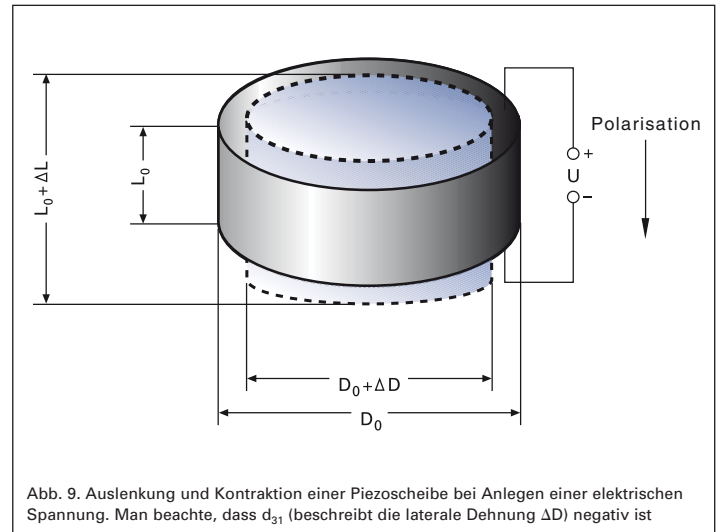


Abb. 9. Auslenkung und Kontraktion einer Piezoscheibe bei Anlegen einer elektrischen Spannung. Man beachte, dass d_{31} (beschreibt die laterale Dehnung ΔD) negativ ist

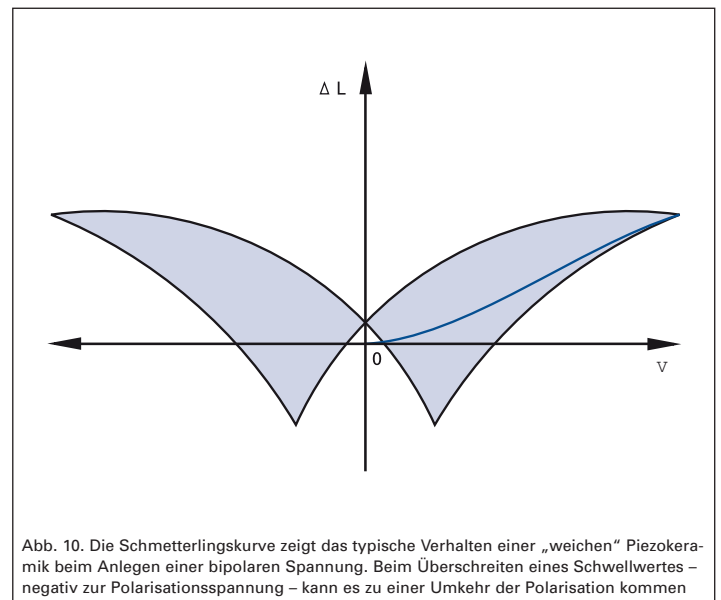


Abb. 10. Die Schmetterlingskurve zeigt das typische Verhalten einer „weichen“ Piezokeramik beim Anlegen einer bipolaren Spannung. Beim Überschreiten eines Schwellwertes – negativ zur Polarisationsspannung – kann es zu einer Umkehr der Polarisation kommen

Hinweis:

PI-Piezomechaniken sind für hohe Zuverlässigkeit im industriellen Einsatz konzipiert. Die Angaben für Auslenkung, Betriebsspannungsbereich und Belastbarkeit in den technischen Daten sind praxisgerechte Werte. Sie wurden durch langjährige Erfahrung in der Piezofertigung und bei vielen Anwendungen im industriellen Einsatz ermittelt.

Im Gegensatz zu anderen Piezoaktoren-Anbietern verfügt PI über das Know-how und die Ausrüstung zur Piezokeramikfertigung und -entwicklung. Das Ziel sollte dabei immer die praktische Nutzbarkeit und Zuverlässigkeit sein. Die Maximierung einzelner Parameter, wie Steifigkeit oder Auslenkung auf Kosten von Lebensdauer, mag für den Experimentierbetrieb interessant sein, ist aber in der Praxis nicht sinnvoll.

Bei der Suche nach einer geeigneten Piezomechanik sollte deshalb beachtet werden, dass „maximale Auslenkung“ nicht der einzig entscheidende Designparameter ist.

Hysterese (nur unregelter Betrieb)

Hysterese tritt im spannungsgesteuerten Betrieb auf und kann durch verschiedene Methoden wie z. B. Ladungssteuerung stark reduziert oder durch Positionsregelung eliminiert werden (s. a. „Positionsgeregelter Betrieb“, s. S. 2-199 ff.). Ungeregelte Piezoaktoren zeigen eine Hysterese in ihrem dielektrischen und elektromechanischen Großsignalverhalten. Der Hauptgrund dafür liegt in mikroskopischen, ferroelektrischen Polarisierungseffekten der piezoelektrischen Materialien. Die Hysterese nimmt mit der Betriebsspannung (elektrisches

Feld) des Aktors zu. Die „Öffnung“ der Spannungs-Auslenkungskurven (s. Abb. 11) beginnt typisch bei 2% (Kleinsignal) und erreicht unter Großsignalbedingungen ein Maximum von 10% bis 15%. Bei Scheraktoren kann dieser Wert darüber liegen.

Beispiel: Wird die Steuerspannung eines unregulierten Piezoaktors mit 50 μm Nominalstellweg in einem Bereich von 10% geändert (etwa 5 μm Bewegung), liegt die Positionsunsicherheit bei ca. 1% des vollen Stellweges oder absolut unter 1 μm .

Je kleiner die Bewegung, desto kleiner auch die Ungenauigkeit. Hysterese ist nicht mit dem Umkehrspiel klassischer Mechaniken zu verwechseln, wo das Spiel weitgehend unabhängig vom Stellweg ist und deshalb relativ mit kleineren Bewegungen zunimmt.

Für hochauflösende Anwendungen, bei denen nicht die absolute Position zählt, ist die Hysterese von untergeordneter

Bedeutung, und unregelte Aktoren können eingesetzt werden.

Positionsgeregelte Piezomechaniken von PI eliminieren die Hysterese. Diese Systeme sind besonders für Anwendungen geeignet, die das Anfahren absoluter Positionen mit hoher Genauigkeit, Linearität und Wiederholbarkeit im Nanometer- und Sub-Nanometerbereich erfordern (s. S. 2-199 ff.).

Beispiel: Faserkoppler und optische Trackingsysteme leiten ihr Positionsregelsignal von der eingekoppelten optischen Leistung ab. Ziel ist dabei nicht, eine exakte, extern vorgegebene Position anzufahren, sondern möglichst schnell auf maximale optische Leistung hin zu positionieren. Eine unregelte Piezomechanik ohne Positionssensor kann hier ausreichend sein. Vorteile, wie kurze Ansprechzeit, unbegrenzte Auflösung, Reibungsfreiheit und Umkehrspielfreiheit kommen hier auch ohne Positionsregelung voll zum Tragen.

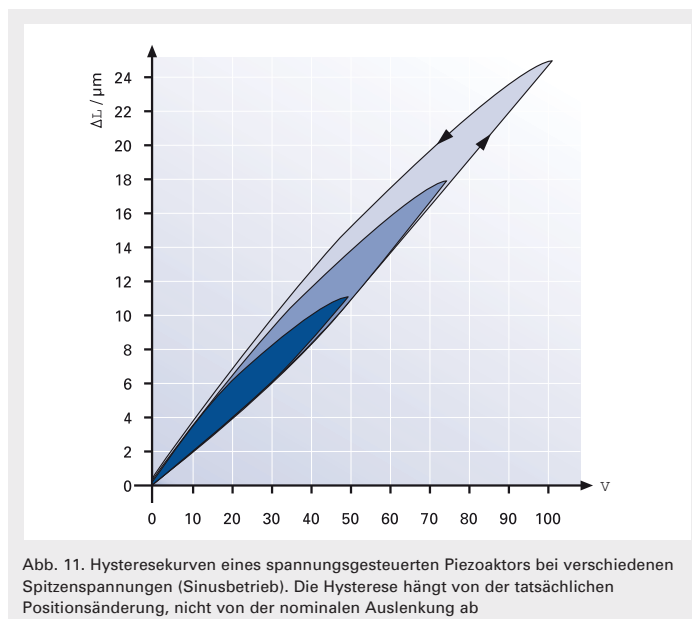


Abb. 11. Hysteresekurven eines spannungsgesteuerten Piezoaktors bei verschiedenen Spitzenspannungen (Sinusbetrieb). Die Hysterese hängt von der tatsächlichen Positionsänderung, nicht von der nominalen Auslenkung ab

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Grundlagen der Piezoaktorkik

Kriechen / Drift (nur unregelter Betrieb)

Die gleichen Materialeigenschaften, die für die Hysterese verantwortlich sind, erzeugen auch das Kriechverhalten. Kriechen beschreibt die Änderung der Auslenkung mit der Zeit bei unveränderter Steuerspannung. Wenn die Betriebsspannung eines spannungsgesteuerten Piezoaktors erhöht / reduziert wird, führt das zu einer Erhöhung / Reduktion der remanenten Polarisation, was sich in einer kontinuierlichen Positionsänderung (positiv oder negativ) manifestiert. Die Kriechgeschwindigkeit nimmt logarithmisch mit der Zeit ab (s. Abb. 12). Die folgende Gleichung beschreibt den Effekt:

(Gleichung 2)

$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{t=0,1} \left[1 + \gamma \cdot \lg \left(\frac{t}{0,1} \right) \right]$$

Positionskriechen eines spannungsgesteuerten Piezoelementes als Funktion der Zeit.

mit:

t = Zeit [s]

$\Delta L(t)$ = Positionsänderung als Funktion der Zeit [m]

$\Delta L_{t=0,1}$ = Auslenkung 0,1 Sekunden nach dem Ende der Spannungsänderung [m].

γ = Kriechfaktor, abhängig von den Materialeigenschaften (ungefähr 0,01 bis 0,02, was 1% bis 2% pro Zeitdekade entspricht).

In der Praxis erreicht die durch Kriechen bedingte Positionsveränderung nach einigen Stunden einige Prozent der ursprünglichen Positionierung.

Altern

Altern wird durch Reduktion der remanenten Polarisation (Depolarisation) hervorgerufen

und muss normalerweise bei Anwendungen in der Sensorik oder bei Ladungserzeugung beachtet werden (direkter Piezoeffekt). Bei Aktoranwendungen ist es vernachlässigbar, weil jedesmal, wenn ein Großsignal in Polarisationsrichtung angelegt wird, eine Repolarisation stattfindet.

Hinweis

Bei periodischen Bewegungen haben Hysterese und Kriechen nur einen minimalen Einfluss auf die Wiederholbarkeit.

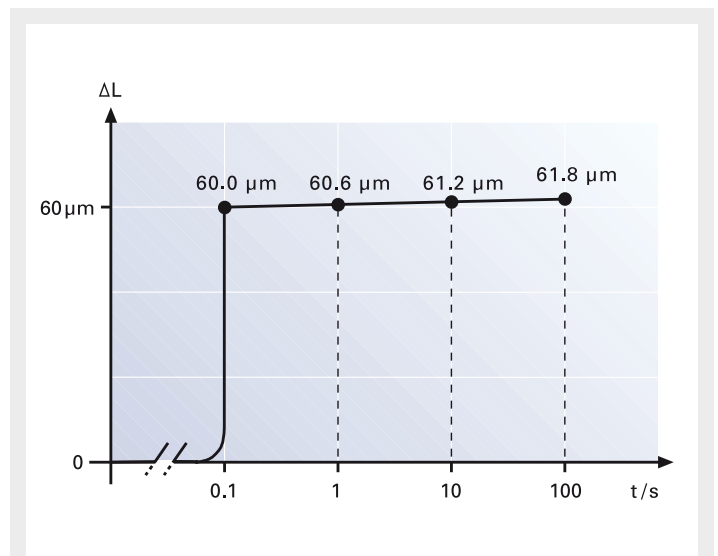


Abb. 12. Positionskriechen eines unregulierten Piezoaktors nach einer durch Spannungsänderung hervorgerufenen schnellen Positionsänderung von 60 μm als Funktion der Zeit. Das Positionskriechen beträgt ungefähr 1% der letzten spannungsgesteuerten Positionsänderung pro Zeitdekade

Aktorik und Messtechnik

Positionsmesstechnik und Sensoren für die Nanopositionierung

Bei der Positionsmessung von geregelten Piezomechaniken gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Prinzipien: Direktmetrologie und indirekte Metrologie.

Indirekte Metrologie

Wird z. B. die Position des Antriebes im Positioniersystem oder die Dehnung einer der Führungen gemessen und darüber auf die Stellung der Plattform zurückgeschlossen, spricht man von indirekter Metrologie. Fehler, die zwischen Antrieb und der eigentlich relevanten Position der Stellplattform auftreten, bleiben hier unberücksichtigt.

Direktmetrologie

Bei der Direktmetrologie wird die Bewegung an der entschei-

denden Stelle direkt gemessen, z. B. durch Interferometer oder kapazitive Sensoren.

Direktmetrologie ist genauer und daher besser zur absoluten Positionsregelung geeignet, u. a. weil Phasenverschiebungen zwischen der Messung und der tatsächlichen Position ausgeschlossen werden. Dies macht sich besonders bei dynamischen Anwendungen, unter Last und bei Mehrachsenanwendungen bemerkbar.

Parallel- und Seriellmetrologie

Bei mehrachsigen Positioniersystemen gibt es zusätzlich die Unterscheidung zwischen Parallelmetrologie und Seriellmetrologie.

Bei Parallelmetrologie beziehen sich, im Gegensatz zur se-

riellen Metrologie, die Messungen aller Sensoren auf die gleiche bewegte Plattform. Dadurch können auch Abweichungen von der vorgegebenen Bahn im Raum erkannt und automatisch ausgeregelt werden (s. a. Active Trajectory Control). Parallelmetrologie kann sehr gut in Mehrachsensystemen mit paralleler Kinematik integriert werden (s. a. S. 2-8).

Von Seriellmetrologie spricht man, wenn jeder Sensor genau einer Antriebsachse zugeordnet ist und parasitäre Bewegungen anderer Aktoren nicht erfasst. Führungsfehler durch Übersprechen können in diesem Falle nicht erkannt und ausgeregelt werden.

Hochauflösende Sensoren

Dehnungsmessstreifen (DMS)

Dehnungsmessstreifen sind indirekt messende Sensoren (indirekte Metrologie). Ein DMS-Positionssensor besteht aus einem elektrisch leitenden Film, dessen Widerstand sich mit der Dehnung ändert. DMS können auf dem Aktor oder dem Führungssystem der Piezomechanik aufgebracht werden. Bis zu 4 DMS bilden eine Wheatstone-Brücke, die von einer Gleichspannung (5 bis 10 V) gespeist wird. Die Brücke wird so abgeglichen, dass die Ausgangsspannung proportional zur Auslenkung ist.

Eine DMS-Spezialbauform ist auch als piezoresistiver Sensor bekannt. Er weist eine relativ gute Empfindlichkeit, aber mäßige Linearität und Temperaturstabilität auf (s. a. S. 2-8 ff).

Auflösung: Besser als 1 nm (bei kleinen Stellwegen bis ca. 15 µm)

Bandbreite: Bis 5 kHz

Vorteile

- Hohe Bandbreite
- Vakuumkompatibel
- Extrem kompakt

Allgemeine Eigenschaften

- Geringe Wärmezeugung (0,01 bis 0,05 W Speiseleistung).
- Langzeit-Positionsstabilität hängt von der Güte der Klebeverbindung ab.
- Indirektes Messverfahren.

Beispiele

Viele Piezoaktoren von PI sind mit integrierten DMS für positionsgeregelten Betrieb erhältlich (s. Kapitel „Piezoaktoren / Piezokomponenten“ S. 1-61 ff).

Hinweis

Die Messbandbreite der hier vorgestellten Sensoren ist nicht mit der Bandbreite des

geschlossenen Regelkreises der Piezomechanik zu verwechseln, die zusätzlich durch verschiedene elektrische und mechanische Eigenschaften des Systems begrenzt wird.



Abb. 13. Dehnungsmessstreifen (DMS). Büroklammer zum Größenvergleich

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Aktorik und Messtechnik



Abb. 14. LVDT-Sensor, Spule und Kern. Büroklammer zum Größenvergleich

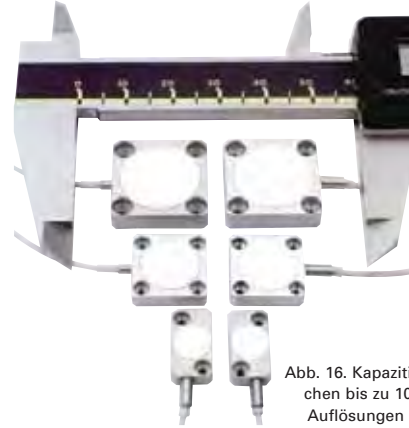


Abb. 16. Kapazitivsensoren erreichen bis zu 10.000 mal höhere Auflösungen als Schieblehren

LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

LVDTs sind gut für Direktmetrologie geeignet. Ein magnetischer Kern, der direkt am bewegten Teil angebracht wird, bestimmt die Menge der magnetischen Energie, die von der Primärwicklung in die beiden differenziellen Sekundärwicklungen übertragen wird (Abb. 15). Die Trägerfrequenz liegt typischerweise bei 10 kHz.

Auflösung: Bis 5 nm

Bandbreite: Bis 1 kHz

Wiederholbarkeit: Bis 5 nm

Vorteile:

- Gute Temperaturstabilität
- Sehr gute Langzeitstabilität
- Kontaktlos

- Misst direkt die Position des bewegten Teils (Direktmetrologie)
- Preisgünstig

Allgemeine Eigenschaften:

- Ausgasen von Isolationsmaterialien kann Anwendungen im Ultrahochvakuum beeinträchtigen
- Erzeugt Magnetfelder

Kapazitive Positionssensoren

Kapazitive Zweiplattensensoren bestehen aus zwei mit Hochfrequenz gespeisten Platten, die Teil einer kapazitiven Brücke sind (Abb. 17). Eine Platte ist fest angebracht, die andere ist mit dem bewegten Objekt (z.B. der Stellplattform einer Piezomechanik) verbunden. Der Abstand zwischen den Platten ist umgekehrt proportional zur Kapazität, aus der die Auslenkung abgeleitet wird. Zweiplattensensoren können Auflösungen im Pikometerbereich erreichen (weitere Informationen siehe Kapitel „Kapazitive Sensoren und Messelektroniken“ S. 3-1 ff).

Auflösung: Besser als 0,1 nm möglich

Wiederholbarkeit: Besser als 0,1 nm möglich

Bandbreite: Bis zu 10 kHz

Vorteile:

- Höchste Auflösung aller kommerziell verfügbaren Sensoren
- Ideal für Parallelmetrologie
- Kontaktlos
- Exzellente Langzeitstabilität
- Exzellenter Frequenzgang
- Keine Magnetfelder
- Hervorragende Linearität

Allgemeine Eigenschaften:

- Die Parallelität der Platten muss durch eine geeignete Konstruktion des Nanopositioniersystems gewährleistet sein, weshalb Flexureführungen besonders geeignet sind. Durch das von PI entwickelte Linearisierungssystem ILS werden darüber hinaus Verkippungseinflüsse stark reduziert (s. S. 3-18).

Beispiele:

P-733 Nanopositioniersystem mit Parallelkinematik und Parallelmetrologie, s. S. 2-62
 P-753 LISA NanoAutomation® Aktoren, s. S. 2-16. Weitere Beispiele finden Sie im Kapitel „Piezo Systeme / Schnelle Scantische“.

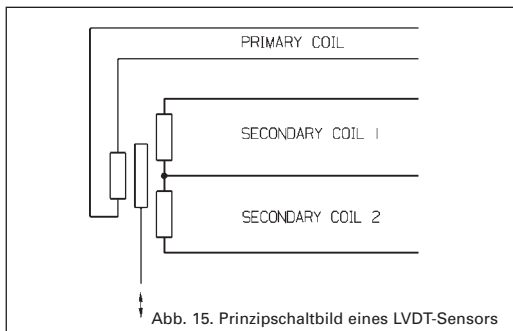


Abb. 15. Prinzipschaltbild eines LVDT-Sensors

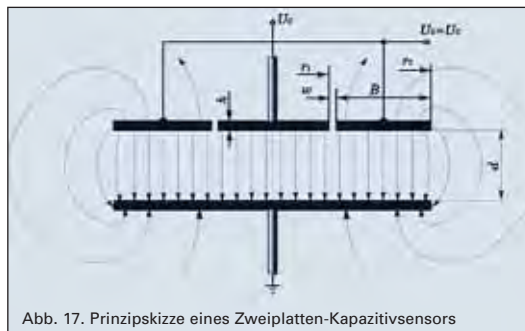


Abb. 17. Prinzipskizze eines Zweiplatten-Kapazitivsensors

Mechanische Grundlagen der Piezoaktork

Kräfte und Steifigkeit

Maximal zulässige Kräfte (Druckbelastbarkeit, Zugbelastbarkeit)

Die Druckbelastbarkeit von Piezokeramikmaterial wird oft mit der praktischen Langzeitbelastbarkeit von Piezoaktoren verwechselt. Piezokeramik kann einem Druck von bis zu 250 MPa ($250 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) widerstehen, bevor sie zerstört wird. In der Praxis darf dieser Wert niemals erreicht werden, weil es schon bei 20 % bis 30 % der mechanischen Belastbarkeit zur Depolarisation kommen kann. Für Aktoren und Stellische (eine Kombination verschiedener Materialien) müssen zusätzliche Parameter wie Schlankheitsgrad, Durchbiegung, Verkippung und Krafteinleitung beachtet werden.

Im Hinblick auf eine möglichst hohe Lebensdauer sind die Belastbarkeitswerte von PI-Piezoaktoren konservativ ausgelegt.

Die Zugbelastbarkeit von nicht vorgespannten Piezoaktoren ist auf 5–10 % der Druckbelastbarkeit begrenzt. PI bietet eine Vielzahl von Aktoren mit interner Vorspannung für hohe Zugbelastbarkeit an. Für dynamische Anwendungen werden generell vorgespannte Elemente empfohlen.

Da Keramik besonders empfindlich gegen Scherkräfte ist, müssen diese durch externe Maßnahmen (Federführungssysteme etc.) abgefangen werden.

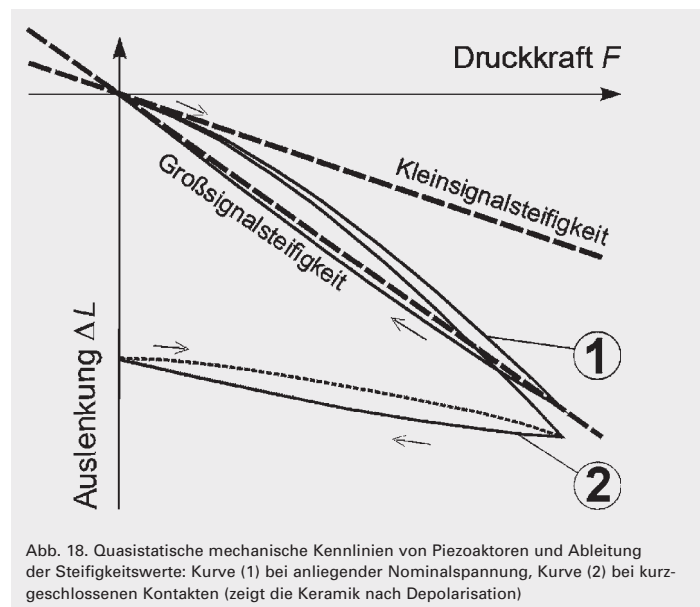
Steifigkeit

Die Aktorsteifigkeit ist ein wichtiger Parameter zum Berechnen von Kraftherzeugung, Resonanzfrequenz, Systemverhalten usw. Bei Festkörpern hängt die Steifigkeit vom Elastizitätsmodul ab. Sie wird normalerweise durch die Federkonstante k_T beschrieben, die den Einfluss einer externen Kraft

auf die räumliche Änderung des Körpers angibt.

Diese enge Definition trifft auf Piezokeramik nicht vollständig zu; Groß- und Kleinsignalbedingungen, statischer und dynamischer Betrieb, offene und kurzgeschlossene Elektroden müssen als Randbedingungen unterschieden werden. Der Polarisationsprozess verursacht eine remanente Dehnung im Piezomaterial, die von der Polarisationsfeldstärke abhängt. Die Polarisation wird aber sowohl von der angelegten Spannung als auch von externen Kräften beeinflusst. Wirkt

Piezokeramiken erzeugen eine elektrische Ladung, wenn sie mechanisch belastet werden, z. B. auch im dynamischen Betrieb (s. S. 2-192). Kann die elektrische Ladung nicht abfließen, ruft sie eine Gegenkraft zur mechanischen Belastung hervor. Deshalb erscheint ein Piezoaktor mit offenen Elektroden deutlich steifer als mit kurzgeschlossenen Elektroden. Übliche Spannungsverstärker wirken auf Piezoaktoren durch ihren geringen Ausgangswiderstand ähnlich wie ein Kurzschluss. Die mechanische Belastung von Piezoaktoren mit offenen Elektroden muss ver-



eine externe Kraft auf polarisierte Piezokeramik ein, hängt die räumliche Änderung von der Steifigkeit des Keramikmaterials und der Änderung der remanenten Dehnung – bedingt durch die Polarisationsänderung – ab. Die Gleichung $\Delta L_N = F/k_T$ gilt nur für kleine Kräfte und Kleinsignalbedingungen. Bei größeren Kräften wird der Kleinsignalsteifigkeit eine zusätzliche Komponente überlagert, die den Einfluss der Polarisationsänderungen beschreibt (Abb. 18).

mieden werden, weil die induzierte hohe Spannung die Keramik schädigen und gefährlich für den Anwender sein kann.

Hinweis

Es gibt keinen internationalen Standard zur Steifigkeitsmessung von Piezoaktoren. Deshalb können Steifigkeitswerte von verschiedenen Herstellern nicht miteinander verglichen werden, ohne die Messbedingungen zu kennen.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Mechanische Grundlagen der Piezoaktorik

Krafterzeugung

In den meisten Anwendungen werden Piezoaktoren als Stellglieder eingesetzt. Sie können jedoch auch als reine Kraftquelle, z.B. für Prägeanwendungen dienen. Krafterzeugung ist immer mit einer Reduktion der Auslenkung gekoppelt (s. Abb. 19). Die maximale Kraft (Blockierkraft), die ein Piezoaktor erzeugen kann, hängt von seiner Steifigkeit und maximalen freien Auslenkung ab (s. a. S. 2-191). Bei maximaler Krafterzeugung geht die Auslenkung auf null zurück.

(Gleichung 3)

$$F_{\max} \approx k_T \cdot \Delta L_0$$

Maximale Kraft, die gegen eine unendlich steife Last (unendliche Federkonstante) erzeugt werden kann.

mit:

$\Delta L_0 = \text{max. freie Auslenkung ohne Belastung [m]}$
 $k_T = \text{Aktorsteifigkeit [N/m]}$

In praktischen Anwendungen kann die Federkonstante der Last größer oder kleiner als die Piezofederkonstante sein. Die vom Piezoaktor erzeugte Kraft ist:

(Gleichung 4)

$$F_{\max \text{ eff}} \approx k_T \cdot \Delta L_0 \left(1 - \frac{k_T}{k_T + k_s} \right)$$

Effektive Kraft, die ein Piezoaktor gegen eine endlich steife Last erzeugen kann.

mit:

$\Delta L_0 = \text{freie Auslenkung ohne externe Belastung [m]}$
 $k_T = \text{Aktorsteifigkeit [N/m]}$
 $k_s = \text{Steifigkeit der externen Feder [N/m]}$

Beispiel:

Wie hoch ist die Krafterzeugung eines Piezoaktors mit einer nominalen Auslenkung von 30 μm und einer Steifigkeit von 200 $\text{N}/\mu\text{m}$? Der Aktor kann eine maximale Kraft von 30 $\mu\text{m} \times 200 \text{ N}/\mu\text{m} = 6.000 \text{ N}$ erzeugen. Bei maximaler Krafterzeugung ist die Auslenkung null und umgekehrt (s. a. Abb. 19).

Beispiel:

Ein Piezoaktor soll zum Einprägen von Mikrostrukturen in ein Substrat verwendet werden. In Ruhe (Nullposition) beträgt der Abstand zwischen dem Ende des Aktors und dem Substrat – bedingt durch mechanische Systemtoleranzen – 30 μm . Eine Kraft von 500 N wird benötigt, um das Substrat zu prägen.

F: Ist ein 60 μm Translator mit einer Steifigkeit von 100 $\text{N}/\mu\text{m}$ ausreichend?

A: Unter idealen Bedingungen kann dieser Aktor eine Kraft von 30 $\mu\text{m} \times 100 \text{ N}/\mu\text{m} = 3.000 \text{ N}$

erzeugen, weil 30 μm durch den Abstand zwischen Substrat und Aktor verloren gehen. Die tatsächliche Krafterzeugung hängt nun von der Steifigkeit des Substrates und dem mechanischen Aufbau ab. Ist die Unterlage des Substrates relativ weich, z.B. 10 $\text{N}/\mu\text{m}$, kann der Aktor bei maximal angelegter Spannung lediglich eine Kraft von 300 N ausüben. Ist die Unterlage steif, das Substrat selbst aber weich, reicht der Stellweg nicht aus, um die erforderliche Kraft zu erzeugen. Ist sowohl die Auflage als auch das Substrat steif, die Halterung des Aktors aber zu nachgiebig, drückt der Aktor sich selbst vom Substrat weg, anstatt genügend Kraft einzuleiten.

Die Situation ist vergleichbar mit dem Anheben eines Fahrzeuges durch einen Wagenheber. Ist der Untergrund oder die Karosserie zu weich, erreicht der Heber den Anschlag, bevor die Räder den Boden verlassen.

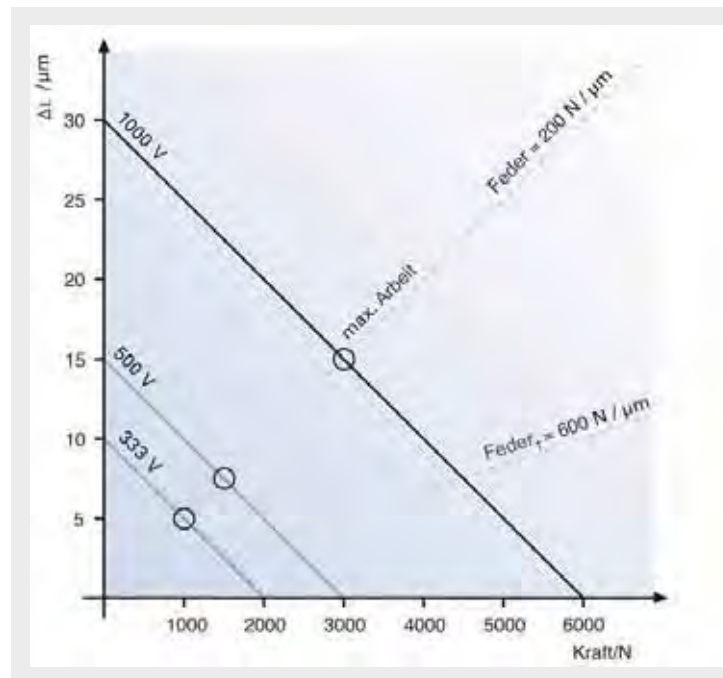


Abb. 19. Krafterzeugung als Funktion der Auslenkung eines Piezotranslators mit 30 μm / 1.000 V nominaler Auslenkung und 200 $\text{N}/\mu\text{m}$ Steifigkeit bei verschiedenen Betriebsspannungen. Die Punkte, bei denen die gestrichelten Linien (externe Federn) die Kraft / Auslenkungskurven des Piezoaktors schneiden, bestimmen die Kraft und Auslenkung für diese Aktor / Federkombination. Je steifer die externe Feder (flachere gestrichelte Kurve), desto weniger Auslenkung und desto mehr Kraft erzeugt der Aktor. Die maximale Arbeit wird geleistet, wenn die Steifigkeiten des Piezoaktors und der externen Feder identisch sind

Auslenkung bei externen Kräften

Beim Einwirken externer Kräfte kommt es zur Komprimierung des Piezoaktors. Zwei Fälle müssen beim Betrieb mit Belastung betrachtet werden:

- a) die Kraft bleibt während der Bewegung konstant
- b) die Kraft ändert sich während der Bewegung

Hinweis

Bei vorgespannten Piezoaktoren sollte die Steifigkeit der Vorspannfeder weniger als 1/10 der Aktorstefigkeit betragen, um den Auslenkungsverlust gering zu halten. Wenn die Steifigkeit der Vorspannfeder gleich der Aktorstefigkeit ist, halbiert sich die freie Auslenkung. Für hochdynamische Anwendungen muss die Resonanzfrequenz der Vorspannfeder über der des Aktors liegen.

a konstante Kraft

Nullpunktverschiebung

Die Masse auf dem Piezoaktor übt die Kraft $F = M \cdot g$ aus (M: Masse, g: Erdbeschleunigung). Der Nullpunkt wird um den Betrag $\Delta L_N \approx F/k_T$ verschoben, wobei k_T die Steifigkeit des Aktors beschreibt. Wenn F die spezifizizierte maximale Belastbarkeit nicht übersteigt, erreicht der Piezoaktor die volle Auslenkung bei nominaler Betriebsspannung (s. Abb. 20).

(Gleichung 5)

$$\Delta L_N \approx \frac{F}{k_T}$$

Nullpunktverschiebung mit konstanter Kraft

mit:

$\Delta L_N =$ Nullpunktverschiebung [m]

F = Kraft (Masse x Erdbeschleunigung) [N]

$k_T =$ Aktorstefigkeit [N/m]

Beispiel:

Wie groß ist die Nullpunktverschiebung eines 30 μm Piezotranslators mit der Steifigkeit von 100 N/ μm bei einer externen Masse von 20 kg und wie groß ist die maximale Auslenkung mit dieser Masse?

Die Masse von 20 kg erzeugt eine Kraft von $20 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 196 \text{ N}$. Bei einer Steifigkeit von 100 N/ μm

wird der Translator um knapp 2 μm komprimiert. Die maximale Auslenkung von 30 μm wird von der konstanten Kraft nicht beeinträchtigt.

b variable Kraft

Reduktion des Stellweges

Beim Betrieb von Piezoaktoren gegen federnde Materialien gelten andere Gesetze. Ein Teil des nominalen Stellweges geht dann durch die Elastizität des Piezoelementes verloren (Abb. 21). Die Beziehung zwischen

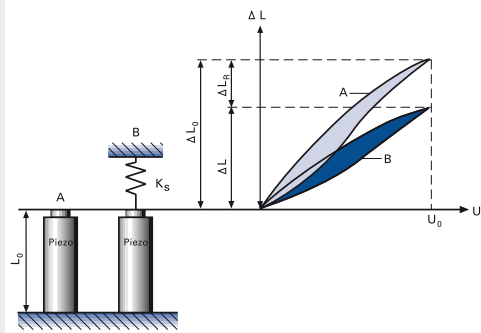


Abb. 21. Fall b, effektive Auslenkung eines Piezoaktors, der gegen eine Feder arbeitet

noch verfügbarer Auslenkung und Federsteifigkeit wird in den folgenden Gleichungen dargestellt:

(Gleichung 6)

$$\Delta L \approx \Delta L_0 \left(\frac{k_T}{k_T + k_S} \right)$$

Maximale Auslenkung eines Piezoaktors, der gegen eine Feder arbeitet

(Gleichung 7)

$$\Delta L_R \approx \Delta L_0 \left(1 - \frac{k_T}{k_T + k_S} \right)$$

Maximaler Auslenkungsverlust durch die externe Federkraft. Bei unendlicher steifer Einspannung ($k_S = \infty$) kann der Piezoaktor keine Auslenkung, sondern nur Kraft erzeugen

mit:

$\Delta L =$ Auslenkung gegen externe Feder [m]

$\Delta L_0 =$ nominale Auslenkung ohne externe Kraft [m]

$\Delta L_R =$ Auslenkungsverlust durch externe Federkraft [m]

$k_S =$ Federsteifigkeit [N/m]

$k_T =$ Aktorstefigkeit [N/m]

Beispiel:

F: Wie groß ist die maximale Auslenkung eines 15 μm Piezotranslators mit einer Steifigkeit von 50 N/ μm in einer elastischen Einspannung der Federkonstante $k_S = 100 \text{ N}/\mu\text{m}$?

A: Gleichung 6 zeigt, dass die Auslenkung durch die Federkonstante der Einspannung, die doppelt so groß ist wie die des Piezotranslators, auf 1/3 (5 μm) des nominalen Stellweges zurückgeht.

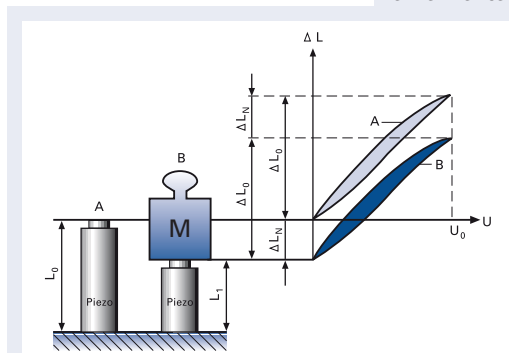


Abb. 20. Fall a, Nullpunktverschiebung bei konstanter Kraft

Grundlagen für den dynamischen Betrieb

Dynamische Kräfte

Jede Betriebsspannungsänderung des Piezoaktors führt zu einer Verformung. Wegen der Massenträgheit der Piezokeramik und der externen Zusatzmasse erzeugt jede Bewegung eine Kraft (Druck oder Zug), die auf die Keramik wirkt. Die maximale Kraft ist gleich der Blockierkraft, die wie folgt abgeschätzt wird:

(Gleichung 8)

$$F_{max} \approx \pm k_r \cdot \Delta L_0$$

Maximale Kraft, die verfügbar ist um die Piezomasse (und evtl. externe Zusatzmasse) zu beschleunigen. Zugkräfte müssen z. B. durch eine Federvorspannung kompensiert werden.

mit:

$$F_{max} = \text{Max. Kraft [N]}$$

$$\Delta L_0 = \text{Max. nominale Auslenkung ohne externe Kraft [m]}$$

$$k_r = \text{Aktorsteifigkeit [N/m]}$$

Zugkräfte müssen durch mechanische Vorspannung kompensiert werden, um Beschädigungen der Keramik zu verhindern, wobei die Vorspannkraft etwa 20% der Druckbelastbarkeit betragen sollte. Die Federsteifigkeit der Vorspannfedern sollte höchstens 10% der Aktorsteifigkeit betragen. Im Sinusbetrieb können die maximalen Kräfte wie folgt abgeschätzt werden:

(Gleichung 9)

$$F_{dyn} = \pm 4\pi^2 \cdot m_{eff} \left(\frac{\Delta L}{2}\right) f^2$$

Dynamische Kräfte, die bei Sinusbetrieb mit der Frequenz f auf ein Piezoelement wirken

mit:

$$F_{dyn} = \text{dynamische Kraft [N]}$$

$$m_{eff} = \text{effektive Masse, s. S. 2-193 [kg]}$$

$$\Delta L = \text{Auslenkung (Spitze-Spitze) [m]}$$

$$f = \text{Frequenz [Hz]}$$

Die maximal zulässigen Kräfte müssen für die Wahl einer Betriebsfrequenz unbedingt beachtet werden.

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

Hinweis

Wenn schwere oder – im Vergleich mit dem Durchmesser des Piezoaktors – große Lasten dynamisch bewegt werden, ist eine axiale Führung (z. B. Membrane) notwendig. Ohne Führungssystem können Kipp-schwingungen auftreten und die Piezokeramik beschädigen.

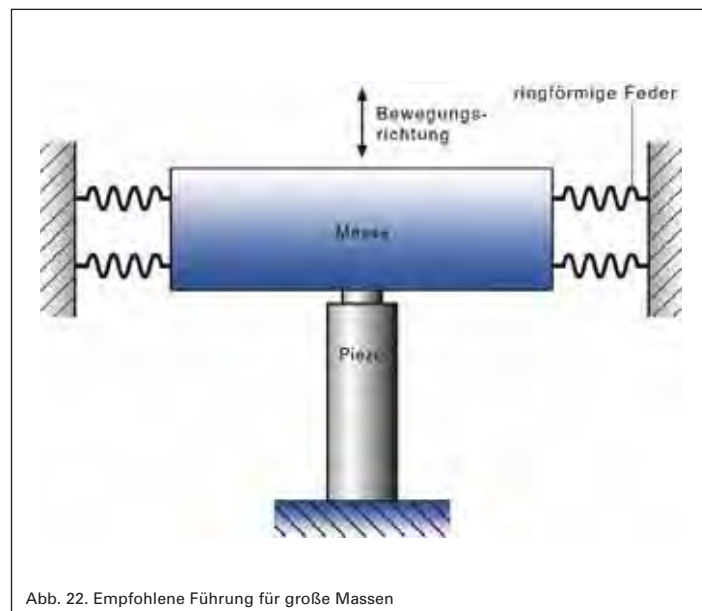


Abb. 22. Empfohlene Führung für große Massen

Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz eines idealen Feder-Masse-Systems ist eine Funktion der Steifigkeit und effektiven Masse (s. Abb. 23). Die Resonanzfrequenzangaben in den technischen Daten dieses Kataloges beziehen sich bei Piezoaktoren jeweils auf den unbelasteten, an einem Ende fest eingespannten Aktor; bei Piezo-Positioniersystemen auf das unbelastete System, das fest mit einer deutlich größeren Masse verbunden ist.

(Gleichung 10)

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{k_T}{m_{\text{eff}}}}$$

Resonanzfrequenz eines idealen Feder-Masse-Systems

mit:

f_0 = Resonanzfrequenz des unbelasteten Aktors [Hz]

k_T = Aktorsteifigkeit [N/m]

m_{eff} = effektive Masse (ca. 1/3 der Masse der Piezokeramik plus evtl. Endstücke) [kg]

Hinweis: Piezoaktoren werden in Positionieranwendungen deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz betrieben. Wegen des nichtlinearen Verhaltens von Piezokeramik stimmt die mit der obigen Gleichung berechnete theoretische Resonanzfrequenz nicht unbedingt mit dem tatsächlich gemessenen Wert überein. Wenn eine Zusatzmasse auf dem Aktor montiert wird, reduziert sich die Resonanzfrequenz entsprechend der folgenden Gleichung:

(Gleichung 11)

$$f'_0 = f_0 \sqrt{\frac{m_{\text{eff}}}{m'_{\text{eff}}}}$$

Resonanzfrequenz mit Zusatzmasse M

m'_{eff} = Zusatzmasse M + m_{eff}

Die obigen Gleichungen zeigen, dass zur Verdoppelung der Resonanzfrequenz eines Feder-Masse-Systems entweder die Steifigkeit um den Faktor 4 erhöht oder die Masse auf 25% des ursprünglichen Wertes reduziert werden muss.

Kräfte durch Vorspannfedern – sofern deren Resonanzfrequenz deutlich über der des Aktors liegt – haben keinen entscheidenden Einfluss auf die Resonanzfrequenz.

Der Phasengang einer Piezomechanik entspricht ungefähr dem eines Systems zweiter Ordnung und wird wie folgt beschrieben:

(Gleichung 12)

$$\varphi \approx 2 \cdot \arctan \left(\frac{f}{f_0} \right)$$

mit

φ = Phasenwinkel [Grad]

f_0 = Resonanzfrequenz [Hz]

f = Arbeitsfrequenz [Hz]

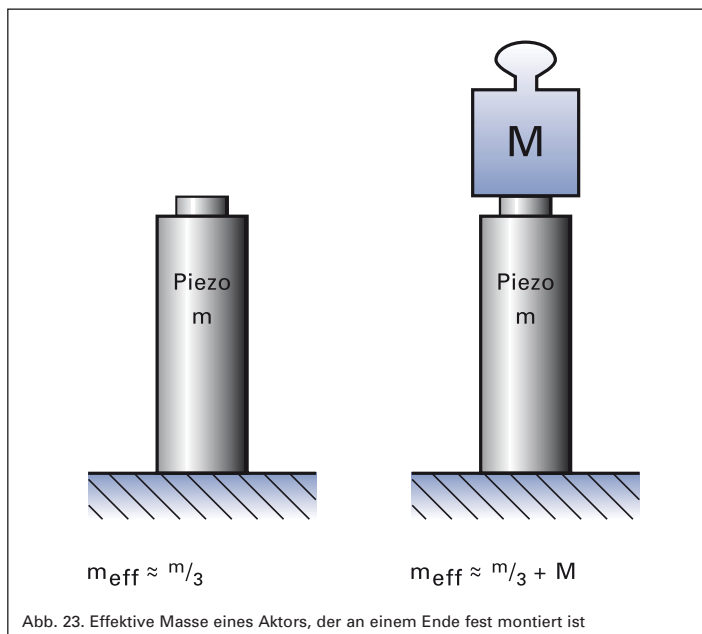


Abb. 23. Effektive Masse eines Aktors, der an einem Ende fest montiert ist

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Grundlagen für den dynamischen Betrieb

Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen?

Schnelles Ansprechverhalten ist eine charakteristische Eigenschaft von Piezoaktoren. Eine schnelle Änderung der Betriebsspannung bewirkt eine schnelle Positionsänderung. Dieses Verhalten ist besonders bei dynamischen Anwendungen (z.B. Scanning-Mikroskopie, Bildstabilisierung, Ventilsteuerung, Erzeugung von Schockwellen, aktive Schwingungsdämpfung etc.) wünschenswert.

Ein Piezoaktor kann bei schlagartigem Anstieg der Steuerungsspannung seine nominale Auslenkung in ungefähr 1/3 der Periode der Resonanzfrequenz erreichen, falls die Spannungsquelle genügend Strom aufbringen kann. Wenn nicht

durch entsprechende Steuerungstechnik (z.B. Notchfilter oder InputShaping® s. S. 2-201) oder einen Regelkreis kompensiert wird, kommt es in diesem Fall zu starkem Überschwingen (s. Abb. 24).

(Gleichung 13)

$$T_{min} \approx \frac{1}{3f_0}$$

Kürzeste Auslenkungszeit eines Piezoaktors, wenn Strom und Anstiegszeit nicht durch den Verstärker begrenzt sind.

$$T_{min} = \text{Zeit [s]}$$

$$f_0 = \text{Resonanzfrequenz [Hz]}$$

Beispiel: Ein Piezoaktor mit einer Resonanzfrequenz von 10 kHz kann seine nominale Auslenkung in 30 µs erreichen.

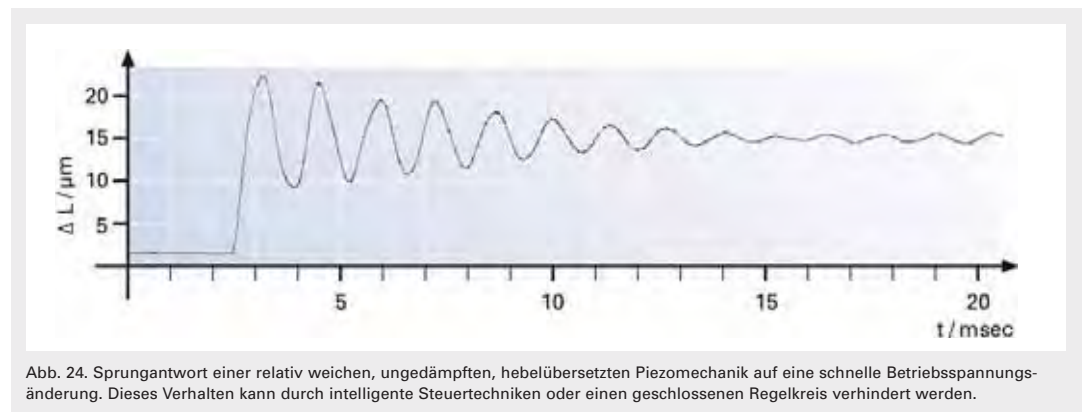


Abb. 24. Sprungantwort einer relativ weichen, ungedämpften, hebelübersetzten Piezomechanik auf eine schnelle Betriebsspannungsänderung. Dieses Verhalten kann durch intelligente Steuerungstechniken oder einen geschlossenen Regelkreis verhindert werden.

Elektrische Grundlagen der Piezoaktuatorik

Elektrische Anforderungen für den Piezobetrieb

Allgemeines

Beim Betrieb weit unterhalb der Resonanzfrequenz verhält sich ein Piezoaktor wie ein Kondensator. Seine 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 Piezo-Stapeltranslatoren oder Kontraktoren, die aus mehreren elektrisch parallelgeschalteten Keramikschichten aufgebaut sind, wird die Kapazität auch durch die Anzahl der Schichten bestimmt.

Die Kleinsignalkapazität eines Stapeltranslatoren kann wie folgt abgeschätzt werden:

(Gleichung 14)

$$C \approx n \cdot \epsilon_{33T} \cdot A/d_s$$

mit:

C = Kapazität [Farad; (As/V)]

n = Anzahl der Keramikschichten $\frac{l_0}{d_s}$

ϵ_{33T} = Dielektrizitätskonstante [As/Vm]

A = Elektrodenfläche einer Lage [m^2]

d_s = Abstand zwischen den einzelnen Elektroden (Dicke der Schichten) [m]

Die obige Gleichung zeigt, dass bei einer gegebenen Aktorlänge die Kapazität mit dem Quadrat der Anzahl der Lagen im Aktor zunimmt. Dadurch ergibt sich, dass die Kapazität eines (monolithischen) Niedervolt-Piezotranslatoren mit 100 μm Schichtdicke 100 mal so groß ist wie die eines Hochvolt-Translatoren mit 1 mm

dicken Schichten, jeweils bei gleichen Abmessungen. Obwohl der Strombedarf des monolithischen Aktors in diesem Beispiel 100 mal größer ist, bleibt die Leistungsaufnahme beider Typen etwa gleich. PI-Hoch- und Niedervolt-Verstärker in diesem Katalog sind optimal für die jeweils unterschiedlichen Anforderungen ausgelegt.

Statischer Betrieb

In einem elektrisch geladenen Piezoaktor ist etwa die Energie $E = (1/2) CU^2$ gespeichert. Jede Ladungsänderung und damit Auslenkungsänderung ist mit einem Ladungstransport verbunden, der den folgenden Strom i benötigt:

(Gleichung 15)

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

Beziehung von Strom und Spannung am Piezoaktor

mit:

i = Strom [A]

Q = Ladung [Coulomb (As)]

C = Kapazität [F]

U = Spannung [V]

t = Zeit [s]

Im statischen Betrieb müssen nur die Leckstromverluste kompensiert werden, die sich auf Grund des hohen Innenwiderstandes im μA -Bereich oder darunter bewegen. Selbst wenn ein geladener Piezoaktor schlagartig 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.

Für langsame Positionsänderungen wird nur ein geringer Strom benötigt. Beispiel: Ein Verstärker mit einem Ausgangsstrom von 20 μA kann einen Aktor mit 20 nF in einer Sekunde voll auslenken (passende Piezoverstärker sind ab S. 2-100 im Kapitel „Piezoelektronik“ beschrieben).

Hinweis

Die Kapazitätswerte in den technischen Daten sind Kleinsignalkapazitätswerte (gemessen bei 1 V, 1.000 Hz, 20 °C, lastfrei). Die Kapazität von Piezokeramik ändert sich mit der Amplitude, Temperatur und Last auf bis zu 200% des unbelasteten Kleinsignalkapazitätswertes bei Raumtemperatur. Weitere Informationen zum elektrischen Leistungsbedarf sind in den Aussteuerkurven der einzelnen Verstärker im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“ enthalten (s. S. 2-99).

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

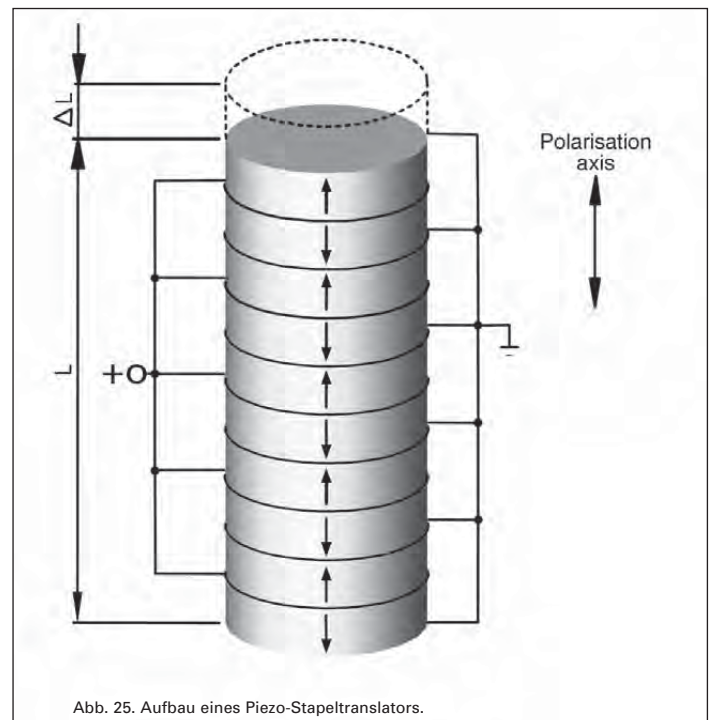


Abb. 25. Aufbau eines Piezo-Stapeltranslatoren.

Elektrische Grundlagen der Piezoaktork

Dynamischer Betrieb (Linear)

Piezoaktoren können Beschleunigungen von mehreren tausend g erzeugen und sind hervorragend für den dynamischen Einsatz geeignet.

Die Dynamik eines Piezo-Positioniersystems wird durch verschiedene Parameter beeinflusst:

- Die Anstiegsgeschwindigkeit (V/s) und der maximale Ausgangsstrom des Verstärkers begrenzen die Arbeitsfrequenz des Piezosystems.
- Wenn genügend elektrische Leistung vom Verstärker vorhanden ist, kann die maximale Arbeitsfrequenz durch die maximalen dynamischen Kräfte, die das Piezoelement verkraften kann, begrenzt sein (s. S. 2-192, „Dynamischer Betrieb“).
- 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 Systems.
- Im Langzeitbetrieb kann die Arbeitsfrequenz durch die Wärmeentwicklung begrenzt werden.

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Beziehung zwischen Verstärkerausgangsstrom, Spannung und Arbeitsfrequenz. Sie sind wichtig bei der Bestimmung der minimalen Spezifikationen eines Piezo-

verstärkers für den dynamischen Betrieb.

(Gleichung 16)

$$i_a \approx f \cdot C \cdot U_{p-p}$$

Dauerstrombedarf für Sinusbetrieb

(Gleichung 17)

$$i_{max} \approx f \cdot \pi \cdot C \cdot U_{p-p}$$

Spitzenstrombedarf für Sinusbetrieb

(Gleichung 18)

$$f_{max} \approx \frac{i_{max}}{2 \cdot C \cdot U_{p-p}}$$

Maximale Arbeitsfrequenz bei Ansteuerung mit Dreiecksfunktion in Abhängigkeit vom max. Verstärkerausgangsstrom

mit:

i_a^* = Dauerstrom des Verstärkers (Source / Sink) [A]

i_{max}^* = Spitzenstrom des Verstärkers (Source / Sink) [A]

f_{max} = maximale Arbeitsfrequenz [Hz]

C^{**} = Aktor-Kapazität [Farad (As/V)]

U_{p-p} = Betriebsspannung (Spitze-Spitze) [V]

f = Arbeitsfrequenz [Hz]

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

Beispiel:

F: Welcher Spitzenstrom ist nötig, um einen Translator mit 40 nF Kapazität und nominaler Auslenkung von 40 µm bei 1.000 V mit sinusförmiger Auslenkung von 20 µm bei 1.000 Hz zu betreiben?

A: Für die Auslenkung von 20 µm sind ungefähr 500 V Spitze-Spitze notwendig. Aus Gleichung 17 ergibt sich ein Spitzenstrom von ≈ 63 mA (passende Verstärker sind im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“ ab S. 2-99 ff beschrieben).

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Beziehung zwischen erforderlicher Blindleistung des Verstärkers, Kapazität des Aktors, Arbeitsfrequenz und Spannung am Piezoaktor.

Die durchschnittliche Leistung, die ein Piezoverstärker bei Sinusbetrieb aufbringen muss, ergibt sich aus:

(Gleichung 19)

$$P_a \approx C \cdot U_{max} \cdot U_{p-p} \cdot f$$

Für Spitzenleistung im Sinusbetrieb gilt:

(Gleichung 20)

$$P_{max} \approx \pi \cdot C \cdot U_{max} \cdot U_{p-p} \cdot f$$

mit:

P_a = durchschnittliche Leistung [W]

P_{max} = Spitzenleistung [W]

C^{**} = Aktor-Kapazität [F]

f = Arbeitsfrequenz [Hz]

U_{p-p} = Spannung am Piezo (Spitze-Spitze) [V]

U_{max} = Nominalspannung des Verstärkers [V]

*Es ist entscheidend, dass das Netzteil genügend Strom liefern kann.

**Für Großsignalbedingungen sollte ein Sicherheitsfaktor von 70% zur Kleinsignalkapazität addiert werden.

Dynamischer Stromkoeffizient (DSK)

Anstatt die benötigte Leistung für eine dynamische Anwendung zu bestimmen, ist es einfacher, den Strom zu berechnen, weil er linear mit der Frequenz und Spannung (Auslenkung) zunimmt. Dazu wird der dynamische Stromkoeffizient (DSK) eingeführt. Er beschreibt den durchschnittlichen Strom (vom Verstärker), der benötigt wird, um einen Piezoaktor pro Einheit Frequenz (Hz) und Auslenkung (μm) zu betreiben, und erleichtert die Auswahl des Verstärkers für die jeweilige Anwendung. DSK-Werte gelten für Sinusbetrieb im offenen Regelkreis. Im geschlossenen Regelkreis kann der Strombedarf um bis zu 50% ansteigen.

Die Spitzen- und Dauerausgangsströme der Piezoverstärker sind den technischen Daten zu entnehmen (s. Kapitel „Piezoverstärker und Controller“). Die DSK-Werte für Piezoaktoren und Piezomechaniken sind ebenfalls in den Datenblättern dieses Kataloges aufgeführt.

Beispiel: Um festzustellen, ob ein gewählter Verstärker einen Piezoaktor bei 100 Hz mit 5 μm Hub betreiben kann, muss der DSK mit 100 und 5 multipliziert werden. Ist das Resultat kleiner oder gleich dem Dauerstrom des gewählten Verstärkers, eignet er sich für die Anwendung.

Dynamischer Betrieb (Schaltanwendungen)

Für Anwendungen wie z. B. Ventilsteuerung oder Schockwellenerzeugung wird nicht unbedingt eine Positionsregelung benötigt; hier bietet sich der geschaltete Betrieb an. Piezoaktoren können extrem schnelle Positionsänderungen mit Beschleunigungen von

mehreren 1.000 g durchführen. Zur Abschätzung dynamischer Kräfte s. S. 2-192.

Die einfachste Steuerung für geschaltete Piezoanwendungen könnte aus einem großen Kondensator bestehen, der z. B. mit einer schwachen Stromquelle langsam geladen und dann schnell in den Piezoaktor entladen wird.

Die nachfolgende Gleichung zeigt den Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung (entspricht der Auslenkung) und der Zeit.

(Gleichung 21)

$$U(t) = U_0 + U_{p-p} \cdot (1 - e^{-t/RC})$$

Spannungsverlauf am Piezoaktor nach dem Schaltvorgang

mit:

$$U_0 = \text{Anfangsspannung [V]}$$

$$U_{p-p} = \text{Ausgangsspannung der Quelle (Spitze-Spitze) [V]}$$

$$R = \text{Ausgangswiderstand der Quelle [Ohm]}$$

$$C = \text{Aktor-Kapazität [F]}$$

$$t = \text{Zeit [s]}$$

Die Spannung steigt oder fällt exponentiell mit der RC-Zeitkonstante. Bei quasistatischen Bedingungen verläuft die Auslenkung des Piezoaktors proportional zur Spannung. In der Praxis können dynamische Prozesse nicht mit einer einfachen Gleichung beschrieben werden. Steigt die Spannung schnell genug an, wird eine Resonanz angeregt, und es kommt zum Überschwingen. Außerdem wirken bei jeder Auslenkungsänderung dynamische Kräfte auf das Piezomaterial. Diese Kräfte erzeugen

eine Spannung im Piezoelement (positiv oder negativ) die sich mit der Steuerspannung überlagert. Ein Piezoaktor kann seine nominale Auslenkung in ungefähr 30% der Periodendauer der Resonanzfrequenz erreichen (s. S. 2-194).

Für Ladungsvorgänge mit konstantem Strom (z. B. mit einem Linearverstärker) gilt die folgende Gleichung:

(Gleichung 22)

$$t \approx C \cdot (U_{p-p} / i_{max})$$

Ladezeit eines Piezoaktors mit konstantem Strom. Bei kleinen Kapazitäten kann die Verstärkeranstiegszeit hier ein begrenzender Faktor sein.

mit:

$$t = \text{Zeit bis } U_{p-p} \text{ am Piezoaktor anliegt [s]}$$

$$C = \text{Aktor-Kapazität [F]}$$

$$U_{p-p} = \text{Spannungshub (Spitze-Spitze) [V]}$$

$$i_{max} = \text{Verstärkerspitzenstrom [A]}$$

Zum schnellstmöglichen Erreichen einer stabilen Position ist der einfache geschaltete Betrieb nicht die beste Lösung, weil es zum Überschwingen kommt. Moderne Verfahren, wie InputShaping® (s. S. 2-201), lösen das Problem von eigenangeregten Resonanzen im Aktor und der Umgebung des Aktors durch komplexe Signalverarbeitung und -aufbereitung.

Linearantriebe & Aktoren

Nanosteiltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalg

Mehrkanalg

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanosteiltechnik

Nanomesstechnik

Mikrosteiltechnik

Index

Elektrische Grundlagen der Piezoaktorik

Hinweis

Piezoantriebe werden immer häufiger eingesetzt, weil sie zu extrem hohen Beschleunigungen fähig sind. Diese Eigenschaft ist z. B. bei der aktiven Strahlsteuerung und Stabilisierung von Optiken extrem wichtig. Die Aktoren können jedoch oft schneller beschleunigen als die Mechaniken, die sie antreiben, in der Lage sind zu folgen. Bei den hohen Beschleunigungen treten signifikante Reaktionskräfte auf, die Resonanzschwingungen, auch in der Umgebung des Aktors, anregen. Die Abklingzeit der Schwingungen kann um Faktoren über der Ansprechzeit des Aktors liegen. Bei industriellen, zeitkritischen Nanopositionier-Anwendungen wird dieses Problem um so signifikanter, je mehr die Anforderungen an die Genauigkeit und den Systemdurchsatz steigen.

Klassische Regeltechnik kann diese Probleme kaum lösen, besonders, wenn Resonanzen außerhalb des Regelkreises auftreten, etwa wenn die Probe auf einem schnellen Piezoscans in den Umkehrpunkten zum Schwingen angeregt wird. Oft wird die Lösung dann in einer Reduktion der Scangeschwindigkeit gesucht, wobei ein Teil der Vorzüge des Piezoantriebes verloren geht.

InputShaping®, ein neues patentiertes Echtzeit-Feedforwardverfahren, eliminiert Resonanzen auch außerhalb des Regelkreises und schaltet die übliche Einschwingphase praktisch aus. Weitere Informationen dazu siehe S. 2-201 oder www.Convolve.com.

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:

(Gleichung 23)

$$P \approx \frac{\pi}{4} \cdot \tan \delta \cdot f \cdot C \cdot U_{p-p}^2$$

Wärmeerzeugung im Piezoaktor

mit:

P =Leistung, die in Wärme umgewandelt wird [W]

$\tan \delta$ =dielektrischer Verlustfaktor (Verhältnis von Parallelwiderstand zu Parallelreaktanz) \approx Leistungsfaktor, $\cos \varphi$, für kleine Winkel δ und φ

f =Arbeitsfrequenz [Hz]

C =Aktor-Kapazität [F]

U_{p-p} =Spannung (Spitze-Spitze) [V]

Für die Beschreibung der Verlustleistung verwenden wir den Verlustfaktor $\tan \delta$ statt des Leistungsfaktors $\cos \varphi$, weil er bei der Charakterisierung dielektrischer Materialien gängiger ist. 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 Wert auf 8 bis 12% ansteigen (variiert mit der Frequenz, Temperatur, Amplitude etc.). Die maximale Arbeitsfrequenz hängt deshalb auch von der zulässigen Betriebstempe-

ratur ab, und bei hohen Frequenzen und Amplituden können Kühlmaßnahmen notwendig werden. PI bietet für diese Anwendungen auch Piezoaktoren mit integrierten Temperatursensoren zur Überwachung der Keramiktemperatur an.

Für den hochdynamischen Betrieb von Hochlastaktoren mit großen Kapazitäten (z. B. PICA-Power Aktoren, s. S. 1-88) wurde eine neue Generation von Hochleistungsverstärkern entwickelt, die auf dem Prinzip der Energierückgewinnung basiert. Bei diesem Verstärkertyp muss nur die Wirkleistung für den Piezoaktor aufgewendet werden, weil die Blindleistung nicht an den Kühlkörpern der Endstufen in Wärme umgewandelt wird.

Die nicht in Bewegung umgewandelte Energie wird zurückgewonnen und steht nach einem Transformationsprozess wieder für den Verstärker zur Verfügung (siehe Blockdiagramm in Abb. 26). Die Kombination von Piezokeramik mit geringen Verlusten und Verstärkern mit Energierückgewinnung bildet die Grundlage für Piezoaktoranwendungen mit höchster Dynamik.

Bei dynamischen Anwendungen mit kleiner bis mittlerer Belastung sind die neu entwickelten monolithischen PICMA® Niedervolt-Piezoaktoren ebenfalls gut geeignet. Durch ihre hohe Curie-Temperatur von 320°C ermöglichen sie einen Arbeitsbereich bis zu 150°C.

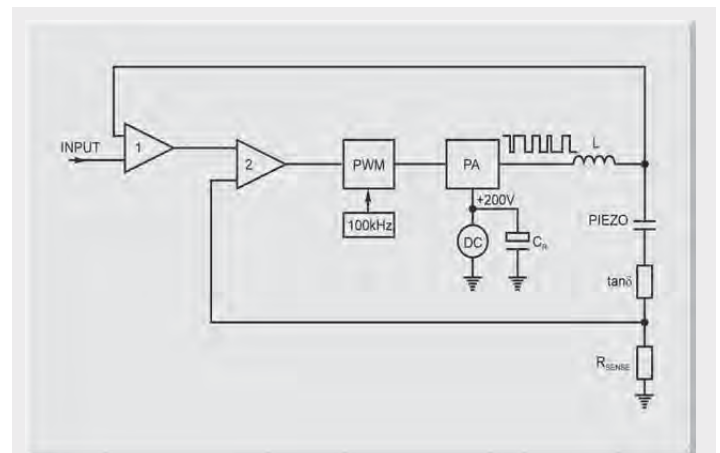


Abb. 26. Blockdiagramm eines Verstärkers mit Energierückgewinnung für hochdynamische Anwendungen

Steuerung und Regelung von Piezomechaniken

Positionsgeregelter Betrieb



Abb. 27. Verschiedene digitale Piezocontroller

Durch den positionsgeregelten Betrieb werden nichtlineare Effekte wie z.B. Hysterese und Kriechen eliminiert und die Voraussetzungen für wiederholbare Positionierungen im Nanometerbereich geschaffen.

PI bietet die größte Auswahl an Piezomechaniken mit integrierten Positionssensoren für den positionsgeregelten Betrieb an. Die Vorteile dieser Betriebsart sind:

- Hohe Linearität, Stabilität, Wiederholbarkeit und Genauigkeit
- Automatische Kompensation von Lastschwankungen
- Virtuell unendliche Steifigkeit (innerhalb der Regelgrenzen)
- Elimination von Hysterese- und Drifteffekten

Die positionsgeregelten Piezomechaniken von PI ermöglichen Wiederholbarkeiten bis

in den Sub-Nanometerbereich, Linearität bis zu 0,01 % und Bandbreiten bis 10 kHz. Ein digitaler oder analoger Positionsregler bestimmt die Piezospannung durch den Vergleich des Referenzsignals (Sollposition) mit der vom Sensor gemessenen Position (Istwert), s. Abb. 28.

Für optimale Genauigkeit ist es wünschenswert, dass der Positionssensor direkt und berührungslos den bewegten Teil der Mechanik misst (Direktmetrologie). PI bietet eine große Auswahl an Systemen mit integrierter Direktmetrologie an. Die höchste Genauigkeit ist mit kapazitiven Sensoren erreichbar (s. a. Kapitel „Kapazitive Sensoren und Messelektroniken“ ab S. 3-1 ff). Einfachere, weniger genaue Systeme messen z.B. die Dehnung des Antriebes.

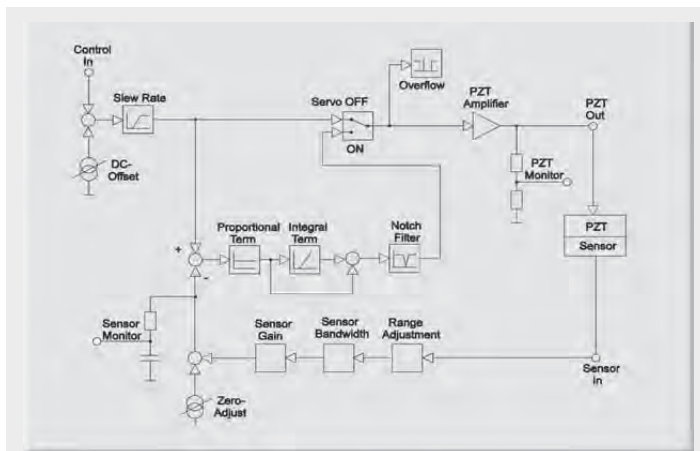


Abb. 28. Blockschaltbild eines typischen, positionsgeregelten Piezo-Positioniersystems

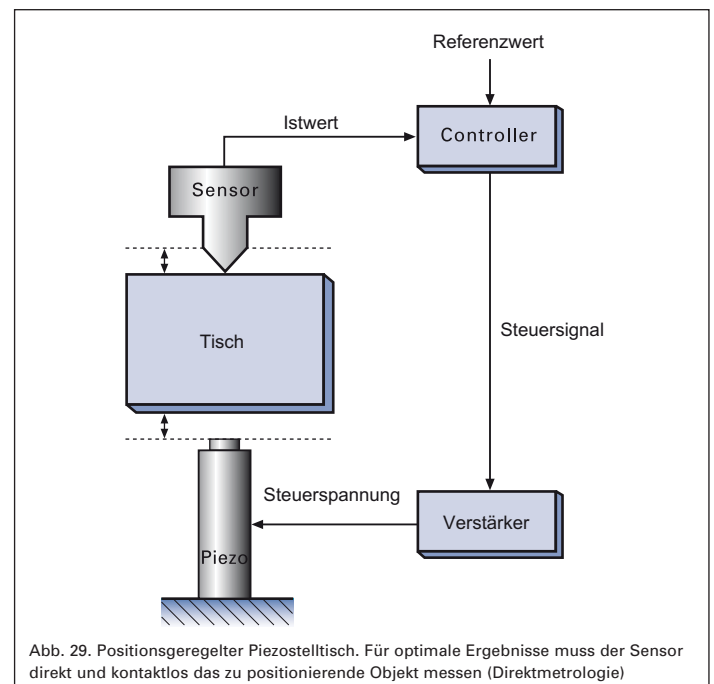


Abb. 29. Positionsgeregelter Piezotellertisch. Für optimale Ergebnisse muss der Sensor direkt und kontaktlos das zu positionierende Objekt messen (Direktmetrologie)

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostechnik

Index

Steuerung und Regelung von Piezomechaniken

Auflösung geregelt / ungeregelt

Positionsgeregelte Piezoantriebe ermöglichen eine um Faktoren höhere Linearität und Wiederholbarkeit als unregelte Systeme. Die Auflösung, die ja bei Piezoaktoren nicht durch Reibung begrenzt ist, sondern vom elektrischen Rauschen bestimmt wird, liegt im unregelmäßigem Betrieb prinzipiell höher als im geschlossenen Regelkreis. Im unregelmäßigem Betrieb entfallen der Sensor und die Regelelektronik als zusätzliche Rauschquellen. Dem Sensor und Regelzweig eines Piezocontrollers kommt deshalb eine besonders große Bedeutung zu. Mit entsprechend hochwertigen Systemen sind auch im geregelten Betrieb Auflösungen im Sub-Nanometer-Bereich möglich, wie in Abb. 30 und 31 gezeigt. Kapazitive Sensoren erreichen die höchste Auflösung, Linearität und Stabilität.

Controllerabgleich

Jeder Piezocontroller wird bei PI auf das dazugehörige Positioniersystem abgeglichen, um optimale Genauigkeit und dynamische Eigenschaften zu garantieren. Das entsprechende Abgleichprotokoll wird mit dem System ausgeliefert (s. S. 2-87). Zur Optimierung des Abgleichs werden verschiedene Informationen über den Einsatz der Piezomechanik benötigt (Details dazu finden Sie auf S. 2-11 im Kapitel „Piezoverstärker und Controller“).

Digitale Controller können sich durch einen sogenannten ID-Chip in der Piezomechanik, der alle wichtigen Abgleichdaten enthält, automatisch auf die Mechanik einstellen. Das erleichtert die Austauschbarkeit von Controller und Stellsystem.

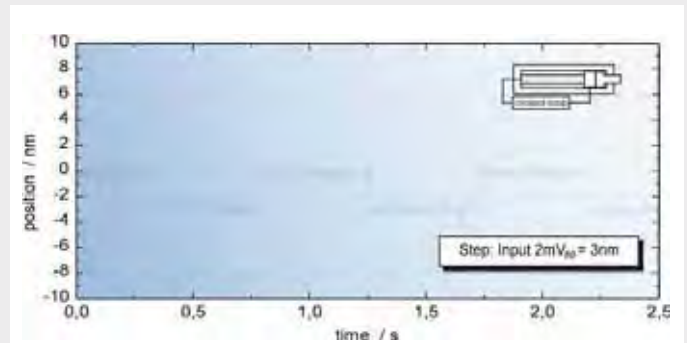


Abb. 30. Ansprechverhalten eines Piezotranslators (P-841.10 mit integrierten DMS-Positionssensoren, 15 µm Hub) bei Rechteckansteuerung mit 3 nm Amplitude (Steuerelektronik: E-501, E-503.00, E-509.S1; Servoeinstellung: 240 Hz Bandbreite, 2 ms Einschwingzeit). Man beachte das verzögerungs- und umkehrspielfreie Verhalten im Nanometerbereich

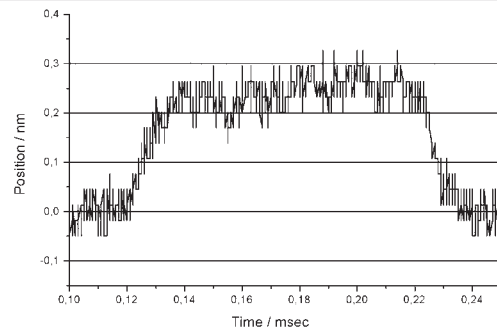


Abb. 31. Piezosysteme mit kapazitiven Sensoren ermöglichen extrem hohe Auflösungen, wie an Hand des obigen 250 Pikometer Schrittes eines S-303 Phasenschiebers gezeigt (Steuerung: E-509.C1A Servocontroller und E-503 Verstärker). Die Messung wurde mit einem hochempfindlichen externen kapazitiven Sensor mit einer Auflösungsgrenze von ±0,02 nm durchgeführt

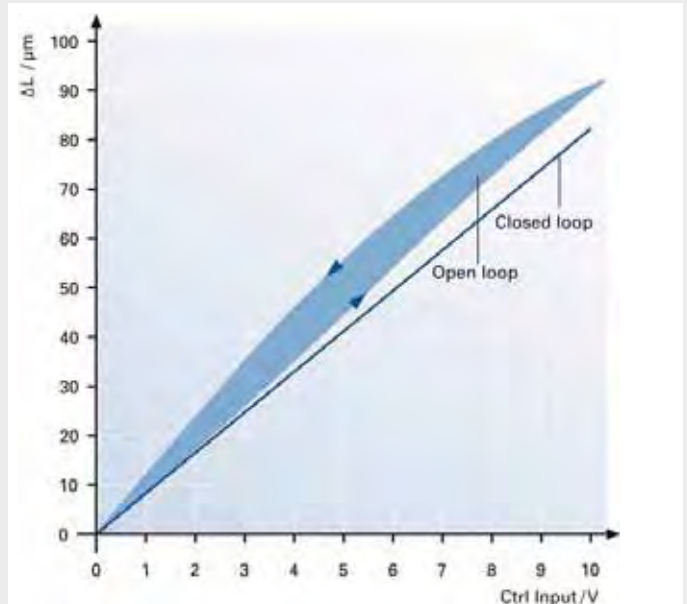


Abb. 32. Vergleich der Positioniergenauigkeit eines typischen Piezotranslators im offenen / geschlossenen Positionsregelkreis

Methoden zur Verbesserung der Dynamik und Linearität

Das dynamische Verhalten von Piezomechaniken hängt u. a. von der Resonanzfrequenz des Systems, dem Positionssensor und dem verwendeten Regler ab. Einfache Regler limitieren die geregelte Trackingbandbreite auf etwa 10% der Resonanzfrequenz. PI bietet verschiedene Controller an, die die dynamischen Eigenschaften von Piezomechanik-Systemen deutlich verbessern (s. Tabelle). Zwei der Verfahren werden im Folgenden beschrieben, weitere Informationen sind auf Anfrage verfügbar.

InputShaping® verhindert Resonanz-Überschwingen bei schnellen Bewegungen

InputShaping®, ein neues patentiertes Echtzeit-Feedforward-

verfahren, eliminiert Resonanzen auch außerhalb des Regelkreises und schaltet die übliche Einschwingphase praktisch aus. Das Verfahren erfordert das Ermitteln aller kritischen Resonanzfrequenzen im System. Besonders gut eignet sich zur Messung ein kontaktloses Laser Doppler Vibrometer, z. B. von Polytec. Die Werte – vor allen Dingen die Resonanzfrequenz der Probe auf dem Scantisch – werden dann in den InputShaping® Signalprozessor eingegeben. Dort sorgt eine komplexe Signalaufbereitung dafür, dass keine der unerwünschten Resonanzen im System und der Umgebung mehr angeregt wird. Da der Prozessor außerhalb des Regelkreises liegt, funktioniert

das Verfahren auch im ungeregelten Betrieb.

Das Resultat ist schnellstmögliches Erreichen der Sollposition innerhalb einer Periodendauer der niedrigsten Resonanzfrequenz im System. InputShaping® basiert auf Forschungsarbeiten am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und wird von Convolve, Inc. (www.Convolve.com) kommerziell vertrieben. Es ist als Option für verschiedene Piezocontroller von PI verfügbar.

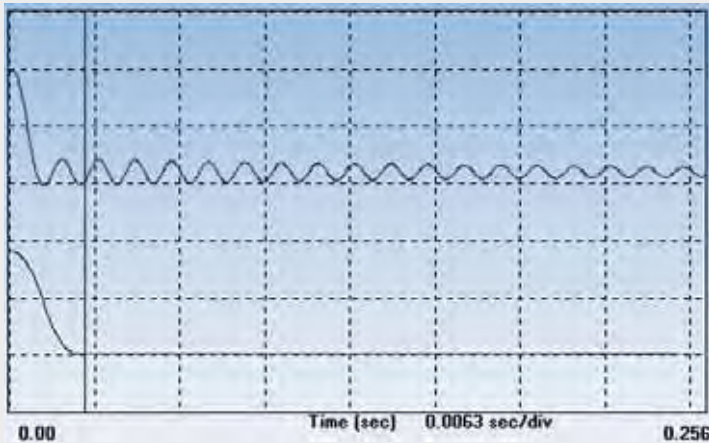


Abb. 33. InputShaping® eliminiert Resonanzen, die durch Reaktionskräfte (bei extrem schneller Auslenkung) in der vom Piezoaktor bewegten Komponente oder in benachbarten Komponenten auftreten können. Obere Kurve: Messung mit Polytec Laser-Vibrometer zeigt die Resonanzschwingung der schwach gedämpften „Last“ auf einem Piezoscantisch nach einem schnellen Schritt.

Untere Kurve: Gleicher Aufbau, gleicher Schritt, jedoch mit InputShaping®. Weil keine Schwingungen in der bewegten Komponente angeregt werden, wird die Endposition schon nach etwa einer Periode der Resonanzfrequenz erreicht

Methoden zur Verbesserung der Dynamik von Piezomechaniken

Methode	Ziel
Feedforward	Reduktion des Phasenwinkels zwischen Soll und Istwert (Trackingfehler)
Signal Preshaping (Software)	Anheben der Systembandbreite, Korrektur von Amplituden- u. Phasengang. Zwei Lernphasen benötigt; nur für periodische Signale.
Adaptives Preshaping (Hardware)	Anheben der Systembandbreite, Korrektur von Amplituden- u. Phasengang. Keine Lernphase, sondern Einschwingphase benötigt; nur für periodische Signale.
Linearisierung (analog, im Verstärker)	Kompensation der Piezohysterese
Linearisierung (digital, im DSP)	Kompensation von Hysterese und Kriechen
InputShaping®	Eliminierung selbsterregter Resonanzen innerhalb und außerhalb des Regelkreises. Reduktion der Einschwingzeit. Für geregelte und ungeregelte Systeme.
Dynamic Digital Linearization (DDL)	Anheben der Systembandbreite, Korrektur von Amplituden- u. Phasengang. Integriert im digitalen Piezocontroller. Keine externe Messtechnik benötigt; nur für periodische Signale.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Methoden zur Verbesserung der Dynamik und Linearität

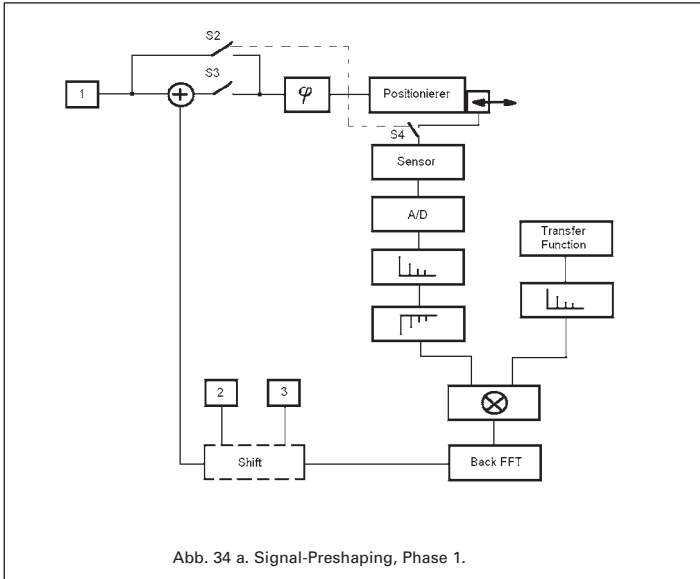


Abb. 34 a. Signal-Preshaping, Phase 1.

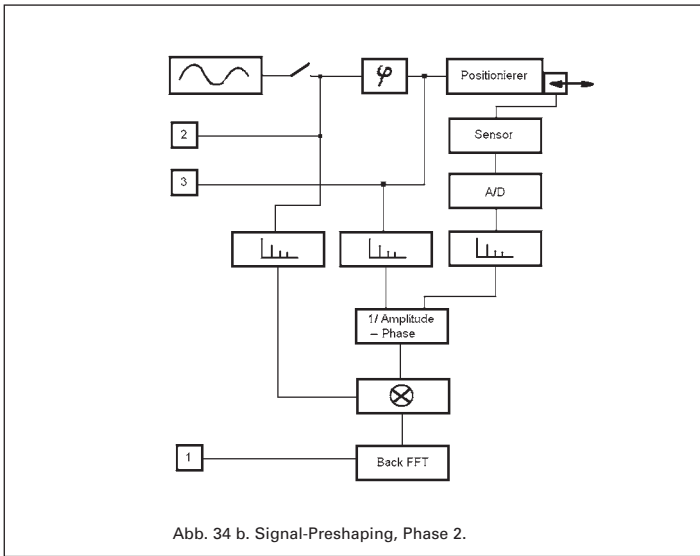


Abb. 34 b. Signal-Preshaping, Phase 2.

Signal-Preshaping / Dynamic Digital Linearization

Preshaping, ein patentiertes Verfahren, hilft bei Anwendungen mit periodischen Bewegungen, den Phasenfehler, Amplitudenabfall und die dynamische Hysterese im System stark zu reduzieren. Das Ergebnis ist eine deutlich erhöhte effektive Bandbreite besonders bei Trackinganwendungen wie z. B. dem Unrundbearbeiten von Präzisionsmechaniken oder Optiken. Preshaping ist ein Softwareverfahren zur Modifizierung der Sollwertdaten, die den Bewegungsablauf beschreiben. Es basiert auf einer analytischen Methode, die die komplexe Übertragungsfunktion des Systems ermittelt, dann transformiert und durch Feed-forward die Trackingfehler im System kompensiert.

Preshaping ist wesentlich effektiver als reine phasenkorrigierende Verfahren und kann die nutzbare Systembandbreite in Mehrfrequenzanwendungen um einige Größenordnungen verbessern.

In zwei Schritten werden per FFT (Fast Fourier Transformation) das Frequenzverhalten und die Oberwellen des Systems, die durch Nichtlinearität

des Piezoeffektes verursacht werden, ermittelt und damit die neuen Sollwerte für den Bewegungsablauf berechnet. Die neuen Sollwerte kompensieren die Nichtlinearitäten im System.

Bei einer Piezomechanik mit 400 Hz Resonanzfrequenz kann z. B. die Kommando-Übertragungsfunktion mit diesem Verfahren in Amplitude und Phase von 20 Hz auf 200 Hz erhöht werden ohne die Systemstabilität zu beeinflussen. Gleichzeitig wird der Trackingfehler um den Faktor 50 reduziert.

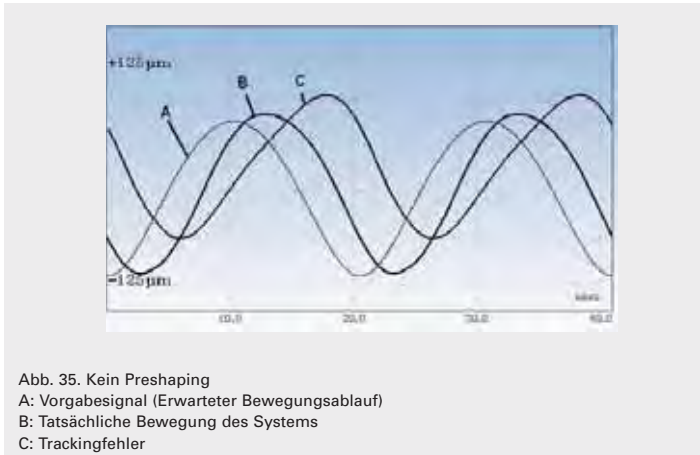


Abb. 35. Kein Preshaping
 A: Vorgabesignal (Erwarteter Bewegungsablauf)
 B: Tatsächliche Bewegung des Systems
 C: Trackingfehler

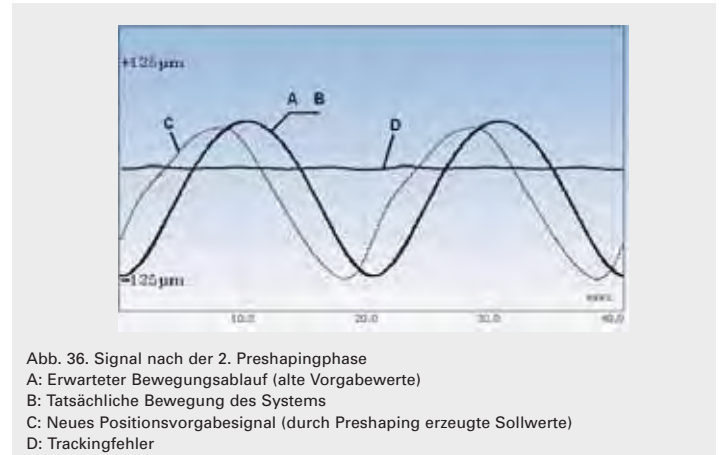


Abb. 36. Signal nach der 2. Preshapingphase
 A: Erwarteter Bewegungsablauf (alte Vorgabewerte)
 B: Tatsächliche Bewegung des Systems
 C: Neues Positionsvorgabesignal (durch Preshaping erzeugte Sollwerte)
 D: Trackingfehler

Dynamic Digital Linearization (DDL)

Dynamic Digital Linearization leistet ähnliches wie Pre-shaping, ist jedoch deutlich einfacher in der Anwendung. Darüber hinaus ermöglicht es die Optimierung von mehrachsigen Bewegungen, z.B. Ellipsen, Raster-scans etc. Das Verfahren benötigt keine externe Messtechnik und Signalverarbeitung, (vgl. S. 2-106). DDL wertet die Positionsinformation der in der Piezomechanik integrierten kapazitiven Sensoren aus (funktioniert nur mit Direktmetrologie) und errechnet daraus die optimierten neuen Sollwerte. Das Ergebnis ist ebenfalls eine Verbesserung der Linearität und Trackinggenauigkeit um bis zu 3 Größenordnungen.

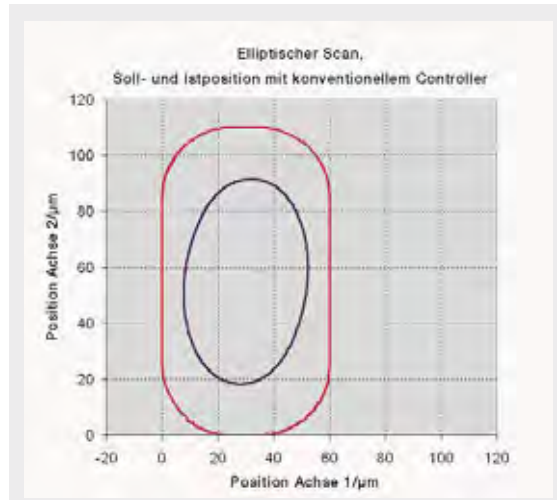


Abb. 37a. Elliptischer Scan (für Laser-Mikrobohranwendung) mit einem XY Piezoscantisch und konventionellem PID-Controller. Die äußere Kurve beschreibt die Sollposition, die innere zeigt die tatsächliche Bewegung des Tisches

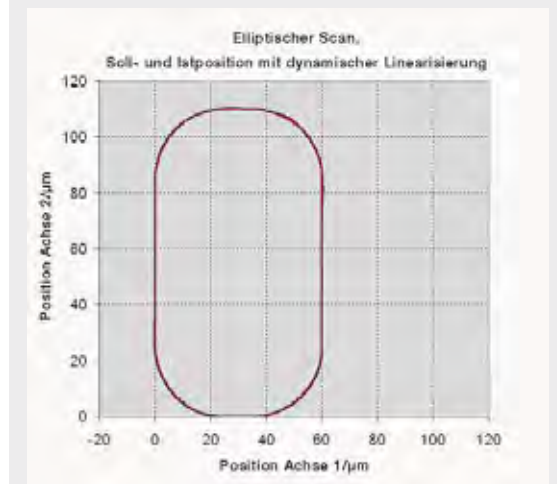


Abb. 37b. Gleicher Scan wie zuvor, jedoch mit DDL-Controller. Soll- und Istposition sind praktisch nicht zu unterscheiden. Der Trackingfehler ist auf wenige Nanometer reduziert

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Umgebungsbedingungen und -einflüsse

Temperatureffekte

Zwei Effekte müssen beachtet werden:

- Lineare thermische Ausdehnung
- Temperaturabhängigkeit des Piezoeffektes

Lineare thermische Ausdehnung

Die thermische Stabilität von Piezokeramik ist besser als die der meisten Metalle. Abb. 38a zeigt das Verhalten verschiedener PZT-Keramiktypen, die von PI eingesetzt werden. Die Kurven beschreiben jedoch nur die Keramiken. Piezoaktoren und Piezopositioniersysteme bestehen aus verschiedenen Materialien, und ihr Verhalten weicht deshalb im Einzelfall ab.

Temperaturabhängigkeit des Piezoeffektes

Piezoaktoren arbeiten in einem breiten Temperaturbereich. Der Piezoeffekt tritt auch bei Temperaturen bis nahe 0 Kelvin auf, die Größe ist jedoch temperaturabhängig.

Bei Flüssighelium-Temperaturen reduziert sich der Piezoeffekt auf ca. 10–20 % des Raumtemperaturwertes.

Piezokeramik muss polarisiert werden, bevor der Piezoeffekt auftritt. Eine polarisierte Keramik depolarisiert beim Überschreiten der zulässigen Betriebstemperatur, wobei der Grad der Depolarisation von der Curie-Temperatur des Materials abhängt. Von PI eingesetzte Hochvoltpiezokeramiken haben Curie-Temperaturen von bis zu 350 °C und können bei bis zu 150 °C betrieben werden. Monolithische Niedervoltkeramiken haben im allgemeinen Curie-Temperaturen von 150 °C und können bis 80 °C betrieben werden. Die neuen monolithischen PICMA® Kera-

miken ermöglichen durch die hohe Curie-Temperatur von 320 °C Arbeitstemperaturen von bis zu 150 °C.

Hinweis

Positionsgeregelte Piezomechaniken sind temperaturstabiler als unregulierte Systeme. Die höchste Genauigkeit wird erreicht, wenn Einsatztemperatur und Abgleichtemperatur identisch sind. Piezomechaniken von PI werden – wenn nicht anders spezifiziert – bei 22 °C abgeglichen.

Einsatz von Piezoaktoren bei hoher Luftfeuchtigkeit

Die Polymer-Isolationsmaterialien von Piezokeramiken sind empfindlicher gegenüber Feuchtigkeit. Wassermoleküle diffundieren durch alle Polymer-schichten und können zum Kurzschluss der Piezoschichten führen. Keramiken mit Polymerisolation werden deshalb nicht für den Einsatz in Umgebungen mit mehr als 60% Luftfeuchtigkeit empfohlen. Für solche Bedingungen bietet PI spezielle Keramiken oder luft- und wasserdicht verpackte

Systeme mit optionalem Sperrluft-Anschluss an.

Besonders empfehlenswert sind PICMA® Aktoren (s. Abb. 39a), die ohne Polymerum-mantelung auskommen und durch ihre vollkeramische Iso-lation unempfindlicher gegen das Eindiffundieren von Was-sermolekülen sind (Abb. 39c).

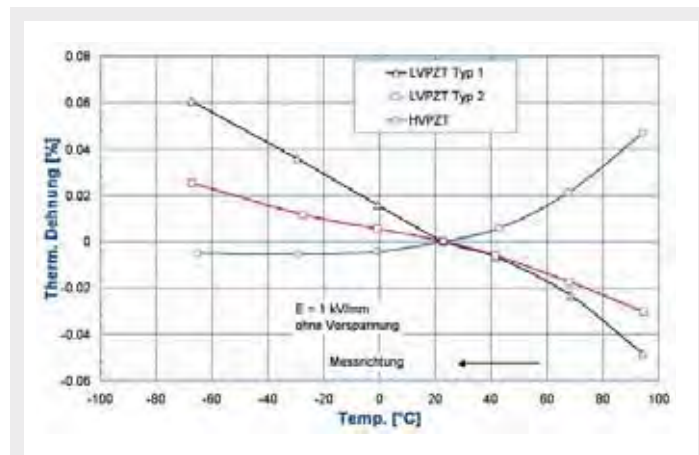


Abb. 38a. Lineare thermische Ausdehnung verschiedener PZT-Keramiken

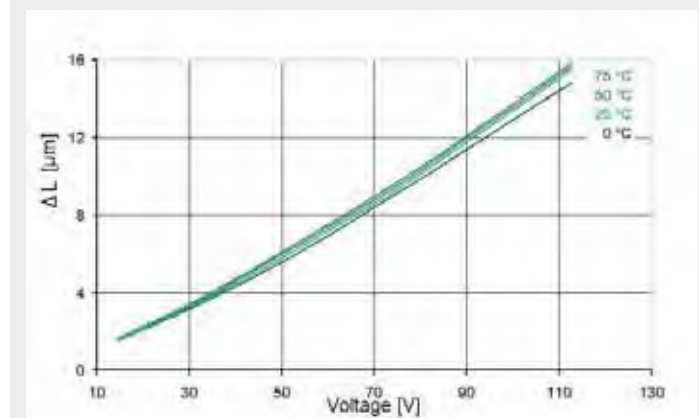


Abb. 38b. Die Auslenkung von PICMA® Piezokeramiken zeigt eine geringe Temperaturabhängigkeit. Dadurch und wegen der geringen Wärmeerzeugung eignen sie sich ideal für dynamische Anwendungen

Einsatz von Piezoaktoren in Edelgasen

Beim Einsatz von Piezoaktoren in Edelgasen wie z.B. Helium werden ebenfalls die keramisch isolierten PICMA® Keramiken empfohlen. Bei Hochvoltpiezoaktoren sollte zur Reduktion des Überschlagrisikos die Betriebsspannung herabgesetzt werden. In diesem Falle empfiehlt sich der semibipolare Betrieb, weil die mittlere Betriebsspannung dann sehr niedrig ist.

Einsatz von Piezoaktoren im Vakuum

Alle PI-Piezoaktoren können bei Drücken unter 0,1 hPa (~0,1 Torr) betrieben werden. Wenn Piezoaktoren im Vakuum eingesetzt werden, müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden:

I. Dielektrische Stabilität

II. Ausgasen

I. Die Durchschlagsfestigkeit eines Gases ist vom Druck abhängig. Luft hat sehr gute Isolationswerte bei atmosphärischem Druck und unter 0,1 hPa (~0,1 Torr). Im Bereich von 100 bis 0,1 hPa (~100 bis 0,1 Torr) verschlechtern sich die

Isolationseigenschaften jedoch deutlich. Piezoaktoren sollten deshalb nicht oder nur bei stark reduzierten Feldstärken in diesem Bereich betrieben werden, um Durchschläge zu vermeiden. HVPZT sind hierfür nicht empfehlenswert.

II. Das Ausgasverhalten hängt u. a. von der Bauform und Konstruktion ab. UHV-Optionen mit minimalen Ausgasraten werden für verschiedene LV-PZT- und HVPZT-Aktoren angeboten. Am besten geeignet sind PICMA® Keramiken (s. Abb. 39a), weil sie keine Polymerisolation haben und bis zu 150 °C ausgeheizt werden können (s. a. „Optionen und Zubehör“ im Kapitel „Piezoaktoren / Piezokomponenten“, S. 1-102 ff). Bei UHV-kompatiblen Piezo-Nanopositioniertischen werden alle verwendeten Materialien, inklusive Verkabelung und Stecker, auf minimale Ausgasraten optimiert (s. Abb. 39b). Die Materialliste ist auf Anfrage erhältlich.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

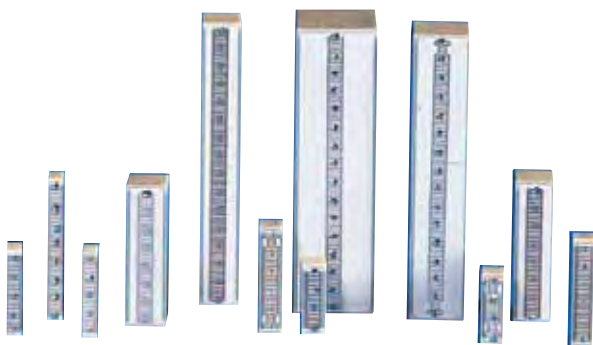


Abb. 39a. PICMA® Piezoaktoren sind keramisch isoliert und kommen ohne Polymerummantelung aus. Das Ergebnis: Keine messbare Ausgasrate, Unempfindlichkeit gegen Luftfeuchtigkeit und breiter Temperaturbereich

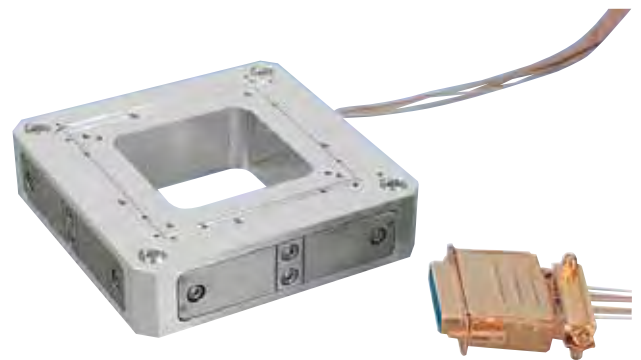


Abb. 39b. P-733.UUD UHV-kompatibler XY-Piezotisch für Scanningmikroskopie-Anwendungen. Hier kommen ebenfalls PICMA® Piezokeramiken zum Einsatz. Alle verwendeten Materialien sind auf minimales Ausgasen optimiert. Die Materialliste ist auf Anfrage erhältlich

Umgebungsbedingungen und -einflüsse

Lebensdauer von Piezoaktoren

Die Lebensdauer eines Piezoaktors wird nicht durch Abnutzung begrenzt. Tests haben gezeigt, dass PI-Piezoaktoren unter angemessenen Umgebungsbedingungen auch nach mehreren Milliarden Zyklen keinen messbaren Verschleiß aufweisen (s. S. 1-65, S. 2-12 ff).

Wie bei Kondensatoren hat jedoch die Feldstärke, bei der die Piezokeramik betrieben wird, einen Einfluss auf die Lebensdauer. Die durchschnittliche Feldstärke sollte so niedrig wie möglich gehalten werden. Die meisten Piezoaktoren und -Elektroniken von PI sind deshalb für den semibipolaren Betrieb ausgelegt.

Es gibt keine allgemeine Formel, mit der sich die Lebensdauer eines Piezoaktors berechnen lässt, weil zu viele Parameter wie z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Spannung, Beschleunigung, Druck- und Zugbelastung, Vorspannung, Arbeitsfrequenz, Isolationsmaterialien usw. einen nichtlinearen Einfluss darauf haben. PI-Piezomechaniken sind nicht nur auf maximale Auslenkung optimiert, sondern vor allen Dingen auf maximale Lebensdauer unter praktischen Einsatzbedingungen.

Die empfohlenen Betriebsspannungsbereiche in den technischen Daten des Kataloges basieren auf jahrzehntelanger Erfahrung mit Piezoanwendungen in der Industrie. Mit höheren Spannungen lassen sich größere Auslenkungen nur auf Kosten der Zuverlässigkeit erzielen.

Beispiel:

Ein P-842.60 LVPZT-Translator (s. S. 1-76), Kapitel „Piezoaktoren / Piezokomponenten“) soll ein Ventil mit einem Hub von 100 µm betätigen. Das Ventil

soll für 70% der Zeit offen (AUF) und für die restlichen 30% geschlossen (ZU) sein.

Optimale Lösung: Durch eine geeignete Konstruktion sollte die AUF-Stellung bei einer möglichst niedrigen Betriebsspannung erreicht werden. Der P-842.60 benötigt einen Spannungshub von ungefähr 110 Volt (nominale Auslenkung bei 0 bis 100 V: 90 µm), um eine Auslenkung von 100 µm zu erreichen.

Da der Betrieb bei -20 V möglich ist, sollte die AUF-Stellung bei diesem Wert erreicht werden und die ZU-Stellung dann bei etwa 90 V. Wenn das Ventil nicht in Betrieb ist, empfiehlt es sich, die Spannung abzuschalten.

Die Statistik zeigt, dass die meisten Defekte an Piezoaktoren durch mechanische Überlastung ausgelöst werden. Hier sind besonders Schockbelastungen, Zug- und Scherkräfte sowie Drehmomente zu erwähnen, die von der Keramik ferngehalten werden müssen.

PI bietet dazu eine Vielzahl vorgespannter Aktoren, Kugelpföpfe, flexible Kopfstücke und Sonderausführungen an.

Eine andere häufige Fehlerursache ist das Eindringen von Feuchtigkeit oder leitenden Materialien wie z. B. Metallstaub, was die Isolation der Piezokeramik schwächt und irreparable Durchschläge verursacht. Für Anwendungen unter solchen Bedingungen sind besonders die keramisch isolierten PICMA® Aktoren geeignet. PI bietet außerdem hermetisch gekapselte Aktoren und Systeme an.

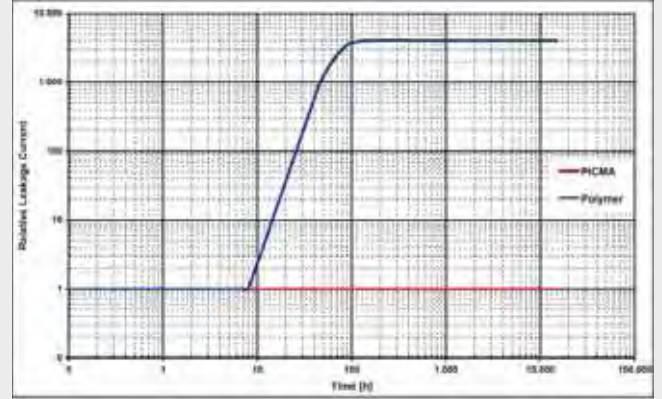


Abb. 39c. PICMA® Piezoaktoren (untere Kurve) im Vergleich mit konventionellen Multilayer-Piezoaktoren (Polymerisolation). PICMA® Aktoren reagieren nicht auf die hohe Luftfeuchtigkeit im Test. Bei konventionellen Aktoren steigt der Leckstrom schon nach wenigen Stunden an, ein Hinweis auf eine Reduktion der Isolationsstärke und der zu erwartenden Lebensdauer. Testbedingungen: U = 100 VDC, T = 25 °C, RH = 70 %

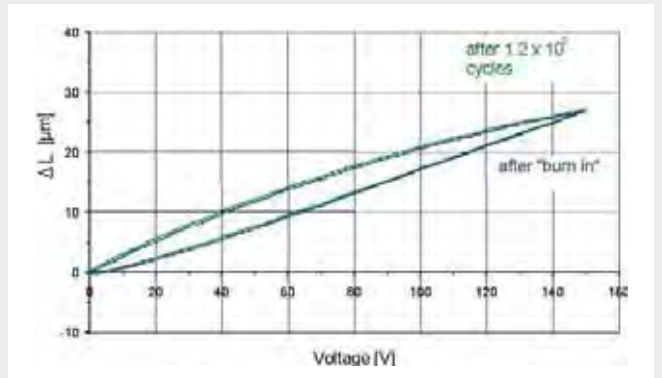


Abb. 39d. Dynamischer Auslenkungstest von P-885.50 PICMA® Piezoaktoren bei 116 Hz und 15 MPa Vorspannung. Nach 1,2 Milliarden Zyklen sind keine Verschleißerscheinungen zu erkennen

Bauformen piezomechanischer Antriebe / Positioniersysteme

Stapeltranslatoren (Linearaktoren)

Der aktive Teil des Piezoaktors besteht aus einem Stapel von Keramikscheiben, die durch dünne Metallelektroden getrennt sind. Die maximale Betriebsspannung ist proportional zur Dicke der Scheiben. Die meisten Hochvoltaktoren sind aus Keramikscheiben von 0,4 bis 1 mm Dicke aufgebaut. Bei Vielschichtaktoren werden die Keramiklagen und Elektroden zu einem Monolithen zusammengesintert (Cofired Design) und haben Dicken zwischen 25 und 100 μm .

Stapeltranslatoren können hohe Druckkräfte aufnehmen und bieten die höchste Steifigkeit aller Piezobauformen. Standardelemente mit bis zu 100 kN Druckbelastbarkeit sind verfügbar, und vorgespannte Aktoren können auch im Zugbetrieb arbeiten. Weitere Informationen zur Belastbarkeit s. a. S. 2-189: „Maximal zulässige Kräfte (Druckbelastbarkeit, Zugbelastbarkeit)“.

Die Auslenkung eines Piezostapeltranslators kann durch die folgende Gleichung abgeschätzt werden:

(Gleichung 24)

$$\Delta L \approx d_{33} \cdot n \cdot U$$

mit:

$$\Delta L = \text{Auslenkung [m]}$$

$$d_{33} = \text{Piezomodul (Feld und Auslenkung in Polarisationsrichtung) [m/V]}$$

$$n = \text{Anzahl der Keramiklagen}$$

$$U = \text{Betriebsspannung [V]}$$

Beispiel:

P-845, S. 1-76 (Kapitel „Piezoaktoren / Piezokomponenten“)

Streifenaktoren (Kontraktoren)

Der aktive Teil von Piezokontraktoren (Streifenaktoren) besteht aus dünnen laminierten Keramikstreifen. Bei diesen Aktoren wird die Auslenkung orthogonal zur Richtung der Polarisation und des elektrischen Feldes ausgenutzt. Die Streifen ziehen sich bei Erhöhung der Spannung zusammen. Der Piezomodul d_{31} (negativ!) beschreibt die relative Längenänderung. Er ist nur etwa halb so groß wie d_{33} .

Der maximale Stellweg hängt von der Länge der Streifen ab, während die Anzahl der parallelen Streifen die Steifigkeit und Krafterzeugung bestimmt.

Die Auslenkung eines Piezokontraktors kann durch die folgende Gleichung abgeschätzt werden:

(Gleichung 25)

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

mit:

$$\Delta L = \text{Auslenkung [m]}$$

$$d_{31} = \text{Piezomodul (Auslenkung orthogonal zur Polarisationsrichtung) [m/V]}$$

$$L = \text{Länge der Piezokeramik in Feldrichtung [m]}$$

$$U = \text{Betriebsspannung [V]}$$

$$d = \text{Dicke einer Keramiklage [m]}$$

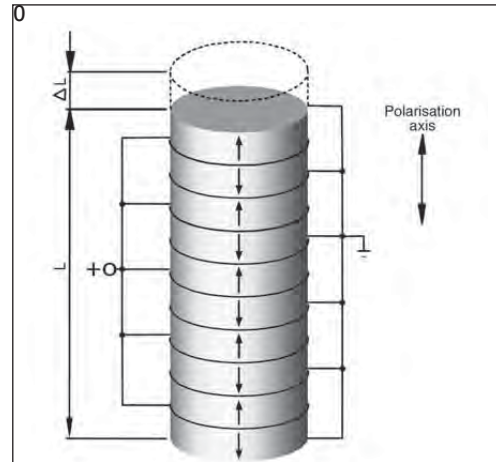


Abb. 40. Elektrische Verschaltung eines Stapeltranslators

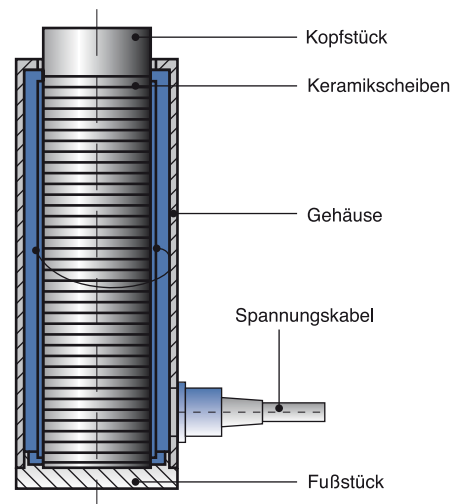


Abb. 41. Mechanischer Aufbau eines Stapeltranslators

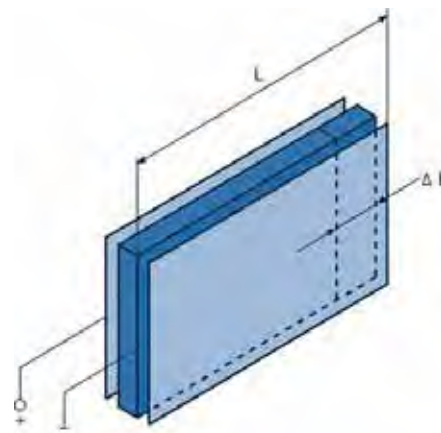


Abb. 42. Aufbau eines Streifenaktors (Kontraktor)

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostechnik

Index

Bauformen piezomechanischer Antriebe / Positioniersysteme

Rohraktoren (Tuben)

Monolithische Keramikrohre sind eine weitere Ausführung piezoelektrischer Aktoren. Die Rohre sind innen und außen mit Elektroden beschichtet und kontrahieren axial und radial, wenn eine elektrische Spannung zwischen die Innen- und Außenelektrode angelegt wird. Die axiale Kontraktion kann mit den folgenden Gleichungen abgeschätzt werden:

(Gleichung 26 a)

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

mit:

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

L = Länge des Piezotubus [m]

U = Betriebsspannung [V]

d = Wanddicke [m]

Bei der radialen Kontraktion überlagern sich der Effekt der tangentialen Kontraktion und die Zunahme der Wanddicke

(Gleichung 26 b)

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

r = Radius des Tubus

(Gleichung 26 c)

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

mit:

Δd = Änderung der Wanddicke [m]

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

U = Betriebsspannung [V]

Sind die Außenelektroden eines Piezorohrs in vier 90° Segmente geteilt, führt die differenzielle Ansteuerung $\pm U$ gegenüberliegender Elektroden zur Verbiegung des Rohrs. Solche Rohre werden als XY-Scanner in Scanning-Probe-Mikroskopen wie z.B. Rasterkraft- oder Tunnelmikroskopen eingesetzt.

Der Scanbereich eines Scannerrohrs lässt sich wie folgt abschätzen:

(Gleichung 27)

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

mit:

Δx = Scanbereich in X und Y (bei symmetrischen Elektroden) [m]

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

U = differenzielle Betriebsspannung [V]

L = Länge [m]

ID = Innendurchmesser [m]

d = Wanddicke [m]

Piezorohre können keine großen Kräfte erzeugen oder aufnehmen. Anwendungsbeispiele: Mikrodosierung, Nanoliterpumpen, Scanning-Mikroskopie, Tintenstrahldrucker.

Beispiele:

PT120, PT130, PT140 (S. 1-100).

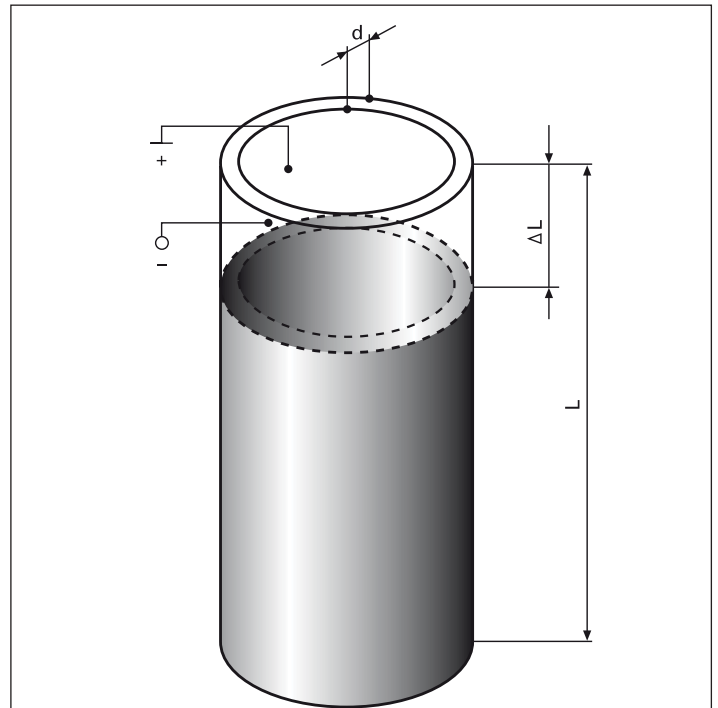


Abb. 43. Prinzip eines Piezorohrs

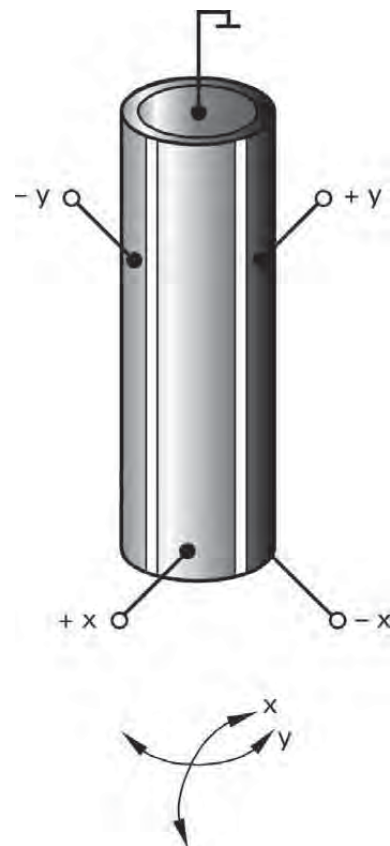


Abb. 44. Prinzip eines Piezoscannerrohrs

Biegeaktoren (Bimorph- und Multimorphaktoren)

Einfache Piezobiegeelemente (Bimorphaktoren) bestehen z.B. aus einem passiven Metallsubstrat, auf das ein aktiver Piezokeramikstreifen aufgeklebt ist (s. Abb. 45 a). Sie arbeiten vergleichbar mit Bimetallstreifen-Thermostaten, die jedoch auf Temperaturänderungen reagieren. Wenn die elektrische Spannung an der Keramik sich ändert, kommt es zur Kontraktion oder Expansion. Da das Metallsubstrat sich nicht dehnt, ergibt sich eine Verbiegung proportional zur Steuerspannung. Das Bimorphprinzip bewirkt die Wegübersetzung des Piezoeffektes, wodurch sich Auslenkungen von bis zu einigen Millimetern bei minimalen Baugrößen erreichen lassen. Neben der Streifenbauform gibt es auch Scheibenbauformen (Disk-Translatoren), bei denen sich das Zentrum wölbt.

Anstelle einer Keramik / Metall-Kombination sind auch Keramik / Keramik-Kombinationen möglich, wobei die einzelnen Piezokeramiklagen gegensätzlich betrieben werden (Kontraktion / Ausdehnung).

Zwei Grundtypen sind hier verfügbar: Der Seriellbimorph (Zweielektroden-Bauform) und der Parallelbimorph (Dreielektroden-Bauform) wie in Abb. 45 b gezeigt. Beim seriellen Typ wird eine der zwei Keramikschichten immer gegen die Polarisationsrichtung betrieben. Die maximale Feldstärke muss auf wenige 100 V/mm begrenzt werden, um Depolarisationseffekte zu verhindern. Seriellbimorphelemente werden häufig als Kraft- und Beschleunigungssensoren eingesetzt.

Neben den Zweiplattentbiegern gibt es auch monolithische Multilayerbieger. Ähnlich den monolithischen Stapelaktoren arbeiten sie mit wesentlich niedrigeren Betriebsspannungen (60 bis 100 V).

Biegeaktoren bieten große Stellwege auf kleinstem Raum aber relativ geringe Steifigkeiten, Kräfte und Resonanzfrequenzen.

Beispiele:

PL122 Multilayer-Bieger (s. S. 1-94).

Scheraktoren

Scheraktoren erreichen große Kräfte und große Auslenkungen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit des bipolaren Betriebes, bei dem die mittlere Position völlig spannungsfrei eingehalten wird. Der Schermodus unterscheidet sich von anderen Moden, weil das elektrische Feld orthogonal zur Polarisationsrichtung angelegt wird (s. Abb. 46). Der entsprechende Piezomodul d_{15} erreicht Großsignalwerte von 1100 pm/V und ermöglicht damit etwa die zweifache Auslenkung von Linearaktoren vergleichbarer Größe, die auf dem d_{33} Modus basieren.

Scheraktoren eignen sich z.B. als Antriebselemente für Piezolinearmotoren und sind sowohl als einachsige Aktoren als auch als XY-Positionierelemente verfügbar.

Beispiele:

P-363 (S. 2-66)
N-214 NEXLINE® PiezoWalk® Antrieb (s. S. 1-10)

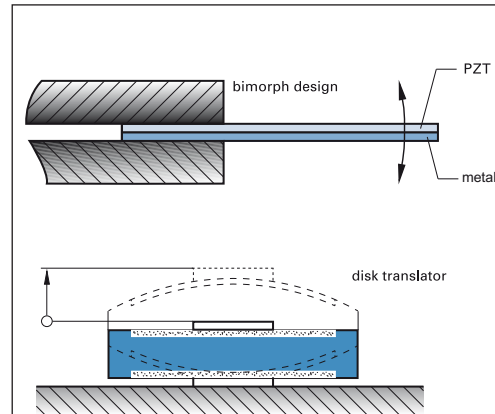


Abb. 45 a. Bimorphbauform (Bieger- und Disktranslator)

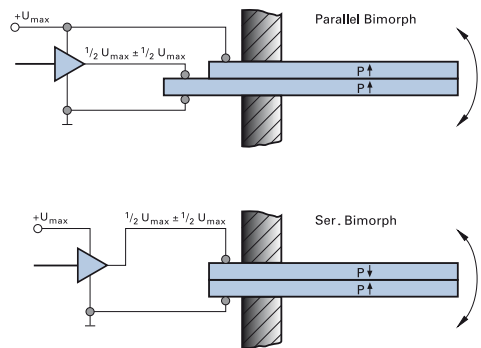


Abb. 45 b. Biegeraktoren: Seriellbimorph und Parallelbimorph

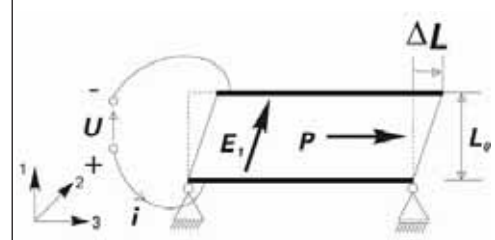


Abb. 46. Materialdeformation in einem Scheraktor

Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Bauformen piezomechanischer Antriebe / Positioniersysteme

Piezomechaniken mit integrierter Hebelübersetzung

Die Auslenkung von Piezoaktoren und -positioniersystemen lässt sich durch die Integration von Hebelmechanismen vervielfachen. Das Hebel- und Führungssystem muss extrem steif, reibungs- und spielfrei sein, um hohe Dynamik und Auflösungen im Sub-Nanometerbereich erzielen zu können. Kugel- oder Rollenlager scheiden deshalb aus. Ideal geeignet sind Festkörpergelenke (Flexures). In Verbindung mit Flexures lassen sich Mehrachsen-Positioniersysteme mit extrem guter Geradführung aufbauen (s. S. 2-211).

Die Festkörpergelenke in Piezo-Nanopositioniersystemen von PI werden durch FEM-Computersimulationen auf bestmögliche Führungsgenauigkeit optimiert (s. Abb. 48 und Abb. 49).

Die Vergrößerung des Stellweges per Wegübersetzung hat verschiedene Vorteile, aber auch Nachteile gegenüber Direktantrieben:

Vorteile:

- Größerer Stellweg
- Geringere Baugröße
- Reduzierte Kapazität (= reduzierter Strombedarf)

Nachteile:

- Reduzierte Steifigkeit
- Reduzierte Resonanzfrequenz

Die Eigenschaften eines idealen Hebels mit der Übersetzung r werden durch folgende Gleichungen beschrieben:

$$k_{\text{sys}} = \frac{k_0}{r^2}$$

$$\Delta L_{\text{sys}} = \Delta L_0 \cdot r$$

$$f_{\text{res-sys}} = \frac{f_{\text{res-0}}}{r}$$

mit:

r = Hebelübersetzungsverhältnis

ΔL_0 = Stellweg des Primärantriebs [m]

ΔL_{sys} = Stellweg des hebelübersetzten Systems [m]

k_{sys} = Steifigkeit des hebelübersetzten Systems [N/m]

k_0 = Steifigkeit des Primärantriebs (Piezoaktor und Ankopplung) [N/m]

$f_{\text{res-sys}}$ = Resonanzfrequenz des übersetzten Systems [Hz]

$f_{\text{res-0}}$ = Resonanzfrequenz des Primärantriebs (Piezoaktor und Ankopplung) [Hz]

Hinweis:

Die obigen Gleichungen setzen eine ideale, masselose Hebelkonstruktion mit unendlicher Steifigkeit und eine unendlich steife Ankopplung des Primärantriebes (Piezoaktor) an den Hebel voraus. In der Praxis erfordert die Konstruktion von

hebelübersetzten Piezosystemen eine große Erfahrung im Bereich der Mikromechanik und Nanostelltechnik. Es muss ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Masse, Steifigkeit und Herstellkosten gefunden werden, bei gleichzeitiger Reibungs- und Spielfreiheit.

Die Ankopplung des Piezoaktors an den Hebel ist entscheidend. Einerseits muss sie sehr steif in Druckrichtung sein, andererseits aber weich in allen anderen Freiheitsgraden, um zerstörende Kräfte von der Keramik fernzuhalten. Liegt z. B. die Steifigkeit der beiden Ankoppelpunkte in der gleichen Größenordnung der Piezokeramik, geht die Systemsteifigkeit auf 1/3 zurück. Die Steifigkeit der Piezokeramik ist deshalb in vielen piezogetriebenen Mechaniken nicht der begrenzende Faktor der Systemsteifigkeit.

Piezomechaniken von PI sind durch 30-jährige Erfahrung mit Mikromechanik, Nanostelltechnik und Flexures in den oben genannten Punkten optimiert.

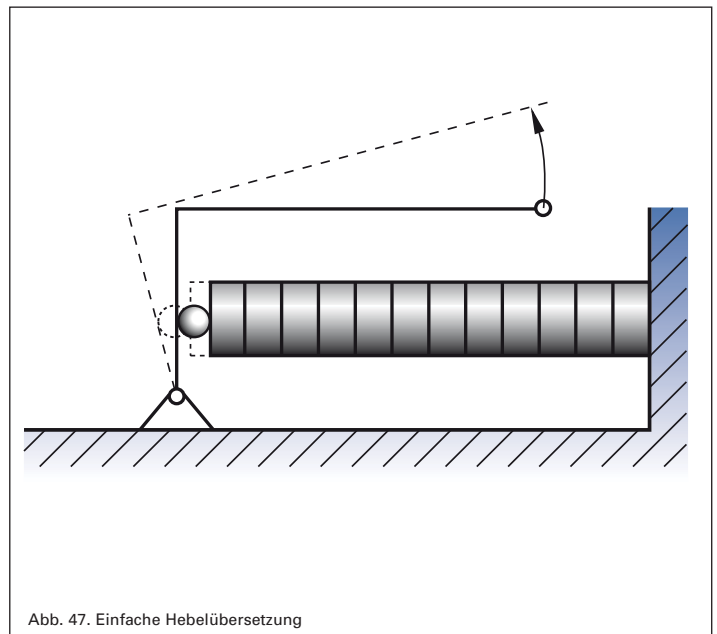


Abb. 47. Einfache Hebelübersetzung

Piezostellische mit Festkörpergelenken (Flexures)

Für Nanopositionier- und Scansysteme, bei denen ein- oder mehrachsige Bewegungen mit extrem hoher Bahntreue (Abweichungen von wenigen nm oder μrad) gefordert werden, bieten Flexureführungen die ideale Lösung.

Ein Flexure ist ein haft- und gleitreibungsfreies Element, das auf der elastischen Deformation (Biegung) eines Festkörpers (z. B. Stahl) basiert und völlig ohne rollende oder gleitende Teile auskommt. Weitere Vorteile sind hohe Steifigkeit, Belastbarkeit und Verschleißfreiheit. Flexures sind außerdem unempfindlich gegenüber Schockbelastungen und Vibrationen. Sie sind wartungsfrei, können aus nichtmagnetischen Materialien gefertigt werden und benötigen weder Schmiermittel noch andere Betriebsstoffe; deshalb arbeiten sie – im Gegensatz zu den ebenfalls reibungsfreien Luftlagern – auch problemlos im Vakuum.

Sehr gute Führungsergebnisse lassen sich mit Parallelogramm-Flexures erzielen. Je nach Aufwand und Fertigungsgenauigkeit ermöglichen sie Führungsgenauigkeiten im Nanometerbereich oder darunter. Bei einfachen Parallelogrammführungen bedingt die Drehbewegung des Parallelogramms einen geringen Höhenversatz, der in der Praxis bei ca. 0,1% der Stellbewegung liegt (s. Abb. 48). Der Höhenschlag kann mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

(Gleichung 28)

$$\Delta H \approx \left(\pm \frac{\Delta L}{2} \right)^2 \frac{1}{2H}$$

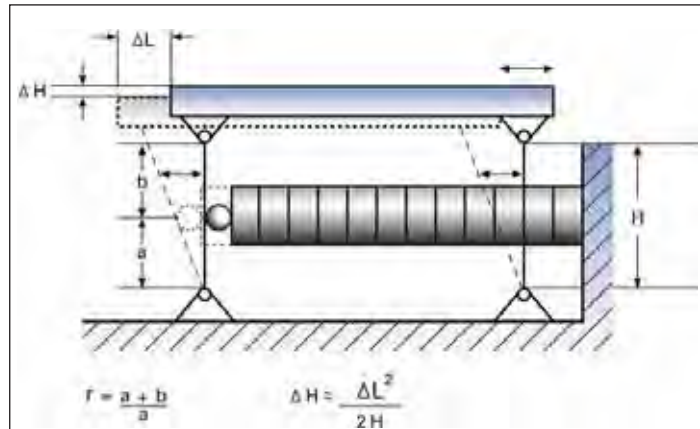


Abb. 48. Einfaches Parallelogramm-Führungssystem mit Hebelübersetzung. Das Übersetzungsverhältnis r ergibt sich aus $(a+b)/a$

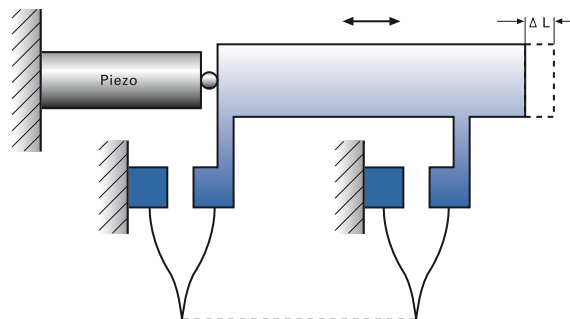


Abb. 49. Multilink-Flexureführungssystem mit Parallel-Versatzunterdrückung

mit:

$$\Delta H = \text{Höhenschlag [m]}$$

$$\Delta L = \text{Stellweg [m]}$$

$$H = \text{Länge der Flexures [m]}$$

Für Nanopositionier-Anwendungen, bei denen selbst dieser geringe Fehler unzulässig ist, hat PI Höhen- und Querversatz kompensierende Multilink-Flexureführungen entwickelt. Diese Führungssysteme, die in den meisten Nanopositioniersystemen von PI eingesetzt werden, ermöglichen eine Ablaufebenheit und Geradheit im Nanometer- bzw. Mikroradianbereich (s. Abb. 49).

Hinweis

Piezo-Nanopositioniersysteme mit Flexureführungen sind Stellelementen mit konventionellen Führungssystemen (Kugellagern, Kreuzrollenlagern etc.) in Auflösung, Präzision und Führungsgenauigkeit bei weitem überlegen. Diese Mechaniken können auf Grund der prinzipbedingten Reibung nur Wiederholbarkeiten im Bereich von 0,5 bis 0,1 μm erreichen. Piezo-Nanopositioniersysteme sind in Auflösung und Wiederholbarkeit um mehrere Größenordnungen besser.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Parallelkinematik und Seriellkinematik

Positionsmessung mit Direktmetrologie und indirekter Metrologie

Berührungslose Sensoren werden eingesetzt um die höchstmögliche Positioniergenauigkeit im geschlossenen Regelkreis zu erzielen. Die besten Eigenschaften haben hier kapazitive Zweiplattensensoren, die koaxial zur gemessenen Achse, direkt den bewegten Teil des Stelltisches messen (Direktmetrologie). Auflösungen und Reproduzierbarkeiten von besser als 0,1 Nanometer sind mit diesen Sensoren möglich. Indirektmetrologiesysteme, die statt der Position der Stellplattform die Dehnung des Antriebssystems messen, kommen für die höchste Genauigkeitsklasse nicht zum Einsatz.



Abb. 50a. Prinzipdarstellung eines gestapelten XY-Piezostellisches (Seriellkinematik). Nachteile gegenüber Parallelkinematiken sind: Höheres Massenträgheitsmoment, höherer Schwerpunkt, bewegte Kabel (können Reibung und Hysterese verursachen). Integrierte Parallelmetrologie und automatische Führungsfehlerkompensation (Active Trajectory Control) sind nicht möglich

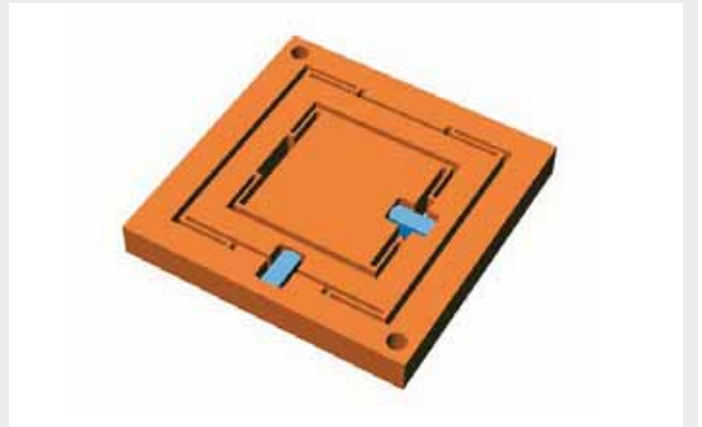


Abb. 50b. Prinzipdarstellung eines geschachtelten XY-Piezostisches (Seriellkinematik). Niedrigerer Schwerpunkt und verbesserte dynamische Performance im Vergleich zum gestapelten System, aber ungleiches dynamisches Verhalten von X und Y und ansonsten gleiche Nachteile wie bei gestapelten Systemen

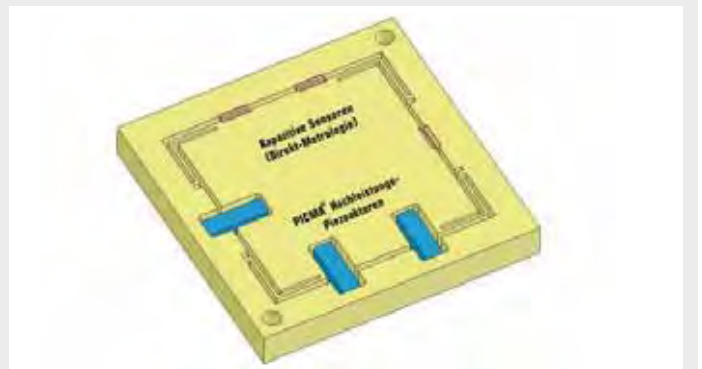


Abb. 50c. Prinzipdarstellung eines monolithischen X, Y, θ Z Parallelkinematik-Piezostisches. Alle Aktoren wirken unmittelbar auf die zentrale Plattform. Integrierte Parallelmetrologie kann alle kontrollierten Freiheitsgrade gemeinsam überwachen. Die Position der zentralen, bewegten Plattform wird mit kontaktlosen kapazitiven Sensoren (nicht gezeigt) direkt gemessen, wodurch jede Abweichung von der vorgegebenen Bahn in Echtzeit erfasst und ausgeglichen werden kann. Dieses „Active Trajectory Control“ genannte Verfahren ist mit Seriellkinematik nicht möglich

Parallel- und Seriellkinematiken

Für die Konstruktion von Mehrachsen-Positioniersystemen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Serielle Kinematik und parallele Kinematik. Serielle Kinematiken sind einfacher im Aufbau und können mit weniger komplexen Controllern betrieben werden. Sie haben jedoch eine Reihe von Nachteilen gegenüber den leistungsfähigeren und eleganteren Parallelkinematik-Systemen. In einem Seriellkinematik-Mehrachsensystem ist jeder Aktor genau einem Bewegungsfreiheitsgrad zugeordnet. Werden Positionssensoren integriert, sind diese ebenfalls jeweils einem Antrieb zugeordnet und messen nur die Bewegung in dem Freiheitsgrad der entsprechenden Stellachse. Alle unerwünschten Bewegungen (Führungsfehler) in den anderen fünf Freiheitsgraden können nicht erkannt und ausgeregelt werden, weshalb es zur Akkumulation von Führungsfehlern kommt.

In einem Parallelkinematik-Mehrachsensystem wirken alle Aktoren unmittelbar auf die zentrale bewegte Plattform.

Nur dadurch lassen sich gleiche Resonanzfrequenzen und identisches dynamisches Verhalten für die X- und Y-Achse erzielen. Parallelkinematik ermöglicht außerdem die einfache Integration von Parallelmetrologie. Parallelmetrologie kann alle geregelten Freiheitsgrade gleichzeitig überwachen und dadurch Führungsfehler in Echtzeit kompensieren (Active Trajectory Control). Die Vorteile sind deutlich bessere Bahn-treue, Wiederholbarkeit und Ablaufebenheit, wie in Abb. 51 gezeigt.

Beispiele:

P-561, P-734, (S. 2-64, S. 2-72) im Kapitel „Piezo Systeme / Schnelle Scantische“.

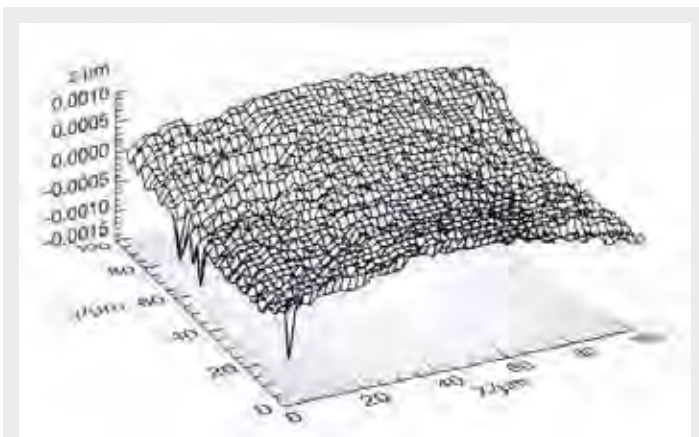


Abb. 51. Ablaufebenheit eines 6-Achsen-Nanopositioniersystems mit aktiver Führung über einen Scanbereich von 100 x 100 µm. Der bewegte Teil des in Parallelkinematik aufgebauten Positioniersystems ist mit einem ultrapräzisen kapazitiven Messsystem für alle sechs Freiheitsgrade (Parallelmetrologie) ausgerüstet. Es misst kontinuierlich die Istposition aller sechs Koordinaten gegenüber dem feststehenden, äußeren Referenzsystem.

Ein digitaler Controller vergleicht die Istpositionen mit den vorliegenden Sollwerten für jede Koordinate. Neben der Positionsregelung der eigentlichen Scanachsen X und Y sorgt der Controller auch dafür, dass Fehler, die in den anderen 4 Freiheitsgraden auftreten, durch Ansteuerung der entsprechenden Piezoaktoren in Echtzeit ausgeregelt werden

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

PMN im Vergleich mit PZT

Elektrostriktive Aktoren (PMN)

Elektrostriktive Aktoren basieren auf einem ähnlichen Prinzip wie Piezoaktoren (PZTs). Der elektrostriktive Effekt kann in allen dielektrischen Materialien, selbst in Flüssigkeiten, beobachtet werden.

Elektrostriktive Aktoren werden aus unpolarisiertem Blei-Magnesium-Niobat-Keramikmaterial (PMN) gefertigt, dessen Auslenkung unter Kleinsignalbedingungen in gewissen Temperaturbereichen proportional zum Quadrat der angelegten Spannung ist. PMN-Elementarzellen sind bei solchen Bedingungen im feldfreien Zustand zentrosymmetrisch aufgebaut. In einem elektrischen Feld werden die positiv und negativ geladenen Ionen getrennt, was zur Änderung der Zellabmessungen und damit zur Ausdehnung führt. Elektrostriktive Aktoren werden oberhalb der, im Vergleich mit PZT-Materialien, sehr niedrigen Curie-Temperatur betrieben.

Durch die quadratische Beziehung zwischen Steuerspannung und Auslenkung ist das Auslenkungsverhalten insgesamt nichtlinearer als das von PZT-Piezokeramik. PMN-Materialien weisen gegenüber PZT eine ca. vierfache Kapazität auf und benötigen deshalb höhere Ströme für den dynamischen Betrieb. Sie zeigen jedoch in einem bestimmten Temperaturbereich eine geringere Hysterese (ca. 3%) als PZT-Materialien. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Zugbelastbarkeit der Keramik.

PZT-Materialien sind temperaturstabiler als elektrostriktive Materialien, besonders bei Temperaturschwankungen von 10 °C und mehr (s. Abb. 53a). Mit steigender Temperatur reduziert sich die Auslenkung,

bei niedrigen Temperaturen, wo die Auslenkung ein Maximum erreicht, nimmt die Hysterese zu (s. Abb. 53 b). PMN-Aktoren eignen sich daher am besten für Anwendungen, bei denen es zu geringen Temperaturschwankungen des Materials kommt, sei es durch dynamischen Betrieb oder durch äußere Einwirkungen.

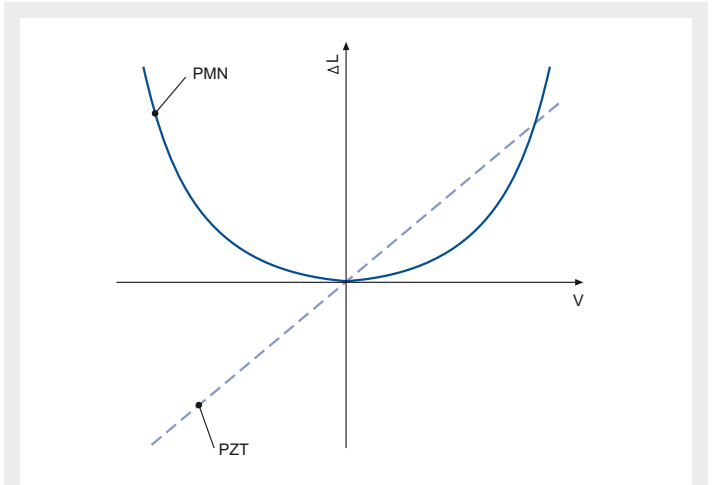


Abb. 52. Vergleich von PMN- und PZT-Material: Auslenkung als Funktion des elektrischen Feldes (generalisierte Darstellung)

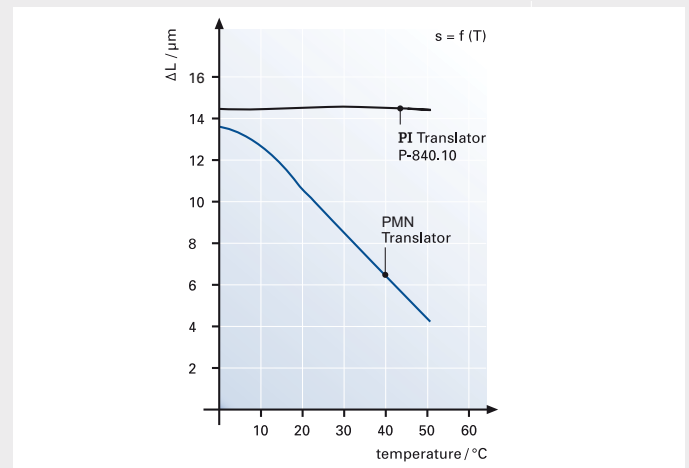


Abb. 53a. Vergleich von PMN- und PZT-Material: Auslenkung als Funktion der Temperatur

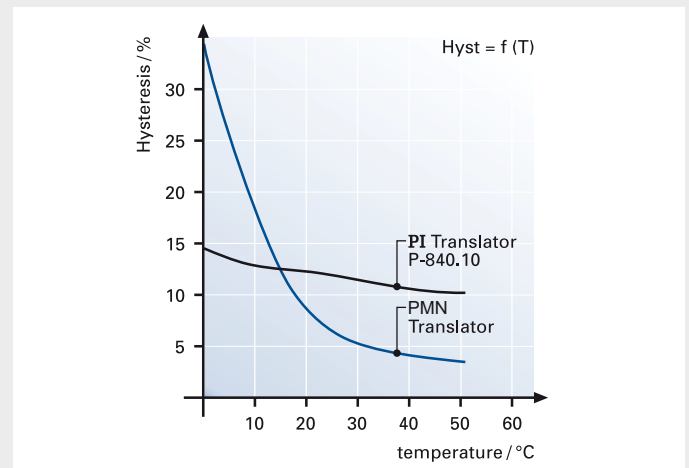


Abb. 53b. Vergleich von PMN- und PZT-Material: Hysterese als Funktion der Temperatur

Ausblick

Piezostelltechnik ermöglicht die Lösung vieler Positionierungsprobleme, bei denen es auf höchste Genauigkeit, Geschwindigkeit und Auflösung ankommt.

Die Beispiele aus dem Tutorium stellen eine Auswahl der heute bekannten Anwendungen dar. Der unaufhaltsame Trend zu höherer Genauigkeit und Geschwindigkeit, sei es bei der Miniaturisierung elektronischer Schaltungen, der Produktion von immer leistungsfähigeren Massenspeichern, der Bearbeitung von Optik, der Feinstpositionierung faseroptischer

Komponenten in der Telekommunikation oder der Herstellung von Präzisionsmechanik, fördert gleichzeitig die Anwendung und Weiterentwicklung der Piezoaktuatorik.

Um die Vorteile voll nutzen zu können, ist es wichtig, in jedem Anwendungsfall das komplette System, in das die Piezomechanik integriert werden soll, zu analysieren. Ein enger Kontakt zwischen dem Anwender und dem Hersteller ist dabei der beste Weg zum Erfolg.

Piezoelektrische Aktoren werden in der Zukunft konventionelle

Antriebstechnik zum Teil ersetzen, zum Teil ergänzen. Sie werden die Grenzen des Machbaren weiter verschieben und die Voraussetzung für Fortschritte – z. B. in der Nanotechnologie – schaffen, die mit konventionellen Antriebstechniken undenkbar wären.

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalig

Mehrkanalig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

Montagehinweise für Piezoaktoren

Die Beachtung der folgenden Hinweise und Richtlinien beim Einsatz von Piezoaktoren ermöglicht die maximale Leistungsfähigkeit und Lebensdauer. Berühren Sie ungeschützte Piezoaktoren („nackte Keramiken“) niemals, verwenden Sie insbesondere keine Metallwerkzeuge. Verletzen Sie nicht die Außenhaut der Stapelaktoren.

I. Piezoelektrische Stapeltranslatoren ohne Vorspannung sind empfindlich gegenüber Zugkräften. Beachten Sie die Vorspannungsempfehlungen im Katalog.

II. Alle Piezoaktoren und Positioniersysteme sind vor Schockbelastungen zu schützen. Auch im dynamischen Betrieb kann es zu erheblichen Druck- und Zugbelastungen kommen. Sowohl durch Druck als auch durch Erwärmung kann sich die Keramik elektrisch aufladen, falls sie nicht kurzgeschlossen ist.

III. Schließen Sie den Piezoaktor während der Montage kurz, da durch Temperatur- und Laständerungen eine Ladung in der Keramik induziert werden kann. Beim Kurzschließen der Anschlussdrähte eines geladenen Piezos muss ein 10 k Ω -Widerstand benutzt werden, um den Entladestrom zu begrenzen. Wenn ein geladener Piezo ohne Entladewiderstände kurzgeschlossen wird, kann dies zu einem Kontraktionsschock und damit zur Zerstörung der Keramik führen.

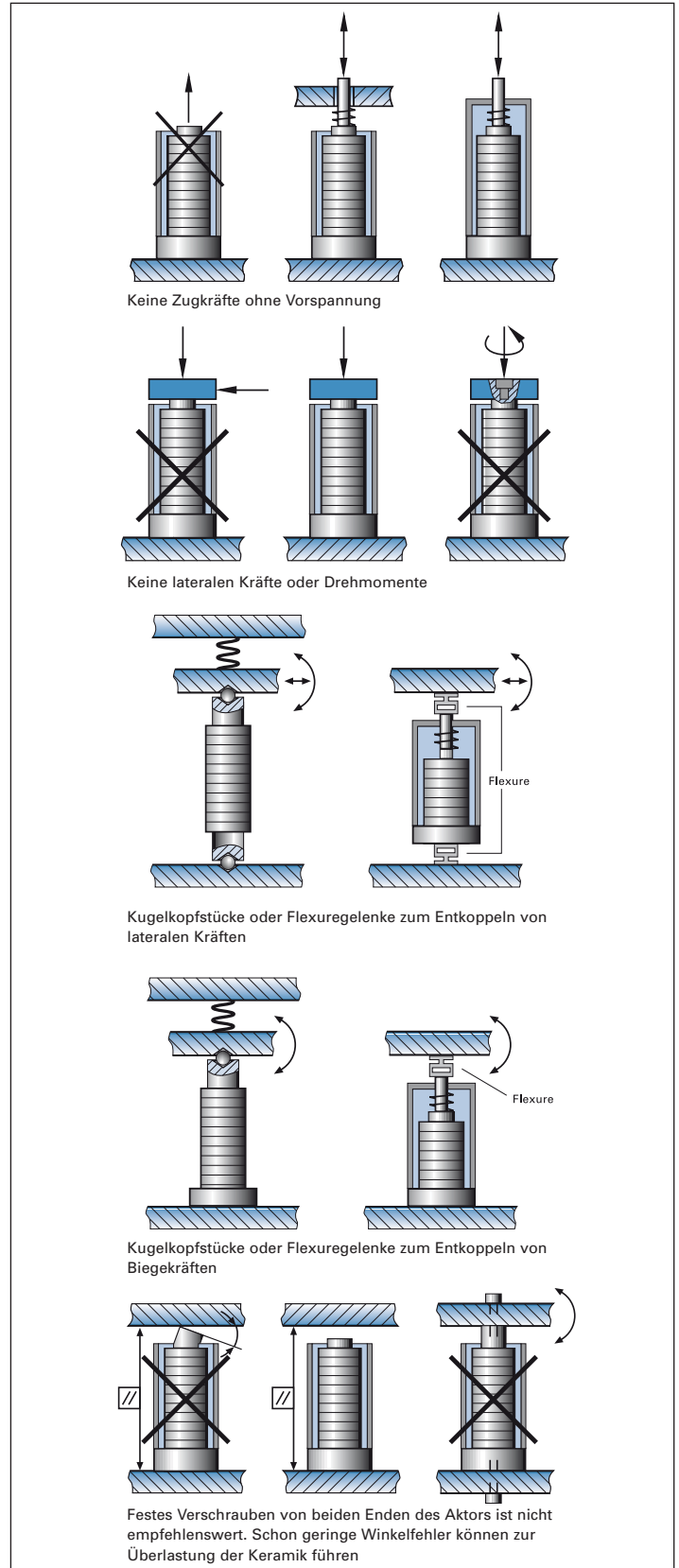
IV. Piezoelektrische Stapeltranslatoren dürfen nur axial belastet werden. Drehmomente und Scherkräfte müssen durch Kugelkopfstücke, flexible Endstücke etc. abge-

fangen werden. Zugkräfte müssen durch eine Vorspannung kompensiert werden. Das maximal zulässige Drehmoment am Kopfstück darf bei der Montage nicht überschritten werden.

V. Piezoelektrische Stapeltranslatoren können mit kalt- oder heißaushärtendem Epoxidkleber auf metallische oder keramische Flächen geklebt werden. Der Untergrund sollte geerdet sein. Der Betriebstemperaturbereich darf beim Verarbeiten nicht überschritten werden.

VI. Piezoaktoren sind empfindlich gegenüber Feuchtigkeit, hoher Luftfeuchtigkeit oder Flüssigkeiten. Vermeiden Sie den Einsatz unter diesen Bedingungen, da sie zu elektrischen Durchschlägen führen können. Schirmen Sie den Aktor durch geeignete Maßnahmen ab. Vermeiden Sie den Kontakt des Aktors mit leitenden oder korrosiven Materialien (z. B. Metallstaub). Zur Reinigung wird Isopropanol empfohlen. Vermeiden Sie Aceton und intensive Ultraschallreinigung bei erhöhter Temperatur.

PI bietet für alle Anwendungsfälle geeignete, mechanisch vorbereitete, integrierte Piezolösungen.



Symbole und Einheiten

A	Oberfläche [m ²]
a	Thermischer Ausdehnungskoeffizient [K ⁻¹]
C	Kapazität [A·s/V]
d _{ij}	Piezomodul (Tensorkomponenten) [m/V]
d _s	Abstand, Dicke [m]
ε	Dielektrizitätskonstante [A·s/V·m]
E	Elektrische Feldstärke [V/m]
f	Arbeitsfrequenz [Hz]
F	Kraft [N]
f ₀	Unbelastete Resonanzfrequenz [Hz]
g	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s ²
i	Strom [A]
k _s	Steifigkeit der Einspannung [N/m] / Federkonstante
k _τ	Steifigkeit des Aktors [N/m] / Federkonstante
L ₀	Länge des Aktors (Betriebsspannung = 0 V) [m]
ΔL	Längenänderung (Auslenkung) [m]
ΔL ₀	Max. nominale Auslenkung ohne externe Kraft [m]
ΔL _{t=0,1}	Ausdehnung zur Zeit t = 0,1 s nach Spannungsänderung [m]
m	Masse [kg]
P	Leistung [W]
Q	Ladung [C]
S	Dehnung [ΔL/L]
t	Zeit [s]
T _c	Curie-Temperatur [°C]
U	Spannung [V]
U _{p-p}	Spitzenspannung [V]

Linearantriebe & Aktoren

Nanostelltechnik / Piezoelektronik

Piezo Systeme /
Schnelle Scantische

Linearachsen

Vertikal- / Kippachsen

2- und 3-achsig

6-achsig

Schnelle Kippspiegel /
Aktive Optiken

Piezoverstärker und Controller

Einkanalgig

Mehrkanalgig

Modular

Zubehör

Grundlagen der Nanostelltechnik

Nanomesstechnik

Mikrostelltechnik

Index

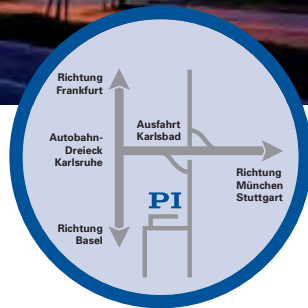
Alle Wege führen zu PI

PI Karlsruhe



Im Einzugsbereich der Flughäfen Frankfurt, Stuttgart und Straßburg, liegt PI verkehrsgünstig, nahe dem Autobahndreieck Karlsruhe, direkt an der A8, Ausfahrt Karlsbad.

www.pi.ws

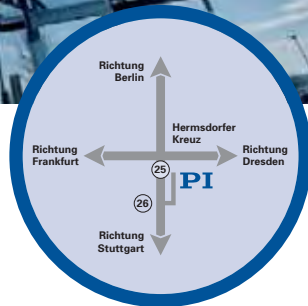


PI Ceramic Lederhose



Einfach und schnell erreichbar liegt PI Ceramic direkt am Verkehrsknotenpunkt „Hermisdorfer Kreuz“ der A9 und der A4. Nur wenige Minuten von den Anschlussstellen Nr. 25 und Nr. 26 entfernt.

www.piceramic.de



Hauptsitze

DEUTSCHLAND

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG
Auf der Römerstr. 1
76228 Karlsruhe
Tel: +49 (721) 4846-0
Fax: +49 (721) 4846-100
info@pi.ws · www.pi.ws

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

Niederlassungen

USA (Ost) & KANADA

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

USA (West) & MEXIKO

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

JAPAN

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

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

CHINA

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

UK & IRLAND

PI (Physik Instrumente) Ltd.
Lambda House
Batford Mill
Harpenden, Hertfordshire
AL5 5BZ
Tel: +44 (1582) 711 650
Fax: +44 (1582) 712 084
uk@pi.ws
www.physikinstrumente.co.uk

FRANKREICH

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

ITALIEN

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