

Piezoverstärker und Controller

STANDARD- UND OEM-LÖSUNGEN

SCHNELL



PRÄZISE



INDIVIDUELL



Inhalt

Piezotechnologie und Präzisionspositionierung	
Precision Motion Control für Industrie und Forschung	3
Standardisierte Messprotokolle	4
Service: Kundenspezifische Entwicklungen, Zertifizierung, Updates, Support	4
Stabilität und Präzision	
Piezoverstärker und -controller für die Nanopositionierung	5
Produktbeispiele	6
Besondere Piezoaktoren? Verstärker und Controller für ...	
Flächenwandler, Biegeaktoren, Scheraktoren	8
Hochvolt-Hochlastaktoren, bipolare Ansteuerung	9
Biegelemente, Auswertung von piezoresistiven Sensoren, Shaker- und Pumpanwendungen	10
Dynamik und Präzision für Schaltanwendungen	11
Leistungstarkes Doppel für Daueranwendungen	11
Lösungen für dynamische Daueranwendungen	
Geschaltete Verstärker mit Energierückgewinnung	12
Produktbeispiele	13
Linearisierter Verstärker für Piezoauslenkung ohne Hysterese	
Digitalcontroller – Präzision, Dynamik und Bedienkomfort	
Digitale Datenverarbeitung	15
Produktübersicht und Systeme	16
„High-End“ oder „Low-Cost“? Controller-Performance nach Maß	17
Digital spezial – für Piezoschreit- und Ultraschallantriebe	18
Auswahlkriterien für Piezoverstärker und -controller von PI	19

Piezotechnologie und Präzisionspositionierung

PRECISION MOTION CONTROL FÜR INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Piezo, Nano, Positioning

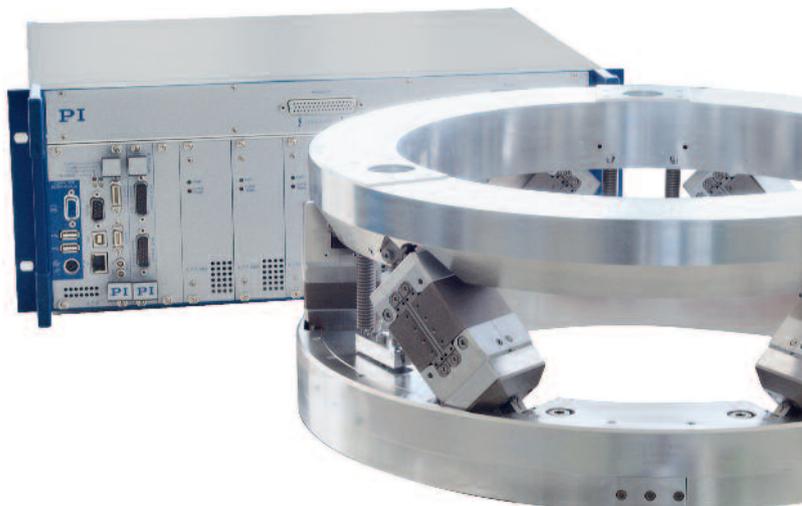
PI bietet für die Präzisionspositionierung im Genauigkeitsbereich von einem Mikrometer bis unter einen Nanometer das weltweit breiteste Spektrum an Positionier- und Antriebssystemen.

Piezoaktorik kommt in den unterschiedlichsten Integrationsstufen zum Einsatz, sei es als Direktantrieb oder mit Hebelübersetzung für größere Stellwege, in ein- und mehrachsigen Positionierern, mit und ohne Positionsmessung. Piezoschreit- und Ultraschallantriebe wie auch klassische Motoren und die Kombination aus alledem ermöglichen es PI, maßgeschneiderte Positioniersysteme anzubieten. Die Anforderungen in der Biotechnologie, Halbleiterfertigung, optischen Messtechnik oder Astronomie haben dabei eines gemeinsam: Die hohe geforderte Präzision und PI als Anbieter der Lösung.

So flexibel wie der Antrieb: Die Steuerung

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.

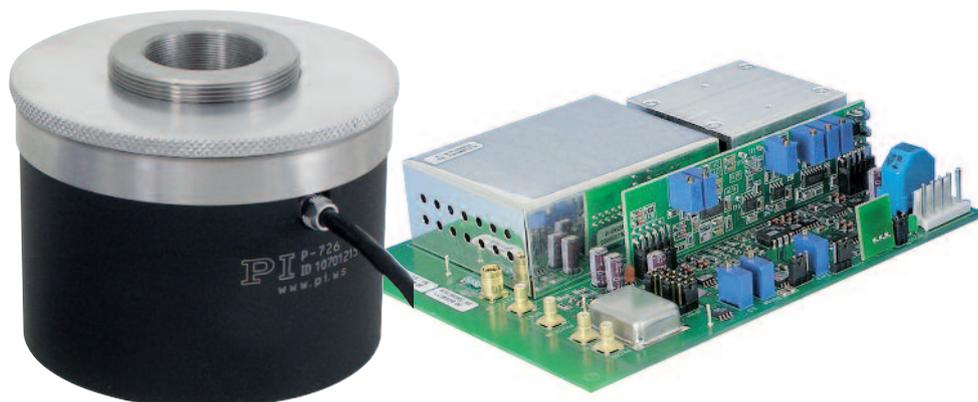


Modulare, digitale Mehrachsensteuerungen mit integrierter Koordinatentransformation erleichtern die Bedienung komplexer parallelkinematischer Systeme, wie hier dieses Hexapoden mit NEXLINE® Piezoschreitantrieben.

Sicherheit, Qualität und Verantwortung

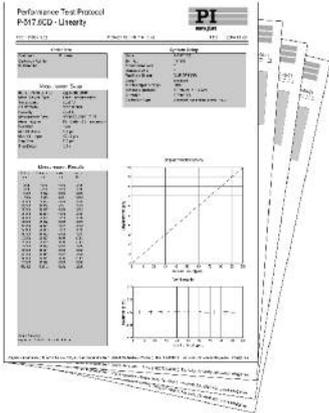
Die Zertifizierung eines Qualitätsmanagementsystems ist für PI eine Verpflichtung zur kontinuierlichen Verbesserung von Produkten und Prozessen. Lieferanten werden in den Entwicklungsprozess mit eingebunden, um die hohen PI Standards auf diese zu übertragen. Die Qualifikation der eigenen Mitarbeiter in Entwicklung und Fertigung, der Unterhalt von Laboren für EMV-Gerätesicherheits- und Umwelttests wie auch die Verwendung neuester CAD- und Simulationstools sind Folge der unbedingten Verpflichtung von PI zur Qualität. Eine Verpflichtung, an der in der Nanotechnologie kein Weg vorbei führt.

Alle PI Produkte unterliegen einem kontinuierlichen Pflege- und Weiterentwicklungsprozess, der zur ständigen Verbesserung dient. Schlanke Produktionsprozesse sorgen mit dem **Integrierten Managementsystem** (Zertifizierung nach ISO 9001, ISO 14001 und OHSAS 18001) für hohe Liefertreue und Qualität „made in Germany“.



Hochdynamische PIFOC® Objektiv-Scanner und OEM-Controller. 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.

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



PI Nanopositioniersysteme werden vor der Auslieferung getestet, das Protokoll hierüber ist Teil des Lieferumfangs.

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.



Service

Kontakt

Bei weiteren Fragen wenden Sie sich gerne an uns unter info@pi.ws und info@piceramic.de.

Unsere technisch versierten Vertriebsmitarbeiter verfügen über viel Applikationswissen und bieten Ihnen sachkundige Beratung.

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, gehäuseten System

- Fertigung in kleinen Stückzahlen wie auch in großen Serien
- Die Entwicklung anhand spezieller Produktnormen (landes- oder marktspezifische Standards wie z. B. Medizinproduktegesetz) und die entsprechende Zertifizierung
- Anpassung der Systeme an spezielle Umgebungsbedingungen (Vakuum, Weltraum, Reinraum)
- Copy-Exactly Vereinbarungen

Die aktuellen Versionen von **Firmware, Software** und **Bedienungsanleitungen** stehen kostenlos im Internet zur Verfügung. Firmwareupdates sind einfach über die Standard-schnittstellen 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.

Selbstverständlich ist die PI Software für die neuesten Betriebssysteme von Microsoft wie auch für den Betrieb unter LINUX ausgelegt.

Stabilität und Präzision

PIEZOVERSTÄRKER UND -CONTROLLER FÜR DIE NANOPositionIERUNG

Hohe Stellkräfte und schnelles Ansprechen sind charakteristische Eigenschaften von Piezoaktoren. Elektrisch betrachtet entspricht ein Piezoelement einer Kapazität. Eine schnelle Änderung der Betriebsspannung bewirkt eine schnelle Auslenkung des Aktors und damit eine Positionsänderung. Bei plötzlichem Anstieg der Steuerspannung kann der Piezoaktor seine nominale Auslenkung in wenigen Mikrosekunden erreichen. Voraussetzung dafür ist, dass die Spannungsquelle genügend Strom liefert, um die Kapazität zu laden. Im statischen Betrieb, also beim Halten einer bestimmten Position, ist zudem die Stabilität der Spannungsquelle entscheidend. Ein Rauschen oder Driften gilt es so weit wie möglich zu vermeiden.

Verstärkerelektronik bestimmt Positioniergenauigkeit und Dynamik

Die Ansteuerlektronik spielt damit eine Schlüsselrolle für die Leistungsfähigkeit von Piezoaktoren und Nanopositioniersystemen oder Kippspiegeln, die auf piezoelektrischen Aktoren basieren. Man braucht hochstabile Verstärker, da piezoelektrische Aktoren bereits auf die geringste Spannungsänderung mit einer Bewegung reagieren. Die Eigenschaften der verwendeten Verstärkerelektronik bestimmen damit wesentlich die Positioniergenauigkeit und Dynamik, die ein piezogetriebenes Nanopositioniersystem erreichen kann.

Präzision in der Positionierung oder Schaltfunktion:

Mit oder ohne geschlossenen Regelkreis

Gleichzeitig muss man bei der Auswahl einer passenden Verstärkerelektronik berücksichtigen, dass bei Piezoaktoren der Zusammenhang zwischen Spannungsanstieg und Positionsänderung nicht linear ist. Bei vielen Anwendungen spielt das jedoch keine Rolle. So kommen Schaltanwendungen, z. B. bei Einspritzventilen, gut ohne geschlossenen Regelkreis zurecht. Anders sieht das bei präzisen Positionieraufgaben aus. Hier müssen nichtlineare Eigenschaften wie Hysterese, Lastschwankungen und Drifteffekte durch den Vergleich der Positionsvorgabe (Sollwert) mit der vom Sensor gemessenen Position (Istwert) ausgeglichen werden. Posi-

Flexibilität durch modulares Design



Bis zu drei Verstärkermodule können in einem E-500 Chassis eingebaut werden. Optional können ein Servocontrollermodul für den positionsgeregelten Betrieb oder ein Display- und Interfacemodul einfach installiert werden.

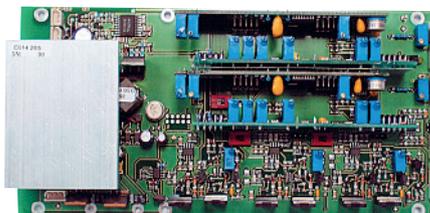


Das leistungsfähige Piezoverstärkermodul E-505 kann Spitzenströme von 2 A in einem Spannungsbereich von -30 bis 130 V abgeben und aufnehmen.

Piezoverstärker und Controller bieten:

- Hohe Linearität
- Positionierung mit Sub-Nanometergenauigkeit
- Hohe Langzeitstabilität
- Rauschen um 1 mV (RMS-Wert)
- Niedrige Leistungsaufnahme
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- Analoge Schnittstellen zur schnellen, direkten Kommandierung in Echtzeit
- Kurzschlussfestigkeit

tionsgeregelte Piezo-Positioniersysteme von PI ermöglichen beispielsweise Wiederholgenauigkeiten bis in den Sub-Nanometerbereich, eine Nichtlinearität unter 0,01 % und Bandbreiten bis 10 kHz.



PI bietet Piezoverstärker in den unterschiedlichsten Formaten: Karten, OEM- und Tischgeräte, sowie spezielle Anpassungen für den Kunden.





Produktbeispiele für analoge Elektroniken

Da die Anforderungen applikationsbedingt hinsichtlich Genauigkeit, Spitzenstrom und -spannung, Dynamik und Linearität differieren, gibt es keine Universal-Ansteuerelektronik, die sich für alle Anwendungsbereiche gleich gut eignet. PI bietet deshalb eine große Auswahl digitaler und analoger Piezolinerverstärker und Piezocontroller an.

Hochauflösende Signalverarbeitung in Echtzeit

Der hochdynamische Betrieb von Piezoaktoren verlangt ein rasches Umladen ihrer Kapazitäten und damit sehr große Spitzenströme. Für zahlreiche Anwendungen, ange-

fangen vom hochdynamischen Schaltbetrieb bis hin zum geregelten Positionierbetrieb, liefern analoge Piezoverstärker und Controller aus dem PI-Programm beste Voraussetzungen. Sie erfordern keine Analog-Digital-Wandlung und bieten daher hochauflösende Signalverarbeitung in Echtzeit. Verschiedene Bauformen, Ausgangsspannungen von 130 V bis 1100 V, unterschiedliche Bandbreiten und Schnittstellen sorgen dafür, dass sich für jede Applikation eine maßgeschneiderte Lösung finden lässt, abgestimmt auf die eingesetzte Piezoaktorik. Herzstück dieser Systeme ist eine besonders rauscharme und hochlineare Verstärkerelektronik.

Einkanaliger Controller E-610

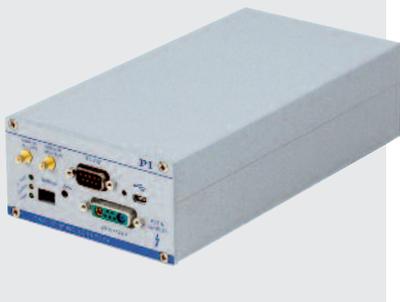
Die Piezoverstärker / Servocontroller E-610 verfügen über einen rauscharmen integrierten Piezoverstärker, der Spitzenströme von 180 mA im Niederspannungsbereich abgeben und aufnehmen kann.

- Preisgünstige einkanalige OEM-Lösung
- Ungeregelte Versionen oder Positionsregelung für DMS- & Kapazitivsensoren
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- 18 W Spitzenleistung

Controller E-625 mit analoger und digitaler Schnittstelle

Der einkanalige Piezoverstärker / Servocontroller E-625 ist mit RS-232 und USB-Rechnerschnittstellen und hochauflösenden 24-Bit-Wandlern ausgestattet. Der rauscharme Verstärker kann Spitzenströme von 120 mA abgeben und aufnehmen. Je nach Ausführung arbeitet der Servocontroller mit einem DMS- oder Kapazitivsensor.

- Integrierte 24-Bit USB-Schnittstelle
- Bis zu 12 Kanäle vernetzbar
- 12 W Spitzenleistung
- Positionsregelung für DMS- & Kapazitivsensoren
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- Interne Tabelle speichert benutzerdefinierte Kurven
- Zusätzliche breitbandige Anlogschnittstelle



Servocontroller OEM-Sondermodell mit Positionsregelung

Gezielt angepasst auf die Applikation: kleiner verfügbarer Bauraum und Schnittstellen nach Kundenwunsch. Die Funktionalität ist vom Standardmodell E-610 abgeleitet.

- Preisgünstige 1-Kanal OEM-Lösung
- Fixe Notchfilter für höhere Bandbreite
- Positionsregelung für DMS-Sensoren
- 8 W Spitzenleistung
- Stromversorgung (Power Supply) auf der Platine integriert
- Leistungssteigerung möglich



Leistungsfähiges Computerinterface, vernetzbar

Das einkanalige Piezoverstärker-/Servocontrollermodul E-621 ist mit RS-232 und USB-Rechnerschnittstellen und hochauflösenden 24-Bit-Wandlern ausgestattet. Der rauscharme Verstärker kann Spitzenströme von 120 mA abgeben und aufnehmen. Je nach Ausführung arbeitet der Servocontroller mit einem DMS- oder Kapazitivsensor.

- Analoge Elektronik mit digitalen Schnittstellen
- Ein einziges Interface zum Host für mehrere Kanäle

- Modularer Aufbau
- Integrierte 24-Bit USB-Schnittstelle
- Bis zu 12 Kanäle in einem Rack vernetzbar
- Bis zu 12 W Spitzenleistung
- Positionsregelung für DMS- & Kapazitivsensoren
- Notchfilter für höhere Bandbreite
- Zusätzliche breitbandige Anlogschnittstelle
- Interne Tabelle für benutzerdefinierte Kurven

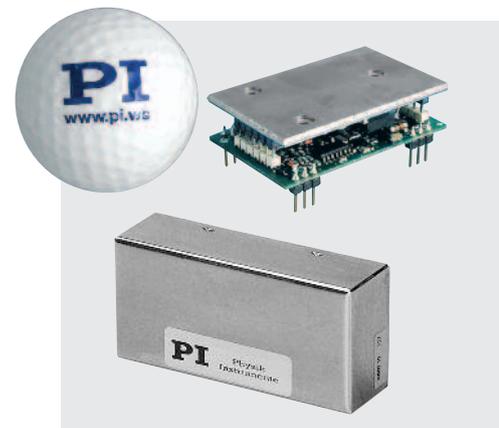


Miniatur-Modul E-831

- Ungeregelte Ansteuerung
- separate Stromversorgung für bis zu drei Elektroniken mit bis zu -30 / +130 V Ausgangsspannung
- Bandbreite bis zu mehreren kHz
- Für Kapazitäten bis zu 20 μF

OEM-Modul E-660 für quasistatische Ansteuerung

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

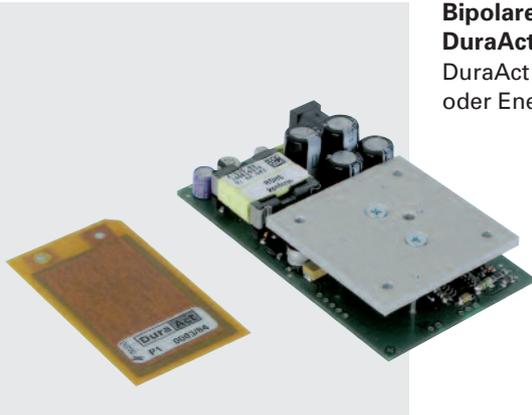


Besondere Piezoaktoren?

VERSTÄRKER UND CONTROLLER FÜR FLÄCHENWANDLER, BIEGEAKTOREN, SCHERAKTOREN

Bipolarer Betrieb für piezoelektrische DuraAct Flächenwandler

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



- OEM-Modul E-835
- Spitzenleistung bis 30 W
- Ausgangsspannungsbereich -100 bis +250 V
- Kompakt: 87 x 50 x 21 mm
- Hohe Bandbreite bis über 4 kHz

Piezoverstärker E-413 für DuraAct und PICA Shear

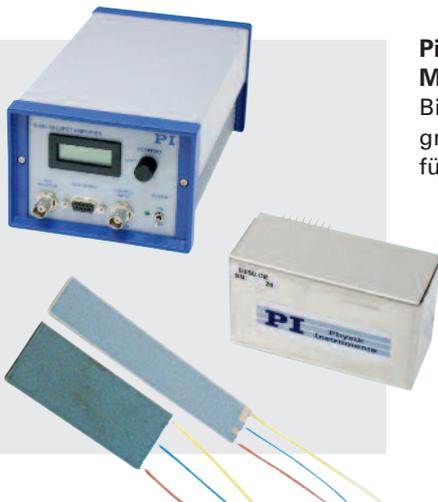
Scheraktoren bieten hohe Linearität, hohe Steifigkeit und Dynamik.



- Ausgangsspannungsbereich bis -100 bis +400 V oder $\pm 250V$
- Spitzenleistung bis 50 W
- OEM-Modul und Tischgerät für PICA Shear Scherpiezoaktoren
- OEM-Modul für piezoelektrische DuraAct Flächenwandler

Piezoverstärker E-650 für Multilayer-Biegeaktoren

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



- Speziell für den Betrieb von dynamischen Multilayer-Piezobiegeaktoren ohne Positionssensor
- Ausgangsspannungsbereich 0 bis 60 V
- Zweikanalige Tischausführung oder OEM-Version zum Auflöten auf Platine
- Bis zu 18 W Spitzenleistung

Besondere Piezoaktoren?

VERSTÄRKER UND CONTROLLER FÜR HOCHVOLT-HOCHLASTAKTOREN, BIPOLARE ANSTEUERUNG

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

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

- Spitzenleistung 550 W
- Ausgangsspannungsbereich 3 bis 1100 V oder bipolar
- Optional: Positionsregelung, digitale Schnittstellen, Display



PicoCube® Piezocontroller E-536: Hohe Dynamik und Auflösung in bis zu drei Achsen

PicoCube® Scanner und Positioniersysteme bieten Subnanometergenauigkeit in bis zu drei Achsen, z. B. für die Rasterkraftmikroskopie.

- Ausgangsspannung -250 / +250 V, für PicoCube® Systeme P-363
- Varianten:
 - Spitzenleistung bis 3 x 100 W für hochdynamischen Betrieb
 - Minimales Rauschen unter 3 mV_{pp} für hochauflösende Positionierung



Mehrkanaliger Verstärker E-616 für Piezo-Kippspiegel

Schnelle Verkippung um zwei Achsen und Linearverstellung für die Laserstrahlsteuerung.

- OEM-Elektronik mit Koordinatentransformation
- Drei integrierte Verstärker liefern bis zu 10 W Spitzenleistung
- Geregelte und unregelte Versionen
- Regelung für parallelkinematische Designs (Drei- und Vierbeine)
- Kompaktes, kostengünstiges OEM-Design oder Tischgerät
- Integrierte Stromversorgung (Power Supply)



Besondere Piezoaktoren?

VERSTÄRKER UND CONTROLLER FÜR BIEGELEMENTE, AUSWERTUNG VON PIEZORESISTIVEN SENSOREN, SHAKER- UND PUMPANWENDUNGEN

Plnano® Piezocontroller E-545

Plnano® Positioniersysteme für die hochauflösende Mikroskopie bieten sowohl Grob- als auch Feinverstellung.



- 3 Kanäle mit 14 W Spitzenleistung
- USB-Schnittstelle
- TCP/IP, USB und RS-232 Schnittstellen
- Rauscharme 24 Bit D/A Wandler
- 25 kHz Sample Rate
- Notchfilter für höhere Bandbreiten
- Funktionsgenerator mit programmierbaren Triggerein- und -ausgängen
- Integrierte Linearisierung für piezoresistive Sensoren

OEM-Shakerelektronik für Ultraschallwandler

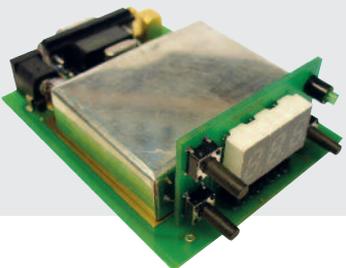
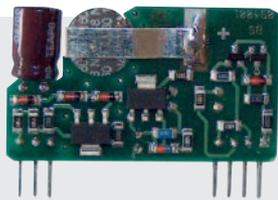
Je nach benötigtem Hub kann der Spannungsbereich angepasst werden.



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

Mikropumpen antreiben

Piezoelemente sind ideale Antriebe für miniaturisierte Pump- und Dosiersysteme.



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

Dynamik und Präzision für Schaltanwendungen

SCHNELLE ANSTIEGSZEITEN DURCH HOHE STRÖME

Schnelle Schaltzyklen erfordern sehr dynamische Lade- und Entladevorgänge der Piezokapazität im Bereich von einigen zehn Kilohertz. Allein die Lade- bzw. Entladezeit, die die Elektronik bewältigt, begrenzt die Dynamik. Entsprechend hohe Ströme sorgen für schnelle Anstiegs- und Abfallzeiten im Bereich von einigen zehn Mikrosekunden. Je nach geforderten Wiederholraten sind verschiedene Leistungsklassen verfügbar.

Der Piezoaktor erwärmt sich, wenn er im dynamischen Betrieb dauerhaft hohen Strömen unterworfen ist. PI empfiehlt für solche Einsätze die Verwendung eines Temperatursensors am Aktor. Die Spannungszufuhr wird dann automatisch unterbrochen, wenn eine bestimmte Temperaturschwelle überschritten wird.

Für das **modulare Piezocontrollersystem E-500** ist der Verstärker E-505.10 verfügbar, der speziell für hochdynamische Schaltanwendungen optimiert wurde. Der integrierte rauscharme Verstärker liefert Spitzenströme bis zu 10 A im Spannungsbereich von -30 bis +130 V.

Technische Daten:

- 1000 W Spitzenleistung mit 10 A Spitzenstrom
- Kleinsignalbandbreite >15 kHz
- Rauschen 1,0 mV rms
- Positionsregelung (optional)
- Digitale Ansteuerung über schnelles Interfacemodul (optional)



Leistungsstarkes Piezoverstärkermodul E-505.10

Leistungsstarkes Doppel für Daueranwendungen

Daueranwendungen wie beispielsweise in Prüfeinrichtungen für Einspritzventile stellen besonders hohe Anforderungen an die Dynamik. Das modulare System E-618 bietet eine Reihe von Optionen für die optimale Einrichtung solcher Applikationen. Bei einer Spitzenleistung von 3200 W und Spitzenströmen bis zu 20 A ist eine Bandbreite von 15 kHz möglich. Weiterer Bestandteil ist eine Auswertung für einen Temperatursensor am Aktor. Der Verstärker kann durch Einschubmodule zum Piezocontroller mit Positionsregelung erweitert werden. Digitale Schnittstellen sind optional erhältlich.

Aktoren für hochdynamische Anwendungen

Die Bewegung bzw. Auslenkung des Piezoaktors basiert auf reinen Festkörpereffekten. Die erzielbare Dynamik ist daher meist nicht durch den mechanischen Aufbau begrenzt, sondern durch die Elektronik. Dauerhafter Betrieb mit hohen Leistungen und hoher Dynamik erfordert dennoch eine entsprechende Verkabelung und Kontaktierung. PICMA® Aktoren mit patentierten, mäander-

förmigen Außenelektroden sorgen für eine gleichmäßige Zuleitung des elektrischen Stromes zu den Innenelektroden. Die Kontaktierung bleibt selbst bei hohen Strömen bis zu 20 A elektrisch stabil und mechanisch flexibel, und unterstützt damit eine besonders dynamische Ansteuerung.



PICMA® Aktoren mit patentierten, mäanderförmigen Außenelektroden für bis zu 20 A Ladestrom

Piezoaktor mit integrierter Vorspannung für bis zu 300 N Zugbelastbarkeit, Spülluft- und Temperatursensoranschluss. Stellweg 10 µm bei bis zu 7 kHz



Anwendungsbeispiele

- Materialprüfung und Präzisionsmaschinenbau
- Shock Tests
- Maschinenprüfung
- Schaltanwendungen
- Beschleunigungstests
- Strukturanalyse
- Aktive Schwingungsdämpfung
- Einspritzventilsteuerung



Hochleistungs-Piezoverstärker E-618

Lösungen für dynamische Daueranwendungen

GESCHALTETE VERSTÄRKER MIT ENERGIERÜCKGEWINNUNG

Häufig werden Piezoaktoren für eine besonders präzise Materialbearbeitung eingesetzt, zum Beispiel im Maschinenbau zur Feinpositionierung in Fräs- und Spanmaschinen. 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's Schaltverstärker für Piezoelemente strom- und spannungsge-regelt. Durch dieses patentierte System eignen sie sich auch für Applikationen im Bereich der aktiven Schwingungsdämpfung. Hier ist die Anpassung auf den aktuell geforderten dynamischen Bereich wichtig.

Schutz des Piezoaktors durch Temperaturüberwachung

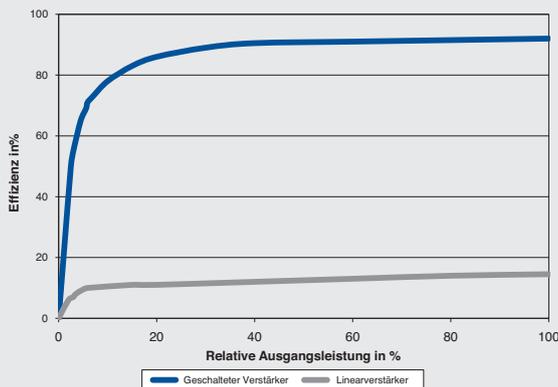
Im Piezo selbst ist der Energieverlust gering; hier entsteht nur wenig Abwärme. Beim Dauerbetrieb ist dies jedoch nicht zu vernachlässigen. Entsprechende Elektronik können deshalb die Signale eines Temperatursensors am Piezo auswerten. Auf diese Weise wird die Keramik vor Überhitzung und vorzeitiger Alterung geschützt. Eventuelle Risse, die zu Spannungsüberschlägen führen könnten, lassen sich vermeiden.

Geltende Patente

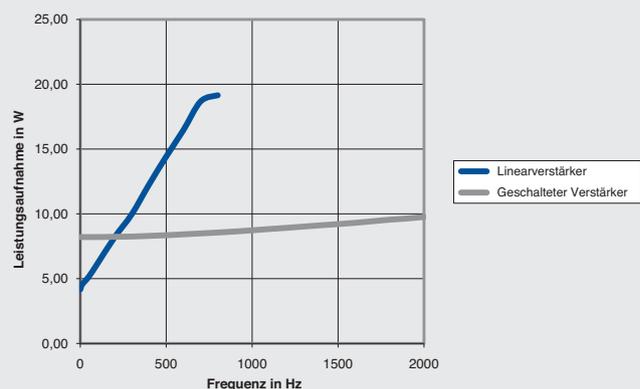
Deutsches Patent Nr. 19825210C2

Internationales Patent Nr. 1080502B1

US-Patent Nr. 6617754B1



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



Leistungsaufnahme eines Piezoverstärkers mit linearer und geschalteter Endstufe am Piezoausgang, kapazitive Last 1 μF . Die Messwerte zeigen deutlich, dass der pulswellen-modulierte Verstärker 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.

Produktbeispiele: Besonders leistungsstark, dynamisch und sparsam

Geschaltete Verstärker mit integrierter Energierückgewinnung stehen in drei Modellen zur Verfügung. Das Modell E-617.001 (im Bild links) ist zur Montage an einer Hutschiene vorgesehen und dadurch ideal geeignet für den Einsatz in Automatisierung und Industrie. E-617.00F (Mitte) ist ein kompaktes OEM-Modul und zur Montage in einem Chassis vorgesehen. Das E-504 Leistungsverstärkermodul (rechts) ergänzt die modulare Piezocontrollerreihe E-500. Hier können optional eine Positionsregelung sowie digitale Schnittstellen oder ein Display integriert werden.



Technische Daten:

- Spitzenleistung 280 W
- Hohe Dauerleistung von 100 W
- Spitzenstrom bis 2 A
- Ausgangsspannungsbereich -30 bis 130 V
- Bandbreite bis 3,5 kHz

Damit ermöglichen diese Piezoverstärker den dynamischen Betrieb von Niedervolt-Piezoaktoren mit hoher Kapazität bei einer Bandbreite bis in den Kilohertzbereich. Gleichzeitig ist der Leistungsbedarf der Geräte mit maximal 30 W äußerst gering.

Das Prinzip der Energierückgewinnung ist auch für **Hochvoltaktoren** mit einem Spannungshub von bis zu 1100 V in unipolarer oder bipolarer Ansteuerung verfügbar. Der modulare Hochleistungs-Piezoverstärker / Controller E-481 bietet eine Spitzenleistung von 2000 W und Spitzenströme bis 2 A.

Zum Schutz vor thermischer Überlast der Piezoaktoren ist eine Auswertung eines Temperatursensors integriert. Piezostrom und -spannung können über Monitoranschlüsse abgegriffen werden. Optional ist der E-481 mit Positionsregelung, digitalen Schnittstellen oder Display verfügbar.



Hochleistungs-Piezoverstärker E-481

Um in dieser Hochleistungsvariante mit 2 kW und 2 A die unregelmäßige Positioniergenauigkeit zu verbessern, können zusätzlich digitale Linearisierungsalgorithmen implementiert werden. Damit werden dann Linearitätswerte um 99% erreicht.

Anwendungsbeispiele

- Ventilsteuerung (z. B. Pneumatik)
- Einspritzventile
- Hochdynamisches Scannen
- Fräsmaschinen
- Laserstrahlableitung
- Aktive Schwingungsdämpfung

Linearisierter Verstärker für Piezoauslenkung ohne Hysterese

LADUNGSSTEUERUNG

Für dynamische Anwendungen:

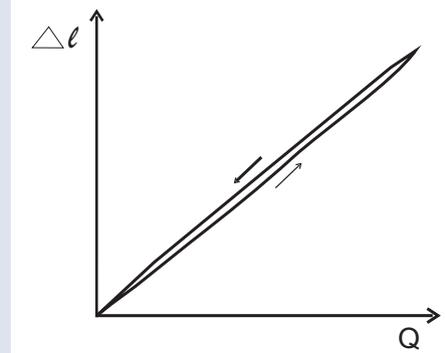
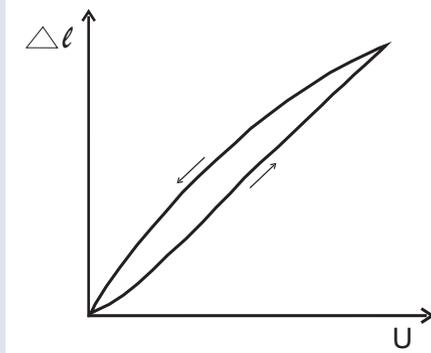
- Aktive Schwingungsdämpfung
- Adaptronik
- Schnelle mechanische Schalter
- Ventilsteuerung (z. B. Pneumatik)
- Dosieren

Ein typischer Anwendungsbereich für Piezoaktoren bzw. Nanopositioniersysteme ist das dynamische Scannen. Hier kann man zwischen zwei unterschiedlichen 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 werden, und die Schrittgrößen konstant hält.

Natürlich lässt sich auch 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 so genannten Ladungssteuerung.

Ladung und Auslenkung

Ladungssteuerung nutzt die Tatsache, dass bei Piezos der Zusammenhang zwischen elektrischer Ladung und Auslenkung sehr viel linearer ist, als der zwischen angelegter Spannung und Auslenkung. Die Abweichung beträgt im ersten Fall nur etwa 2 %, während sie bei Spannungssteuerung etwa zwischen 10 bis 15 % liegt (s. Abbildungen unten). Mit 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 Ladungsregelung 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, da die Positionsdrift des Piezoaktors nicht ausgeregelt wird.



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



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

- Hochlineares Verstärkermodul mit Ladungskontrolle
- 280 W Spitzenleistung
- Integrierte Temperaturüberwachung zum Schutz vor Überhitzung
- Optional: Positionsregelung, digitale Schnittstellen, Display

Die elektrische Schaltung erfordert einen masselosen Aufbau der Piezosysteme und entsprechende Anschlüsse.

Digitalcontroller

PRÄZISION, DYNAMIK UND BEDIENKOMFORT

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

Bequeme Bedienung über Software

Die komplette Digitalisierung aller Arbeitsschritte macht die Prozessparameter einfach per Software zugänglich. Sobald sich z. B. die Last ändert, erlauben digitale Controller die unmittelbare Änderung von Servoparametern über Software.

PI Software bietet darüber hinaus Diagnose-tools und Einstellhilfen, wie die grafische Darstellung von Sprungantworten zur Parameteroptimierung.

Digitale Datenverarbeitung

Digitale Prozesse verbessern die Systemperformance in der klassischen Nanostelltechnik:

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. Klassischerweise werden PID Regler verwendet. Abhängig von der Anwendung können aber auch andere Regelkonzepte in Kombination mit Linearisierungsalgorithmen zu besseren Ergebnissen führen.

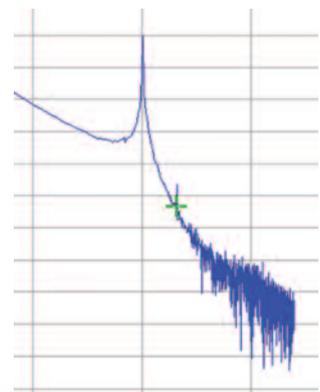
Digitale Filter vermeiden unerwünschte Anregungen, unterdrücken Rauschen und erhöhen somit die Auflösung des Systems.

Linearisierung der Mechanik

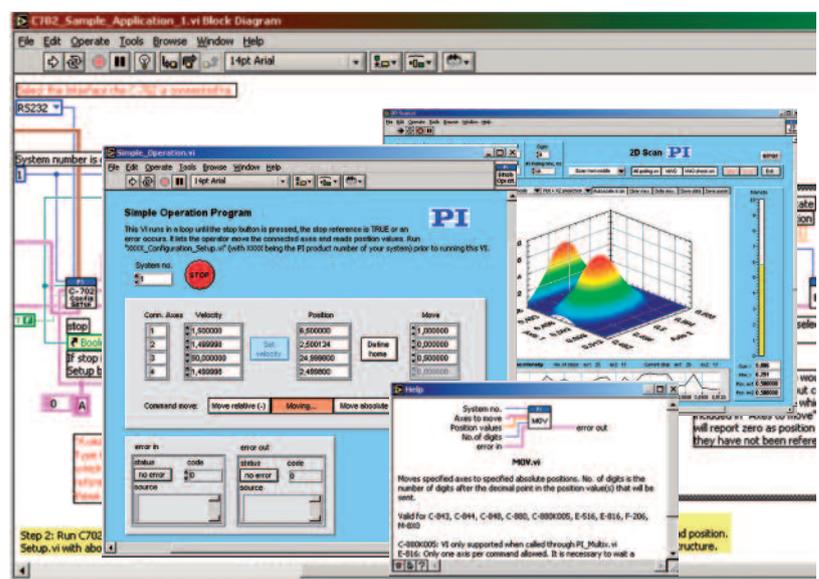
Die Linearität des Gesamtsystems ist ein Maß für seine Positioniergenauigkeit. Piezoaktoren an sich besitzen eine Nichtlinearität von 10 bis 15 % des Stellwegs, der durch die Ansteuerung und Regelung ausgeglichen werden muss, damit das System die Position möglichst präzise erreicht. Die Nichtlinearität 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.

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.



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



Schneller Zugriff auf die volle Funktionalität



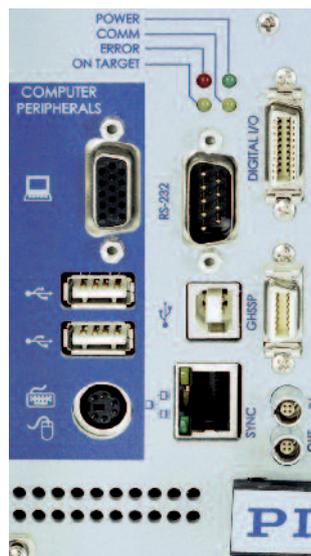
Produktübersicht und Systeme

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
- **Datenrekorder** 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 alle Controller besitzen alle Funktionen. Die einzelnen Funktionsumfänge sind in den jeweiligen Datenblättern aufgeführt.



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.

Antrieb	Controllerplattform
Nanopositioniersysteme mit einer Achse	E-753
Nanopositioniersysteme mit bis zu drei Achsen, geringe Leistungsanforderungen	E-761
Nanopositioniersysteme mit bis zu drei Achsen	E-725
Nanopositioniersysteme mit bis zu sechs Achsen	E-712
PicoCube® Hochgeschwindigkeitsscanner	E-712
NEXLINE® Hochlast-Nanopositionierantrieb	E-755 E-712
NEXLINE® Parallelkinematik mit bis zu drei Achsen	E-712
Positioniersysteme mit NEXACT® Nanopositionierantrieb (mit Encoderauswertung)	E-861
Positioniersysteme mit DC-Servomotoren mit Encoderauswertung/ PILine® Piezo Ultraschallmotoren mit Encoderauswertung/Schrittmotoren	C-863 C-867 C-663
Hexapoden/ Parallelkinematiken mit jedwedem Antrieb	Digitaler Hexapodcontroller

„High-End“ oder „Low-Cost“? Controller-Performance nach Maß

Fit in allen Leistungsklassen

Die wichtigste Voraussetzung dabei ist, analoge Eingangssignale schnell und hochauflösend für die Weiterbearbeitung zu konvertieren. Informationen, die bei der Konvertierung verloren gehen, bleiben verloren. Dasselbe gilt auch für die Erzeugung des Ausgangssignals: Die besten Algorithmen nutzen nichts, wenn es nicht hoch aufgelöst erzeugt werden kann.

PI setzt deshalb in den leistungsfähigsten Controllern für mehrachsige, hochauflösende Positioniersysteme A/D- und D/A-Wandler mit mindestens 20 Bit Auflösung ein. Dadurch werden analoge Signale in über 1 Million Datenpunkte aufgelöst.

Gleichzeitig müssen die eingehenden Datenmengen schnell verarbeitet werden, um den klassischen analogen Controllern im Punkt „Echtzeit“ nicht wesentlich nachzustehen. Hierzu sind schnelle Prozessoren erforderlich: je nach Aufgabenstellung des Controllers moderne DSPs oder leistungsfähige PC-Lösungen.

Ein Zyklus wird so z. B. in 0,02 Millisekunden abgearbeitet; das entspricht einer Servorate von 50 kHz. Entsprechend werden dann aktualisierte Sensordaten und Steuersignale bereitgestellt.

Preisgünstige Digitaltechnik – kein Widerspruch!

PI stellt eine Reihe von preiswerten Digitalcontrollern zur Verfügung und erreicht damit eine Genauigkeitsklasse von einem bis zehn Nanometern. Der einkanalige E-709 unterstützt sowohl Dehnmessstreifen-Sensoren (Metallfolien und piezoresistiv) als auch kapazitive Sensoren. Die D/A-Wandlung beträgt 16 Bit, der 32 Bit-Prozessor mit 150 MHz Taktrate ermöglicht eine Servorate von 10 kHz – das heißt, dass Positionsneuberechnungen 10 000 mal pro Sekunde stattfinden.

Der Verstärker liefert 5 W Dauerleistung für den dynamischen Betrieb klassischer Nanopositioniersysteme wie z. B. des P-721 PIFOC® Objektivscanners.

Piezo-Positioniersysteme, die mit Dehnmess-Sensoren (DMS) ausgestattet sind, erfahren durch die digitalen Linearisierungsalgorithmen eine deutliche Verbesserung der Performance.



Dieselbe Technik steckt im E-609 Piezocontroller und im E-709 Digitalcontroller. Im E-609 verwendet PI einen digitalen Regler in einem rein analog anzusteuernenden Gerät. Der E-709 bietet zusätzlich die Kommandierung über SPI, USB und RS-232 Schnittstellen.

Digitales Piezocontrollersystem E-712 für die Nanostelltechnik

Modulares System mit bis zu sechs Achsen für höchste Präzision

- Höchste Präzision für bis zu 6 Achsen und Hexapodsteuerung
- 600 MHz Prozessor; bis zu 50 kHz Servo Update Rate; hochstabile 20-Bit D/A-Wandler
- Echtzeitbetriebssystem für höchste Bahntreue
- ID-Chip-Erkennung für automatischen Abgleich des Controllers auf die Piezomechanik
- Ethernet, USB, RS-232, optional breitbandige analoge Ein- und Ausgänge
- Umfangreiches Softwarepaket
- Modularer Aufbau für höchste Flexibilität in der Umsetzung von Kundenanforderungen





Digital spezial – für Piezoschreit- und Ultraschallantriebe



Controller/Treiber E-861 für PiezoWalk® NEXACT® Linearantriebe und Positionierer

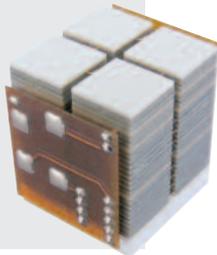
Piezo-Schreitantriebe vereinigen hohe Kraft, Dynamik und unbegrenzte Stellwege.



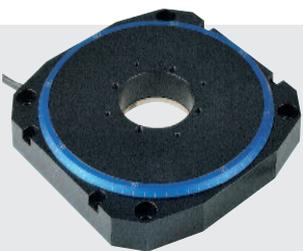
- Vernetzbar für Mehrachsenbetrieb
- Komplettes System mit Controller, integrierten Leistungsendstufen und Software; Parameteränderung im Betrieb
- Flexibel und preisgünstig
- I/O für Automatisierung, Joystick für manuelle Bedienung, Stand-Alone-Betrieb
- OEM-Version für unregelmäßigen Betrieb



Digitales Piezocontrollersystem E-712 Modularer Aufbau für mehrere Achsen



- Höchste Präzision auch für Hexapodsteuerung
- Verstärkermodule für verschiedene Antriebskonzepte: Piezoaktoren, NEXLINE® und NEXACT® Piezo-Schreitantriebe
- Bis zu 13 Kanäle im 19" Chassis
- Auswertung von kapazitiven und inkrementellen Positionssensoren
- Echtzeit-Datentransfer über schnelle Parallelschnittstellen
- Echtzeit-Betriebssystem für Synchronisation mit Systemkomponenten



Controller C-867 für PLine® Piezolinearantriebe

PLine® Piezo-Ultraschallmotoren sind besonders kompakt und schnell.



- Breitbandige Encodereingänge ermöglichen hohe Geschwindigkeit und Auflösung
- PID-Regelung mit dynamischer Parameterumschaltung
- Integrierter Piezomotor-Leistungstreiber mit Frequenzregelung
- USB, RS-232 und analoge Schnittstellen (z. B. für Joystick)
- 4 + 4 programmierbare TTL-Ein- / Ausgänge für flexible Automatisierung
- Datenrekorder
- Umfangreicher Softwaresupport, LabVIEW, DLLs, Makroprogrammierung ...

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, ein- oder mehrachsige Lösungen, oder die Anforderung nach Steuerung über PC bestimm-

men, welcher Verstärker oder -Controller der richtige ist.

Für Nanopositionieraufgaben stehen eine Reihe von analogen und digitalen Controllern zur Verfügung:

Ihre Applikation erfordert ...	Welcher Controller passt?
Häufige Lastwechsel oder Änderung des Betriebsmodus	Parameter unkompliziert per Software ändern: Jeder digitale von PI, auch die E-609-Serie
Günstiger Preis	Digital: E-709 oder E-609; analog: E-610, E-625, E-621
3 bis 6 Kanäle	Digital: E-725, E-710, E-712; analog: E-500, E-612
Mehr als 6 Kanäle	Vernetzbare Controller wie E-621, E-625, E-665; modulare Controller wie E-712, E-500
Auflösung	Digitale High-End Lösungen von PI wie E-753, E-712, E-725; jeder analoge
Beste dynamische Linearität	Digitale High-End Lösungen von PI mit DDL Option
Langzeitstabilität (thermisch)	Alle Piezocontroller und -verstärker von PI
Linearität / Genauigkeit	Jeder digitale von PI, auch die E-709-Serie: Digitalisierungspolynome bis 5. Ordnung; zusätzliche DDL-Option
Ansteuerung mit analogem Eingangssignal	Jeder analoge; digitale E-709, E-609, E-753 oder E-712 mit Analog IN Option
Echtzeit-Kommandierung	Digital mit PIO-Option; SPI-Schnittstelle (Standard bei E-709!), TCP/IP für Übertragungsraten bis zu 1 kHz; alle Controller über Analog I/O
Regelung in Echtzeit oder mit hohen Servoraten	Jeder analoge; 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; 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; E-625, E-621, E-665; modulare Controller mit digitaler Bedieneinheit E-517

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

Weitere Informationen

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

Detaillierte Informationen zu digitalen Piezocontrollern sind in unserer aktuellen Broschüre **„Digital Control – Bestleistung für Positioniersysteme“** erhältlich.

Aufbereitetes Basiswissen zum Thema **Nanopositionierung mit Piezoaktoren** ist ebenfalls unter www.pi.ws sowie auf der Homepage unserer Tochtergesellschaft PI Ceramic zu finden (www.piceramic.de).

Der PI Gesamtkatalog

Jetzt anfordern!

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



Hauptsitze

DEUTSCHLAND

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

PI Ceramic GmbH
 Lindenstraße
 07589 Lederhose
 Tel: +49 (36604) 882-0
 Fax: +49 (36604) 882-4109
 Email: info@piceramic.de
 www.piceramic.de

Niederlassungen

USA (OST) & KANADA

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

USA (WEST) & MEXIKO

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

JAPAN

PI Japan Co., Ltd.
 Akebono-cho 2-38-5
 Tachikawa-shi
 Tokyo 190-0012
 Tel: +81 (42) 526 7300
 Fax: +81 (42) 526 7301
 Email: info@pi-japan.jp
 www.pi-japan.jp

PI Japan Co., Ltd.
 Hanahara Dai-Ni Building #703
 4-11-27 Nishinakajima,
 Yodogawa-ku, Osaka-shi,
 Osaka 532-0011
 Tel: +81 (6) 6304 5605
 Fax: +81 (6) 6304 5606
 Email: info@pi-japan.jp
 www.pi-japan.jp

ENGLAND & IRLAND

PI (Physik Instrumente) Ltd.
 Trent House, University Way,
 Cranfield Technology Park,
 Cranfield, Bedford MK43 0AN
 Tel: +44 (1234) 756 360
 Fax: +44 (1234) 756 369
 Email: uk@pi.ws
 www.physikinstrumente.co.uk

ITALIEN

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
 Email: info@pionline.it
 www.pionline.it

FRANKREICH

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
 Email: info.france@pi.ws
 www.pifrance.fr

CHINA

Physik Instrumente (PI Shanghai) Co., Ltd.
 Building No. 7-106
 Longdong Avenue 3000
 201203 Shanghai
 Tel: +86 (21) 518 792 98
 Fax: +86 (21) 687 900 98
 Email: info@pi-china.cn
 www.pi-china.cn