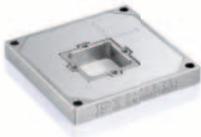




Piezo Nano Positioning

2013/2014

Inhalt

Über PI		ab Seite	4
<hr/>			
Piezopositioniersysteme		ab Seite	17
	Piezoscanner für nanopräzise Positionierung in 1 bis 6 Achsen	Seite	18
	Z-Piezoscanner und Objektivfokussierer für die Mikroskopie	Seite	44
	Precision Motion Control: Piezoverstärker und -controller für die Nanopositionierung	Seite	56
	Nanometrologie	Seite	72
	Technologie der Nanopositionierung	Seite	76
<hr/>			
Piezoantriebe		ab Seite	99
	Piezomotoren	Seite	100
	Technologien der Piezomotoren	Seite	104
	Piezoaktoren mit Führung und Vorspannung	Seite	110
	Technologie: Führung und Vorspannung	Seite	116
	Piezoaktoren und Piezokomponenten	Seite	118
	Grundlagen der Piezotechnologie	Seite	126

Hexapod und SpaceFAB: Parallelkinematiken für 6 Bewegungsachsen

ab Seite 159



Hexapod und SpaceFAB

Seite 160

Controller für Hexapod-Positioniersysteme

Seite 176

Zubehör

Seite 178



Technologie parallelkinematischer Präzisionspositionierer

Seite 180

Motorisierte Positioniersysteme

ab Seite 191



Präzisionslinearversteller

Seite 192



Präzisionskreuztische

Seite 216



Präzisionsrotationstische

Seite 222

Motorisierte Präzisionslinearaktoren

Seite 234

Motion Controller

Seite 244



Grundlagen motorisierter Positioniersysteme

Seite 252

Patente

Seite 268

Impressum

Seite 269

Die PI Gruppe



Weltweit ist kein anderes Unternehmen im Bereich der Präzisionspositionierung technologisch breiter aufgestellt als die PI Gruppe. Kontinuierliches Wachstum ist dabei eines der Hauptmerkmale der PI Gruppe.

Neuartige Antriebskonzepte, Produkte und Systemlösungen haben auch in den letzten Jahren zu einer stetig steigenden Marktpräsenz geführt und für eine hohe Konstanz in der Firmenentwicklung gesorgt. Über 700 hochqualifizierte Mitarbeiter weltweit und eigene Vertretungen in 13 Ländern versetzen die PI Gruppe heute in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisionspositioniertechnik zu erfüllen.



Typisch PI: Nanometer-Auflösung für die Fokusfeinverstellung in der Mikroskopie mit PIFOC® Objektivscanner

PICMA® Multilayer-Piezoaktoren von PI Ceramic mit vollkeramischer Ummantelung für optimale Zuverlässigkeit und Lebensdauer

SpaceFAB Positioniersystem von PI miCos. Parallele Kinematik für die Positionierung in bis zu 6 Freiheitsgraden

Einzigartig in Piezotechnologie und Präzisionspositionierung

Physik Instrumente (PI) – Präzisionspositionierung für Industrie und Forschung

Physik Instrumente (PI) wurde vor mehr als vier Jahrzehnten gegründet und gilt heute als weltweiter Markt- und Technologieführer in der Präzisionspositionierung mit Genauigkeiten im Nanometerbereich. Der Hauptsitz in Karlsruhe ist mit mehr als 350 Mitarbeitern Entwicklungs- und Fertigungsstandort für eine breit gefächerte Palette hochauflösender Antriebssysteme und Positionierlösungen.

PI Ceramic – Spezialist für Piezotechnologie

PI Ceramic mit zurzeit etwa 200 Mitarbeitern wurde 1992 in Lederhose (Thüringen) als Entwicklungs- und Fertigungsstandort für piezoelektrische Wandler gegründet und gehört heute zu den weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte. Diese sind in der Präzisionspositionierung ebenso zu finden wie in der Messtechnik, der Schwingungs- oder Energieerzeugung.

PI miCos – Motion Control und Systemintegration

PI miCos, gegründet 1990 in Eschbach bei Freiburg, gehört seit 2011 zur PI Gruppe. Mit aktuell über 60 Mitarbeitern entwickelt, fertigt und vertreibt das Unternehmen weltweit einzigartige Systeme und Komponenten für hochpräzise Positionieranwendungen. Schwerpunkte bilden unter anderem die Positioniertechnik im Vakuum, Luftlagertechnik, Linearmotoren sowie Ingenieurleistungen zur Systemintegration.



In allen wichtigen Forschungs-, Entwicklungs- und Hochtechnologie-Fertigungsregionen ist die PI Gruppe präsent. Die rund um den Globus verteilten lokalen Niederlassungen sind dabei mehr als reine Vertriebsvertretungen. Davon profitieren die Kunden, denn vielerorts gibt es

- Serviceeinrichtungen für Diagnose und Reparaturen sowie Messtechnik für Tests, Systemkalibration und Qualitätssicherung
- Entwicklungsabteilungen, um schnell und ohne Zeitversatz auf die Bedürfnisse der lokalen Märkte reagieren zu können im direkten Dialog mit dem Anwender
- Muster- und Prototypenbau, nahe an der Entwicklung und im direkten Kontakt zum Kunden
- Vertriebsmitarbeiter, die nicht nur Produktspezialisten für das Portfolio der gesamte PI Gruppe sind, sondern auch kundenspezifische Entwicklungen vom ersten Kontakt bis zur Auslieferung als Ansprechpartner begleiten
- Marktspezialisten, die die spezifischen Anforderungen in bestimmten Marktsegmenten weltweit kennen. Die PI Gruppe kann darauf mit perfekt abgestimmten Produktentwicklungen reagieren

Weltweit gut aufgestellt



- 1970** Gründungsjahr von PI
- 1977** Umzug nach Waldbronn
- 1991** Markteinführung von 6-achsigen, parallelkinematischen Positioniersystemen (Hexapoden)
- 1992** Gründung von PI Ceramic in Thüringen, Grundstein für die Marktführerschaft in der Nanostelltechnik
- 1994** Markteinführung kapazitiver Positionssensoren
- 1998** Markteinführung von digitalen Regelungselektroniken
- 2001** Markteinführung der PILine® Ultraschall-Piezomotoren
- 2001** Neues Firmengebäude in Karlsruhe
- 2002** Erweiterungsgebäude für PI Ceramic
- 2002** Markteinführung der PICMA® Multilayer-Piezoaktoren
- 2004** Markteinführung der NEXLINE® Hochleistungs-Piezolinearantriebe
- 2007** Markteinführung der NEXACT® Piezolinearantriebe
- 2010** Raum für weiteres Wachstum: Kauf des Erweiterungsgrundstücks neben dem PI Firmensitz in Karlsruhe
- 2011** Übernahme Mehrheitsanteile der miCos GmbH, Eschbach
- 2012** Erweiterungsgebäude in Karlsruhe und Lederhose
- 2012** Vorstellung des vollständig magnetisch geführten Positioniersystems PIMag™ 6D
- 2013** Markteinführung der auf PIShift Trägheitsantrieben basierenden PiezoMike Linearaktoren

Liebe Kundinnen und Kunden,



PI steht für technische Spitzenleistungen; unser wichtigstes Anliegen ist es aber, Sie zu begeistern. Die Voraussetzungen dafür glauben wir zu haben, denn PI bietet eine technologische Bandbreite, die in der Welt ihresgleichen sucht: Piezoaktoren, Voice-Coil, magnetische Führungen, Nanometrologie-Sensoren oder digitale Regler – es gibt keine Technologie für hochgenaue Bewegungen, die wir nicht einsetzen können. Die Piezotechnologie ist dabei ein solch elementarer Grundbaustein unseres Portfolios, dass wir mit PI Ceramic ein ganzes Unternehmen darum herum gegründet haben. So sind wir unabhängig von am Markt verfügbaren Komponenten und können alle Schlüsseltechnologien aus einer Hand anbieten. Das macht uns so besonders, wie wir es sein müssen, um Ihre besonderen Anforderungen in der Antriebs- und Positioniertechnik zu erfüllen.

Es ist aber nicht alleine die Technologie, die unsere Basis bildet. Es sind vor allem auch die Menschen, die für und mit PI arbeiten. Stetige Verbesserung der Arbeitsabläufe, flache Hierarchien, kurze Wege und eine direkte Kommunikation intern und mit Ihnen als Kunden bilden dafür gute Grundlagen. Unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter freuen sich darauf, für Sie tätig zu sein und Sie zu begeistern.

Mit freundlichen Grüßen

Dr. Karl Spanner, Vorsitzender der Geschäftsführung



Die „Wall of Fame“: Weit über 100 Patente und zum Patent angemeldete Technologien aus den Bereichen Nanopositionierung, Positioniersteuerungen und piezoelektrischer Antriebssysteme

Integriertes Managementsystem: Qualität, Umwelt und Arbeitssicherheit zertifiziert nach ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001



Aus dem Leitbild

„PI ist ein stark expandierendes mittelständisches Unternehmen in Privatbesitz. Der Name PI steht für Qualität in Produkten, Prozessen und Service. Der Entwicklungs- und Fertigungsablauf unterliegt der vollständigen Kontrolle und Verantwortung von PI. Profitabilität ist notwendig für eine finanzielle Unabhängigkeit und die Voraussetzung für Investitionen. Sie gewährleistet Stabilität und eine zuverlässige Partnerschaft für unsere Kunden.“

PI ist Partner der Kunden, es werden langfristige Kundenbeziehungen angestrebt. Die Voraussetzung hierfür sind die Fairness in der Preisfindung und die gegenseitige Unterstützung bei der Problemlösung.“

Unangepasst angepasst

Ganz so, wie es die Kunden wünschen, kann die PI Gruppe reagieren: Spezifische Anforderungen können oft nur mit angepassten Lösungen bedient werden – Lösungen, die nur mit unangepasstem, kreativem Denken erzielt werden.

Marktvorteile durch große Bandbreite und unkonventionelle Lösungen

PI ist dort zu Hause, wo unkonventionelle Lösungen gefragt sind. Das ist längst nicht mehr nur in Forschungsbereichen der Fall. Die Nanotechnologie ist heute auch in standardisierten industriellen Prozessen präsent. Ob für Industrie oder Forschung: PI kann Lösungen anbieten, die sich von „handelsüblicher“ Technologie unterscheiden. Dazu ist es erforderlich, die Anforderungen der Kunden zu verstehen, zu bewerten und kreativ umzusetzen. Die technologische Breite, auf die PI zurückgreifen kann, erlaubt immer einen Lösungsansatz, der nicht von vornherein auf bestimmte Technologien festgelegt ist. Für den Kunden ergeben sich daraus oft beachtliche Wettbewerbsvorteile.

Warum Wissenschaftler auf PI setzen: Kreativität für Forschung und Entwicklung

Viele wissenschaftliche Veröffentlichungen verweisen auf PI Systeme, weil diese eine wichtige Voraussetzung für erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte lieferten. Sonderanfertigungen für das Umfeld der öffentlichen Forschung sind für PI an der Tagesordnung. Extreme Umgebungsbedingungen und neue Designs sind dabei ebenso gängig wie leichte Modifikationen zur besseren Anpassung an die Anwendung. Wichtige Betätigungsfelder im Forschungsumfeld sind z. B. die Beamline-Instrumentierung, die Mikrosystemtechnik oder Nanotechnologie.

OEM-Anwender profitieren vom Integrierten Management System

Optimierte Prozesse ermöglichen es uns, kundenspezifische Entwicklungen in Stückzahlen bis zu mehreren 100 000 Einheiten pro Jahr termingetreu und kostengünstig zu liefern. Die Palette der OEM-Produkte der PI Gruppe ist breit gefächert und reicht vom „nackten“ Aktor oder Sensor bis zum hochintegrierten parallelkinematischen Positioniersystem. Die dafür erforderliche Evaluierung über seriennahe Muster ist im Entwicklungsprozess ebenso verankert wie die entsprechenden Testverfahren, die Produktionsprozesse und das Qualitätsmanagement.

Entscheidende Wettbewerbsvorteile für unsere Kunden ergeben sich, weil PI mit seinen Produkten in allen Bereichen (Mechanik, Elektronik, Sensorik, Software) auf die Kundenanforderungen eingeht. Solche Lösungen machen den wesentlichen Unterschied zum „Stand der Technik“ aus und sind unerlässlich, um erfolgreich am Markt bestehen zu können.

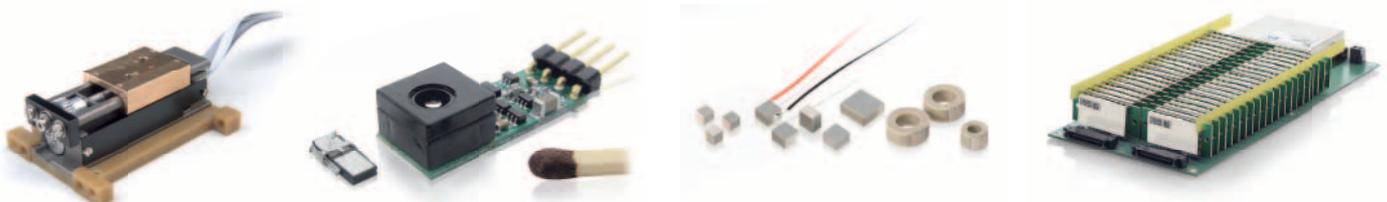
Kontrolle aller entscheidenden Systemkomponenten

Die PI Gruppe entwickelt alle wichtigen Systemkomponenten selbst, vom Piezomaterial über das mechanische Design und die Sensorik bis hin zur Auslegung der Elektronik und Software. Die Vorteile daraus liegen nicht nur in besseren Leistungsdaten der Systeme, sondern auch in der Lieferfähigkeit und Ersatzteilversorgung bis weit in die Zukunft, ein wichtiger Punkt für alle unsere Kunden sei es aus der Industrie oder aus der Forschung.



Spiegelhalter in einem astronomischen Projekt, bei dem es auf höchste Stabilität und Auflösung ankommt. Hier hat PI NEXLINE® Piezomotoren mit absolut messenden Sensoren für lange Messbereiche kombiniert

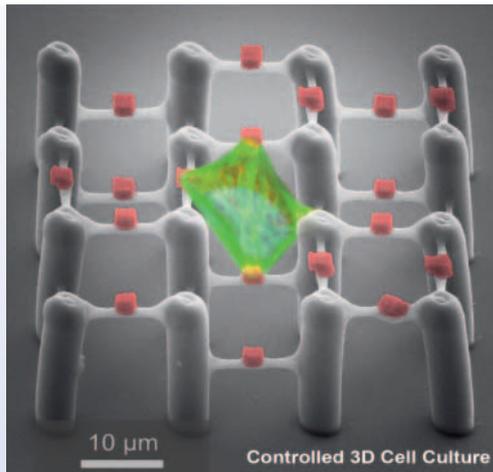
Klein, kleiner, am kleinsten. Kundenspezifische Antriebslösungen der PI Gruppe von einem 30 mm breiten geführten Positionierer mit klassischem Getriebemotor über einen piezomotorischen Fokusversteller für mobile Endgeräte mit Ansteuer-elektronik bis hin zu Piezo-Chip-Aktoren und passenden Verstärkermodulen, die in großen Mengen preisgünstig gefertigt werden



Die Märkte



Komplexe dreidimensionale Struktur: Eine 300 µm hohe Freiheitsstatue wurde mit dem 3D-Lithografieverfahren von Nanoscribe erzeugt (Foto: Nanoscribe GmbH)



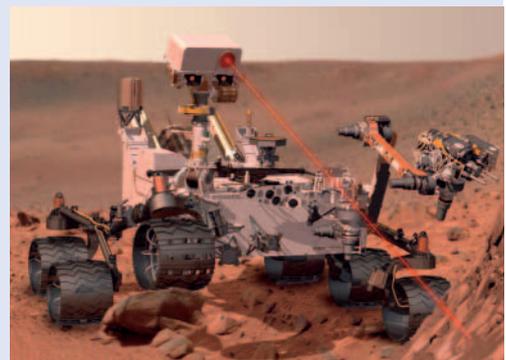
Dreidimensionales Gerüst: Zellen docken an den „Griffen“ an. (Foto: B. Richter und M. Bastmeyer, Zoologisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT))



Antriebe, die zugleich klein und genau sind, verbessern abbildende Verfahren z. B. in der Medizintechnik (Foto: SCHÖLLY FIBEROPTIC GMBH)



Vorteile der Hexapoden einfach in der Automatisierung nutzen. Neben der SPS-Anbindung ist auch die Ansteuerung über standardisierte G-Code Kommandos möglich



Curiosity untersucht Marsgestein mit Unterstützung von PI Piezoaktoren und motorisierten Verstellern (Bild: NASA/JPL)

Präzision im Kleinsten und im Großen

Was haben lithografische Verfahren zur Herstellung von Nanostrukturen mit der Astronomie zu tun? So unterschiedlich sie erscheinen, erfordern beide bei der Objektbewegung höchste Genauigkeit im Bereich von Nanometern. PI ist mit seinen Positionier- und Antriebssystemen in diesen und vielen weiteren Bereichen beheimatet – nicht nur in der Forschung, sondern auch in der industriellen Produktion.

Halbleitertechnologie

Die Halbleitertechnologie ist Vorreiter in der Kommerzialisierung der Nanotechnologie. Moderne Chips besitzen bereits Strukturen mit nur einigen Nanometern Breite. Piezomotorische und -aktorische Systeme von PI helfen bei der präzisen Justierung von Wafern, der abbildenden Optik und Maske. Auch Inspektionssysteme in der Halbleiterindustrie nutzen die Leistungsmerkmale der PI Systeme.

Vakuumtauglich, nichtmagnetisch und für den Tieftemperaturbereich geeignet

Die Antriebssysteme von PI lassen sich ohne Weiteres für extreme Umgebungsbedingungen wie Ultrahochvakuum, hohe Magnetfelder oder tiefe Temperaturen auslegen. Wichtig ist hier vor allem die Wahl der Systemkomponenten, denn grundsätzlich ist die Piezotechnologie für diese drei Extrembereiche geeignet. Speziell bei Antriebslösungen im Ultrahochvakuum gilt PI miCos als Experte, vor allem wenn es um den Aufbau komplexer mehrachsiger Systeme für hohe Lasten und lange Stellwege geht.

Medizintechnik

Piezoaktoren zur Erzeugung von Ultraschallwellen, die Erzeugung von Nanoliter-Tröpfchen bei Dosieraufgaben oder Piezomotoren als preisgünstiger Antrieb für mobile Medikamentierung – all das sind Aufgabenstellungen, für die die PI Gruppe seit Jahren am Markt erfolgreiche Lösungen bietet. Für abbildende Verfahren wie OCT, Fokussierung oder für Zoomobjektive werden ebenfalls zunehmend kleine und zuverlässige Antriebssysteme benötigt. Hier finden Produkte von PI ein breit gefächertes Einsatzfeld.

Biotechnologie

Die Anwendungen präziser Positioniersysteme von PI im Bereich der Lebenswissenschaften beschränken sich nicht nur auf die typischen optischen Verfahren wie z. B. die Fokussierung oder die Probenbewegung und -manipulation in der Mikroskopie oder in Genom-Sequenzern. Auch im Bereich der Nanodosierung und Mikrofluidik sind Antriebssysteme von PI unschlagbar. Sie ermöglichen beispielsweise die Dosierung kleinster Volumina bei Verfahren wie dem PipeJet bzw. feinste Strukturierungen durch Nanoimprint oder 3D-Lithografie.

Mikroskopie

Optische Verfahren bauen schon seit Langem auf Positioniersysteme von PI, z. B. zur Justage von Optiken oder Proben. Piezoaktoren und -motoren ersetzen hier zunehmend klassische Antriebsprinzipien, denn sie sind kompakter, präziser und schneller. Andere, nichtoptische mikroskopische Verfahren wie SEM (Scanning Electron Microscope) oder AFM (Rasterkraft-Mikroskop) setzen Systeme von PI wegen ihrer hohen Genauigkeit und Dynamik ein.

Bildgebende Verfahren

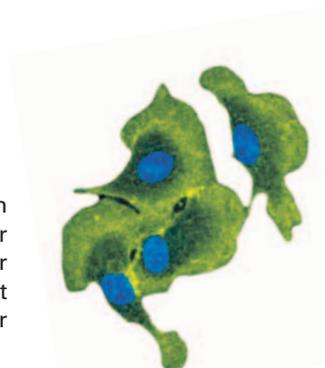
Die unterschiedlichsten Branchen sind heute auf bildgebende Verfahren angewiesen. Marktübergreifend bestehen die Aufgaben in der Fokussierung, dem Zoomen, der Objektjustierung und dem Wunsch, die Auflösung zu verbessern. Das Spektrum reicht dabei von der Inspektion von Oberflächenstrukturen auf Halbleitern oder Flachbildschirmen mit Weißlichtinterferometrie über die klassische Mikroskopie bis hin zum Digitalisieren von Dokumenten oder der Kamerastabilisierung bei Luftaufnahmen. In all diesen Bereichen ist die PI Gruppe mit ihren präzisen, stabilen und dynamischen Positioniersystemen vertreten.

Industrielle Automatisierung

Positioniersysteme von PI können über Feldbus-Schnittstellen direkt mit einer SPS kommunizieren. Dadurch lassen sie sich praktisch in jeden Automatisierungsverbund integrieren und die Taktsynchronisierung mit anderen Automatisierungskomponenten ist gut realisierbar. Auch präzise parallelkinematische Hexapoden kann man damit in automatisierten Fertigungsprozessen für exakte Justageaufgaben nutzen.

Astronomie und Weltraumforschung

Höchste Präzision ist auch in der Astronomie gefragt, wenn es darum geht, der Bewegung der Gestirne zu folgen oder atmosphärische Störungen auszugleichen. Dabei justieren Hexapoden von PI Sekundärspiegel von Teleskopen auf weniger als 1 µm genau oder piezogetriebene, aktive Spiegelelemente passen die Form großer Hauptspiegel an. Die PI Gruppe ist derzeit sogar mit zwei Systemen auf dem Mars vertreten: Piezoaktoren trennen Gesteinsproben voneinander und motorische Antriebe verfahren eine Kameraoptik der Marssonde Curiosity.



Endothelzellen unter dem Mikroskop (Foto: Lemke Group, EMBL Heidelberg)



Flacher, preisgünstiger Piezoscanner für die Biometrie: Der CCD-Chip wird dynamisch in zwei Achsen bewegt, um die Auflösung virtuell zu erhöhen



SpaceFAB: 6-achsiges Positioniersystem für 10⁻⁶ hPa



PI Ceramic Piezotechnologie

PI Ceramic gilt als weltweit führendes Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte. Zum Produktportfolio gehören unterschiedliche piezokeramische Elemente, die je nach Material und Anwendung in Multilayer- oder Presstechnologie hergestellt werden. Piezokeramische Komponenten werden in einer Vielzahl von Formen und Größen sowie mit unterschiedlichsten Bewegungseigenschaften gefertigt.

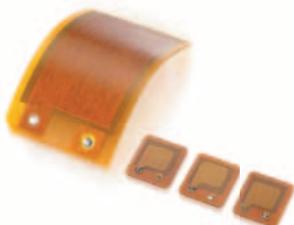
Das breit gefächerte Know-how im komplexen Entwicklungs- und Herstellungsprozess funktionskeramischer Bauelemente verbunden mit modernster Produktionsausstattung gewährleisten hohe Qualität, Flexibilität und Liefertreue. Prototypen und Kleinserien kundenspezifischer Piezobaugruppen stehen bereits nach sehr kurzen Bearbeitungszeiten zur Verfügung. PI Ceramic besitzt darüber hinaus die Kapazitäten für die Herstellung mittlerer und großer Serien in automatisierten Linien.



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

PI Ceramic bietet

- piezokeramische Werkstoffe
- bleifreie piezoelektrische Werkstoffe
- piezokeramische Bauelemente
- kunden- und anwendungsspezifische Ultraschallwandler / Transducer
- PICMA® monolithische Multilayer-Piezoaktoren
- Miniatur-Piezoaktoren
- PICMA® Multilayer-Biegeelemente
- PICA Hochlast-Piezoaktoren
- PT-Tube Piezorohre
- vorgespannte Aktoren mit Gehäuse
- Piezokomposite – DuraAct Flächenwandler



DuraAct Transducer lassen sich als Sensor, Aktor und für Energy Harvesting nutzen





PI miCos Motion Control

Oft wird die komplette Integration vieler Achsen hochpräziser Positioniersysteme gefordert. Beispiele liefern die Einrichtung von Experimenten in Großforschungsanlagen ebenso wie die optische Messtechnik und Photonik sowie Prüf- und Kalibriereinrichtungen in der Industrie. PI miCos liefert hierfür schlüsselfertige Lösungen aus einer Hand auch für komplexe Integrationen. Die kritischen mechanischen Komponenten fertigt PI miCos im eigenen Haus und erzielt dadurch die spezifizierten Leistungsmerkmale.

Zum Produktportfolio gehören Linear- und Rotationstische ebenso wie mehrachsige SpaceFAB Robotik-Systeme und abgestimmte Motion Controller mit Anwendersoftware. PI miCos bietet darüber hinaus spezielle Produktlinien für Anwendungen im Vakuum bis 10^{-10} hPa oder unter kryogenen Bedingungen.

Typische Beispiele für erfolgreich integrierte Systemlösungen finden sich bei den flexiblen Positioniersystemen mit Linearmotoren und Luftlagertechnik ebenso wie bei den Robotik-Systemen, die Bewegungen mit sechs Freiheitsgraden ermöglichen und speziell für die optische Messtechnik und Photonik entwickelt wurden.

Positionierung im Vakuum in bis zu sechs Achsen ist eines der Spezialgebiete von PI miCos

Spitzenleistung für exzellente Ergebnisse: Forschungseinrichtungen setzen auf die einzigartige Kombination aus technischem Know-how und perfekter Umsetzung, die beispielsweise die taumel- und spielfreie Bewegung dieses Rotationstisches ermöglichen



Alles aus einer Hand



Technologie und Fertigung fest im Griff

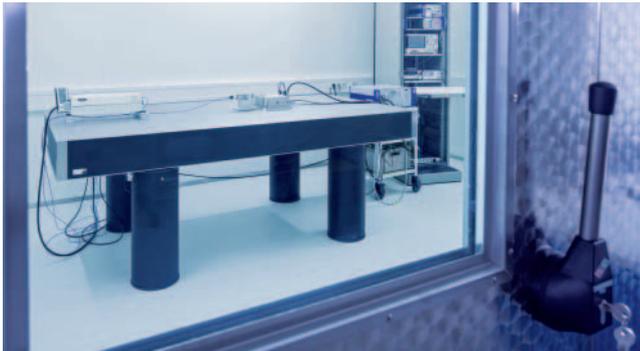
Kunden- und applikationsspezifische Produktentwicklungen sind für die PI Gruppe die Grundlage für den Erfolg. Dazu müssen die Anforderungen verstanden und technologisch umgesetzt werden. Dadurch, dass die PI Gruppe ihre Schlüsseltechnologien selbst entwickelt, lassen sich sowohl die Technologie als auch die Fertigung bestmöglich auf die Erfordernisse ausrichten. Die Produkte liefern den Beweis.

Das gute Gefühl zu bekommen, was man erwartet

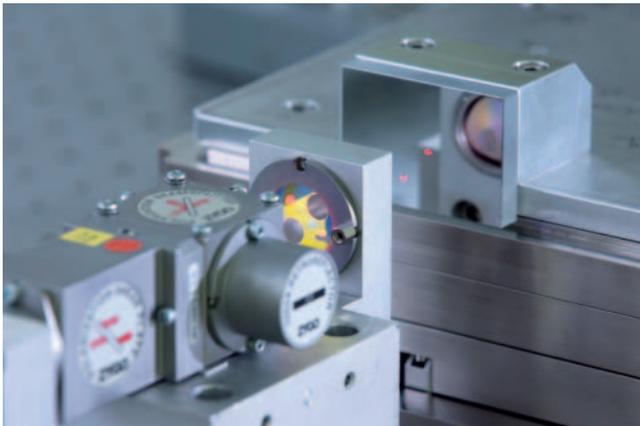
Der Kunde soll Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des von ihm eingesetzten Systems haben. Deshalb gehört zu jedem ausgelieferten positionsgeregelten Nanopositioniersystem ein aussagekräftiges Messprotokoll. Dabei werden alle Messungen mit externen, rückführbaren Messmitteln wie hochauflösenden Interferometern durchgeführt.

Die kombinierte Hub- und Schwenkvorrichtung trägt bis zu sieben Tonnen und erlaubt Drehungen um 360°. Dadurch können z. B. Hochlast-Hexapoden mitsamt Last in der Orientierung des geplanten Einbaus qualifiziert werden





Die seismische, elektromagnetische und thermische Isolierung der Testlabore sorgt für eine Temperaturstabilität besser als 0,25 °C in 24 Stunden. Messgenauigkeiten bis in den Picometerbereich setzen Standards in der Vermessung von Nanopositionierprodukten



Hochpräzise Piezopositioniersysteme werden mit hochwertigen kalibrierten Interferometern vermessen

Qualifikation mit großer Bandbreite

Die Produktbandbreite vom Zwei-Tonnen-Hexapod bis zum 10-Gramm-Nanopositionierer setzt voraus, dass PI diese Systeme sowohl fertigen als auch qualifizieren kann. Im Neubau bei PI in Karlsruhe wurde daher eine Schwerlasthalle eingerichtet, in der sich Massen bis fünf Tonnen bewegen lassen. Spezielle Messvorrichtungen wie hochauflösende 6D-Lasertracker ermöglichen die Systemqualifikation der „Schwergewichte“ in jeder Lage.

Nanopositioniersysteme erfordern in der Qualifikation stabile Messbedingungen. Klimastabile Messräume, die mehrfach gegen das Gebäudefundament und damit gegen Schwingungen von außen entkoppelt sind, sorgen dafür, dass die hochauflösenden Messgeräte wie Interferometer und kapazitive Sensoren ideale Umgebungsbedingungen vorfinden.

Komplette Systeme

Positioniersysteme von PI sind Komplettlösungen, d. h. sie werden mit allem ausgeliefert, was für den Betrieb erforderlich ist. Dazu zählen, sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt, Netzteile, Kabel, Netz- und Netzkabel und natürlich die Software. Mit PIMikroMove® bietet PI außerdem ein grafisches Benutzerinterface für die schnelle Inbetriebnahme und Optimierung des Positioniersystems. Darüber hinaus vereinfachen Programmbibliotheken und Treiber die Einbindung und Programmierung der Systeme z. B. unter Linux, Windows oder LabVIEW.



Besuchen Sie uns im Web

Auf unserer Website www.pi.de erfahren Sie mehr über uns, unsere Produkte und die neuesten Entwicklungen. Sie finden dort auch die technischen Spezifikationen zu einzelnen Produkten, die im gedruckten Katalog nicht explizit aufgeführt sind. Ein Besuch auf www.pi.de lohnt sich.

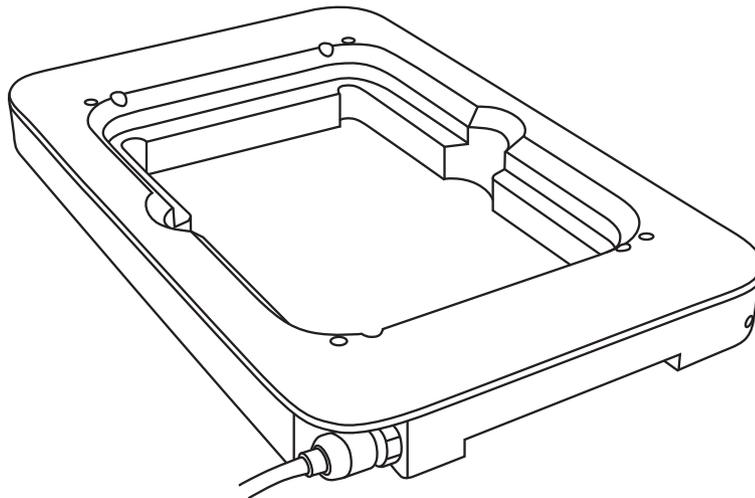
Downloads von Software, Manuals und CAD-Dateien

Die Website www.pi.de hat viel zu bieten. Als Kunde haben Sie online Zugriff auf Software-Downloads oder unsere ausführlichen Bedienungsanleitungen. Wenn Sie PI Komponenten in Ihr System integrieren wollen, stellt PI Ihnen online 3D-Modelle im universell verwendbaren STEP-Format zur Verfügung.



Die aktuelle Softwareversion steht immer online bereit. Eine umfangreiche Produktdokumentation hilft bei der schnellen und erfolgreichen Inbetriebnahme ebenso wie bei Detailfragen fortgeschrittener Anwender

Piezopositioniersysteme



Produkte

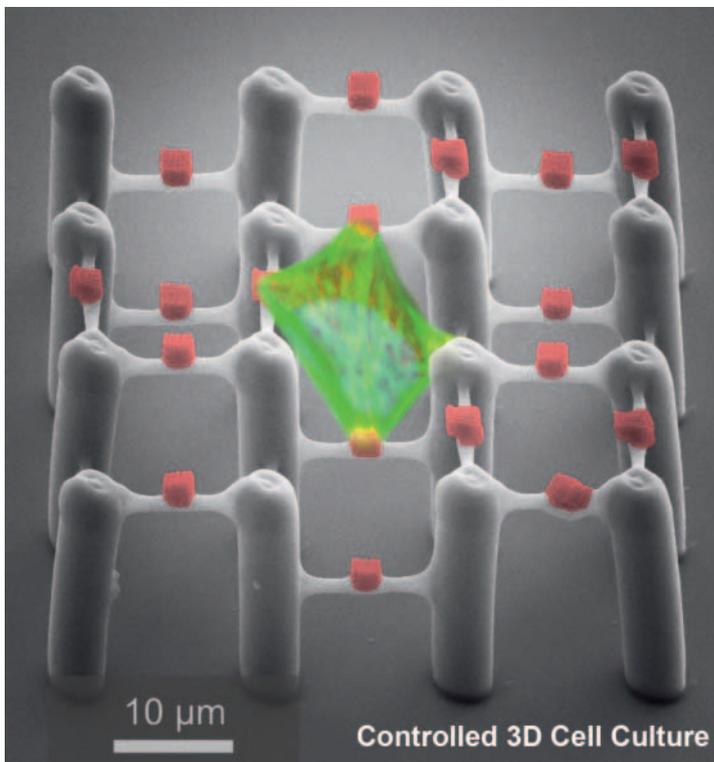
Seite 18–75

Technologie

Seite 76–95

Piezoscanner für nanopräzise Positionierung

In 1 bis 6 Achsen



Dreidimensionales Gerüst:
Zellen docken an den „Griffen“ an.
(Foto: B. Richter und M. Bastmeyer,
Zoologisches Institut, Karlsruher
Institut für Technologie (KIT))

Nanotechnologie ist bereits Alltag. Die Verwendung hochpräziser Positioniersysteme in der Biotechnologie, Mikroskopie oder Halbleitertechnologie ermöglicht die Auflösung feinsten Strukturen in Fertigung und Inspektion. So werden immer leistungsfähigere integrierte Elektronikbausteine ermöglicht und neue Diagnose und Therapieverfahren in den Lebenswissenschaften erforscht.



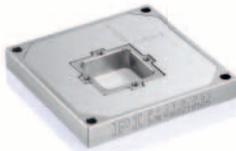
Einachsige Piezoscantische
Nanopositioniersysteme der Referenzklasse

Seite 20



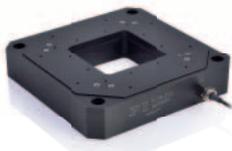
Piezo-Z-Scanner
Kompakte Positionierer für die Vertikale

Seite 22



Piezoscantische für 1 bis 3 Achsen

Seite 26



Präzisionspositionierer für bis zu 6 Achsen
Piezosysteme der Referenzklasse

Seite 38



PicoCube® XYZ - Piezoscanner für AFM

Seite 40



Schnelle Kippspiegel
Aktive Optiken

Seite 42

Einachsige Piezoscantische

Nanopositioniersysteme der Referenzklasse



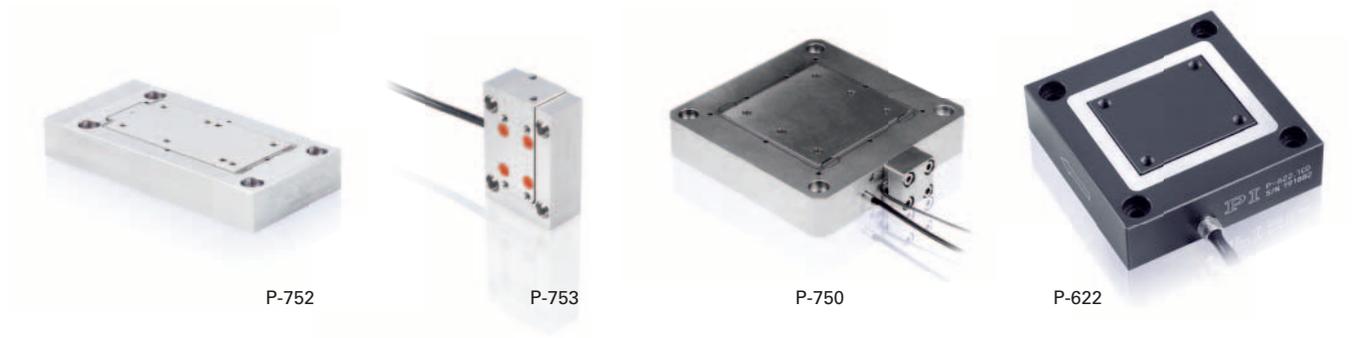
P-753

Highlights

- Hervorragende Präzision
- Für dynamische Anwendungen
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit
- Kapazitive Positionssensoren für Positioniergenauigkeit und Stabilität im Bereich einzelner Nanometer
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)

Anwendungen

Piezoaktorielle Lineartische von PI vereinen nanometergenaue Auflösung und Führungspräzision mit minimalem Übersprechen. Daher sind sie besonders geeignet für Referenzanwendungen in der Messtechnik, für mikroskopische Verfahren, für die Interferometrie oder in Inspektionssystemen für die Halbleiterchip-Herstellung.



P-752

P-753

P-750

P-620
bis
P-629

	P-752	P-753	P-750	P-620 bis P-629
Höchste Führungsgenauigkeit		LISA Aktor und Nanoscantisch: Vertikal und horizontal einsetzbar	Für hohe Lasten	PIHera: XY- und Z-Versionen verfügbar
Abmessung in mm	66 bis 84 × 40 × 13,5	44 bis 80 × 30 × 15	115 × 115 × 25	30 × 30 × 12 bis 100 × 100 × 22,5
Stellweg geregelt in μm	15 bis 30	12 bis 38	75	50 bis 1 500
Belastbarkeit in N	30	100 vertikal, 20 horizontal	100	10
Auflösung geregelt in nm	bis 0,1	0,05 bis 0,2	1	bis 0,2
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,03	0,03	bis 0,02
Wiederholgenauigkeit in nm	± 1 bis ± 2	± 1 bis ± 3	± 3	bis ± 1
Übersprechen θ_x/θ_z in μrad	± 1	± 5 bis ± 10	± 10	± 3 bis ± 10
Steifigkeit in N/ μm	bis 30	bis 45	12,5	bis 0,4
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	bis 3 200	bis 5 600	600	bis 1 100

Piezo-Z-Scanner

Kompakte Positionierer für die Vertikale



P-622

Highlights

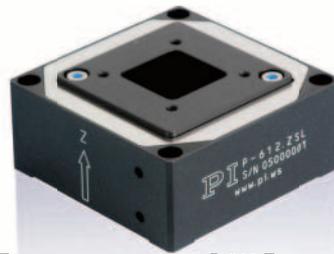
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit
- Ungeregelte Versionen verfügbar

Anwendungen

Vertikale Piezopositionierer werden für die Justage von Optiken in der Lasermesstechnik verwendet, wie auch für die Fokussierung von Proben in der Mikroskopie oder in Testsystemen. PI bietet für unterschiedlichste Anwendungen Vertikalversteller in verschiedenen Bauformen an.



P-611.Z



P-612.Z



S-303.BL

P-620.Z
P-621.Z
P-622.Z

P-611.Z

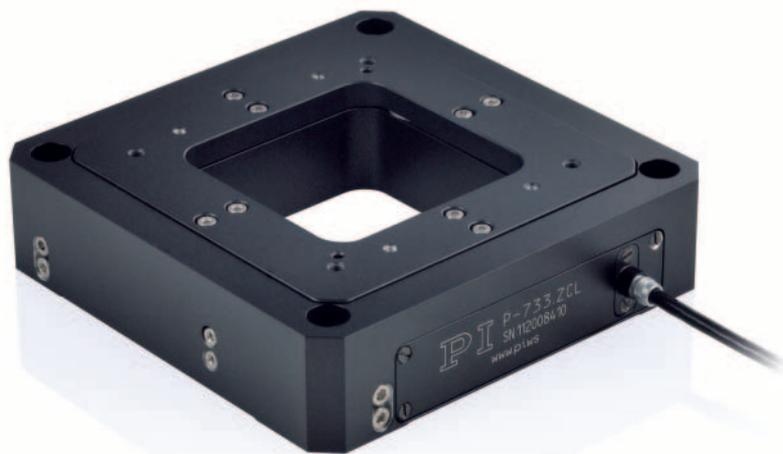
P-612.Z

S-303.BL

	P-620.Z P-621.Z P-622.Z	P-611.Z	P-612.Z	S-303.BL
	Präzise mit langen Stellwegen	Preisgünstig	Kompakt mit Apertur	Hochdynamischer Piezophasenschieber
Optionen	PIHera: XY- und Z-Versionen verfügbar	X-, XY- oder XZ-Versionen verfügbar	XY-Versionen verfügbar	Version mit Pico-actuator® Antrieb für hohe Linearität im unregulierten Betrieb
Abmessung in mm	30 × 30 × 15 bis 50 × 50 × 17,5	44 × 44 × 27	60 × 60 × 27	Ø 30 × 10, unreguliert mit Ø 8 mm Apertur
Stellweg geregelt in µm	bis 250	100	100	2
Belastbarkeit in N	10	15	15	0,5
Sensor	kapazitiv	DMS	DMS	kapazitiv
Auflösung geregelt in nm	bis 0,1	2	1,5	0,03
Linearitätsabweichung in %	0,02	0,1	0,2	1
Wiederholgenauigkeit in nm	±1	<10	±4	0,7
Übersprechen θ_y/θ_z in µrad	<80	±20	–	–
Steifigkeit in N/µm	bis 0,6	0,45	0,63	–
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	bis 1000	460	490	25000

Hub- und Kipp-Piezoscantische

Mit großer Apertur



P-733

Highlights

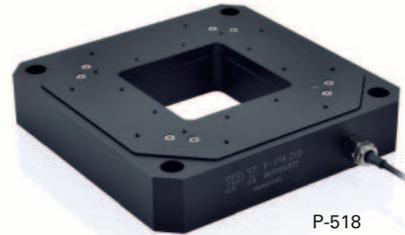
- Kurze Einschwingzeiten im ms-Bereich
- Parallele Kinematik für bestmögliche Präzision bei mehrachsiger Bewegung
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit

Anwendungen

Vertikale Positionierer von PI mit großer Apertur sind mit unterschiedlichen Ausstattungen passend für die jeweilige Anwendung erhältlich. Die Hauptanwendungsbereiche sind die verschiedenen mikroskopischen Verfahren zur Justage und Z-Rasterung (Stacking) von Proben. PI bietet zudem spezielle Scantische für handelsübliche Mikroskope an.



P-541



P-518

P-541.ZC
P-541.TC

P-541.ZS
P-541.TS

P-733.Z

P-518
P-528
P-558

	Referenzklasse	Präzisionsklasse	Referenzklasse: Hohe Führungsgenauigkeit	Referenzklasse: Hohe Dynamik in Hub- und Kippachsen
Optionen	XY-Versionen verfügbar	XY-Versionen verfügbar	XY- und XYZ-Versionen, Vakuumvarianten verfügbar	XY- und XYZ-Versionen, Vakuumvarianten verfügbar
Abmessung in mm	150 × 150 × 16,5	150 × 150 × 16,5	100 × 100 × 25	150 × 150 × 30
Aktive Achsen	Z, θ_x , θ_y	Z, θ_x , θ_y	Z	Z und Z, θ_x , θ_y
Freie Apertur in mm	66 × 66	66 × 66	50 × 50	66 × 66
Stellweg geregelt in μm	100	100	100	bis 200
Kippbereich θ_x , θ_y geregelt in mrad	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	–	bis ± 1
Belastbarkeit in N	50	50	50	100
Sensor	kapazitiv	DMS	kapazitiv	kapazitiv
Auflösung geregelt in nm	0,5	2,5	0,3	1
Auflösung im Kippbereich in μrad	0,08	0,25	–	bis 0,05
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,2	0,03	0,03
Wiederholgenauigkeit in nm	± 2	± 10	± 2	bis ± 5
Übersprechen θ_x / θ_z in μrad	<15	<15	<5	<100
Steifigkeit in N/ μm	0,8	0,8	2,5	bis 4
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	410	410	700	bis 570

Preisgünstige 1- und 2-Achsen-Piezoscantische

Standardklasse mit hoher Dynamik



P-713

Highlights

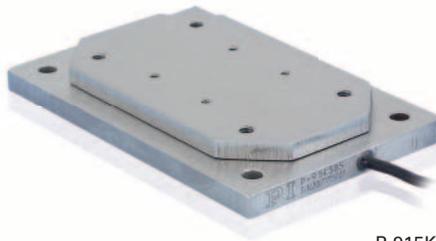
- Schnelle Piezotische
- DMS-Positionssensoren optimiert für hohe Linearität
- Serielle und parallelkinematische Designs
- Hochdynamisch durch Direktantrieb
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit

Anwendungen

Schnelle X- und XY-Piezoscanner für geringe Lasten werden häufig für Microstepping-Verfahren eingesetzt. Durch schnelle, gezielte Bewegungen verbessern sie die Auflösung optischer Systeme. Dazu gehören abbildende Verfahren in derameratechnik oder die Bilderkennung z. B. für Biometrie oder Dokumentarchivierung.



P-712



P-915KXYS



P-915KHDS

P-712

P-713

P-915K XYS

P-915K HDS

	Große Apertur 12 x 15 mm ²	Große Apertur 15 x 15 mm ²	Sondermodell	Sondermodell mit großer Apertur 30 x 45 mm ²
Aktive Achsen	X	X,Y	X,Y	X,Y
Abmessung in mm	40 x 40 x 6	45 x 45 x 6	40 x 60 x 7	85 x 54 x 12,5
Apertur in mm	20 x 15	15 x 15	–	30 x 45
Sensor	DMS	DMS	–	–
Stellweg geregelt in µm	30	15 x 15	4 x 4 ungeregelt	15 x 15 ungeregelt
Auflösung geregelt in nm	2	1	0,4 ungeregelt	0,1 ungeregelt
Linearitätsabweichung in %	0,3	0,3	–	–
Wiederholgenauigkeit in nm	±5	±4	–	–
Übersprechen θ_x/θ_z in µrad	±5 / ±20	±1 bis ±5 / ±40 bis ±50	bis ±50	–
Steifigkeit in N/µm	0,6	0,8	–	10
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	1 550	2 250	> 2 000	1 850
Belastbarkeit in N	5	2	0,5	5

NanoCube®

Preisgünstig Positionieren in bis zu 3 Achsen, Präzisionsklasse



P-611

Highlights

- Preisgünstig
- Modularer Aufbau mehrachsiger Systeme
- DMS-Positionssensoren
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit

Anwendungen

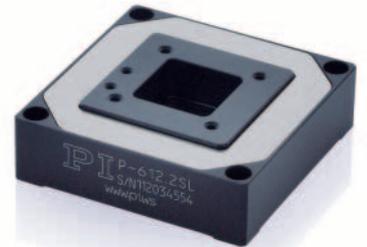
Der NanoCube® ist ein Allrounder in der Nanopositioniertechnik und bietet die günstigste Alternative zu Systemen der Referenzklasse. Die Anwendungen liegen in der Probenjustage, Handling in der Mikrosystemtechnik, Probenmanipulation, Faserpositionierung und Photonik.



P-611.2, P-611.XZ



P-611.3



P-612

P-611.1

P-611.2 P-611.XZ

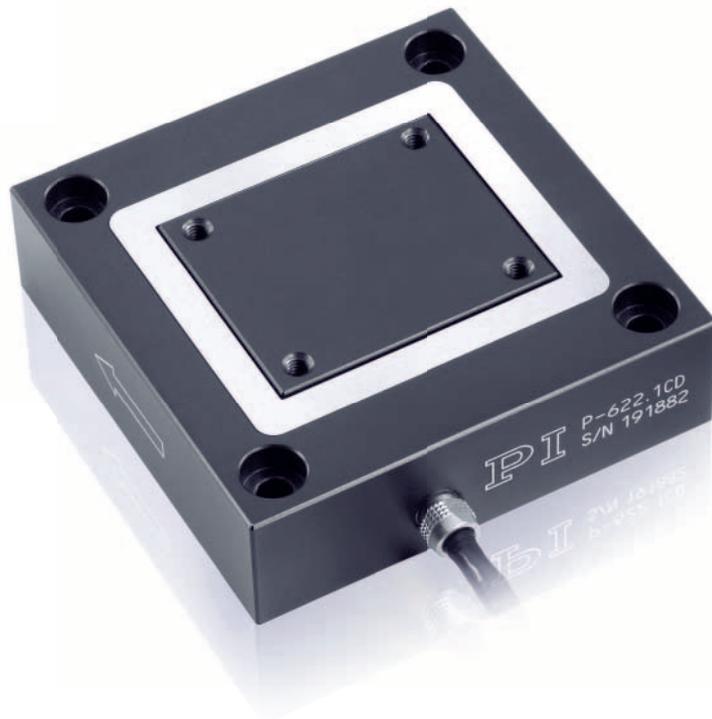
P-611.3

P-612

Aktive Achsen	X	X, Y oder X, Z	X, Y, Z	X, Y
Abmessung in mm	44 × 44 × 17	44 × 44 × 34	44 × 44 × 44,2	60 × 60 × 18
Apertur in mm	–	–	–	38 × 38
Sensor	DMS	DMS	DMS	DMS
Stellweg geregelt in μm	100	100	100	100
Auflösung geregelt in nm	2	2	2	5
Linearitätsabweichung in %	0,1	0,1	0,1	0,4
Wiederholgenauigkeit in nm	<10	<10	<10	<10
Übersprechen in μrad	max. ± 20	max. ± 20	max. ± 20	max. ± 50
Steifigkeit in $\text{N}/\mu\text{m}$	0,2	0,2 bis 0,35	0,3	0,15
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	400	bis 340	bis 350	400
Belastbarkeit in N	15	15	15	15

PIHera Nanopositionierer für 1 bis 3 Achsen

Vielfalt an Piezoscantischen der Referenzklasse



P-622

Highlights

- Hochpräzise Piezopositioniersysteme mit Stellwegen bis zu 1 500 μm
- Kurze Ansprech- und Einschwingzeiten im Millisekundenbereich
- Kapazitive Positionssensoren für höchste Positioniergenauigkeit und Stabilität
- PICMA[®] Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)

Anwendungen

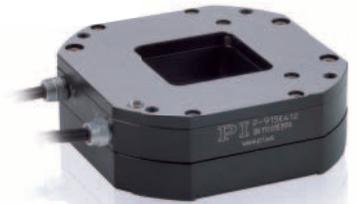
Die Piezoscanner der PIHera Familie zeigen exemplarisch eine Erfolgsgeschichte der Nanopositioniersysteme von PI. Ihr kompakter Aufbau macht sie universell einsetzbar. Ihr Design erlaubt den seriellen Aufbau von mehrachsigen Systemen zu einem sehr günstigen Preis. Anwendungen liegen z. B. in der optischen Messtechnik, der Biotechnologie oder der Rasterkraftmikroskopie.



P-621.2CD



P-622.ZCD



P-763.22C

P-620.1
bis
P-629.1

P-620.2
bis
P-629.2

P-620.Z
P-621.Z
P-622.Z

P-763

	1 Achse	XY-Achsen	Z-Achse	XY-Achsen mit Apertur, vorläufige Werte
Abmessung in mm	30 × 30 × 12 bis 100 × 100 × 22,5	30 × 30 × 21,5 bis 100 × 100 × 40	30 × 30 × 15 bis 50 × 50 × 17,5	60 × 60 × 22
Apertur in mm	–	–	–	30 × 30
Stellweg geregelt in µm	50 bis 1500	50 bis 1500	50 bis 250	200
Auflösung geregelt in nm	0,2 bis 3	0,2 bis 3,5	0,2 bis 1	0,7
Linearitätsabweichung in %	bis 0,02	bis 0,02	0,02	0,02
Wiederholgenauigkeit in nm	±1 bis ±14	±2 bis ±14	±1	±2
Übersprechen in µrad	±3 bis ±10	±3 bis ±30	<20 bis <80	±50
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	bis 1 100	bis 800	bis 1 000	bis 200
Belastbarkeit in N	10	10	10	3

Flache XY - Piezoscanner

Mit großer Apertur für Mikroskopie



P-541

Highlights

- Flexibel anpassbar z. B. für Mikroskope
- Besonders niedriges Profil
- Auswahl an Positionssensoren
- Spielfreie Festkörperführungen
- PICMA® Piezoaktoren für hervorragende Zuverlässigkeit

Anwendungen

Die Nanopositionierer der P-540er Serie sind für Anwendungen in der Mikroskopie ausgelegt. Durch ihre typische flache Bauform sind sie leicht in bestehende Aufbauten zu integrieren. Je nach Aufgabenstellung variiert das Antriebssystem von besonders dynamisch für Tracking-Anwendungen bis zu langen Stellwegen für Superresolution-Mikroskopie.



P-545

P-541.C
P-542.C

P-541.S
P-542.S

P-541.2
DD

P-545
PI nano[®]

	Präzise durch kapazitive Sensoren Referenzklasse	Preisgünstige Version mit DMS-Sensoren Präzisionsklasse	Direkt getrieben und dynamisch Referenzklasse	Preisgünstig für Mikroskopie, bis 3 Achsen Präzisionsklasse
Aktive Achsen	X, Y	X, Y	X, Y	X, Y, (Z)
Abmessung in mm	150 × 150 × 16,5	150 × 150 × 16,5	150 × 150 × 16,5	217 × 150 × 20
Apertur in mm	80 × 80	80 × 80	80 × 80	82 × 65
Sensor	kapazitiv	DMS	kapazitiv	piezoresistiv, kapazitiv
Stellweg geregelt in µm	100 bis 200	100 bis 200	45	70 bis 200
Auflösung geregelt in nm	0,3 bis 0,7	2,5 bis 4	0,3	<1
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,2	0,03	0,1
Wiederholgenauigkeit in nm	<±5	<±10	<±5	–
Übersprechen in µrad	<±5 bis ±10	<±5 bis ±10	<±3	–
Kinematisches Design	parallel	parallel	parallel	seriell
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	bis 255	bis 255	1 550	1 000 (X, Y), 800 (Z)
Belastbarkeit in N	20	20	20	5

2-Achsen-Flexure-Scanner mit hervorragender Ablaufgenauigkeit

Piezosysteme der Referenzklasse



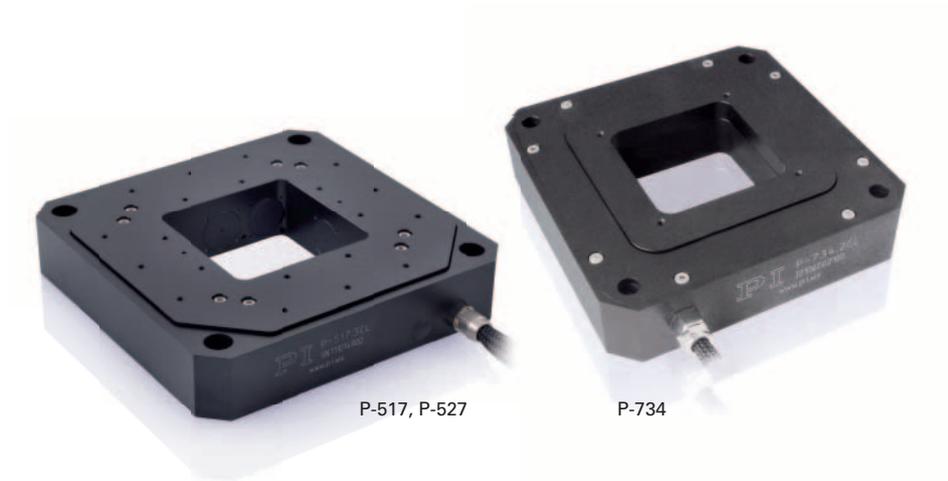
P-733

Highlights

- Bewegung in X und Y
- Optimierte Ablaufgenauigkeit
- Parallelkinematik mit kapazitiven Sensoren
- Spielfreie Festkörperführungen
- PICMA® Piezoaktoren für hervorragende Zuverlässigkeit
- Große Apertur

Anwendungen

Nanopositionierer der Referenzklasse eignen sich für die Probenpositionierung in der hochauflösenden, nichtoptischen Mikroskopie.



P-733.2

P-733.2
DD

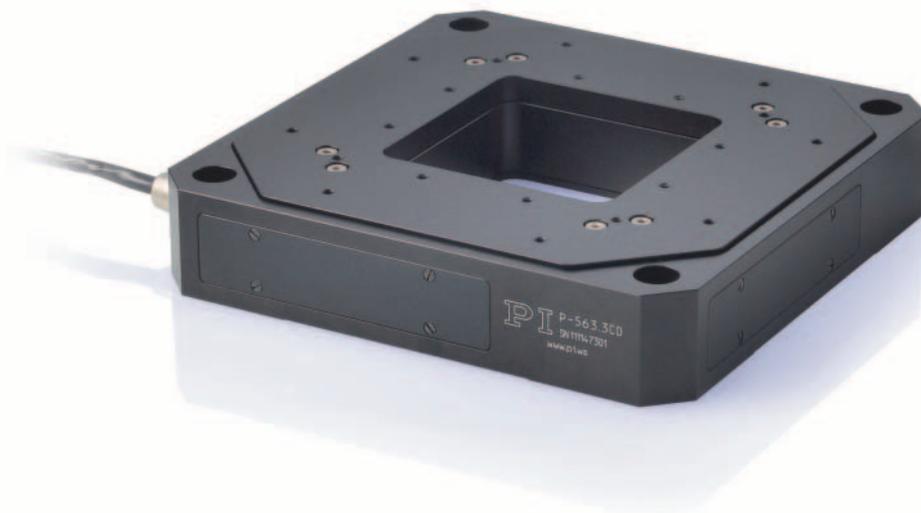
P-517.2
P-527.2

P-734

	Kompakt und präzise	Direkt getrieben und dynamisch	Stellweg bis 200 μm	Ablaufebenheit <5 nm
Abmessung in mm	100 × 100 × 25	100 × 100 × 20	150 × 150 × 30	130 × 130 × 30
Apertur in mm	50 × 50	50 × 50	66 × 66	56 × 56
Stellweg geregelt in μm	100	30	100 bis 200	100
Auflösung geregelt in nm	0,3	0,1	1 bis 2	0,3
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,03	0,03	0,03
Wiederholgenauigkeit in nm	< ± 2	< ± 2	± 5 bis ± 10	< $\pm 2,5$
Übersprechen in μrad	< ± 3 bis ± 10	< ± 5 bis ± 10	–	< ± 3 bis ± 10
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	500	2 230	bis 450	500
Belastbarkeit in N	50	50	50	20

3-Achsen-Piezoscantische

Piezosysteme der Referenzklasse



P-563

Highlights

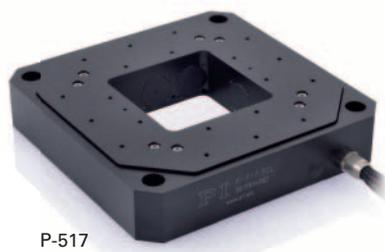
- Bewegung in X, Y und Z
- Hohe Ablaufgenauigkeit
- Große Apertur
- Parallelkinematik mit kapazitiven Sensoren
- Spielfreie Festkörperführungen
- PICMA® Piezoaktoren für hervorragende Zuverlässigkeit

Anwendungen

Sowohl in der optischen als auch der nichtoptischen Mikroskopie scannen 3-achsige Nanopositionierer eine Probe in der Ebene und justieren sie entlang der Messachse. Weitere Einsatzgebiete liegen in der Interferometrie, der 3D-Laserlithographie und in Nanoimprinttechniken.



P-733



P-517

P-733.3

P-517.3 P-527.3

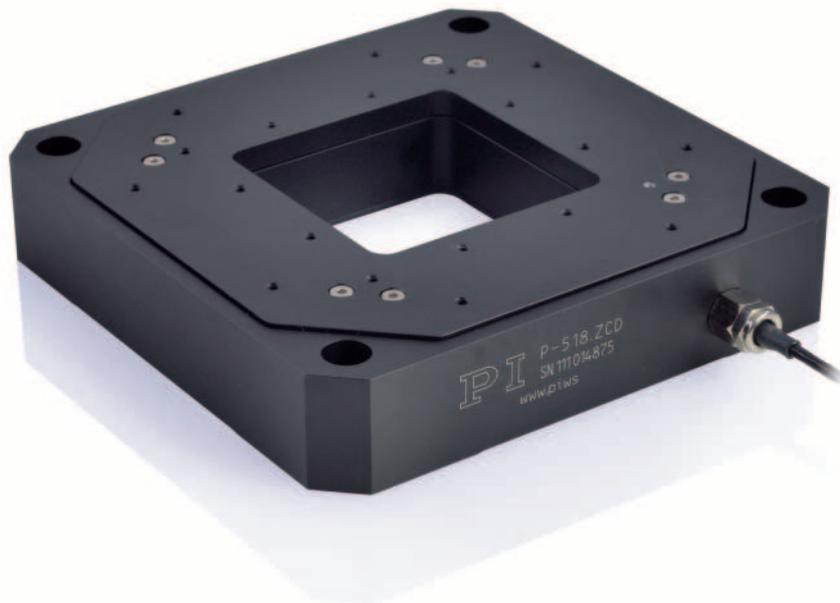
P-561 P-562 P-563

P-561.3 DD

	Kompakt und präzise Hochdynamische Z-Achse	Hohe Dynamik auf bis zu 200 μm Hochdynamische Z-Achse	PIMars Serie, auch für 6 Achsen verfügbar Großer Stellweg auch in Z	Direkt getriebener PIMars mit hoher Dynamik
Abmessung in mm	100 × 100 × 25	150 × 150 × 30	150 × 150 × 30	150 × 150 × 30
Apertur in mm	40 × 40	66 × 66	66 × 66	66 × 66
Stellweg geregelt Z in μm	10	20	100 bis 300	15
Stellweg geregelt X,Y in μm	100 × 100	100 × 100 bis 200 × 200	100 × 100 bis 300 × 300	45 × 45
Auflösung geregelt X,Y in nm	0,3	1 bis 2	0,8 bis 2	0,2
Auflösung geregelt Z in nm	0,2	0,1	0,8 bis 2	0,2
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,03	0,03	0,01
Wiederholgenauigkeit in nm	<2	± 1 bis ± 10	2	2
Übersprechen in μrad	$< \pm 10$	–	± 6 bis ± 10	± 3
Übersprechen um X,Y bei Bewegung in Z in μrad	$< \pm 5$	–	± 15 bis ± 25	± 3
Resonanzfrequenz X,Y in Hz	460	bis 450	bis 190	920
Resonanzfrequenz Z in Hz	1 400	1 100	bis 380	1 050
Belastbarkeit in N	50	50	50	50

Präzisionspositionierer für bis zu 6 Achsen

Piezosysteme der Referenzklasse



P-518

Highlights

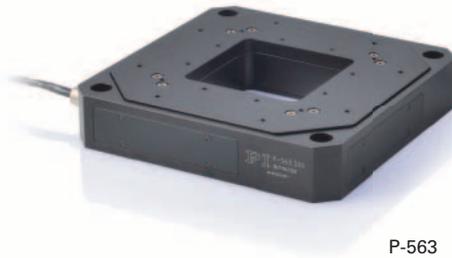
- Parallelkinematik mit kapazitiven Sensoren
- Kapazitive Positionssensoren mit höchster Linearität
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit

Anwendungen

Die differenzielle Ansteuerung der Aktoren für eine Bewegungsrichtung kombiniert mit einem digitalen Motion Controller ermöglicht die Justage von Proben oder Messsonden nicht nur in den linearen Achsen sondern zusätzlich in Kipp- und Drehwinkeln.



P-517



P-563



P-587

P-517.R
P-527.R

P-518.T

P-562.6

P-587

	Rotationsachsen mit Apertur	Kippachsen mit Apertur	PIMars, kompakte Bauweise	Große Stellwege
Aktive Achsen	X, Y, θ_z	Z, θ_x , θ_y	X, Y, Z, θ_x , θ_y , θ_z	X, Y, Z, θ_x , θ_y , θ_z
Abmessung in mm	150 × 150 × 30	150 × 150 × 30	150 × 150 × 30	240 × 240 × 50
Apertur in mm	66 × 66	66 × 66	66 × 66	–
Stellweg geregelt in μm	100 bis 200	50 bis 200	200	800, 800, 200
Auflösung geregelt in nm	0,3 bis 1	bis 0,5	1	0,7 bis 2,2
Kippwinkel geregelt in mrad	± 1	$\pm 0,25$ bis ± 1	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Winkelauflösung geregelt in μrad	0,01	0,05	0,1	bis 0,1
Linearitätsabweichung X, Y, Z / θ_x , θ_y , θ_z in %	0,03	0,03	0,01 / 0,1	0,01 / 0,1
Wiederholgenauigkeit X, Y / Z in nm	± 5	± 5 bis ± 10	± 2 / ± 3	± 3 / ± 2
Wiederholgenauigkeit θ_x , θ_y / θ_z in μrad	$\pm 0,5$	bis $\pm 0,03$	$\pm 0,1$ / $\pm 0,15$	$\pm 0,1$ / $\pm 0,15$
Resonanzfrequenz ohne Last X / Y / Z in Hz	450	bis 570	110 / 110 / 190	103 / 130 / 235
Belastbarkeit in N	50	100	50	50

PicoCube® XYZ-Piezoscanner für AFM



P-313

Highlights

- Picometer-Auflösung
- Parallelkinematischer Aufbau
- Hohe Dynamik durch Direktantrieb
- Nichtmagnetische und UHV-Versionen verfügbar

Anwendungen

Die Rasterkraftmikroskopie (AFM) ermöglicht Oberflächenmessungen höchster Auflösung bis auf atomare Level und dringt damit in Bereiche vor, die sich mit Lichtmikroskopie nicht mehr auflösen lassen. Das Verfahren kann Aufschluss über die Topografie, die chemische Oberflächenbeschaffenheit, Defekte etc. geben. Zu den typischen Einsatzbereichen gehören z. B. Life Science Technologien ebenso wie die Materialforschung oder die Halbleiterinspektion. Piezobasierte Scansysteme ermöglichen die nötige Präzision bei der Positionierung von Messspitze und Probe, und sorgen damit für die gewünschte hohe Ortsauflösung und hohe Dynamik.



P-363



E-536

P-313

P-363

E-536 PicoCube® Piezo- controller

	Picoactuator® Technologie für hochlineare Auslenkung ohne Positionssensor		<ul style="list-style-type: none"> ■ Mit / ohne Regelmodul ■ Mit / ohne Digitalinterface ■ Ausgangsspannung -250 bis +250 V ■ Spitzenstrom pro Kanal bis 200 mA, <3 ms ■ Bandbreite, Kleinsignal 10 kHz ■ Welligkeit, Rauschen, 0 bis 100 kHz <0,8 mV_{rms}
Aktive Achsen	X, Y, Z	X, Y, Z	
Abmessung in mm	30 x 30 x 29,4	30 x 30 x 29,4	
Sensor	–	kapazitiv	
Stellweg geregelt in µm	bis 1	5	
Auflösung geregelt in nm	–	0,1	
Linearitätsabweichung in %	0,2	0,05	
Übersprechen in µrad	–	0,5	
Übersprechen bei Bewegung in Z in µrad	–	0,2	
Resonanzfrequenz ohne Last X, Y / Z in Hz	4000 / 11000	3100 / 9800	
Belastbarkeit in N	10	10	
Betriebsspannung in V	±250	±250	

Schnelle Kippspiegel

Aktive Optiken



S-334

Highlights

- Zwei orthogonale, parallelkinematische Kippachsen mit gemeinsamem Drehpunkt
- Optionale Linearachse zur Anpassung der optischen Weglänge
- Kompaktes Design
- Betriebsfrequenzen von 100 Hz bis >1 kHz
- PICMA® Piezoaktoren für höchste Zuverlässigkeit
- Optionale Dehnmessstreifen-Sensoren für hohe Genauigkeit
- Reibungs- und spielfreie Festkörperführungen (Flexures)

Anwendungen

Piezobasierte Kippspiegelsysteme werden aufgrund ihrer hohen Dynamik und den beiden Kippachsen mit gemeinsamem Pivotpunkt zur Laserstrahlsteuerung und -führung eingesetzt. Anwendungen liegen in der industriellen Materialbearbeitung oder in der Medizintechnik, dort zum Beispiel in der Ophthalmologie oder Dermatologie. Die Bildstabilisierung ist ein weiteres Anwendungsfeld, dem die hohe Dynamik des Systems zugute kommt.



S-330



S-325



S-340

S-330

S-334

S-325

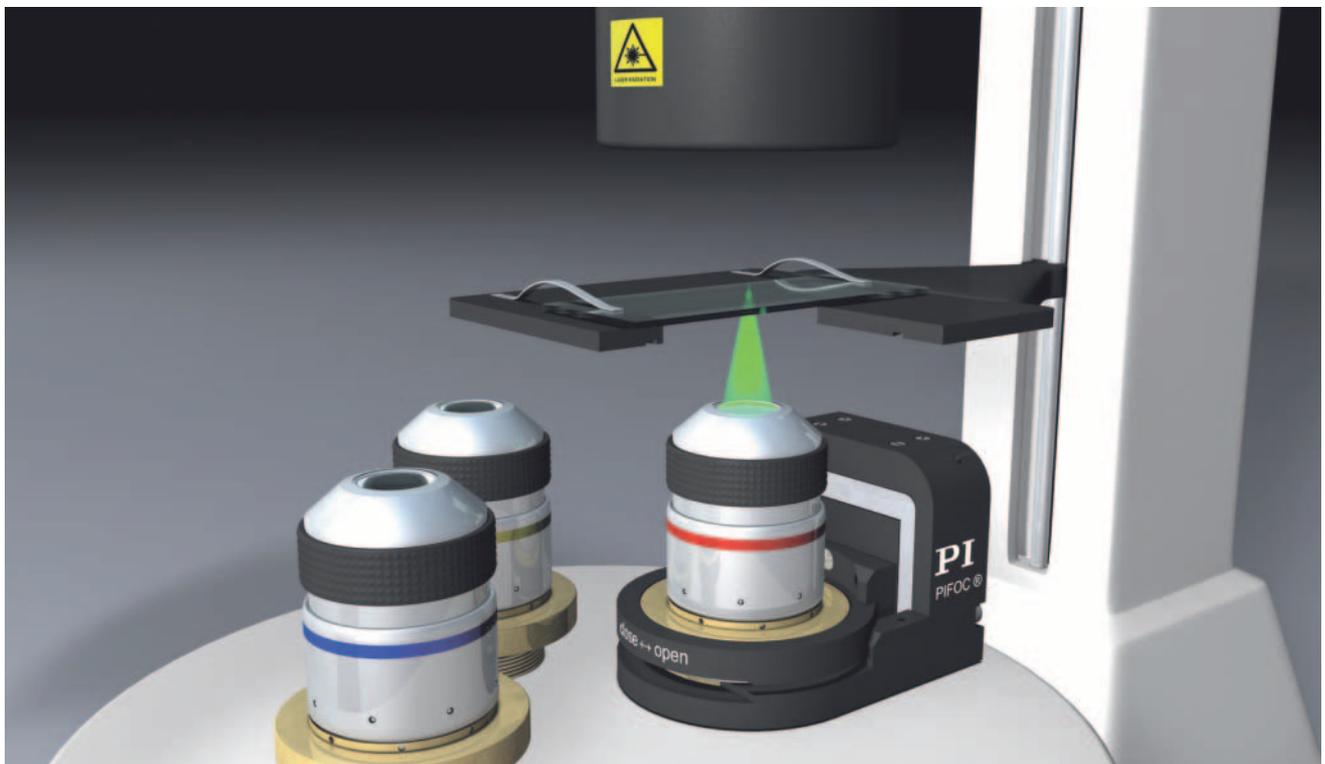
S-340

	Schnell und flexible Kippwinkel	Große Kippwinkel mit vormontiertem Spiegel	Schnell mit zusätzlicher geregelter Z-Achse	Große Plattform aus verschiedenen Materialien wie Invar, Aluminium, Titan
Abmessungen in mm	Ø 25 x 37 bis 91	25 x 33 x 38	Ø 25 x 50	60 x 60 x 56
Aktive Achsen	θ_x, θ_y	θ_x, θ_y	θ_x, θ_y, Z	θ_x, θ_y
Integrierter Sensor	DMS	DMS	DMS	DMS
Kippwinkel* geregelt in mrad	bis 10	25 und 50	5	2
Auflösung geregelt in μ rad	0,05 bis 0,5	1 und 5	0,05	0,2
Linearitätsabweichung in %	0,25	0,05	0,05	0,1
Resonanzfrequenz unbelastet in kHz	bis 3,7	1 und 3 mit Spiegel	2	1,4
Plattfordurchmesser in mm	25	12,5	25	59
Stellweg geregelt in Z in μ m	–	–	30	–
Auflösung geregelt in Z in nm	–	–	0,6	–

*Mechanischer Winkel: Die optische Strahlablenkung ist doppelt so groß.

Z-Piezoscanner und Objektivfokussierer

Objektiv und Probe schnell und präzise positionieren



PIFOC® im inversen Mikroskop

PIFOC® Objektivscanner mit Piezoantrieb erreichen Einschwingzeiten bis 10 ms auf Stellwegen bis zu 1 mm. Durch QuickLock-Gewindeinsätze können Objektive schnell und unkompliziert getauscht werden. Im Bild ein PIFOC® im inversen Mikroskop, wo die Strahlführung auf die Probe von unten erfolgt.



Positionieraufgaben in der Mikroskopie

Seite 46



PIFOC® Objektivscanner mit Millisekunden-Einschwingzeit

Seite 48



**Schnelle Z-Probenpositionierung für
dynamische Fokusjustage und Imaging**

Seite 52

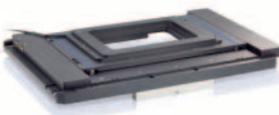
Mikroskopiescanner mit großer freier Apertur



Mehrachsige hochgenaue Probenpositionierung mit Plnano®

Seite 54

Bis zu 200 µm in XY und XYZ



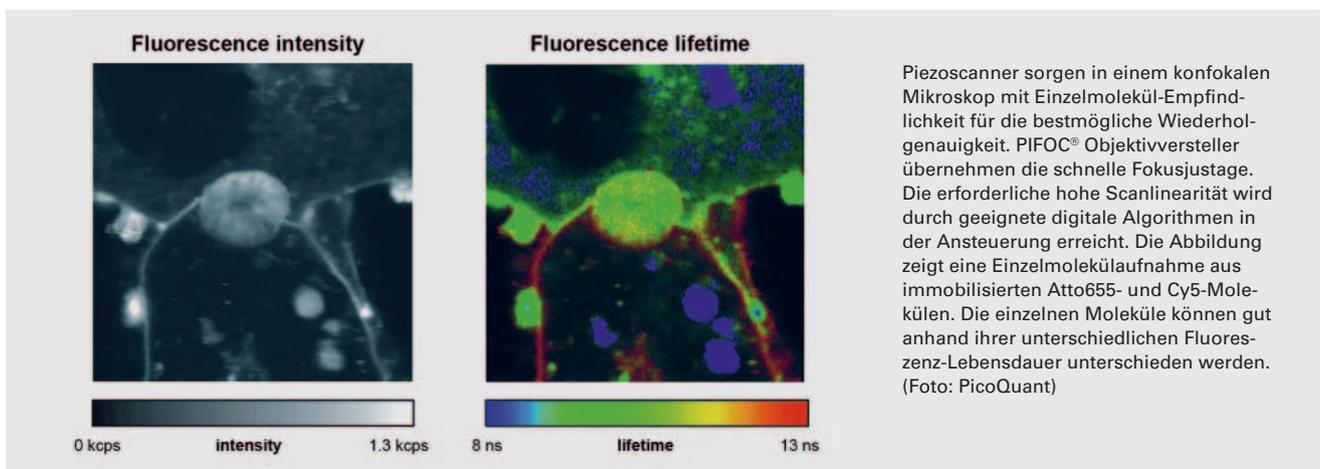
Präzisionskreuztische

Seite 216

Für Mikroskopie und Inspektionsaufgaben

Z-Positionieraufgaben in der Mikroskopie

Die optische Mikroskopie stellt je nach Verfahren unterschiedliche Anforderungen an Positionierer und Scanner für Objektive und Proben. Die Anwendung bestimmt dabei, welche Achsen bewegt werden, ihren Hub und die benötigte Genauigkeit. Bei der Untersuchung einer Probe sind oft viele Einzelaufnahmen in kürzester Zeit erforderlich oder Screenings fordern hohe Durchsatzraten – beides stellt hohe Anforderungen an die Dynamik der Systeme und das Gleichlaufverhalten beim Scan. Außerdem sollte die Bauform in bestehende Mikroskope passen und darf den Strahlengang nicht negativ beeinflussen.



Z-Bewegung in Richtung der optischen Achse

In Lichtmikroskopen bieten PI Produkte eine Z-Feinverstellung für verschiedene Anwendungsbereiche, wie z. B. schnelle optische Serienschritte (Z-Stacks, Bildstapel) für 3D-Verfahren, konfokale oder Multiphotonenmikroskopie oder Autofokusanwendungen bzw. Driftkompensation. Die geforderte Schrittweite liegt, z. B. bei der Z-Stack-Akquisition, im Bereich der Auflösungsgrenze des Mikroskops.

Grundsätzlich kann dazu entweder die Probe oder das Objektiv verstellt werden. Die hohen Anwendungsanforderungen an Präzision und geringe Einschwingzeit sind identisch. Bei aufrechter Mikroskopie und großen oder sehr empfindlichen Proben geht die Tendenz dabei zur Objektivverstellung, bei inverser Mikroskopie und kleiner Probe zur Probenverstellung.

Systeme mit Stellwegen bis 500 μm , auf Anfrage sogar bis 2 mm, sind möglich. Auch bei großen Objektiven werden kurze Einschwingzeiten von ca. 10 ms erreicht und damit hohe Durchsatzraten ermöglicht. Speziell für Makroobjektive mit großer numerischer Apertur (NA) gibt es PIFOC® Versteller mit einem freien Durchgang bis 29 mm bei M32-Gewinde.

PIFOC® Objektivscanner, mit ihren frei austauschbaren PI QuickLock-Gewindeeinsetzen, ermöglichen die Ankopplung an das Mikroskop sowohl für unterschiedliche Gewindetypen als auch in unterschiedlichen Winkeln. Die PIFOC® werden einfach mit dem QuickLock zwischen Mikroskoprevolver und Objektiv eingesetzt. Nach dem Einschrauben des Adapters in den Revolver wird der PIFOC® darin in der gewünschten Ausrichtung befestigt. Da der Objektivpositionierer selbst nicht gedreht werden muss, ist die Kabelführung unproblematisch.



QuickLock-Adapter vereinfachen die Montage des Objektivscanners am Mikroskop

Objektiv oder Probe verstellen

Neben den Objektivverstellern stehen für die Probenverstellung mehrere Piezotischserien mit sehr niedrigem Profil und unterschiedlichen Aperturen zur Verfügung, abgestimmt auf 3x1"-Objekträger oder Einsätze bis 160 mm x 110 mm. Der Hub beträgt bis 500 µm.

Für zusätzliches Tracking oder Feinjustageaufgaben senkrecht zur optischen Achse bietet PI integrierte piezobasierte XYZ-Scanner an.

Autofokus oder externe Positionsvorgabe

Das Autofokussignal kann als Regelgröße für den konstanten Abstand zwischen Probe und Objektiv verwendet werden und damit aktiv Materialdrift kompensieren. Durch Umstellen eines einzigen Steuerparameters in der Elektronik kann der Piezoversteller wieder auf den internen Sensor referenziert und dann z. B. für Z-Stack-Aufnahmen benutzt werden.

Anwendungsgebiete

- Schnelle, picometergenaue 3D-Oberflächeninspektion
- Schnelle Fokussierung für Z-Stack-Akquisition
- Autofokussierung
- Driftkompensation bis in den Nanometerbereich
- 3D-Laserlithografie in Biotechnologie und Medizintechnik



Das piezobasierte Nanopositioniersystem bewegt den kompletten Revolver mit den unterschiedlichen Objektiven in Richtung der Z-Achse (Foto: Nikon Instech / PI)

PIFOC® Objektivscanner

Mikroskopobjektive nanometergenau fokussieren



P-725

Highlights

- Feinpositionierung von Objektiven mit Sub-nm Auflösung und ms-Einschwingzeit
- Höchste Linearität durch Direktmetrologie mit kapazitiven Sensoren
- Minimaler Objektivversatz und hervorragende Fokusstabilität durch spielfreie Parallelflexureführung
- Übertreffende Lebensdauer dank PICMA® Piezoaktoren
- Längere Stellwege für Multiphotonenmikroskopie

Anwendungen

Neben allen gängigen Mikroskopieverfahren liegen die Anwendungen auch in der 3D-Lithografie oder der industriellen Oberflächenprüfung mit Weißlicht-Interferometrie (WLI)-Verfahren. Für alle Modelle gibt es eine Reihe von QuickLock-Gewindeeinsätzen mit unterschiedlichen Gewindemaßen, die die Montage vereinfachen. Von vielen Modellen sind preisgünstige Scansysteme inklusive digitalem Motion Controller erhältlich.



P-721



P-725KHDS



P-726

P-721

P-725

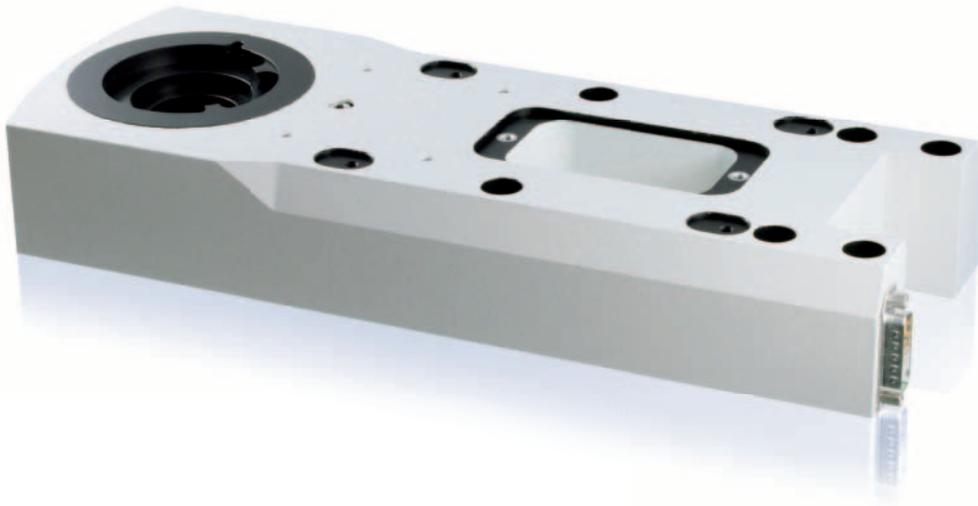
P-725K HDS

P-726

	P-721		P-725	P-725K HDS	P-726
	Kostengünstig, im System mit Controller		Verschiedene Stellwege, im System mit Controller	Sondermodell mit hoher Dynamik	Sehr steif, für schwere Objektive
Max. Abmessungen in mm	40 × 49,5 × 65		46 × 40,5 × 68		Ø 65 × 50,7
Max. Objektivdurchmesser in mm	39		39	39	M-32
Stellweg geregelt in µm	100		100, 250, 400	400	100
Sensor	kapazitiv	DMS	kapazitiv	kapazitiv	kapazitiv
Auflösung geregelt in nm	0,7	5	bis 0,65	1,2	0,4
Linearitätsabweichung in %	0,03	0,2	0,03	0,03	0,02
Wiederholgenauigkeit in nm	±5	±10	±5	±5	±3
Druck-/Zugbelastbarkeit in N	100 / 20		100 / 20	100 / 20	100 / 50
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	580		bis 470	bis 620	1 120
Steifigkeit in N/µm	0,3		bis 0,23	bis 0,4	3,4
Übersprechen in X,Y in nm	100		20 je 100 µm Stellweg	20 je 100 µm Stellweg	50

PIFOC® Objektivscanner

Maximale Dynamik auch für Mikroskoprevolver



P-721K

(Foto: Nikon Instech/PI)

Highlights

- Höchste Linearität durch Direktmetrologie
- Minimaler Objektivversatz und hervorragende Fokusstabilität durch spielfreie Parallelflexureführung
- Überraschende Lebensdauer dank PICMA® Piezoaktoren

Anwendungen

Unterschiedliche Mikroskopieverfahren haben definierte Anforderungen an die Dynamik, den Stellweg und die Flexibilität der Piezo-Z-Antriebe. So erfordern Hochgeschwindigkeitsmessungen unter dem Mikroskop, wie sie z. B. in der Oberflächen- und Materialuntersuchung benötigt werden, neben der besonderen Dynamik auch das stabile Fokussieren zum Teil über lange optische Wege. Häufig müssen mehrere Objektive an einem Mikroskoprevolver flexibel gewechselt werden. Das schnelle Anfahren unterschiedlicher Fokussierebenen mit diesen entsprechend höheren Lasten stellt besondere Anforderungen an die Z-Scanmethode.



P-725.DD



N-725



P-721KTPZ



P-721KPTZ

P-725.DD

N-725

P-721K TPZ

P-721K PTZ

	P-725.DD	N-725	P-721K TPZ	P-721K PTZ
	Kürzeste Einschwingzeit von unter 5 ms mit Mikroskopobjektiv	2 mm Stellung mit Piezolinearmotor	Sondermodell für den Mikroskoprevolver	Sondermodell für den Mikroskoprevolver
Abmessungen in mm	52 × 71 × 40,5	52 × 75 × 40	44,5 × 42 × 53	
Apertur in mm	34	21		
Stellweg geregelt in µm	18	2 000	80	150
Sensor	kapazitiv, DMS	Linearencoder	kapazitiv	kapazitiv
Auflösung geregelt in nm	bis 0,2	20	10	2
Linearitätsabweichung in %	bis 0,04	0,1	0,03	0,03
Wiederholgenauigkeit in nm	bis ±1,5	±25	±10	±10
Druck-/Zugbelastbarkeit in N	100 / 20	10	20	20
Resonanzfrequenz ohne Last in Hz	1 180	-	215, bei voller Bestückung	410
Steifigkeit in N/µm	1,5	0,5		
Übersprechen in X,Y in nm	150	<100		

Schnelle Z-Probenpositionierung für dynamische Fokusjustage und Imaging

Mikroskopiescanner mit großer freier Apertur



P-737

Highlights

- Stabile Positionierung von Objektträgern bis zu Mikrotiterplatten
- Ansprechzeiten im Bereich weniger Millisekunden
- Hohe Zuverlässigkeit auch in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit durch PICMA® Piezoaktoren
- Minimaler Versatz und hervorragende Fokusstabilität durch spielfreie Parallelflexureführung

Anwendungen

Z-Stapelaufnahmen für 3D-Imaging oder Fluoreszenzmikroskopie benötigen hohe Präzision und Dynamik. Piezogetriebene Probenscanner sind typischerweise 10 bis 20 mal schneller als konventionelle Schrittmotoren. Dadurch sind effizientere Durchlaufzeiten und höhere Datenerfassungsraten möglich. Auch Funktionen wie Autofokus oder Driftkompensation sind deutlich schneller.



P-736

P-736

P-737

E-709

P-736

P-736

P-737

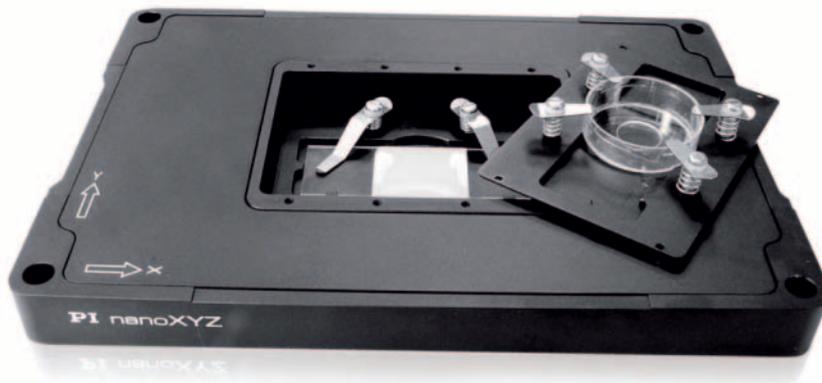
E-709

	P-736	P-736	P-737	E-709
	Plnano® Probenversteller	Plnano® Probenversteller für Mikroskope von Nikon und Olympus	PIFOC® Probenfokussierer, passt an XY-Probenpositionierer der führenden Hersteller	Piezo Servocontroller mit digitalem Regler
Abmessung in mm	110 × 160 × 20	156 × 237 × 20	138 bis 150 × 156 × 27	<ul style="list-style-type: none"> ■ Im Lieferumfang von P-736 Systemen enthalten ■ Digitale Schnittstellen ■ Analogeingang ■ Softwaretreiber für LabVIEW ■ Wird unterstützt von MetaMorph, µManager, MATLAB ■ Zahlreiche Funktionen wie Funktionsgenerator, Datenrecorder, Makroprogrammierung, AutoZero, Trigger I/O ■ Abmessungen 160 mm × 96 mm × 33 mm
Freie Apertur in mm	65 × 93 passend für Objektträger	110 × 160 passend für Mikrotiterplatten	90 × 128	
Stellweg geregelt in µm	100, 200	220	100, 250, 500	
Einschwingzeit bei 10 % Schrittweite in ms, mit Probenhalter (Last <100 g)	5	20	24 bis 50, abhängig vom Stellweg	
Sensor	piezoresistiv	kapazitiv, piezoresistiv	DMS	
Auflösung geregelt in nm	bis 0,4	1	2,5 bis 5	
Empfohlene Last für dynamischen Betrieb in kg	0,5	0,5	0,5	

Zubehör wie passende Objekthalter verfügbar.

Mehrachsige hochgenaue Probenpositionierung mit PInano®

Bis zu 200 µm in XY und XYZ



P-545 PInano®

Highlights

- Geringe Bauhöhe von 20 mm erlaubt platzsparende Integration im Mikroskop
- Versenkte Einlegerahmen, dadurch Objektivrevolver frei drehbar
- Große zentrale Öffnung für Objektträger und Petrischalen
- Hohe Zuverlässigkeit auch in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit durch PICMA® Piezoaktoren
- Ergänzung durch manuellen Kreuztisch für XY-Zustellung über bis zu 25 mm x 25 mm

Anwendungen

Screening, konfokale Mikroskopie oder Biotechnologie profitieren von der Feinverstellung der Proben um Schrittweiten im Nanometerbereich. Der passende Mehrachsen-Controller ist bereits im Lieferumfang enthalten und kann wahlweise digital oder über ein analoges Signal angesteuert werden.



P-545 Plnano®



E-545

P-545 Plnano® Cap

P-545.R Plnano®

P-545 Plnano® TRAK

E-545

	Ideal für Superresolu- tion-Mikroskopie	Kostenoptimiertes Design mit piezoresis- tiven Sensoren	Hochdynamischer Piezotracker	Plnano® Piezo- Servocontroller, im Lieferumfang von P-545 Systemen enthalten
Apertur in mm	90 × 60	90 × 60	90 × 60	■ Digitale Schnittstellen
Stellweg geregelt in µm	200 × 200 × 200	200 × 200 × 200	70 × 70 × 50	■ BNC Analogeingang
Sensor	kapazitiv	piezoresistiv	piezoresistiv	■ Softwaretreiber für LabVIEW
Auflösung geregelt in nm	1	1	<1	■ wird unterstützt von MetaMorph, µManager, MATLAB
Empfohlene Last für dyna- mischen Betrieb in kg	0,5	0,5	0,5	■ Zahlreiche Funktionen wie Funktionsgene- rator, Datenrecorder, Makroprogrammierung, AutoZero, Trigger I/O
Grundfläche in mm	150 × 182 bis 200 × 217	150 × 182 bis 200 × 217	150 × 182 bis 200 × 217	

Zubehör wie passende Objekthalter verfügbar.

Precision Motion Control

Piezoverstärker und -controller für die Nanopositionierung

Auswahlkriterien für Piezoverstärker und -controller von PI

Die Entscheidung für einen Piezocontroller hängt von der konkreten Anwendungssituation ab. Verschiedenste Kriterien wie zum Beispiel Einschränkungen im Bauraum, die Anzahl der Achsen, oder die Art der Ansteuerung bestimmen, welcher Verstärker oder Controller der richtige ist.

Ihre Applikation erfordert...	Welcher Controller passt?
häufige Lastwechsel oder Änderung des Betriebsmodus	Parameter unkompliziert per Software ändern: Jeder digitale Controller von PI, auch die E-609-Serie
günstigen Preis	Digitalcontroller: E-709 oder E-609; analoge Controller: E-610, E-625, E-621
3 bis 6 Kanäle	Digitalcontroller: E-725, E-712; analoge Controller: E-500, E-612
mehr als 6 Kanäle	Vernetzbare Controller wie E-621, E-625, E-665; modulare Controller wie E-712
Auflösung	Digitale High-End Lösungen von PI wie E-753, E-712, E-725; jeder analoge Controller von PI
beste dynamische Linearität	Digitale High-End Lösungen von PI mit DDL Option
Langzeitstabilität (thermisch)	Alle Piezocontroller und -verstärker von PI
Linearität / Genauigkeit	Jeder digitale Controller von PI, auch die E-709-Serie: Digitalisierungspolynome bis 5. Ordnung; zusätzliche DDL-Option
Ansteuerung mit analogem Eingangssignal	Jeder analoge Controller von PI; digitale E-709, E-609, E-753, E-725 oder E-712 mit Analog IN Option
Echtzeit-Kommandierung	Digitalcontroller mit PIO-Option; SPI-Schnittstelle, TCP/IP für Übertragungsraten bis zu 1 kHz; alle Controller über Analog I/O
Regelung in Echtzeit oder mit hohen Servoraten	Jeder analoge Controller von PI; E-712, E-753, E-725
schnelle, unperiodische Bewegungen in mehreren Achsen, Tracking	E-712
virtuelle Achsen und Mehrachsen-Synchronisation	Digitale Mehrachsencontroller wie E-712, E-725
digitale Kommunikationsinterfaces; benutzerdefinierte periodische Bewegungsprofile; Datenrecorder	Jeder digitale Controller von PI; E-625, E-621, E-665; modulare Controller mit digitaler Bedieneinheit E-517
Stand-alone Funktionalität mit Makros	Modulare Controller mit digitaler Bedieneinheit E-517
Trigger I/Os	Jeder digitale Controller von PI; außerdem E-625, E-621, E-665; modulare Controller mit digitaler Bedieneinheit E-517



Digitale und analoge Controller für Piezonanopositionierer

Seite 58



OEM-Piezoverstärkermodule

Seite 64



Piezoverstärker / Controller mit hoher Dynamik
Für Piezoaktoren bis 1000 V Ansteuerspannung

Seite 66



Piezoachsen mit Sonder-Ansteuerspannungen
Vorkonfigurierte Mehr- und Einachsen-Controller

Seite 68



Digitale Controller für Piezomotoren
Beste Systemoptimierung und Bedienkomfort: Plug-and-play

Seite 70

Digitale Controller für einachsige Piezonanopositionierer

Beste Systemoptimierung und Bedienkomfort



E-753

Highlights

- Digitaler Regler mit Linearisierungsalgorithmen, Parametereinstellungen per Software und Notchfilter zur Schwingungsunterdrückung
- Positionsregelung für kapazitive, DMS- und PRS-Dehnmessstreifen-Sensoren
- ID-Chip-Erkennung für automatischen Abgleich des Controllers auf die Piezomechanik
- Funktionsgenerator, Trigger I/O, Datenrecorder
- Zusätzlicher, breitbandiger Analogeingang für Sollwerte oder Sensor



E-609,
E-709 OEM-Version



E-709 Tischgerät



E-709.CHG

E-709
E-609

E-709.
CHG

E-753

	Günstiger digitaler Piezocontroller, universell einsetzbar	Digitaler Hochleistungscontroller für hohe Dynamik	Leistungsfähiger Prozessor ermöglicht Linearisierungsalgorithmen höherer Ordnung, 24 Bit D/A-Wandler
Schnittstellen / Kommunikation	Analog, USB, digitale RS-232, schnelle serielle Schnittstelle mit bis zu 25 MBit/s. OEM-Piezocontroller E-609 mit digitalem Regler und analoger Ansteuerung verfügbar	Analog, USB, digitale RS-232, schnelle serielle Schnittstelle mit bis zu 25 MBit/s	Analog, Ethernet (u.a. TCP/IP) für größere Übertragungswege, RS-232
Samplerate Regelung	10 kHz	10 kHz	25 kHz
Unterstützter Sensortyp	kapazitiv, DMS, PRS	kapazitiv	kapazitiv
Ausgangsspannungsbereich in V	-30 bis +130	-30 bis +130	-30 bis +135
Spitzenstrom in mA	100	500	110
Dauerstrom in mA	50	160	40
Bandbreite, Kleinsignal in kHz	50	50	50
Abmessungen in mm	160 × 96 × 33	320 × 150 × 80	264 × 125 × 48

Analoge Controller für einachsige Piezonanopositionierer

Preisgünstig und flexibel wählbare Schnittstellen



E-625

Highlights

- Für hochdynamische Anwendungen bis mehrere kHz bis hin zu statischen Anwendungen
- Positionsregelung für kapazitive und DMS-Dehnmessstreifen-Sensoren
- Analoge Schnittstelle
- Optionales digitales Interface



E-610



E-621



E-665

E-610

E-621

E-625

E-665

	Universelle Piezo- steuerung, OEM- Modul	Piezocontrollermodul, Steckkarte für bis zu 12 Achsen im 19-Zoll- Rack	Piezocontroller E-621 als Tischgerät	Hochleistungs- Piezocontroller für hohe Dynamik
Schnittstelle / Kommunikation	analog	Digitalschnittstelle mit zusätzlichen digitalen Funktionen wie Daten- recorder, Funktions- generator, etc.	Digitalschnittstelle mit zusätzlichen digitalen Funktionen wie Daten- recorder, Funktions- generator, etc.	Digitalschnittstelle mit zusätzlichen digitalen Funktionen wie Daten- recorder, Funktions- generator, etc.
Unterstützter Sensortyp	kapazitiv, DMS	kapazitiv, DMS	kapazitiv, DMS	kapazitiv, DMS
Ausgangsspannungs- bereich in V	-30 bis 130	-30 bis 130	-30 bis 130	-30 bis 130
Spitzenstrom in mA	180	120	120	360
Dauerstrom in mA	100	60	60	120
Abmessungen in mm	100 x 160	100 x 160	105 x 205 x 60	236 x 88 x 273

Controller für mehrachsige Piezopositionierer

Für 3 und mehr Achsen



E-712.6CDA

Highlights

- Flexible Lösungen für alle piezoelektrischen Antriebe von PI
- Für hochdynamische Anwendungen bis mehrere kHz bis zu statischen Anwendungen
- Positionsregelung für inkrementelle, kapazitive und DMS-Dehnmessstreifen-Sensoren
- Digitale Controller für beste Systemoptimierung und Bedienkomfort, mit ID-Chip-Erkennung für automatischen Abgleich des Controllers auf die Piezomechanik
- Analoges Controllersystem mit digitalem Schnittstellenmodul für Funktionsgenerator, Datenrecorder und Display



E-500



E-725



E-712

E-500

E-725

E-712

	Modularer Controller mit analogem Regler, bis 3 Achsen, optional mit Digitalschnittstelle und zusätzlichen digitalen Funktionen wie Datenrecorder, Funktionsgenerator, etc.	3-Achsen-Digitalcontroller	Frei konfigurierbarer, modularer Digitalcontroller ab 3 Achsen
Schnittstellen / Kommunikation	Ethernet (TCP/IP), USB, RS-232, IEEE 488	Ethernet (TCP/IP), USB, RS-232	Ethernet (TCP/IP), USB, RS-232
Samplerate Regelung	25 kHz (mit Digitalschnittstelle)	20 kHz	20 bis 50 kHz
DAC/ADC Auflösung in Bit	24/18	24	20
Unterstützter Sensortyp	kapazitiv, DMS	kapazitiv	kapazitiv, PISeCa kapazitiv, inkrementell
Ausgangsspannungsbereich in V	-30 bis 130 bis 1100	-30 bis 135	-30 bis 135
Spitzenstrom in mA	140 bis 10000	190	140
Dauerstrom in mA	40 bis 215 (Verschiedene Leistungsklassen der Verstärkermodule)	120	60
Bandbreite, Kleinsignal in kHz	50	50	15
Abmessungen	9,5- oder 19-Zoll-Gehäuse	263 × 89 × 302 mm ³	9,5- oder 19-Zoll-Gehäuse

Optionen für E-712

- Endstufen für Pieznanopositionierer und für Piezomotoren
- Vorkonfigurierte 3- und 6-Achsen-Controller
- Zusätzliche Schnittstellen: Analog, Parallel I/O
- Linearisierungsalgorithmen höherer Ordnung
- Realtime Betriebssystem
- Digitale Sensor-signalübertragung über längere Strecken

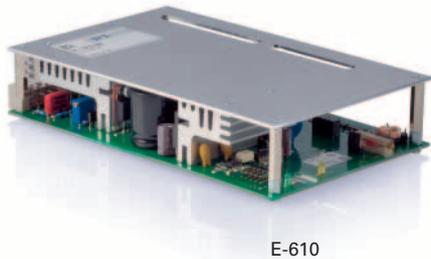
OEM-Piezoverstärkermodule



40-kanalige Elektronik
auf Basis E-831

Highlights

- Individuelle mehrkanalige Lösungen können auf Basis dieser Piezoverstärkermodule erstellt werden
- Separate Netzteile (DC/DC Wandler) können ein bis mehrere Verstärkermodule versorgen
- Varianten als Tischgeräte für schnelle Inbetriebnahme der Piezoaktoren in Anwendungen mit sehr geringer Dynamik



E-610



E-831



E-660, E-462
OEM-Aufsteckmodul

E-610

E-831

E-660

E-462

	E-610	E-831	E-660	E-462
	Universelle Piezo- steuerung, optional mit Positionsregelung für kapazitive oder DMS-Sensoren	Miniaturmodule	Für quasistatische Anwendungen	Für quasistatische Anwendungen
Ausgangsspannungs- bereich in V	-30 bis 130	-30 bis 130	5 bis 110	10 bis 1000
Spitzenstrom in mA	180	100 bis 250	20	0,5
Dauerstrom in mA	100	50 bis 100	10	0,3
Bandbreite, Kleinsignal in kHz	bis 30	3,5 bis 15	quasistatisch	quasistatisch
Rauschen, 0 bis 100 kHz in mV _{rms}	0,5 bis 1,6	<0,15 bis 0,8	5	50
Verfügbare Versionen	Europakarte	60 × 28 × 6 mm ³	160 × 90 × 60 mm ³ Tischgerät oder Auf- steckmodul für Platine	205 × 150 × 73 mm ³ Tischgerät oder 67 × 38 × 20 mm ³ OEM-Aufsteckmodul
Spannungsversorgung	DC/DC Wandler bereits integriert	Optional mit integrier- tem DC/DC-Wandler	DC/DC Wandler bereits integriert	DC/DC Wandler bereits integriert

Piezoverstärker / Controller mit hoher Dynamik

Für Piezoaktoren bis 1000 V Ansteuerspannung



E-481

Highlights

- Hohe Dynamik auch für Piezoaktoren mit hoher elektrischer Kapazität
- Integrierte Temperaturüberwachung zum Schutz vor Überhitzung des Piezoaktors
- Ergänzende Optionen: Positionsregelung für Langzeitstabilität, digitale Schnittstellen
- Für dynamisches Scannen im Dauerbetrieb, schnelles Schalten, aktive Schwingungsdämpfung



E-618



E-617



E-506

E-618

E-617

E-506

E-481

E-482

	Kurze Anstiegszeiten durch hohen Piezostrom bis 20 A	Geringe Leistungsaufnahme durch geschaltetes Verstärkerprinzip mit Energierückgewinnung	Hohe Linearität der Piezoauslenkung durch Ladungssteuerung, Abweichung <2 %	Geringe Leistungsaufnahme durch geschaltetes Verstärkerprinzip mit Energierückgewinnung
Ausgangsspannungsbereich in V	-30 bis 130	-30 bis +130	-30 bis 130	0 bis +1 100, bipolar einstellbar
Spitzenstrom in A	20 (<0,3 ms)	2 (<5 ms)	2 (<2,5 ms)	0,5 bis 6 (<5 ms)
Dauerstrom in A	0,8 (>0,3 ms)	1 (> 5 ms)	0,2	0,1 bis 2
Bandbreite, Kleinsignal in kHz	bis 15	3,5	15	mehrere kHz auch bei hoher Aktorkapazität
Rauschen, 0 bis 100 kHz in mV _{rms}	200 mV _{pp} / 24 mV _{rms} (ohne Last), 2 mV _{rms} (1 µF)	<30 mV _{rms} <100 mV _{pp}	<0,6 mV _{rms}	<25 bis 300 mV _{rms}
Verfügbare Versionen	9,5- oder 19-Zoll-Rack-einschub	Version zur Hutschienenmontage oder Modul E-504 für E-500 Controllersystem	Einschubmodul für E-500 Controller-system	19 Zoll-Rackeinschub. Linearverstärker E-421, E-470 für 1 oder 2 Achsen

Piezoachsen mit Sonder-Ansteuerspannungen

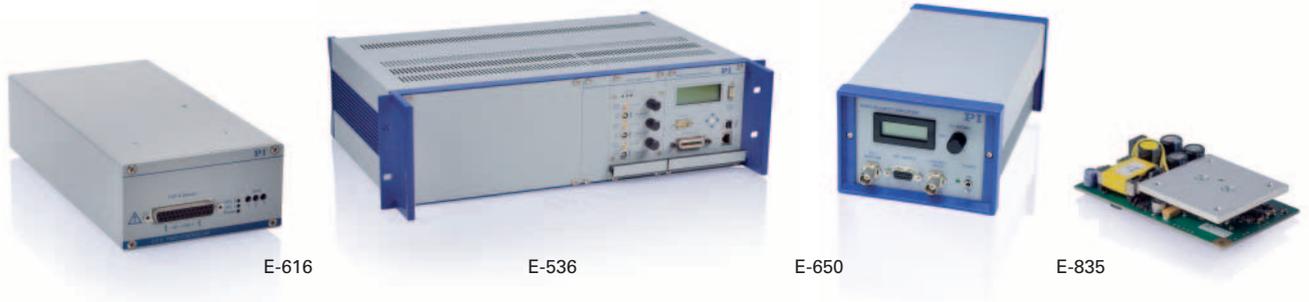
Vorkonfigurierte Mehr- und Ein-Achsen-Controller



E-413.00

Highlights

- Besondere Piezoaktoren und Piezoscanner erfordern besondere Ansteuerspannungen: Spezielle Controller und Treiber für Piezokippspiegel, Mehrachsen-Scanner, Bimorph-Piezobieger, DuraAct und Scheraktoren
- Interne Koordinatentransformation des Kippwinkels bei parallelkinematischem Mehrachsen-Design
- Vielfalt an Versionen: Tischgeräte, Rackeinschübe, Einzelmodule, OEM-Versionen



E-616

E-536

E-650

E-413

E-651

E-835

	E-616	E-536	E-650 E-651	E-413 E-835
	Für Kippspiegelsysteme mit Tripod- oder differenziellem Antrieb	Für PicoCube® 3-Achsen-Piezoscanner	Für PICMA® Biegeaktoren mit und ohne Positionsregelung	Bipolare Ausgangsspannung, für DuraAct oder Scheraktoren
Unterstützter Sensortyp	DMS	kapazitiv	DMS oder ungeregelt	–
Ausgangsspannungsbereich in V	-20 bis +120	-250 bis +250	0 bis 60	350 bis 500 V Spannungshub
Spitzenstrom in mA	100	100 bis 200	bis 300 für maximale Dynamik ungeregelt	100
Dauerstrom in mA	50	15 bis 30	<100	<50
Bandbreite in kHz	3 (Kleinsignal)	2 bis 10 (Kleinsignal)	6 (Großsignal)	bis 4 (Kleinsignal)
Verfügbare Versionen	Tischgerät oder Europakarten-Rack-einschub	19-Zoll-Rack, optional mit digitalem Interface	Tischgerät oder OEM-Aufsteckmodul	Tischgerät oder kompakte OEM-Versionen

Digitale Controller für Piezomotoren

Systemoptimierung und Bedienkomfort: Plug-and-play



E-871

Highlights

- Umfangreiche Softwareunterstützung, z. B. für LabVIEW, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux. Datenrecorder z. B. für Positionswerte
- Auswertung inkrementeller Sensoren
- Analoge I/O z. B. für Anschluss eines Joysticks und digitale für Automatisierungsaufgaben
- Integrierte Treiber optimiert für die jeweilige Antriebsart z. B. mit autoresonanten Ultraschallfrequenzen oder koordinierte Auslenkung von Scher- und Longitudinalaktoren
- Alternativ: Treiberelektroniken ohne integrierte Regelung für Aufbau eines externen Regelkreises



E-755



E-861



C-867

E-755

E-861

E-871

C-867

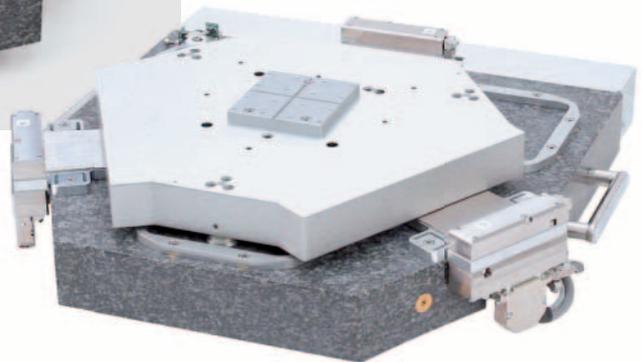
	Für NEXLINE® Piezoschreitantriebe	Für NEXACT® Piezoschreitantriebe	Für PIShift Piezoträgheitsantriebe	Für PILine® Ultraschallantriebe
Besonderheiten	Polynom-Linearisierungsverfahren für eine hervorragende Linearität der Bewegung, Abweichung ca. 0,001 % über den gesamten Stellweg des NEXLINE® Nanopositionierers	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Analogmodus für nanometergenaue Positionierung an der Zielposition. Nichtflüchtiger Makrospeicher	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Analogmodus für nanometergenaue Positionierung an der Zielposition. Nichtflüchtiger Makrospeicher	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Langsamfahrt bei $\mu\text{m/s}$, präzises Einregeln. Nichtflüchtiger Makrospeicher
Schnittstellen / Kommunikation	RS-232	USB, RS-232	USB, RS-232	USB, RS-232
Mehrachsensteuerung	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. Modularer Mehrachsen-Controller E-712 für unterschiedliche Antriebsarten verfügbar	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. Mehrachsen-Controller E-712	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. 2-Achsen-Controller verfügbar
Unregelte Versionen / Treiberelektronik	Unregelte Version verfügbar	OEM-Treiberelektronik E-862 verfügbar	OEM-Treiberelektronik E-870 verfügbar	OEM-Version in Europakartenformat oder OEM-Treiberelektronik C-872 verfügbar

Nanometrologie

Hohe Präzision für die Nanopositioniertechnik



PIMag™ 6D, das Positioniersystem, das auf dem magnetischen Schweben (Magnetic Levitation) basiert: Der passive Läufer schwebt auf einem magnetischen Feld und wird durch dieses aktiv geführt. Objekte lassen sich auf diese Weise mit bisher unerreichter Führungsgenauigkeit in der Ebene linear bzw. rotativ bewegen. Die 6-achsige Bewegung wird über einen 6D-Sensor geregelt, der hochauflösende kapazitive und inkrementelle Sensoren kombiniert



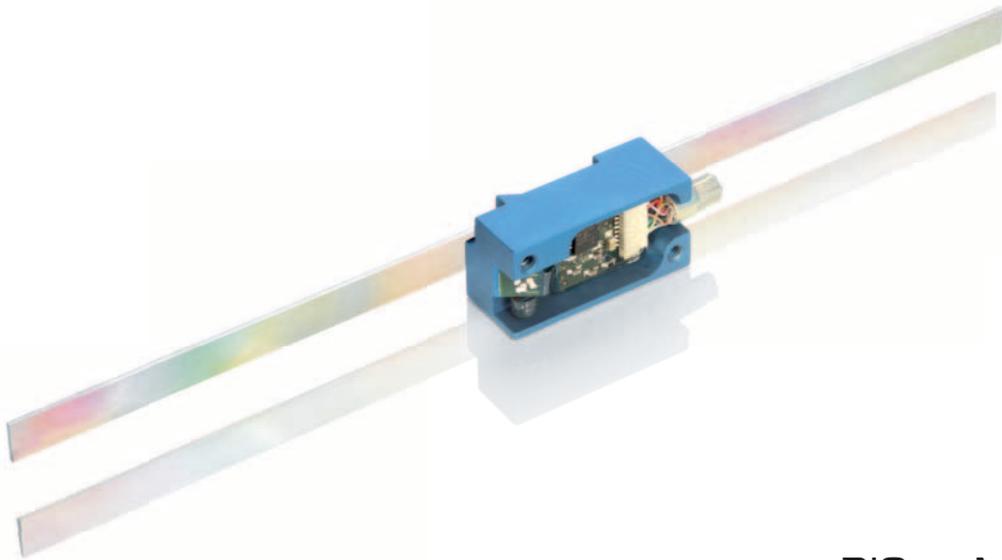


Kapazitive und inkrementelle Sensoren
Nanometrologie in PI Piezo-Nanopositioniersystemen

Seite 74

Kapazitive und inkrementelle Sensoren

Nanometrologie in PI Piezo-Nanopositioniersystemen



PIOne Messkopf
und Maßstab

Highlights

- Berührungslose Wegmessung
- Für Anwendungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen
- Direkte Positionsmessung kompensiert mechanische Abweichungen: Direktmetrologie

Anwendungen

PI setzt in seinen Nanopositionierern der Referenzklasse berührungslose Positionsmessverfahren ein. Die wichtigsten Kenndaten für die Auswahl des geeigneten Verfahrens sind Linearität, Auflösung (Sensitivität), Stabilität, Bandbreite und nicht zuletzt die Kosten. Wichtig ist außerdem die Fähigkeit, die Bewegung der Plattform direkt aufzunehmen, sodass jede Positionsänderung der bewegten Plattform relativ zum Grundkörper unmittelbar vom Controller erfasst wird. Damit sind Genauigkeiten unterhalb eines Nanometers möglich.



D-015



D-510

D-015
D-050
D-100

D-510
PISeca

D-711
PIOne

	Kapazitive Sensoren mit Auflösung im Sub-Nanometerbereich	Kapazitive Einelektrodensensoren mit hervorragender Positionsauflösung	Inkrementeller Sensor mit interferometrischem Messprinzip für die Nanopositionierung
Einsatzbereich	Integriert in die Piezonanopositionierer von PI Für Einsatz im UHV bis 10^{-9} hPa	Einfach zu integrieren, als eigenständiges Produkt verfügbar zum Aufbau eines externen Regelkreises mit Elektronik E-852 Auch für Vibrationsmessung	Integriert in die Nanopositionierer von PI für Stellwege > 1 mm
Auflösung	0,0005 % des Messbereichs, typisch 0,5 nm bis 10 µm	0,001 % des Messbereichs, typisch 1 bis 5 nm	bis 20 µm RMS; 0,12 nm Spitze-Spitze
Bandbreite	10 kHz	10 kHz	1 MHz
Messbereich	bis 2000 µm	20 bis 500 µm, Millimeter auf Anfrage	10 bis 130 mm, abhängig vom Lineal
Linearitätsabweichung	bis 0,01 % des Messbereichs, typisch 10 bis 50 nm	bis 0,1 % des Messbereichs, typisch 100 bis 500 nm	<20 nm
Betriebstemperaturbereich	-20 bis +80 °C	-20 bis +100 °C	10 bis +50 °C
Material	Aluminium andere wie z. B. Invar auf Anfrage	Aluminium andere wie z. B. Invar auf Anfrage	gemischt, Glasmaßstab
Abmessungen Sensor in mm	15 x 8 x 4 bis 20 x 20 x 5	Ø 8 bis 20 x 30	23 x 12 x 9,5

Technologie der Nanopositionierung

Piezoaktoren als Antrieb in der Nanopositionierung	Seite 77
Hochzuverlässige PICMA® Piezoaktoren – Nanopositionierung über lange Stellwege mit Piezomotoren: PiezoWalk®, PILine®, PIShift	
Hohe Führungsgenauigkeit durch Flexure-Festkörpergelenke	Seite 79
Kein Verschleiß – Flexures als Hebel – Sub-Nanometer-Genauigkeit	
Parallele Kinematik optimiert die Bewegung in mehreren Achsen	Seite 80
Paralleles oder seriellles Mehrachsen-Design	
Kinematik von Mehrachsen-Kippsystemen	Seite 81
Kippsystem mit Dreibein-Piezoantrieb (Tripod) – Kippsystem mit differenziellem Piezoantrieb (Tetrapod) – Dynamik eines Piezokippspiegels	
Einsatz im Vakuum	Seite 83
Klassifizierung von Vakuum bei PI	
Besondere Umgebungsbedingungen	Seite 83
Magnetfelder – Tiefe Temperaturen	
Sensortechnologie in der Nanopositioniertechnik	Seite 84
Höchste Genauigkeit durch Direktmetrologie – Kapazitive Sensoren – PIONe Linearencoder: Klein und Picometer-Auflösung – Indirekte Positionsmessung mit Dehnmessstreifen-Sensoren – Direkte Parallelmetrologie: Mehrachsmessungen gegen eine feste Referenz	
Precision Motion Control	Seite 88
Die Regelelektronik optimiert die Systemeigenschaften – Vor- und Nachteile einer Positionsregelung – Auflösung mit und ohne Regelung – So flexibel wie der Antrieb: Die Steuerung – Controllerabgleich	
Digitalcontroller für Präzision, Dynamik und Bedienkomfort	Seite 91
Linearisierung der Elektronik – Regler und Regelverfahren – Linearisierung der Mechanik – Dynamische Linearisierung – Zusatzfunktionen digitaler Controller	
Motion Control Software von PI	Seite 93
Universeller Befehlssatz – Hostsoftware PIMikroMove® für schnelle Inbetriebnahme	
Service	Seite 96
Lieferumfang – Kundenspezifische Anpassungen – Aktualisierte Firmware, Software, Bedienungsanleitungen	
Glossar	Seite 97

Piezoaktoren als Antrieb in der Nanopositionierung



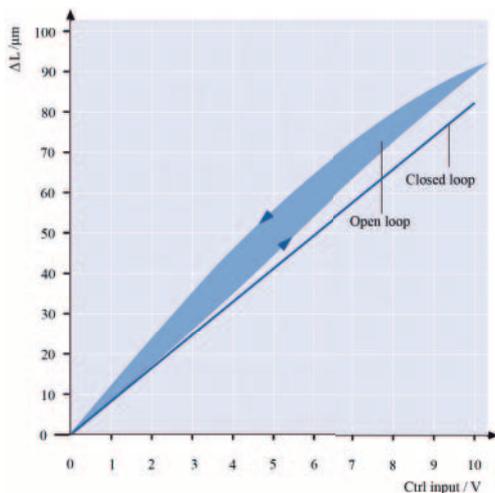
Flacher 2-Achsen-Piezoscanner

Piezoaktoren bieten hervorragende Antriebseigenschaften:

- Die Bewegung von Piezoaktoren beruht auf Festkörpereffekten, wodurch ihre Auflösung im Prinzip unbegrenzt ist
- Ihre Steifigkeit ist sehr hoch und ermöglicht große Kraftentwicklung und Dynamik
- Die schnelle Ansprechzeit im Mikrosekundenbereich ist eine Folge der hohen Resonanzfrequenz von mehreren hundert Kilohertz
- Der verfügbare Stellweg beträgt einige hundert Mikrometer

Die Bewegung von Piezoaktoren verläuft nicht geradlinig. Um das seitliche Auswandern zu verhindern, ist daher ein Führungssystem erforderlich. In Piezoverstellern von PI sorgen reibungs- und spielfreie Flexure-Festkörpergelenke für eine hochsteife Führung und optimale Ablaufgenauigkeit. Sie vergrößern außerdem den Stellweg bis in den Millimeterbereich.

Die Festkörpereffekte im piezoelektrischen Material bedingen eine nichtlineare und hysteresebehaftete Bewegung. Um die in der Nanopositionierung geforderte hervorragende Positionsstabilität, Linearität und Wiederholgenauigkeit zu erreichen, wird eine Positionsregelung verwendet.



Die Positionsregelung eliminiert das nichtlineare Verhalten des Piezoaktors. Der erreichbare Stellweg ist unregelt größer als mit Positionsregelung

Hochzuverlässige PICMA® Piezoaktoren

PICMA® Piezoaktoren von PI sind weltweit die einzigen monolithischen Multilayer-Piezoaktoren mit vollständig keramischer Isolierung. Erfahrung mit PICMA® Serien in verschiedensten Anwendungen zeigen eine Erhöhung der Lebensdauer um mindestens einen Faktor 10 verglichen mit herkömmlichen, polymerisolierten Multilayer-Piezoaktoren. In Lebensdauertests wurden bereits über 100 Milliarden Zyklen ohne einen einzigen Ausfall nachgewiesen. Die PICMA® Technologie ist patentgeschützt.



PICMA® Piezoaktoren mit vollkeramischer Isolierung wurden bei Tests der NASA wegen ihrer überragenden Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit für die Mars-Mission ausgewählt

Nanopositionierung über lange Stellwege mit Piezomotoren: PiezoWalk®, PILine®, PIShift

Für Stellwege über 1 mm verwendet PI Piezomotoren als Antrieb, die ebenfalls hohe Steifigkeit und Auflösungen im Nanometerbereich bieten. Piezomotoren erzeugen weder Magnetfelder noch werden sie von diesen beeinflusst.

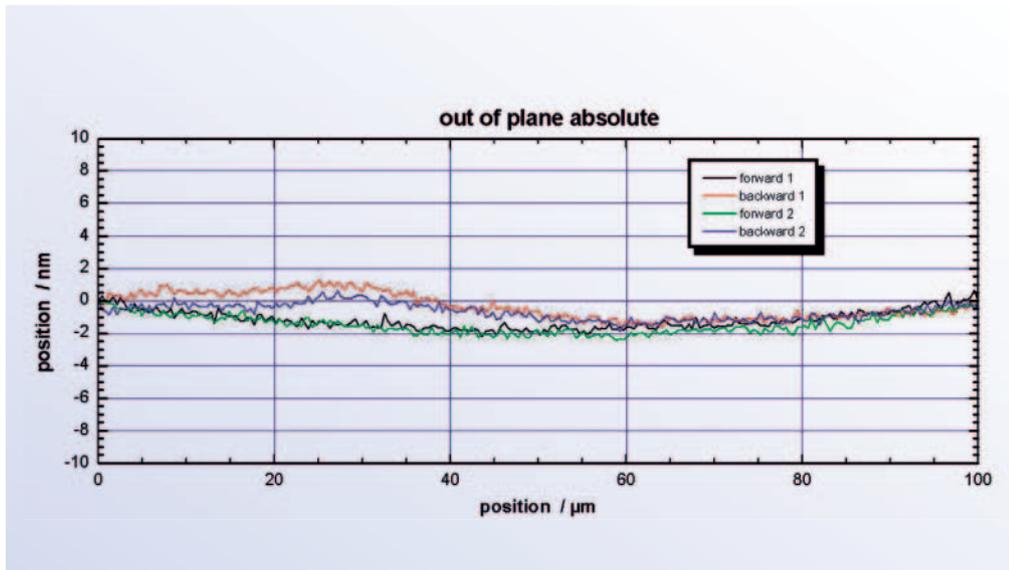
Piezomotoren übertragen auf die bestmögliche Weise die spezifischen Eigenschaften von Piezoaktoren auf längere Wege. Angepasst an die benötigte Kraft- und Geschwindigkeitsentwicklung hat PI eine Reihe unterschiedlicher Piezomotortechnologien mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen entwickelt.

Eigenschaften von Piezomotoren

- Selbsthemmend im ausgeschalteten Zustand mit maximaler Kraft
- Skalierbare Stellwege
- Nanometergenaue Auflösung
- Mechanisch einfach integrierbar
- Verschiedene Technologien optimiert für hohe Geschwindigkeiten oder für hohe Kräfte

Piezostapelaktoren in Multi-layer- oder Presstechnologie	PiezoWalk® Piezoschreittrieb	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PIShift Piezoträgheitsantrieb
Sub-Nanometer-Auflösung	Sub-Nanometer-Auflösung	Sub-Mikrometer-Auflösung	Sub-Nanometer-Auflösung
Kleinste Ansprechzeiten im Mikrosekunden-Bereich	Geschwindigkeit bis 10 mm/s Hochdynamischer Scanmodus	Sehr hohe Betriebsfrequenz Geräuschloser Antrieb Hohe Geschwindigkeit bis zu mehreren 100 mm/s	Sehr hohe Betriebsfrequenz Geräuschloser Antrieb Geschwindigkeit über 10 mm/s
Stellwege bis ca. 300 µm direkt und 2 mm mit Hebelübersetzung	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt
Hohe Steifigkeit Kraftentwicklung bis zu 100 kN	Sehr hohe Kräfte bis zu 800 N (NEXLINE®) Selbsthemmend in Ruhe	Kräfte bis 40 N Selbsthemmend in Ruhe	Kräfte bis 10 N Selbsthemmend in Ruhe
Ansteuerung mit analoger Spannung Spannungshub 150 V (PICMA® Multilayer-Aktoren), 1 100 V (PICA Hochlastaktoren)	Mehraktorantrieb erzeugt Schreitbewegung Spannungshub 55 V (NEXACT®), 500 V (NEXLINE®)	Einaktorantrieb Ansteuerung mit hochfrequenter Wechselspannung (Sinus) Spannungshub 120 V, 200 V. Minimotoren deutlich darunter	Einaktorantrieb Ansteuerung mit hochfrequenter Wechselspannung (modifizierter Sägezahn) Spannungshub <48 V
Ideal für:			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue Positionierung mit hoher Dynamik ■ Hebelübersetzte und geführte Systeme ■ Piezoscanner ■ Feinjustage ■ Krafterzeugung ■ Aktive Schwingungsisolierung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue Positionierung ■ Quasistatische Anwendungen mit großer Haltekraft ■ Stellwege bis einige mm ■ Grob- und Feinjustage ■ Krafterzeugung ■ Aktive Schwingungsisolierung ■ Betrieb mit konstanter niedriger Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Positionierung mit Sub-µm-Genauigkeit ■ Schnelles Einregeln ■ Scanbetrieb mit hohen Geschwindigkeiten ■ Betrieb mit konstanter niedriger Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue und langzeitstabile Positionierung ■ Quasistatische Anwendungen mit geringer bis mittlerer Haltekraft

Hohe Führungsgenauigkeit durch Flexure-Festkörpergelenke



Ein Piezoversteller mit integriertem Flexure-Führungssystem erreicht eine Führungsgenauigkeit von wenigen Nanometern bzw. Microradian und eine hohe Ablaufebenheit

In der Nanostelltechnik haben sich Festkörpergelenksführungen für Positionieraufgaben bis 2 mm bewährt.

Die Bewegung eines Flexuregelenkes beruht auf der elastischen Deformation eines Festkörpers. Dadurch treten weder Haft-, Roll- noch Gleitreibung auf.

Kein Verschleiß

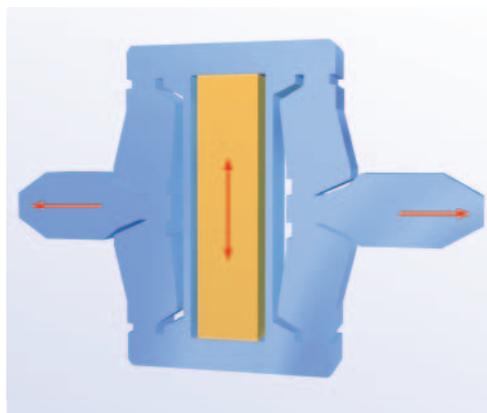
Vorteile sind die hohe Steifigkeit, Belastbarkeit und Verschleißfreiheit. Flexures sind wartungsfrei, können aus nichtmagnetischen Materialien gefertigt werden und benötigen weder Schmiermittel noch andere Betriebsstoffe – deshalb arbeiten sie auch problemlos im Vakuum.

Flexures als Hebel

Die Auslenkung eines Piezoaktors lässt sich zudem durch die Integration von Hebelmechanismen vervielfachen. Der Aktor wird mechanisch so in ein Festkörpergelenk eingebunden, dass sich der Stellweg auf bis zu 2 mm verlängert. Da einfache Hebelaufbauten jedoch deutlich an Führungsgenauigkeit und Steifigkeit verlieren, erfordert die Konstruktion wesentlich komplexere Geometrien.

Sub-Nanometer-Genauigkeit

Flexures ermöglichen Bewegungen mit extrem hoher Bahntreue. Um Höhen- oder Querver-satz zu kompensieren, verwendet PI spezielle Multilink-Flexure-Führungen. Diese Führungssysteme, die in den meisten Nanopositioniersystemen von PI eingesetzt werden, ermöglichen eine Ablaufebenheit und Geradheit im Sub-Nanometer- bzw. Mikroradianbereich.



Diese Hebelmechanik mit Flexure Gelenksführungen übersetzt den Aktorhub (vertikal) in eine gleichförmige, geradlinige Bewegung (horizontal)

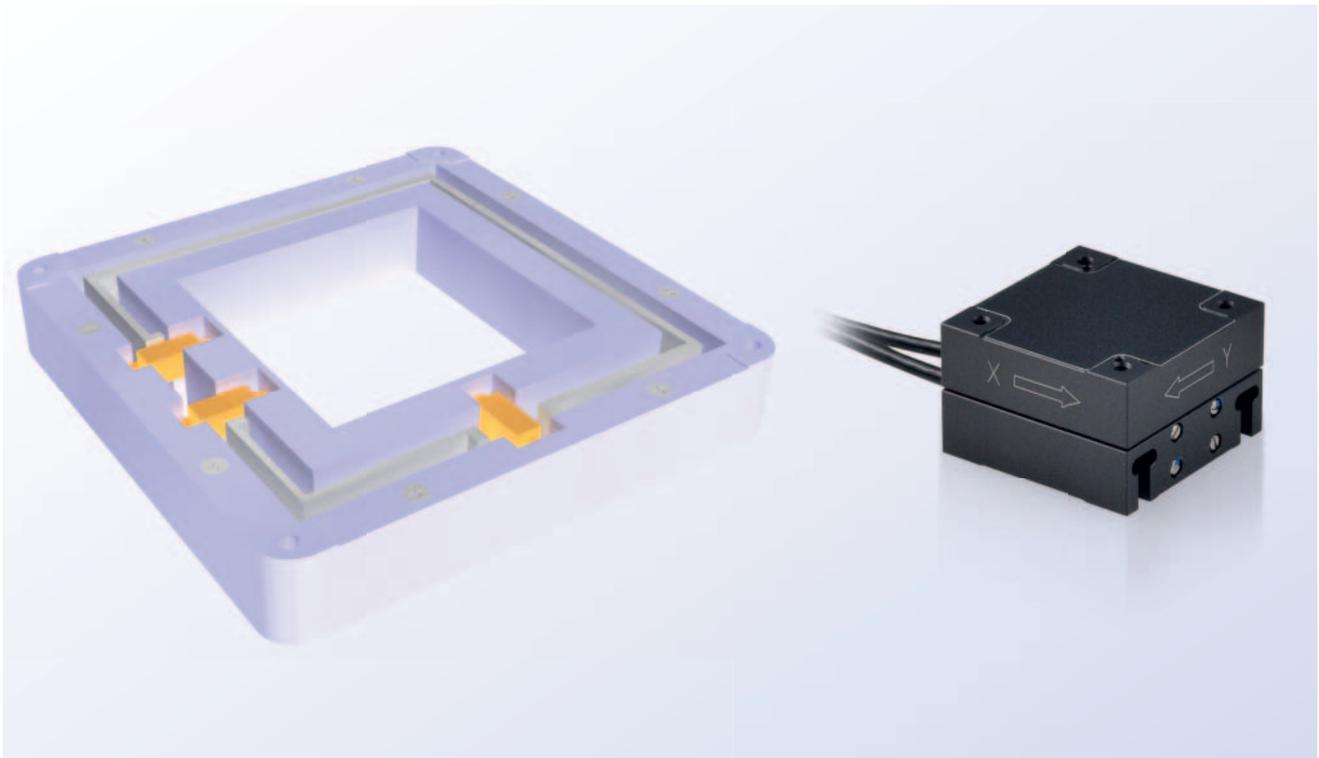


Die Deformation der Flexure-Gelenksführungen wird über FEM-Stresssimulationen geprüft

Parallele Kinematik optimiert die Bewegung in mehreren Achsen

In einem Parallelkinematik-Mehrachsensystem gibt es nur eine bewegte Plattform, auf die alle Aktoren direkt einwirken. Dadurch können die dynamischen Eigenschaften der Achsen identisch ausgelegt und die bewegte Masse stark reduziert werden. Weitere Vorteile der parallelen Kinematik liegen darin, dass das System kompakter gebaut werden kann als

seriell gestapelte bzw. verschachtelte Systeme, und sich die Fehler und Massen der einzelnen Achsen nicht aufaddieren. Parallel-kinematische Systeme sind mit bis zu 6 Freiheitsgraden verfügbar und besitzen eine hohe Dynamik in allen Achsen durch die minimale Massenträgheit.

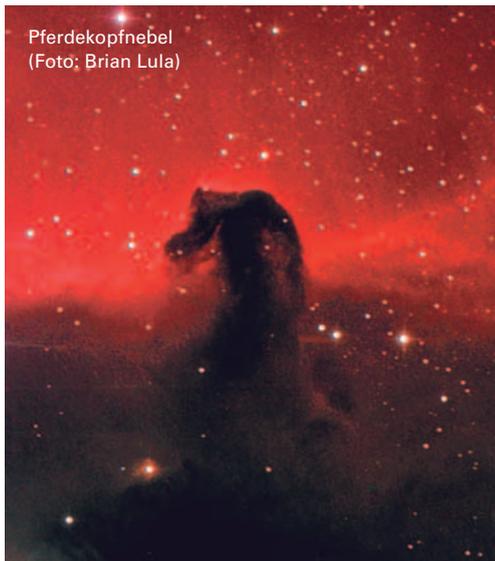


Beim parallelkinematischen Aufbau wirken – anders als bei seriellen Achsen – alle Antriebe auf dieselbe bewegte Plattform. Eine höhere Dynamik und höhere Scanningfrequenzen, verbesserte Führungsgenauigkeit, Wiederholbarkeit und Stabilität sind die Folge

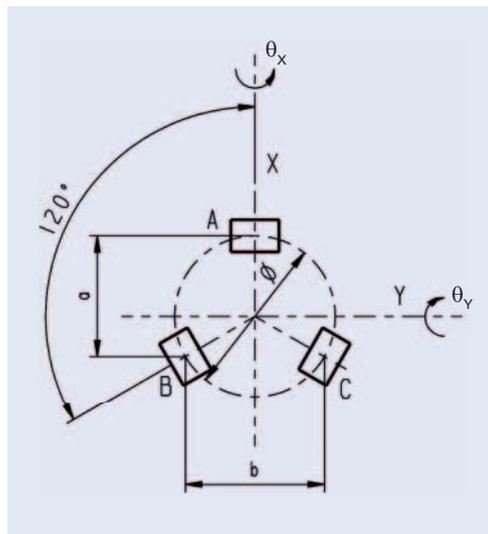
Ein serielles Mehrachsensystem, ob verschachtelt oder gestapelt, weist jedem Aktor und jedem Sensor genau eine Bewegungsrichtung zu. Die Verstellachsen tragen jeweils die aufmontierte nächste Achse, wodurch sich die dynamischen Eigenschaften verschlechtern und die Gesamtsteifigkeit reduziert. Zudem summieren sich die Führungsfehler der Einzelachsen zu einer geringeren Genauigkeit und Wiederholbarkeit. Seriell-kinematische Systeme sind einfacher im Aufbau und in der Ansteuerung

Kinematik von Mehrachsen-Kippsystemen

Kippspiegelsysteme von PI basieren auf einer parallelen Kinematik mit nur einer bewegten Plattform für alle Bewegungsrichtungen. Die Systeme erreichen eine höhere Linearität als durch Hintereinanderschalten von zwei Einachssystemen – z. B. Galvoscantern – realisierbar ist, und sind dabei sehr kompakt.



Pferdekopfnebel
(Foto: Brian Lula)



Anordnung der Aktoren im Dreibein-Piezoantrieb

Folgende Gleichungen dienen zur Berechnung der Kippwinkel und des Stellwegs in Z:

$$\theta_y = 2A - \frac{(B+C)}{2a}$$

$$\theta_x = \frac{(B-C)}{b}$$

$$Z = \frac{(A+B+C)}{3}$$

A, B, C ist die lineare Auslenkung der entsprechenden Aktoren.

Piezogetriebene Kippspiegel und -plattformen sind sowohl für den hochdynamischen Betrieb, wie z. B. Tracking, Scanning, Bildstabilisierung, Drift- und Vibrationselimination als auch für statische Positionierung von Optiken oder Proben geeignet.

Sie ermöglichen einen optischen Ablenkbereich bis zu 100 mrad, extrem kurze Ansprechzeiten von wenigen Mikrosekunden sowie Auflösungen bis in den Nanoradianbereich.

PI bietet ein großes Spektrum von kompakten Systemen für die Laserstrahlsteuerung bis hin zu großen Einheiten für die Astronomie.

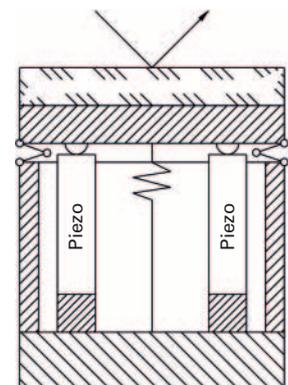
Kippsystem mit Dreibein-Piezoantrieb (Tripod)

Die Plattform wird von drei in 120°-Abständen angeordneten Piezoaktoren angetrieben. Durch Koordinatentransformation kann die Bewegung auf die einzelnen Aktoren aufgeteilt werden.

Zusätzlich zur Kippung kann die Plattform auch linear in Z bewegt werden, was z. B. zur Korrektur optischer Laufzeitunterschiede (Phasenschieber) wichtig ist.

Kippsystem mit differenziellem Piezoantrieb (Tetrapod)

Die Plattform wird von zwei Paaren in 90°-Abständen angeordneter Piezoaktoren angetrieben. Die 4 Aktoren werden dabei je nach Kipprichtung differenziell paarweise angesteuert. Weil die Kippachsen θ_x und θ_y orthogonal ausgerichtet sind, ist keine Koordinatentransformation notwendig.



Prinzip eines Kippsystems mit differenziellem Piezoantrieb

Das Resultat ist eine hervorragende Positions-/Winkelstabilität in einem breiten Temperaturbereich.

Die differenzielle Bauform bietet wie die Dreibeinkonstruktion eine optimale Winkelstabilität in einem breiten Temperaturbereich. Bei positionsgeregelten Ausführungen ermöglicht die differenzielle Auswertung von je zwei Sensoren pro Achse eine verbesserte Linearität und Auflösung.

Dynamik eines Piezokippspiegels

Die maximale Arbeitsfrequenz eines Piezokippsystems hängt stark von seiner mechanischen Resonanzfrequenz ab. Auch den Eigenschaften des Verstärkers, Reglers und Sensors kommt eine hohe Bedeutung zu. Um die effektive Resonanzfrequenz des Systems aus Plattform und Spiegel abzuschätzen, muss zuerst das Trägheitsmoment des Spiegelsubstrats berechnet werden.

Trägheitsmoment eines rotationssymmetrischen Spiegels:

$$I_M = m \left[\frac{2R^2 + H^2}{12} + \left(\frac{H}{2} + T \right)^2 \right]$$

Trägheitsmoment eines rechteckigen Spiegels:

$$I_M = m \left[\frac{L^2 + H^2}{12} + \left(\frac{H}{2} + T \right)^2 \right]$$

mit:

m = Spiegelmasse [g]

I_M = Trägheitsmoment des Spiegels
[g × mm²]

L = Länge des Spiegels orthogonal zur Kippachse [mm]

H = Spiegeldicke [mm]

T = Abstand Drehpunkt Plattformoberfläche (s. technische Daten der einzelnen Modelle) [mm]

R = Spiegelradius [mm]

Mit der Resonanzfrequenz der Plattform (s. technische Daten) und dem Trägheitsmoment des Spiegelsubstrats ergibt sich die Systemresonanzfrequenz entsprechend folgender Gleichung:

$$f' = m \frac{f_0}{\sqrt{1 + I_M/I_0}}$$

Resonanzfrequenz eines Piezokippsystems mit Spiegel

mit:

f' = Resonanzfrequenz der Plattform mit Spiegel [Hz]

f_0 = Resonanzfrequenz der Plattform ohne Spiegel [Hz]

I_0 = Trägheitsmoment der Plattform (siehe technische Daten) [g × mm²]

I_M = Trägheitsmoment des Spiegels [g × mm²]

Einsatz im Vakuum

Piezoversteller verwenden Technologien, die grundsätzlich hervorragend für den Einsatz im Vakuum geeignet sind: Piezoaktoren, kapazitive Positionssensoren und Flexure-Festkörpergelenksführungen. Sie benötigen außerdem keine Schmiermittel und Fette zum Betrieb.

Die PICMA® Piezoaktoren in allen PI Nanopositionierern sind ohne Polymeranteile hergestellt und haben daher besonders niedrige Ausgasraten. Sie können mit bis zu 150 °C ausgeheizt werden. Als Materialien für die Vakuumversteller kommen Aluminiumlegierungen, Edeltähle oder Titan zum Einsatz. Die Oberflächen werden nicht beschichtet sondern elektroploliert. Vakuum-Kabelisolierungen bestehen aus Materialien wie PTFE oder FEP (Teflon), auf Wunsch aus Polyimid (Kapton) oder PEEK. Der Einsatz von Kunststoffen und Klebstoffen wird so weit wie möglich reduziert.



Dieser Piezo-6-Achsen-Tisch wurde für die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) als Objektträger in einem Rasterkraftmikroskop (AFM) entwickelt und ist für den Einsatz in UHV ausgelegt. Die linearen Stellwege betragen $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, eine aktive Korrektur der Ablaufgenauigkeit ist durch die Ansteuerung der Kippachsen möglich. Bei einer Last von 300 g erreicht er eine Resonanzfrequenz von über 2 kHz

Klassifizierung von Vakuum bei PI

Hochvakuum (HV)	10^{-3} bis 10^{-6} hPa
Ultrahochvakuum (UHV)	10^{-7} bis 10^{-9} hPa
1 hPa = 1 mbar	

Für eine Reihe von Verstellerserien bietet PI UHV-Versionen als Katalogprodukte an. Design und Fertigung für Bereiche außerhalb dieser Grenzwerte werden auf Anfrage angeboten. Die Vakuumdurchführungen sind im Lieferumfang nicht enthalten und können bei Bedarf dazu bestellt werden.

Besondere Umgebungsbedingungen

Magnetfelder

PICMA® Piezoaktoren eignen sich hervorragend für den Einsatz auch in sehr hohen Magnetfeldern. Piezopositioniersysteme können ohne ferromagnetische Materialien gefertigt werden.

Auch Piezomotoren können in Magnetfeldern verwendet werden, denn sie erzeugen weder selbst Magnetfelder noch werden sie von diesen beeinflusst.

Tiefe Temperaturen

Piezoaktoren zeigen Auslenkungen bis weit in den kryogenen Bereich. Sondermodelle von PICMA® Aktoren können bei bis zu $-271\ \text{°C}$ eingesetzt werden, allerdings mit deutlich reduziertem Stellweg. Auch hier kommt es auf die geeignete Auswahl der weiteren Materialien und Komponenten des Piezopositioniersystems an.

Sensortechnologie in der Nanopositioniertechnik

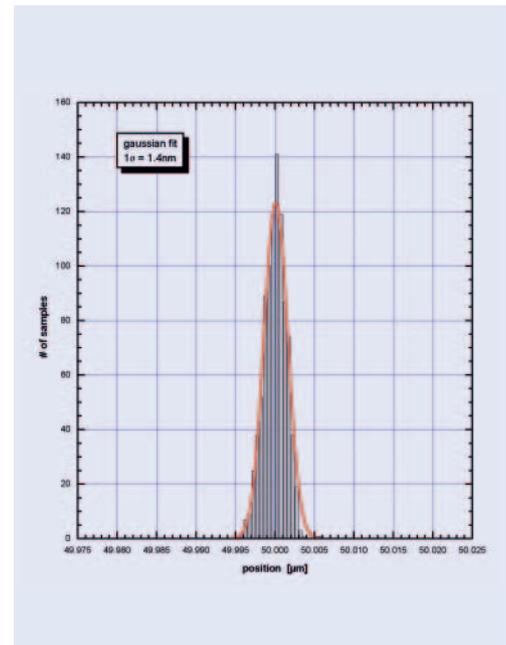


Der PIONe Linearencoder wird in hochauflösenden Nanopositioniersystemen von PI wie in den N-664 eingesetzt. Dieser Linearpositionierer wird von NEXACT® Piezolinearmotoren angetrieben und erreicht so – abhängig vom Motion Controller – über 30 mm Stellweg und eine Auflösung von unter einem Nanometer

PI bietet weltweit die größte Auswahl an hochdynamischen und hochauflösenden Nanopositioniersystemen. Die Linearität und Wiederholgenauigkeit sind nicht denkbar ohne den Einsatz höchstauflösender Messverfahren.

Genauigkeiten im Bereich weniger Nanometer und darunter erfordern ein Positionsmessverfahren, das Bewegung in diesem Bereich auch erfassen kann. Die wichtigsten Kenndaten für die Auswahl des geeigneten Verfahrens sind Linearität, Auflösung (Sensitivität), Stabilität, Bandbreite und nicht zuletzt die Kosten. Wichtig ist außerdem die Fähigkeit, die Bewegung der Plattform direkt aufzunehmen. PI setzt nach Möglichkeit auf kontaktlose Messprinzipien, um das Messergebnis möglichst wenig zu beeinflussen. Außerdem müssen die Sensoren klein sein und dürfen sich nicht erwärmen.

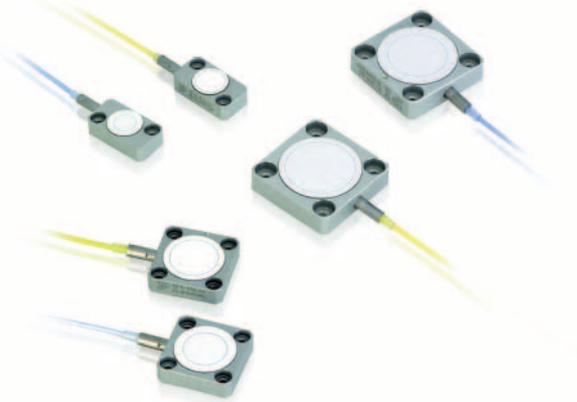
PI Nanopositionierer verwenden drei verschiedene Typen von Sensoren: Kapazitive Sensoren und Linearencoder für Direktmetrologie, sowie Dehnmessstreifen für die indirekte Positionsmessung.



Die Messung belegt die hervorragende Wiederholgenauigkeit dieses Piezopositioniersystems kapazitiven Sensoren von 1,4 nm (1 σ -Wert)

Höchste Genauigkeit durch Direktmetrologie

Bei der direkten Positionsmessung mit berührungslos messenden Sensoren wird jede Positionsänderung der bewegten Plattform relativ zum Grundkörper unmittelbar vom Controller erfasst. Zwischen dem Messpunkt und der bewegten Plattform liegen keine Antriebs- oder Führungselemente, die die Messung beeinflussen könnten. Diese Methode ermöglicht eine Bandbreite im Kilohertz-Bereich, Auflösung im Sub-Nanometerbereich und hervorragende Stabilität.



Kapazitive Sensoren

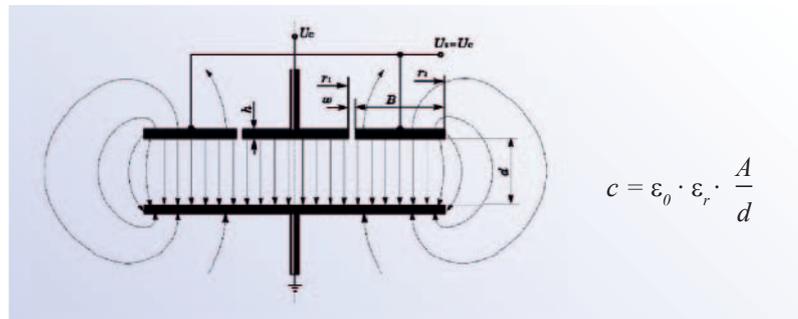
Nanopositioniersysteme von PI werden klassisch von translatorischen Piezoaktoren angetrieben und besitzen Stellwege von wenigen hundert Mikrometern bis zu einem Millimeter. Kapazitive Sensoren erreichen eine Positionsauflösung im Sub-Nanometerbereich, hohe Stabilität und Bandbreite, sowie die beste Linearität bzw. Genauigkeit.

Kapazitive Zweiplatten-Sensoren von PI ermitteln berührungslos den Abstand zwischen zwei Elektroden. Eine aktive Schutzringelektrode sorgt für ein homogenes Feld. Das und die hochgenaue parallele Ausrichtung der beiden Elektroden führt zur bestmöglichen Linearität der Sensorsignale über den gesamten Messbereich. Diese Sensoren werden so in das Nanopositioniersystem integriert, dass keine Auswirkung auf Baugröße und Masse (Trägheit) zu erwarten sind. Bei entsprechender Anordnung erfassen sie direkt die Bewegung der Plattform (direkte Metrologie).

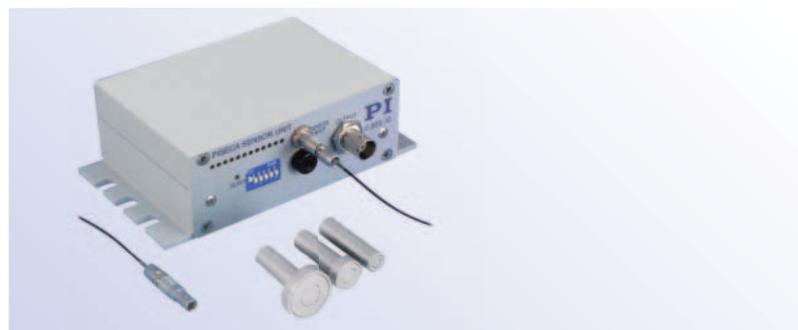
Kapazitive Einplattensensoren PISeca messen gegen jede Art von leitender Oberfläche und sind einfacher in der mechanischen Handhabung beispielsweise beim Einbau oder der Kabelführung. Sie können außerdem vielseitiger eingesetzt werden, z. B. zur Erfassung von Bewegungen senkrecht zur Messrichtung. Die Qualität der Sensorsignale hängt allerdings stark von der Parallelität und Beschaffenheit der Oberfläche ab, gegen die gemessen wird.

- Kontaktlose Absolutmessung von Abstand, Bewegung, Vibration
- Messbereiche zwischen wenigen 10 µm und ca. 2 mm
- Nur minimale Erwärmung, kein Streulicht

- Direktmetrologie: Unmittelbare Positionsmessung am bewegten Objekt
- Vakuumkompatibel bis 10⁻⁹ hPa
- Wartungsfrei, kein Verschleiß
- Hohe Bandbreite bis 10 kHz
- Hohe Temperatur- und Langzeitstabilität (< 0,1 nm/3 h)
- Invar-Versionen für höchste Temperaturstabilität (5 × 10⁻⁶/K)
- Kompakte Zweielektroden- und Ein-elektroden-Sensoren, kundenspezifische Ausführungen
- Auswerteelektronik in verschiedenen Ausbaustufen, von analogen OEM-Versionen bis zum modular aufgebauten und jederzeit erweiterbaren digitalen Contollersystem



Arbeitsprinzip eines kapazitiven Sensors. Die Kapazität C ist proportional zur aktiven Sensorfläche A, d bezeichnet den Messbereich (Abstand von Sensor zu Targetfläche), ε₀ ist eine Konstante, ε_r die dielektrische Konstante des Materials zwischen den Kondensatorplatten, im Allgemeinen Luft. Die Messgröße ist die Kapazitätsänderung im elektrischen Feld. Eine aktive Schutzringelektrode sorgt für ein homogenes Feld im Messbereich

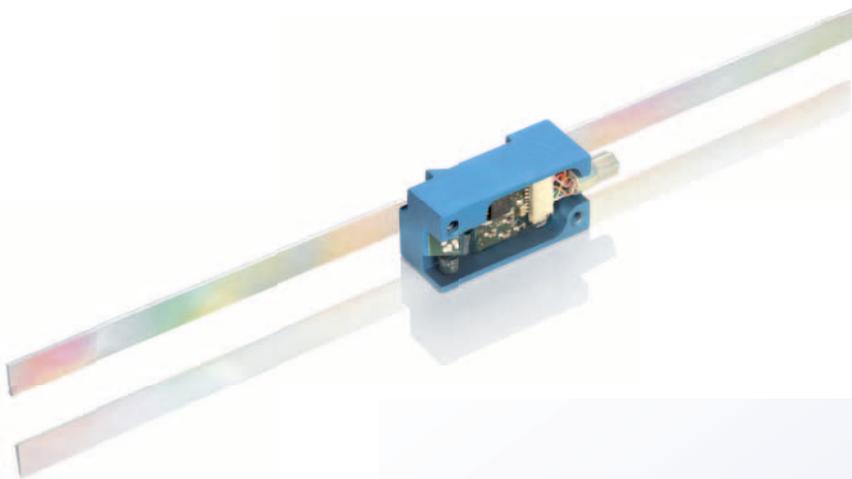


Kapazitive PISeca Einelektrodensensoren messen gegen jede Art von leitender Oberfläche und sind einfacher in der mechanischen Handhabung beispielsweise beim Einbau oder der Kabelführung. Sie können außerdem vielseitiger eingesetzt werden, z. B. zur Erfassung von Bewegungen senkrecht zur Messrichtung. Die E-852 Stand-alone Auswerteelektronik für PISeca zeigt nur ein minimales Rauschen und integriert ein Linearisierungssystem. Alle Systeme werden im Hause PI kalibriert und für die vorgesehene Bandbreite und den Messbereich optimiert

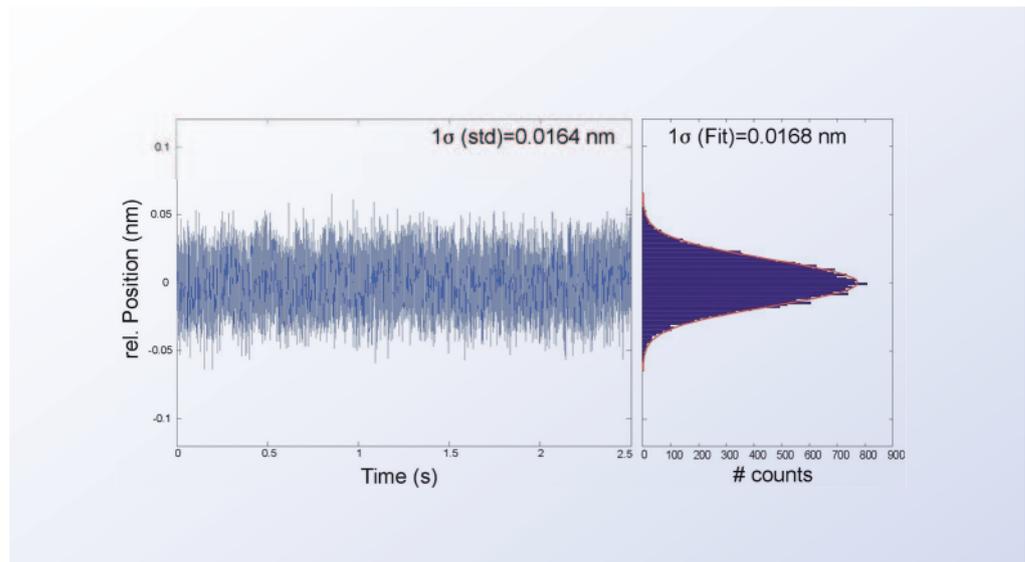
**PIOne Linearencoder:
Klein und Picometer-Auflösung**

Bei größeren Stellwegen stoßen die kapazitiven Messsysteme an ihre Grenzen: Entweder werden die Sensorflächen immer größer oder die Auflösung und Linearität nimmt ab. Nanopositioniersysteme mit Piezomotoren, die Stellwege von mehreren 10 Millimetern erreichen, verwenden lineare Encoder als Positionssensor. Das sind inkrementelle Messsysteme, die aus Maßband und Messkopf bestehen. Der hochauflösende Linearsensor PIONe erlaubt bei entsprechender Messauswertung eine Positionsauflösung von weit unterhalb einem Nanometer.

Der Messkopf des PIONe beinhaltet ein Mach-Zehnder Interferometer, das an einem Linearmaßstab entlang bewegt wird. Aus den Signalen der Reflexionen am Gitter werden Sinus- und Cosinus-Signale erzeugt. Zusätzliche Interpolation führt zu den nachweislich kleinen Auflösungen des Systems. Der Sensorkopf beinhaltet zusätzlich die Auswertung eines richtungserkennenden Referenzsignals. Die Abmessungen des Sensorkopfes betragen dabei nur 23 mm x 12 mm x 9,5 mm. PIONe nutzt eine patentierte Technologie.



- Auflösung bis 20 Picometer RMS; 0,12 Nanometer Spitze-Spitze
- Für Geschwindigkeiten bis 0,5 m/s bei höchster Auflösung
- Kleine Abmessungen 23 mm x 12 mm x 9,5 mm
- Ausgabe von Sinus- und Cosinus- oder Quadratur-Signalen
- Geringer Stromverbrauch und geringe Eigenerwärmung
- Ausheizbar bis 80 °C



Rauschmessung eines Positioniersystems mit dem PIONe bei 1 MHz Bandbreite und 18 Bit Auflösung des Sensoreingangs: 16 Picometer RMS und 100 Picometer Spitze-Spitze

Indirekte Positionsmessung mit Dehnmessstreifen-Sensoren

Dehnmessstreifen-Sensoren bestehen aus einer dünnen Metall- (DMS) oder Halbleiterfolie (piezoresistiv, PRS), die auf der Piezokeramik oder für verbesserte Präzision auf dem Führungssystem eines Flexure-Verstellers aufgebracht ist. Diese Art der Positionsmessung erfolgt mit Kontakt und indirekt, da die Positi-

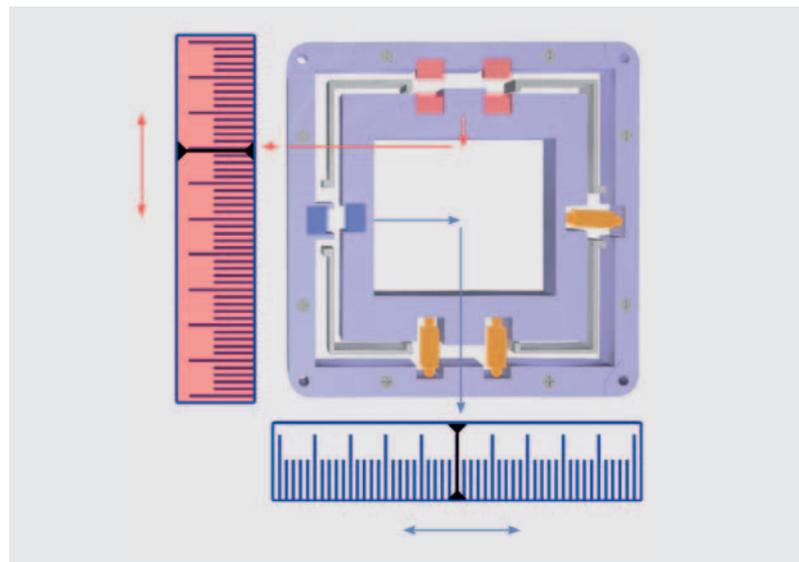
on der bewegten Plattform aus einer Messung am Hebel, an der Führung oder am Piezostapel abgeleitet wird. Dehnmesssensoren leiten die Positionsinformation aus ihrer Ausdehnung ab. Vollbrückenschaltungen mit mehreren Dehnmessstreifen je Achse verbessern die thermische Stabilität.

Sensortyp	Empfindlichkeit / Auflösung*	Linearität*	Stabilität / Wiederholbarkeit	Bandbreite*	Messverfahren	Messbereich
Kapazitiv	hervorragend	hervorragend	hervorragend	hervorragend	direkt / berührungslos	< 2 mm
Dehnmessstreifen-Sensor aus Metallfolien (DMS)	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	indirekt / mit Berührung	< 2 mm
Piezoresistive Dehnmess-Sensoren (PRS)	hervorragend	gut	mittel	sehr gut	indirekt / mit Berührung	< 1 mm
Linearencoder	hervorragend	sehr gut	hervorragend	sehr gut	direkt / berührungslos	bis > 100 mm

* Die Einstufungen beziehen sich auf die Eigenschaften des Nanopositioniersystems. Die Angaben zu Auflösung, Linearität, Wiederholbarkeit im jeweiligen Datenblatt geben die Spezifikation des Gesamtsystems wieder, einschließlich Controller, Mechanik und Sensor. Die Überprüfung erfolgt mit externen Messmitteln (Zygo-Interferometer)

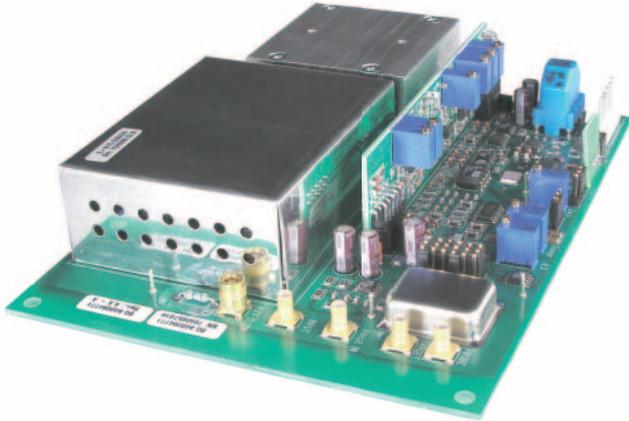
Direkte Parallelmetrologie: Mehrachs-messungen gegen eine feste Referenz

Ein mehrachsiges Verstellersdesign mit Parallelkinematik ermöglicht die Verwendung von direkter Parallelmetrologie, die Vermessung aller Freiheitsgrade der bewegten Plattform gegen eine einzige feste Referenz. Ein ungewolltes Übersprechen der Bewegung in eine andere Achse z. B. durch äußere Krafteinwirkung kann so detektiert und in Echtzeit aktiv ausgeregelt werden. Diese aktive Führung ermöglicht eine hohe Bahntreue im Nanometerbereich, auch bei dynamischem Betrieb.



Trägheitsminimiertes Parallelkinematik-Nanopositioniersystem mit kapazitiven Sensoren in Parallelmetrologie-Anordnung. Die Pfeile zeigen den Signalfloss von Sensor zur Regelung. rot: X-Achse, blau: Y-Achse

Precision Motion Control



Die Stromversorgung des Controllers ist auch bei offenen OEM-Modulen meist direkt auf der Platine integriert. Der Betrieb des Piezosystems erfordert dann nur eine stabilisierte Spannung von 12 bzw. 24 V

Piezocontroller von PI bieten:

- Hohe Linearität
- Positionierung mit Sub-Nanometer-Genauigkeit
- Hohe Langzeitstabilität
- Rauschen um 1 mV (RMS-Wert)
- Niedrige Leistungsaufnahme
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- Angepasste Ausgangsspannungen für verschiedene Piezoaktoren und Piezoantriebe
- Analoge Schnittstellen zur schnellen, direkten Kommandierung in Echtzeit
- Kurzschlussfestigkeit

So flexibel wie der Antrieb: Die Steuerung

PI bietet für die Präzisionspositionierung im Genauigkeitsbereich von einem Mikrometer bis unter einen Nanometer das weltweit breiteste Spektrum an Positionier- und Antriebssystemen. Schnelles Einschwingen oder langsame Geschwindigkeit mit hoher Konstanz, hohe Positionsstabilität und -auflösung, hohe Dynamik – die Anforderungen an Piezosysteme sind höchst unterschiedlich und erfordern ein hohes Maß an Flexibilität der Steuerung und Regelung. PI bietet daher von breit einsetzbaren Steuerungen bis hin zu hoch spezialisierten Controllern ein breites Spektrum an Piezoelektroniken an: Als OEM-Board zur Integration, als „Plug & Play“ Tischgerät oder modular aufgebaut für die Ansteuerung einer nahezu beliebigen Anzahl von Bewegungsachsen.

Eine Änderung der Ansteuerspannung bewirkt eine Änderung der Auslenkung des Piezoaktors. Ansprechzeiten im Bereich weniger Mikrosekunden sind möglich, abhängig von der Leistungsfähigkeit der Piezoverstärker.

Im statischen Betrieb, also beim Halten einer bestimmten Position, ist zudem die Stabilität der Spannungsquelle entscheidend, da piezoelektrische Aktoren bereits auf die geringste Spannungsänderung mit einer Bewegung reagieren. Ein Rauschen oder Driften gilt es so weit wie möglich zu vermeiden.

Dieser Hochleistungscontroller liefert bis zu 6 A im Spannungsbereich bis 1100 V und kann auch ohne Regelung betrieben werden. Ein digitales Interfacemodul bietet erweiterte Funktionalitäten wie Datenrecorder und Funktionsgenerator

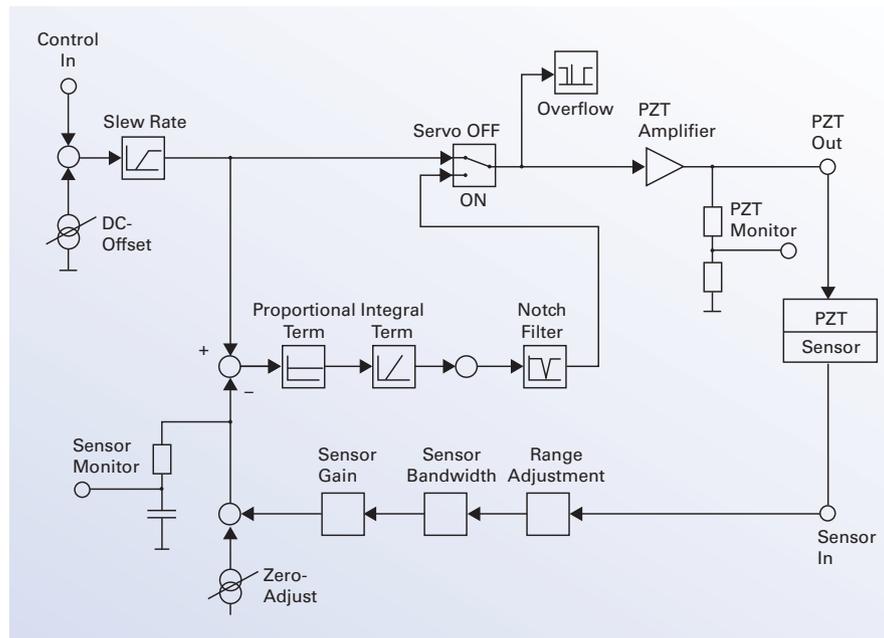


Die Regelelektronik optimiert die Systemeigenschaften

Die Leistungsfähigkeit eines Piezoscanners muss grundsätzlich im System, also in Kombination mit dem geeigneten Motion Controller betrachtet werden. Rauscharme und drifffreie Piezoverstärker von PI sorgen für beste Stabilität und Auflösung. Schnelle Anstiegsflanken erlauben schnelle Ansprechzeiten und hohe Scanfrequenzen.

Eine Positionsregelung vergleicht die Positionsvorgabe (Sollwert) mit der vom Sensor gemessenen Position (Istwert) und kann so nichtlineare Eigenschaften des Piezoaktors wie Hysterese und Drifffekte ausregeln.

Die Positionsregelung der meisten analogen Piezocontroller von PI ist identisch. Es handelt sich dabei um einen speziell für den Piezobetrieb optimierten Proportional-Integral-Positionsregler. Ein oder mehrere einstellbare Notchfilter führen zu einer deutlichen Verbesserung der Bandbreite und Dynamik, da Randeffekte durch systemimmanente Resonanzen unterdrückt werden, bevor sie die Systemstabilität beeinträchtigen können. Optimierte Regelalgorithmen minimieren die Einschwingzeiten, sodass positionsgeregelte Piezopositioniersysteme von PI Wiederholgenauigkeiten bis in den Sub-Nanometerbereich und Bandbreiten bis 10 kHz erreichen.



Blockschaltbild eines typischen Piezocontrollers mit Positionsregelung

Auflösung mit und ohne Regelung

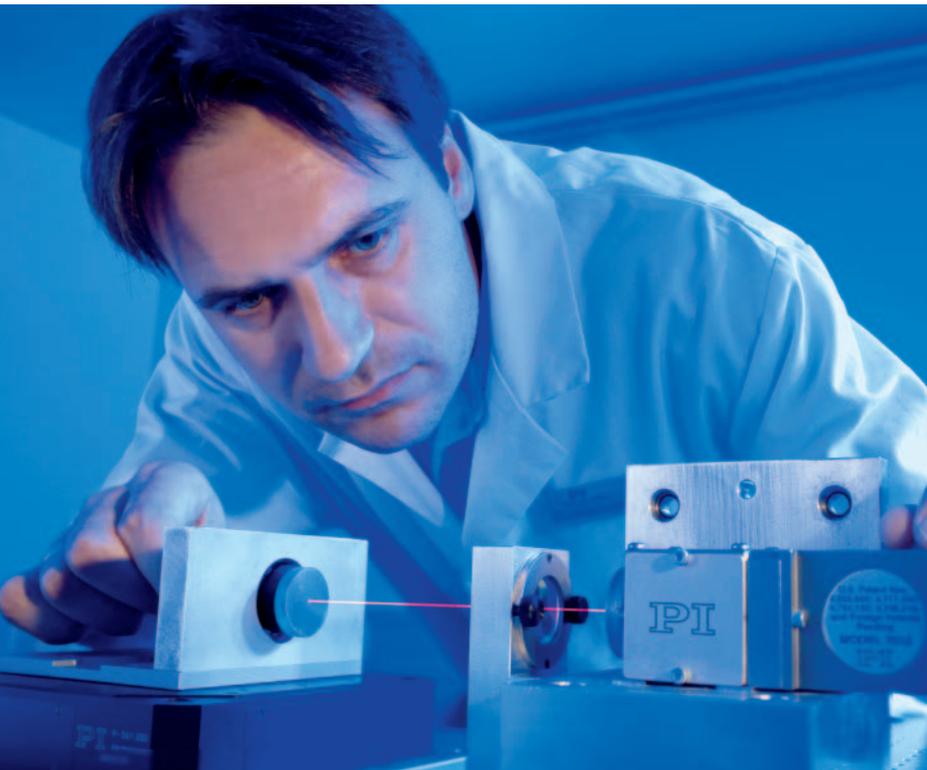
Positionsgeregelte Piezoantriebe ermöglichen eine um Faktoren höhere Linearität und Wiederholbarkeit als unregelte Systeme. Die Auflösung, die bei Piezoaktoren nicht durch Reibung begrenzt ist, sondern vom elektrischen Rauschen bestimmt wird, liegt im unregulierten Betrieb prinzipiell höher als im geschlossenen Regelkreis.

Im geregelten Betrieb erzeugen der Sensor und die Regelelektronik zusätzlich zum Piezoverstärker ein Rauschen. Mit entsprechend hochwertigen Systemen sind auch im geregelten Betrieb Auflösungen im Sub-Nanometer-Bereich möglich. Kapazitive Sensoren erreichen die höchste Auflösung, Linearität und Stabilität.

Vor- und Nachteile einer Positionsregelung

Ein Positionsregler arbeitet immer im linearen Aussteuerbereich der Spannungen und Ströme. Da der Spitzenstrom zeitlich begrenzt und daher nicht linear ist, kann er für eine stabile Wahl der Regelparameter nicht genutzt werden. Dadurch begrenzt die Positionsregelung die Bandbreite und lässt einen Pulsbetrieb nicht zu. In Schaltanwendungen kann daher häufig eine erforderliche Positionsstabilität und Linearität nicht durch Positionsregelung erreicht werden. Eine Linearisierung kann dann z. B. durch die Ladungssteuerung der Verstärker oder durch numerische Korrekturverfahren erreicht werden.

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



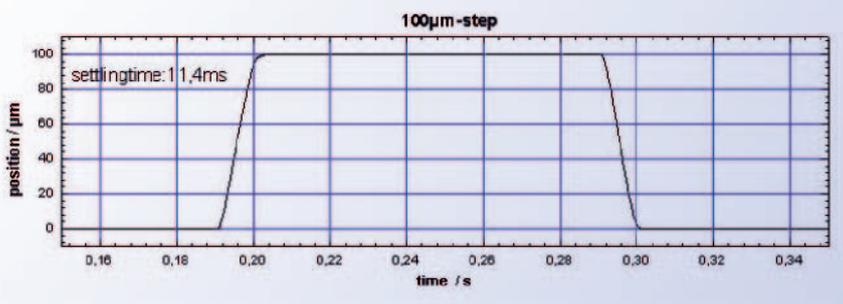
Standardisierte Messprotokolle: Das gute Gefühl, zu bekommen, was man erwartet

Nanopositioniersysteme stellen in Anwendungen eine wesentliche und kostenintensive Komponente dar. Bei PI wird daher jedes System individuell getestet und auf die statischen und dynamischen Parameter hin optimiert. Das Messprotokoll wird dem System zur Auslieferung beigelegt. Daher kann kundenseitig jederzeit nachvollzogen werden, wie die Leistungsfähigkeit des Systems bei der Auslieferung war und welche Systemkomponenten zusammengehören.

PI investiert fortlaufend in die Verbesserung der Nachweismethoden und Testmittel, um so noch höherwertige Systeme ausliefern zu können. Geregelte Nanopositioniersysteme werden ausschließlich mit hochwertigen kalibrierten Interferometern vermessen. Die Testlabore sind seismisch, elektromagnetisch und thermisch isoliert, die Temperaturstabilität ist besser als 0,25 °C in 24 Stunden. Damit setzt PI die Standards in der Vermessung und Beschreibung von Nanopositionierprodukten.

Controllerabgleich

Zur Optimierung des Abgleichs werden verschiedene Informationen über die Anwendung benötigt, wie die gewünschte Betriebsfrequenz, die Größe der bewegten Last oder die Federkonstante einer Vorlast bzw. des Materials, gegen das der Piezoaktor arbeitet.



Optimiertes, positionsgeregeltes Nanopositioniersystem: Ein Piezoscanner erreicht den vollen Stellweg von 100 µm in nur wenigen Millisekunden

Digitalcontroller für Präzision, Dynamik und Bedienkomfort

Digitale Controller haben gegenüber analogen Verstärkerelektroniken Vorteile, die vor allem bei hochpräzisen Positionieraufgaben zum Tragen kommen: So kann auf die Linearität und das Einschwingverhalten durch Rechenalgorithmen gezielt Einfluss genommen werden. Dies dient der Steigerung der Präzision und der dynamischen Eigenschaften.

Linearisierung der Elektronik

Alle digitalen PI Controller für die Nanopositionierung verhalten sich gleich. Dadurch ist es möglich, beliebige auf eine digitale Steuerung abgestimmte Piezomechaniken auch an anderen Controllern ohne Performanceverluste zu betreiben. Die erforderlichen Abgleichdaten werden auf einem ID-Chip im Verstärker gespeichert und vom Controller bei der Inbetriebnahme abgerufen.

Regler und Regelverfahren

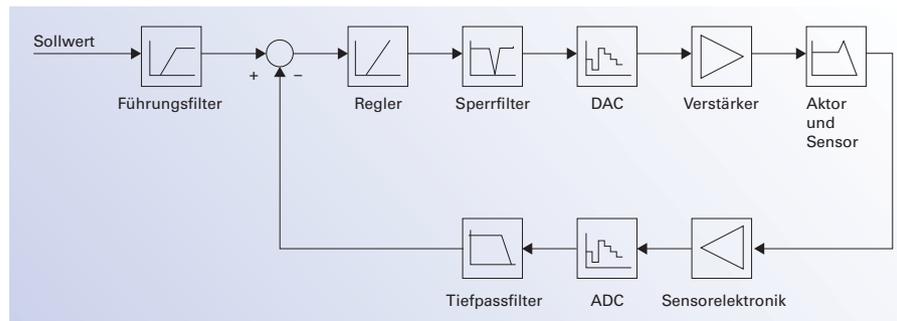
Die Aufgabe des Reglers ist, Abweichungen von Soll- und Istposition auszugleichen. Klassisch werden PI Regler mit Notchfiltern verwendet. Abhängig von der Anwendung können aber auch andere Regelkonzepte in Kombination mit Linearisierungsalgorithmen zu besseren Ergebnissen führen. Digitale Filter vermeiden unerwünschte Anregungen, unterdrücken Rauschen und erhöhen somit die Auflösung des Systems.

Linearisierung der Mechanik

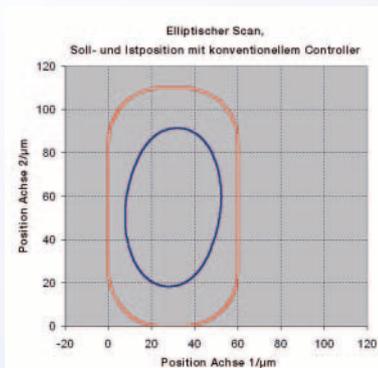
Die Linearität des Gesamtsystems ist ein Maß für seine Positioniergenauigkeit. Piezoaktoren an sich besitzen eine Nichtlinearität von 10 bis 15 % des Stellwegs, der durch die Ansteuerung und Regelung ausgeglichen werden muss, damit das System die Position möglichst präzise erreicht. Die Nichtlinearität der Bewegung wird bei digitalen Controllern durch Berechnungen mit Polynomen höherer Ordnung auf Werte unter 0,001 % reduziert – was bei einem Stellweg von 100 µm einer Genauigkeit unter einem Nanometer entspricht.



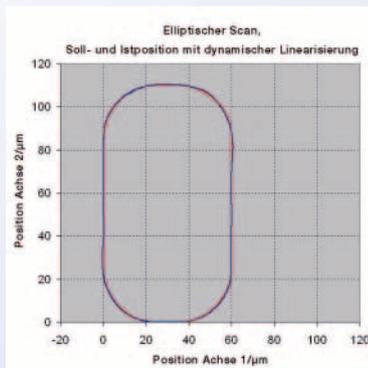
Modulare, digitale Mehrachsensteuerungen mit integrierter Koordinatentransformation erleichtern die Bedienung komplexer parallelkinematischer Systeme, wie hier dieses Hexapoden mit NEXLINE® Piezoschreitantrieben



Regelung in digitalen Controllern



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



Gleicher Scan wie zuvor, jedoch mit DDL-Controller. Der Trackingfehler ist auf wenige Nanometer reduziert, Soll- und Istposition sind in der Grafik nicht zu unterscheiden

Dynamische Linearisierung

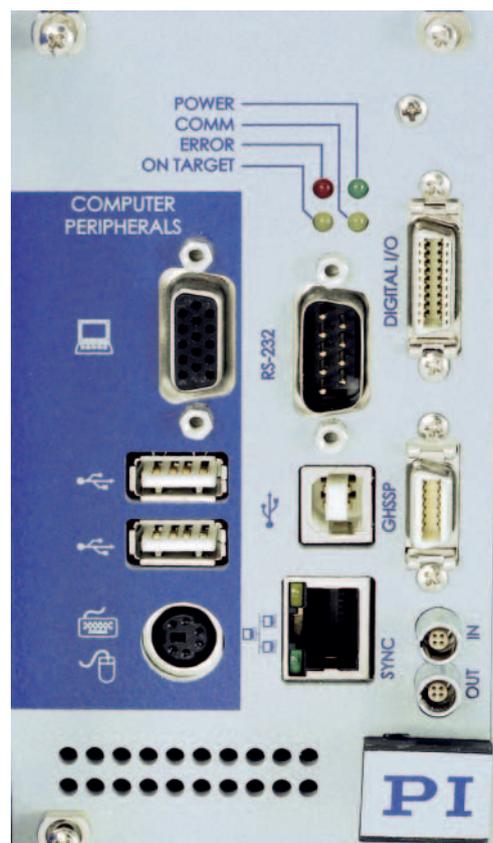
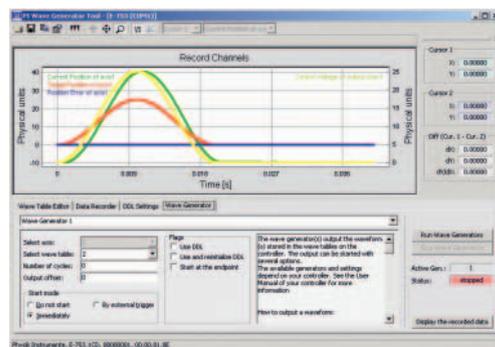
Die digitale dynamische Linearisierung (DDL) reduziert zusätzlich noch während der Bewegung die Abweichung von sich periodisch wiederholenden Bahnkurven. Dies ist relevant für Scanning-Anwendungen, bei denen es darum geht, eine bestimmte Position zu identifizieren und präzise wieder anzufahren, oder für Anwendungen, bei denen die Bahnkurve für Bearbeitungsschritte eingehalten werden muss.

Zusatzfunktionen digitaler Controller

Rechenleistung und Speicherplatz, die die digitalen Steuerungen mit sich bringen, erlauben die Implementierung nützlicher Zusatzfunktionen.

- Software-Zugriff auf alle Bewegungsparameter und die grafische Darstellung der Effekte
- Koordinatentransformation für parallele Kinematiken zur einfachen Kommandierung in kartesischen Koordinaten
- Makrospeicher um extern triggerbare Bewegungsabläufe zu speichern und abzurufen
- Funktionsgenerator und Kurvenspeicher für den Abruf vorgefertigter Bewegungskurven und zur Erzeugung von eigenen Wellenformen
- Datenrecorder zeichnen Sensor- und Steuerwerte für die spätere Bearbeitung auf
- Der ID Chip ermöglicht den flexiblen Austausch von Controllern und Nanopositionierern ohne einen erneuten Abgleich der Betriebsparameter

Nicht jede Funktionalität steht für alle Controller zur Verfügung. Details in den jeweiligen Produktdatenblättern.

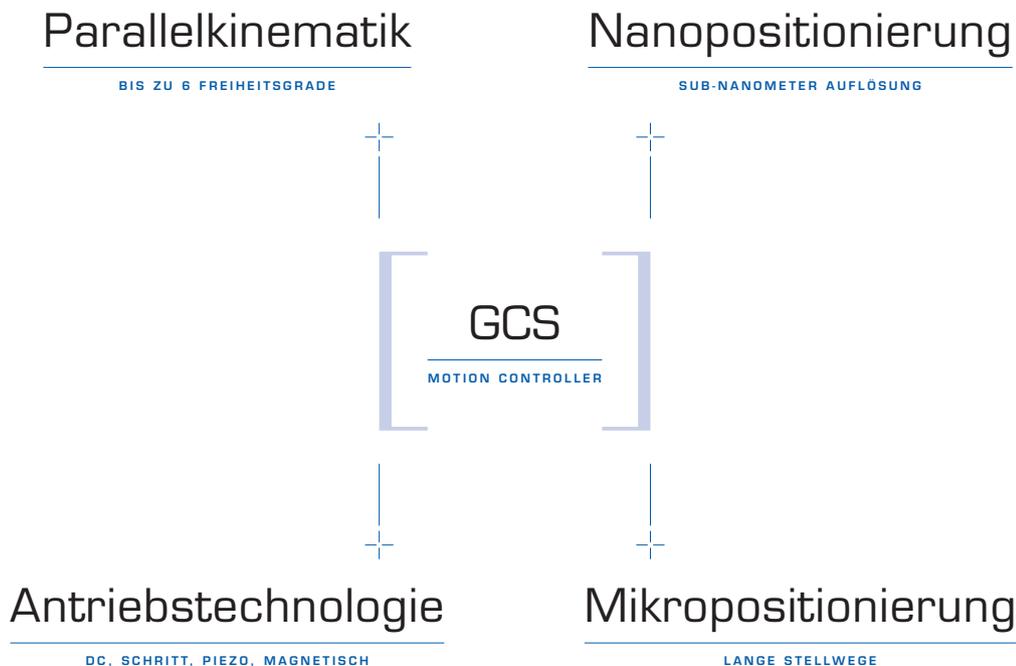


Die Standardschnittstellen für digitale Nanopositioniercontroller sind RS-232, USB und TCP/IP. Darüber hinaus bietet PI zusätzliche digitale I/O Leitungen sowie Optionen für analoge Schnittstellen oder ein PIO zur Echtzeit-Kommandierung

Komplexe Bewegungsprofile können mit dem Funktionsgenerator erzeugt, gespeichert und umgesetzt werden

Motion Control Software von PI

Effektive und komfortable Lösungen



Alle Digitalcontroller von PI werden mit einem umfangreichen Softwarepaket ausgeliefert. PI unterstützt Softwareanwender durch umfangreiche Onlinehilfen und Handbücher, die sowohl die schnelle Inbetriebnahme ermöglichen als auch Detailfragen für den fortgeschrittenen Anwender erläutern. Aktualisierte Versionen der Software sind für PI Kunden jederzeit kostenlos über das Internet verfügbar.

Die PI Software deckt alle Anwendungsaspekte ab, angefangen bei der einfach durchführbaren Inbetriebnahme über die komfortable Ansteuerung der Systeme über grafische Oberflächen bis zur schnellen und übersichtlichen Einbindung in externe Programme.

Universeller Befehlssatz vereinfacht Inbetriebnahme und Programmierung

PI hat den PI General Command Set (GCS) entwickelt, über den alle Nano- und Mikropositioniersysteme, unabhängig von den verwendeten Antrieben und Motion Controllern, angesteuert werden. Die durchgängig einheitliche Kommandostruktur erfordert lediglich eine einmalige Einarbeitungszeit und vermindert die Fehlerwahrscheinlichkeit in der Programmierung.

Unterstützte Betriebssysteme

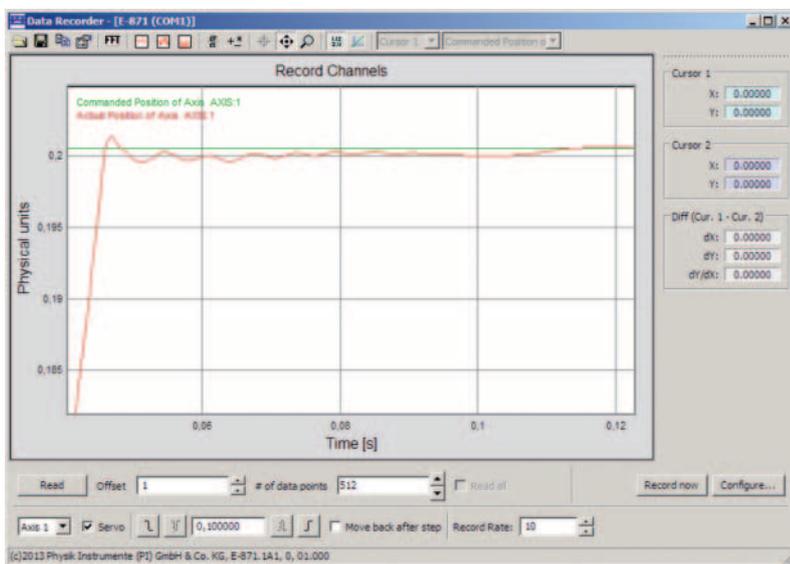
- Windows XP (SP3)
- Windows VISTA
- Windows 7 32/64 Bit
- Linux 32/64 Bit
- Windows 8 32/64 Bit

PIMikroMove® Software sorgt für schnelle Inbetriebnahme

PIMikroMove® steuert alle Positioniersysteme von PI übersichtlich und komfortabel an, egal ob mit piezoelektrischen, magnetischen oder klassischen Elektromotorantrieben, unabhängig von der Zahl und Konfiguration der Achsen.

Alle angeschlossenen Controller und Achsen werden in einer einheitlichen grafischen Umgebung angezeigt. Dabei können für eine mehrachsige Anwendung verschiedene Controller verwendet und dennoch über PIMikroMove® im selben Fenster kommandiert werden. Zwei oder mehrere unabhängige Achsen können im Position Pad mit der Maus oder einem Joystick bewegt werden, auch vektoriell; Hexapoden werden grafisch dargestellt.

Makros erleichtern wiederkehrende Aufgaben, wie sie bei automatisierten Vorgängen anfallen. Die Makros werden als GCS-Befehlsfolgen erstellt, die abhängig vom verwendeten System z. B. in Form von Startup-Makros direkt auf dem Controller ausgeführt werden können oder vom Host-PC abgearbeitet werden.



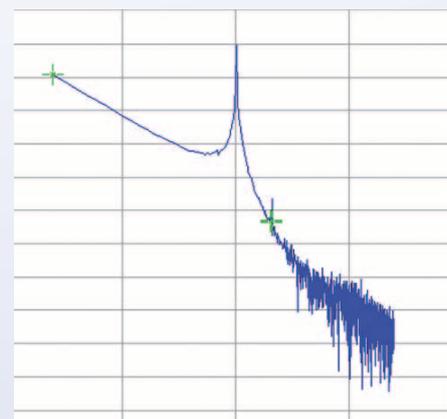
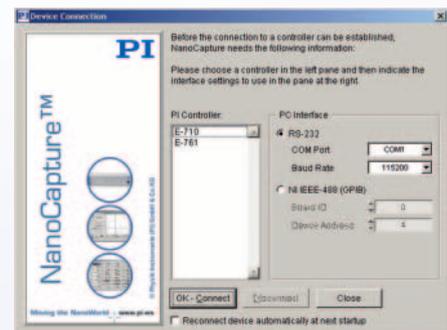
Ein flexibel konfigurierbarer Datenrecorder speichert Daten wie Position, Sensorsignal oder Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Zeit

Scanalgorithmen können analoge Werte in Abhängigkeit von der Position aufzeichnen und darstellen oder das globale Maximum eines analogen Wertes vollautomatisch finden.

Abhängig vom Controller unterstützt PIMikroMove® unterschiedliche Funktionalitäten. Ein Datenrecorder kann z. B. Bewegungs- und Systemparameter aufzeichnen.

Optimales Systemverhalten

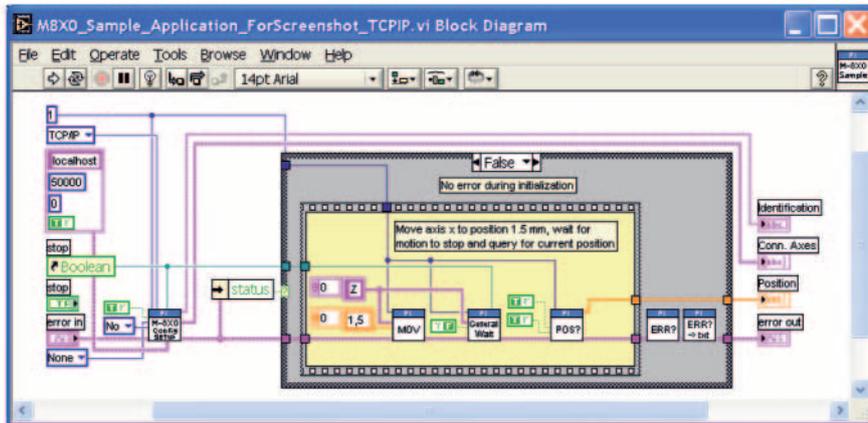
Wenn die mechanischen Eigenschaften eines Systems z. B. durch eine andere Last verändert werden, ist oft eine Parameteranpassung notwendig. PI Software bietet Tools, um das Ansprechverhalten und die Systemstabilität zu optimieren und verschiedene Sätze von Parametern zu speichern, die dann für selbstprogrammierte Applikationen bereit stehen.



Mit Software von PI Piezosysteme komfortabel bedienen und Performance optimieren: Das Einstelltool für Parameter zeigt die Frequenzantwort eines Nanopositionierendes im Bodeplot

Motion Control Software von PI

Schnelle Einbindung der PI Controller in Programmiersprachen und Softwareumgebungen von Drittanbietern



Viele Applikationen werden heute in LabVIEW erstellt, z. B. in der Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik. PI stellt vollständige LabVIEW-Treiber zur Verfügung. Ein controller-spezifisches Configuration_Setup VI wird am Anfang der LabVIEW-Applikation eingebunden und beinhaltet alle zur Inbetriebnahme benötigten Systeminformationen und Initialisierungsschritte. Die Applikation selbst wird mit controllerunabhängigen VIs umgesetzt.

Bei Controllerupgrades oder -wechseln muss in der Regel nur das Configuration_Setup VI ausgetauscht werden, der applikationsspezifische Code bleibt aufgrund des einheitlichen Befehlssatzes GCS identisch.

Der Treibersatz beinhaltet viele spezielle Beispielprogramme, z. B. umfangreiche Scan- und Alignapplikationen, die als Template für eigene Programme genutzt werden können. Zudem ermöglicht der offene Quellcode vieler VIs die schnelle Anpassung an die Anwenderbedürfnisse.

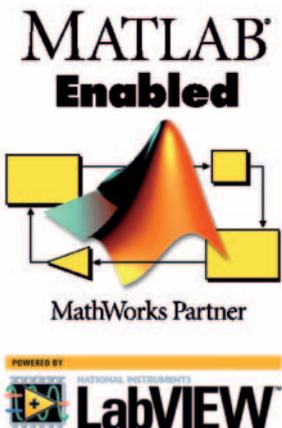
Flexible Einbindung in textorientierte Programmiersprachen

Die Einbindung von PI Positioniersystemen in textbasierte Programmiersprachen unter Microsoft Windows oder Linux wird durch Programmbibliotheken und Beispielcodes erleichtert.

Diese Bibliotheken unterstützen alle gängigen Programmiersprachen und alle Positioniersysteme von PI. Die Funktionalität des PI GCS-Befehlssatzes kann dadurch nahtlos in externe Programme eingebunden werden.

Softwarepakete von Drittanbietern

Treiber für die PI GCS-Kommandos sind inzwischen in den bekanntesten Drittanbieter-Softwarepaketen integriert. So ist die Ansteuerung von PI Systemen z. B. über MetaMorph, µManager, MATLAB und ScanImage möglich. Außerdem sind EPICS- und TANGO-Treiber für die Integration in Experimente in Großforschungsanlagen verfügbar. Die Treiber für µManager, MATLAB sowie ein großer Teil der EPICSTreiber werden von PI selbst entwickelt und gepflegt.



Unterstützte Sprachen und Softwareumgebungen

- C, C++, Python, Visual C++, Visual Basic, Delphi
- LabVIEW, MATLAB, µManager, EPICS, TANGO, MetaMorph
- sowie alle Programmierumgebungen, die das Laden von DLLs unterstützen

Service

Der Lieferumfang eines PI Systems, bestehend aus Controller und Verstärker, enthält alles, was für den Betrieb erforderlich ist.

- Externe Netzteile
- Alle Netz-, Kommunikations- und Systemkabel
- Die ausführliche Bedienungsanleitung in gedruckter Form
- Software CD mit Setup-Funktion

Bei der Entwicklung der Geräte steht die Verwendung modernster Komponenten an erster Stelle. Somit ergibt sich eine **lange Lieferbarkeit** und Austauschbarkeit der Systeme auch über den Produktlebenszyklus hinaus. Alle Positioniersysteme aus dem Standardprogramm von PI erfüllen die CE und RoHS Vorgaben.

Kundenspezifische Produktentwicklungen und -anpassungen sind ein wichtiger Bestandteil unseres technischen Fortschritts.

Wir bieten Ihnen:

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

Die aktuellen Versionen von Firmware, Software und Bedienungsanleitungen stehen kostenlos im Internet zur Verfügung. Firmwareupdates sind einfach über die Standardschnittstellen des Controllers auszuführen. PI bietet einen weitreichenden Software-Support an. Die PI Software ist im Lieferumfang von Digitalgeräten enthalten und dient zur Inbetriebnahme sowie zur Analyse und Optimierung des Systemverhaltens. DLLs, LabVIEW Treiber oder die Unterstützung von MATLAB erleichtern die Programmierung.



Glossar

Anstiegszeit

Zeitkonstante des Verstärkers/Controllers. Zeit, die benötigt wird, um von 10 % auf 90 % des maximalen Spannungshubs zu kommen.

Antriebsart

Gibt an, welche Antriebsarten durch den Controller/Verstärker unterstützt werden, z. B. DC-Motoren, Piezoschreitantriebe, Piezoaktoren.

Auflösung

Auflösung in der Positionierung bezeichnet die kleinste Abstandsänderung, die vom System unterschieden werden kann. Die unregelmäßige Auflösung von Piezo-Nanopositionierern und Piezoaktoren ist im Prinzip unbegrenzt, weil sie nicht durch Haft- oder Gleitreibung limitiert wird. Stattdessen ist das Äquivalent zum Elektronikrauschen spezifiziert.

Ausgangsspannung

Die Ausgangsspannung von Piezocontrollern zeigt Schwankungen von nur wenigen Millivolt und ist damit besonders langzeitstabil.

Aussteuergrenzen

Gemessene Werte bei Umgebungstemperatur 20 °C. Als Steuersignal wird ein Sinus verwendet, im unregelmäßigen Betrieb (open-loop). Der Verstärker arbeitet innerhalb der Aussteuergrenzen linear, insbesondere ohne thermische Begrenzung.

Bandbreite

Gemessener Wert. Angegeben ist die Frequenz in kHz, bei der die Amplitude um -3 dB abgefallen ist. Großsignalwerte: bei maximaler Ausgangsspannung. Kleinsignalwerte: bei Ausgangsspannung von $10 V_{pp}$. Die Werte sind im Aussteuerdiagramm des Controllers/Verstärkers abzulesen.

Betriebsspannung

Erlaubter Eingangsspannungsbereich, ggf. auch Eingangsfrequenz, für die Versorgung des Geräts.

Betriebstemperaturbereich

Im maximal zulässigen Temperaturbereich kann das Gerät in jedem Fall sicher betrieben werden. Um ein internes Überhitzen zu vermeiden, steht jedoch ab einer bestimmten Temperatur (maximale Betriebstemperatur unter Volllast) nicht mehr die volle Leistung zur Verfügung.

Dauerausgangsstrom

Für Mehrachsen-Controller erfolgt die Angabe pro Kanal. Gemessener Wert. Steht über längere Zeit zuverlässig zur Verfügung.

Dynamische Auflösung

Für kapazitive Sensoren. Gemessen im nominalen Messbereich, Bandbreite s. Datentabelle. Vgl. statische Auflösung.

Eingangsspegel

Erlaubte Eingangsspegel für digitale Schnittstellen.

Eingangsspannungsbereich

Auch Eingangssteuerspannung, für Piezocontroller/Verstärker. Empfohlen ist ein Bereich von -2 bis 12 V. Der übliche Verstärkungsfaktor von 10 bewirkt eine Ausgangsspannung von -20 bis 120 V. Die meisten PI Controller erlauben einen Eingangsspannungsbereich von -3 bis 13 V.

Encodereingang

Maximale Bandbreite (-3 dB) der Eingangssignale für den Encodereingang.

Endschalter

Funktionsweise, z. B. optisch, magnetisch.

Erweiterungsfaktor für den Messbereich

Für kapazitive Sensoren, wird bei PI gesetzt.

Grundlast (intern)

Für geschaltete Verstärker. Stabilisiert die Ausgangsspannung auch ohne angeschlossene kapazitive Last (Piezoaktor). Die mögliche Ausgangsleistung eines Piezocontrollers/Verstärkers hängt von den internen und externen kapazitiven Lasten ab.

Leistungsaufnahme

Maximale Leistungsaufnahme bei Volllast.

Linearisierung

Integrierte Methode, z. B. ILS, Polynome n-ter Ordnung, Sensorlinearisierung.

Linearitätsabweichung

Wert aus Realmessung mit externem, rückführbarem Messmittel. Bezeichnet den Betrag der maximalen Abweichung von einer idealen geradlinigen Bewegung. Die Angabe erfolgt in % in Bezug auf den gesamten Messbereich. Die Linearitätsabweichung hat keinen Einfluss auf die Auflösung und Wiederholbarkeit einer Messung.

Messung der Linearitätsabweichung: Die Soll- und gemessenen Istwerte der Positionen werden gegeneinander aufgetragen, eine Gerade durch den ersten und letzten Datenpunkt gelegt und die betragsmäßig maximale Abweichung von dieser Gerade bestimmt. 0,1 % Linearitätsabweichung entspricht damit einem Fenster von $\pm 0,1$ % um die ideale Gerade. Beispiel: Eine Linearitätsabweichung von 0,1 % über einen Messbereich von 100 μm ergibt eine mögliche maximale Abweichung des Messwertes zum Istwert von 0,1 μm .

Profilgenerator

Lineare Interpolation, Punkt-zu-Punkt, Trapez, S-Kurven. Für mehrere Achsen: elektronische Getriebefunktion.

Rauschen

Für kapazitive Sensoren. In erweiterten Messbereichen ist das Rauschen deutlich höher als im nominalen Messbereich.

Referenzschalter

Funktionsweise: optisch, magnetisch.

Sensorauflösung

Der Sensor kann das kritische Element der Positionsaufklärung sein, weshalb die Sensoraufklärung erforderlichenfalls separat spezifiziert wird.

Sensorbandbreite

Gemessener Wert. Angegeben ist die Frequenz, bei der die Amplitude bei auf -3 dB abgefallen ist.

Sinnvolle Piezolast

Für geschaltete Verstärker. Die mögliche Ausgangsleistung eines Piezocontrollers/Verstärkers hängt von den internen und externen kapazitiven Lasten ab.

Spitzenstrom

Steht nur für sehr kurze Zeiten zur Verfügung, typisch unter einigen Millisekunden. Dient der Abschätzung der möglichen Dynamik mit einer bestimmten kapazitiven Last. Hinweis: Der Piezocontroller/Verstärker arbeitet dabei nicht unbedingt linear.

Statische Auflösung

Für kapazitive Sensoren. Gemessen bei einer Bandbreite von 10 Hz, nominaler Messbereich.

Stromaufnahme

Stromverbrauch des Systems auf der Versorgungsseite. Angegeben im Leerlauf (Controller ohne Last). Alternativ Leistungsaufnahme.

Strombegrenzung

Kurzschlussfestigkeit.

Überhitzungsschutz

Abschalttemperatur für den Spannungsausgang. Kein automatisches Wiedereinschalten.

Verstärkerauflösung

Nur für digital angesteuerte Verstärker: Messung des kleinsten digitalen Ausgabewerts (LSB) in mV.

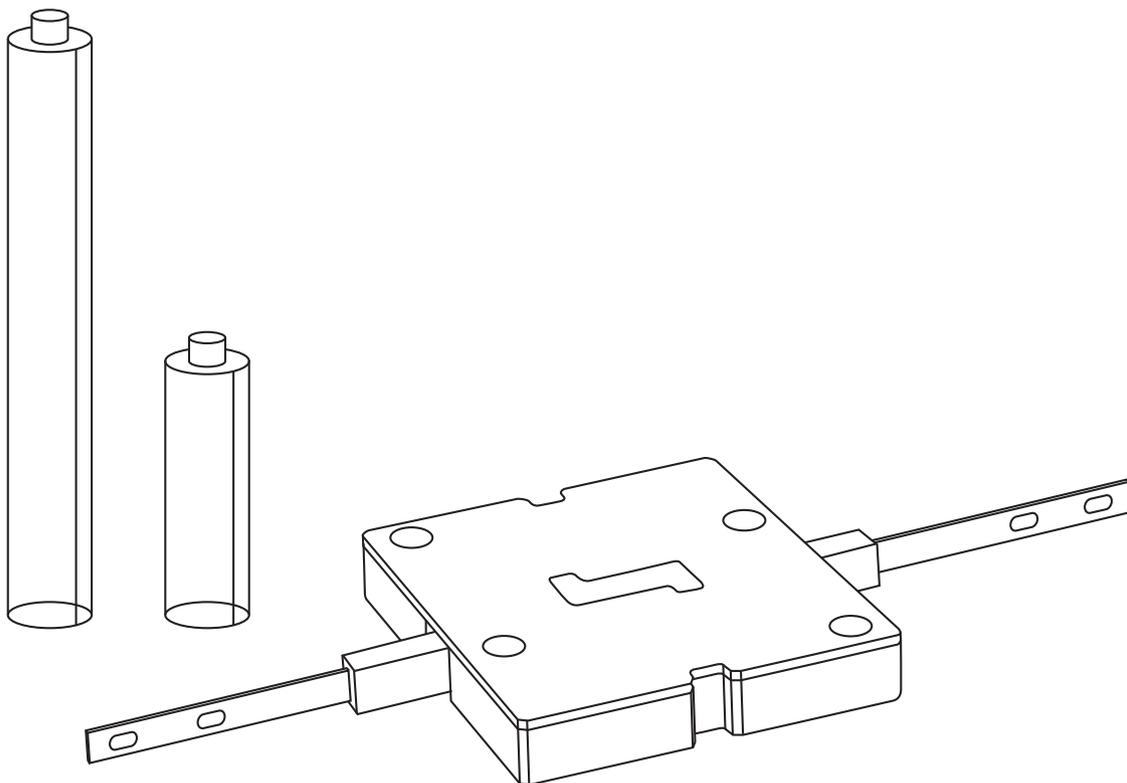
Verstärkerprinzip

PI verwendet folgende Verstärkerprinzipien: Ladungsgesteuert, geschaltet (class D), linear.

Welligkeit, Rauschen, 0 bis 100 kHz

Restwelligkeit der Spannung in mV_{pp} mit eindeutiger Frequenz. Rauschen über gesamten Frequenzbereich.

Piezoantriebe



Produkte

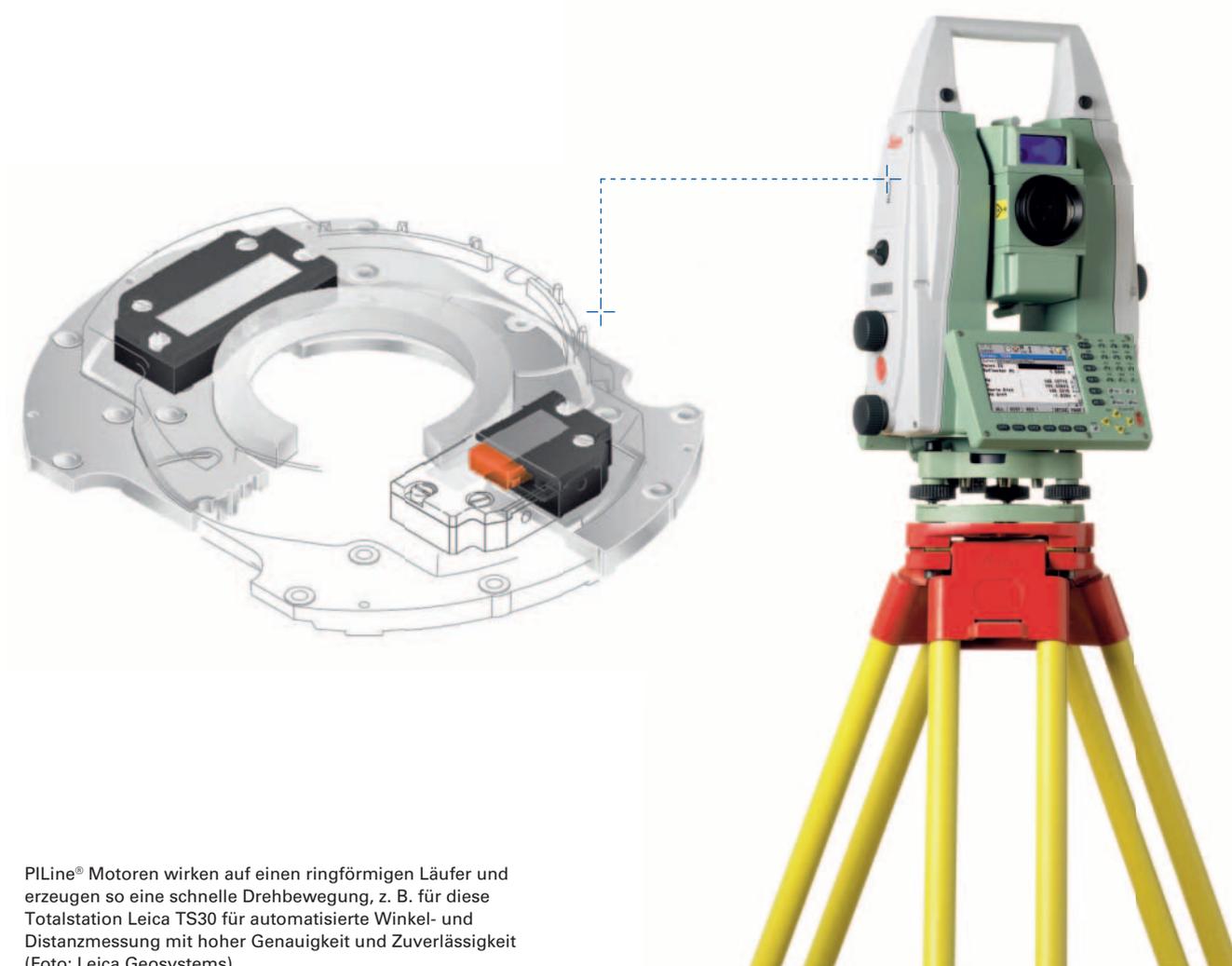
Seite 100–125

Grundlagen der Piezotechnologie

Seite 126–157

Piezomotoren

Integrationsbeispiele von Piezolinearmotoren



PILine® Motoren wirken auf einen ringförmigen Läufer und erzeugen so eine schnelle Drehbewegung, z. B. für diese Totalstation Leica TS30 für automatisierte Winkel- und Distanzmessung mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit (Foto: Leica Geosystems)



Piezolinearmotoren

Erste Integrationsstufen für OEM-Anwendungen

Seite 102

Technologien der Piezomotoren

Seite 104



Die Integration von PLine® Ultraschallmotoren ermöglicht besonders niedrig bauende Kreuztische, z. B. für die Mikroskopie



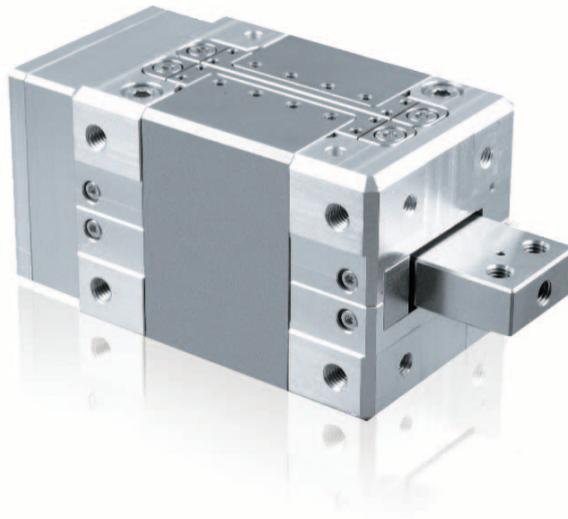
Kompakte Sonderausführung eines Linearverstellers mit NEXACT® Piezoschreittrieb und Präzisionslinearführungen. Die Abmessungen betragen nur 33 mm x 24 mm x 20 mm



PIShift Antriebe justieren die Kippwinkel in einem kardananischen Spiegelhalter

Piezolinearmotoren

Erste Integrationsstufen für OEM-Anwendungen



N-216

Highlights

- Breite Auswahl an verschiedenen Piezomotor-Technologien: Kräfte von 10 bis 800 N
- Selbsthemmend mit maximaler Kraft, keine Wärmeentwicklung im Ruhezustand
- Der Stellweg ist skalierbar und wird nur durch die Läuferlänge begrenzt
- Einfache Integration, Ersatz für Motor-Spindel-Antriebe
- Nichtmagnetische Ausführungen auf Anfrage
- Vakuumkompatibel bis 10^{-6} mbar; UHV auf Anfrage

Anwendungen

Die Anwendungen reichen von der Probenmanipulation in der Biotechnologie bis zur Positionierung optomechanischer Komponenten in abbildenden Verfahren. PI setzt Piezomotoren als platzsparendes und hochauflösendes Antriebselement in ein- und mehrachsigen Positioniersystemen ein. Die Integration geht bis zu komplexen 6D-Hexapoden, die auch unter Umgebungsbedingungen wie UHV oder Magnetfeldern eingesetzt werden können.



N-216
N-111

N-310

U-264

N-422

	Versionen mit hochauflösendem integriertem Linearencoder verfügbar	Sub-nm Auflösung, Geschwindigkeit regelbar bis auf wenige nm/s	Preisgünstig und sehr schnell	Einfach ansteuerbares 1-Aktor-Prinzip mit Sub-nm Auflösung
Antriebsart	NEXLINE® Piezoschreitantrieb	NEXACT® Piezoschreitantrieb	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PIShift Piezoträgheitsantrieb
Abmessungen in mm	50 × 50 × 80 (N-216) 28 × 40 × 40 (N-111)	25 × 25 × 12	57 × 63 × 10,2	21,5 × 18 × 13
Geschwindigkeit	wenige nm/s bis max. 1 mm/s	wenige nm/s bis 20 mm/s	wenige nm/s bis 500 mm/s	wenige nm/s bis 20 mm/s
Stellkraft in N	bis 600	bis 20	bis 40	bis 10
Unbestromte Haltekraft in N	bis 800 / selbsthemmend	bis 20 / selbsthemmend	bis 40 / selbsthemmend	bis 10 / selbsthemmend
Kleinste Schrittweite ohne Sensor in nm	0,03	0,03	50	300 mit E-870 Treiber
Betriebsspannung	-250 / 250 V bipolar	bis 45 V	bis 200 V Spannungshub	bis 48 V Spannungshub
Stellweg in mm	20	bis 125	bis 150	bis 40
Masse in g	1200 (N-216) 300 (N-111)	<100	<100	<30
Empfohlene Ansteuerung	E-755, E-712 Motion Controller inkl. Treiber	E-862 Treiber, E-861 Motion Controller inkl. Treiber	C-872 Treiber, C-867 Motion Controller inkl. Treiber	E-870 Treiber, E-871 Motion Controller inkl. Treiber

PiezoWalk® Piezoschreit'antriebe

Nanometer-Präzision mit hoher Vorschubkraft



- Kräfte von 10 bis 800 N
- Integrationsstufen vom OEM-Motor bis zum mehrachsigen Positioniersystem
- Variabler Stellweg durch variable Läuferlänge
- Auflösung bis 0,03 nm
- Selbsthemmend im Ruhezustand, keine Wärmeentwicklung
- Nichtmagnetisches und vakuumkompatibles Funktionsprinzip

Warum PiezoWalk®?

PiezoWalk® Antriebe wurden vor mehr als 10 Jahren für die Halbleiterindustrie entwickelt, die höchste Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Positionsauflösung und Langzeitstabilität stellt. PI erhielt für die PiezoWalk® Technologie im Jahre 2005 den SEMI Technology Innovation Showcase Award. Die Antriebe werden ständig weiterentwickelt und heute steht eine Vielzahl an Varianten für unterschiedliche Einsatzgebiete zur Verfügung.

Direkt getriebene PiezoWalk® Linearmotoren

Wesentliche Bestandteile des Piezoschreit'antriebs sind mehrere piezokeramische Aktoren, die gegen einen beweglich geführten Läufer vorgespannt sind. Die Piezoaktoren führen im Betrieb eine Schreitbewegung aus, die zu einem Vorschub des Läufers führt. Die Ansteuerung der Aktoren ermöglicht kleinste Schritt- und Vorschubbewegungen, sodass eine hohe Bewegungsauflösung von weit unter einem Nanometer erreicht wird.

Piezoschreit'antriebe benötigen keine mechanischen Komponenten wie Kupplung oder Getriebe, die durch Reibung und Spiel die Präzision und Zuverlässigkeit hochauflösender Motor-Spindel-basierter Antriebssysteme merklich begrenzen.

Schreitender Bewegungsablauf

Bei PiezoWalk® Schreit'antrieben wirken piezoelektrische Aktoren paarweise als Klemm- und Vorschubelemente auf einen bewegten Läufer. Zyklisch angesteuert erfolgt so eine schreitende Bewegung der Aktoren auf dem Läufer, dieser wird vor oder zurück bewegt.

Bei NEXLINE® Antrieben erfolgt die Schreitbewegung über getrennt angesteuerte, leistungsstarke Längs- und Scheraktoren, wodurch eine hohe Steifigkeit mit Vorschubkräften von mehreren 100 N erreicht werden. Die kompakteren NEXACT® Antriebe setzen die Schreitbewegung mit Biegeelementen um.

Die geeignete Auswahl der Piezoelemente optimiert Schrittweite, Klemmkraft, Geschwindigkeit und Steifigkeit für die jeweiligen Anforderungen.



Bewegungsablauf eines NEXLINE® Aktors

Piezomotoren sind selbsthemmend

Die Vorspannung der piezokeramischen Aktoren gegen den Läufer sorgen für die Selbsthemmung des Antriebs in Ruhe und im ausgeschalteten Zustand. Dadurch verbraucht er keine Energie, er erwärmt sich nicht und hält die Position mechanisch stabil. Anwendungen mit geringer Einschaltdauer, die eine hohe zeitliche und Temperaturstabilität erfordern, profitieren von diesen Eigenschaften.

Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Die Bewegung des piezokeramischen Aktors beruht auf kristallinen Effekten und ist keinem Verschleiß ausgesetzt. Die Ankopplung der Aktoren an den Läufer ist anders als bei anderen piezomotorischen Motorprinzipien keinen Gleitreibungseffekten unterworfen, der Vorschub wird durch ein physikalisches Klemmen und Abheben der Aktoren erzielt.

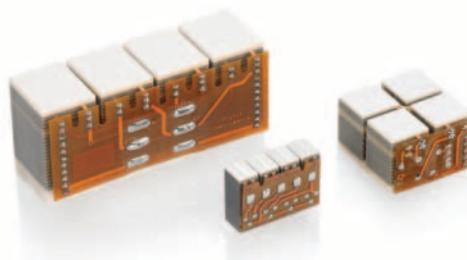
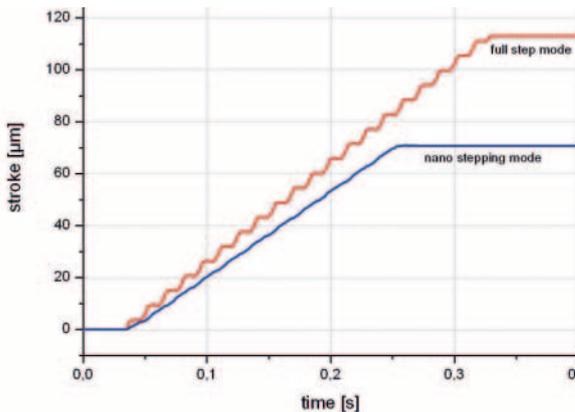
Piezomotoren für alle Anwendungen – z. B. im Vakuum und in starken Magnetfeldern

Piezomotoren von PI sind im Prinzip vakuumtauglich und für den Betrieb unter starken

Magnetfeldern geeignet. Hierfür werden Sonderversionen der Antriebe angeboten. Piezoschreitantriebe können auch in Reinräumen oder in Umgebungen mit harter ultravioletter Strahlung eingesetzt werden.

Zwei Technologien – mehr Möglichkeiten

PI verwendet bei den Piezoschreitantrieben zwei unterschiedliche Technologien, die auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmt werden können. NEXLINE® Schreitantriebe sind für höhere Stell- und Haltekräfte bis 800 N ausgelegt und arbeiten mit geringeren Geschwindigkeiten. NEXACT® Antriebe sind kompakter und erreichen höhere Geschwindigkeiten, wobei sie Kräfte im Bereich von 10 bis 20 N entwickeln.

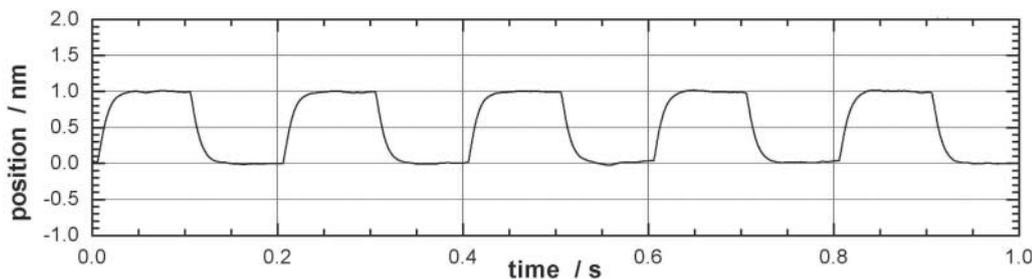


Verschiedene Bauformen und Größen von NEXLINE® Modulen (links und rechts) sowie NEXACT® (Mitte)



Konstante Geschwindigkeit und gleichmäßiger Vortrieb eines NEXLINE® Antriebs sind im Nanoschritt-Betrieb am besten, aber die maximal erreichbare Geschwindigkeit ist im Vollschritt-Betrieb höher

OEM-Piezomotoren (von links): N-216 und N-111 mit NEXLINE®, N-310 mit NEXACT® Antrieben



Folge von unregelmäßigen 1-nm-Bewegungen eines NEXLINE® Antriebs

PILine® Ultraschall-Piezomotoren

Kompakte Antriebe, schnell und selbsthemmend

- Integrationsstufen vom preisgünstigen OEM-Motor bis zum mehrachsigen Positioniersystem
- Hohe Dynamik, schnelles Einregelverhalten
- Beliebige, unbegrenzte Stellwege
- Mechanisch einfach integrierbar
- Selbsthemmend im Ruhezustand
- Haltekraft bis 15 N
- Geschwindigkeit bis 500 mm/s
- Auflösung bis 0,05 µm (50 nm)



Direktangetriebene PILine® Linearmotoren

Die Linearantriebe verzichten zugunsten der Kosten und der Zuverlässigkeit auf mechanische Komponenten klassischer Motor-Spindel-basierter Antriebssysteme wie Kupplung oder Getriebe.

Gerade in miniaturisierten Systemen sind diese Komponenten sehr verschleißanfällig. Wesentlicher Bestandteil des Ultraschall-Piezomotors ist eine Piezokeramik, die über ein Kopplungselement gegen einen beweglich geführten Läufer vorgespannt ist. Das Piezoelement wird zu hochfrequenten Schwingungen angeregt, die zu einem Vorschub des Läufers führen.

Piezomotoren sind selbsthemmend

Die Vorspannung des piezokeramischen Aktors gegen den Läufer sorgt für die Selbsthemmung des Antriebs in Ruhe und im ausgeschalteten Zustand. Dadurch verbraucht er keine Energie, er erwärmt sich nicht und hält die Position mechanisch stabil. Anwendungen mit geringer Einschaltdauer, die batteriebetrieben oder wärmeempfindlich sind, profitieren von diesen Eigenschaften.

Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Die Bewegung des piezokeramischen Aktors beruht auf kristallinen Effekten und ist keinem Verschleiß ausgesetzt. Die Ankopplung an den Läufer ist hingegen Reibungseffekten unterworfen. Abhängig vom Betriebsmodus werden Laufstrecken über 2000 km bzw. eine MTBF von 20000 Stunden erzielt.

Dynamik in der Anwendung

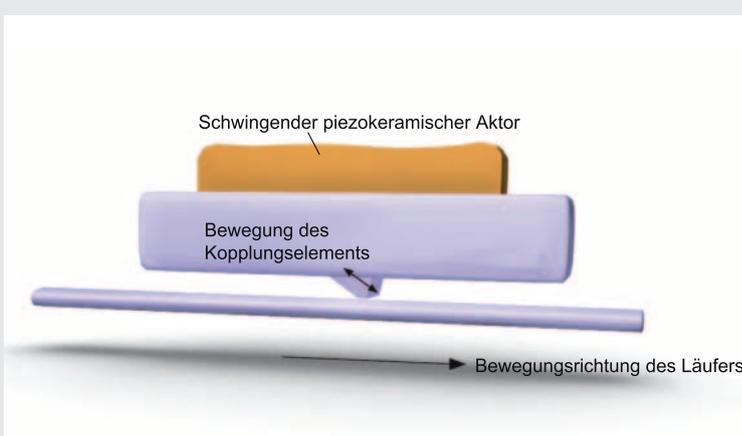
Die direkt getriebene, stabile Mechanik und die schnellen Ansprechzeiten der Piezokeramik ermöglichen das hochdynamische Start-/Stoppverhalten und Geschwindigkeiten bis zu mehreren 100 mm/s.

Patentertechnologie

Die in diesem Dokument beschriebenen Produkte fallen zumindest teilweise unter den Schutz der folgenden Patente:

US-Patent Nr. 6,765,335B2

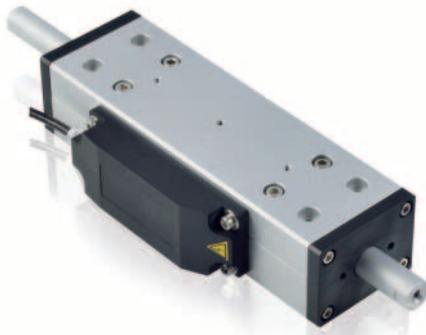
Europäisches Patent Nr. 1267425B1



Der piezokeramische Aktor wird mit einer hochfrequenten Wechselfspannung zu Ultraschallschwingungen zwischen 100 und 200 kHz angeregt. Die Deformation des Aktors führt zu einer periodischen diagonalen Bewegung des Kopplungselements zum Läufer. Je Zyklus beträgt der erzeugte Vorschub etwa 10 nm, die hohen Frequenzen führen zu den hohen Geschwindigkeiten

PILine® Ultraschall-Piezomotoren

OEM-Motoren, Technische Daten



PILine® Integrationsstufen (von links): OEM-Motor, ungeführter RodDrive U-264 und positionsgeregelter geführter Linearaktor M-272

Mehrere Integrationsstufen bieten Flexibilität

PILine® Antriebe sorgen in Positioniersystemen für die hohe Dynamik und kompakte Abmessungen. PI bietet verschiedene Integrationsstufen von PILine® Antrieben an, die einen einfachen Einbau in Kundendesigns ermöglichen:

- Positioniertische mit integrierten PILine® Antrieben, angepasst an OEM-Anforderungen
- Linearaktoren bewegen die Last über einen geführten Stab. Optional besitzen sie eine Positionsregelung.

- RodDrives sind ungeführte und unregelte Linearantriebe, die in der Integration Motor-Spindel-Kombinationen ersetzen. Sie können einfach an eine geführte Plattform angekoppelt werden
- Die Integration von OEM-Motoren ist relativ aufwendig, da die optimale Vorspannung zwischen Läufer und Aktor kundenseitig hergestellt werden muss



Treiberelektronik

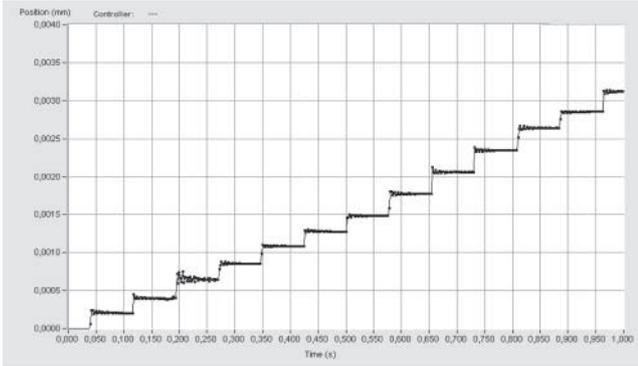
Zur Erzeugung der Ultraschallschwingungen im Piezoaktor sind spezielle Treiberelektroniken erforderlich, die PI ebenfalls anbietet. Diese reichen von OEM-Platinen bis zu integrierten Servocontrollern für positionsgeregelte Systeme.

Treiberelektroniken erzeugen die Ultraschallschwingungen im piezokeramischen Aktor des PILine® Antriebs. PI bietet universelle Treiber für alle Aktorgrößen an – wie auch spezialisierte, kompakte Platinen

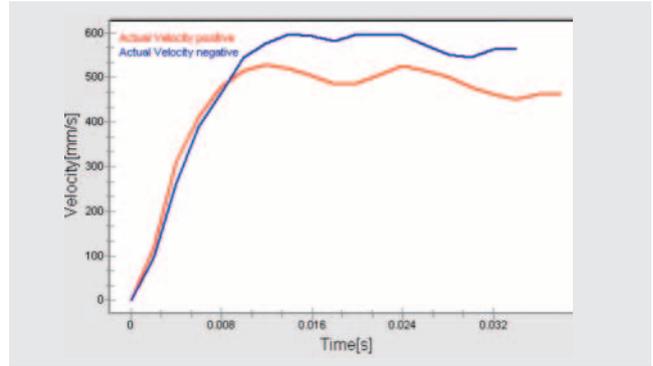
Bewegung und Positionieren	P-661	U-164	Einheit	Toleranz
Stellweg*	Unbegrenzt	Unbegrenzt	mm	bis 1 mm
Kleinste Schrittweite, unregelt**	0,05	0,05	µm	typ.
Geschwindigkeit, unregelt	500	500	mm/s	max.
Mechanische Eigenschaften				
Steifigkeit, unbestromt	0,7	3	N/µm	±10 %
Haltekraft, unbestromt	1,5	3	N	max.
Zug- / Druckkraft	2	4	N	max.
Vorlast auf Reibschiene	9	18	N	±10 %
Integrationsaufwand	mittel	gering		niedrig
Antriebseigenschaften				
Resonanzfrequenz	210	155	kHz	±2 kHz
Motorspannung	42 V _{rms} (120 V _{pp})	60 V _{rms} (170 V _{pp})		
Anschlüsse und Umgebung				
Betriebstemperaturbereich	-20 bis +50	-20 bis +50	°C	
Gehäusematerial	Aluminium, eloxiert	Aluminium, eloxiert		
Masse	10	20	g	±5 %

* Der Stellbereich von Piezolinearmotoren ist praktisch unbegrenzt und hängt nur von der Länge der Reibschiene ab

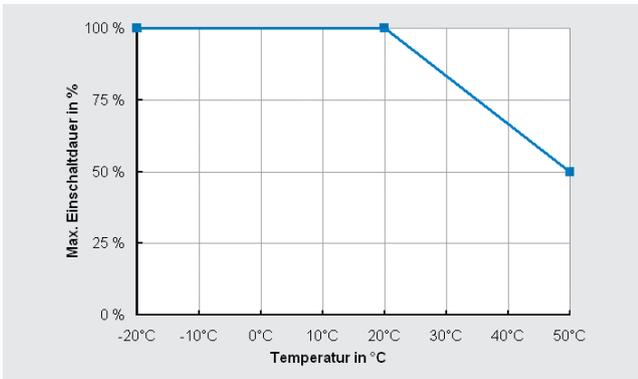
** Die kleinste Schrittweite ist ein typischer Wert, der im offenen Regelkreis erreicht werden kann. Dabei ist es wichtig, den Montagerichtlinien der Motoren zu folgen



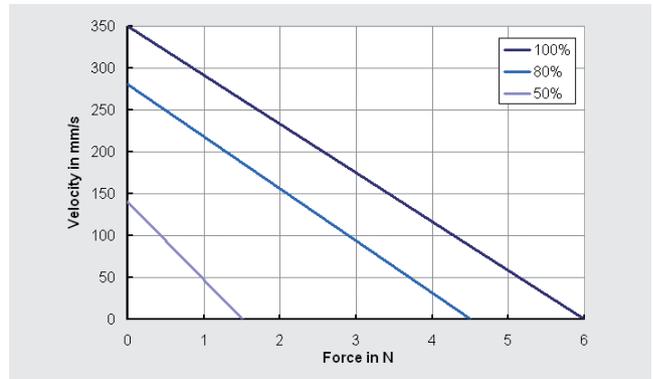
Ungeregelte Schrittfolge eines PILine® basierten Verstellers mit Schritten von ca. 300 nm. Wiederholbare Inkremente können nur im positionsgeregelten Betrieb erzielt werden, da die Schrittweite von der von außen wirkenden Kraft abhängt



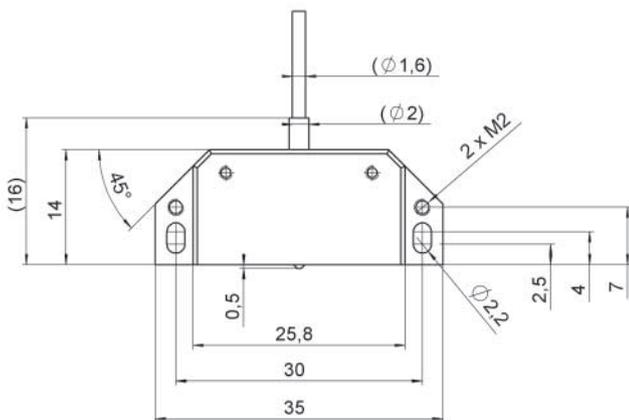
PILine® Ultraschallantriebe sind hochdynamisch und erreichen Beschleunigungen bis zu mehreren g. Sie zeigen ein schnelles Einregelverhalten innerhalb einiger 10 Mikrosekunden für kleine Schritte



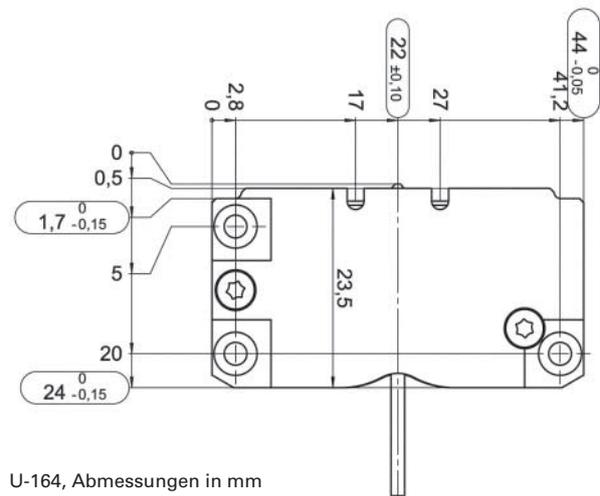
Maximale Einschaltdauer in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur bei einem Steuersignalpegel von 100 %



Kraft-Geschwindigkeitscharakteristik eines PILine® Motors mit 6 N Haltekraft. Die Prozentangaben bezeichnen den Steuersignalpegel, ein Maß für die Einkopplung der elektrischen Leistung in den Aktor



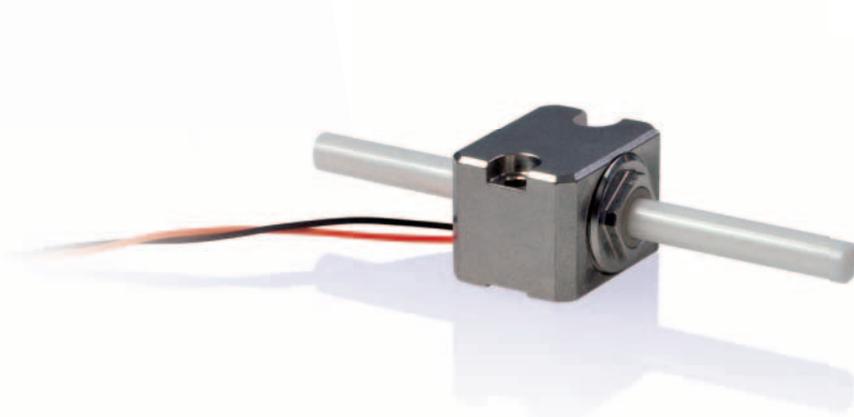
108 P-661, Abmessungen in mm



U-164, Abmessungen in mm

PIShift Piezoträgheitsantriebe

Preisgünstige, kompakte Motoren



- Vom OEM-Antrieb bis zur Integration in ein mehrachsiges Positioniersystem
- Beliebige, unbegrenzte Stellwege
- Mechanisch einfach integrierbar
- Selbsthemmend im Ruhezustand
- Haltekraft bis 10 N
- Geschwindigkeit über 5 mm/s
- Einfache, preisgünstige Ansteuerung

PIShift sind platzsparende und preiswerte piezobasierte Antriebe mit relativ hohen Haltekraften bis 10 N und prinzipiell unbegrenztem Stellweg. Sie nutzen den Stick-Slip-Effekt (Trägheitseffekt) – ein durch das Piezoelement erzeugter zyklischer Wechsel von Haft- und Gleitreibung zwischen einem bewegten Läufer und dem Piezoaktor – für einen kontinuierlichen Vorschub des Läufers. Mit einer Betriebsfrequenz von mehr als 20 kHz erreicht PIShift dadurch Geschwindigkeiten von über 5 mm/s.

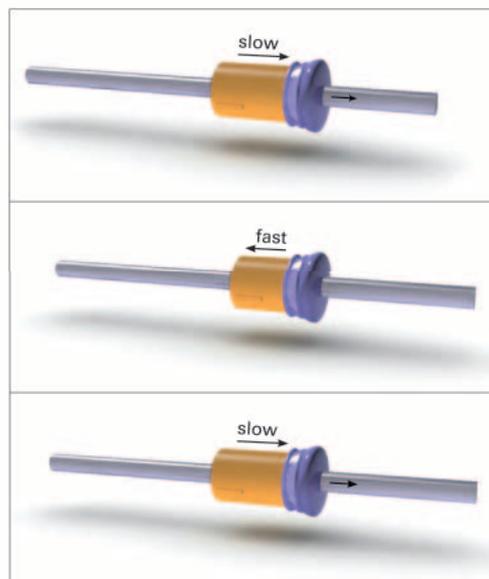
Geräuschlos und energiesparend

Der Antrieb arbeitet bei dieser Frequenz geräuschlos. Im Stillstand ist der Antrieb selbsthemmend, muss nicht bestromt werden und erwärmt sich nicht. Er hält die Position mit maximaler Kraft.

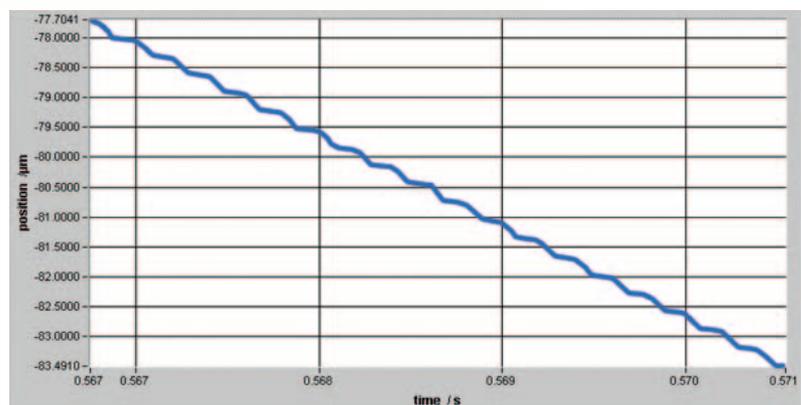
Einfache Integration

Zur einfachen Integration wird der Antrieb entweder auf einer ebenen Fläche montiert oder stirnseitig eingeschraubt. Die Last wird am bewegten Läufer angekoppelt. PI bietet zum Antrieb passende Treiberelektroniken an, die über analoge oder digitale Schnittstellen angesteuert werden können. Die Betriebsspannung des Piezoelements im Antrieb beträgt dabei weniger als 50 V.

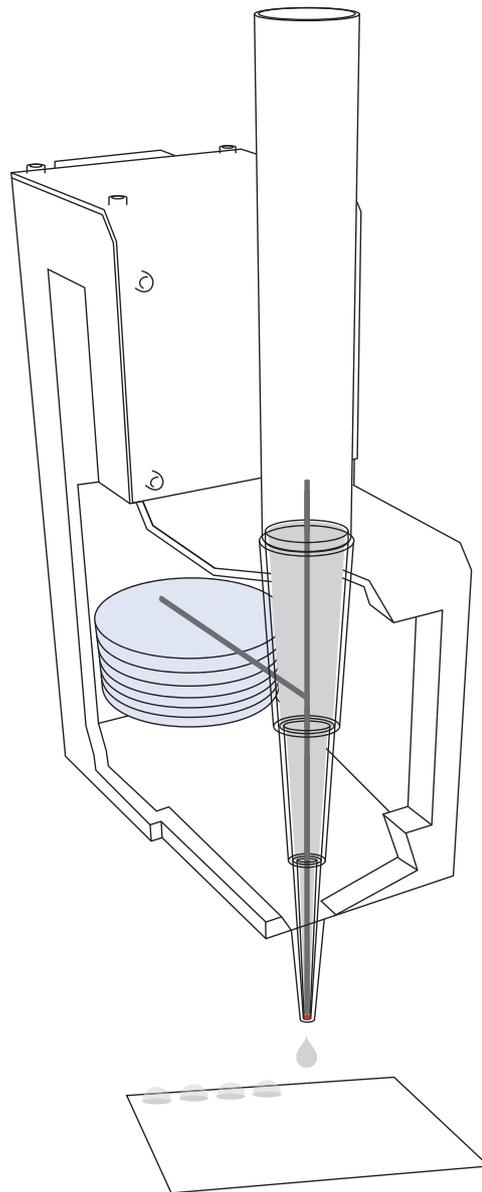
Ein voller Zyklus liefert einen Vorschub von typischerweise 300 Nanometer. Die mechanischen Komponenten sind so ausgelegt, dass der Backstep während der schnellen Kontraktion minimal ist



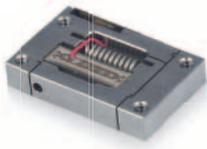
Das PIShift Antriebsprinzip basiert auf einem einzelnen piezoelektrischen Aktor, der über die Treiberelektronik mit einer modifizierten Sägezahnspannung angesteuert wird. Der Aktor dehnt sich langsam aus und nimmt einen Läufer mit. Die schnelle Kontraktion des Aktors kann der Läufer aufgrund seiner Trägheit nicht nachvollziehen und verharrt auf seiner Position



Piezoaktoren mit Führung und Vorspannung



In Mikroventilen können Translationsaktoren mit und ohne Vorspannung eingesetzt werden, für größere Hübe sind hebelübersetzte Antriebssysteme geeignet



PiezoMove® Hebelaktoren

Geführte und vorgespannte PICMA®
Multilayer-Piezoaktoren mit Hebelübersetzung

Seite 112



Vorgespannte Piezostapelaktoren

für dynamische Anwendungen

Seite 114

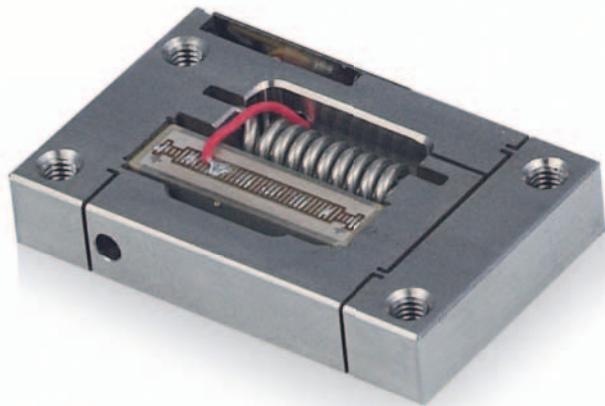
Technologie: Führung und Vorspannung

Seite 116

	Piezostapelaktoren	PiezoMove® Hebelaktoren
Stellwege	bis ca. 300 µm	bis 1 mm
Bewegte Achsen	eine	eine
Sensorik	optionale DMS	optionale DMS
Linearität	bis 99,8 %	bis 99,8 %
Führung	keine	Festkörpergelenke für Verkippungen <10°
Platzbedarf	gering	gering
Preis	gering	gering
Integrationsaufwand	mittel	gering

PiezoMove® Hebelaktoren

Geführte und vorgespannte PICMA®
Multilayer-Piezoaktoren mit Hebelübersetzung



P-603
PiezoMove® Hebelaktor

Highlights

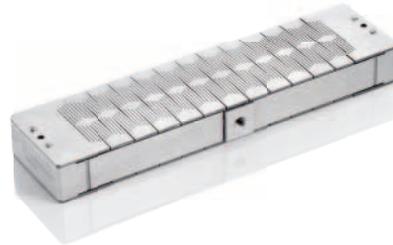
- Sub-Millisekunden-Ansprechzeit und Sub-Nanometer-Auflösung
- Versionen mit DMS-Sensoren für Wiederholgenauigkeiten von nur wenigen Nanometern
- Preisgünstige OEM-Lösungen zur Integration
- Für hohe Stückzahlen

Anwendungen

Für Ventile, Pumpen, Mikro- und Nanoliterdosierung, aktive Schwingungsisolierung, Probenhandling und Imprinttechniken in Mikrofluidtechnik, Biotechnologie, Medizintechnik, Mechatronik, Adaptronik, Lasertechnik oder Messtechnik.



P-601



P-602



P-604

P-601

P-602

P-603

P-604

Abmessungen in mm	16,5 × 12 × 16,5 bis 82,5 × 12 × 20,5	28 × 17 × 9 bis 126 × 34 × 14	33,5 bis 62 × 21 × 6	19,5 × 13 × 3
Stellweg in μm	100 bis 400	100 bis 1000	100 bis 500	300
Druckbelastbarkeit in Stellrichtung in N	15 bis 30	100	10 bis 40	2
Zugbelastbarkeit in Stellrichtung in N	10	5	10 bis 20	1,5
Resonanzfrequenz unbelastet in Hz	350 bis 750	150 bis 1000	300 bis 900	900
Elektrische Kapazität in μF	1,5 bis 5	1,5 bis 39	1,5 bis 3,7	0,27
Betriebsspannungs- bereich in V	-20 bis 120	-20 bis 120	-20 bis 120	-20 bis 120
Versionen mit DMS- Positionssensor	verfügbar	verfügbar	verfügbar	-
Empfohlener Controller	E-610, E-625, E-709	E-610, E-625, E-709	E-610, E-625, E-709	E-610, E-831

Vorgespannte Piezostapelaktoren

für dynamische Anwendungen



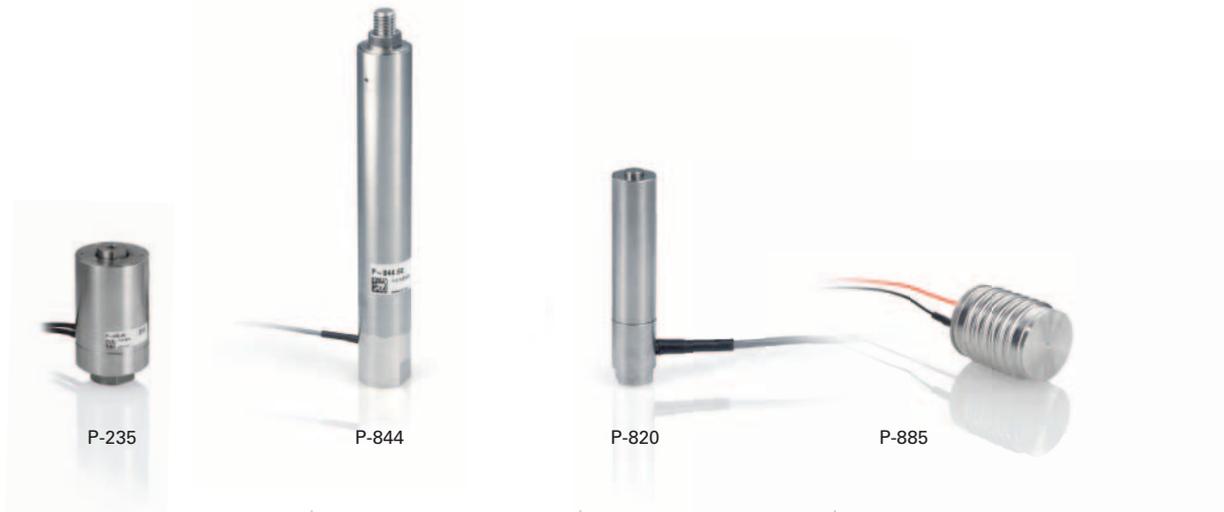
P-216
PICA Power Piezoaktor

Highlights

- Sub-Millisekunden-Ansprechzeit und Sub-Nanometer-Auflösung
- Kompakte Edelstahlgehäuse mit variablen Endstücken
- Hohe Steifigkeit
- UHV-Ausführungen
- Versionen mit DMS-Positionssensor verfügbar

Anwendungen

Hochdynamische Anwendungen mit gleichzeitig hohen Anforderungen an Präzision und Kräfteerzeugung gibt es unter anderem im Präzisionsmaschinenbau, bei der Materialbearbeitung und -formung. Schalt- und Dosieraufgaben gehören ebenso dazu, wie die aktive Kompensation von Schwingungen. Ausführungen für Vakuum bis 10^{-9} hPa, besonders hohe oder tiefe Betriebstemperaturen sind verfügbar.



P-235

P-844

P-820

P-885

P-212
P-216

P-842 bis
P-845

P-810
P-830

P-885
P-888

P-225
P-235

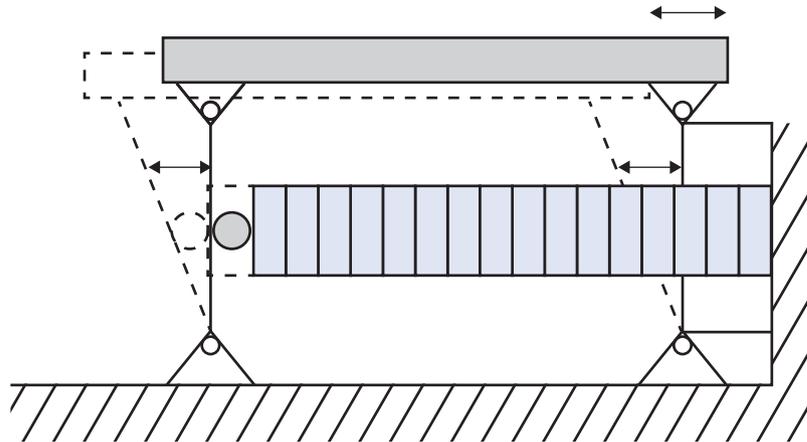
P-840
P-841

P-820

	PICA Stapelaktoren für höchste Kraftentwicklung	PICMA® Stack Multilayer-Aktoren	PICMA® Stack Multilayer-Aktoren	Gekapselte PICMA® Stack Multilayer-Aktoren für den Einsatz in rauer Umgebung
Abmessungen in mm	Ø 18 bis 50 Länge bis 199	Ø 12 bis 19 Länge bis 137	Ø 5,5 bis 10 Länge bis 76	Ø 11,2 bis 18,6 Länge bis 40,5
Betriebsspannungsbereich in V	0 bis 1000	-20 bis 120	-20 bis 120	-20 bis 120
Stellweg in µm	15 bis 180	15 bis 90	15 bis 60	17 bis 36
Druckbelastbarkeit in Stellrichtung in N	2000 bis 30000	800 bis 3000	50 bis 1000	800 bis 3000
Zugbelastbarkeit in Stellrichtung in N	300 bis 3500	50 bis 700	1 bis 10	-
Resonanzfrequenz unbelastet in kHz	bis 17	5 bis 18	8 bis 22	35 bis 60
Elektrische Kapazität in µF	0,05 bis 8	1,5 bis 36	0,3 bis 6	1,5 bis 6
Empfohlener Controller	E-481, E-421	E-610, E-621, E-709	E-610, E-621, E-709	E-831, E-610

Technologie: Piezoaktoren mit Führung und Vorspannung

Einfache Hebelübersetzung. Der Punktkontakt entkoppelt Scherkräfte und damit Zugspannungen an der Piezokeramik



Vorgespannte und gehauste Aktoren

Piezokeramische Aktoren sind unempfindlich gegenüber Druckkräften, müssen aber vor Zug- und Scherbelastungen geschützt werden. Ein Gehäuse entkoppelt mechanisch seitliche Kräfte und isoliert die elektrische Kontaktierung. Zwischen Gehäuse und Piezokeramik kann z. B. über eine Feder eine Vorspannung aufgebracht werden, die den dynamischen Betrieb höherer Lasten erlaubt.

Flexureführungen lenken die Bewegung und erhalten die Steifigkeit

Präzise geradlinige Bewegungen erfordern das Einbetten des Piezoaktors in eine Führung. Dies ist in der Regel eine biegsame Festkörperführung (Flexure), die reibungsfrei ist und bei den möglichen Stellwegen bis zu wenigen Millimetern eine hysteresefreie Bewegung erlaubt. Ideal übernimmt dieses mechanische Führungskonzept auch die Kraftentkopplung und Vorspannung, ohne dabei die Systemsteifigkeit negativ zu beeinflussen.

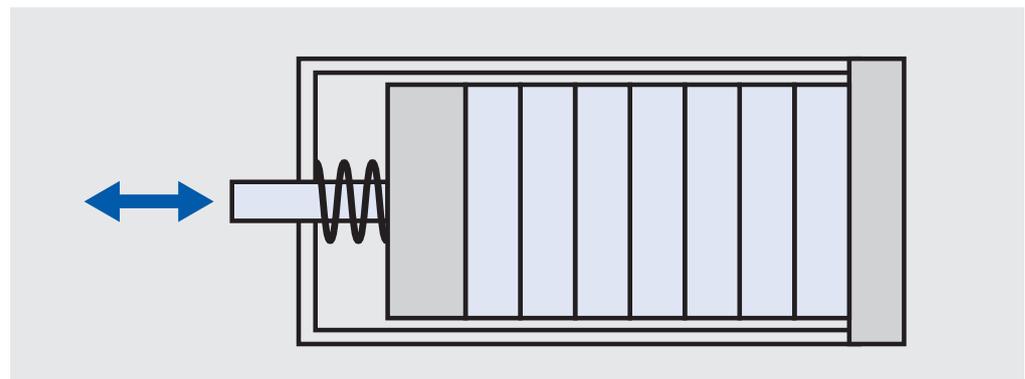
Hebelübersetzung ermöglicht Stellwege bis zu 1 mm

Die Auslenkungen von Piezostapelaktoren („Stacks“) betragen typischerweise bis zu einigen zehn Mikrometern, maximal können einige 100 Mikrometer erreicht werden. Die Flexure-Festkörperführung kann so gestaltet werden, dass sie wie ein mechanischer Hebel wirkt. Die Auslenkung des Piezoaktors wird so mechanisch vergrößert und wenn nötig in eine andere Richtung geführt.

Hebelübersetzte Systeme sind sehr anspruchsvoll im Design: Sie sollen zum einen das seitliche Auswandern verhindern und zum anderen geradlinig führen, obwohl der Hebel immer über einen Drehpunkt führt. Die Vergrößerung des Hubs geht außerdem auf Kosten der Steifigkeit.

Die Flexureführung kann so ausgelegt werden, dass auch für die weitere Integration keine zusätzliche Führung erforderlich ist.

Der Piezokeramikstapel ist durch eine Feder mechanisch gegen das Gehäuse vorgespannt. Das beugt Zugkräften vor, wie sie im dynamischen Betrieb durch die träge Masse der Last verursacht werden



Vom Stapelaktor zum 6-Achstisch

Integrationsstufen von Piezoaktoren

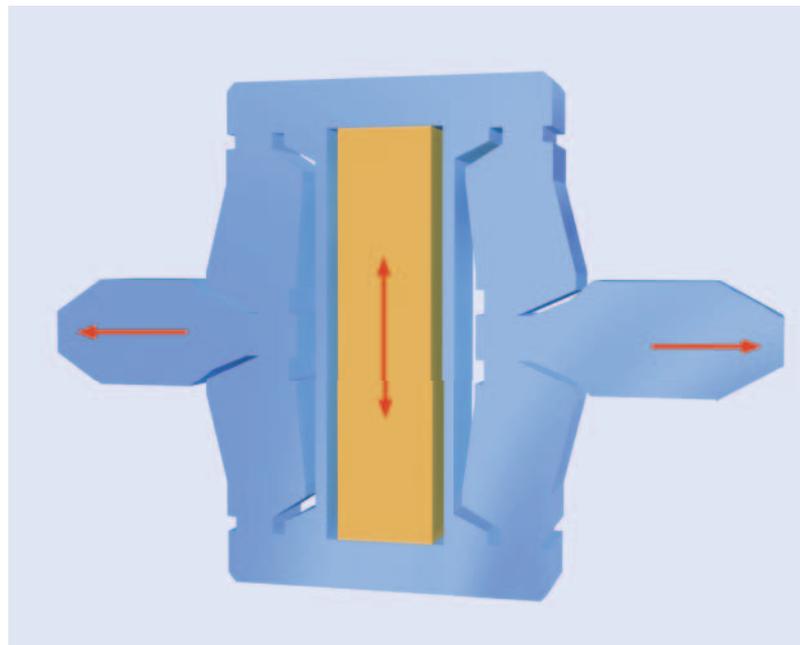
	Stapelaktoren	Hebelaktoren	Positioniersysteme
Stellwege	bis ca. 300 µm	bis 1 mm	bis 1 mm
Bewegte Achsen	eine	eine	bis zu 3 Linear- und 3 Kippachsen
Sensorik	optionale DMS	optionale DMS	DMS oder direkt messende kapazitive Sensoren
Linearität	bis 99,8 %	bis 99,8 %	über 99,9 %
Führung	keine	Festkörpergelenke für Verkippungen <10°	Festkörpergelenke für Verkippungen <2°
Platzbedarf	gering	gering	Abhängig von der Ausstattung
Preis	gering	gering	Abhängig von der Ausstattung
Integrationsaufwand	mittel	gering	niedrig

PiezoMove® OEM-Hebelaktoren mit eingebauter Führung

PiezoMove® Aktoren kombinieren geführte Bewegung und lange Stellwege bis 1 mm sowie optional einen Sensor, der Genauigkeiten im Bereich bis 10 Nanometern zulässt. Durch die hochpräzisen, reibungsfreien Festkörperführungen wird eine sehr hohe Steifigkeit erreicht, zugleich auch ein extrem geringes seitliches Auswandern. Damit sind sie leichter handhabbar als ein einfacher Piezoaktor, aber dennoch besonders kompakt. Die Zahl und Größe der eingesetzten Piezoaktoren beeinflussen die Steifigkeit und Krafterzeugung.

Aufgrund dieser Eigenschaften, ihren geringen Abmessungen und des kostengünstigen Designs eignen sich die PiezoMove® Hebelaktoren speziell für OEM-Anwendungen. Für Anwendungen im offenen Regelkreis sind Versionen ohne Sensor erhältlich.

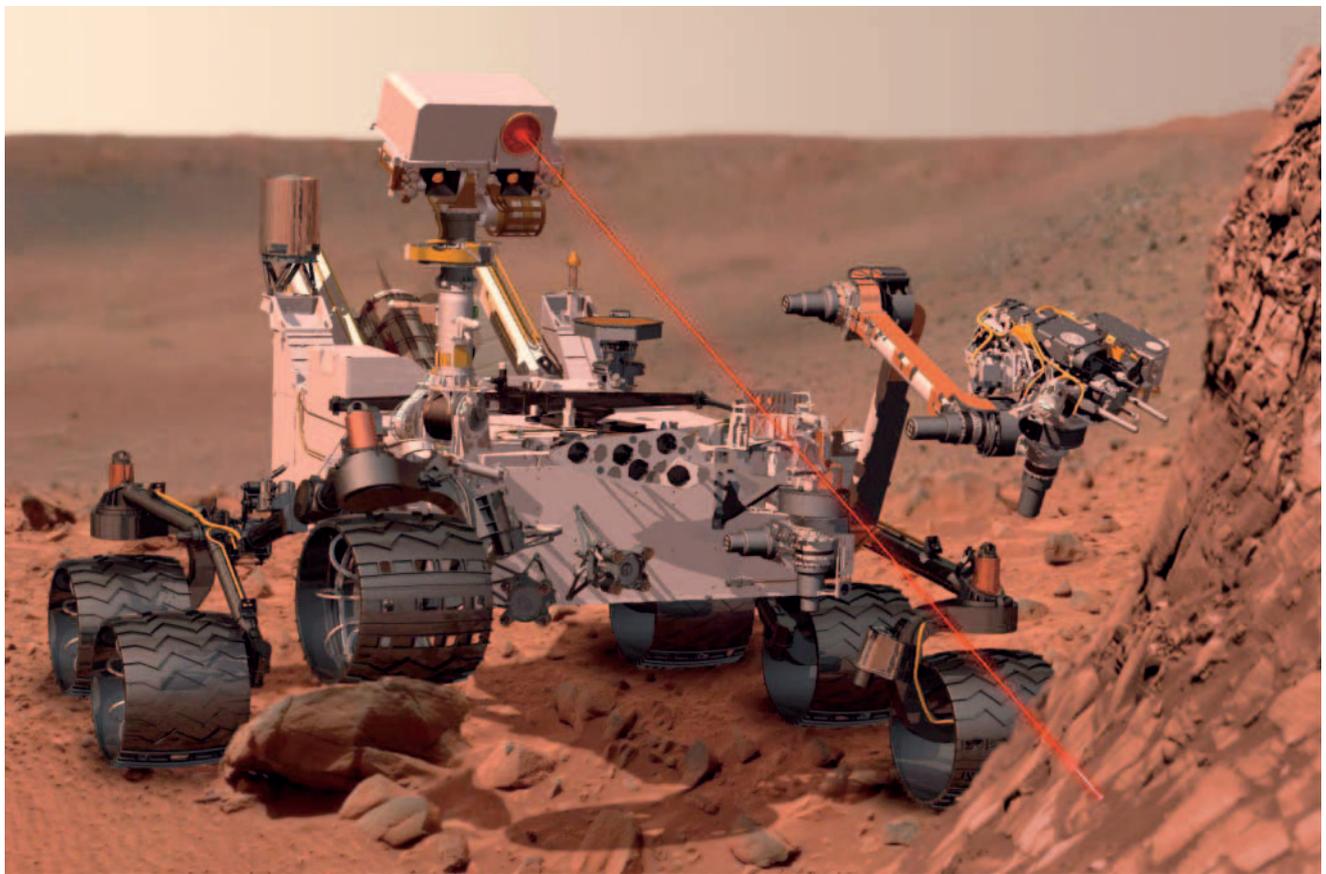
Neben den Standardmodellen aus Stahl sind auf Anfrage Versionen aus Invar sowie nicht-magnetische Ausführungen verfügbar.



Diese Hebelmechanik mit Flexure-Gelenksführungen übersetzt den Aktorhub (vertikal) in eine gleichförmige, geradlinige Bewegung (horizontal)

Piezoaktoren und Piezokomponenten

Direktantriebe für die Präzisionspositionierung und -fertigung, Mikrodosierung, Schaltanwendungen, Kraft- und Schwingungserzeugung



Aktuell sind PICMA® Aktoren im CheMin Instrument des Mars Rovers Curiosity im Einsatz. Bei dynamischen Tests, die von der NASA für die Mars Mission durchgeführt wurden, haben PICMA® Aktoren 100 Milliarden Arbeitszyklen ohne Ausfälle und ohne signifikante Leistungseinbußen überstanden (Bild: NASA/JPL)



Longitudinale Piezoaktoren / Translatoren
Multilayer-Technologie oder geklebte Stapelaktoren

Seite 120



PICMA® Bender Multilayer-Biegeaktoren
Vollkeramische Biegeaktoren mit großem Hub

Seite 122



Ungeführte Piezoaktoren
und Piezokomponenten

Seite 124

Flexible Anpassung der Aktoren und Komponenten

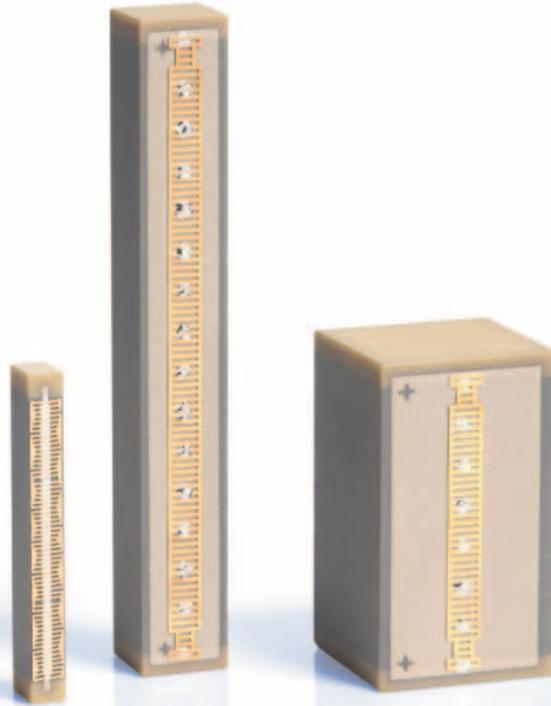
PI Ceramic ist einer der weltweit führenden Hersteller von Piezotechnologie. Eigene Entwicklungslabors und Einrichtungen für Prototypenbau und für die Prüfung der fertigen Elemente ermöglichen die schnelle und flexible Anpassung der Standardprodukte an spezielle Einsatzgebiete. Die Formgebung in Press- und Multilayer-Technologie ist jederzeit kurzfristig möglich. Dabei können auch große Serien bis zu mehreren 100 000 Stück pro Jahr gefertigt werden.



Eigengefertigte PICMA® Multilayer-Piezoaktoren bilden zusammen mit hochpräziser Sensorik und Mechanikdesign die Basis. Die von PI speziell entwickelte Ansteuerungselektronik und Software machen daraus Nanopositioniersysteme der Extraklasse

Longitudinale Piezoaktoren / Translatoren

Multilayer-Technologie oder geklebte Stapelaktoren



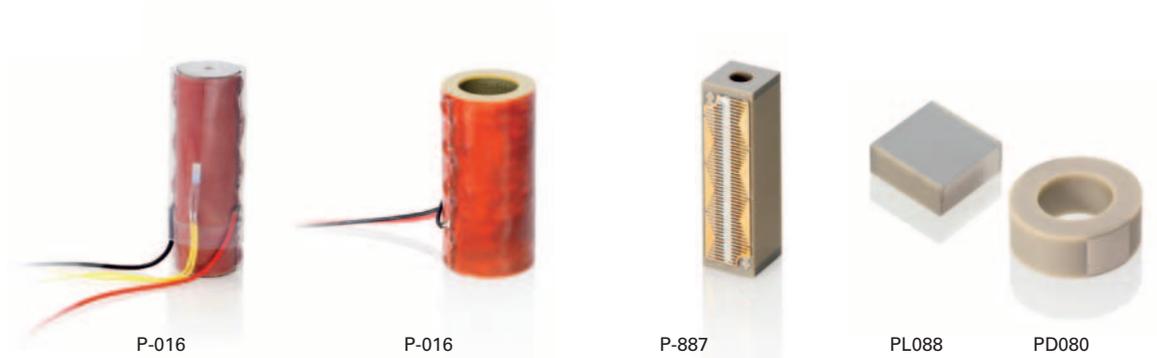
PICMA®
Multilayer-Piezoaktoren

Highlights

- Sub-Millisekunden-Ansprechzeit und Sub-Nanometer-Auflösung
- Hohe Steifigkeit
- Variable Endstücke
- UHV-Ausführungen
- Optional mit DMS-Sensoren für Positionsregelung

Anwendungen

Die Zuverlässigkeit der PI Piezoaktoren ist in vielen Bereichen notwendig: in der Halbleiterindustrie über die Präzisionsmechanik und -fertigung ebenso wie für Schaltanwendungen und zur Ventilsteuerung, z. B. in der Automobilindustrie. Auch in der aktiven Schwingungsdämpfung, in der Nanotechnologie, der Metrologie, Optik und Interferometrie werden Piezoaktoren eingesetzt.



P-010...P
bis
P-056...P

P-010...H
bis
P-025...H
P-007 bis
P-056

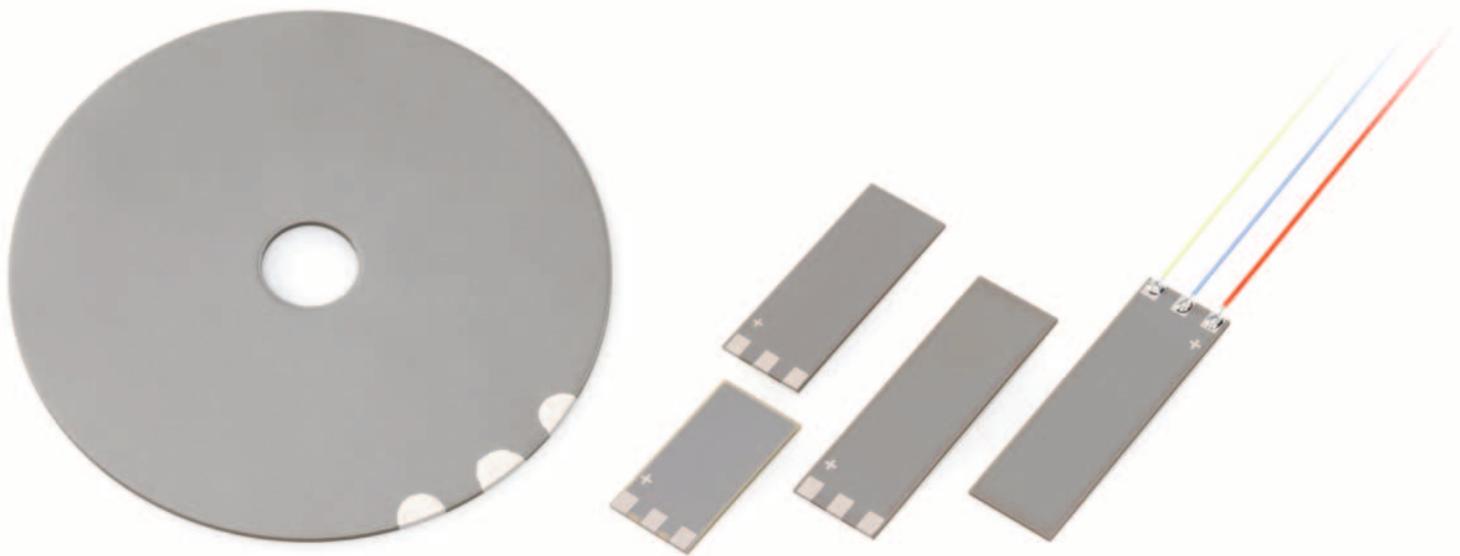
P-882 bis
P-888

PL022 bis
PL088
PD050
PD080

	PICA Power Hochlast-Stapel- aktoren	PICA Thru und PICA Stapelaktoren mit und ohne Innenbohrung	PICMA® Stack Multilayer-Piezo- aktoren mit und ohne Innenbohrung	PICMA® Chip Miniatur-Multilayer- Aktoren, auch ringförmig verfügbar
Querschnitt in mm	Ø 10 bis 56	Ø 7 bis 56 Bohrung bis 16	2 x 3 bis 10 x 10	2 x 2 bis 10 x 10 oder Ø 8 x 2,45
Länge in mm	9 bis 169	8 bis 244	9 bis 36	2
Betriebsspannungsbereich in V	0 bis 1000	0 bis 1000	-20 bis 120	-20 bis 120
Stellweg in µm	5 bis 180	5 bis 300	5 bis 38	2
Blockierkraft in N	1 200 bis 78000	650 bis 78000	190 bis 3800	120 bis 2000
Resonanzfrequenz unbelastet in kHz	7 bis 130	5 bis 144	40 bis 135	600
Elektrische Kapazität in µF	0,017 bis 21	0,011 bis 27	0,15 bis 13	0,025 bis 1,1

PICMA® Bender Multilayer-Biegeaktoren

Vollkeramische Biegeaktoren mit großem Hub



PICMA®
Bender Biegeaktoren

Highlights

- PICMA® Multilayer-Technologie in Bimorph-Aufbau
- Bidirektionale, symmetrische Auslenkung
- Niedrige Betriebsspannung
- UHV-Ausführungen

Anwendungen

Durch ihre Zuverlässigkeit und flexible Ansteuerspannung eignen sich die PICMA® Biegeaktoren ideal für Dosier- und Pumpvorgänge, zur optischen Strahlableitung und in kleinsten Abmessungen für den Einsatz in portablen Geräten. Dort können die Piezoelemente z. B. als akusto-mechanische Wandler eingesetzt werden.



P-871

PL112
bis
PL140
PD410

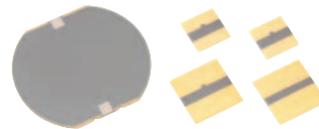
P-871

Applikationsspezifische Ausführungen

Fertig konfektioniert nach Kundenvorgaben
Für besonders kompakte OEM-Lösungen

Multilayer-Kontraktorplatten

Rund (als Scheibe) oder eckig (als Platte) herstellbar
Zur Applikation auf Metall- oder Siliziumsubstrat



Piezelement aufgebracht auf passivem Substrat

Unidirektionale Auslenkung, dadurch höhere Steifigkeit und größere relative Auslenkung

Beliebige Konturen

Auch mit vollständig keramisch isolierter Bohrung



Variable Höhe der aktiven Schichten

Bis zu 15 μm für Ansteuerspannung von nur 10 V

Miniaturausführungen

mit nur 4 mm \times 10 mm Kantenlänge



	UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa	PICMA [®] Bender Biegeaktoren mit DMS-Positionssensor
Abmessungen in mm	18 \times 10 \times 0,65 bis 45 \times 11 \times 0,60 \varnothing 44 \times 0,65	22 \times 10 \times 0,65 bis 49 \times 11 \times 0,60
Betriebsspannungsbereich in V	0 bis 60	0 bis 60
Auslenkung in μm	± 80 bis $\pm 1\,000$	± 80 bis $\pm 1\,000$
Blockierkraft in N	$\pm 0,5$ bis ± 2	$\pm 0,5$ bis ± 2
Resonanzfrequenz unbelastet in Hz	160 bis 2 000	160 bis 2 000
Elektrische Kapazität in μF	2 \times 1 bis 2 \times 4	2 \times 1 bis 2 \times 4
Empfohlener Controller/Verstärker	E-650	E-651, E-614

Ungeführte Piezoaktoren

und Piezokomponenten



PT120 bis PT140

Highlights

- Flächiger DuraAct Piezowandler zum Aufbringen auf Strukturmaterialien
- PT-Tube Piezorohre für Mikrodosierung, Mikromanipulation und Scanning-Anwendungen
- Kompakte PICA Shear Aktoren für Auslenkung in bis zu 3 Achsen
- Bleifreie Piezoaktoren in Picoactuator® Technologie
- Flexibel durch zahlreiche Ausführungsvarianten

Anwendungen

So vielfältig wie die Produkte sind auch die Applikationen: DuraAct Piezowandler werden für Condition Monitoring und adaptive Systeme eingesetzt. Piezorohre sind für die Mikrodosierung z. B. mit Jet-Technologie geeignet, als Mikro- und Nanomanipulatoren wie als Faserstrecker. PICA Shear Scheraktoren sind mit die kleinsten XYZ-Positionierer und in Varianten für kryogene Umgebung bis zu -269 °C und Vakuum bis 10^{-9} hPa verfügbar. Der kristalline Picoactuator® zeigt auch ohne Positionregelung eine hochlineare Auslenkung und kann daher für Positionierungen den vollen dynamischen Bereich ausnutzen.



P-876

PT-Tube

P-111 bis
P-151

P-405

	P-876	PT-Tube	P-111 bis P-151	P-405
	DuraAct Piezowandler für aktorischen und sensorischen Einsatz	Piezorohrreaktoren für radiale, laterale und axiale Auslenkung	Hochzuverlässige PICA Shear Scheraktoren	Picoactuator® aus bleifreiem kristallinem Material
Verfügbare Versionen	Auf Anfrage in verschiedenen Formen und Abmessungen oder als Array erhältlich	UHV-kompatible Versionen bis 10^{-9} hPa	X-, XY-, XZ- und XYZ-Versionen Varianten für kryogene und UHV-Umgebung	Longitudinal- und Scheraktoren
Betriebsspannungsbereich in V	-50 bis +200, -100 bis +400 oder -250 bis +1000	0 bis 1000 oder ± 250	-250 bis 250	± 500
Stellweg in μm	laterale Kontraktion bis $800 \mu\text{m/m}$. Auslenkung abhängig vom Strukturmaterial	5 bis 15 axial, ± 10 bis ± 35 lateral	1 bis 10	1
Blockierkraft in Stellrichtung in N	90 bis 800	–	–	–
Resonanzfrequenz unbelastet in kHz	–	–	30 bis 530	bis 160
Elektrische Kapazität in nF	bis 150	3 bis 70	0,2 bis 230 je Achse	<4
Querschnitt in mm	61 x 35	\varnothing 2,2 bis 40	3 x 3 bis 16 x 16	5 x 5 bis 10 x 10
Länge in mm		20 bis 40	3,5 bis 40	bis 19
Empfohlener Controller/ Verstärker	E-835, E-413 für aktorische Anwendungen E-821 für Energy Harvesting	–	E-508, E-413, E-536	E-421

Grundlagen der Piezotechnologie

Grundlagen der Piezoelektrizität	Seite 127
Piezoelektrischer Effekt – Ferroelektrische Polarisierung – Ausdehnung der polarisierten Piezokeramik	
Piezoelektrische Aktormaterialien	Seite 128
Auslenkungsarten piezoelektrischer Aktoren	Seite 129
Herstellung von Piezoaktoren	Seite 134
Multilayer-Folientechnologie – Presstechnologie – PT-Tube Rohrakturen – DuraAct	
<hr/>	
Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren	Seite 137
Auslenkungsverhalten	Seite 137
Nichtlinearität – Hysterese – Kriechen – Positionsregelung	
Temperaturabhängiges Verhalten	Seite 140
Kräfte und Steifigkeiten	Seite 142
Vorspannung und Belastbarkeit – Steifigkeit – Kräfteerzeugung und Auslenkung	
Dynamischer Betrieb	Seite 146
Resonanzfrequenz – Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen – Dynamische Kräfte	
Elektrische Ansteuerung	Seite 147
Elektrische Kapazität – Leistungsaufnahme – Kontinuierlicher Betrieb – Pulsbetrieb	
Umgebungsbedingungen	Seite 150
Vakuumentwicklung – Edelgase – Magnetfelder – Gammastrahlung – Flüssigkeiten	
Zuverlässigkeit von PICMA® Multilayer-Aktoren	Seite 151
Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung – Lebensdauer im dynamischen Dauerbetrieb	
<hr/>	
Verstärkertechnik: Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren	Seite 153
Charakteristisches Verhalten von Piezoverstärkern	Seite 153
Leistungsanforderungen – Aussteuerkurve – Einstellen der Steuerspannung	
Lösungen für dynamische Daueranwendungen	Seite 154
Geschaltete Verstärker mit Energierückgewinnung – Temperaturüberwachung – Ladungssteuerung	
<hr/>	
Handhabung von Piezoaktoren	Seite 156
Mechanischer Einbau – Elektrischer Anschluss – Sicherer Betrieb	

Grundlagen der Piezoelektrizität

Piezoelektrischer Effekt

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

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

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



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

Ferroelektrische Polarisation

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

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

Ausdehnung der polarisierten Piezokeramik

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

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

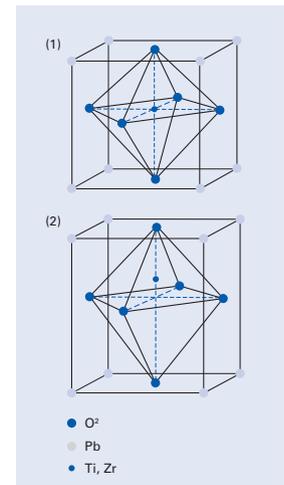


Abb. 1
(1) Elementarzelle mit symmetrischer, kubischer Struktur oberhalb der Curie-Temperatur T_c
(2) Tetragonal verzerrte Elementarzelle unterhalb der Curie-Temperatur T_c mit spontaner Polarisation und spontaner Dehnung

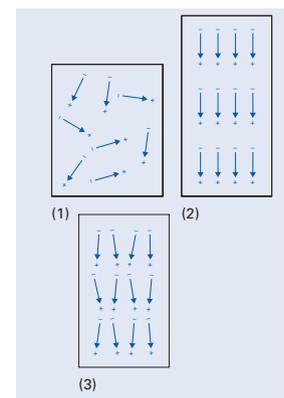


Abb. 3
Ausrichtung der spontanen Polarisation innerhalb einer piezo-ferroelektrischen Keramik
(1) Unpolarisierte Keramik
(2) Keramik während der Polung und (3) Keramik nach der Polung

Piezelektrische Aktormaterialien

Grundlagen der Piezelektrizität

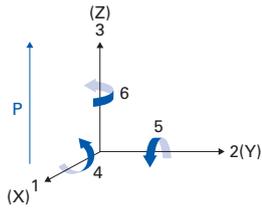


Abb. 4
Orthogonales System zur Beschreibung der Eigenschaften einer polarisierten Piezokeramik. Achse 3 ist die Polarisationsrichtung

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

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

Ferroelektrisch harte PZT-Materialien wie PIC181 und PIC300 werden vorwiegend in Leistungsschallanwendungen eingesetzt. Sie besitzen eine höhere Umpolungsfestigkeit, hohe mechanische Güten sowie geringere Hysteresewerte bei reduzierten piezelektrischen Deformationskoeffizienten. Die Picoactuator®-Serie basiert auf dem einkristallinen Material PIC050, das eine hochlineare, hysteresefreie Kennlinie bei allerdings kleinen piezelektrischen Koeffizienten aufweist.

Aktormaterialien von PI Ceramic

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

PIC153 Modifizierte PZT-Keramik für große Auslenkungen.

Hohe piezelektrische Deformationskoeffizienten, hohe Permittivität, relativ geringe Curie-Temperatur.

Sonderwerkstoff für die Produktlinien PICA Stack und PICA Thru sowie für verklebte Biegeaktoren.

PIC255 Modifizierte PZT-Keramik, die sich besonders für den bipolaren Betrieb, in Scheraktoren sowie bei hohen Umgebungstemperaturen eignet.

Hohe Umpolungsfeldstärke (>1 kV/mm), hohe Curie-Temperatur. Standardwerkstoff für die Produktlinien PICA Power, PICA Shear, PT-Tube und DuraAct.

PIC252 Variante des PIC255-Werkstoffes mit niedrigerer Sintertemperatur für den Einsatz im Multilayer-Folienprozess.

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

PIC050 Kristalliner Werkstoff für lineare, hysteresefreie Positionierung mit kleinen Auslenkungen im offenen Regelkreis.

Hervorragende Stabilität, hohe Curie-Temperatur.

Standardwerkstoff für die Picoactuator®-Produktlinie.

	PIC151	PIC153	PIC255/252	PIC050
Physikalische und dielektrische Eigenschaften				
Dichte ρ [g/cm ³]	7,80	7,60	7,80	4,70
Curie-Temperatur T_c [°C]	250	185	350	> 500
Relative Permittivitätszahl in Polarisationsrichtung $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ quer zur Polung ϵ_{11}/ϵ_0	2400	4200	1750	60
	1980		1650	85
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ [10 ⁻³]	20	30	20	<1

	PIC151	PIC153	PIC255/252	PIC050
Elektromechanische Eigenschaften				
Piezelektrischer Deformationskoeffizient, Piezomodul*				
d_{31} [pm/V]	- 210		- 180	
d_{33} [pm/V]	500	600	400	40
d_{15} [pm/V]			550	80

	PIC151	PIC153	PIC255/252	PIC050
Akustomechanische Eigenschaften				
Elastische Nachgiebigkeitskonstante				
	s_{11}^E [10 ⁻¹² m ² /N]	15,0		16,1
	s_{33}^E [10 ⁻¹² m ² /N]	19,0		20,7
Mechanischer Gütefaktor Q_m		100	50	80

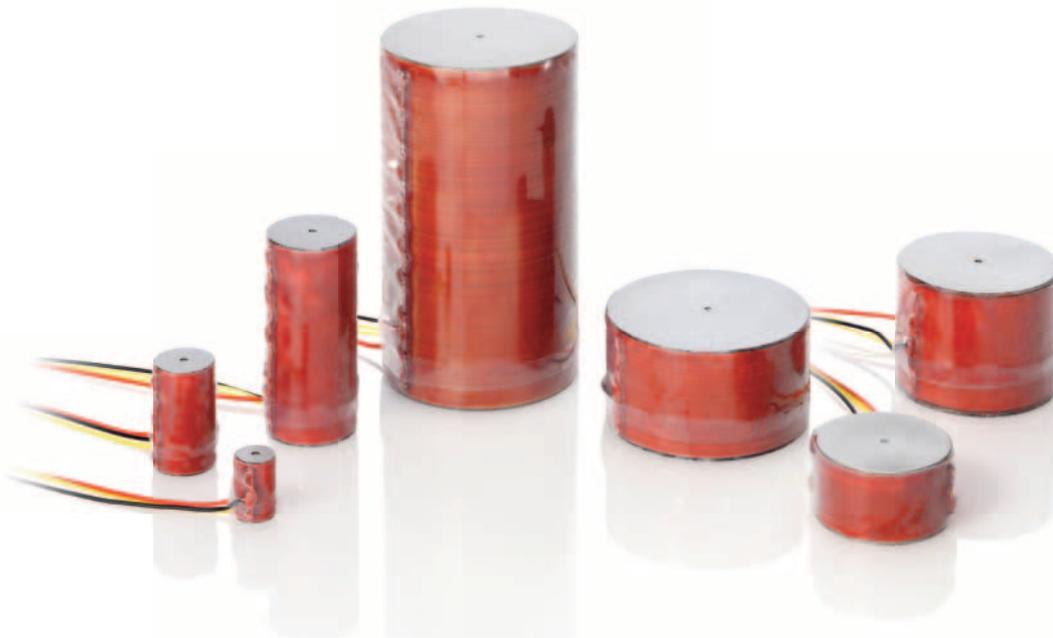
Erläuterungen und weitere Daten siehe Katalog „Piezokeramische Materialien und Bauelemente“
* Der Deformationskoeffizient entspricht dem Ladungskoeffizienten bei Piezokomponenten. Der Wert ist von der Ansteuerfeldstärke abhängig (Abb. 22, S. 137). Die Angabe in der Tabelle bezieht sich auf sehr geringe Feldstärken (Kleinsignal)

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

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

Auslenkungsarten piezoelektrischer Aktoren

Grundlagen der Piezoelektrizität



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

Longitudinale Stapelaktoren

In longitudinalen Piezoaktoren wird das elektrische Feld in der Keramikschicht parallel zur Richtung der Polarisierung angelegt. Dadurch wird eine Dehnung oder Auslenkung in Richtung der Polarisierung induziert. Einzelne Schichten liefern relativ geringe Auslenkungen. Um technisch nutzbare Auslenkungswerte zu erreichen, werden Stapelaktoren aufgebaut, in denen viele Einzelschichten mechanisch in Reihe und elektrisch parallel verschaltet sind (Abb. 5).

Die Wandlungseffizienz elektrischer in mechanische Energie ist für longitudinale Stapelaktoren hoch. Sie erzielen Nominalauslenkungen von etwa 0,1 bis 0,15 % der Aktorlänge.

Die Nominalblockierkräfte liegen in der Größenordnung von 30 N/mm², bezogen auf die Aktorquerschnittsfläche. Im Aktor können damit Werte bis zu mehreren 10 000 Newton erreicht werden.

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

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

Bei Ansteuerung mit einem elektrischen Feld parallel zur Richtung der Polarisierung findet im Piezoaktor neben der Verlängerung in Polarisationsrichtung, die bei Longitudinalaktoren genutzt wird, gleichzeitig immer eine Kontraktion orthogonal zur Polarisierung statt.

Dieser sogenannte transversale piezoelektrische Effekt wird bei Kontraktoren, Piezorrohren oder Biegeaktoren ausgenutzt.

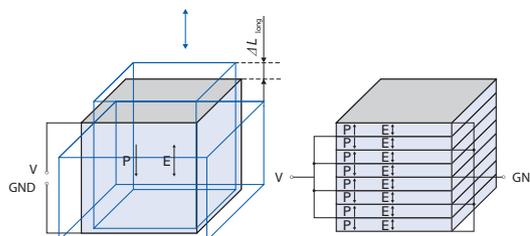


Abb. 5
 $\Delta L_{long} = n d_{33(GS)} V$ (Gleichung 1)

Ein typischer Einsatzfall für Scheraktoren sind Antriebselemente für sog. Stick-Slip-Motoren.

Scheraktoren von PI Ceramic werden in den Produktlinien PICA Shear und Picoactuator® angeboten.

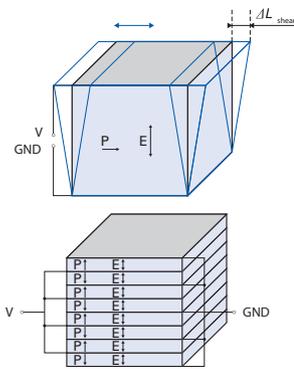


Abb. 6

$$\Delta L_{shear} = n d_{15(GS)} V$$

(Gleichung 2)

Scheraktoren

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

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

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



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

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

Picoactuator® Technologie

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

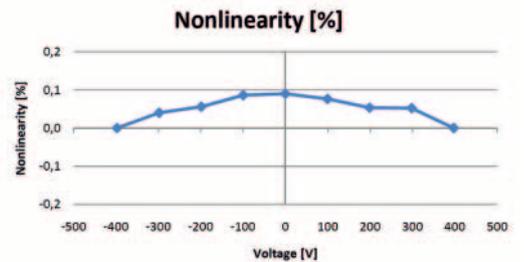


Abb. 7:

Gemessene Nichtlinearität eines Picoactuator®



Rohraktoren

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

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

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

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

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

Weitere Anwendungsbeispiele finden sich in der Mikrodosierung zum Aufbau von Nanoliterpumpen oder Tintenstrahl-druckern.



Axiale Auslenkung

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

(Gleichung 3)

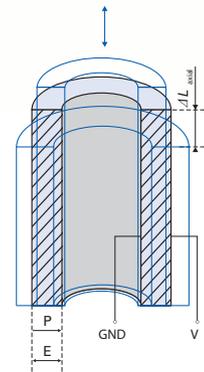


Abb. 8

Radiale Auslenkung (Radiusänderung)

Für große Radien gilt folgende Abschätzung:

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

(Gleichung 4)

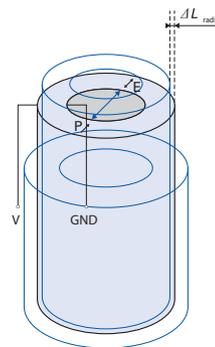


Abb. 9

Biegeaktoren, XY-Scannerrohre

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

(Gleichung 5)

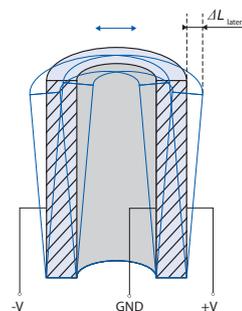
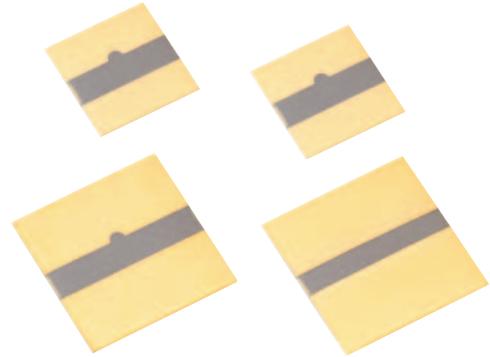


Abb. 10

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

- ΔL_{trans} transversale Auslenkung [m]
 - $d_{31(GS)}$ transversaler piezoelektrischer Großsignal-Deformationskoeffizient [m/V]
 - l Länge der Piezokeramik in Auslenkungsrichtung [m]
 - h Dicke einer Keramikschicht [m]
 - n Anzahl der gestapelten Keramikschichten
 - V Betriebsspannung [V]
 - ΔL_{bend} Biegeauslenkung [m]
 - l_f freie Bieglänge [m]
 - h_p Höhe Piezokeramikelement [m]
- 
- R_h Verhältnis der Höhen von Substrat (h_s) und Piezokeramikelement (h_p) in einem Verbundbieger ($R_h = h_s/h_p$)
 - R_E Verhältnis der Elastizitätsmodule von Substrat (E_s) und Piezokeramikelement (E_p) in einem Verbundbieger ($R_E = E_s/E_p$)
 - V_F Festspannung zur Biegeansteuerung [V] (V und V_F können mit einer Offsetspannung überlagert werden)



Kontraktoren

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

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

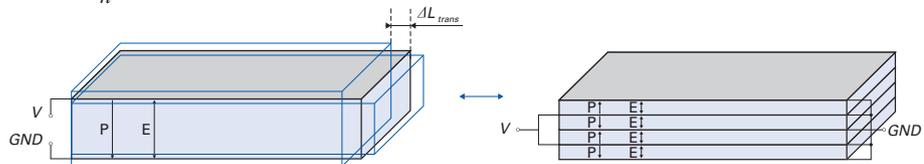
Durch die Kontraktion entstehen in der Piezokeramik Zugspannungen, die in der spröden Keramik Schäden verursachen können. Eine Vorspannung ist daher empfehlenswert.

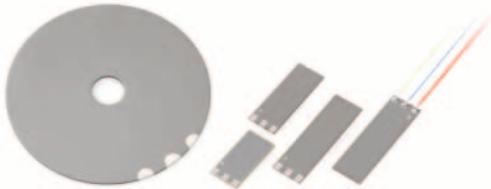
Für die Patchaktoren der Produktgruppe DuraAct wird ein Piezokontraktor in einem Polymer einlaminiert. Dadurch wird eine mechanische Vorspannung erreicht, die die Keramik vor Bruch schützt.

Multilayer-Kontraktoren können als Sonderversionen der PICMA® Bender Produktlinie angefragt werden.

Abb. 11

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





Biegeaktoren

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

Piezoelektrische Biegeaktoren funktionieren nach dem Prinzip von Thermobimetallen. Durch die Kopplung eines flächigen Piezokontraktors mit einer zweiten Schicht entsteht bei der Ansteuerung und Kontraktion der Kera-

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

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

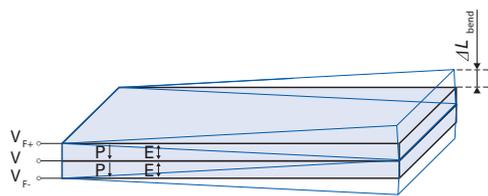


Abb. 12: Auslenkung von Biegeaktoren

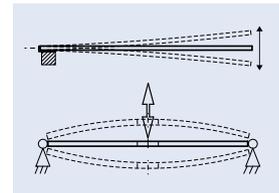


Abb. 17
Durch die Wahl einer zweiseitigen Einspannung mit drehbarer Lagerung (unten) statt einer einseitigen festen Einspannung (oben) kann das Verhältnis zwischen Auslenkung und Kraft des Biegers verändert werden. Die Auslenkung reduziert sich um den Faktor vier, während sich die Blockierkraft um den Faktor vier erhöht. Besonders hohe Kräfte können erreicht werden, wenn man statt streifenförmiger Bieger zweiseitig eingespannte flächige Biegeplatten bzw. -scheiben einsetzt

Vollkeramikbieger für die Parallelschaltung

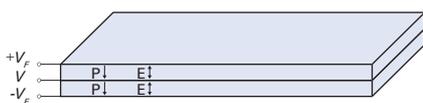


Abb. 13

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

Vollkeramikbieger für die Reihenschaltung

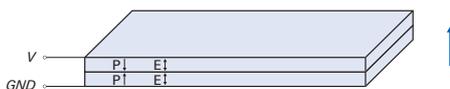


Abb. 14

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

(Betrieb gegen die Polarisationsrichtung nur mit reduzierter Spannung bzw. Feldstärke möglich, vgl. S. 137ff.)

Zweischicht-Verbundbieger mit einseitiger Auslenkung



Abb. 15

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

(Gleichung 9)

Anwendung DuraAct, PICMA® Bender (Sonderversionen)

Symmetrischer Dreischicht-Verbundbieger für die Parallelschaltung

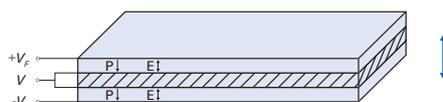


Abb. 16

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

(Gleichung 10)

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

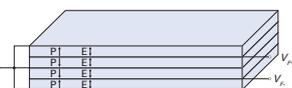


Abb. 18:

Die Produkte des PICMA® Bender Sortiments sind Vollkeramikbieger, deren zwei Piezokeramikelemente jeweils aus mehreren aktiven Schichten bestehen (Multilayer-Aktoren)

Gleichungen nach Pfeifer, G.: Piezoelektrische lineare Stellantriebe. Wiss. Schriftenreihe der TU Chemnitz 6/1982

Herstellung von Piezoaktoren

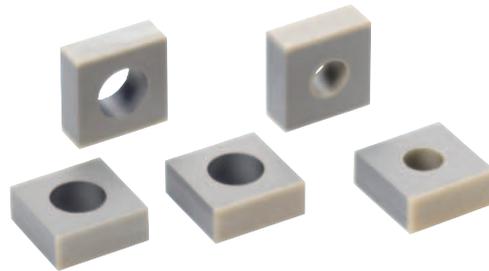
Grundlagen der Piezoelektrizität



Multilayer-Folientechnologie

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

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



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

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



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

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

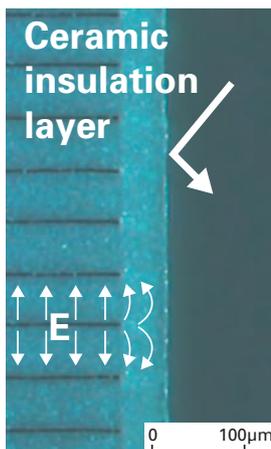
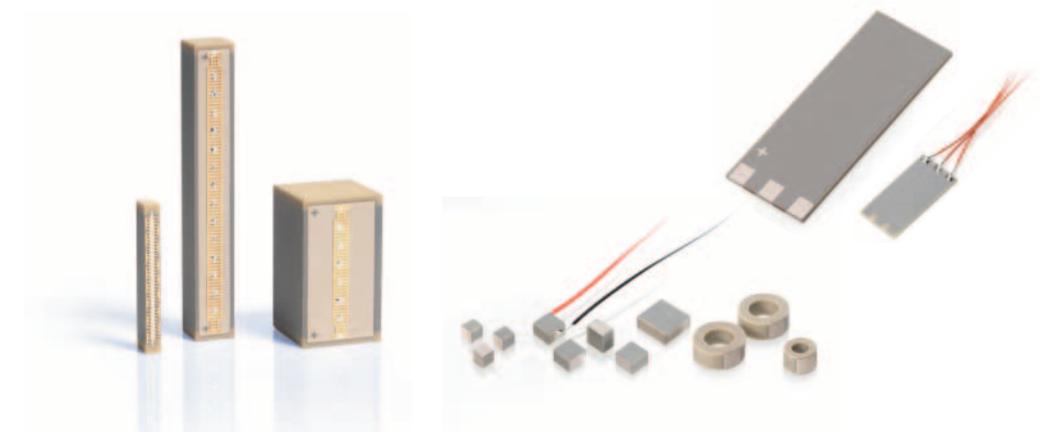


Abb. 19: In PICMA® Stack Aktoren deckt eine keramische Isolierfolie die inneren Elektroden ab



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

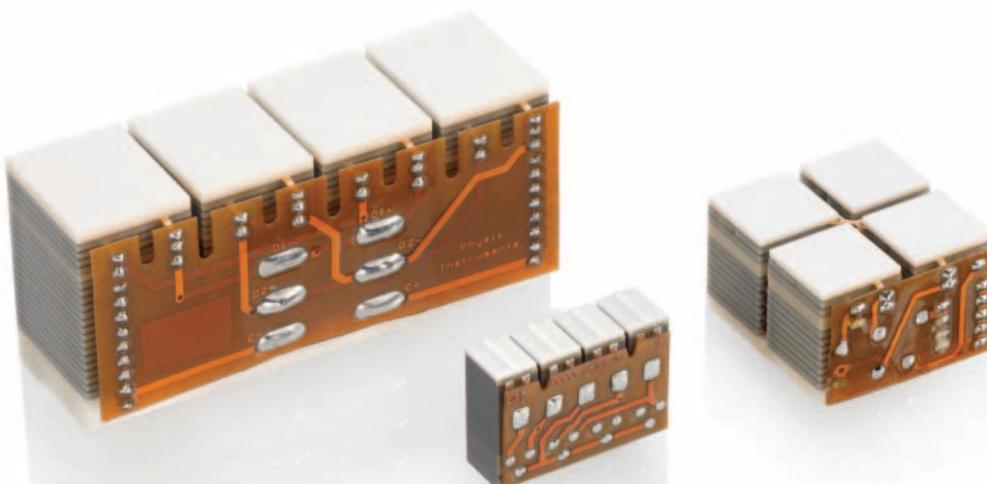
Presstechnologie

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

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

Picoactuator® Piezoaktoren bestehen aus kristallinen Schichten mit einer Dicke von 0,38 mm. Im Unterschied zur Keramik wird die Orientierung der spontanen Polarisierung nicht durch eine ferroelektrische Polung, sondern durch die Schnittrichtung im Einkristall bestimmt. Alle weiteren Verarbeitungs- und Montageschritte ähneln denen gestapelter PICA Aktoren.

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



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





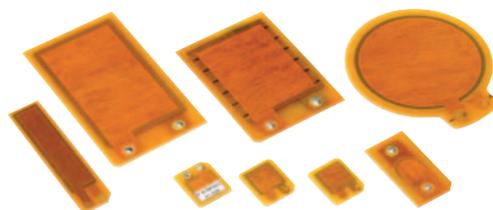
Strukturierte Elektroden erlauben die gezielte Ansteuerung der Rohraktoren

PT-Tube Rohraktoren

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

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

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



Verschiedene Formen von DuraAct Aktoren mit Keramikplatten in Press- und Multilayer-Technologie

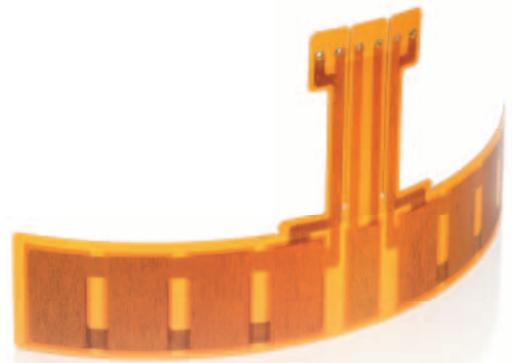
DuraAct Flächenaktoren/-wandler

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

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

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

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



Einlamierte Keramikschichten in einer DuraAct Wandleranordnung (Array)

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

Auslenkungsverhalten

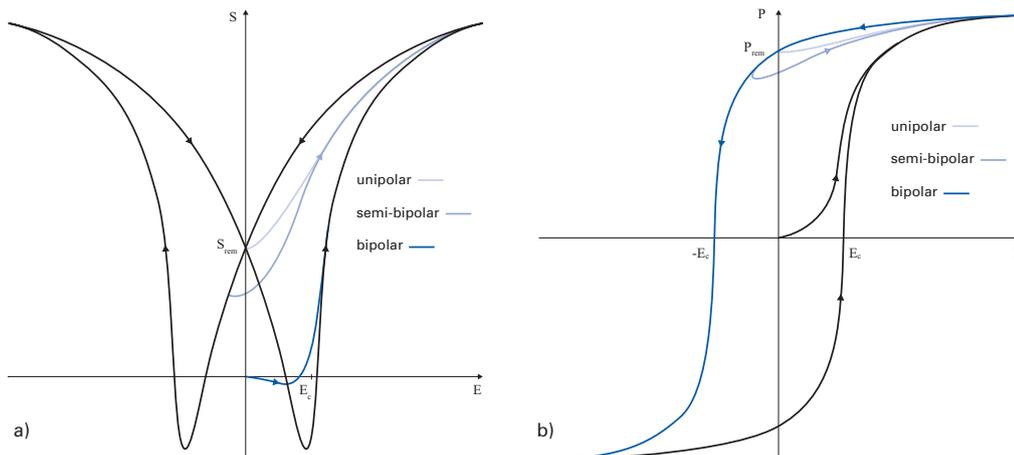


Abb. 20: Auslenkung ferroelektrischer Piezokeramiken bei verschiedenen Ansteueramplituden parallel zur Polarisationsrichtung. Großsignalkennlinien in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke E
 a) elektromechanisches Verhalten der longitudinalen Dehnung S , b) dielektrisches Verhalten der Polarisation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

Nichtlinearität

Die spannungsabhängigen Auslenkungs-kurven von Piezoaktoren haben aufgrund der extrinsischen Domänenanteile einen stark nichtlinearen und hysteresebefaheten Verlauf.

Aus der Nominalauslenkung kann daher nicht linear auf Zwischenpositionen bei bestimmter Ansteuerung interpoliert werden. Die elektro-mechanischen und dielektrischen Großsignal-kennlinien von Piezokeramiken verdeutlichen die Charakteristik (Abb. 20). Der Ursprung der Diagramme wird jeweils durch den thermisch depolarisierten Zustand definiert.

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

Piezoelektrischer Deformationskoeffizient (Piezomodul)

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

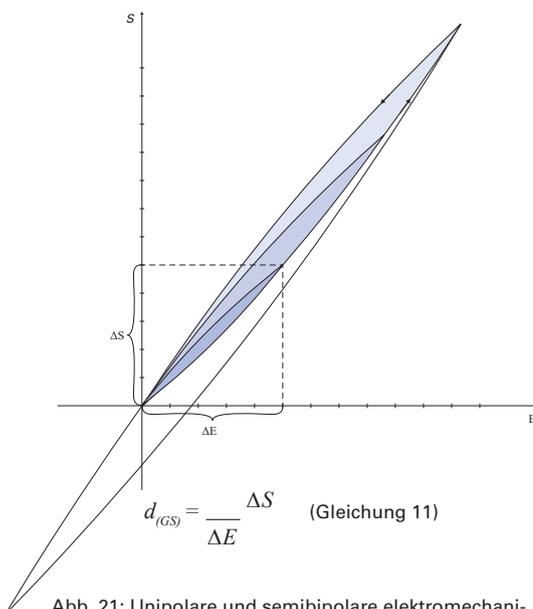


Abb. 21: Unipolare und semibipolare elektromechanische Kennlinien ferroelektrischer Piezokeramiken und Definition des piezoelektrischen Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ als Anstieg zwischen den Umkehrpunkten einer Teilhysteresekurve

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

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

Abschätzung der zu erwartenden Auslenkung

Setzt man die Werte aus Abb. 22 in die Gleichungen 3 bis 10 (s. S. 131 – 133) ein, so kann man daraus die erreichbare Auslenkung bei einer bestimmten Ansteuerungsspannung abschätzen. Die Feldstärke kann aus den Schichthöhen des konkreten Bauelementes und der Ansteuerungsspannung V_{pp} berechnet werden. Die Schichthöhen der PI Ceramic-Standardprodukte sind ab S. 134 angegeben.

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

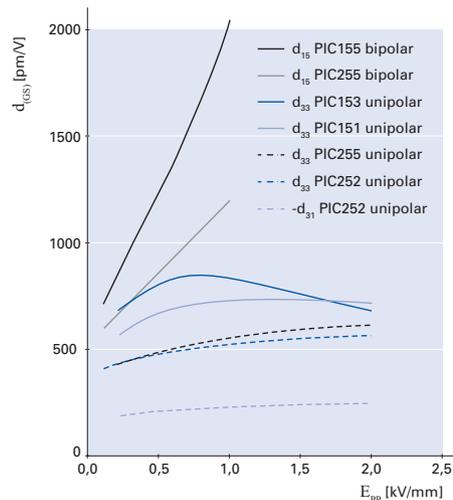


Abb. 22: Piezoelektrische Großsignal-Deformationskoeffizienten $d_{(GS)}$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Bei sehr kleinen Feldamplituden stimmen die Werte der Koeffizienten mit den Materialkonstanten von S. 128 überein

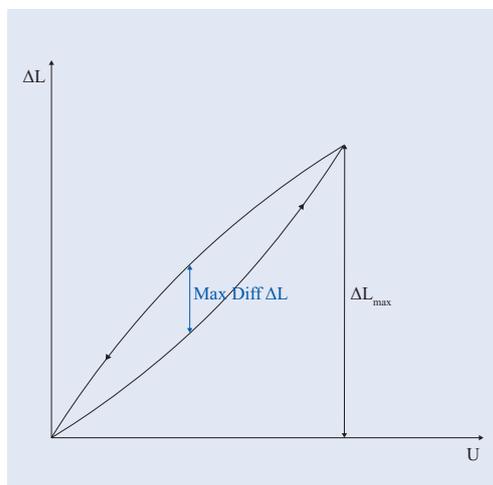


Abb. 23: Der Hysteresewert H_{disp} ist als Verhältnis zwischen der maximalen Öffnung der Kurve und der maximalen Auslenkung definiert

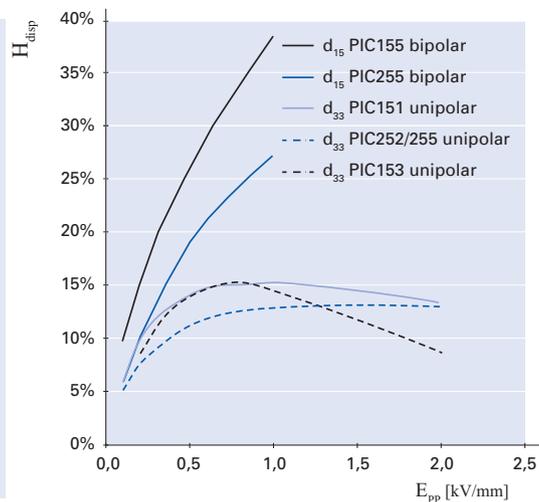


Abb. 24: Auslenkungshysterese H_{disp} verschiedener Aktormaterialien im unregelmäßig, spannungsgesteuerten Betrieb für verschiedene Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung

Hysterese

Im unregelmäßig, spannungsgesteuerten Betrieb zeigen die Auslenkungskennlinien piezokeramischer Aktoren eine starke Hysterese (Abb. 24), die mit zunehmender Spannung bzw. Feldstärke in der Regel ansteigt. Beson-

ders hohe Werte entstehen bei Scheraktoren bzw. bei bipolarer Ansteuerung. Verantwortlich für diese Zunahme ist die steigende Beteiligung extrinsischer Umpolungsvorgänge am Gesamtsignal.

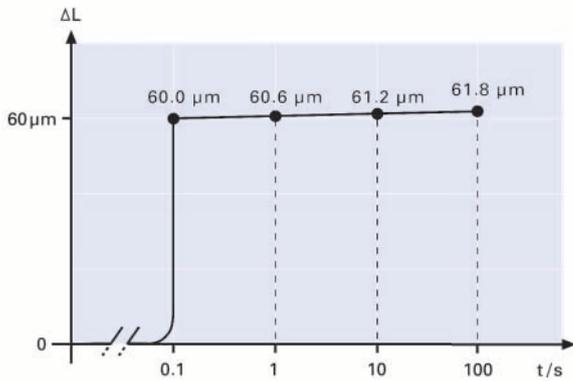


Abb. 25: Auslenkung eines Piezoaktors nach Ansteuerung mit einer Sprungfunktion. Das Kriechen verursacht ungefähr 1 % Auslenkungsänderung pro logarithmischer Zeitdekade

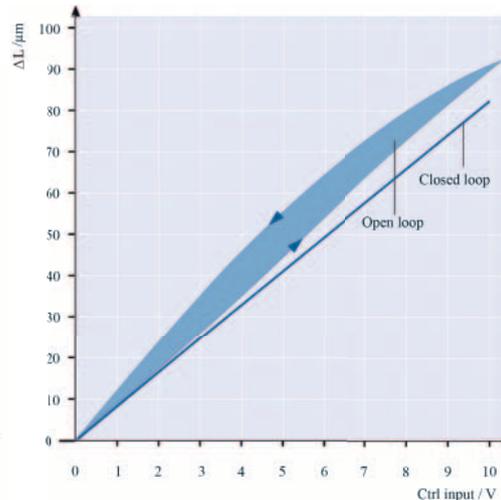


Abb. 26: Eliminieren von Hysterese und Kriechen im piezokeramischen Aktor durch Positionsregelung

Kriechen

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

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

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

Positionsregelung

Hysterese und Kriechen der piezokeramischen Aktoren lassen sich am wirkungsvollsten durch eine Positionsregelung im geschlossenen Regelkreis beseitigen. Zum Aufbau von positionsgeregelten Systemen können die PI Ceramic-Piezoaktoren der PICA Stack und PICA Power Produktreihe optional mit applizierten Dehnungsmessstreifen angeboten werden.

In Anwendungen mit rein dynamischer Ansteuerung kann die Hysterese auch ohne Regelung durch die Verwendung eines Ladungsverstärkers wirkungsvoll auf Werte von 1 bis 2 % reduziert werden (s. S. 155).

Temperaturabhängiges Verhalten

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

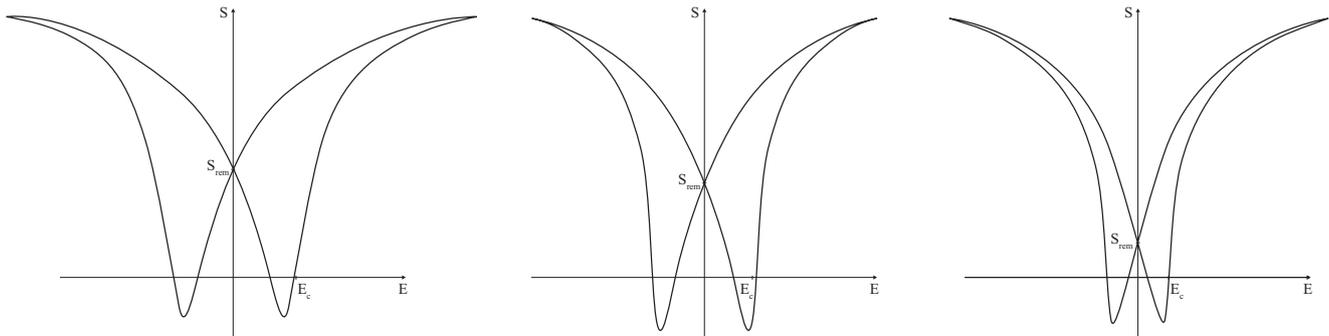


Abb. 27: Bipolare elektromechanische Großsignal-Kennlinie piezokeramischer Aktoren bei verschiedenen Temperaturen. Von links: Verhalten bei tiefen Temperaturen, bei Raumtemperatur, bei hohen Temperaturen

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

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

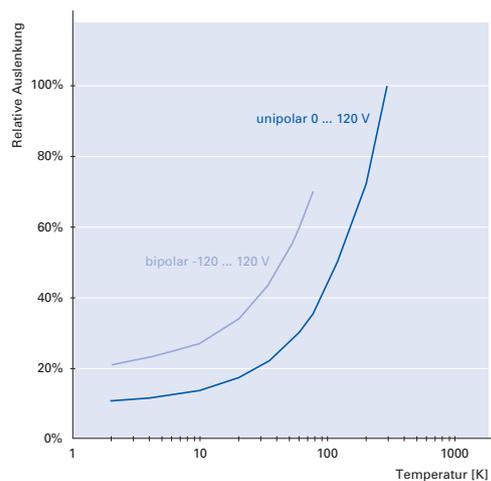


Abb. 28: Relative Abnahme der Auslenkung am Beispiel eines PICMA® Stack Aktors im kryogenen Temperaturbereich bei verschiedenen Ansteuersignalen, bezogen auf die Raumtemperatur-Nominalauslenkung

Auslenkung in Abhängigkeit von der Temperatur

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

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

Abmessung in Abhängigkeit von der Temperatur

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

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

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

Temperatureinsatzbereich

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

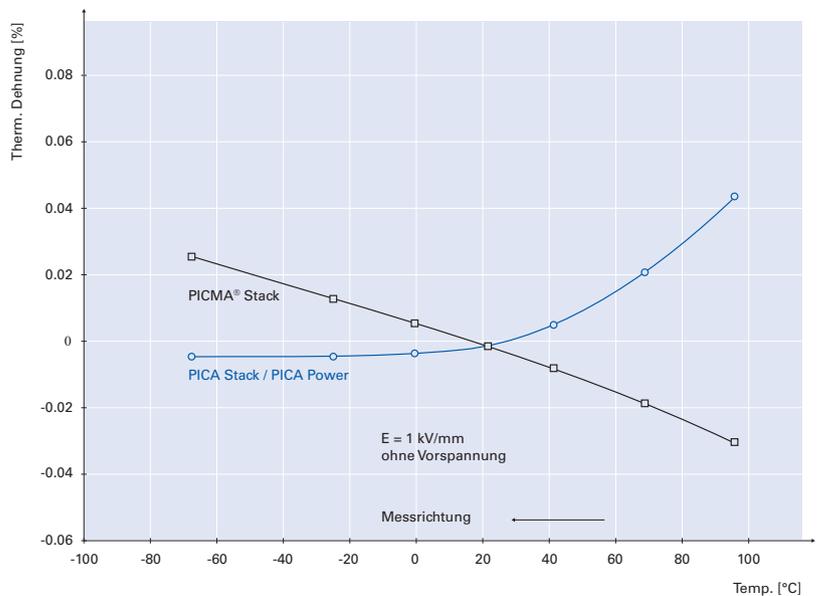


Abb. 29: Temperatureausdehnungsverhalten von PICMA® und PICA Aktoren bei elektrischer Großsignalansteuerung

Kräfte und Steifigkeiten

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

E^*	effektiver Elastizitätsmodul: linearer Anstieg einer Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Probekörpers oder -aktors aus dem entsprechenden Piezokeramikmaterial (Abb. 30)
A	Aktorquerschnittsfläche
l	Aktorlänge
k_A	Aktorsteifigkeit
ΔL_0	Nominalauslenkung
F_{\max}	Blockierkraft
k_L	Laststeifigkeit
F_{eff}	effektive Kraft

Vorspannung und Belastbarkeit

Die Dauerzugfestigkeiten spröder Piezokeramik- und Einkristallaktoren sind mit Werten im Bereich von 5 bis 10 MPa relativ gering. Daher wird empfohlen, die Aktoren in der Anwendung mechanisch vorzuspannen. Die Vorspannung sollte so niedrig wie möglich gewählt werden. Erfahrungsgemäß genügen zur Kompensation von dynamischen Kräften 15 MPa (s. S. 146), bei konstanter Belastung sollten 30 MPa nicht überschritten werden.

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

Steifigkeit

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

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

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

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

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

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

Grenzen der Vorspannung

Bereits bei einigen 10 MPa beginnt der Aktor mechanisch zu depolarisieren. Eine Großsignalansteuerung repolarisiert den Aktor, wodurch einerseits zwar die induzierte Auslenkung zunimmt, andererseits aber die effektiven Kapazitäts- und Verlustwerte ansteigen, was nachteilig für die Lebensdauer des Bauelementes ist.

Eine Druckvorspannung erzeugt partiell auch Zugspannungen (s. S. 156). Daher besteht bei sehr hohen Vorspannungen die Gefahr, dass die Zugspannungsfestigkeit lokal überschritten wird. Die Größe der möglichen Vorspannung wird nicht durch die Festigkeit des keramischen Materials bestimmt. Piezoaktoren erreichen Druckfestigkeiten von mehr als 250 MPa.

Krafterzeugung und Auslenkung

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

Nominalauslenkung

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

Blockierkraft

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

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

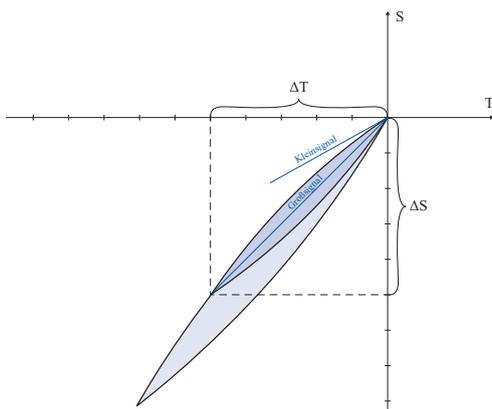


Abb. 30: Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eines piezokeramischen Stapelaktors bei Ansteuerung mit einer hohen Feldstärke, um mechanische Depolarisationen zu vermeiden. Der lineare Anstieg $\Delta T/\Delta S$ definiert den effektiven Großsignal-Elastizitätsmodul $E^*_{(GS)}$. Kleinsignalwerte der Elastizitätsmodule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

Typische Lastfälle

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

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

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

Auslenkung ohne Vorspannung, Last mit geringer Steifigkeit

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

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

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

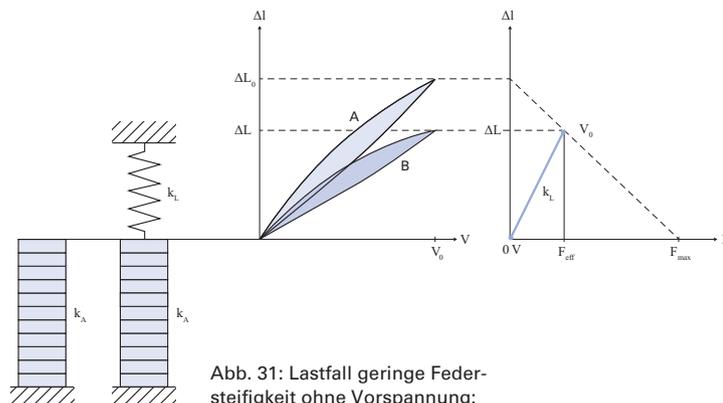


Abb. 31: Lastfall geringe Federsteifigkeit ohne Vorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

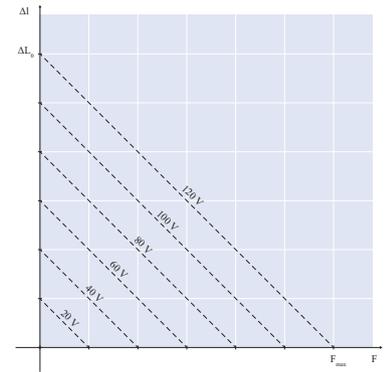


Abb. 32: Arbeitsdiagramm eines PICMA® Stack Aktors bei unipolarer Ansteuerung mit verschiedenen Spannungen

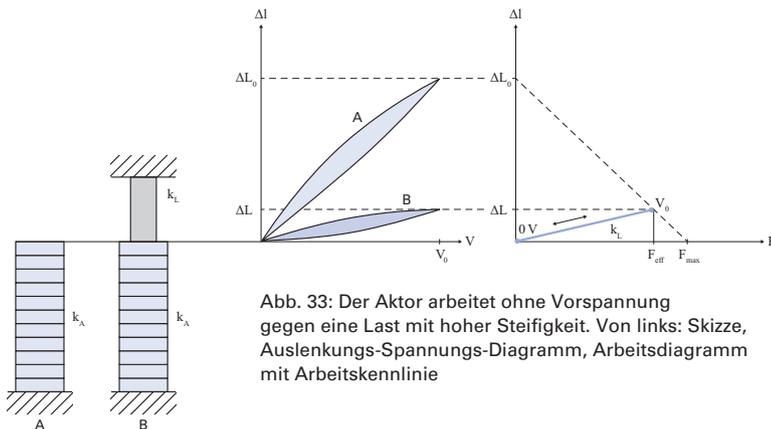


Abb. 33: Der Aktor arbeitet ohne Vorspannung gegen eine Last mit hoher Steifigkeit. Von links: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Krafterzeugung ohne Vorspannung, Last mit hoher Steifigkeit

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

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

Die sorgfältige Kraftereinleitung ist bei diesem Lastfall besonders wichtig, da im Aktor große mechanische Spannungen entstehen. Um eine hohe Lebensdauer zu erreichen, müssen lokale Zugspannungen unbedingt vermieden werden (s. S. 142).

Nicht-lineare Last ohne Vorspannung, öffnen und schließen eines Ventils

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

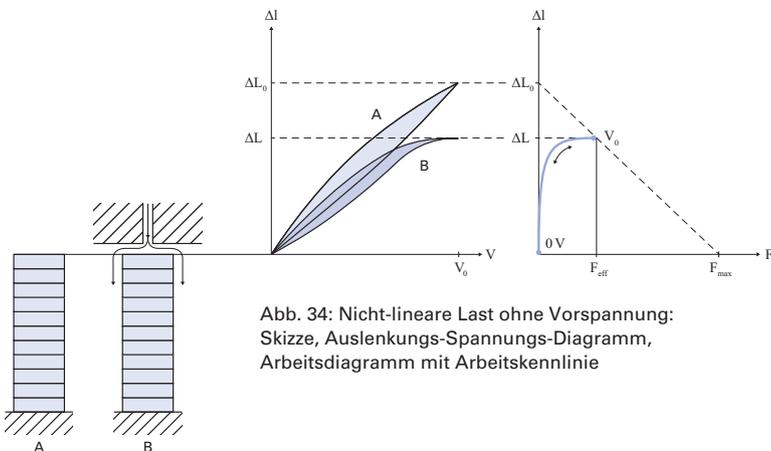


Abb. 34: Nicht-lineare Last ohne Vorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Große konstante Last

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

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

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

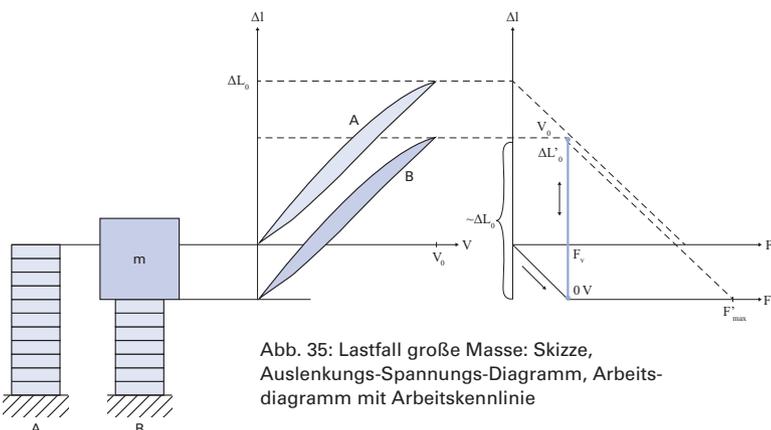


Abb. 35: Lastfall große Masse: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Beispiel: Die Steifigkeit steigt deutlich, wenn der Aktor elektrisch mit einer hohen Impedanz betrieben wird, wie sie bei Ladungsverstärkern gegeben ist (s. S. 155). Bei mechanischer Belastung wird eine Ladung generiert, die aufgrund der hohen Impedanz nicht abfließen kann und daher ein versteifendes Gegenfeld erzeugt.

Federvorspannung

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

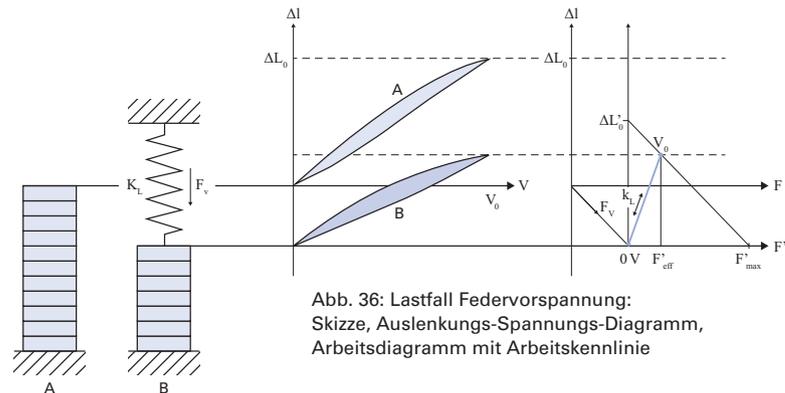


Abb. 36: Lastfall Federvorspannung: Skizze, Auslenkungs-Spannungs-Diagramm, Arbeitsdiagramm mit Arbeitskennlinie

Aktordimensionierung und energetische Betrachtung

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

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

Die Energiemenge E_{mech} , die beim Betrieb eines Aktors von elektrischer in mechanische Energie umgewandelt wird, entspricht der Fläche unter der Kennlinie in Abb. 37. Von dieser Gesamtmenge kann jedoch nur ein Bruchteil E_{out} an die mechanische Last abgegeben werden. Das mechanische System ist energetisch optimiert, wenn die Fläche ihr Maximum erreicht. Dieser Fall tritt ein, wenn die Laststeifigkeit und die Aktorsteifigkeit gleich sind.

Die im Arbeitsdiagramm hellblau dargestellte Fläche entspricht diesem Betrag. Ein longitudinaler Piezoaktor kann ca. 2 bis 5 mJ/cm³ mechanische Arbeit verrichten, ein Biegeaktor erreicht etwa 10-fach geringere Werte.

Wirkungsgrad und Energiebilanz eines piezoaktorischen Systems

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

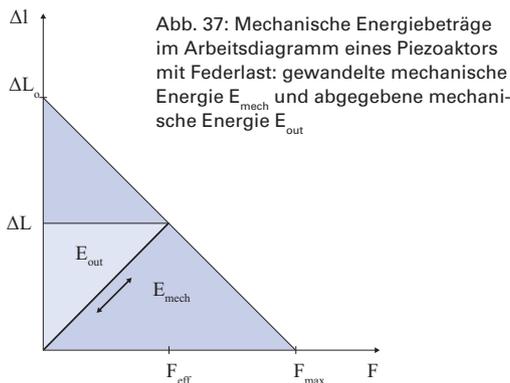


Abb. 37: Mechanische Energiebeträge im Arbeitsdiagramm eines Piezoaktors mit Federlast: gewandelte mechanische Energie E_{mech} und abgegebene mechanische Energie E_{out}

Dynamischer Betrieb

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

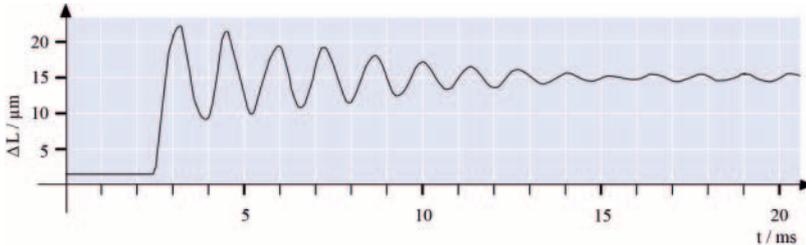


Abb. 38: Auslenkung eines ungedämpften Piezosystems nach Ansteuerung mit einem Spannungssprung. Die Nominalauslenkung wird nach etwa einem Drittel der Periodendauer erreicht

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

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

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

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

Dynamische Kräfte

Bei geeigneter Ansteuerlektronik können Piezoaktoren hohe Beschleunigungen von einigen Zehntausend m/s^2 erzeugen. Durch die Trägheit evtl. angekoppelter Massen sowie der Aktoren selbst entstehen dynamische Zugkräfte, die durch mechanische Vorspannungen kompensiert werden müssen (vgl. S. 142 ff).

Im Sinusbetrieb können die maximalen Kräfte wie folgt abgeschätzt werden:

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

Beispiel: Die dynamischen Kräfte bei 1000 Hz , $2 \mu\text{m}$ Auslenkung (Spitze-Spitze) und 1 kg Masse betragen ungefähr $\pm 40 \text{ N}$.

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

Resonanzfrequenz

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

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

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

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

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

Wie schnell kann sich ein Piezoaktor ausdehnen?

Schnelles Ansprechverhalten ist eine charakteristische Eigenschaft von Piezoaktoren. Eine schnelle Änderung der Betriebsspannung bewirkt eine schnelle Positionsänderung.

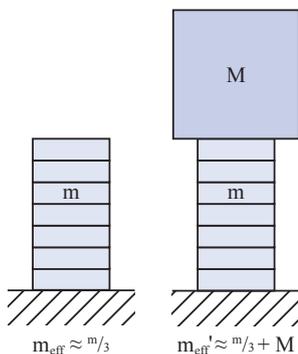


Abb. 39: Berechnung der effektiven Masse m_{eff} und m_{eff}' eines einseitig eingespannten Piezostapelaktors ohne und mit Last

Elektrische Ansteuerung

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

Betriebsspannung

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

Elektrisches Verhalten

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

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

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

Elektrische Kapazitätswerte

Die Kapazitätswerte in den technischen Daten sind Kleinsignalwerte, d. h. sie sind gemessen bei Ansteuerung mit 1 V, 1000 Hz, 20 °C, lastfrei. Die Kapazität der Piezokeramik ändert sich mit der Spannungsamplitude, der Temperatur und der Last auf bis zu 200 % des unbelasteten Kleinsignalwertes bei Raumtemperatur. Für Berechnungen unter Großsignalbedingungen

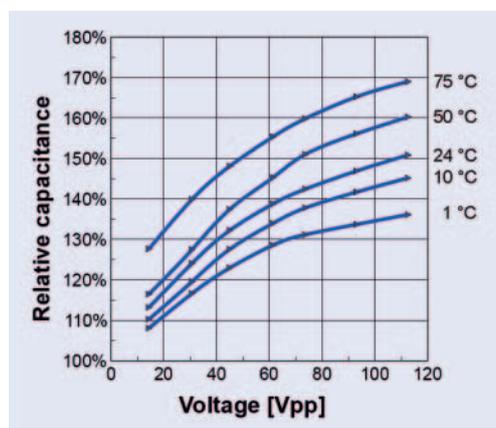


Abb. 40: Die elektrische Kapazität wächst mit steigender Ansteuerspannung und Temperatur

genügt häufig ein Sicherheitsfaktor von 70 %, der zur Kleinsignalkapazität addiert wird (Abb. 40).

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

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

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

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

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

Positionierbetrieb, statisch und mit geringer Dynamik

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

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

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

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

C	Kapazität [C]
n	Anzahl der Keramiksichten im Aktor
ϵ_{33}^T	Permittivität = ϵ_{33}/ϵ_0 (vgl. Tabelle S. 128) [As/Vm]
A	Aktorquerschnittsfläche [m ²]
l	Aktorlänge [m]
h_L	Schichthöhe im Aktor [m]
I	Strom [A]
Q	Ladung [C, As]
V	Spannung am Piezoaktor [V]
t	Zeit [s]

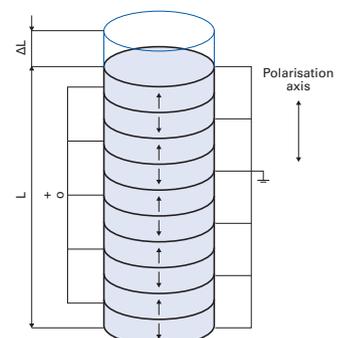


Abb. 41: Aufbau und Kontaktierung eines gestapelten Piezotranslators

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

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

Betrieb mit Positionsregelung

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

Leistungsaufnahme des Piezoaktors

In dynamischen Anwendungen nimmt die Leistungsaufnahme des Aktors linear mit Frequenz und Aktorkapazität zu. Ein kompakter Piezotranslator mit ca. 100 N Belastbarkeit benötigt bei 1000 Hz und 10 μm Hub weniger als 10 Watt Blindleistung, während ein Hochlastaktor (>10 kN Belastbarkeit) bei gleichen Bedingungen einige 100 Watt erfordert.

Wärmeerzeugung in einem Piezoelement bei dynamischem Betrieb

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

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

Bei Aktor-Piezokeramik liegt der Verlustfaktor unter Kleinsignalbedingungen in der Größenordnung von 0,01 – 0,02. Dadurch werden bis zu 2 % der elektrischen Leistung, die in den Aktor fließt, in Wärme umgewandelt. Bei Großsignalbedingungen kann dieser auf deutlich höhere Werte ansteigen (Abb. 42). Die maximale Arbeitsfrequenz hängt deshalb auch von der zulässigen Betriebstemperatur ab. Bei hohen Frequenzen und Spannungsamplituden können Kühlungsmaßnahmen notwendig wer-

Abb. 42: Dielektrische Verlustfaktoren $\tan \delta$ für verschiedene Materialien und Ansteuerformen bei Raumtemperatur und quasistatischer Ansteuerung. Die Umrechnung zwischen Spannung und Feldstärke für konkrete Aktoren erfolgt mit den Schichthöhen, die ab S. 134 angegeben werden. Der tatsächliche Verlustfaktor im Bauelement hängt von weiteren Faktoren ab, wie der mechanischen Vorspannung, der Temperatur, der Ansteuerfrequenz und dem passiven Materialanteil.

den. PI Ceramic bietet für diese Anwendungen auch Piezoaktoren mit integrierten Temperatursensoren zur Überwachung der Keramiktemperatur an.

Kontinuierlicher dynamischer Betrieb

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

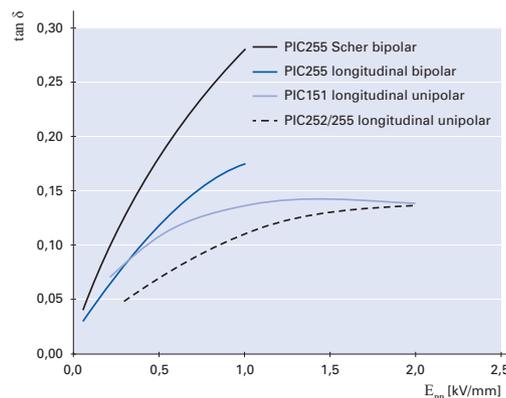
Ansteuerung mit Sinusfunktion

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

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

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

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



Ansteuerung mit Dreiecksfunktion

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

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

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

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

Signalform und Bandbreite

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

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

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

Schaltanwendungen, Pulsbetrieb

Die schnellstmögliche Auslenkung eines Piezoaktors kann in 1/3 der Periode seiner Resonanzfrequenz erfolgen (vgl. S. 146). Anstiegszeiten im Mikrosekundenbereich und Beschleunigungen von mehr als 10000 g sind möglich, erfordern aber vom Piezoverstärker besonders hohe Spitzenströme.

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

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

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

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

Vor- und Nachteile einer Positionsregelung

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

In Schaltanwendungen kann daher häufig eine erforderliche Positionsstabilität und Linearität nicht durch Positionsregelung erreicht werden. Eine Linearisierung kann z. B. durch die Ladungssteuerung der Verstärker (s. S. 155) oder durch numerische Korrekturverfahren erreicht werden.

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

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



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

Umgebungsbedingungen

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

Bei Fragen zum Einsatz in besonderen Umgebungen wenden Sie sich an

info@pi.ws oder
info@piceramic.de.

Piezoaktoren eignen sich für den Betrieb in verschiedensten, teilweise extremen Umgebungsbedingungen. Hinweise zur Anwendung bei hohen Temperaturen bis 200 °C sowie in kryogenen Umgebungen befinden sich ab S. 140.

Vakuumumgebung

Dielektrische Stabilität

Die Durchschlagsspannung eines Gases hängt nach dem Paschen-Gesetz vom Produkt aus dem Druck p und dem Elektrodenabstand s ab. Luft hat sehr gute Isolationswerte bei atmosphärischem Druck und bei sehr geringen Drücken. Die minimale Durchschlagsspannung von 300 V liegt bei einem ps-Produkt von 1 000 Pa mm. PICMA® Stack Aktoren mit Nominalspannungen deutlich unterhalb von 300 V können deshalb bei jedem Zwischen-druck betrieben werden. PICA Piezoaktoren mit Nominalspannungen oberhalb von 300 V sollten hingegen bei Luft im Druckbereich 100 bis 50 000 Pa nicht oder nur bei stark reduzierten Spannungen angesteuert werden, um Durchschläge zu vermeiden.

Ausgasen

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

Edelgase

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

Magnetfelder

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

Gammastrahlung

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

Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit

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

Dauerbetrieb mit hohen Gleichspannungen in feuchter Umgebung kann Piezoaktoren schädigen (s. S. 151). Dies gilt insbesondere für die Aktoren der PICA Produktreihen, da hier die aktiven Elektroden nur durch eine Polymerschicht geschützt sind, die von der Luftfeuchtigkeit durchdrungen werden kann. Die Aktoren der PICMA® Produktreihen besitzen eine vollkeramische Isolation, welche die Lebensdauer bei feuchten Umgebungsbedingungen im Vergleich zu polymerumhüllten Aktoren wesentlich verbessert (s. S. 151).

Flüssigkeiten

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

Zuverlässigkeit von PICMA[®] Multilayer-Aktoren

Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren

Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung

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

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

Vollkeramische Schutzschicht

Mit dem patentierten PICMA[®] Design wird diese Reaktion wirkungsvoll unterdrückt. Die anorganische keramische Schutzschicht (s. S. 134) verhindert im Gegensatz zu rein polymeren Umhüllungen den Kontakt der Wassermoleküle mit den Innenelektroden und erhöht auf diese Weise die Lebensdauer um mehrere Größenordnungen (s. Abb. 44).

Quasistatische Bedingungen: Beschleunigte Lebensdauerprüfung

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

In Abb. 44 werden die Ergebnisse eines Tests bei einer stark erhöhten Luftfeuchtigkeit von 90 % RH bei 100 V DC und 22 °C gezeigt. Die extrapolierte mittlere Lebensdauer (MTTF, "Mean Time To Failure") für PICMA[®] Aktoren liegt bei mehr als 400 000 h (ca. 47 Jahre), während Vergleichsaktoren mit Polymerumhüllung unter diesen Bedingungen nur eine MTTF von ca. einem Monat erreichen.

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

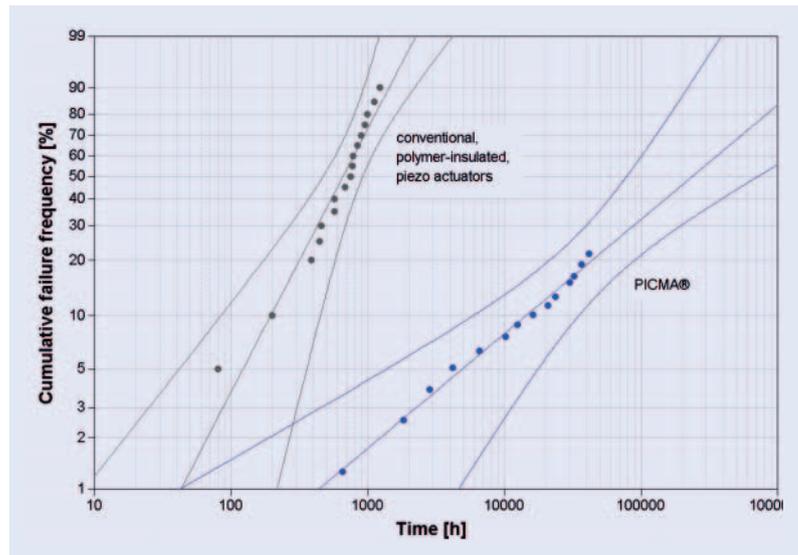


Abb. 44: Ergebnisse eines beschleunigten Lebensdauerests mit erhöhter Luftfeuchtigkeit (Testbedingungen: PICMA[®] Stack und polymerumhüllte Aktoren, Abmessungen: 5 x 5 x 18 mm³, 100 V DC, 22 °C, 90 % RH)

Berechnung der Lebensdauer bei Gleichspannungsbelastung

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

Die einfache Formel

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

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

Wichtig:

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

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

Abb. 45: Diagramm zur Berechnung der Lebensdauer von PICMA® Stack Aktoren bei Gleichspannungsbelastung. Für einen Dauerbetrieb bei 100 V DC mit 75 % Luftfeuchtigkeit (RH) und einer Umgebungstemperatur von 45 °C kann man folgende Werte aus dem Diagramm ablesen: $A_F = 14$ (Luftfeuchte, blaue Kurve), $A_T = 100$ (Temperatur, rote Kurve) und $A_U = 75$ (Betriebsspannung, schwarze Kurve). Das Produkt ergibt eine mittlere Lebensdauer von 105 000 h, also über 11 Jahren

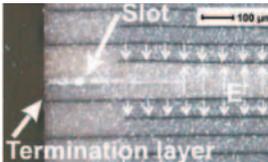
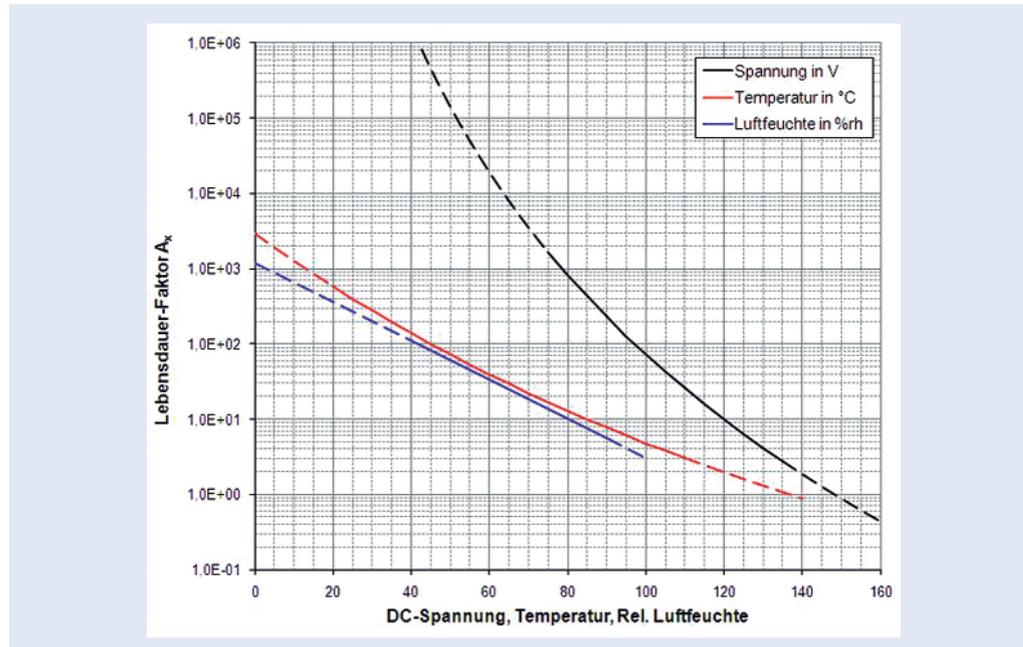


Abb. 46: Deutlich sichtbar ist das patentierte PICMA® Aktordesign mit definierten Schlitzen („Slots“), das unkontrollierte Dehnungsrisse bei dynamischer Ansteuerung verhindert

Lebensdauer im dynamischen Dauerbetrieb

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

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

Industrietauglich: 10¹⁰ Arbeitszyklen

Prüfungen mit besonders hoher Ansteuerfrequenz belegen die Robustheit der PICMA® Piezoaktoren. Vorgespannte PICMA® Aktoren der Größe 5 x 5 x 36 mm³ wurden dazu bei Raumtemperatur und Druckluftkühlung mit einem Sinussignal von 120 V unipolarer Spannung bei 1157 Hz belastet, was 10⁸ Zyklen täglich entspricht. Auch nach über 10¹⁰ Arbeitszyklen gab es keinen einzigen Ausfall und die Aktoren zeigten keine signifikanten Auslenkungsänderungen. In jüngsten Leistungs-

und Lebensdauertests der NASA erreichten PICMA® Aktoren nach 100 Milliarden (10¹¹) Zyklen noch 96 % ihrer anfänglichen Leistungsdaten. Aus einer Reihe verschiedener Piezoaktoren wurden sie daher für das Science Lab im Marsrover Curiosity ausgewählt. (Quelle: Piezoelectric multilayer actuator life test. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2011 Apr; Sherrit et al. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA)

Patentiertes Design reduziert die mechanische Spannung

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

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

Charakteristisches Verhalten von Piezoverstärkern

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

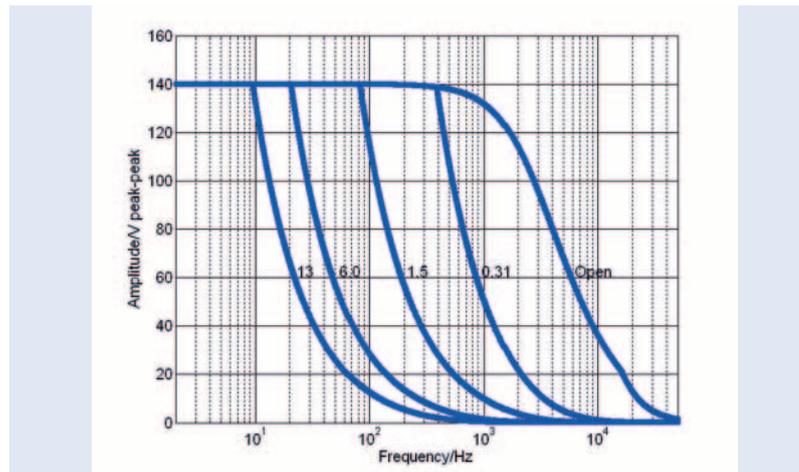
Die Ansterelektronik spielt eine Schlüsselrolle für die Leistungsfähigkeit piezoelektrischer Aktoren und Nanopositioniersysteme. Für die präzise Positionierung werden besonders rauscharme, hochstabile Linearverstärker benötigt, denn Piezoaktoren reagieren auf die geringste Spannungsänderung mit einer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

Leistungsanforderungen für den Piezobetrieb

Die Aussteuergrenze eines Verstärkers mit einem gegebenen Piezoaktor hängt von der Verstärkerleistung, dem Verstärkerdesign und der Kapazität der Piezokeramik ab (vgl. S. 148 – 149). In hochdynamischen Anwendungen benötigen Piezoaktoren hohe Lade- und Entladeströme. Dabei kommt, speziell bei sinusförmigem Betrieb oder bei Pulsbetrieb, dem Spitzenstrom eine besondere Bedeutung zu. Piezoverstärker von PI sind deshalb so ausgelegt, dass sie hohe Spitzenströme abgeben und aufnehmen können. Wird ein Verstärker mit einer kapazitiven Last und Frequenz betrieben, bei der er nicht mehr den erforderlichen Strom aufbringen kann, kommt es zur Verzerrung des Ausgangssignals. Als Folge davon kann die volle Auslenkung nicht mehr erreicht werden.

Aussteuerkurve

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



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

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

Einstellung der Steuerspannung

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

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

Abb. 47: Aussteuerkurve, ermittelt mit verschiedenen Piezolasten, Kapazitätswerte in µF. Ansteuersignal Sinus, Betriebsdauer > 15 min, 20 °C

Lösungen für dynamische Daueranwendungen

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

Geschaltete Verstärker mit Energierückgewinnung

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

Energierückgewinnung minimiert den Energieverbrauch im Dauerbetrieb

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

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

Im Gegensatz zu konventionellen Class D-Schaltverstärkern sind PI Schaltverstärker für Piezoelemente strom- und spannungsge-regelt. Produktbeispiele sind E-617 für PICMA[®] Aktoren und E-481 für die PICA Aktorserien.

Schutz des Piezoaktors durch Temperaturüberwachung

Beim Dauerbetrieb ist die Wärmeentwicklung im Piezoaktor nicht zu vernachlässigen (vgl. S. 148). Entsprechende Elektronik können deshalb die Signale eines Temperatursensors am Piezo auswerten. Auf diese Weise wird die Keramik vor Überhitzung und Depolarisation geschützt.

Geltende Patente

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



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

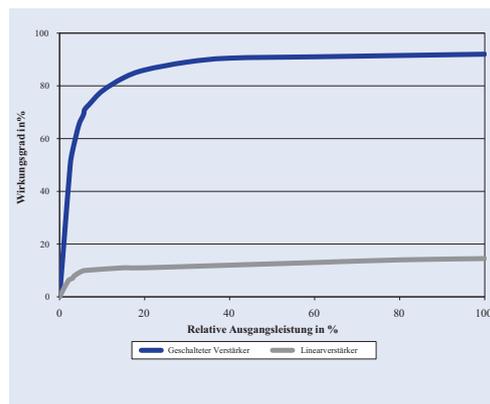


Abb. 49: Bei gleicher Ausgangsleistung verbrauchen PI Verstärker mit patentierter Energierückgewinnung nur ca. 20 % des Bedarfs eines entsprechenden Linearverstärkers

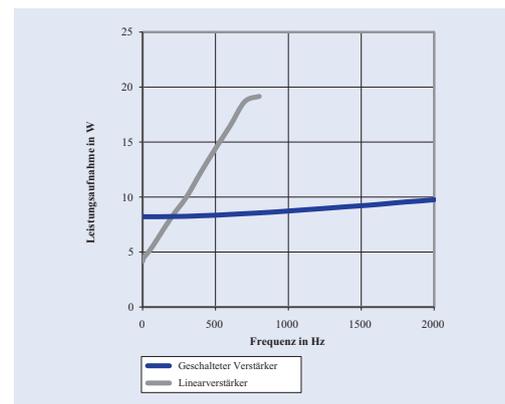


Abb. 50: Leistungsaufnahme eines Piezoverstärkers mit linearer und geschalteter Endstufe am Piezoausgang, kapazitive Last 1 µF. Die Messwerte zeigen deutlich, dass der pulswerten-modulierte Verstärker eine wesentlich höhere Dynamik erlaubt als der klassisch linear arbeitende. Der Linearverstärker erreicht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

Linearisierter Verstärker für Piezoauslenkung ohne Hysterese

Piezoelektronik zur Ansteuerung von Piezoaktoren

Ladungssteuerung

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

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

Ladung und Auslenkung

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

Für dynamische Anwendungen:

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



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

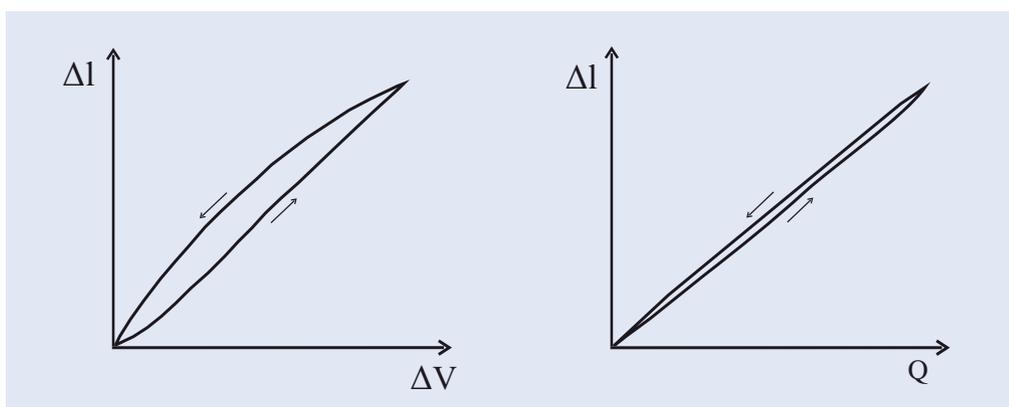


Abb. 51: Typische Auslenkungscharakteristik von Piezoaktoren im Verhältnis zur angelegten Spannung (links) und zur Ladung (rechts). Die Hysterese ist durch die Kontrolle der aufgebrauchten Ladung deutlich reduziert

Handhabung von Piezoaktoren

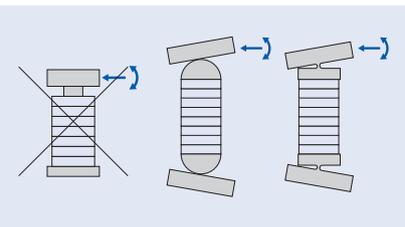


Abb. 52: Vermeiden von Querkräften und Momenten

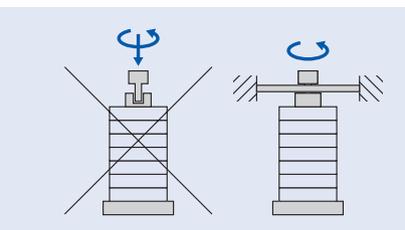


Abb. 53: Vermeiden von Drehmomenten

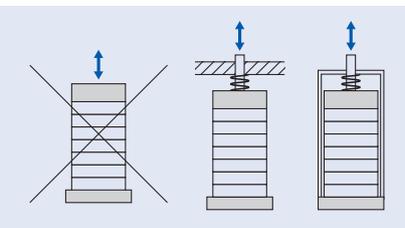


Abb. 54: Vermeiden von Zugspannungen durch mechanische Vorspannung

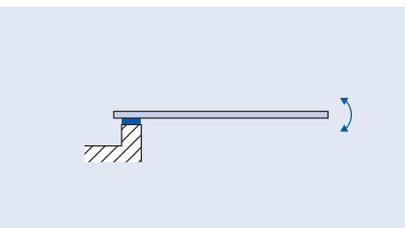


Abb. 55: Montage eines einseitig vorgespannten Biegeaktors durch Klebung

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

- ▶ Vermeiden Sie mechanische Stöße auf den Aktor, wie sie z. B. beim Herunterfallen entstehen können.
- ▶ Verwenden Sie beim Einbau keine metallischen Werkzeuge.
- ▶ Vermeiden Sie beim Einbau und während der Anwendung ein Zerkratzen der Keramik- bzw. Polymerumhüllung und der Endflächen.
- ▶ Vermeiden Sie den Kontakt der Keramik- oder Polymerisolierung zu leitfähigen Flüssigkeiten (u. a. Fingerschweiß) sowie zu Metallstaub.
- ▶ Wenn der Aktor im Vakuum betrieben wird: Beachten Sie die Hinweise zu den zulässigen Ansteuerspannungen in bestimmten Druckbereichen (s. S. 150).
- ▶ Wenn der Aktor in Kontakt mit isolierenden Flüssigkeiten, wie Silikon- oder Hydrauliköle, kommen kann, wenden Sie sich an info@piceramic.de.
- ▶ Wenn der Aktor versehentlich verunreinigt wurde, reinigen Sie den Aktor vor der Wiederinbetriebnahme sorgfältig mit Isoopropanol bzw. Ethanol. Anschließend trocknen Sie ihn vollständig in einem Trockenschrank. Verwenden Sie zur Reinigung keinesfalls Aceton. Reduzieren Sie bei der Reinigung im Ultraschallbad den Energieeintrag auf das notwendige Minimum.
- ▶ Empfehlung: Tragen Sie während des Einbaus und der Inbetriebnahme Handschuhe und Schutzbrille.

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

Mechanischer Einbau (Abb. 52, 53, 54)

- ▶ Vermeiden Sie Momente und Querkräfte während der Montage und im Betrieb des Aktors durch geeignete Konstruktionen bzw. Führungselemente.
- ▶ Wenn der Aktor dynamisch betrieben wird: Bauen Sie den Aktor möglichst so ein, dass der Masseschwerpunkt des bewegten Systems mit der Aktorachse übereinstimmt und verwenden Sie bei sehr großen Massen eine Führung.
- ▶ Stellen Sie an den Endflächen eines Stapelaktors einen möglichst vollflächigen Kontakt her.
- ▶ Wählen Sie Gegenflächen mit einer Ebenheit von wenigen Mikrometern.

Verkleben

- ▶ Bei unebenen Montageflächen verwenden Sie Epoxidharzklebstoffe zum Einkleben der Aktoren. Gut geeignet sind kalt-härtende 2K-Klebstoffe, um die thermo-mechanischen Spannungen zu reduzieren.
- ▶ Halten Sie bei der Aushärtung den für den Aktor spezifizierten Betriebstemperaturbereich ein und beachten Sie die Temperaturausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien.

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

Vorspannung aufbringen (Abb. 54)

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

Last homogen einleiten (Abb. 56)

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

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

Elektrischer Anschluss (Abb. 59)

Elektrisch gesehen sind Piezoaktoren Kondensatoren, die sehr viel Energie speichern können. Ihre hohen Innenwiderstände führen zu sehr langsamen Entladungen mit Zeitkonstanten im Bereich von Stunden. Mechanische oder thermische Belastungen laden den Aktor elektrisch auf.

- ▶ Schließen Sie das Gehäuse bzw. die umgebende Mechanik normgerecht an einen Schutzleiter an.

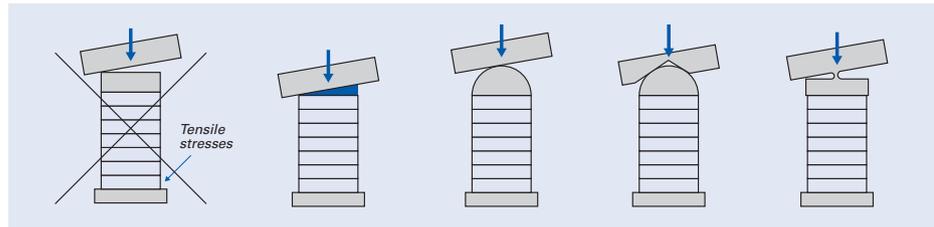


Abb. 56: Vermeiden einer inhomogenen Lasteinleitung

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

Sicherer Betrieb

- ▶ Reduzieren Sie im Betrieb des Aktors die DC-Spannung soweit wie möglich (s. S. 151). Offsetspannungen können Sie durch einen semi-bipolaren Betrieb verringern.
- ▶ Schalten Sie den Aktor immer ab, wenn er nicht benötigt wird.
- ▶ Vermeiden Sie steile Flanken im Ansteuersignal, da sie bei fehlender Vorspannung des Aktors starke dynamische Kräfte auslösen können. Steile Flanken können z. B. beim Einschalten von digitalen Funktionsgeneratoren auftreten.

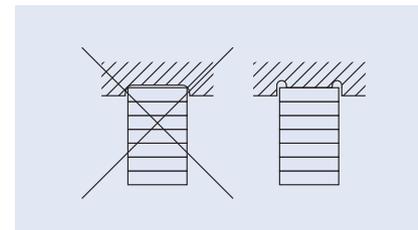


Abb. 57: Vollflächiger Kontakt des Aktors

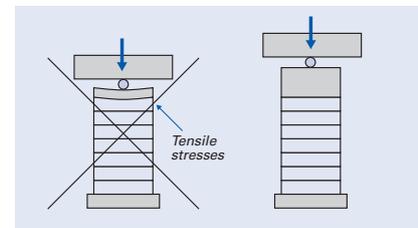


Abb. 58: Richtiges Dimensionieren der Endstücke bei punktförmigem Kontakt

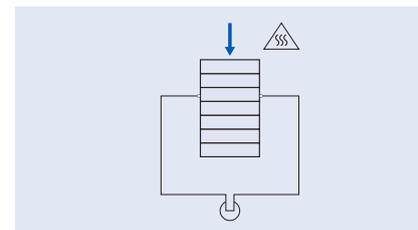
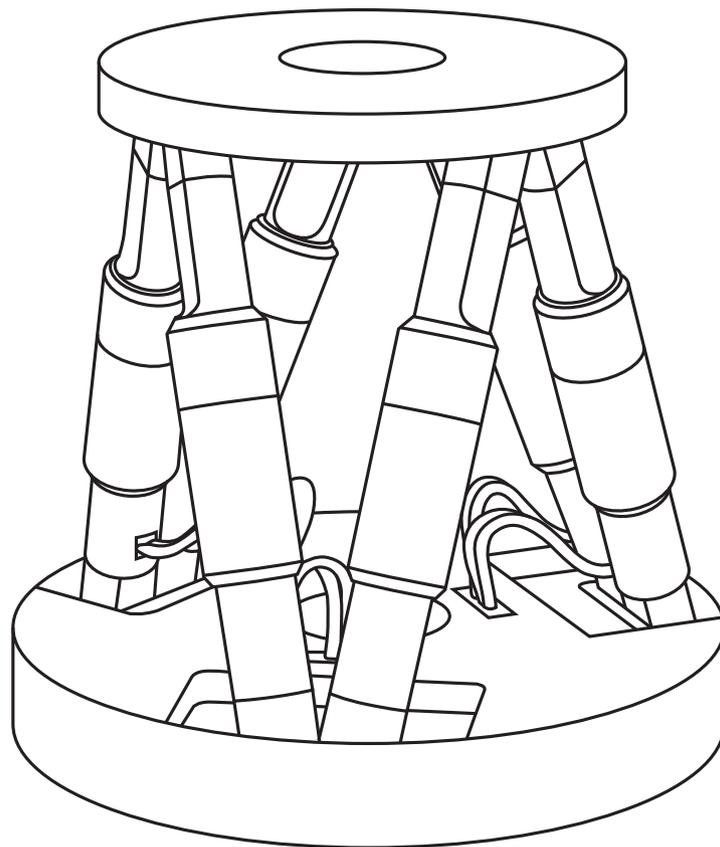


Abb. 59: Mechanische Belastungen laden den Aktor elektrisch auf. Montage nur im kurzgeschlossenen Zustand

Hexapod und SpaceFAB



Produkte

Seite 160–179

Technologie parallelkinematischer Präzisionspositionierer

Seite 180–189

Hexapod und SpaceFAB

Parallelkinematiken für 6 Bewegungsachsen



Beim ALMA-Projekt in der Atacama-Wüste in Chile werden bis zu 64 Antennen zu einem riesigen Radioteleskop zusammengefasst. Hexapodsysteme von PI positionieren die Sekundärreflektoren der Teleskope. Die auch gegen extreme Umgebungsbedingungen unempfindlichen Systeme können Massen bis zu 75 kg bewegen (Foto: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))



Hexapod und SpaceFAB

Seite 162



Controller für Hexapod-Positioniersysteme

6D-Bewegungssteuerung, umfangreiche Funktionen

Seite 176



Zubehör

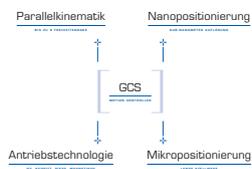
Für Hexapodsysteme

Seite 178



Technologie parallelkinematischer Präzisionspositionierer

Seite 180



Motion Control Software

Effektive und komfortable Lösungen

Seite 186

Kompakte hochpräzise parallelkinematische Hexapoden



H-811

Highlights

- Sechs-Achsen-Positioniersysteme mit hervorragender Präzision
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- Umfangreiches Softwarepaket mit integrierten Scanalgorithmen für faseroptische Justage
- Optionale SPS/CNC Schnittstelle

Anwendungen

Automatisierte 6D-Justagesysteme übernehmen wichtige Aufgaben bei Test und Herstellung von MEMS und Photonik-Zubehör. Dazu gehört auch die Positionierung und Ausrichtung kollimierter Fasern oder Anordnungen.



H-206



H-810

H-206

H-811

H-810

	Ideal für Faserpositionierung	Vakuumversion bis 10 ⁻⁶ hPa verfügbar	
Abmessungen in mm	228 × 220 × 158	Ø 136 × 115	Ø 100 × 116
Stellweg X, Y, Z in mm	12 × 11 × 13	34 × 32 × 13	40 × 40 × 13
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	11 × 13 × 11	13 × 13 × 42	20 × 20 × 60
Belastbarkeit bei horizontaler/beliebiger Montage in kg	2	5 / 2,5	5 / 2,5
Wiederholgenauigkeit X, Y, Z in μm	±0,3	±0,3, ±0,3, ±0,1	±1, ±1, ±0,1
Kleinste Schrittweite X, Y, Z in μm	0,1	0,5, 0,5, 0,2	1, 1, 0,5
Max. Geschwindigkeit in mm/s	10	10	2,5

Preisgünstige Hexapodsysteme

Für mittlere Lasten



H-840

Highlights

- Sechs-Achsen Positioniersysteme mit hervorragender Präzision
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- Umfangreiches Softwarepaket
- Optionale SPS/CNC Schnittstelle

Anwendungen

Diese preisgünstigen 6-Achsen-Systeme sind universell einsetzbar für Positionier- und Scanaufgaben in allen Freiheitsgraden.



H-824



H-820

H-824

H-840

H-820

	Präzisions-Hexapod, Vakuumbversionen bis zu 10 ⁻⁶ hPa	Präzisions-Hexapod	Standard-Hexapod für Automatisierungsauf- gaben in Biotechnologie und Life Science
Abmessungen in mm	Ø 280 x 190	Ø 350 x 330	Ø 350 x 330
Stellwege X, Y, Z in mm	50 x 50 x 25	100 x 100 x 50	100 x 100 x 50
Stellwege $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	15 x 15 x 25	30 x 30 x 60	30 x 30 x 60
Belastbarkeit in kg	5 bis 10	10 bis 30	20
Wiederholgenauigkeit in μm	bis $\pm 0,1$	bis $\pm 0,4$	± 20
Kleinste Schrittweite in μm	0,3 bis 1	0,5 bis 3	20
Max. Geschwindigkeit X, Y, Z in mm/s	1; 25	2,5; 50	20 unter Volllast

SpaceFAB Präzisions-Mikroroboter

6 Freiheitsgrade in sehr flachem Aufbau



SF-450 PS

Highlights

- Große Stellwege in X und Y bei sehr niedrigem Aufbau
- Last bis 3 kg
- Vakuumversionen bis 10^{-9} hPa auf Anfrage
- Modular aufgebaut, dadurch flexibel anpassbare Stellwege
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt

Anwendungen

SpaceFAB Designs können schnell und unkompliziert an Kundenvorgaben den Bauraum oder die Stellwege betreffend angepasst werden. Das macht die 6-Achsen-Systeme geeignet für nahezu jede Präzisionsanwendung, vom Mini-Positionierer für die UHV-Kammer bis zur Integration in Produktionsprozesse.



SF-3000



SF-6500 PS

SF-3000

SF-6500 PS

SF-450 PS

Abmessungen in mm	600 × 444 × 209	276 × 210 × 57	200 × 170 × 77
Stellweg X, Y, Z in mm	50 × 50 × 12,7	13 × 13 × 10	12 × 12 × 6
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	10	12 × 12 × 12	13 × 13 × 10
Belastbarkeit in kg	3	2	0,4
Wiederholgenauigkeit in μm	±0,5	±0,008	±0,25
Kleinste Schrittweite in μm	0,2	0,005	0,025
Max. Geschwindigkeit in mm/s	30	10	10
Motortyp	2-Phasen-Schrittmotor	NEXACT® Piezoschreit-antrieb	PIShift Piezoträgheits-antrieb

Präzisions-Hexapoden

Für Lasten bis 50 kg



HP-550

Highlights

- Sechs-Achsen-Positioniersysteme mit hervorragender Präzision
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- Umfangreiches Softwarepaket

Anwendungen

Die HP-Hexapodsysteme beinhalten einen leistungsfähigen Delta-Tau-Controller, der häufig für Automatisierungsaufgaben in allen Bereichen eingesetzt wird. Dazu gehört die Positionierung von Antennen in Teleskopen ebenso wie die Anlagensteuerung in der Halbleiterfertigung.



HP-430



HP-300

HP-550

HP-430

HP-300

Abmessungen in mm	Ø 550 × 360	Ø 430 × 250	Ø 300 × 176
Freie Apertur in mm	Ø 130	Ø 90	Ø 60
Stellweg X, Y, Z in mm	100 × 100 × 100	50 × 50 × 30	44 × 44 × 30
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	40 × 40 × 60	20 × 20 × 40	18 × 18 × 25
Belastbarkeit bei horizontaler Montage in kg	50	50	10
Wiederholgenauigkeit in μm	bis ± 3	bis ± 2	bis ± 1
Kleinste Schrittweite in μm	0,5	0,5	0,5
Max. Geschwindigkeit in mm/s	2	1	3

Präzisions-Hexapoden

Für Lasten von 50 kg bis 250 kg



H-850

Highlights

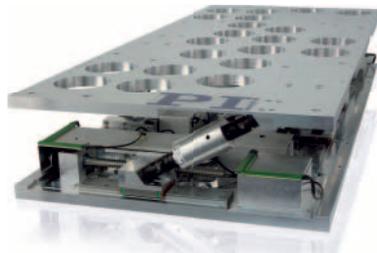
- Sechs-Achsen-Positioniersysteme mit hervorragender Präzision
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- Umfangreiches Softwarepaket
- Optionale SPS/CNC Schnittstelle

Anwendungen

Die Positionierung von Spiegeln in ausgedehnten Teleskopanordnungen ist ein häufiges Anwendungsgebiet von 6-Achsen-Positioniersystemen. Ähnliche Ansprüche an die Präzision stellen Inspektionssysteme z. B. für großformatige LCD-Bildschirme.



M-850KWAH



M-850KPAH

H-850

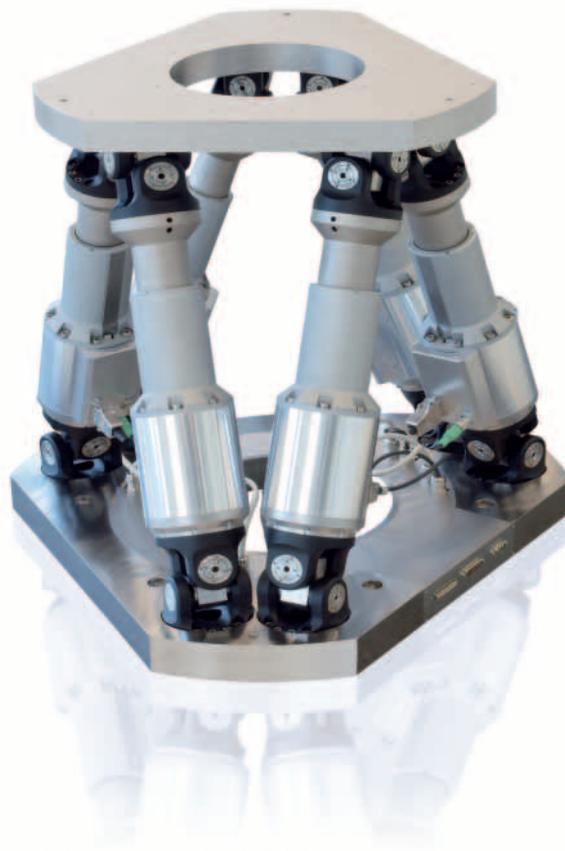
M-850K WAH

M-850K PAH

	Hochpräzise, Vakuumbversionen bis 10 ⁻⁶ hPa verfügbar	Sondermodell zur Positionierung des Sekundärspiegels in ausgedehnten Tele- skopanordnungen	Sondermodell zur Positionierung von Patienten in der Medizintechnik
Abmessungen in mm	Ø 350 × 330	Ø 580 × 360	1200 × 530 × 184
Freie Apertur in mm	Ø 80	Ø 420	–
Stellweg X, Y, Z in mm	100 × 100 × 50	20 × 22 × 32	100 × 100 × 50
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	±15	±3	±5
Belastbarkeit bei horizontaler Montage in kg	50 bis 250 20 bis 50 bei beliebiger Montage	75	200
Wiederholgenauigkeit in μm	±0,2 bis ±1	±5	±100
Kleinste Schrittweite in μm	0,5 bis 1	2	100
Typ. Geschwindigkeit in mm/s	0,3 bis 5	5	16

Präzisions-Hexapoden

Für hohe Lasten ab 1 Tonne



H-845

Highlights

- Sechs-Achsen-Positioniersysteme mit hervorragender Präzision
- System mit leistungsfähigem Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- Umfangreiches Softwarepaket
- Optionale SPS/CNC Schnittstelle

Anwendungen

Astronomie und andere Forschungsgebiete, aber auch industrielle Fertigung und Prüfanlagen setzen Parallelkinematiken ein, um kompakt in 6 Achsen zu positionieren. Die mechanische Ankopplung ist jeweils auf die spezifischen Kundenforderungen abgestimmt.



M-850KHTH



H-850KHLC



M-850KHLH

H-845.
D11

M-850K
HTH

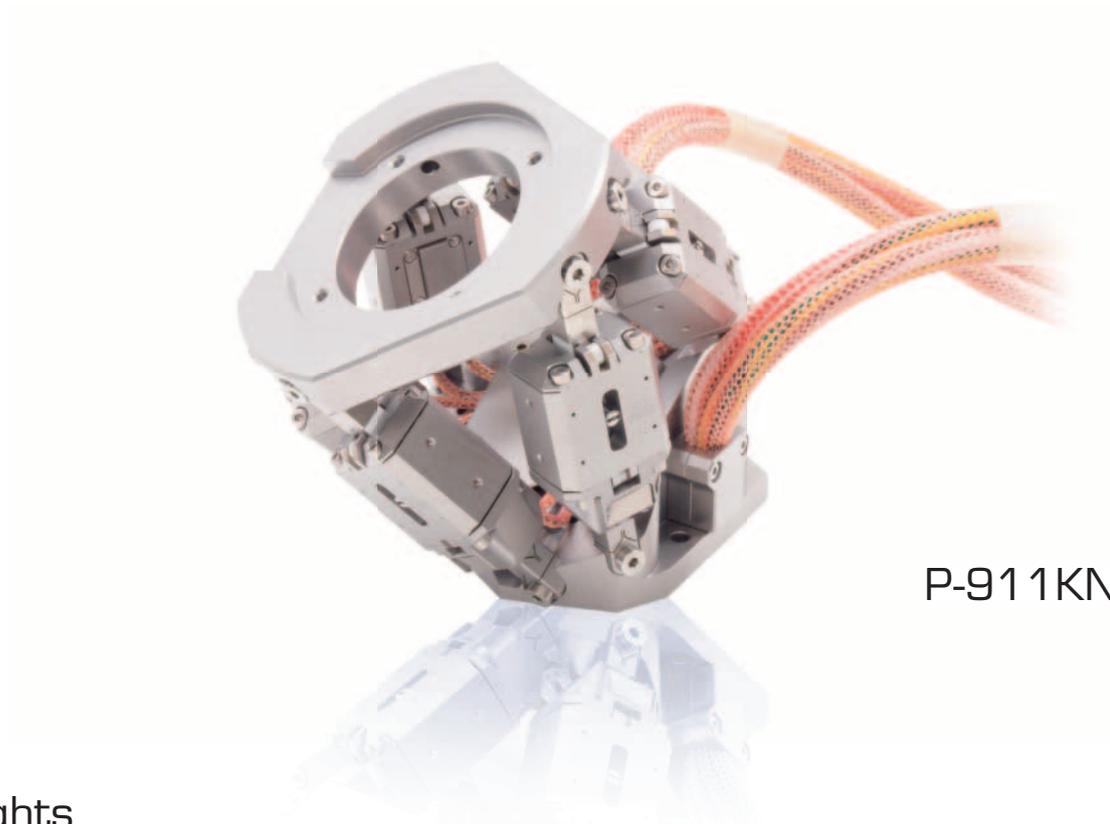
H-850K
HLC

M-850K
HLH

	Belastbar bis 400 kg in beliebiger Orientierung	Sondermodell für 1 Tonne Last	Sondermodell für 1,5 Tonne Last auch in beliebiger Montage- orientierung	Sondermodell für Vakuumumgebung bis 10 ⁻⁶ hPa
Abmessungen in mm	Ø 790 × 660	Ø 900 × 710	Ø 1200 × 600	Ø 1000 × 500
Stellwege X, Y, Z in mm	220 × 220 × 100	400 × 400 × 200	340 × 340 × 220	24 × 24 × 24
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	40 × 40 × 60	40 × 40 × 10	40 × 40 × 60	6 × 6 × 8
Belastbarkeit in kg	1 000	1 000	1 500	1 000
Wiederholgenauigkeit in μm	±2	±1	±1	±2
Kleinste Schrittweite in μm	2	1	1	2
Typ. Geschwindigkeit in mm/s	20	1	0,3	0,1
Motortyp	Bürstenlose DC- Motoren und integrierte Bremsen	Bürstenlose Motoren und integrierte Bremsen	Bürstenlose DC-Motoren mit Getriebe	Bürstenlose DC- Motoren mit Getriebe, integrierte Bremsen

Nanometergenaue Parallelkinematiken

Antrieb durch Piezomotoren



P-911KNMV

Highlights

- Sondermodelle für Anwendungen mit sehr hohen Präzisionsanforderungen
- Nichtmagnetische Antriebe
- System mit leistungsfähigem Digitalcontroller und integrierten Endstufen für die Piezoschreitantriebe

Anwendungen

Gerade in der Halbleiterinspektion sind hochpräzise Mehrachsenpositionierer mit hoher Steifigkeit gefordert. Parallelkinematiken mit PiezoWalk® Piezoschreitantrieben leisten die Nanometer-Genauigkeit, wie sie in der Waferjustage gebraucht wird.



N-515KNPH



N-510

P-911K
NMV

N-515K
NPH

N-510

	Kundenspezifisches Modell. UHV-kompatibel bis 10^{-9} hPa, UV-resistent	Kundenspezifisches Modell mit hervorragender Auflösung	Kraftvolle Hub- und Kipp-Plattform
Abmessungen in mm	Ø 100 × 90	Ø 380 × 140 Apertur Ø 202	Ø 300 × 60 Apertur Ø 250
Stellwege X, Y, Z in mm	1,5	10	Z: 1,3
Stellweg $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ in °	2	6	θ_x, θ_y : 0,6
Belastbarkeit in kg	5	50	20
Rechnerische Auflösung in nm	100	5	5
Motortyp	PiezoWalk® Piezoschreitantrieb	PiezoWalk® Piezoschreitantrieb	PiezoWalk® Piezoschreitantrieb

Controller für Hexapod-Positioniersysteme

6D-Bewegungssteuerung, umfangreiche Funktionen



C-887.11

Highlights

- Leistungsfähiger Controller mit Vektorsteuerung
- Virtueller Pivotpunkt, per Software im Raum frei wählbar
- Datenrecorder
- Makroprogrammierung
- Stand-Alone-Betrieb möglich oder Steuerung mit TCP/IP und RS-232
- Umfangreiche Software
- Im Lieferumfang aller PI Standard-Hexapodsysteme enthalten



C-887.21



Sondermodell für PiezoWalk® Piezoschreittriebe

Digitalcontroller für 6-Achsen-Parallelkinematik

Versionen	<p>C-887.11 19"-Controller, enthält Ansteuerung für zwei weitere Einzelachsen mit Servomotoren, Funktionalität mit zahlreichen Optionen erweiterbar</p> <p>C-887.21 Kompaktes Tischgerät für geringeren Systempreis</p>
Funktionen	<p>Positionseingabe in kartesischen Koordinaten, vektorisierte Bewegungen. Stabiler virtueller Pivotpunkt, frei im Raum definierbar. Echtzeitdatenrecorder zur Aufnahme von Betriebsgrößen wie Motoransteuerung, Geschwindigkeit, Position oder Positionsfehler. Makroprogrammierung. Stand-Alone-Betrieb möglich mit Autostart-Makro oder Anschluss von Tastatur und Monitor. Optional: Steuerung über manuelle Bedieneinheit</p>
Schnittstellen	<p>TCP/IP-Ethernet, u. a. zur Fernsteuerung und Fernwartung. RS-232 für bis zu 25 m Kabellänge. Standard Monitor- und Keyboardanschluss.</p> <p>Optional: Analogeingang. SPS/CNC Schnittstelle. Auf Anfrage: RS-422 für bis zu 1,4 km Kabellänge. GPIB für Messausrüstung</p>
Software	<p>PIMikroMove® Bedienersoftware. Einheitlicher Befehlssatz für alle PI Positioniersysteme (GCS). Dynamische Bibliotheken für Windows und Linux. Vollständiger Satz von LabVIEW-VIs. Graphische-Eingabeoberflächen (GUI), Konfigurationssoftware und graphisch dargestellte Scan-Routinen.</p> <p>Optional: PIVeriMove Software zur Prüfung eines eingeschränkten Bewegungsraums</p>
Sonderausführungen	<p>Für den Einsatz in großen Höhen, z. B. für astronomische Teleskopanwendungen. Auswertungen von Absolutsensoren. Steuerung einer Motorbremse. Auswertung zusätzlicher (redundanter) Positionssensoren für erhöhte Sicherheitsanforderungen, z. B. in der Medizintechnik</p>

Zubehör

für Hexapodsysteme



C-887.MC

**Bedieneinheit für Hexapoden,
USB-Anschluss, 3 m Kabel**

- Manuelle Bedienung
- Freie Definition der Schrittweiten
- Display für Positionswerte



F-206.NCU

**Schnelles 3-Achsen-Piezo-
Nanopositioniersystem**

zur Verwendung in Kombination mit
Hexapodsystemen

- Besteht aus P-611.3SF NanoCube® XYZ-Nanopositioniersystem mit DMS-Sensoren, 100 x 100 x 100 μm^3 , integrierter Faserhalter und E-760.3S0 NanoCube® Piezocontrollerkarte, ISA-Bus



F-206.VVU

**2-Kanal Photometerkarte, sichtbarer
Bereich**

- Optische Eingänge für 480 bis 1040 nm
- Analoge Eingänge 0–10 V

F-206.iiU

2-Kanal Photometerkarte, IR-Bereich

- Optische Eingänge für 850 bis 1680 nm
- Analoge Eingänge 0–10 V



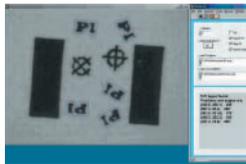
C-887.A20
Hexapod Kabelsatz, 20 m

- Mit 2 Signalverstärkerboxen für differenzielle Datenübertragung



F-206.TMU
Zusätzliche Montageplattform
für H-206 Hexapoden

- Für schnellen Austausch unterschiedlicher Aufbauten
- Magnetisch gekoppelt



F-311.LV
PIMotion&Vision LabVIEW Treibersatz
für intelligente Automatisierungsprozesse

- Mehrkanal-Bildverarbeitung für 3D-Untersuchungen oder verschiedene Auflösungen
- Bietet Funktionen wie Autofokus, Kantenausrichtung, Abstandsmessungen bis hin zu komplexen 6D-Justageroutinen



F-603
Faser-, Objektiv- und
Waveguide-Halter
für H-206 und P-611 NanoCube®

- Schnellverschlüsse für einfachen Aufbau
- Präzisionsbearbeitet aus hochfestem Aluminium/Messing

Technologie parallelkinematischer Präzisionspositionierer

Hexapoden und SpaceFAB bieten 6 Bewegungsachsen

Seite 181

Kompaktes Positioniersystem – Vorteile gegenüber seriellem Aufbau – Komponenten – Arbeitsraum

Hexapoden in der Automatisierung

Seite 184

Bahnsteuerung auf Basis von G-Code – Benutzerdefinierte Koordinatensysteme – Automatisierungsschnittstellen

Motion Control Software von PI

Seite 186

Universeller Befehlssatz – Hostsoftware PIMikroMove® für schnelle Inbetriebnahme – Schnelle Einbindung in Sprachen und Software von Drittanbietern

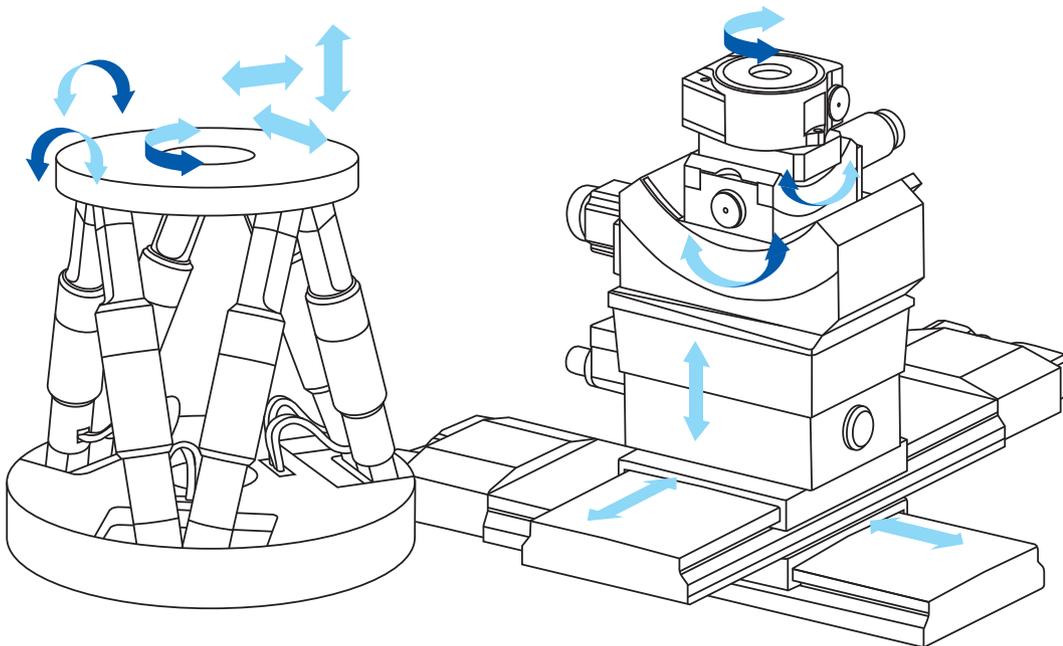
Hexapodspezifische Software

Seite 189

Bewegungsraum ermitteln – Zulässige Last prüfen – PIVeriMove: Kollisionen vermeiden bei eingeschränktem Arbeitsraum – Emulation des Hexapodsystems als virtuelle Maschine – HexaApp: Mit dem iPhone, iPad oder iPod Hexapoden steuern

Parallelkinematische Präzisionspositionierer

Hexapoden und SpaceFAB bieten 6 Bewegungsachsen



Kompaktes Positioniersystem mit 6 Freiheitsgraden

Ein Hexapod ist ein System für die Bewegung und Positionierung, Justierung und Verschiebung von Lasten in sechs Achsen im Raum, drei linearen und drei rotatorischen.

Hexapoden sind parallelkinematisch aufgebaut, d. h. die sechs Antriebe wirken gemeinsam auf eine einzige bewegte Plattform. Die Länge der Einzelantriebe ist veränderlich, was eine Bewegung in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden ermöglicht. Das besondere Hexapoddesign optimiert die Gesamtsteifigkeit und erlaubt eine große zentrale Apertur.

Präzise Positionierung auch hoher Lasten

Hexapoden können je nach Ausführung Lasten von einigen kg bis zu einigen Hundert kg, oder sogar mehreren Tonnen in beliebiger Raumorientierung, also unabhängig von der Montageausrichtung, mit hoher Präzision positionieren.

Vorteile gegenüber serielllem Aufbau

Hexapoden erreichen einen deutlich kompakteren Aufbau als seriell gestapelte Mehrachsensysteme. Da nur eine einzige Plattform bewegt wird, die in den meisten Fällen mit großer Apertur ausgestattet ist, ist die bewegte Masse wesentlich geringer. Daraus resultieren ein wesentlich schnelleres Ansprechen und damit eine verbesserte Dynamik. Außerdem müssen keine Kabel bewegt werden, und damit entstehen keine zusätzlichen Kräfte und Momente, die die Genauigkeit vermindern.

Bei aufeinander gestapelten Systemen müssen die unteren Antriebe nicht nur die Masse der Nutzlast, sondern auch die Masse der nachfolgenden Antriebe bewegen. Dadurch reduzieren sich die dynamischen Eigenschaften und die Gesamtsystemsteifigkeit. Zudem summieren sich die Führungsfehler der Einzelachsen zu einer geringeren Genauigkeit und Wiederholbarkeit.



Kardanische Gelenke des Hexapodmodells H-840



Kugelgelenke

Abgestimmte Komponenten für hohe Präzision

Grundlage ist ein möglichst spielfreier Aufbau und eine entsprechend sorgfältige Auswahl und Abstimmung der Komponenten. Dazu gehört zunächst die richtige Materialauswahl, wenn z. B. mit thermischen Einflüssen am Einsatzort zu rechnen ist. Der Motor, ggf. mit Getriebe, eine integrierte Führung, die Spindel-Mutter-Einheit, ebenso wie die Gelenke für den geforderten Lastbereich bis hin zur hochauflösenden Positionserfassung im Einzelbein bestimmen die erreichbare Präzision.

Motoren, Antriebe und Getriebeeinheit

PI Hexapoden basieren auf elektromechanischen Antrieben und sind damit viel genauer als die hydraulischen Hexapoden, die von Flug- oder Fahr simulatoren bekannt sind. Präzisionsspindelantriebe oder Piezolinearmotoren kommen zum Einsatz. Die meisten Systeme sind selbsthemmend. Direkt getriebene Hexapoden bieten höhere Geschwindigkeiten, für den industriellen Einsatz sind insbesondere bürstenlose Motoren (BLDC) geeignet.

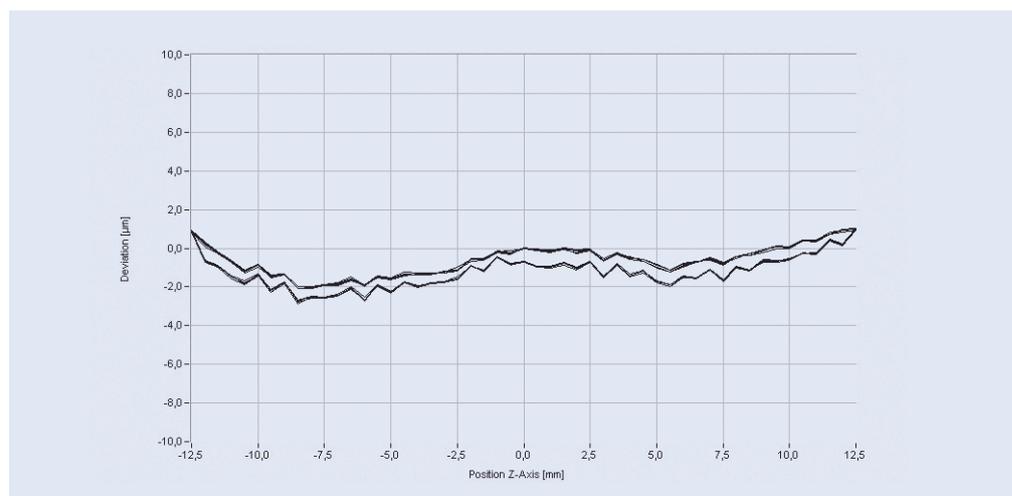
Die Anwendung bestimmt die Antriebstechnologien: So sind Hexapoden mit piezoelektrischen PiezoWalk® Schreitantrieben für Ultra-hochvakuum-Anwendungen geeignet und können auch in sehr starken Magnetfeldern betrieben werden.

Gelenke

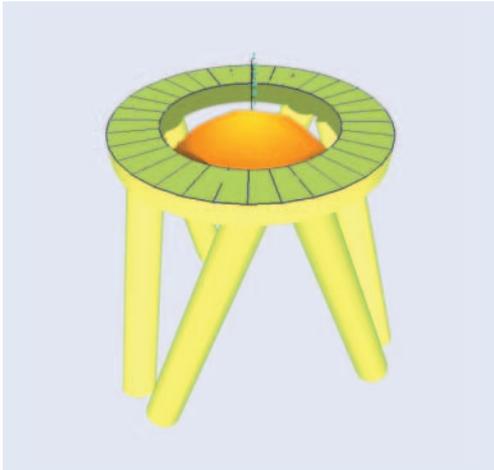
Hexapoden für die Präzisionspositionierung werden häufig mit kardanischen Gelenken ausgestattet, bei denen zwei Gelenkachsen orthogonal angeordnet sind. Damit wird die optimale Kombination aus zwei Freiheitsgraden und Steifigkeit des Aufbaus erreicht.

Kugelgelenke bieten mehrere Freiheitsgrade in einer mechanisch oft einfacheren Konstruktion. Sie können jedoch die Gesamtsteifigkeit und damit die Präzision bei auftretenden Momenten reduzieren. Eine kompensierende Vorspannung ist nur möglich, wenn die Antriebe entsprechend hohe Kräfte aufbringen, wie z. B. die NEXLINE® Piezomotorantriebe.

Für besonders hohe Präzision und geringe lineare Auslenkungen und Winkel können Festkörpergelenke eingesetzt werden, die reibungsfrei, spielfrei und ohne Einsatz von Schmiermitteln arbeiten.



Die Positioniergenauigkeit eines Präzisionshexapoden H-824 über den vollen Stellweg von 25 mm in Z-Richtung liegt bei wenigen Mikrometern, die Wiederholgenauigkeit deutlich unter $\pm 0,1 \mu\text{m}$

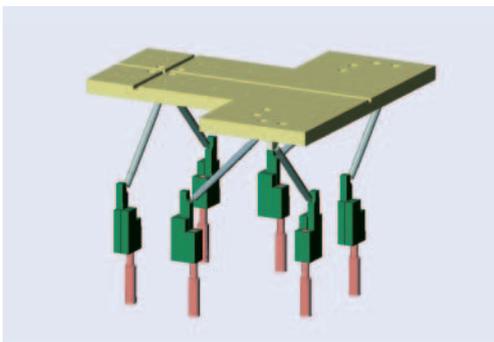


Der Arbeits- bzw Bewegungsraum

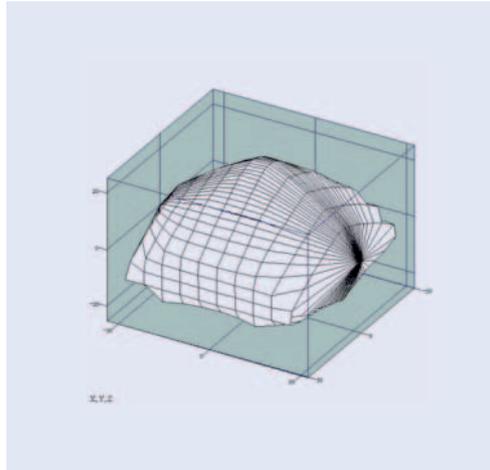
Der Hexapod kann mit seiner Plattform im Rahmen des Aktorhubs und der Gelenkwinkel beliebige Kombinationen aus Verkippungen und Drehungen um einen frei wählbaren Drehpunkt und Linearbewegungen ausführen. Die Verkabelung verursacht weder Reibung noch eine Einschränkung des Bewegungsraums, wie es bei seriellem Aufbau mit Verkabelung jeder Einzelachse häufig der Fall ist.

Design mit konstanter Beinlänge

Alternativ zum Aufbau mit veränderlichen Beinlängen kann das Design auch vorsehen, die Beinlänge konstant zu halten und stattdessen die Ankopplpunkte oder Gelenke zu verschieben. Vorteile bietet dieses Design vor allem, wenn die Antriebseinheit getrennt von der Plattform z. B. außerhalb von Reinräumen oder Vakuumkammern angebracht werden soll.



Design mit konstanter Beinlänge. Die Antriebseinheit verschiebt die Gelenkposition und bewegt so die eigentlich passive Plattform



Die Gesamtheit aller Kombinationen von Translationen und Rotationen, die der Hexapod von der aktuellen Position aus anfahren kann, wird als Arbeitsraum bezeichnet; man bezieht sich bei der Angabe auf den Ursprung des verwendeten Koordinatensystems. Der Arbeitsraum kann durch externe Faktoren wie Hindernisse oder die Abmessungen und Position der Last eingeschränkt werden

Spezielle Ansteuerung

Die einzelnen Antriebe eines Hexapoden zeigen nicht notwendigerweise in Richtung der Bewegungsachsen, weshalb eine schnelle Steuerung, die auch die Koordinatentransformation übernimmt, für den Betrieb benötigt wird.

PI setzt leistungsfähige Digitalcontroller ein und bietet kundenfreundliche Software zur einfachen Kommandierung. Die Positionen werden in kartesischen Koordinaten vorgegeben, alle Transformationen auf die Einzelantriebe finden im Controller statt.

Eine wesentliche Eigenschaft ist der frei definierbare Dreh- oder Pivotpunkt. Damit kann die Bewegung der Hexapodplattform gezielt auf die jeweilige Applikation abgestimmt und in den Gesamtprozess integriert werden.



Bei dieser 3-Bein-Konstruktion werden zusätzliche Freiheitsgrade dadurch erzeugt, dass ein passives Bein in zwei oder mehr Achsen bewegt werden kann. Beispiel: Im SpaceFAB treibt je eine XY-Anordnung von Linearverstellern die Einzelbeine an

Hexapoden in der Automatisierung

Ansteuerung und Schnittstellen für einfache Integration

Präzise Bahnsteuerung auf Basis von G-Code

Der Hexapodcontroller kann auch die Bahnsteuerung auf Basis von G-Code nach DIN 66025/ISO 6983 vornehmen. G-Code ist dazu als Kommandosprache direkt auf dem Controller implementiert.

Damit ist das Fahren auch von komplexen Trajektorien mit definierter Bahngeschwindigkeit und Beschleunigung möglich. So kann beispielsweise der Hexapod ein Werkstück oder Werkzeug während der Bearbeitung mit großer Präzision ruckbegrenzt verfahren, ohne dass die Mechanik ins Schwingen kommt.

Benutzerdefinierte Koordinatensysteme

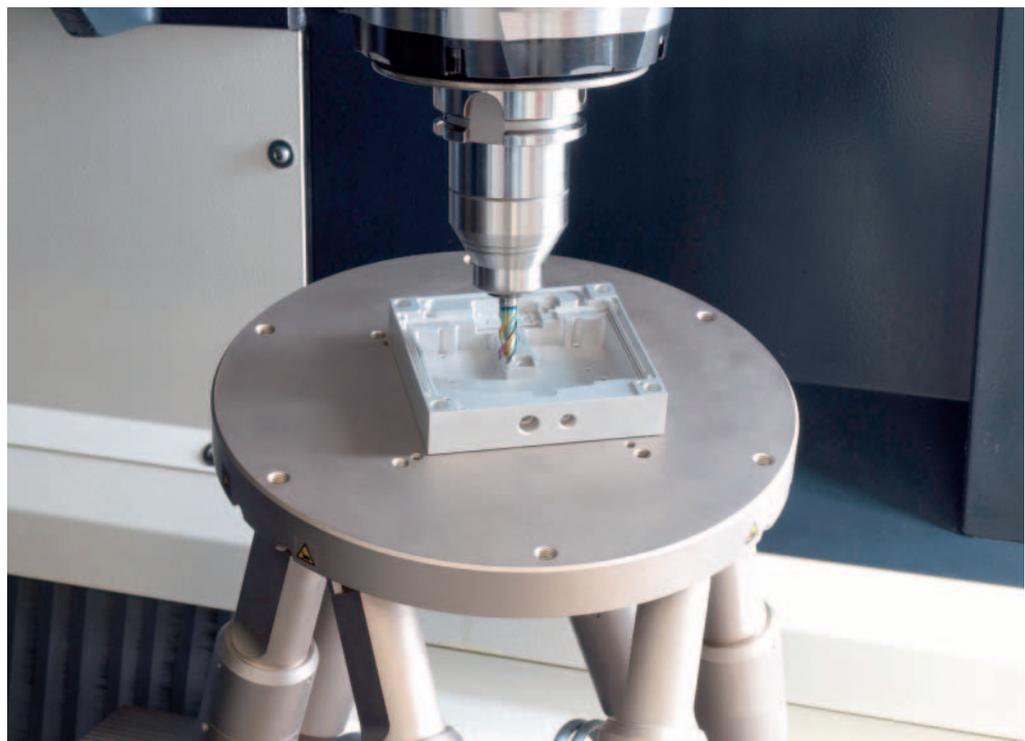
Um eine perfekte Anpassung der Trajektorie an die Applikationserfordernisse zu gewährleisten, ist es möglich mit Hilfe des Controllers verschiedene Koordinatensysteme zu definieren, beispielsweise Work- und Toolkoordinatensysteme, die sich auf die Lage des Werkstücks oder des Werkzeugs beziehen. Das ist vorteilhaft in der industriellen Automatisierung, aber auch für Fiber-Alignment-Aufgaben.



Die Soll-Positionen des Hexapods können in beliebigen Koordinatensystemen kommandiert werden

Standardisierte Automatisierungsschnittstellen

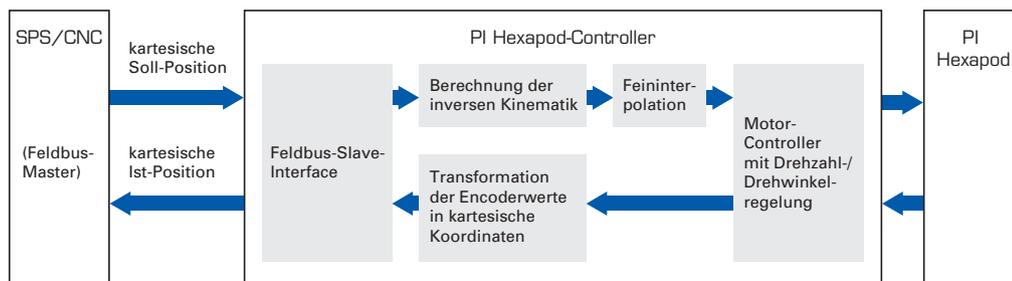
Über standardisierte Feldbusschnittstellen ist die Anbindung an übergeordnete SPS oder CNC-Steuerungen möglich. Dadurch können die Hexapoden mit anderen Automatisierungskomponenten takt synchron im Verbund arbeiten.



Standardisierte Feldbusschnittstellen vereinfachen die Integration: Hexapoden in der Automatisierungstechnik

Die SPS gibt als Master die kartesische Soll-Position bzw. Bahnen im Raum vor und bekommt die Ist-Positionen ebenfalls über die Feldbusschnittstelle zurückgemeldet. Alle anderen Berechnungen, die notwendig sind, um die Fahrbefehle für das parallelkinematische Sechssachssystem umzusetzen, übernimmt der Hexapodcontroller, also die Transformation der kartesischen Soll-Positionen in die Ansteuerung der Einzelantriebe. Der Controller verhält sich in diesem Fall wie ein intelligenter Antrieb.

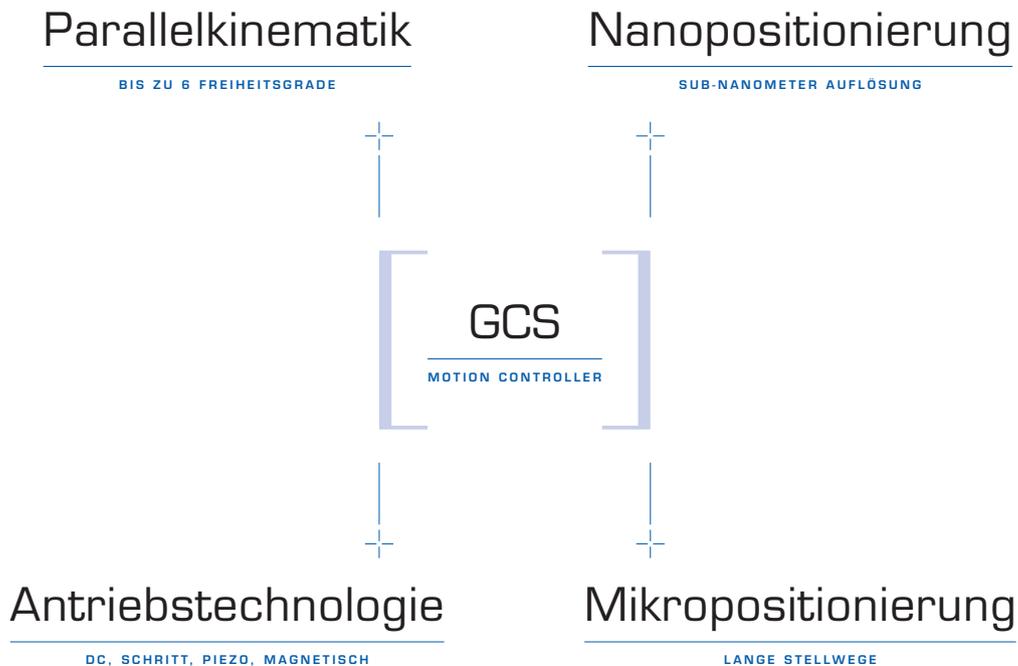
Die Zykluszeiten für die Vorgabe neuer Positionen, Signalauswertung und Synchronisation liegen zwischen 1 und 3 ms. Feldbusschnittstellen gibt es aktuell für Profibus, EtherCAT, Profinet CANopen und SERCOS.



Blockschaltbild: Der Hexapod-Controller verhält sich wie ein intelligenter Antrieb. Durch die Austauschbarkeit des Feldbus-Interfaces ist die Kommunikation mit einer Vielzahl von SPS bzw. CNC-Steuerungen möglich

Motion Control Software

Effektive und komfortable Lösungen



Unterstützte Betriebssysteme

- Windows XP (SP3)
- Windows VISTA
- Windows 7 32/64 Bit
- Linux 32/64 Bit
- Windows 8 32/64 Bit

Alle Digitalcontroller von PI werden mit einem umfangreichen Softwarepaket ausgeliefert. PI unterstützt Softwareanwender durch umfangreiche Onlinehilfen und Handbücher, die sowohl die schnelle Inbetriebnahme ermöglichen als auch Detailfragen für den fortgeschrittenen Anwender erläutern. Aktualisierte Versionen der Software sind für PI Kunden jederzeit kostenlos über das Internet verfügbar.

Die PI Software deckt alle Anwendungsaspekte ab, angefangen bei der einfach durchführbaren Inbetriebnahme über die komfortable Ansteuerung der Systeme über grafische Oberflächen bis zur schnellen und übersichtlichen Einbindung in externe Programme.

Universeller Befehlssatz vereinfacht Inbetriebnahme und Programmierung

PI hat den PI General Command Set (GCS) entwickelt, über den alle Nano- und Mikropositioniersysteme, unabhängig von den verwendeten Antrieben und Motion Controllern, angesteuert werden. Die durchgängig einheitliche Kommandostruktur erfordert lediglich eine einmalige Einarbeitungszeit und vermindert die Fehlerwahrscheinlichkeit in der Programmierung. Das spart Zeit bei der Erstellung von eigenen Applikationsprogrammen.

PIMikroMove® Software sorgt für schnelle Inbetriebnahme

PIMikroMove® steuert alle Positioniersysteme von PI übersichtlich und komfortabel an, egal ob mit piezoelektrischen, magnetischen oder klassischen Elektromotorantrieben, unabhängig von der Zahl und Konfiguration der Achsen.

Alle angeschlossenen Controller und Achsen werden in einer einheitlichen grafischen Umgebung angezeigt. Dabei können für eine mehrachsige Anwendung verschiedene Controller verwendet und dennoch über PIMikroMove® im selben Fenster kommandiert werden. Zwei oder mehrere unabhängige Achsen können im Position Pad mit der Maus oder einem Joystick bewegt werden, auch vektoriell; Hexapoden werden grafisch dargestellt.

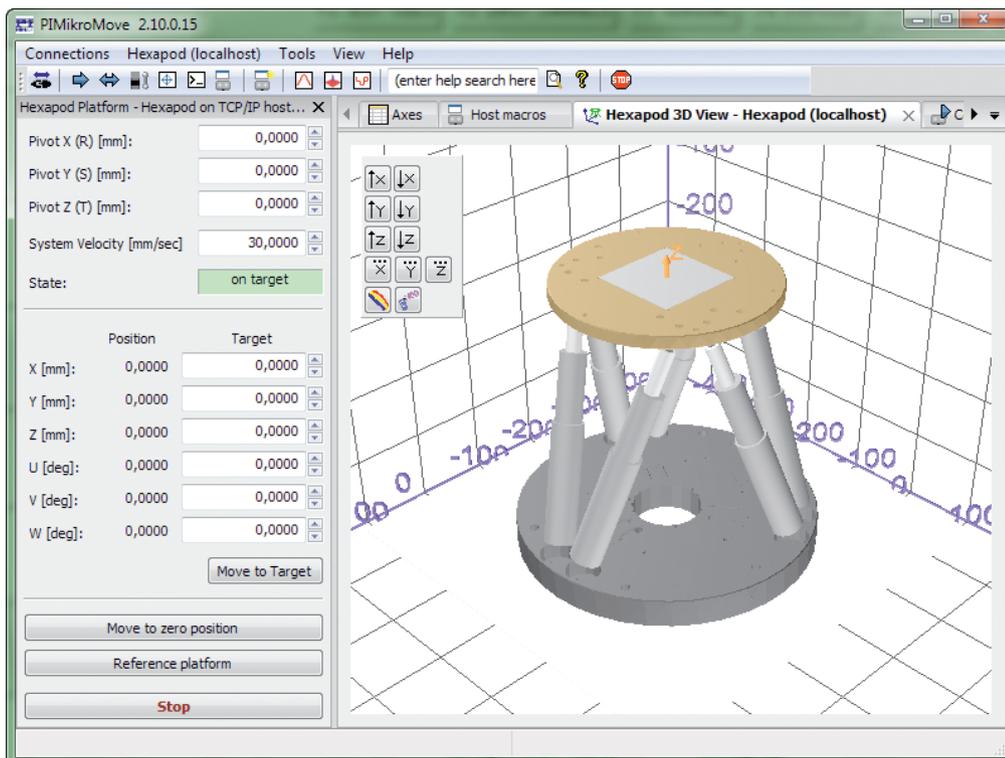
Makros erleichtern wiederkehrende Aufgaben, wie sie bei automatisierten Vorgängen anfallen. Die Makros werden als GCS-Befehlsfolgen erstellt, die abhängig vom verwendeten System z. B. in Form von Startup-Makros direkt auf dem Controller ausgeführt werden können oder vom Host-PC abgearbeitet werden.

Scanalgorithmen können analoge Werte in Abhängigkeit von der Position aufzeichnen und darstellen oder das globale Maximum eines analogen Wertes vollautomatisch finden.

Abhängig vom Controller unterstützt PIMikroMove® unterschiedliche Funktionalitäten. Ein Datenrecorder kann z. B. Bewegungs- und Systemparameter aufzeichnen.

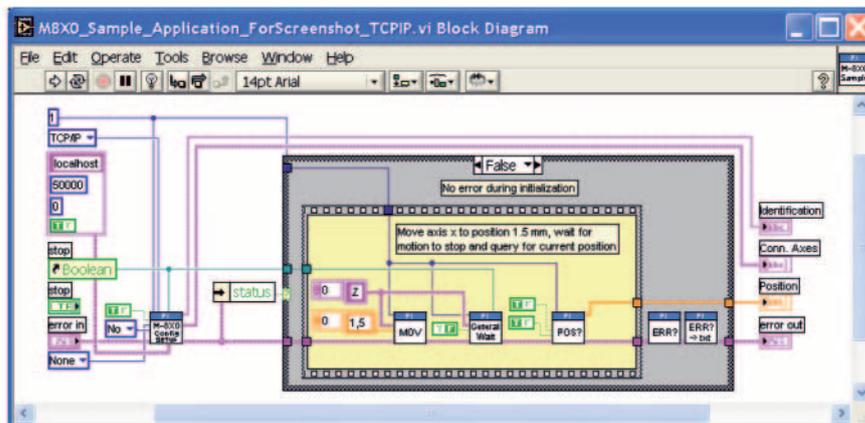
Optimales Systemverhalten

Wenn die mechanischen Eigenschaften eines Systems z. B. durch eine andere Last verändert werden, ist oft eine Parameteranpassung notwendig. PI Software bietet Tools, um das Ansprechverhalten und die Systemstabilität zu optimieren und verschiedene Sätze von Parametern zu speichern, die dann für selbstprogrammierte Applikationen bereit stehen.

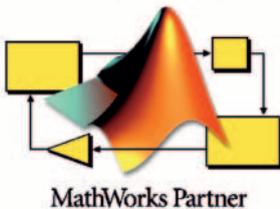


Motion Control Software

Schnelle Einbindung der PI Controller in Programmiersprachen und Softwareumgebungen von Drittanbietern



**MATLAB
Enabled**



Viele Applikationen werden heute in LabVIEW erstellt, z. B. in der Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik. PI stellt vollständige LabVIEW-Treiber zur Verfügung. Ein controller-spezifisches Configuration_Setup VI wird am Anfang der LabVIEW-Applikation eingebunden und beinhaltet alle zur Inbetriebnahme benötigten Systeminformationen und Initialisierungsschritte. Die Applikation selbst wird mit controllerunabhängigen VIs umgesetzt.

Bei Controllerupgrades oder -wechseln muss in der Regel nur das Configuration_Setup VI ausgetauscht werden, der applikationsspezifische Code bleibt aufgrund des einheitlichen Befehlssatzes GCS identisch.

Der Treibersatz beinhaltet viele spezielle Beispielprogramme, z. B. umfangreiche Scan- und Alignapplikationen, die als Template für eigene Programme genutzt werden können. Zudem ermöglicht der offene Quellcode vieler VIs die schnelle Anpassung an die Anwenderbedürfnisse.

Flexible Einbindung in textorientierte Programmiersprachen

Die Einbindung von PI Positioniersystemen in textbasierte Programmiersprachen unter Microsoft Windows oder Linux wird durch Programmbibliotheken und Beispielcodes erleichtert.

Diese Bibliotheken unterstützen alle gängigen Programmiersprachen und alle Positioniersysteme von PI. Die Funktionalität des PI GCS-Befehlssatzes kann dadurch nahtlos in externe Programme eingebunden werden.

Softwarepakete von Drittanbietern

Treiber für die PI GCS-Kommandos sind inzwischen in den bekanntesten Drittanbieter-Softwarepaketen integriert. So ist die Ansteuerung von PI Systemen z. B. über MetaMorph, µManager, MATLAB und ScanImage möglich. Außerdem sind EPICS- und TANGO-Treiber für die Integration in Experimente in Großforschungsanlagen verfügbar. Die Treiber für µManager, MATLAB sowie ein großer Teil der EPICSTreiber werden von PI selbst entwickelt und gepflegt.

Unterstützte Sprachen und Softwareumgebungen

- C, C++, Python, Visual C++, Visual Basic, Delphi
- LabVIEW, MATLAB, µManager, EPICS, TANGO, MetaMorph
- sowie alle Programmierumgebungen, die das Laden von DLLs unterstützen

Hexapodspezifische Software

Hexapoden erfordern aufgrund ihres parallelkinematischen Aufbaus eine besonders komplexe Ansteuerung. So werden z. B. die Positionskordinaten in virtuellen kartesischen Achsen angegeben, die der Controller in eine Bewegung der einzelnen Aktorkanäle umrechnet. PI bietet spezielle Software, die die 6-Achsen-Positionierer in der Anwendung komfortabler bedienen und einfacher einbinden lassen.

Bewegungs- bzw. Arbeitsraum ermitteln

Die Grenzen des Arbeitsraums variieren in Abhängigkeit von der aktuellen Position des Hexapods (Translations- und Rotationskoordinaten) und den aktuellen Pivotpunktkoordinaten. Im Lieferumfang der PI Hexapodsoftware enthalten ist ein Programm, mit dem diese Grenzen berechnet und grafisch dargestellt werden können.

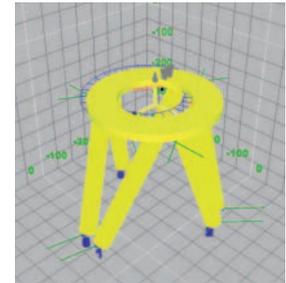
Zulässige Last prüfen

Der Grenzwert für die Belastung des Hexapods variiert in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren: Dem Startzustand des Hexapodsystems, der Einbaulage des Hexapods, der Last und der Position ihres Massenschwerpunkts, der Position (Translations- und Rotationskoordinaten) der bewegten Hexapodplattform sowie den Kräften und Momenten, die an der bewegten Plattform des Hexapods angreifen.

Das Hexapodsoftwarepaket enthält bereits eine PI Simulationssoftware, die im konkreten Lastfall auftretende Kräfte und Momente berechnet und sie individuell gegen die zulässigen Werte für die betreffende Hexapodmechanik prüft.

PIVeriMove: Kollisionen vermeiden bei eingeschränktem Arbeitsraum

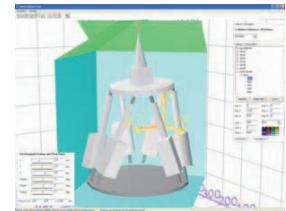
Eine zusätzlich verfügbare Simulationssoftware von PI ermöglicht offline die grafische Konfiguration und Simulation des Hexapods in der Anwendungsumgebung. Durch einfache Formen wie Zylinder und Quader können Objekte definiert oder anhand von CAD-Daten eingelesen werden. PIVeriMove prüft dann daraus resultierende Einschränkungen im Arbeitsraum. Implementiert in die Controllerfirmware oder in die Applikationssoftware wird so verhindert, dass Positionen angefahren werden, in denen der Hexapod oder die montierte Last mit der Umgebung kollidieren würden.



Die Simulationssoftware stellt die Position und den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum des Hexapodmodells grafisch dar

Emulation: Das Hexapodsystem als virtuelle Maschine

Oft besteht der Wunsch nach einer frühzeitigen Implementation der Kundensoftware oder der Prüfung des benötigten Arbeitsraumes für die anstehende Aufgabe, ohne dass das System bereits vor Ort zur Verfügung steht. PI stellt eine geeignete Software zur Verfügung, mit der ein vollständiges Hexapodsystem (Hexapodmechanik und Controller, ggf. auch mit Peripherie) als virtuelle Maschine auf dem Host-PC realisiert werden kann. So können schon vor Erhalt des Systems Anwendungsprogramme entwickelt und vorgetestet werden, Lastfälle simuliert und der Bewegungsraum ermittelt werden. Bei der Lieferung ist dann alles schon fertig!

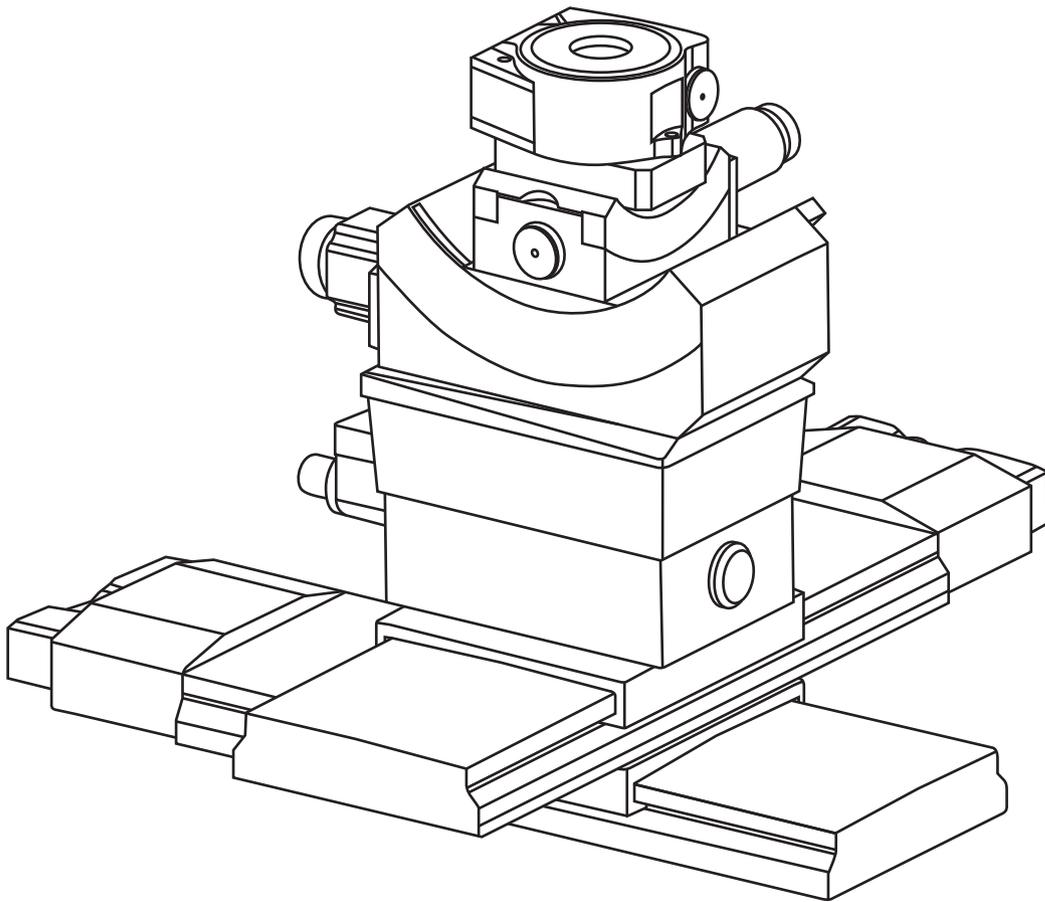


PITouch: Mit dem iPhone, iPad oder iPod PI Hexapoden steuern

Das Hexapodsystem kann auch drahtlos von mobilen Apple-Endgeräten aus gesteuert werden. Eine entsprechende App ermöglicht die Kommandierung über Touchscreen, Bewegungssensoren oder – gewohnt präzise – über ein Kommandoeingabefenster.



Motorisierte Positioniersysteme



Produkte

Seite 192–251

Grundlagen motorisierter Positioniersysteme

Seite 252–265

Präzisionslinearversteller



System mit hochpräzisen PI miCos Linear- und Rotationsachsen für die Positionierung von Wafern in der Chipherstellung



Linearversteller mit Piezomotoren

Seite 194



Kleine Präzisions-Linearversteller

Seite 198



Linearversteller für Stellwege bis 1 m

Seite 202



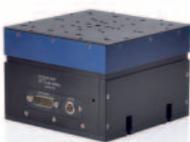
Nanometer-Präzision über lange Stellwege
Schnelle Scans mit konstanter Geschwindigkeit

Seite 208



Hochgeschwindigkeitstische mit hervorragender Präzision
Elektromagnetischer Linearmotor kombiniert mit hochauflösendem Encoder

Seite 210

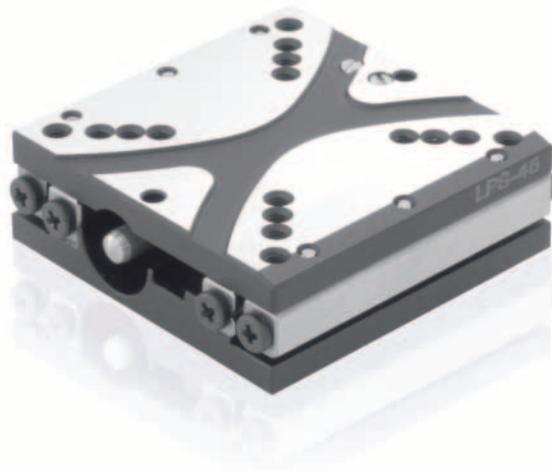


Präzisions-Hubtische

Seite 212

Miniaturtische mit Piezomotoren und direkter Positionsmessung

Piezomotoren ersetzen Elektromotor-Spindel-Antriebe in Kleinstverstellern



LPS-45

Highlights

- Linearencoder mit Auflösung bis wenige Nanometer
- Sehr kompakte XY-Kombinationen
- Vakuumversionen bis 10^{-9} hPa verfügbar
- Nichtmagnetische Ausführungen auf Anfrage

Anwendungen

Piezoelektrische Linearmotoren ermöglichen Versteller mit kleinsten Abmessungen. Der Direktantrieb vermeidet mechanische Komponenten wie Getriebe und Spindeln und ist daher zuverlässig und hochauflösend bis auf einzelne Nanometer. Piezomotoren sind prinzipiell vakuumkompatibel und erzeugen keine magnetischen Störungen. Dadurch eröffnen sie Anwendungsbereiche, in denen Elektromotoren nicht eingesetzt werden können. In Kombination mit einem direkt messenden optischen Encoder ermöglichen z. B. die Tische mit PIShift Trägheitsantrieben eine sehr präzise und wiederholbare Positionierung. Je nach Antriebsprinzip werden hohe Geschwindigkeit, hohe Kräfte und/oder hohe Auflösung erreicht.



LPS-23



LPS-24



M-663

LPS-23

LPS-24

M-663

LPS-45

	Kleinstes geregeltes Positioniersystem	Bestes Kraft-Bauraum-Verhältnis	Schneller Linearmotor mit bis zu 250 mm/s	Hohe Führungsgenauigkeit
Stellweg in mm	13, 26	15	19	13, 26
Abmessungen in mm	23 bis 35 × 23 × 10	33 bis 60 × 24 × 20	35 × 35 × 15	48 bis 63 × 45 × 15
Rechnerische Auflösung in µm	0,001	0,002	0,1; 0,6	0,001
Kleinste Schrittweite in µm	0,01	Sensorabhängig 0,3 bis 0,04	Sensorabhängig 0,3 bis 3	0,006
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,02	Sensorabhängig 0,3 bis <0,01	Sensorabhängig 0,3 bis 0,2	0,018
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in µrad	±80 bis ±110	±100	±300	±50, ±80
Geschwindigkeit in mm/s	10	10	250	10
Belastbarkeit in N	2	10	5	10
Druck- / Zugkraft in N	2	5	2	8
Haltekraft in N	2	7	2	8
Motortyp	PIShift Piezoträgheitsantrieb	NEXACT® Piezoschreitantrieb	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PIShift Piezoträgheitsantrieb
Betriebsspannung Spitze-Spitze in V	48	55	120	48
Empfohlener Controller	E-871 einachsrig	E-861 einachsrig	C-867 ein- oder zweiachsrig	E-871 einachsrig

Linearversteller mit Piezomotoren und direkter Positionsmessung

Piezodirektantrieb ermöglicht sehr niedrige Bauhöhe



LPS-65

Highlights

- Direkte Positionsmessung mit hochauflösendem optischem Encoder
- Selbsthemmend im Ruhezustand, keine Wärmeentwicklung
- Sehr kompakte XY-Kombinationen
- Vakuumversionen verfügbar

Anwendungen

Testausrüstungen für industrielle Fertigung oder Qualitätssicherung profitieren vom geringen Platzbedarf der Piezomotoren. Der große Dynamikbereich von PILine® Ultraschallantrieben macht sie für Life Science-Anwendungen oder Forschungseinrichtungen in der Biotechnologie interessant, wo ein schnelles Umschalten vom Scanbetrieb zu präziser Positionierung nötig ist.



M-664



M-683



M-664K

LPS-65

M-664

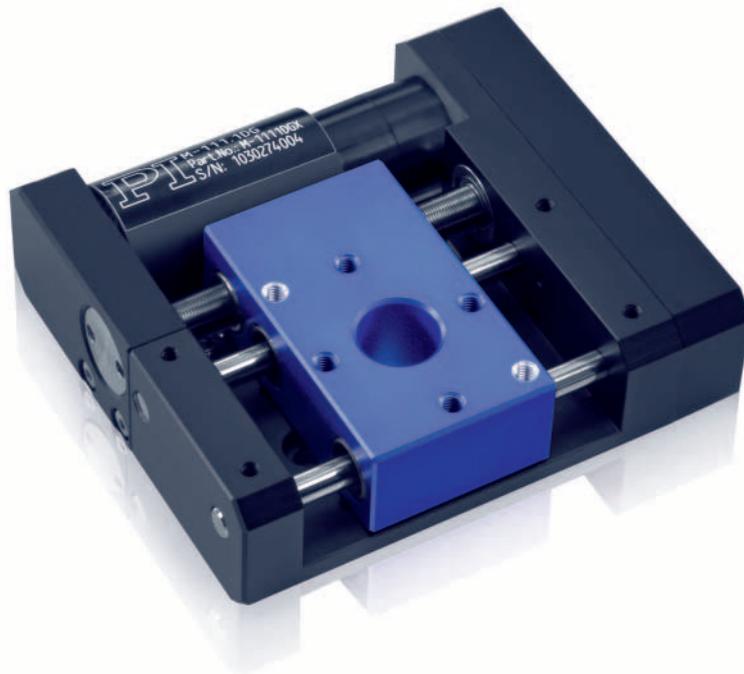
M-683

M-664K CEP

	LPS-65	M-664	M-683	M-664K CEP
				Sondermodell
Stellweg in mm	13, 26, 52	25	50	50
Abmessungen in mm	80 bis 160 × 65 × 20	90 × 50 × 16	130 × 95 × 21	120 × 40 × 9
Rechnerische Auflösung in μm	0,0005	0,1	0,02	0,5
Kleinste Schrittweite in μm	0,001	0,6	0,1	3
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,001	0,2	0,1	1
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 40 bis ± 60	$\pm 75 / \pm 50$	$\pm 150 / \pm 50$	± 150
Geschwindigkeit in mm/s	10	400	350	100
Belastbarkeit in N	20	25	50	–
Druck- / Zugkraft in N	10	2,5	6	2
Haltekraft in N	10	2,5	6	2
Motortyp	NEXACT® Piezoschreitantrieb	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PILine® Ultraschall-Piezomotor
Betriebsspannung Spitze-Spitze in V	55	200	200	200
Empfohlener Controller	E-861 einachsig	C-867 ein- oder zweiachsig	C-867 ein- oder zweiachsig	C-867 OEM-Version, vernetzbar

Kleine Präzisions-Mikrostelltische mit Elektromotoren

Stellwege bis 52 mm (2"), Lasten bis 50 N



M-110

Highlights

- Für Lasten bis zu 5 kg
- Sehr kompakte XY- und XYZ-Kombinationen
- Stellwege bis 52 mm (2")

Anwendungen

Kompakte Antriebslösungen sind für automatisierte Abläufe in vielen Bereichen von der Mikrobearbeitung im Präzisionsmaschinenbau bis hin zur Photonikfertigung unerlässlich. Sowohl für Testsysteme als auch zum Einsatz im Produktionsprozess sind diese Kleinverstellerserien hervorragend geeignet. Unterschiedliche Motorisierungen, Positioniergenauigkeit und Stellwege bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten.



LS-40



M-122

LS-40

M-110 M-111 M-112

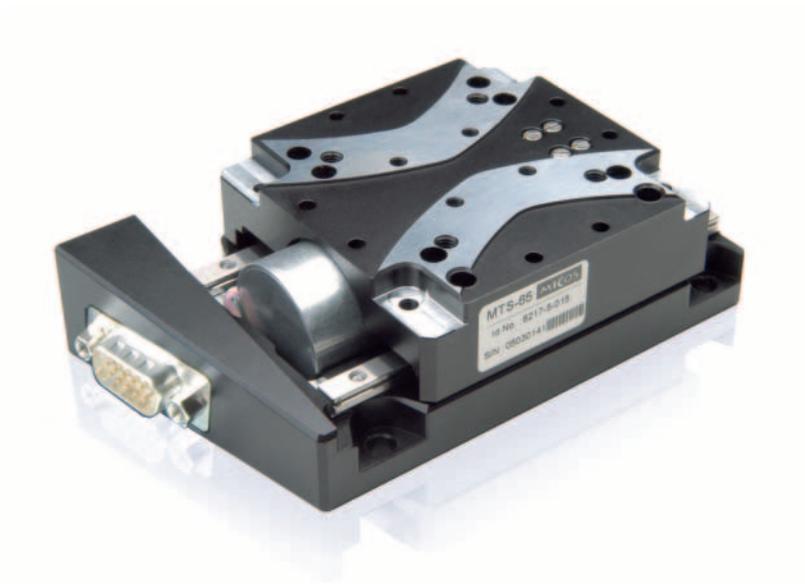
M-122

Stellweg in mm	13, 26, 52	5 bis 25	25
Abmessungen in mm	62,5 bis 101,5 × 40 × 20 plus Motor 77 × 40 × 26	60 bis 80 × 62 × 20,5	86 × 60 × 20,5
Rechnerische Auflösung in μm	bis 0,01	bis 0,007	0,1
Kleinste Schrittweite in μm	0,1	0,05 bis 0,2	0,2
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,1	0,1 bis 0,5	0,15
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 150 bis ± 190	± 50 bis ± 150	± 150
Geschwindigkeit in mm/s	5	1 bis 2	20
Antriebsspindelsteigung in mm	0,5; 1	0,4; 0,5	0,5
Belastbarkeit in N	30	20 bis 30	50
Druck- / Zugkraft in N	20	10	20
Motortyp	DC-Getriebemotor / 2-Phasen-Schrittmotor mit und ohne Getriebe	DC-Getriebemotor / 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor
Empfohlener Controller	SMC Controller	C-863 einachsige C-663 einachsige	C-863 einachsige

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Kompakte Präzisions-Linearversteller mit Elektromotoren

Stellwege bis 100 mm, Lasten bis 300 N



MTS-65

Highlights

- Große Auswahl an Modellen mit unterschiedlichen Antriebsspindeln
- Kompakte XY-Kombinationen
- Zahlreiche Motorvarianten

Anwendungen

Diese kompakten Linearversteller bieten Stellwege bis 100 mm (4") und sind in weiten Bereichen einsetzbar. Typischerweise werden sie für Inspektionssysteme mit geringem Platzangebot benötigt. Zu den Aufgaben gehören die Mikromanipulation z. B. von optischen Komponenten, bis hin zur hochpräzisen Positionierung von Lasten bis zu 30 kg in Test- und Prüfeinrichtungen.



M-126



LS-65



M-605

MTS-65

M-126

LS-65

M-605

Stellweg in mm	13 bis 52	20 bis 25	26 bis 102	25, 50
Abmessungen in mm	38,5 bis 62 x 65 x 31	101,5 x 83 x 26 plus Motor 115 x 40 x 34	93 bis 171 x 65 x 30 plus Motor 90 x 40 x 40	194 x 113 x 33,5
Rechnerische Auflösung in μm	bis 0,05	bis 0,0035	bis 0,5	0,1
Kleinste Schrittweite in μm	bis 0,05	0,1 bis 1	0,2 bis 0,5	0,3
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,1	0,1 bis 0,2	0,3 bis 0,5	0,1
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 40 bis ± 80	± 50	± 70 bis ± 130	± 30
Geschwindigkeit in mm/s	8	0,7 bis 50	13 bis 20	50
Antriebsspindelsteigung in mm	1	0,5 bis 1	1	1
Belastbarkeit in N	10	200	60	300
Druck- / Zugkraft in N	3	40/40 bis 50/50	25	20
Motortyp	2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern
Empfohlener Controller	SMC Controller	C-863 einachsige C-663 einachsige	SMC Controller	C-863 einachsige

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Linearversteller für Stellwege bis 600 mm und Lasten bis 200 N

Viele Varianten der Motorisierung



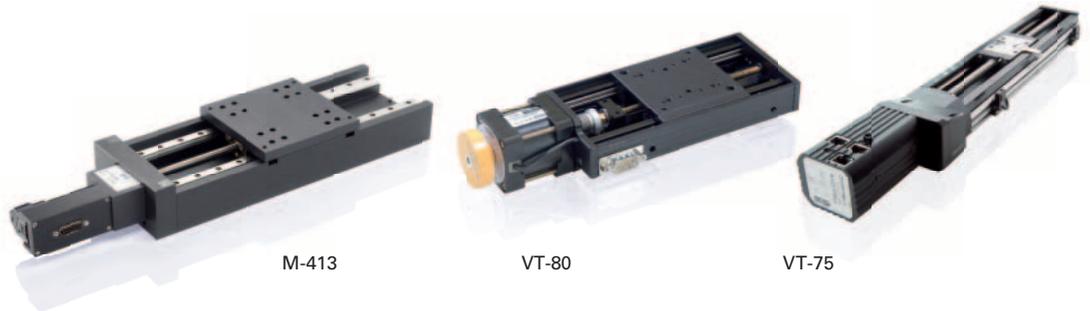
M-404

Highlights

- Vorgespannte Präzisionsgewindespindeln oder Kugelumlaufspindeln für hohe Geschwindigkeit und Zyklenzahlen
- Variable Stellwege von 25 bis 600 mm
- XY- und XYZ-Kombinationen
- Für günstige Systemlösungen
- Vakuumversionen verfügbar

Anwendungen

Die Anwendungen sind breit gefächert und reichen von der Prozessautomatisierung über industrielle Testsysteme bis zu Aufgaben der Qualitätssicherung. Diese Verstellerserien positionieren zuverlässig Lasten im mittleren Bereich von 50 bis zu 200 N. Die vielen Varianten können ideal für die jeweilige Situation ausgewählt werden.



M-403
M-404

M-413
M-414

VT-80

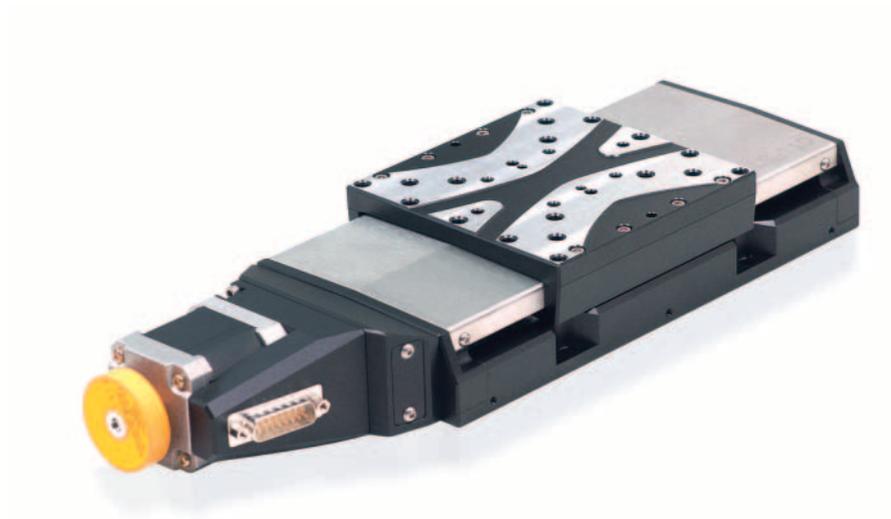
VT-75

Stellweg in mm	25 bis 200	100 bis 300	25 bis 300	50 bis 600
Abmessungen in mm	141 bis 316 x 80 x 40,5	255 bis 455 x 120 x 57	100 bis 375 x 80 x 25 plus Motor 70 x 40 x 40	181 bis 781 x 75 x 30 plus Motor 110 x 43 x 70
Rechnerische Auflösung in μm	bis 0,012	bis 0,018	bis 0,5	bis 2
Kleinste Schrittweite in μm	0,1 bis 0,25	0,1 bis 0,5	0,2 bis 0,5	0,4 bis 2
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,5 bis 1	0,5 bis 1	0,4 bis 0,8	0,4 bis 2
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 75 bis ± 200 pro 100 mm	± 100 bis ± 300 pro 100 mm	± 100 bis ± 210	± 40 bis ± 110
Max. Geschwindigkeit in mm/s	50	100	20	150
Antriebsspindelsteigung in mm	1, 2	1, 2	1	4
Belastbarkeit in N	200	500	50	50
Druck- / Zugkraft in N	50, 100	50, 200	30	18 bis 88
Motortyp	DC-Getriebemotor, DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor
Empfohlener Controller	C-863 einachsig C-663 einachsig	C-863 einachsig C-663 einachsig	SMC Controller	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Linearversteller für Stellwege bis 500 mm

Präzisions-Mikrostelltische für Lasten bis 1000 N



LS-110

Highlights

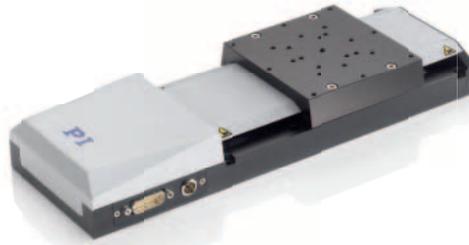
- Abdeckung der Mechanik zum Schutz vor Staub und Schmutz
- Kombinationen unterschiedlicher Motorisierungen und variable Stellwege
- Hohe Steifigkeit und mechanische Stabilität

Anwendungen

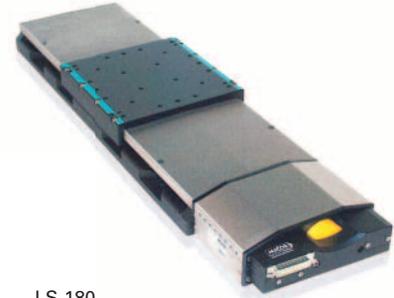
Industrielle Anwendungen im Produktionsprozess wie z. B. die Laserbearbeitung profitieren von der präzisen Positionierung dieser Versteller. Die variablen Verstellerserien mit geringer Bauhöhe machen sie universell einsetzbar, von Testeinrichtungen bis hin zu Fertigungsstrecken in der Präzisionsautomatisierung.



M-410



M-505



LS-180

M-405
M-410
M-415

M-505

LS-110

LS-180

Abmessungen in mm	207 bis 307 × 106,5 × 40 plus Motor 125 × 60 × 36	245 bis 370 × 108 × 43	225 bis 480 × 110 × 45	470 bis 920 × 180 × 55
Stellweg in mm	50 bis 150	25 bis 150	26 bis 305	155 bis 508
Rechnerische Auflösung in µm	bis 0,0035	bis 0,017	bis 0,05 mit Linearencoder	bis 0,05 mit Linearencoder
Kleinste Schrittweite in µm	0,1 bis 0,25	0,05 bis 0,25	0,05 bis 1	0,05 bis 0,5
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,2	0,1 bis 0,25	0,05 bis 1	0,05 bis 0,5
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in µrad	±25 bis ±75	±25	±30 bis ±100	±40 bis ±100
Geschwindigkeit in mm/s	0,7 bis 15	3 bis 50	45 bis 90	75 bis 200
Antriebsspindelsteigung in mm	0,5	1	2	5
Belastbarkeit in N	200	1000	100	1000
Druck- / Zugkraft in N	40 bis 50	50	80	200
Motortyp	DC-Getriebemotor, DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, DC-Motor mit integrierten ActiveDrive Verstärkern, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor
Empfohlener Controller	C-863 einachsig C-663 einachsig	C-863 einachsig C-663 einachsig	SMC Controller	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Linearversteller für Stellwege bis 1 m

Hochpräzisionspositionierung mit Schrittweiten bis einige 10 nm



M-511

Highlights

- Positionierung der Referenzklasse
- Hervorragende Langzeitstabilität durch hochsteife Grundprofile
- Hochpräzise Komponenten wie Kreuzrollenführungen und spielfreie Kugelumlaufspindeln
- XY-Kombinationen; passende Hubtische verfügbar
- Optional direkte Positionsmessung mit Linearencoder

Anwendungen

Die Anwendungsbereiche dieser Verstellerserien gehören zu den anspruchsvollsten in der Präzisionspositionierung. Dazu zählen die Inspektion von Wafern in der Halbleiterindustrie, Justage und Integration in Testvorrichtungen in der Photonikfertigung, oder auch Mess- und Inspektionsaufgaben in der Qualitätssicherung.



PLS-85



HPS-170



LS-270

PLS-85

HPS-170

M-511 M-521 M-531

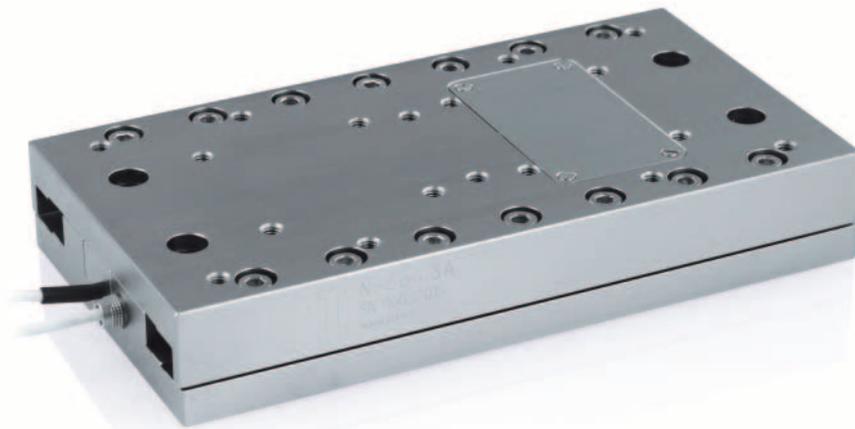
LS-270

Stellweg in mm	26 bis 155	52 bis 305	102 bis 306	155 bis 1016
Abmessungen in mm	119,5 bis 257,5 × 85 × 35 plus Motor 100 × 43 × 70	261 bis 556 × 170 × 50 plus Motor 100 × 75 × 50	400 bis 600 × 140 × 55	550 bis 1400 × 270 × 100
Rechnerische Auflösung in µm	0,05	bis 0,05	bis 0,02	bis 0,05
Kleinste Schrittweite in µm	0,05 bis 1	0,05 bis 0,2	0,1 bis 0,5	0,05 bis 0,5
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,05 bis 1	0,05 bis 0,2	±0,1 bis ±0,5	0,05 bis 0,5
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in µrad	±60 bis ±150	±20 bis ±40	±25 bis ±50	±20 bis ±120
Geschwindigkeit in mm/s	20 bis 90	35 bis 90	6 bis 125	50 bis 150
Antriebsspindelsteigung in mm	1, 2	2	2	5
Belastbarkeit in N	100	350	1 000	1 500
Druck- / Zugkraft in N	50	bis 150	80/80	bis 260
Motortyp	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	Bürstenloser DC-Motor (BLDC), DC-Getriebemotor, DC-Active-Drive, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsiger C-663 einachsiger	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Nanometer-Präzision über lange Stellwege

Schnelle Scans mit konstanter Geschwindigkeit



N-664

Highlights

- Nanometer-Schrittweiten
- Direkte Positionsmessung
- Einregeln in wenigen Millisekunden

Anwendungen

Bei der Oberflächeninspektion z. B. mit Weißlichtinterferometrieverfahren kommt es auf gleichmäßigen Vorschub mit konstanter Geschwindigkeit und nanometergenaues Positionieren an. Auch schnelle Scans profitieren davon.



M-511.HD



M-714



UPM-160

M-511.HD

M-714

N-664

UPM-160

Stellweg in mm	100	7	30	55 bis 205
Abmessungen in mm	400 × 140 × 51,5	140 × 120 × 55	120 × 65 × 20	210 bis 360 × 160 × 55 plus Motor 120 × 60 × 55
Rechnerische Auflösung in nm	2	2	0,5	bis 0,001
Kleinste Schrittweite in µm	0,004	0,004	0,002	0,035 bis 0,05
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,01	0,01	0,0005	0,035 bis 0,05
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in µrad	±25	±10	±20	±15 bis ±30
Geschwindigkeit in mm/s	50	0,2	10	18 bis 100
Antriebsspindelsteigung in mm	2	1	ohne Spindel	2,5; 5
Belastbarkeit in N	200	–	20	350
Druck- / Zugkraft in N	80/80	100/100	10	100
Motortyp	Hybrid: DC-Motor mit Piezodirektantrieb	Hybrid: DC-Getriebemotor mit Piezodirektantrieb	NEXACT® Linearantrieb	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor
Empfohlener Controller	C-702 zweiachsig	C-702 zweiachsig	E-861 einachsig	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Hochgeschwindigkeitstische mit hervorragender Präzision

Elektromagnetischer Linearmotor kombiniert mit hochauflösendem Encoder



UPS-150

Highlights

- Direktantrieb ohne zusätzliche mechanische Komponenten, also weniger Verschleißteile
- Hohe Geschwindigkeiten von mehreren 100 mm/s
- Präzision nur von Encoder und Führungen abhängig
- Kombinierbar mit hochdynamischen direkt getriebenen Rotationstischen
- Endschalter zum Schutz der Mechanik

Anwendungen

Insbesondere industrielle Anwendungen nutzen die Zuverlässigkeit und hervorragende Präzision dieser Tische mit Direktantrieb. Ihre hohe Dynamik sorgt für hohe Durchsatzraten bei automatisierten Aufgaben im Bereich von Testsystemen z. B. in der Halbleiterindustrie. Sie steigern auch die Effizienz z. B. in Elektronikfertigungslinien oder der Laserbearbeitung.



LMS-60



LMS-180



V-106

LMS-60

UPS-150

LMS-180

V-106

	15 nm-Linearencoder integriert	1 nm- oder 15 nm-Linearencoder integriert	15 nm-Linearencoder integriert	VoiceCoil-Antrieb für schnelles Scannen und Positionieren
Stellweg in mm	25, 65	52 bis 305	155 bis 508	6, 20
Abmessungen in mm	145 bis 185 × 60 × 14	198 bis 454 × 150 × 55	470 bis 820 × 180 × 55	120 × 120 × 44
Rechnerische Auflösung in μm	0,015	0,001 bis 0,015	0,015	0,1
Kleinste Schrittweite in μm	0,1	0,015 bis 0,02	0,04	0,2
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,1	0,015 bis 0,025	0,05	0,2
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 80 bis ± 100	± 15 bis ± 40	± 40 bis ± 80	± 25
Geschwindigkeit in mm/s	500	600	500	270
Belastbarkeit in N	30	150	450	36, 81
Druck- / Zugkraft in N	7 (typ.), 31 (max.)	22 (typ.), 88 (max.)	50 (typ.), 170 (max.)	5, 3,3
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsrig

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Präzisions-Hubtische

Hohe Lasten mit hervorragender Genauigkeit positionieren



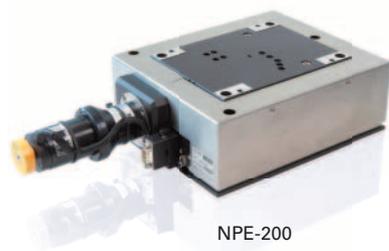
UPL-120

Highlights

- Für hohe Lasten
- Stellwege bis 13 mm
- Mit integrierten Endschaltern

Anwendungen

Lithografieverfahren, Waferinspektion oder die Photonik stellen höchste Anforderungen an die Präzision der Positioniersysteme. Diese Z-Versteller sind speziell für Lasten bis 300 N ausgelegt, so dass sie wenn nötig auch noch weitere Verstellachsen tragen können.



NPE-200



M-451

UPL-120

NPE-200

M-451

		Hervorragende Ablaufgenauigkeit	Kompatibel mit Piezopositioniertischen
Abmessungen in mm	170 x 110 x 55	238 x 200 x 85	154 x 150 x 95 plus Motor 110 x 60 x 40
Stellweg in mm	13	13	12,5
Rechnerische Auflösung in μm	bis 0,013	0,001	bis 0,0028
Kleinste Schrittweite in μm	0,1 bis 0,5	0,005	0,2
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,05 bis 0,5	0,04	0,3
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 100	± 20	± 75
Geschwindigkeit in mm/s	6	0,2	0,8 bis 3
Antriebsspindelsteigung in mm	0,268	2	0,5
Belastbarkeit in N	bis 200	300	120
Motortyp	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor	DC-Getriebemotor, DC-ActiveDrive, 2-Phasen-Schrittmotor
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsig C-663 einachsig

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Präzisions-Hubtische

Kombinieren mit Linear- und Rotationsverstellern



M-501

Highlights

- Verschiedene Lastklassen
- Stellwege bis 25 mm
- Mit integrierten Endschaltern

Anwendungen

Für Bewegungen in Z stehen spezielle Hubtische zur Verfügung, die möglichst kompakt mit Lineartischen oder Rotationstischen kombiniert werden können. Alternativ zu Hubtischen können Linearversteller über Adapterwinkel für Z-Bewegungen genutzt werden, womit auch längere Stellwege realisiert werden können.



ES-82



ES-100

ES-82

ES-100

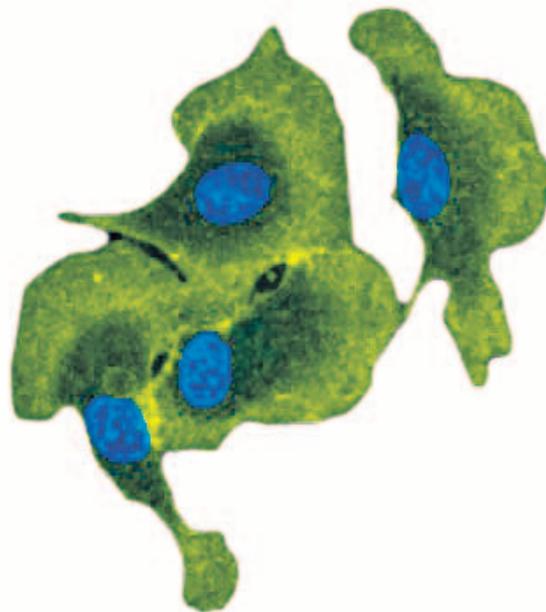
M-501

	Zur Kombination mit PLS-85, LS-65 und MTS-65	Zur Kombination mit LS-110 und PRS-110	Zur direkten Montage auf M-511, M-521, M-531
Abmessungen in mm	92 x 82 x 45	140 x 100 x 90 bis 105	130 x 130 x 95
Stellweg in mm	13	13 und 26	12,5
Rechnerische Auflösung in μm	bis 0,05	bis 0,05	bis 0,005
Kleinste Schrittweite in μm	0,1 bis 0,3	0,05 bis 0,5	<0,1
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,1 bis 0,3	0,05 bis 0,5	0,1
Übersprechen rotatorisch (Neigen / Gieren) in μrad	± 75	± 100 bis ± 150	± 15
Geschwindigkeit in mm/s	0,08 bis 0,1	15 bis 20	1 bis 3
Antriebsspindelsteigung in mm	7	1	1
Belastbarkeit in N	20	bis 55	50, 100
Motortyp	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, DC-Active-Drive
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsrig

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Präzisionskreuztische

Für Mikroskopie und Inspektionsaufgaben

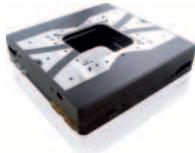


Endothelzellen unter dem Mikroskop (Quelle: Lemke Group, EMBL Heidelberg)



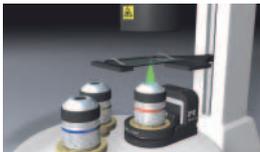
Mikroskopietische
Kreuztische mit Apertur

Seite 218



Präzisionskreuztische
Scanner für Inspektions- und Mikroskopieaufgaben

Seite 220



Z-Piezoscanner und Objektivfokussierer
Objektiv und Probe schnell und präzise positionieren

Seite 44

Mikroskopietische

Kreuztische mit Apertur



M-687

Highlights

- Passend auf gängige Mikroskope bekannter Hersteller wie Nikon, Zeiss, Leica und Olympus
- Stabile Positionierung
- Niedrige Bauhöhe für einfache Integration
- Kompakte und flache Bauform erlaubt freien Zugang zur Probe
- Hohe Geschwindigkeitskonstanz auch bei Geschwindigkeiten um 10 $\mu\text{m/s}$
- Passende Piezo-Scantische für XYZ- und Z-Probenpositionierung verfügbar

Anwendungen

Für Superresolution-Mikroskopie, Tiling, automatisierte Scanning-Mikroskopie



M-545



M-686

M-545

M-686

M-687

	M-545	M-686	M-687
	Manueller Antrieb mit Mikrometerschrauben, optionale Motorisierung	Dynamisch durch Direktantrieb mit Ultraschall-Piezomotor	Dynamisch durch Direktantrieb mit Ultraschall-Piezomotor
Passende Piezo-Scantische	P-545 PInano®	P-563 PIMars, P-541	P-736 PInano®
Freie Apertur in mm	140 × 100 für Objektträger und Petrischalen	78 × 78	160 × 100 für Multititerplatten
Abmessungen in mm	230 × 240 × 30	170 × 170 × 32	400 × 297 × 48 (für Nikon Eclipse Ti) 400 × 237 × 36 (für Olympus IX2)
Stellweg in mm	25 × 25	25 × 25	135 × 85 (für Nikon Eclipse Ti) 100 × 75 (für Olympus IX2)
Rechnerische Auflösung in µm	0,046 (motorisiert)	0,1	0,1
Kleinste Schrittweite in µm	1 (motorisiert)	0,3	0,3
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	2	0,3	0,3
Max. Geschwindigkeit in mm/s	1,5	100	120
Belastbarkeit in N	50	50	50
Empfohlener Controller	Motorisiertes System inkl. Controller und Joystick	C-867 PLine® Motion Controller zweiachsig	System inkl. Controller und Joystick

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Präzisionskreuztische

Scanner für Inspektions- und Mikroskopieaufgaben



MCS

Highlights

- Stabile Plattformen mit Elektromotoren
- Mit Apertur für Durchlicht- und Auflicht-Mikroskopie geeignet
- Optional mit Linearencoder
- Minimale Ebenheitsabweichung

Anwendungen

Die Führungs- und Positioniergenauigkeit dieser Mikroskopie-Kreuztische wird vor allem in der industriellen Messtechnik benötigt. Anwendungsgebiete sind industrielle Oberflächenmesstechniken wie Topologiemessungen an Werkstücken und Optiken oder Strukturmessungen an Halbleiterwafern. Die hohen Traglasten ermöglichen die Montage weiterer Achsen, z. B. von Drehverstellern, Hubmodulen und Kippverstellern auf der Plattform.



CS-430



M-880

MCS

CS-430

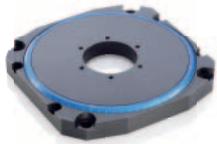
M-880

Abmessungen in mm	380 × 380 × 80	430 × 430 × 100	600 × 600 × 105
Freie Apertur in mm	150 × 150	–	Ø 160
Stellweg in mm	102 × 102 205 × 205 / 305 × 305 auf Anfrage	350 × 300	20 × 20 rotatorisch in θ_z : 8°
Rechnerische Auflösung in μm	0,005 bis 0,2	bis 0,05	–
Kleinste Schrittweite in μm	bis 0,005	0,1 bis 0,5	–
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,2	0,1 bis 0,5	0,5
Übersprechen in μrad	± 40 / ± 20	± 80	–
Max. Geschwindigkeit in mm/s	35 bis 300	100	20
Belastbarkeit in N	200	300	1500 (Haltekraft)
Druck- / Zugkraft in N	80 bis 200	110	200
Motortyp	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor, Linearmotor	2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor ActiveDrive
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	Systemcontroller

Präzisionsrotationstische



Zwei Drehtische sind über einen Winkel verbunden und realisieren ein 2-Kreis Goniometer: ein kardanisches Gelenk mit gemeinsamem Drehpunkt



Kleine Rotationstische mit Piezomotoren
Dynamischer Direktantrieb

Seite 224



Kleine Rotationstische mit Elektromotoren
Für kompakte gestapelte Mehrachs-Positioniersysteme

Seite 226



Präzisionsrotationstische

Seite 228



Ultrapräzise Rotationstische
Drehtische der Referenzklasse für höchste Ansprüche

Seite 230

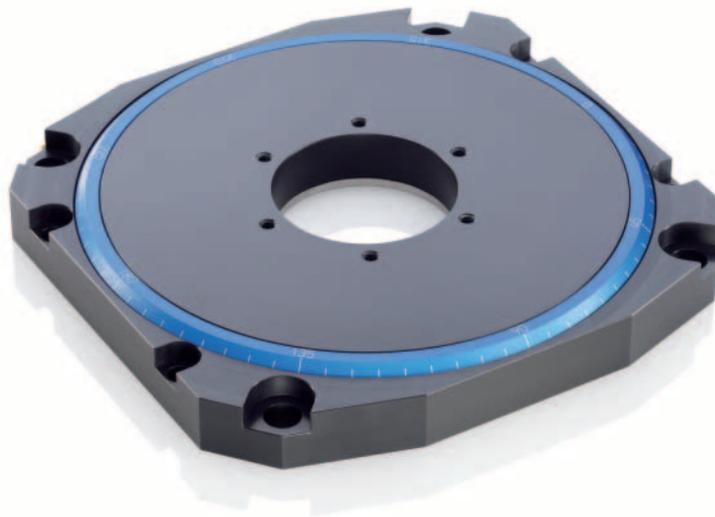


Goniometer und Kipptische
1- oder 2-Achsenbewegung

Seite 232

Kleine Rotationstische mit Piezomotoren

Dynamischer Direktantrieb



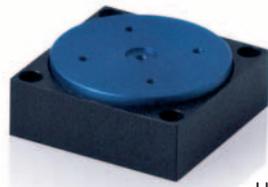
M-660

Highlights

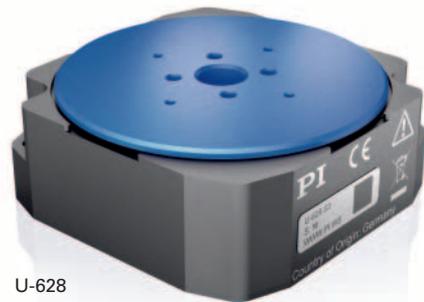
- Dynamisches Start-/Stopverhalten
- Kompakte Kombinationen mit Lineartischen möglich
- Direktmetrologie: Integrierte optische Encoder für direkte Positionsmessung
- Selbsthemmend im Ruhezustand, keine Wärmeentwicklung, kein Servozittern
- Hohe Führungsgenauigkeit
- Vakuumversionen verfügbar

Anwendungen

Diese Miniaturtische sind flexibel einsetzbar, z. B. in der Materialprüfung oder zur Instrumentierung von Strahlexperimenten an Beschleunigerringen. Ihr Piezoantrieb ist prinzipiell vakuumtauglich und unmagnetisch, die Tische selbst sind sehr kompakt.



U-624



U-628

M-660

U-624

U-628

		vorläufige Daten	vorläufige Daten
Abmessungen in mm	116 x 116 x 14	30 x 30 x 12	50 x 50 x 16
Rotationsbereich in °	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Rechnerische Auflösung in μrad (°)	4 / 34 (0,0002 / 0,002)	10 (0,0006)	3 (0,0002)
Kleinste Schrittweite in μrad (°)	12 / 34 (0,0007 / 0,002)	70 (0,004)	10 (0,0006)
Max. Geschwindigkeit in %/s	720	> 360	> 720
Belastbarkeit (Axialkraft) in N	20	2	20
Drehmoment in Nm	0,3	0,02	0,05
Antrieb	Ultraschall-Piezomotor	Ultraschall-Piezomotor	Ultraschall-Piezomotor
Empfohlener Controller	C-867 PLine® Motion Controller	C-867 PLine® Motion Controller	C-867 PLine® Motion Controller

Kleine Rotationstische mit Elektromotoren

Für kompakte gestapelte Mehrachs-Positioniersysteme



RS-40

Highlights

- Unbegrenzter Rotationsbereich mit kontaktlosem Referenzschalter
- Präzisionstische für minimiertes Umkehrspiel

Anwendungen

Viele Anwendungen in der Mikroskopie erfordern einen freien Durchgang für Licht. Diese kompakten Rotationstische können auch in Optikanwendungen eingesetzt werden, wo sie z. B. Filter zuverlässig und mit hervorragender Wiederholgenauigkeit positionieren.



DT-34



M-116



DT-65 N

DT-34

M-116

RS-40

DT-65 N

	DT-34	M-116	RS-40	DT-65 N
Antriebsdetaill	Vorgespannter Riemenantrieb	Spielfrei vorgespannter Schneckenantrieb	Spielfrei vorgespannter Schneckenantrieb	Spielfrei vorgespannter Schneckenantrieb, vorgespannte zweireihige Kugelführung für minimale Verkippung
Freie Apertur Ø in mm	10	19	20	25
Abmessungen in mm	34 x 58 x 18,5	66 x 70 x 23,5	56 x 64 x 20	70 x 92,5 x 25
Rechnerische Auflösung in µrad (°)	bis 0,7 (0,00004)	2,5 (0,00015)	bis 0,5 (0,00003)	bis 17 (0,001)
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µrad (°)	700 (0,04)	10 bis 12 (0,0006 bis 0,0007)	90 (0,005)	35 (0,002)
Max. Geschwindigkeit in °/s	675	20	7	60
Belastbarkeit in N	15	15	20	30
Drehmoment in Nm	bis 0,9	bis 1,5	0,2	0,8
Motortyp	2-Phasen-Getriebeschrittmotor, DC-Getriebemotor	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	2-Phasen-Getriebeschrittmotor, DC-Getriebemotor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor
Empfohlener Controller	SMC Controller	C-863 einachsige C-663 einachsige	SMC Controller	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Präzisions-Rotationstische



PRS-110

Highlights

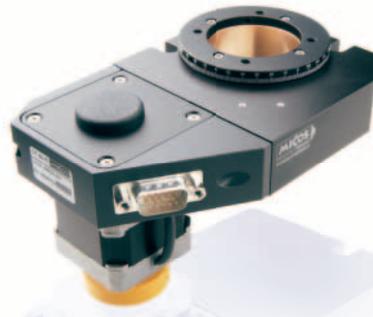
- Spielfrei vorgespannter Schneckenantrieb
- Unbegrenzter Rotationsbereich mit kontaktlosem Referenzschalter

Anwendungen

Diese hochpräzisen Rotationstische werden in vielen Anwendungsbereichen in Industrie und Forschung eingesetzt. Testausrüstungen in der Materialprüfung oder die optische Messtechnik in der Photonik-Fertigung profitieren von der hervorragenden Ablaufgenauigkeit und dem gleichmäßigen Vorschub.



M-062



DT-80 R



PRS-200

M-060
M-061
M-062

DT-80
DT-80 R

PRS-110

PRS-200

Besonderheiten	Mit manuellem Antrieb verfügbar	Riemenübersetzte Version für hohe Geschwindigkeit >3 Umdrehungen/Sekunde	Vorgespannte und kalibrierte Lager für minimale Verkippung	Vorgespannte Kugelführung für minimale Verkippung
Freie Apertur Ø in mm	20 bis 45	40	35	120
Drehteller Ø in mm	60 bis 120	64	85	190
Abmessungen in mm	90 × 70 × 29 bis 150 × 130 × 38 plus Motor	83 × 86 × 30 plus Motor	125 × 110 × 55 plus Motor	225 × 200 × 75 plus Motor
Rechnerische Auflösung in µrad (°)	bis 0,96 (0,00006)	bis 17 (0,001)	bis 1,7 (0,0001)	bis 1,3 (0,00008)
Kleinste Schrittweite in µrad (°)	bis 5 (0,0003)	bis 17 (0,001)	bis 1,7 (0,0001)	bis 1,3 (0,00008)
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µrad (°)	bis 50 (0,003)	170 (0,01)	bis 3,5 (0,0002)	bis 5,2 (0,0003)
Max. Geschwindigkeit in °/s	90	40 Hochgeschwindigkeitsversion: 1170	200	150
Belastbarkeit in N	500 bis 650	20	100	500
Drehmoment in Nm	4 bis 8	0,1	3	4
Motortyp	DC-Motor, ActiveDrive, DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor
Empfohlener Controller	C-863 einachsig C-663 einachsig	SMC Controller	SMC Controller	SMC Controller

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Ultrapräzise Rotationstische

Drehtische der Referenzklasse für höchste Ansprüche



UPR-120

Highlights

- Optional sind alle Serien mit Luftlagern erhältlich für eine taumelfreie Bewegung ohne Spiel durch Reibungseffekte
- Bürstenlose Torquemotoren für besonders ruhigen Gleichlauf auch bei langsamen Geschwindigkeiten
- Unbegrenzter Rotationsbereich mit kontaktlosem Referenzschalter
- Direkte Positionsmessung

Anwendungen

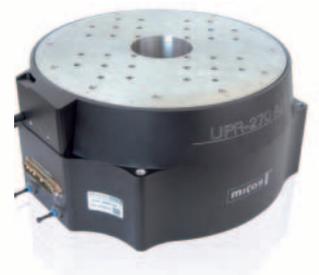
Diese Rotationsversteller der Referenzklasse zielen auf Applikationen, die gleichzeitig hohe Dynamik und Präzision der Positionierung erfordern. Forschungsbereiche z. B. an Beamlines oder die Halbleitertechnologie mit ihren hohen Anforderungen an Genauigkeit und Durchsatz sind die Zielmärkte.



UPR-100



UPR-160



UPR-270

UPR-100

UPR-120

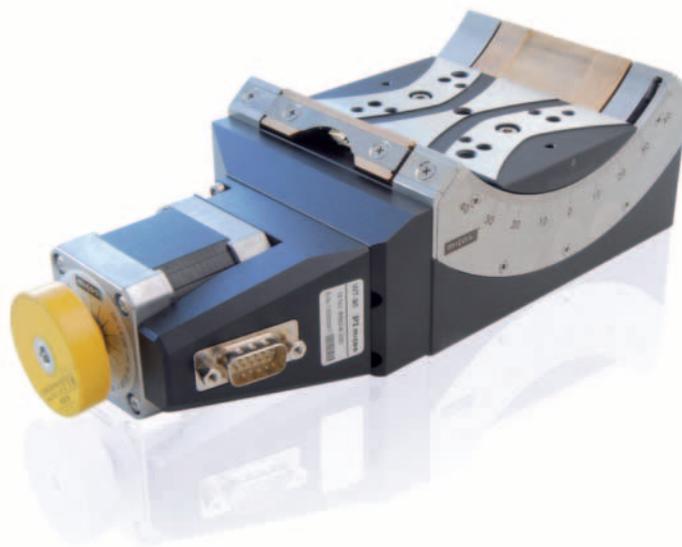
UPR-160

UPR-270

	UPR-100	UPR-120	UPR-160	UPR-270
Höhenschlag und Exzentrizität mit Luftlager	<±0,2 µm	<±0,1 µm	<±0,1 µm	<±0,1 µm
Freie Apertur Ø in mm	20	35	35	35
Abmessungen in mm	100 × 100 × 50	155 × 129 × 90	178,4 × 165 × 90	281 × 270 × 135
Rechnerische Auflösung in µrad (°)	0,17 (0,00001)	0,17 (0,00001)	0,17 (0,00001)	0,17 (0,00001)
Kleinste Schrittweite in µrad (°)	0,35 (0,00002)	0,35 (0,00002)	0,35 (0,00002)	0,17 (0,00001)
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µrad (°)	1,4 (0,00008)	1,4 (0,00008)	1,4 (0,00008)	1,2 (0,00007)
Max. Geschwindigkeit in °/s	360	360	360	360
Belastbarkeit in N	15 bis 20	200	200	400
Max. Drehmoment in Nm	0,25 bis 0,5	2	2	10
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	SMC Controller	SMC Controller

Goniometer und Kipptische

1- oder 2-Achsenbewegung



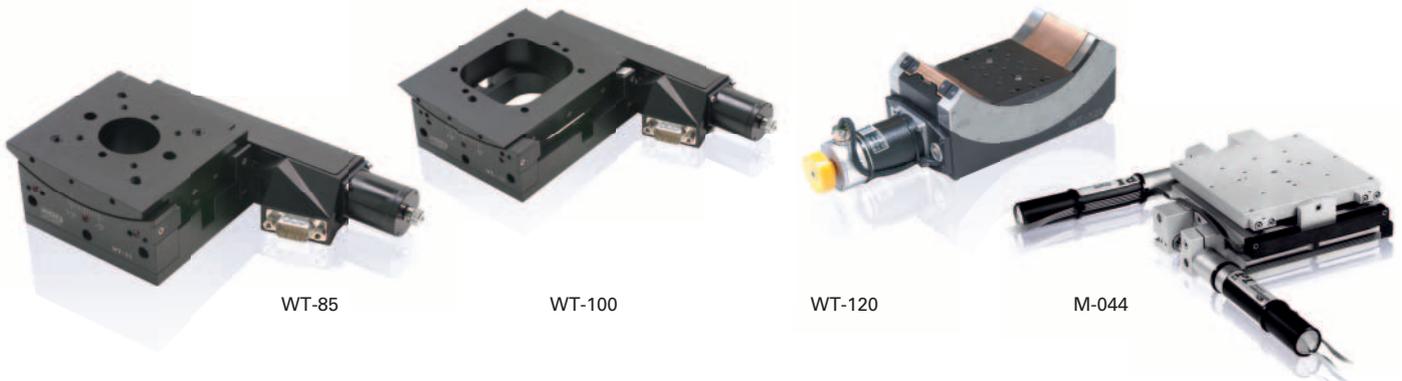
WT-90

Highlights

- Große Laufruhe und gleichmäßiger Vorschub mit konstanter Winkelgeschwindigkeit
- Drehachse oberhalb der Plattform bei Goniometern oder in Plattformebene bei Kipptischen
- Gemeinsamer Drehpunkt (Pivotpunkt) möglich für WT-85 auf WT-100, WT-90 auf WT-120
- Vakuumausführungen auf Anfrage

Anwendungen

Goniometer können Rotationstische in Anwendungen mit eingeschränktem Bauraum ersetzen. Davon profitieren z. B. die Lasertechnologie und Materialforschung, wo optische Elemente in der Strahlführung positioniert werden müssen. Für Scanning- oder Trackinganwendungen stehen je nach Applikation motorisierte Kipptische mit zusätzlichem Piezofeiantrieb zur Verfügung oder für besonders hohe Dynamik Piezokippspiegelsysteme.



WT-85

WT-100

WT-120

M-044

WT-85

WT-100

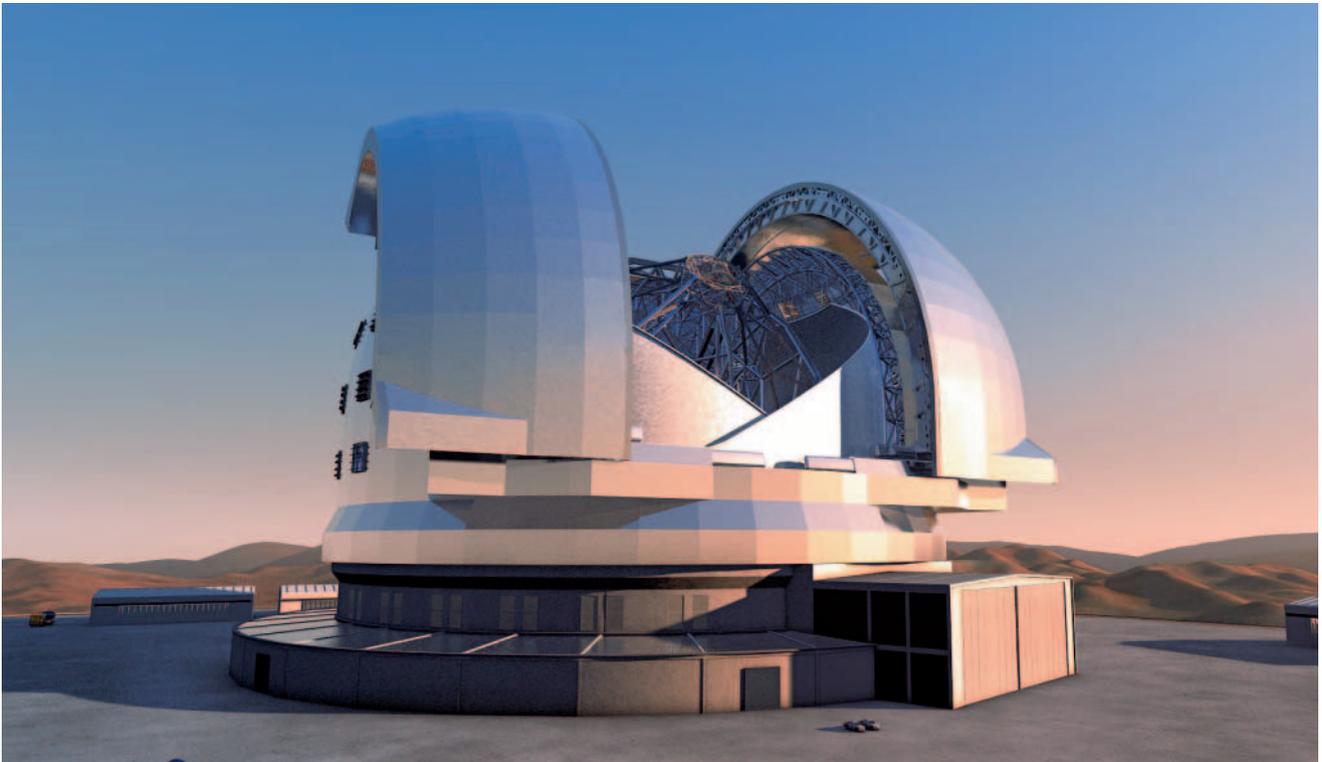
WT-90 WT-120

M-041 bis M-044

	Goniometer mit freier Apertur Ø 30 mm	Goniometer mit freier Apertur 60 mm x 25 mm	Goniometer für hohe Lasten mit großem Verstellbereich	Kipptisch mit 1 oder 2 Achsen und großer Plattform
Besonderheiten	Optional direkte Positionsmessung	Optional direkte Positionsmessung	Optional direkte Positionsmessung	Antrieb spielfrei magnetisch angekoppelt
Rotations- / Kippbereich in °	10	10	90	14 bis 18
Abmessungen in mm	85 x 130,5 x 44 plus Motor	132 x 158 x 37 plus Motor	115 x 125 x 61 (WT-90) 150 x 235 x 106 (WT-120) plus Motor	60 x 60 x 27 bis 100 x 100 x 47 plus Motor
Rechnerische Auflösung in µrad (°)	bis 1,7 (0,0001)	bis 1,6 (0,00009)	bis 1,6 (0,00009)	bis 0,23
Kleinste Schrittweite in µrad (°)	bis 87 (0,005)	bis 87 (0,005)	bis 17 (0,001)	bis 65 (0,004) manuell 15 (0,001) motorisiert
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µrad (°)	bis 87 (0,005)	bis 87 (0,005)	bis 17 (0,001)	bis 15 (0,001)
Max. Geschwindigkeit in °/s	7 bis 15	7 bis 15	15 bis 30	bis 4,5
Belastbarkeit in N	20	20	80, 200	4 bis 5
Drehmoment in Nm	0,75	0,75	2,5; 8	bis 0,75
Antrieb	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Motor	DC-Motor, optionale Ergänzung durch Piezofeinantrieb. Manuelle Tische unter www.pi.de
Empfohlener Controller	SMC Controller	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsig

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Motorisierte Präzisionslinearaktoren



Das E-ELT, das „größte Auge“ für den Blick in den Weltraum, hat einen Hauptspiegel von ca. 39 m Durchmesser, der aus knapp 800 sechseckigen Spiegelementen zusammengesetzt ist. 2018 soll es auf dem gut 3000 m hohen Cerro Armazones in der chilenischen Atacamawüste in Betrieb gehen. Jedes Spiegelement wird von drei Linearaktoren mit hochgenauer Antriebstechnik positioniert. (Bild: European Southern Observatory, ESO)



Präzisionsaktoren

Seite 236



Preisgünstige Linearaktoren

Seite 238



Hochlastaktoren

Seite 240



Kompakte Linearaktoren

Für die Justage optomechanischer Komponenten

Seite 242

Präzisionsaktoren



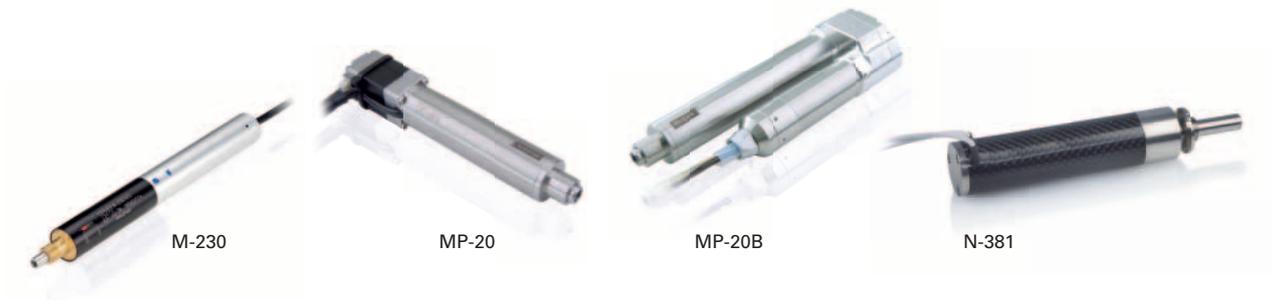
M-230

Highlights

- Hochauflösende Antriebe mit Präzisionskomponenten
- Vorspannung: spielfreier Aufbau mit nichtdrehendem Kopfstück
- Vakuumvarianten verfügbar

Anwendungen

Die Versteller bieten kompakte Lösungen für kleinen Bauraum z. B. in Test- und Prüfeinrichtungen in Industrie und Forschung. Ihr nichtdrehendes Kopfstück für gleichförmige Bewegung vermeidet Taumelfehler, Drehmomente und Verschleiß am Kontaktpunkt. Speziell die Aktoren mit Piezomotor sind ideal als Mikro- und Nanomanipulatoren z. B. in Bio- und Nanotechnologie verwendbar.



M-230

MP-20

MP-20B

N-381

	M-230	MP-20	MP-20B	N-381
	Hochauflösend	Flexibel im Stellweg	Kompakt durch gefalteten Antrieb	Nanometer-Präzision mit Piezomotor, optional nichtmagnetisch
Abmessungen in mm	Ø 19 x 175 bis 205	Ø 20 x 124,5 bis 196,5	30 x 47,9 x 100 bis 143	Ø 25 x 121,5
Stellweg in mm	10 bis 25	13 bis 76	13 bis 76	30
Kraft axial in N	bis 70	bis 125	bis 110	10
Max. Querbearbeitbarkeit in N	bis 30	1	1	10
Max. Geschwindigkeit in mm/s	1,2 bis 2	0,8 bis 12	0,6 bis 10	10
Rechnerische Auflösung in nm	4,6 bis 37	22	22	20; 0,03 ungerichtet
Kleinste Schrittweite in µm	0,05	0,1	0,1	0,02
Umkehrspiel in µm	2	2	2	0,2
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,1	0,3	0,3	0,1
Encodertyp	Rotationsencoder	Rotationsencoder	Rotationsencoder	Linearencoder
Motortyp	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Getriebemotor	2-Phasen-Schrittmotor, DC-Getriebemotor	NEXACT® Piezoschreittrieb
Empfohlener Controller	C-863 einachsig C-884 bis 4 Achsen C-663 einachsig	SMC Controller	SMC Controller	E-861 einachsig

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Preisgünstige Linearaktoren



M-229

Highlights

- Schrittmotoren mit und ohne Getriebe, DC-Servomotor oder geregelter Piezomotor
- Nichtdrehendes Kopfstück für gleichförmige Linearbewegung vermeidet Taumelfehler, Drehmomente und Verschleiß am Kontaktpunkt

Anwendungen

Preissensitive Applikationen profitieren vom günstigen Systempreis der Linearachsen. Auch für OEM-Anwendungen in mehreren Achsen hervorragend geeignet. Alternativ zu Motor-Spindel-Kombinationen oder elektromagnetischen Linear-motoren bietet der keramische Direktantrieb Selbsthemmung im Ruhezustand ohne Wärmeentwicklung.



M-228

M-229

M-227

M-272

M-228.11
M-229.26

M-228.10
M-229.25

M-227

M-272

	Handrad, Sichtfenster zur schnellen Positionserkennung	Schlanke Bauform, Sichtfenster zur schnellen Positionserkennung	Hochpräzise, optional mit Piezofeinantrieb	Minimiert Umkehrspiel durch linearen Direktantrieb
Abmessungen in mm	39 × 39 × 100 bis 120	Ø 21 × 100 Ø 30 × 135	Ø 19 × 125 bis 187	26 × 40 × 130
Kraft axial in N	50; 80	20; 50	40	8
Max. Querbelastbarkeit in N	bis 0,5	bis 0,5	0,1	10
Stellweg in mm	10; 25	10; 25	10; 50	50
Max. Geschwindigkeit in mm/s	5	1,5	0,75	150
Rechnerische Auflösung in µm	0,078	0,046	0,0035	0,6 mit Direktmetrologie
Kleinste Schrittweite in µm	1	1	0,05	1,8
Umkehrspiel in µm	10	5 bis 10	2	1
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	2	2	0,1	2
Encodertyp	–	–	Rotationsencoder	Linearencoder
Motortyp	2-Phasen-Schrittmotor	2-Phasen-Schrittmotor mit Getriebe	DC-Getriebemotor, Schrittmotorvariante M-168 online	U-164 PILine® Ultraschall-Piezomotor
Empfohlener Controller	C-663 einachsig	C-663 einachsig	C-863 einachsig C-884 bis 4 Achsen	C-867.OE

Hochlastaktoren



Highlights

- Seitliche Lagerung des Stößels für laterale Kräfte bis 100 N
- Leistungsstarke Antriebe mit Präzisionskomponenten
- Vorspannung für spielfreien Aufbau
- Nichtdrehendes Kopfstück für gleichförmige Bewegung vermeidet Taumelfehler, Drehmomente und Verschleiß am Kontaktpunkt

Anwendungen

Hohe Belastbarkeit bei hoher Dynamik zeichnen diese Aktoren aus. Lasten von 100, 200 oder gar 500 N werden zuverlässig und wiederholbar präzise positioniert. Sowohl für Test- und Prüfeinrichtungen als auch zum Einsatz in Fertigungs-
linien im Präzisionsmaschinenbau gibt es die richtige Lösung.



M-235



M-238

	M-235	MA-35	MA-35	M-238
Abmessungen in mm	Ø 27 × 166 bis 196	Ø 40 × 249	Ø 40 × 275 bis 300	Ø 42 × 247,2
Kraft axial in N	bis 120	500	bis 300	400
Max. Querbelaastbarkeit in N	8	10	10	100
Stellweg in mm	20 bis 50	52	52	50
Max. Geschwindigkeit in mm/s	2,6 bis 30	bis 5	bis 90	30
Rechnerische Auflösung in µm	0,016 bis 0,5	bis 0,01	0,5	0,13 bis 0,1
Kleinste Schrittweite in µm	0,1 bis 0,5	bis 0,1	bis 0,1	0,5 bis 0,3
Umkehrspiel in µm	1	2	2	3 / 1
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,1 bis 0,5	0,2	bis 0,2	1 bis 0,3
Motortyp	DC-Getriebemotor, DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor	DC-Motor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Motor, ActiveDrive
Empfohlener Controller	C-863 einachsige C-884 bis 4 Achsen C-663 einachsige	SMC Controller	SMC Controller	C-863 einachsige C-884 bis 4 Achsen

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Kompakte Linearaktoren

Für die Justage optomechanischer Komponenten



N-470 PiezoMike

Highlights

- Linearantriebe der Präzisionsklasse
- Hochwertige Komponenten
- Motorisierung von manuellen Positioniertischen

Anwendungen

Die kompakten Micro Pusher sind ideal geeignet, um optomechanische Komponenten stabil zu positionieren. Klassisch motorisierte Linearachsen passen direkt an manuelle Verstellische und Spiegelversteller. PIShift Antriebe eignen sich vor allem für die driftfreie Langzeitpositionierung.



MP-15

M-231

M-232

MP-15

M-231

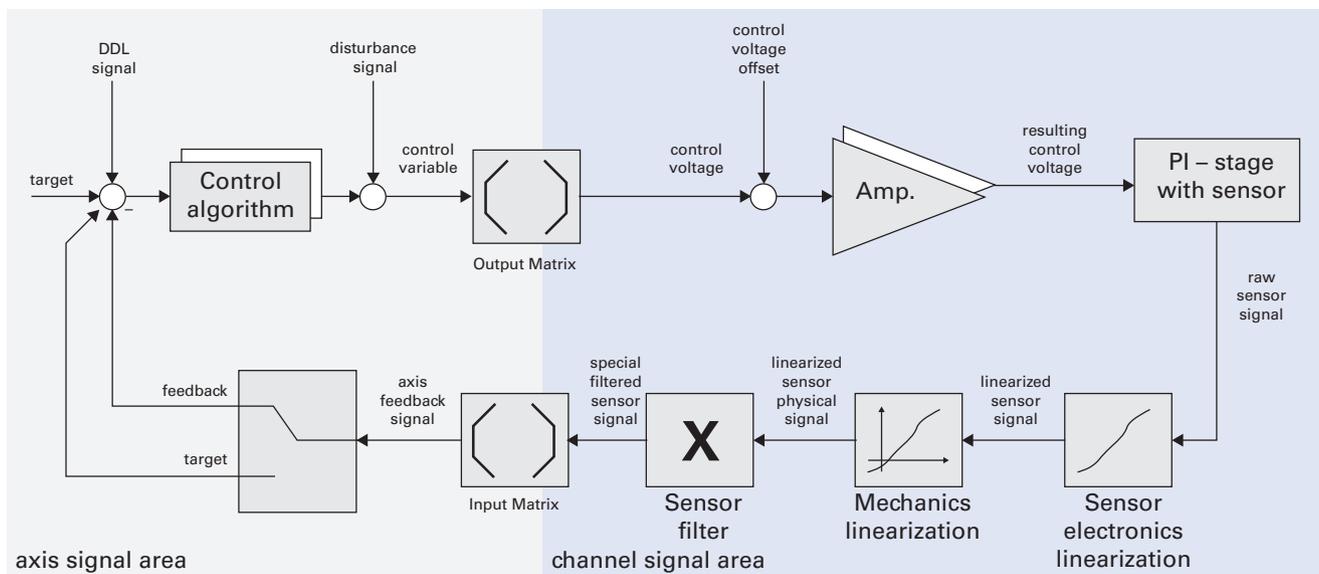
M-232

N-470

	Vakuumvarianten bis 10 ⁻⁶ hPa verfügbar	Schlanker Getriebemotor	Kompakt durch gefalteten Antrieb	PIShift Piezomotor mit hoher Haltekraft
Abmessungen in mm	Ø 17 x 85 bis 108	Ø 19 x 134	20 x 49 x 72	16 x 28 x 48
Stellweg in mm	6; 12,7	17	17	7,4
Kraft axial in N	10	40	40	22 aktiv, Haltekraft > 100 N
Max. Geschwindigkeit in mm/s	0,3	1,5	1,5	0,06
Rechnerische Auflösung in µm	bis 0,05	0,007	0,007	-
Kleinste Schrittweite in µm	0,2	0,1	0,1	0,03
Umkehrspiel in µm	10	2	2	-
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit in µm	0,5	0,2	0,2	-
Motortyp	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	DC-Getriebemotor, 2-Phasen-Schrittmotor	PIShift Piezoträgheitsantrieb
Empfohlener Controller	SMC Controller	C-863 einachsig C-884 bis 4 Achsen	C-863 einachsig C-884 bis 4 Achsen	E-870

Schrittmotorauflösung controllerabhängig

Motion Controller



Regelung eines mechanischen Systems mit integrierter aktiver Schwingungsdämpfung

Für die Präzision entscheidend kann die Entkopplung von niederfrequenten Umgebungsschwingungen sein, die Resonanzen des mechanischen Systems anregen und damit die präzise Positionierung beeinträchtigen würden. Piezoaktoren unterdrücken mit Hilfe eines eigens konstruierten 6D-Beschleunigungssensors und eines entsprechenden Digitalcontrollers die Anregungen im Bereich bis ca. 50 Hz. Digitale Linearisierungsalgorithmen für Mechanik und Elektronik sowie Filterfunktionen für die Sensorwerte ermöglichen dann eine Unterdrückung mehrdimensionaler Schwingungen mit Dämpfungsfaktoren von über 20.



DC-Servomotor-Controller

Seite 246



Schrittmotor-Controller

Seite 248



Digitale Controller für Piezomotoren

Seite 250

DC-Servomotor-Controller



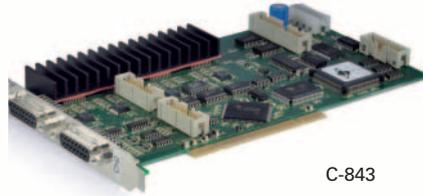
C-884

Highlights

- P-I-D-Regler, Parameteränderung im Betrieb
- Benutzerfreundliche Bedienersoftware PIMikroMove®
- Bewegungssteuerung von PI Positioniersystemen mit DC-Motoren: direkte Motoransteuerung, PWM-Ansteuerung für PI Stellische mit integrierten ActiveDrive Verstärkern oder für Versteller mit integrierter Blockkommutierung (bürstenlose Motoren). Unterstützt Motorbremse
- Datenrecorder. Parameteränderung im Betrieb. Umfangreiche Softwareunterstützung, z. B. für LabVIEW, dynamische Bibliotheken für Windows oder Linux
- Lineare Vektorbewegung bei Mehrachsencontrollern



C-863



C-843



C-885

C-863

C-884

C-843

C-885

	C-863	C-884	C-843	C-885
	Motion Controller für 1 Achse	Motion Controller für 4 Achsen	PCI-Motorsteuerkarte für 2 oder 4 Achsen	Modularer Aufbau, Controllermodule für verschiedene Antriebstechnologien
Kanäle	1	4	2, 4	bis zu 40
Profilgenerator	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil	Trapezförmiges oder S-Kurven-Geschwindigkeitsprofil	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil
Schnittstelle / Kommunikation	USB, RS-232	TCP/IP, USB, RS-232	PCI-Bus	TCP/IP, USB
I/O-Leitungen	analoge/digitale Eingänge, digitale Ausgänge	analoge/digitale Eingänge, digitale Ausgänge	digitale Ein- und Ausgänge	digitale Ein- und Ausgänge
Softwaretreiber	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux	LabVIEW-Treiber, GCS-DLL	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux
Unterstützte Funktionen	Punkt-zu-Punkt-Bewegung, leistungsfähige Makroprogrammiersprache, Stand-Alone-Betrieb	Lineare Vektorbewegung, Punkt-zu-Punkt-Bewegung, leistungsfähige Makroprogrammiersprache, Stand-Alone-Betrieb	Triggerprogrammierung	Punkt-zu-Punkt-Bewegung, leistungsfähige Makroprogrammiersprache, Stand-Alone-Betrieb
Manuelle Bedienung	Pushbutton Box, Joystick	USB Schnittstelle für HID-konforme Geräte	nur über PC	-
Betriebsspannung	Netzteil im Lieferumfang	Netzteil im Lieferumfang	Versorgung über PC	Netzteil integriert
Abmessungen	130 x 76 x 40 mm ³	320 x 150 x 80,5 mm ³	PCI-Karte	19-Zoll-Gehäuse

Schrittmotor-Controller



SMC hydra

Highlights

- Sensorauswertung und PID-Regelung für Versteller mit 2-Phasen-Schrittmotoren
- Datenrecorder. Parameteränderung im Betrieb
- Lineare Vektorbewegung bei Mehrachsencontrollern
- SMC Controller verwenden eine spezielle Technologie mit bis zu 300 000-facher Schrittinterpolation. Dies ermöglicht eine extrem präzise Kommandierung von Positionen. In Kombination mit einem Wegmesssystem erreicht ein Schrittmotorversteller damit eine hervorragende Laufruhe und Trajektorientreue.



SMC corvus



SMC pollux



C-663

SMC corvus

SMC hydra CM

SMC pollux

C-663

	Auch als PCI-Karte oder Tischgerät	Auch für andere Motorarten, wie DC-Motoren, Linear-motoren, etc.	Optional mit integrier-tem Motor	-
Abmessungen in mm	70 x 240 x 305	48 x 56 x 150	48 x 56 x 77	130 x 76 x 40
Kanäle	2, 3	2	1	1
Mikroschrittinterpolation	>60 000	>60 000	>60 000	16
Schnittstelle / Kommunikation	RS-232, TCP/IP, GPIB	RS-232, TCP/IP	RS-232	USB, RS-232
Controllernetzwerk	-	-	Bis zu 16 Einheiten an einer Schnittstelle	Bis zu 16 Einheiten an einer Schnittstelle
I/O-Leitungen	optional digitale Ein- und Ausgänge	optional digitale Ein- und Ausgänge	-	analoge/digitale Eingänge, digitale Ausgänge
Befehlssatz	Venus-1 ASCII	Venus-3 ASCII	Venus-2 ASCII	PI General Command Set (GCS)
Softwaretreiber	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows	LabVIEW-Treiber, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux
Unterstützte Funktionen	Positionsregelung, Lineare Vektorbewegung, Punkt-zu-Punkt-Bewegung	Positionsregelung, Lineare Vektorbewegung, Punkt-zu-Punkt-Bewegung	Positionsregelung, Lineare Vektorbewegung, Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Startup-Makro	Startup-Makro
Manuelle Bedienhilfe	Joystick, 3-Achsen-Handrad	Joystick, 3-Achsen-Handrad	-	Joystick, Pushbutton Box
Strombegrenzung/ Motorphase in A	3	3	1,2	1
Betriebsspannung	90 bis 250 V	externes Netzteil	externes Netzteil	Netzteil im Lieferumfang

Digitale Controller für Piezomotoren

Systemoptimierung und Bedienkomfort: Plug-and-play



E-871

Highlights

- Umfangreiche Softwareunterstützung, z. B. für LabVIEW, dynamische Bibliotheken für Windows und Linux. Datenrecorder z. B. für Positionswerte
- Auswertung inkrementeller Sensoren
- Analoge I/O z. B. für Anschluss eines Joysticks und digitale für Automatisierungsaufgaben
- Integrierte Treiber optimiert für die jeweilige Antriebsart z. B. mit autoresonanten Ultraschallfrequenzen oder koordinierte Auslenkung von Scher- und Longitudinalaktoren
- Alternativ: Treiberelektroniken ohne integrierte Regelung für Aufbau eines externen Regelkreises



E-755



E-861



C-867

E-755

E-861

E-871

C-867

	Für NEXLINE® Piezoschreitantriebe	Für NEXACT® Piezoschreitantriebe	Für PIShift Piezoträgheitsantriebe	Für PILine® Ultraschallantriebe
Besonderheiten	Polynom-Linearisierungsverfahren für eine hervorragende Linearität der Bewegung, Abweichung ca. 0,001 % über den gesamten Stellweg des NEXLINE® Nanopositionierers	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Analogmodus für nanometergenaue Positionierung an der Zielposition. Nichtflüchtiger Makrospeicher	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Analogmodus für nanometergenaue Positionierung an der Zielposition. Nichtflüchtiger Makrospeicher	Unterstützt alle Bewegungsmoden: Punkt-zu-Punkt-Bewegung, Langsamfahrt bei $\mu\text{m/s}$, präzises Einregeln. Nichtflüchtiger Makrospeicher
Schnittstellen / Kommunikation	RS-232	USB, RS-232	USB, RS-232	USB, RS-232
Mehrachsensteuerung	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. Modularer Mehrachsen-Controller E-712 für unterschiedliche Antriebsarten verfügbar	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. Mehrachsen-Controller E-712	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain	Bis 16 Geräte über Daisy-Chain. 2-Achsen-Controller verfügbar
Unregelte Versionen / Treiberelektronik	Unregelte Version verfügbar	OEM-Treiberelektronik E-862 verfügbar	OEM-Treiberelektronik E-870 verfügbar	OEM-Version in Europakartenformat oder OEM-Treiberelektronik C-872 verfügbar

Grundlagen motorisierter Positioniersysteme

Motoren und Antriebe

Seite 253

Linearantriebe – Piezoantriebe – Drehende Elektromotoren – Kombinationen aus Piezoaktor und Elektromotor

Antriebselemente

Seite 257

Getriebe – Spindelarten

Metrologie

Seite 258

Indirekte Metrologie – Direktmetrologie – Erweiterte Metrologiekonzepte

Führungen, Lager

Seite 259

Linearführungen – Luftlager – Flexure Festkörpergelenksführungen

Einsatz im Vakuum

Seite 261

Entscheidend: Die Materialauswahl – Bevorzugte Materialien – Montage im Reinraum – Zu beachten bei Vakuumverstellern – Controller, Verstärker und andere elektronische Geräte – Anpassungen der Versteller für verschiedene Vakuumklassen

SMC Controller Technologie

Seite 263

Präzise Positionierung mit dem SMC Controller – Positionsregelung, Geschwindigkeit, Korrektur der Positionsabweichung im Controller

Glossar

Seite 266

Motoren und Antriebe

Linearantriebe

Linearantriebe erlauben prinzipiell unbegrenzte Stellwege. Sie wirken direkt ohne Zwischenelemente wie Spindeln oder Getriebe und sind umkehrspielfrei. Die Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems wird nur durch die Positionsmessung und die Führungen bestimmt.

Elektromagnetische Linearantriebe

Linearservomotoren werden sowohl für sehr hohe als auch für sehr geringe Vorschubgeschwindigkeiten eingesetzt. Sie arbeiten präzise in einem Bereich von unter $0,1 \mu\text{m/s}$ bis zu über 5 m/s . In Kombination mit Luftlagern ist eine Positionsauflösung bis zu wenigen Nanometern erreichbar.

Voice-Coil Linearantriebe, Tauchspulantriebe

Diese reibungsfreien magnetischen Linearantriebe werden durch hohe Dynamik, aber relativ geringe Haltekräfte charakterisiert. Sie kommen besonders bei Scananwendungen

mit Stellwegen bis zu einigen zehn Millimetern zum Einsatz. Um eine Position stabil zu halten, muss der Voice-Coil, wie jeder magnetische Direktantrieb, in Regelung betrieben oder gebremst werden.



Mit Voice-Coil-Antrieben der PIMag™ Serie sind ausgesprochen kleine Bauformen realisierbar

Piezoantriebe

Piezoaktoren

Piezoaktoren ermöglichen Positionsaufösungen von unter einem Nanometer. Für verschiedene Mikropositioniertische sind zusätzliche Piezofeinantriebe verfügbar. Alternativ zu dieser seriellen Konfiguration werden sie zu Hybridantrieben kombiniert, bei denen eine gemeinsame Regelschleife für Motor und Piezoaktor verwendet wird.

Piezoaktoren können extrem hohe Beschleunigungen von mehreren Tausend g übertragen und sind reibungs- und umkehrspielfrei. Ihr Stellweg ist in der Regel auf unter einen Millimeter begrenzt.

Piezomotoren: PiezoWalk®, PILine®, PIShift

Piezomotoren erzeugen weder Magnetfelder noch werden sie von diesen beeinflusst. Sie werden zum Aufbau von nanometergenauen Stellsystemen mit langem Stellbereich verwendet.

Piezomotoren übertragen auf die bestmögliche Weise die spezifischen Eigenschaften von Piezoaktoren auf längere Wege. Angepasst an die benötigte Kraft- und Geschwindigkeitsentwicklung hat PI eine Reihe unterschiedlicher Piezomotortechnologien entwickelt, die den Schwerpunkt jeweils auf andere Merkmale legen.

Eigenschaften von Piezomotoren

- Selbsthemmend im ausgeschalteten Zustand mit maximaler Kraft
- Skalierbare Stellwege
- Nanometergenaue Auflösung
- Mechanisch einfach integrierbar
- Verschiedene Technologien optimiert für hohe Geschwindigkeiten oder für hohe Kräfte

PI Piezomotoren im Vergleich mit Piezoaktoren

Piezoaktoren mit und ohne Flexureführungen	PiezoWalk® Piezoschreittrieb	PILine® Ultraschall-Piezomotor	PIShift Piezoträgheitsantrieb
Sub-Nanometer-Auflösung	Sub-Nanometer-Auflösung	Sub-Mikrometer-Auflösung	Sub-Nanometer-Auflösung
Kleinste Ansprechzeiten im Mikrosekunden-Bereich	Geschwindigkeit bis 10 mm/s Hochdynamischer Scanmodus	Sehr hohe Betriebsfrequenz Geräuschloser Antrieb Hohe Geschwindigkeit bis zu mehreren 100 mm/s	Sehr hohe Betriebsfrequenz Geräuschloser Antrieb Geschwindigkeit über 10 mm/s
Stellwege bis ca. 300 µm direkt und 2 mm mit Hebelübersetzung	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt	Lange Stellwege, nur durch die Läuferlänge begrenzt
Hohe Steifigkeit Kraftentwicklung bis zu 100 kN	Sehr hohe Kräfte bis zu 800 N (NEXLINE®) Selbsthemmend in Ruhe	Kräfte bis 40 N Selbsthemmend in Ruhe	Kräfte bis 10 N Selbsthemmend in Ruhe
Ansteuerung mit analoger Spannung Spannungshub 150 V (PICMA® Multilayer-Aktoren), 1 100 V (PICA Hochlastaktoren)	Mehraktorantrieb erzeugt Schrittbewegung Spannungshub 55 V (NEXACT®), 500 V (NEXLINE®)	Einaktorantrieb Ansteuerung mit hochfrequenter Wechselspannung (Sinus) Spannungshub 120 V, 200 V. Minimotoren deutlich darunter	Einaktorantrieb Ansteuerung mit hochfrequenter Wechselspannung (modifizierter Sägezahn) Spannungshub <48 V
Ideal für:			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue Positionierung mit hoher Dynamik ■ Hebelübersetzte und geführte Systeme ■ Piezoscanner ■ Feinjustage ■ Kräfteerzeugung ■ Aktive Schwingungsisolierung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue Positionierung ■ Quasistatische Anwendungen mit großer Haltekraft ■ Stellwege bis einige mm ■ Grob- und Feinjustage ■ Kräfteerzeugung ■ Aktive Schwingungsisolierung ■ Betrieb mit konstanter niedriger Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Positionierung mit Sub-µm-Genauigkeit ■ Schnelles Einregeln ■ Scanbetrieb mit hohen Geschwindigkeiten ■ Betrieb mit konstanter niedriger Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nanometergenaue und langzeitstabile Positionierung ■ Quasistatische Anwendungen mit geringer bis mittlerer Haltekraft

Drehende Elektromotoren

DC-Motor / Servomotor

Ein Gleichstrommotor mit Positionserfassung wird als Servomotor bezeichnet. Typisch für DC-Servomotoren sind der gleichmäßige, schwingungsfreie Betrieb, ein weiter Geschwindigkeitsbereich und hohe Drehmomente bei geringer Geschwindigkeit. Um die Eigenschaften bestmöglich zu nutzen, benötigt man eine Motorsteuerung mit proportionaler, integraler und differentieller (PID-) Regelung und geeigneten Filtern. Der Servomotor bietet viele Vorteile wie gute Dynamik, schnelles Ansprechen, hohe Momente bei kleinen Drehzahlen, geringe Wärmeentwicklung und wenig Vibration.

DC Servomotoren benötigen eine Betriebsspannung bis zu 12 VDC. Die Rotationsgeschwindigkeit des Motors ist direkt proportional zur Spannung, das Vorzeichen bestimmt die Stellrichtung. Zur wiederholbaren Positionierung ist ein zusätzliches Messsystem erforderlich.

Bürstenloser DC-Motor

Zunehmend setzt PI elektronisch kommutierte, bürstenlose DC-Motoren ein. Hohe Drehmomente erreichen dabei optimierte Hohlwellen- oder Torquemotoren. Gleichzeitig kann damit der Antriebsstrang bei gleichbleibendem Stellweg kürzer gebaut werden, denn die Antriebswelle ist innerhalb des Motors untergebracht.

DC-Motoren mit ActiveDrive

DC-Motorantriebe haben verschiedene Vorteile wie z. B. gute dynamische Eigenschaften mit einem weiten Regelbereich, hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen, geringe Wärme-erzeugung und Vibrationsarmut bei hoher Positionsauflösung. Die Kosten für einen leistungsfähigen linearen Verstärker sind jedoch üblicherweise höher als bei Schrittmotoren.

Das ActiveDrive System reduziert diesen Aufwand erheblich, indem ein im PWM-Modus (Pulsweitenmodulation) getriebener Servoverstärker mit im Motorgehäuse integriert ist. Die Betriebsspannung von meist 24 V für ActiveDrive Motoren wird von einem separaten Netzteil bereitgestellt, das bereits im Lieferumfang enthalten ist. Das ActiveDrive Konzept hat viele Vorteile:

- Höherer Wirkungsgrad durch Ausschaltung von Leistungsverlusten zwischen Verstärker und Motor
- Geringere Kosten, kompakterer Aufbau und höhere Zuverlässigkeit, weil kein extern verkabelter Verstärker benötigt wird
- Vermeidung von Störstrahlung, weil Verstärker und Motor zusammen in einem geschirmten Gehäuse montiert sind

Schrittmotorantriebe

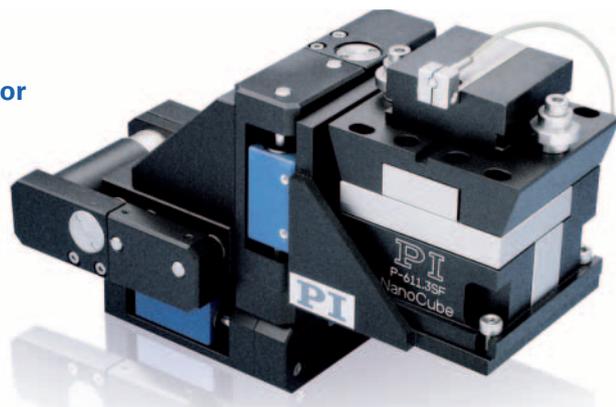
Im Gegensatz zu DC Motoren nehmen Schrittmotoren nur diskrete Positionen innerhalb einer Umdrehung ein. Da diese Schritte einen konstanten Abstand haben, kann über deren Anzahl eine Position kommandiert werden, ohne dass ein Positionssensor erforderlich ist. Üblich sind 200 bis 1000 Vollschritte pro Motorumdrehung. Die tatsächlich erreichbare Schrittweite wird von der Schrittmotorsteuerung bestimmt, die je nach Ausführung bis zu mehrere Hunderttausend Mikroschritte zwischen den Vollschritten elektronisch interpoliert. PI setzt laufruhige 2-Phasen-Schrittmotoren ein.

Schrittmotoren haben eine hohe Lebensdauer und sind im Vergleich zu DC-Motoren besonders bei Anwendungen mit geringerer Dynamik und im Vakuum gut geeignet. Ein mechanischer Dämpfer auf der Motorwelle, der gleichzeitig als Handrad dient, unterstützt die Laufruhe.

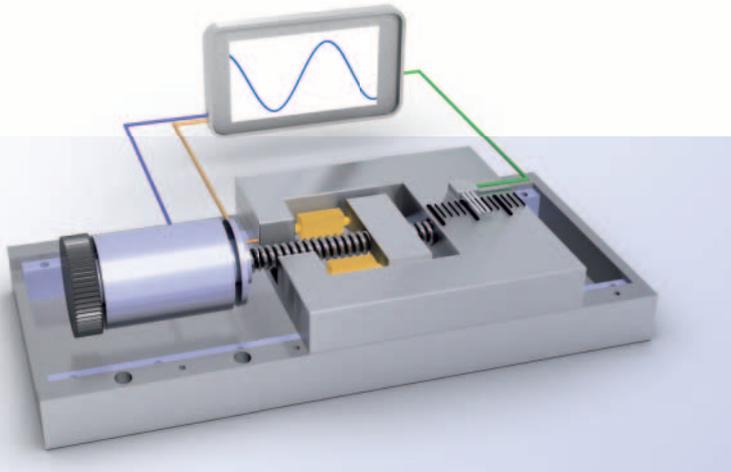
Wenn die Position gehalten werden soll, müssen Schrittmotoren ohne selbsthemmendes Getriebe permanent bestromt werden. Das kann ein Positionszittern zwischen den Schritten und die Erzeugung von Wärme zur Folge haben.

Kombinationen aus Piezoaktor und Elektromotor

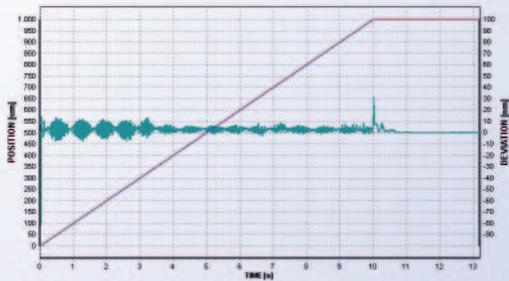
PI bietet in der Mikrostelltechnik Kombinationen aus piezogetriebenen und motorisierten oder manuellen Verstellern. Der Motor-Spindeltrieb liefert lange Stellwege und der zusätzliche Piezofeinantrieb bietet Nanometergenauigkeit und schnelles Ansprechverhalten. Die Regelung bei solchen gestapelten Systemen arbeitet unabhängig voneinander über separate Positionssensoren, und der Piezo tritt erst in Aktion, wenn der Motor hält. Die Positioniergenauigkeit (nicht die rechnerische Auflösung) eines solchen Aufbaus wird vom motorisierten System begrenzt. Ideal wird diese Kombination durch einen externen Regelkreis ergänzt.



Dieses 3-Achsen-Faserpositioniersystem kombiniert motorisierte Versteller für den Grobstellbereich über bis zu 15 mm mit 50 nm Schrittweite mit einem schnellen Piezo-scanner für die Feinjustage über 100 µm Stellweg mit 1 nm Auflösung. Die Intensität des in die Faser eingekoppelten Lichts bestimmt die optimale Position und dient als externe Regelgröße



Schematische Darstellung des Hybridantriebs. Die gemeinsame Regelung des Motors (blau) und des Piezoaktors (gelb) über einen einzigen hochauflösenden Linearencoder (grün) ermöglicht die extrem konstante Geschwindigkeit und hohe Positioniergenauigkeit



Vorschub über 1 mm mit Hybridversteller, Geschwindigkeit 100 µm/s. Die Abweichung von der kommandierten Trajektorie beträgt weniger als 10 nm

Hybridkonzept mit übergeordneter Positionsmessung und Regelung

Beim Hybridantrieb ist die bewegte Plattform vom motorisierten Antriebsstrang über den hochsteifen Piezoantrieb und spiel- und reibungsfreie Festkörpergelenke entkoppelt. Im Positionierbetrieb erfolgt das Einschwingen auf die Position binnen weniger Millisekunden und kleinste Schritte im Bereich der Auflösung des Encoders werden zuverlässig ausgeführt. Die Piezoaktoren ermöglichen im dynamischen Betrieb eine hohe Konstanz der Geschwindigkeit durch Kompensation von Regelabweichungen des motorisierten Antriebs. Stick-/Slip-Effekte beim Anfahren oder Umkehrspiele können ebenfalls kompensiert werden.

Die gemeinsame Regelung auf einen einzigen hochauflösenden Sensor bedeutet, dass beide Bewegungssysteme nicht mehr getrennt zu betrachten sind, sondern als ein System mit Stellwegen über hunderte Millimeter und mit der Präzision eines piezobasierten Nanopositioniertischs. Die Auflösung und damit die Positioniergenauigkeit hängen von der Wahl des verwendeten Positionssensors ab. Für die Hybridsysteme von PI werden hochgenaue optische Linearencoder mit einer Auflösung von derzeit bis zu 2 nm verwendet.

Hybridversteller sind besonders gut geeignet für Anwendungen, in denen die Position hochgenau ausgewertet und wieder angefahren werden muss, oder für Oberflächeninspektion und Messtechnik, wenn eine Zielposition nanometergenau erreicht werden soll.

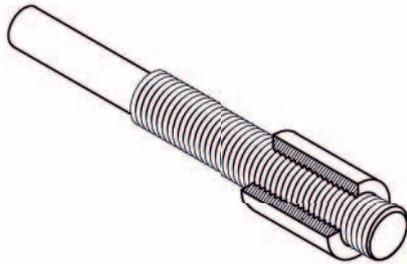
Antriebselemente

Getriebe

Getriebe werden zwischen Motor und Antriebs-
spindel eingesetzt und erhöhen die Positions-
auflösung sowie das Drehmoment. Bei den
meisten Ausführungen sind die Getriebe zur
Reduktion des Umkehrspiels vorgespannt.

Gewindespindeln

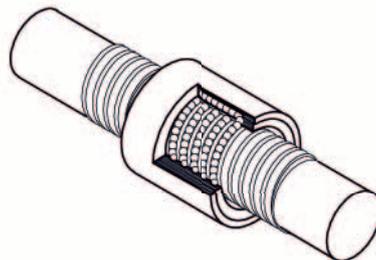
Mit Gewindespindeln können sehr hohe Auf-
lösungen und ein gleichmäßiger Lauf erreicht
werden. Ein Gewindespindeltrieb besteht
aus einer motorgetriebenen Spindel, deren
Mutter mit dem Schlitten des Verstelltisches
verbunden ist. Durch Federvorspannung der
Mutter kann das Umkehrspiel minimiert wer-
den. Sie weisen dadurch eine höhere Reibung
als Kugelumlaufspindeln auf, wodurch sie
einerseits selbsthemmend sind, was sich an-
dererseits auf die Geschwindigkeit, Antriebs-
leistung und Lebensdauer auswirkt. Typische
Gewindesteigungen liegen zwischen 0,4 und
0,5 mm / Umdrehung, bis zu 1 mm / Umdre-
hung für längere Stellwege.



Kugelumlaufspindeln

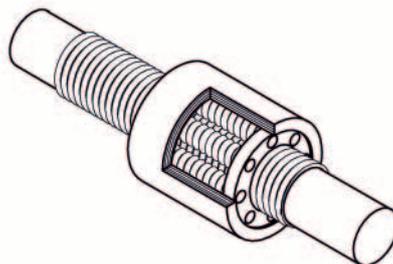
Kugelumlaufspindeln sind deutlich reibungs-
ärmer als Gewindespindeln, weil hier statt der
Gleitreibung die wesentlich geringere Rollre-
ibung genutzt wird.

Ein Kugelspindeltrieb besteht aus einer
motorgetriebenen Spindel, deren Mutter mit
dem Schlitten des Verstelltisches verbun-
den ist. Zwischen der Mutter (Kugelgehäuse)
und der Spindel laufen Kugeln in einem geschlo-
senen Kreislauf. Durch geeignetes Abstimmen
von Kugeldurchmesser und Profil der Gewin-
degänge zwischen Spindel und Mutter kann
das Umkehrspiel minimiert werden. Kugel-
umlaufspindeln sind nicht selbsthemmend, aber
sehr effizient und ermöglichen hohe Geschwin-
digkeiten und Standzeiten im Dauerbetrieb.
PI setzt Gewindesteigungen von 0,5, 1 und
2 mm / Umdrehung ein.



Rollengewindetriebe

Rollengewindetriebe verwenden Rollen anstel-
le von Kugeln als Wälzkörper. Dadurch können
höhere Tragzahlen, höhere Geschwindigkeit
und deutlich höhere Lebensdauern erreicht
werden.



Zur Positionserfassung werden optische Linear- und Rotationsencoder eingesetzt.

Indirekte Metrologie

Positionssensor-Konfiguration, bei der die Bewegung der Plattform indirekt bestimmt wird. Der Sensor ist meist im Antriebsstrang integriert, beispielsweise durch einen Rotationsencoder auf der Motorwelle. Vorteil hier ist die vereinfachte Anbringung des Sensors. Umkehrspiel und mechanisches Spiel beeinflussen allerdings das Messergebnis.

Rotationsencoder

Ein Rotationsencoder ist an einer sich drehenden Stelle im Antriebsstrang implementiert, z. B. auf der Motorwelle. Zur relativen Positionsbestimmung zählt der Controller die Encodersignale (Impulse). Um die absolute Position zu messen, muss auf ein End- oder Referenzschaltersignal referenziert werden. Typische Schrittweiten mit Rotationsencodern liegen bei 0,1 μm .

Direktmetrologie

Kontaktlose optische Linearencoder messen die Ist-Position mit höchster Genauigkeit direkt an der bewegten Plattform (Direktmetrologie). Dadurch werden Fehler im Antriebsstrang wie z. B. Nichtlinearität, mechanisches Spiel und elastische Deformation nicht berücksichtigt. Die Auflösung von Linearencodern reicht bis in den Nanometerbereich.

Erweiterte Metrologiekonzepte

Absolutencoder

Absolutencoder liefern eine zusätzliche Information über die absolute Position der bewegten Plattform.

Parallele Metrologie

Positionssensor-Konfiguration für mehrachsige parallelkinematische Systeme, bei der alle Sensoren die Position zwischen der Grundplatte und der bewegten Plattform messen. Wesentlich ist, dass alle Bewegungsabweichungen von der vorgegebenen Bahn erkannt werden und ausgeregelt werden können. Das bedeutet, dass das Positionsübersprechen einzelner Achsen aller Aktoren kompensiert werden kann („Active Trajectory Control“). Das erfordert hochkomplexe Kontrollalgorithmen.

Serielle Metrologie

Positionssensor-Konfiguration für mehrachsige Systeme, bei dem einige Sensoren die Position zwischen zwei bewegten Plattformen messen. Vorteile sind die einfache Integration in ein seriellkinematisches System und ein einfaches Regelkonzept. Führungsfehler beim Positionsübersprechen der dazwischen liegenden Plattformen können nicht ausgeglichen werden.

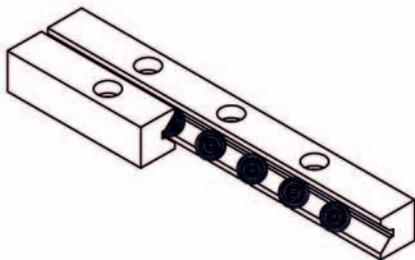
Tachometer

Tachometer werden zur Messung und Regelung der Geschwindigkeit eingesetzt. Alternativ zur direkten Messung kann für die Geschwindigkeitsregelung auch der zeitliche Verlauf der Positionsdaten aus dem Encoder verwendet werden.

Führungen, Lager

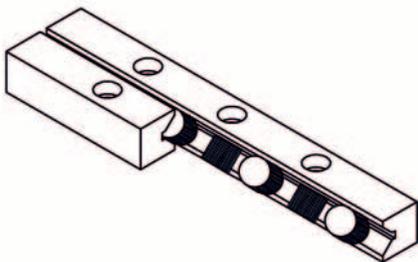
Linearkugellager

Die Kugeln laufen in einem Messingkäfig und sind gegenüber den gehärteten Präzisionsführungswellen vorgespannt. Um Spiel und Reibung möglichst gering zu halten, müssen exakte Toleranzen zwischen Führung und Lager eingehalten werden. Die Belastbarkeit ist begrenzt.



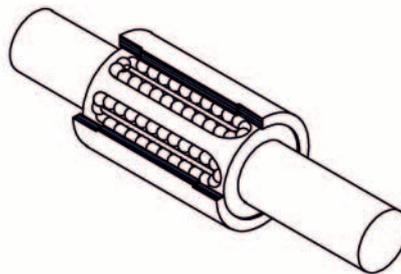
Kreuzrollenlager

Bei Kreuzrollenlagern wird der Punktkontakt der Kugeln in Kugellagern durch den Linienkontakt gehärteter Rollen ersetzt. Sie sind dadurch wesentlich steifer und kommen mit geringerer Vorspannung aus, was die Reibung reduziert und einen gleichmäßigeren Lauf ermöglicht. Kreuzrollenlager zeichnen sich darüber hinaus durch hohe Führungsgenauigkeit und Tragfähigkeit aus. Zwangsgesteuerte Wälzkörperkäfige verhindern ein Auswandern der Wälzlager.



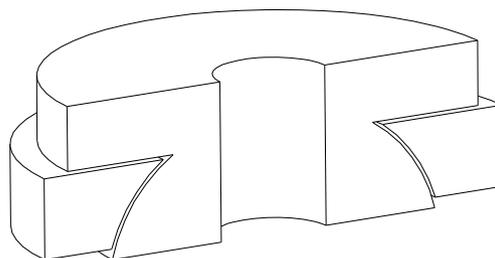
Kugelumlauflager

Hochpräzisionsversteller sind mit Doppelkugelumlaufslagern ausgerüstet. Diese Lager zeichnen sich bei entsprechend sorgfältiger Montage durch eine vorteilhafte Kombination aus hoher Belastbarkeit, Lebensdauer, Wartungsfreiheit und Führungsgenauigkeit aus. Der bewegliche Teil der Tische wird von vier vorgespannten Kugelumlaufschuhen, die auf zwei Führungsschienen laufen, getragen. Jeder Lagerschuh beinhaltet zwei unabhängige Reihen umlaufender Kugeln. Kugelumlauflager sind unempfindlich gegen das Wandern der Wälzlager, das bei Kreuzrollenlagern auftreten kann, wenn kleine Bereiche häufig abgetreten werden.



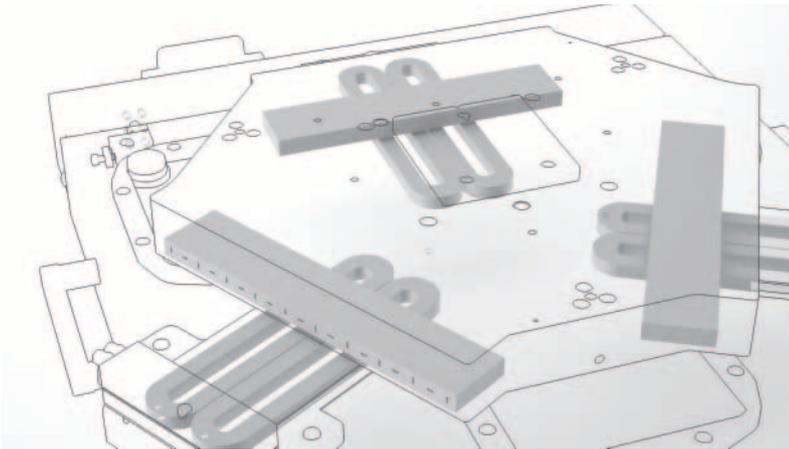
Luftlager

Ein Luftfilm von einigen Mikrometern übernimmt die Funktion eines Lagers. Dadurch sind Luftlager reibungsfrei und ermöglichen eine bis zu 10-fach bessere Führungsgenauigkeit als mechanische Lager. PI miCos setzt Luftlager in ultrapräzisen und Hochgeschwindigkeits-Verstellern ein.



Magnetische Lager

Das magnetische Schweben („Magnetic Levitation“) ermöglicht hervorragende Führungsgenauigkeit in der Ebene sowohl linear als auch rotativ: Der passive Läufer schwebt auf einem magnetischen Feld und wird durch dieses aktiv geführt. Ablauffehler werden von hochgenauen berührungslosen Sensoren gemessen und ausgeregelt. Im Gegensatz zu den ebenfalls hochgenauen Luftlagern können magnetische Lager auch im Vakuum verwendet werden.

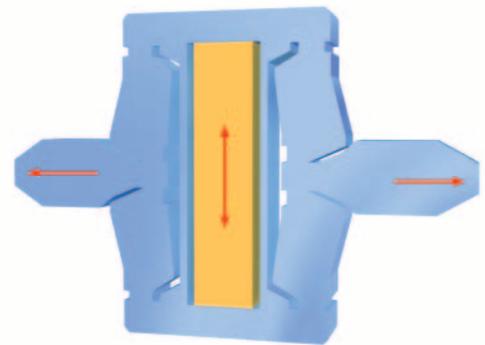


Der Läufer schwebt auf einem magnetischen Feld, das lediglich durch sechs planare Spulen im Stator erzeugt wird

Flexure Festkörperführungen

Die Bewegung eines Flexuregelenkes beruht auf der elastischen Deformation eines Festkörpers. Dadurch treten weder Haft-, Roll- noch Gleitreibung auf. Die Flexureelemente zeigen hohe Steifigkeit, Belastbarkeit und sind dabei sehr unempfindlich gegen Schockbelastungen und Vibrationen. Flexure Führungen sind wartungs- und verschleißfrei. Sie sind 100 % vakuumkompatibel, arbeiten in einem weiten Temperaturbereich und benötigen keinerlei Schmierstoffe.

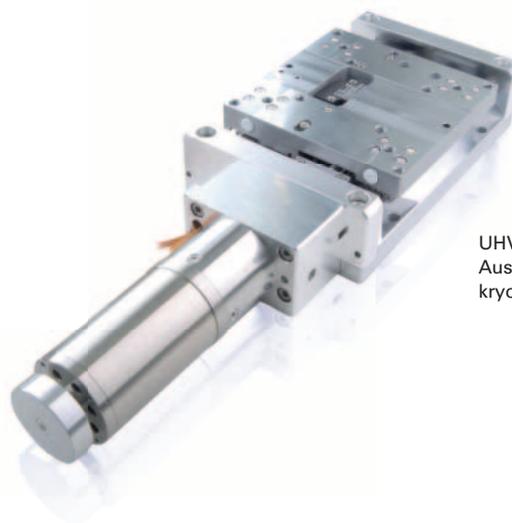
In der Nanostelltechnik haben sich Festkörpergelenksführungen von PI bewährt. Sie führen den Piezoaktor und dienen der geradlinigen Bewegung ohne Verkippung oder seitlichen Versatz. Über ein haft- und gleitreibungsfreies Element (Flexure) erfolgt die elastische Deformation eines Festkörpers – völlig ohne rollende oder gleitende Teile. Diese Verformung reicht aus, um den Aktor über Stellwege von einigen 10 bis einigen 100 μm zu führen.



Flexure Festkörperführungen verlängern den Stellweg, können die Bewegung umlenken und bieten dabei hervorragende Führungsgenauigkeit ohne Reibung. Die gezeigte Hebelmechanik mit Flexure Gelenksführungen übersetzt den Aktorhub (vertikal) in eine gleichförmige, geradlinige Bewegung (horizontal)

Einsatz im Vakuum

Fast alle Versteller können für den Einsatz in verschiedenen Vakuumklassen modifiziert werden. Auf Wunsch werden Ausgastests mit Aufnahme eines Massenspektrogramms durchgeführt.



UHV-geeigneter Versteller mit Ausrüstung für den Einsatz in kryogener Umgebung bei 77 K

Klassifizierung von Vakuum bei PI

		Zulässiger Temperaturbereich der Motoren	Druckbereich
Feinvakuum	FV	-20 bis +150 °C	bis 1×10^{-3} hPa
Hochvakuum*	HV	-20 bis +210 °C	1×10^{-3} hPa bis 1×10^{-7} hPa
Ultrahochvakuum, keine Schmiermittel	UHV	-20 bis +210 °C	1×10^{-7} hPa bis 1×10^{-9} hPa
Ultrahochvakuum, Vakuumschmiermittel	UHV-G	-20 bis +210 °C	1×10^{-7} hPa bis 1×10^{-9} hPa
Ultrahochvakuum Kryo	UHV-C	-269 bis +40 °C	bis 1×10^{-11} hPa
Extrem hohes Vakuum	XHV	-20 bis +300 °C	1×10^{-9} hPa bis 1×10^{-11} hPa

1 hPa = 1 mbar

Design und Fertigung für Bereiche außerhalb dieser Grenzwerte werden auf Anfrage angeboten.

* Üblich ist auch eine Einteilung der Klasse Hochvakuum bis 1×10^{-6} hPa.

Entscheidend: Die Materialauswahl

Um die erforderliche Vakuumklasse zu bestimmen ist es notwendig, die Applikation möglichst gut zu kennen. Beispielsweise haben Kristallographie oder Optikbeschichtung unterschiedliche Anforderungen nicht nur in Bezug auf den Druckbereich, sondern auch auf die erlaubten Reststoffe innerhalb der Vakuumkammer. Häufig ist der erreichte Partialdruck von Kohlenwasserstoffen entscheidend. Diese sind in Schmierstoffen und Kunststoffen enthalten, werden beim Abpumpen der Vakuumkammer freigesetzt und können Oberflächen kontaminieren. Insbesondere Laseranwendungen im UV-Bereich sind sehr sensibel, weil Kohlenwasserstoffe aufgespalten werden und sich an der Optik niederschlagen.

Für die Verwendung in HV und UHV werden spezielle Vakuumschmiermittel verwendet. Auf Wunsch kann das Schmiermittel bei der Auftragsvergabe definiert werden. Der Einsatz von Kunststoffen und Klebstoffen wird so weit wie möglich reduziert.

Bevorzugte Materialien

- Edelstahl
- Aluminium
- Titan
- Messing
- FKM, z. B. Viton
- Keramik
- Saphir
- PTFE, z. B. Teflon
- PEEK
- Polyimid, z. B. Kapton
- Glaskeramik, z. B. Macor

Montage im Reinraum

Vakuumversteller werden unter Reinraumbedingungen montiert. Alle Komponenten werden im Ultraschall gereinigt. Der Versand erfolgt in einer partikelfreien und antistatischen Verpackung.

Controller, Verstärker und andere elektronische Geräte

Die Ansteuerelektronik ist grundsätzlich nicht geeignet, in der Vakuumkammer betrieben zu werden und muss außerhalb der Vakuumkammer aufgestellt werden.

Zu beachten bei Vakuumverstellern

- Geringe Geschwindigkeit: maximal 10 Motorumdrehungen pro Sekunde
- Geringere Betriebsdauer
- Vakuumversteller sollten ausschließlich im Vakuum betrieben werden

Wenn nicht anders vereinbart, gilt:

- Ausheiztemperatur max. 80 °C
- Bei Auslieferung montierte Stecker am Versteller sind nicht vakuumkompatibel. Diese Teststecker müssen kundenseitig durch Vakuumstecker ersetzt werden
- Vakuumdurchführungen sind im Lieferumfang normalerweise nicht enthalten und können bei Bedarf dazu bestellt werden

	FV bis 10 ⁻³ hPa	HV von 10 ⁻³ bis 10 ⁻⁷ hPa	UHV von 10 ⁻⁷ bis 10 ⁻⁹ hPa
Motor	- (wie Luft)	Vakuummotor	geeigneter Vakuummotor
Encoder	- (wie Luft)	modifiziert	modifiziert
Kabel	- (wie Luft)	1 m PTFE - (Teflon-) Kabel	1 m PI - (Kapton-) Kabel
Endschalter	- (wie Luft)	- (wie Luft)	keine auf Wunsch spezielle UHV-Endschalter
Oberfläche	eloxiert (wie Luft)	nicht-eloxiert*	nicht-eloxiert
Schrauben	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl mit Silberbeschichtung, Ausgasbohrung
Schmierung (Führungen, Antriebsstrang)	Vakuumschmiermittel	Vakuumschmiermittel	UHV: ohne Schmierung UHV-G: Vakuumschmiermittel
Stecker	- (wie Luft)	Teststecker, nicht vakuumgeeignet	Teststecker, nicht vakuumgeeignet
Bohrungen	- (wie Luft)	nur Durchgangsbohrungen	nur Durchgangsbohrungen
Weitere Materialien	- (wie Luft)	keine CuZn-Legierungen	keine CuZn-Legierungen, keine Kunststoffe
Ausheiztemperatur	bis 50 °C	bis 80 °C	bis 120 °C, ggf. bis 150 °C

* Für den Einsatz bei bis zu 10⁻⁶ hPa werden auch Vakuumversteller mit eloxierter Aluminiumoberfläche angeboten.

SMC Controller Technologie

Die Ansteuerungstechnik der SMC Schrittmotorsteuerungen bewirkt einen besonders ruhigen Lauf der Motoren. Das Ergebnis ist eine sehr hohe Positionsauflösung, gleichmäßiger Vorschub und ein weiter Dynamikbereich der Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Effizienz der SMC Steuerungen ist sehr hoch, was die Erwärmung der Motoren vermeidet.

SMC Controller basieren auf einem 32-Bit Prozessor mit hochauflösenden Endstufen, die eine Positionsauflösung bis in den Nanometerbereich ermöglichen. In Kombination mit Hochpräzisionsmechaniken werden gleichmäßige Vorschubgeschwindigkeiten deutlich unter 1 $\mu\text{m/s}$ erreicht.

Das Beschleunigungsprofil kann statt linear als \sin^2 -Profil gewählt werden, sodass ruckfreie Beschleunigungs- und Abbremsphasen möglich sind.

Wenn eine stabile Langzeitpositionierung gefragt ist, werten SMC Schrittmotorcontroller auch Positionsmesssysteme aus und regeln präzise. Die Auswertung eines analogen 1 V – Spitze-Spitze – Wertes erlaubt die hochgenaue, stufenlose Einstellung der Position, ohne Limitierung durch eine bitgebundene Digitalwandlung.

SMC Controller stehen in unterschiedlichen Ausführungen, vom einkanaligen Kompaktgerät bis zu Mehrachsen-Steuerung im 19-Zoll-Gehäuse zur Verfügung.

Präzise Positionierung mit dem SMC Controller

Abbildung 1 zeigt 100 nm Schritte eines Linearverstellers PLS-85 mit 2-Phasen-Schrittmotor ohne zusätzliche Positionsrückmeldung. Diese Schritte führt der Versteller sehr präzise aus.

Bei Kommandierung von 25-nm-Schritten (s. Abb. 2) treten mehr Variationen in den einzelnen Schritten auf. Im Mittel liegen die Abweichungen nur um ± 5 nm.

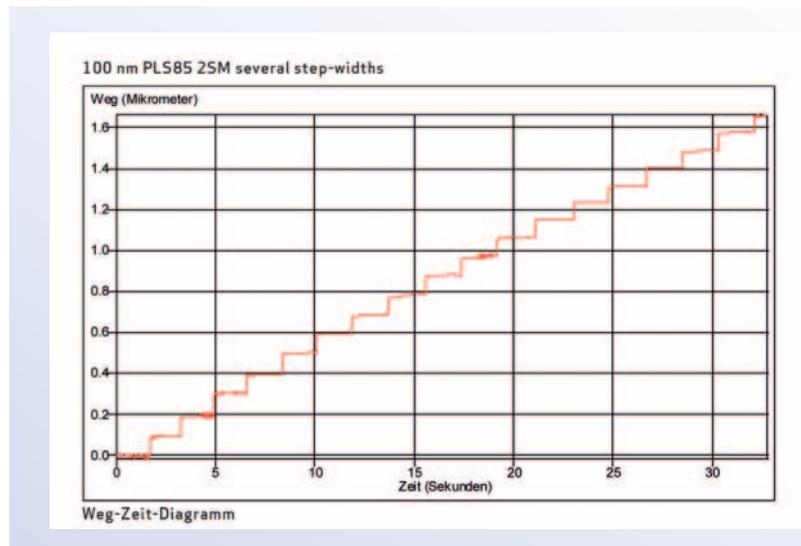


Abb. 1 PLS-85 mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung, 100 nm Schritte

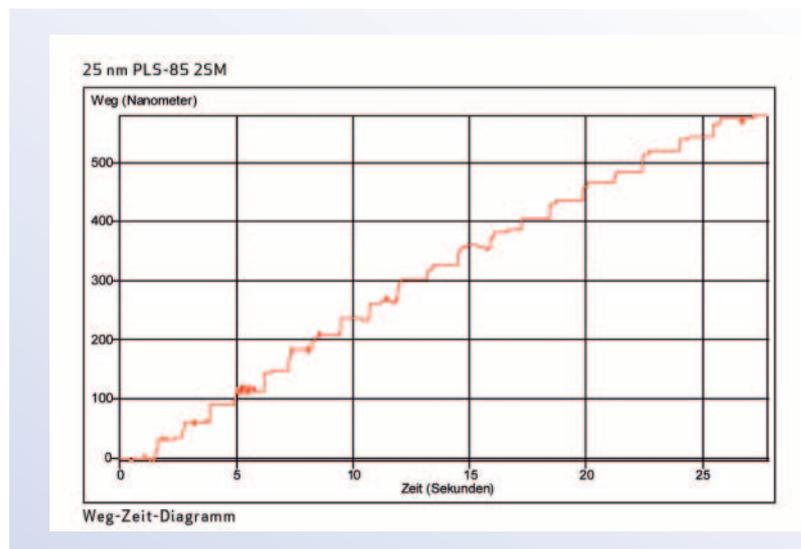


Abb. 2 PLS-85 mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung, 25 nm Schritte

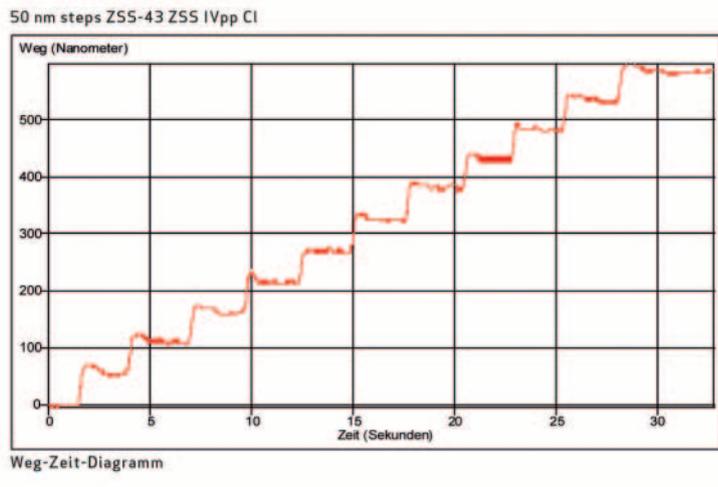


Abb. 3 LS-110 mit 2-Phasen-Schrittmotor in Regelung, 1 V-Spitze-Spitze Sensorsignal, 50 nm Schritte



Abb. 4 PLS-85 mit 2-Phasen-Schrittmotor in Regelung, Geschwindigkeit 100 nm/s

Positionierungsregelung

Das Positionsverhalten für kleine Schritte kann noch weiter verbessert werden durch die Verwendung einer Positionsregelung, insbesondere wenn zur Auswertung das analoge Ausgangssignal eines hochauflösenden Sensors verwendet wird.

SMC Controller können Sensorauflösungen bis 2 nm verarbeiten, die Positionsauflösung ist also nur durch den Sensor vorgegeben. Allerdings sind die Umgebungseinflüsse nicht zu vernachlässigen: Die Schwankung der Umgebungstemperatur um nur 0,01 °C bewirkt bereits eine thermisch bedingte Ausdehnung des Verstellers um etwa 10 nm. Bei Bedarf kommen Ultrapräzisionsversteller zum Einsatz oder spezifische Entwicklungen wie Versteller auf Granitbasis mit entsprechend hochauflösenden Linearencodern.

Abbildung 3 zeigt die gemessene kleinste Schrittweite eines LS-110 Verstellers mit Linearencoder. Die 50 nm Auflösung ist deutlich erkennbar in klar abgegrenzten Stufen. Selbst Lastwechsel beeinflussen diese Positionsgenauigkeit nicht.

Geschwindigkeitsregelung

Einer der bestimmenden Parameter für die Auswahl eines Positioniersystems ist die Geschwindigkeit. Oft geht es dabei um die höchste erreichbare Geschwindigkeit, aber einige Anwendungen erfordern eine speziell langsame und gleichmäßige Vorschubbewegung. Das ist sowohl für Schrittmotoren aber auch für DC-Motoren eine große Herausforderung.

Die Geschwindigkeitsregelung der SMC Controller erreicht eine hervorragende Geschwindigkeitskonstanz des Verstellers im Bereich von $\ll 1 \mu\text{m/s}$. Eine höhere Encoderauflösung verbessert die Ergebnisse noch weiter.

Abbildung 4 zeigt Messergebnisse eines PLS-85 Verstellers mit integriertem Linearencoder mit 10 nm Auflösung. Die Geschwindigkeit war auf 100 nm/s eingestellt, was einem Vorschub von 360 μm pro Stunde oder ca.

10 mm pro Tag entspricht. Die Bewegung ist sehr gleichmäßig. Die abgebildeten einzelnen Schritte sind auf die Interferometer-Auflösung von 5 nm zurückzuführen.

Korrektur der Positionsabweichung im Controller

Die Qualität der Führungen und des Antriebsstrangs limitiert normalerweise die erreichbare Positioniergenauigkeit. Eine Nichtlinearität der Spindelsteigung führt beispielsweise zu einer Abweichung von der kommandierten Position.

In einigen Anwendungen ist es wichtig, die absolute Positionsgenauigkeit zu verbessern, während die bidirektionale Wiederholgenauigkeit weniger relevant ist. Die Fehlerkorrektur im SMC Controller speichert die gemessene Abweichung und korrigiert dann die Zielposition entsprechend.

Abbildung 5 zeigt die Positionsabweichung von 32 µm zwischen Soll- und Ist-Position eines LS-180 über den Stellweg von 100 mm. Die Messung enthält beide Fahrrichtungen, die bidirektionale Wiederholgenauigkeit liegt im Mittel bei 1,78 µm.

Das Ergebnis zeigt Abbildung 6: Die Abweichung ist deutlich verringert und beträgt nur noch um ±1,5 µm. Die Wiederholgenauigkeit kann durch eine Positionsregelung weiter verbessert werden.

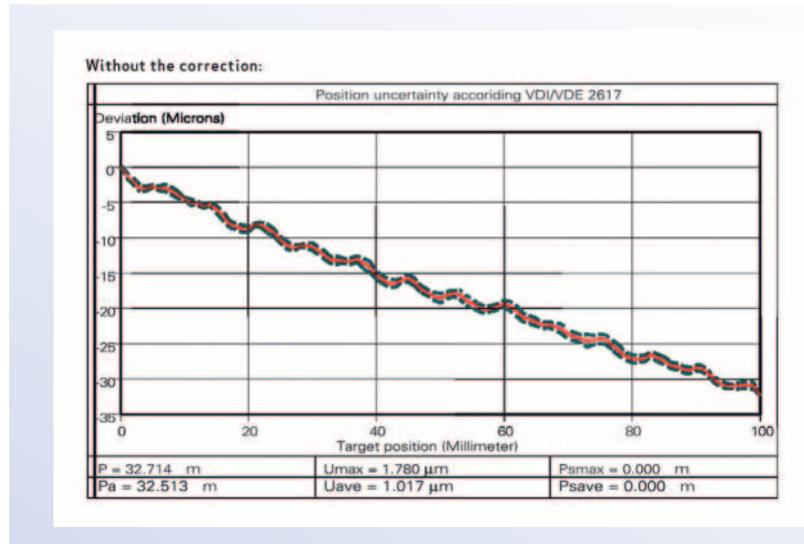


Abb. 5 LS-180 mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung, Positionsmessung

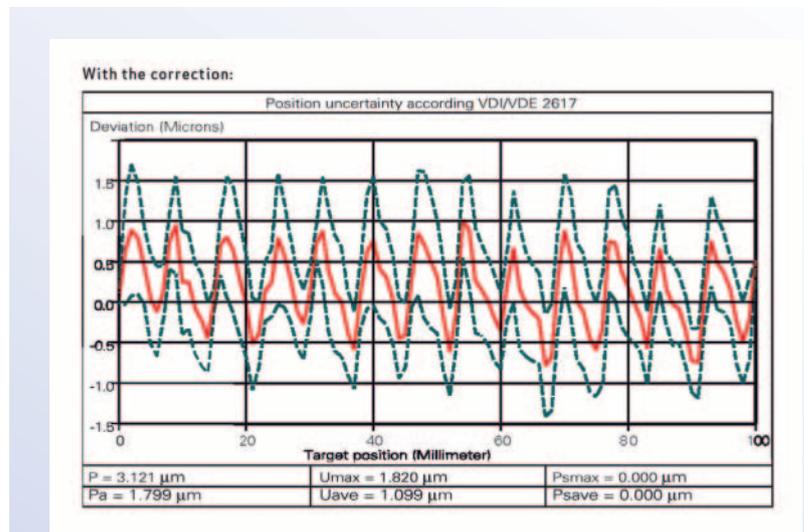
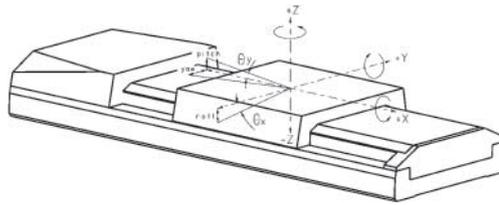


Abb. 6 LS-180 mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung, Positionsmessung mit Korrektur

Glossar



Absolute Genauigkeit

Die absolute Genauigkeit ist die maximale Differenz zwischen der Soll-Position und der Ist-Position. Die Genauigkeit wird durch Umkehrspiel, Hysterese, Drift, Nichtlinearität im Antrieb oder Messsystem, Verkipfung etc. begrenzt. Die höchste Genauigkeit kann mit Direktmetrologie-Messsystemen erreicht werden. Dabei wird z. B. mit einem Interferometer oder Linearcoder direkt die Position der Stellplattform gemessen, sodass mechanisches Spiel innerhalb des Antriebsstrangs keinen Einfluss auf die Positionsmessung hat. Systeme mit indirekter Metrologie (z. B. Rotationsencoder auf der Motorwelle) oder unregelmäßige, schrittmotorgetriebene Tische bieten deutlich schlechtere Absolutgenauigkeit. Unabhängig davon können sie trotzdem hohe Auflösungen und Wiederholbarkeiten erreichen.

Auflösung

Siehe "Rechnerische Auflösung" und "Kleinste Schrittweite".

Belastbarkeit

Maximale Belastbarkeit vertikal, wenn der Versteller horizontal montiert ist. Der Angriffspunkt der Last liegt in der Mitte der Plattform.

Betriebstemperaturbereich

Sicherer Betrieb, ohne Schaden für den Antrieb. Alle technischen Daten im Datenblatt beziehen sich auf Zimmertemperatur ($22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Bidirektionale Wiederholgenauigkeit

Die Genauigkeit, mit der jede Position innerhalb des Stellbereiches nach einer beliebigen Positionsänderung erneut angefahren werden kann. Effekte wie z. B. Hysterese und Umkehrspiel wirken sich direkt auf die bidirektionale Wiederholbarkeit aus, wenn das System nicht über „Direktmetrologie“ verfügt. Siehe auch "Unidirektionale Wiederholbarkeit".

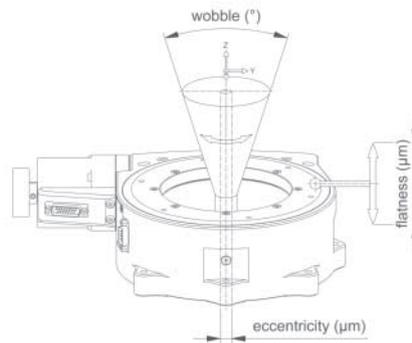
Cosinusfehler

Der Cosinusfehler ist ein akkumulativer Positionsfehler in Linearsystemen, der auftritt, wenn ein Winkelfehler zwischen dem Antrieb und der Stellplattform existiert. Der Positionsfehler errechnet sich aus dem Produkt der Positionsänderung und der Differenz zwischen 1 und dem Cosinus des Winkelfehlers.

Definition der Linear- und Drehachsen

- X: Linearbewegung in Richtung der Positionierung
- Y: Linearbewegung senkrecht zur X-Achse
- Z: Linearbewegung senkrecht zu X und Y
- θ_x : Drehung um X
- θ_y : Drehung um Y
- θ_z : Drehung um Z

Richtung der Achsen bei Linearversteller, siehe auch „Führungsgenauigkeit“



Begriffsdefinition beim Drehversteller: Tauteln (wobble), Ebenheit (flatness), Exzentrizität (eccentricity)

Druck-/Zugkraft, max.

Maximale Kraft in Bewegungsrichtung. Einige Versteller bringen evtl. höhere Kräfte auf, was die Lebensdauer beeinträchtigen kann.

Endschalter

Jeder Endschalter sendet sein Signal auf einer eigens zugewiesenen Leitung zum Controller. Der Controller sorgt dann für den Abbruch der Bewegung und verhindert so, dass der Versteller bis an den mechanischen Anschlag fährt und Schaden nimmt. PI Versteller sind mit mechanischen oder mit berührungslosen optischen oder Hall-Effekt-Endschaltern ausgestattet.

Exzentrizität

Die Abweichung von theoretischer und tatsächlicher Rotationsachse bei Drehverstellern.

Freiheitsgrad

Ein Freiheitsgrad entspricht einer aktiven Achse eines Positioniersystems. Ein XY-Positionierler hat zwei Freiheitsgrade, ein Hexapod sechs.

Führungsgenauigkeit, Führungsfehler

Der Führungsfehler beschreibt die Abweichungen der Stellplattform von der gewünschten Bahn senkrecht zur Stellrichtung, sowie die Verkipfung um die Achsen. Bei einem einachsigen Lineartisch sind das z. B. die unerwünschten Bewegungen in allen anderen fünf Freiheitsgraden. Für jede Translation in X treten auch lineare Komponenten in Y und Z und Verkipfungen um X (θ_x , Rollen), um Y (θ_y , Neigen) und um Z (θ_z , Gieren) auf. Führungsfehler werden durch das Führungssystem, die Montage des positioniertischen (Verspannungen) und die Last (z. B. Drehmomente) verursacht.

Geregelter Betrieb

Der Betrieb in Regelung erfordert die Auswertung eines Positionsmesssystems. Ein Regelalgorithmus vergleicht dann die kommandierte Soll- mit der gemessenen Ist-Position. Die Regelung sorgt für bessere Wiederholgenauigkeit und Positionsstabilität.

Geschwindigkeit, max.

Angegeben ist der kurzzeitige Spitzenwert bei horizontaler Montage, ohne zusätzliche Last. Dieser Wert ist nicht für den kontinuierlichen Betrieb geeignet. Durchschnitts- und Dauergeschwindigkeit sind niedriger als der Spitzenwert und hängen von den Randbedingungen der Anwendung ab. Daten für Vakuumversionen können abweichen.

Haltekraft, unbestromt

Piezomotor-Linearantriebe sind im Ruhezustand selbsthemmend, verbrauchen keinen Strom und erzeugen keine Wärme. Bei längerem Abschalten sinkt die Haltekraft, dies ist typisch für Piezomotoren. Die Daten geben die Mindesthaltekraft im Langzeitbetrieb an.

Hysterese

Die Hysterese ist ein Positionsfehler, der beim Umkehren der Stellrichtung auftritt. Sie kann durch elastische Deformation, wie reibungsbedingte Ver- und Entspannungen, verursacht werden. Die Hysterese eines Positioniersystems ändert sich meist mit der Belastung, Beschleunigung und Geschwindigkeit.

Kleinste Schrittweite

Die kleinste Bewegung, die wiederholbar durchgeführt werden kann, wird kleinste Schrittweite oder typische Auflösung genannt und wird durch Messungen ermittelt. Die Datentabelle enthält typische Messwerte.

Die kleinste Schrittweite unterscheidet sich meist stark von der "rechnerischen Auflösung", die numerisch wesentlich kleiner ausfallen kann. Wiederholbare Bewegungen im Nanometer- oder Sub-Nanometerbereich können mit Piezostelltechnik und reibungslosen Flexure Führungen durchgeführt werden.

Material

Mikropositioniertische sind normalerweise aus eloxiertem Aluminium oder rostfreiem Stahl gefertigt. Geringe Mengen anderer Materialien können enthalten sein, z. B. für Lager, Vorspannung, Kupplung, Montage, etc. Auf Wunsch können andere Materialien, wie z. B. unmagnetischer Stahl oder Invar verwendet werden.

Messwerte

Die Messwerte wie Umkehrspiel und Wiederholgenauigkeit werden nach der VDI-Norm 3114 ermittelt.

MTBF

“Mean Time Between Failure“. Maß für die Betriebsdauer und Zuverlässigkeit des Verstellers.

Neigen / Gieren

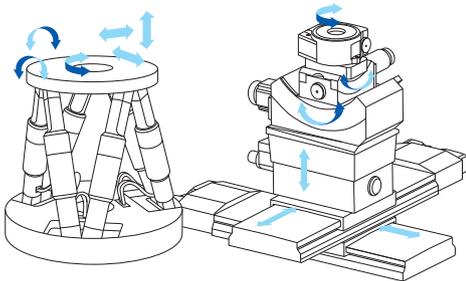
siehe Übersprechen

Orthogonalität

Siehe "Rechtwinkligkeit".

Parallele Kinematik

Mehrachsiges System, bei dem alle Aktoren direkt auf dieselbe bewegte Plattform wirken. Vorteile gegenüber serieller Kinematik sind ein geringeres Massenträgheitsmoment, keine bewegten Kabel, niedrigerer Schwerpunkt, keine Akkumulation von Führungsfehlern und ein kompakterer Aufbau.



Parallel- und seriellkinematischer Aufbau eines 6-Achsen-Positionierers im Vergleich

Präzision

Präzision ist ein nicht genau definierter Begriff und wird von verschiedenen Herstellern unterschiedlich für Wiederholbarkeit, Genauigkeit oder Auflösung verwendet. PI verwendet den Begriff im Sinne einer nicht quantifizierten hohen Genauigkeit.

Pulsweitenmodulation (PWM)

Der PWM-Modus ist ein hocheffizienter Verstärkerbetrieb, bei dem nicht die Amplitude des Ausgangssignales geregelt wird, sondern dessen Einschaltdauer. Siehe „DC-Motoren mit ActiveDrive“.

Querbelastbarkeit

Maximal zulässige Kraft orthogonal zur Stellrichtung. Dieser Wert gilt direkt für die bewegte Plattform und reduziert sich, wenn die Kraft oberhalb der Plattform angreift.

Rechnerische Auflösung

Die theoretisch kleinste Bewegung, die ein Positioniersystem durchführen kann, wird rechnerische Auflösung genannt. Dieser Wert darf nicht mit der kleinsten Schrittweite verwechselt werden.

Bei indirektem Positionsmessverfahren gehen in die Berechnung der Auflösung z. B. die Werte für die Spindelsteigung, Getriebeuntersetzung, Auflösung des Motors bzw. Sensors/Encoders etc. ein, sie liegt oft wesentlich unter der kleinsten Schrittweite der Mechanik. Bei direkten Messverfahren wird die Auflösung des Sensorsystems angegeben.

Rechtwinkligkeit, Orthogonalität

Die Rechtwinkligkeit beschreibt die Abweichung vom idealen 90° Winkel der X, Y und Z Bewegungsachsen.

Referenzschalter

Viele Versteller verfügen über einen richtungserkennenden Referenzschalter ungefähr in der Mitte des Stellbereichs. Für die beste Wiederholbarkeit des Positionierens empfiehlt es sich, den Referenzschalter immer von derselben Seite anzufahren.

Sensorauflösung

Rotationsencoder: Impulse pro Spindeldrehung
Linearencoder: Kleinste Bewegung, die vom verwendeten Sensorsystem noch detektiert wird

Serielle Kinematik

Mehrachsiges System, bei dem alle Aktoren auf eine eigene Stellplattform wirken. Vorteile sind einfacher mechanischer Aufbau und Kontrollalgorithmen. Nachteile gegenüber paralleler Kinematik sind schlechtere dynamische Eigenschaften, keine integrierte Parallelmetrologie möglich, Akkumulation von Führungsfehlern, geringere Genauigkeit.

Stellweg

Der maximal mögliche Stellweg wird durch die Länge der Antriebsspindel begrenzt. Falls vorhanden, bestimmt der Abstand der Endschalter den Stellbereich.

Stick-Slip-Effekt, Reibung

Dieser Effekt begrenzt die kleinste Schrittweite. Er tritt beim Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung auf und bewirkt einen Bewegungssprung. Reibungsfreie Antriebe, wie z. B. Piezoaktoren mit Flexure Festkörperführungen, werden vom Stick-Slip-Effekt nicht beeinträchtigt und ermöglichen deshalb Auflösungen im Sub-Nanometerbereich.

Taumelfehler

Der Taumelfehler beschreibt bei Rotationstischen das unerwünschte Verkippen um die Drehachse je voller Umdrehung.

Übersprechen:

Neigen / Gieren, Geradheit / Ebenheit

Über den gesamten Stellweg gemessene Abweichung von der idealen, geraden Bewegung als

Verkipfung um die Y- (Neigen) und Z-Achse (Gieren), wobei die Bewegung in X-Richtung erfolgt (rechtwinkliges Koordinatensystem). Die Datentabelle enthält typische Messwerte als +/- Werte.

Geradheit (bezogen auf Z) und Ebenheit (bezogen auf Y) beziehen sich auf die entsprechende Absolutabweichung und werden in μm angegeben.

Umkehrspiel

Der Positionierfehler, der bei einer Richtungsänderung auftritt, wird Umkehrspiel genannt. Er wird durch mechanisches Spiel im Antriebsstrang, z. B. in Lagern oder Getrieben, und durch Reibung der Führungen verursacht. Im Gegensatz zur Hysterese kann Umkehrspiel in positionsgeregelten Systemen zur Instabilität führen, da es für eine Totzeit im Regelkreis sorgt. Das Umkehrspiel hängt ab von Temperatur, Beschleunigung, Belastung, Spindelposition, Stellrichtung, Abnutzung usw.

Umkehrspiel wird unterdrückt durch Vorspannung des Antriebsstrangs. Ein Positionsmessverfahren, das die Position der Plattform direkt misst, eliminiert sämtliche Fehler aus dem Antriebsstrang (Direktmetrologie).

Die Datentabelle enthält typische Messwerte. Daten für Vakuumversionen können abweichen.

Ungeregelter Betrieb

Betrieb ohne Auswertung eines Positionssensors und Regelkreis. Versteller mit Schrittmotoren führen präzise und wiederholbare Schritte aus und benötigen daher keine Regelung. Die Regelung sorgt für bessere Wiederholgenauigkeit und Positionsstabilität.

Unidirektionale Wiederholgenauigkeit

Die Genauigkeit, mit der jede Position innerhalb des Positionierbereichs nach einer beliebigen Positionsänderung aus der gleichen Richtung wieder angefahren werden kann. Weil Hysterese und Umkehrspiel nur einen geringen Einfluss auf die unidirektionale Wiederholbarkeit haben, ist dieser Wert meist deutlich besser als die "Bidirektionale Wiederholbarkeit".

Patente

Folgende produktbezogenen Patente werden von PI gehalten. Sie dienen dem Schutz der Technologie und gewährleisten den technologischen Vorsprung.

In Produktbeschreibungen und -beschriftungen wird auf die auf das Produkt zutreffenden Patente verwiesen. Dieses ist in Teilen der Welt erforderlich, um den Patentschutz aufrecht zu erhalten.

Patent	Zugeteilt am	Betrifft die Produkte
Deutsches Patent Nr. 10021919	08.08.2001	PICMA [®] , P-88x, alle Produkte, die PICMA [®] verwenden
Deutsches Patent Nr. 10234787	30.10.2003	PICMA [®] , P-88x
Deutsches Patent Nr. 10348836	08.11.2004	PICMA [®] , P-88x
US Patent Nr. 7,449,077	08.11.2008	PICMA [®] , alle P-5xx, P-6xx, P-7xx, P-8xx, P-9xx
Deutsches Patent Nr. 29618149,8	05.12.1996	F-206, F-206.S, H-206
US Patent Nr. 6,765,335 Deutsches Patent Nr. 10154526	20.04.2004 08.02.2007	PILine [®] , M-663, M-664, M-272, M-683, M-686, M-687, P-661, U-161, U-164, U-264, U-628
US Patent Nr. 6,800,984 Deutsches Patent Nr. 10148267	05.10.2004 24.11.2005	NEXLINE [®] , P-911, N-111, N-216
US Patent Nr. 6,950,050	27.09.2005	HyperBit
Deutsches Patent Nr. P4408618.0 Europäisches Patent 0 624 912 B1	22.04.2004 22.01.1997	NEXACT [®] N-310, N-381, N-664, LPS-24, LPS-65
Deutsches Patent Nr. 102004011724	10.08.2006	P-712, P-713
Deutsches Patent Nr. 10051784 US Patent Nr. 6,930,439	14.08.2002 16.08.2005	P-876 DuraAct
Deutsches Patent Nr. 19825210C2 Internationales Patent Nr. 1080502B1 US Patent Nr. 6617754B1	25.09.2003 10.07.2002 09.09.2003	E-481, E-482, E-504, E-617

Impressum

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

Auf der Römerstrasse 1
D-76228 Karlsruhe

Tel.: +49 0721 4846-0
Fax: +49 0721 4846-1019
info@pi.ws
www.pi.de

Geschäftsführung: Dr. Karl Spanner (Vors.), Norbert Ludwig, Dr. Peter Schittenhelm, Markus Spanner

Reg.-Gericht Mannheim: HRA 104804
Umsatzsteuer-Identifikationsnummer: DE 1431 828 03
Altgeräte Registrierungsnummer (WEEE-Reg.-Nr.): DE 93978928

Persönlich haftende Gesellschafterin: Physik Instrumente (PI) Verwaltungs GmbH
Reg.-Gericht Mannheim: HRB 109941

Obwohl bei der Zusammenstellung der Informationen mit größter Sorgfalt vorgegangen wurde, können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Garantie für die Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität wird nicht übernommen. Abbildungen können abweichen und stellen keine zugesicherten Eigenschaften dar. PI behält sich das Recht vor, Ergänzungen oder Änderungen der bereitgestellten Informationen ohne Vorankündigung vorzunehmen.

Eingetragene Warenzeichen

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

PI[®], PIC[®], PICMA[®], PILine[®], PIFOC[®], PiezoWalk[®], NEXACT[®], NEXLINE[®], PInano[®], NanoCube[®], Picoactuator[®], Nanoautomation[®], NEXSHIFT[®], PicoCube[®], PiezoMove[®], PIMikroMove[®]

Die folgenden aufgeführten Firmennamen oder Marken sind eingetragene Warenzeichen ihrer Inhaber:

µManager, LabVIEW, Leica, Linux, MATLAB, MetaMorph, Microsoft, National Instruments, Nikon, Olympus, Windows, Zeiss

CAT130D 05/2013.7500 © Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2013. Änderungen vorbehalten.

Alle Texte, Graphiken, Daten und deren Darstellung unterliegen dem Schutz des Urheberrechts und anderer Schutzgesetze. Kopie, Veränderung, Weiterverbreitung sind ohne schriftliche Genehmigung von PI nicht zulässig.

**Physik Instrumente (PI)
GmbH & Co. KG**
Auf der Roemerstr. 1
76228 Karlsruhe
Germany
Tel. +49 (721) 4846-0
Fax +49 (721) 4846-1019
info@pi.de
www.pi.de

GERMANY

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

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

USA (East) & CANADA

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) & MEXICO

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.
Business Center Bldg. 5F
2-38-5 Akebono-cho
Tachikawa-shi, Tokyo 190-0012
Tel. +81 (42) 526 7300
Fax +81 (42) 526 7301
info@pi-japan.jp
www.pi-japan.jp

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

UK & IRELAND

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

ITALY

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

FRANCE

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

CHINA

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

SOUTH EAST ASIA

**PI (Physik Instrumente)
Singapore LLP**
20 Sin Ming Lane
#05-60 Midview City
Singapore 573968
Tel. +65 665 98400
Fax +65 665 98404
info-sg@pi.ws
www.pi-singapore.sg
For ID / MY / PH / SG / TH

KOREA

PI Korea Ltd.
6F Jeongu Bldg.
Cheonho-Daero 1111
Gangdong-gu
138-814 Seoul
Tel. +82 (2) 475-0060
Fax +82 (2) 475-3663
info-kr@pi.ws
www.pi-korea.ws