

Piezokippsysteme

Aufbau – Performance – Tuning



Inhalt

1	Übersicht	3
2	Aufbau und Funktionsprinzip	3
3	Auslieferungszustand und Qualität	4
4	Handhabung des Spiegels	5
5	Steuerung der Kippspiegelsysteme	5
5.1	<i>Wahl der passenden Steuerelektronik</i>	5
5.2	<i>PI MikroMove®: Einfache Konfiguration und Inbetriebnahme</i>	6
6	Während des Betriebs	6
6.1	<i>Hysterese</i>	6
6.2	<i>Resonanzfrequenzen</i>	7
6.3	<i>Schrittantwort und Einschwingzeit</i>	7
6.4	<i>Wärmeentwicklung im Dauerbetrieb</i>	8
6.5	<i>Positionsdrift</i>	9
6.6	<i>Lebensdauer</i>	9
7	OEM Engineering und Lösungen	9
8	FEM-Optimierung	10
9	Simulation des Gesamtsystems	10
10	Autor	11
11	Über PI	11

1 Übersicht

Piezokippsysteme von Physik Instrumente (PI) sind vielseitige Positionierungssysteme – ideal für den dynamischen Betrieb in Anwendungen wie zum Beispiel Scanning, Tracking, Drift- und Schwingungsunterdrückung oder dynamischer Bildstabilisierung. Piezokippsysteme und Scanner bieten eine größere Beschleunigung und dynamische Bandbreite als ähnliche Aktoren, wie z. B. Voice-Coil oder Galvoscaner. Ebenso finden die von PI entwickelten Piezokippsysteme Anwendung bei quasistatischen Positionierungen von Optiken mit hohen Anforderungen an die „Pointing-Stability“.

Alle von PI hergestellten Piezokippsysteme verfügen über Festkörperführungen für reibungsfreie Bewegung und bieten damit eine hervorragende Führungsgenauigkeit. Auflösungen bis in den Nanoradianbereich sind bei gleichzeitig hoher Winkelstabilität realisierbar. Optische Ablenkwinkel von bis zu 70 mrad können mit sehr geringen Einschwingzeiten (Milli- bis Mikrosekunden) erreicht werden.

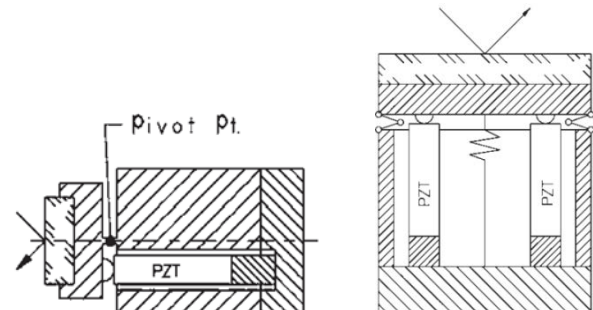


Abb. 1 Prinzipdarstellung eines Piezokippspiegels mit einem Piezoaktor (links) und differenziellem Antrieb (rechts). Der Pivot-Punkt des differenziell angetriebenen Piezokippsystems kann der technischen Zeichnung entnommen werden (Bild: PI)

Die Konstruktion der Piezokippsysteme mit **differenziellem Antrieb** basiert auf **zwei** Piezoaktoren (siehe hierzu Abb. 1., rechte Grafik), die im Druck-/Zug-Regime die Plattform antreiben. Dazu werden beide Aktoren elektrisch in einer Brückenschaltung betrieben, die mit einer festen Spannung versorgt ist und mit einer variablen Spannung gesteuert wird. Die differenzielle Bauart ermöglicht höchste Winkelstabilität in einem breiten Temperaturbereich, da sich Temperaturänderungen nur auf eine lineare Offsetverschiebung der Plattform auswirken. Der Einsatz von DMS-Sensoren ermöglicht eine hohe Linearität und sehr gute Wiederholbarkeit.

2 Aufbau und Funktionsprinzip

!

Hinweis: PI Piezokippspiegel sind trotz ihres massiven und robusten Erscheinungsbildes hoch präzise und empfindliche Systeme. Besonders kritisch sind Einwirkungen von Kräften und Drehmomenten auf die Kippplattform während der Montage. Diese sind stets zu minimieren oder ganz zu vermeiden. Entsprechende Montage- und Justier-Anweisungen werden von PI zur Verfügung gestellt.

PI Piezokippsysteme werden in ein- und mehrachsigen Ausführungen angeboten. Differenzielle Piezokippsysteme besitzen zudem zwei Piezoaktoren pro Achse.

Die Bewegungsplattform von Systemen mit **einem Piezoaktor**, wie in Abb. 1 (linke Grafik), wird von einem Festkörpergelenk geführt. Das Festkörpergelenk bildet den Drehpunkt (Pivot-Punkt) und stellt gleichzeitig die Vorspannung für den Piezoaktor zur Verfügung.

Die Vorteile dieser Ausführung liegen in der einfachen Konstruktion, geringen Kosten und kleinem Bauraum. Für Anwendungen, die hohe Winkelstabilität in einem breiten Temperaturbereich erfordern, wird ein differentieller Piezoantrieb empfohlen.

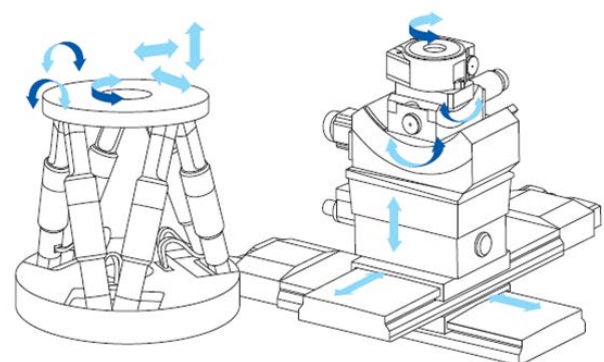


Abb. 2 Bewegungsrichtungen einer Parallelkinematik (links) und vergleichbarer serieller Aufbau (rechts) (Bild: PI)

Mehrachsige Piezokippsysteme sind parallelkinematisch aufgebaut (Abb. 2). Diese Bauform besitzt gegenüber seriellen Systemen große Vorteile. Die bewegte Plattform wird um lediglich *einen* festen Drehpunkt ausgelenkt.

Dadurch ergibt sich eine höhere Dynamik, mittels höherer Systemresonanzfrequenz. Zudem erreichen parallelkinematische Systeme eine bessere Linearität als serielle Systeme. Serielle Systeme funktionieren durch ein Hintereinanderschalten von zwei Einachs-Systemen – z. B. Galvoscaner.

PI bietet Standardbauformen mit zwei- und drei Achsen an, die durch Parallelkinematiken angetrieben werden. Bei zwei-Achs-Systemen werden insgesamt vier Piezoaktoren differenziell betrieben. Sie sind paarweise um 90° zueinander angeordnet und bewegen gleichzeitig dieselbe Plattform (Parallelkinematik) die um einen festen Drehpunkt ausgelenkt wird. In Abb. 3 ist der prinzipielle Aufbau eines dreiachsigen, parallelkinematischen Piezokippsystems (Tripod) dargestellt.

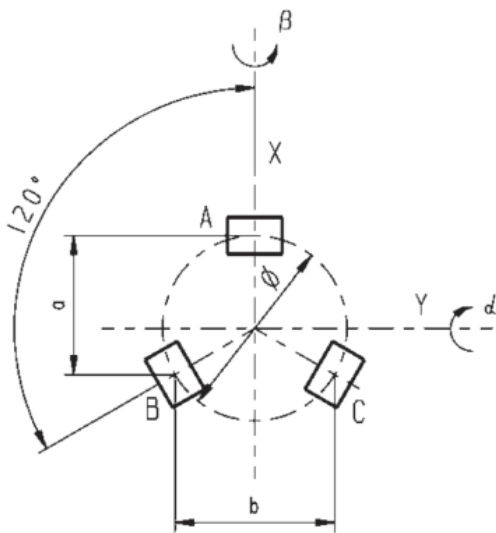


Abb. 3 Prinzipdarstellung der Parallelkinematik am Beispiel eines dreiachsigen Piezokippsystems – dem Tripod (Bild: PI)

Die mehrachsige Ausführung in Form eines „Tripod“ wird von drei in 120°-Abständen angeordneten Piezoaktoren angetrieben. Der Antrieb mit drei unabhängigen Piezoaktoren hat den Vorteil, dass zusätzlich zur Verkippung die Plattform auch linear bewegt werden kann, was z. B. zur Steuerung optischer Phasenunterschiede genutzt werden kann.

3 Auslieferungszustand und Qualität

An die Zuverlässigkeit und Qualität aller Produkte von PI werden sehr hohe Maßstäbe gesetzt. Die ISO-9001-Zertifizierung, bei der nicht nur ein Produkt, sondern auch die Erwartungen und Zufriedenheit des Kunden im Vordergrund stehen, wurde bereits im Jahr 1994 erreicht und regelmäßig rezertifiziert.

Die Standardausführung der Piezokippsysteme liefert beste Performance bei gleichzeitig konservativer Systemauslastung. Das System funktioniert innerhalb von den Standardspezifikationen zuverlässig und ermöglicht einen stabilen Betrieb in einem Großteil der kundenspezifischen Anwendungen.

Bei besonderen Anwendungsfällen wie z. B. extrem hoher Dynamik oder extrem stabilen Positionierungsanforderungen, bietet PI ein spezielles, auf die Anwendung zugeschnittenes Tuning des Systems an. Dabei kann durch ein gezieltes Optimieren der Regelparmeter das beste Ergebnis für die jeweilige Applikation erreicht werden.

Darüber hinaus kann PI selbstverständlich auch kundenspezifische Änderungen am Design des Standardproduktes vornehmen, um den exakten Bauraumvorgaben in der Kundenapplikation zu entsprechen.

Vor dem Versand wird jedes Produkt vermessen und qualifiziert. Anschließend erhält das ausgelieferte System das „Performance-Test-Protocol“ als Qualitätssiegel – siehe Abb. 4.

Performance Test Protocol S-335.2SH - Linearity

File: 117034271_linearity_1.cal
Protocol No.: FM 7.5-16 A4

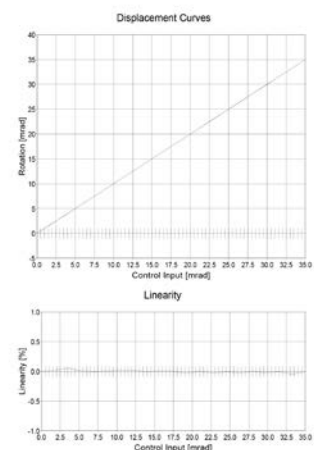
PI

Order Info		System Setup	
Customer	PI	Stage	S-335.2SH
Customer Ref No.		Commanded Axis	1
PI Order No.		Measured Axis	1
		Feedback Sensor	GG5
		Sensor Bandwidth	Standard
		Design	Standard
		Nominal Oper. Voltage	-20...+120V
		Nominal Expansion	35 mrad
		Controller	E-727.3SDA SN: 117025085
		Calibration Type	Standard, via digital interface
Measurement Setup			
Measurement Device	Electrol 2000		
Meas. Device Type	Electr. Autocollimator		
Temperature	21.5 °C		
Air Pressure	1012.0 mbar		
Humidity	47.0 %		
Measurement Date	08.07.02, 2017-06-22		
Meas. Program	PZTCals 7.6.0.1		
Examiner	BY		
Min. Ctrl Input	0.0 mrad		
Max. Ctrl Input	35.0 mrad		
Step Size	1.75 mrad		
Time Delay	0.5 s		

Measurement Results

Ctrl In [mrad]	Output + [mrad]	nonlin [mrad]	nonlin [%]
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.7500	1.7500	0.0076	0.0018
3.5000	3.5004	0.0106	0.0030
5.2500	5.2506	0.0028	0.0009
7.0000	7.0014	-0.0024	-0.0006
8.7500	8.7572	0.0020	0.0007
10.5000	10.5120	0.0044	0.0012
12.2500	12.2637	0.0071	0.0024
14.0000	14.0059	-0.0017	-0.0004
15.7500	15.7500	0.0011	0.0003
17.5000	17.5104	0.0010	0.0003
19.2500	19.2464	-0.0119	-0.0041
21.0000	21.0124	0.0012	0.0004
22.7500	22.7629	0.0000	-0.0000
24.5000	24.5113	-0.0018	-0.0003
26.2500	26.2543	-0.0007	-0.0002
28.0000	28.0111	0.0001	0.0000
29.7500	29.7585	-0.0074	-0.0012
31.5000	31.5158	-0.0011	-0.0003
33.2500	33.2518	-0.0160	-0.0048
35.0000	35.0187	0.0000	0.0000

Control Function:
Expansion = 1.000534*Ctrl_In + 0.0000 mrad



Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstraße 1, 76228 Karlsruhe - Phone: (+49) 721-4846-0, Fax: (+49) 721-4846-100, e-mail: info@pi.ws

Abb. 4 „Performance Test Protocol“ eines S-335.2SH Piezokippspiegels (Bild: PI)

4 Handhabung des Spiegels

!

ACHTUNG: Den Spiegel auf keinen Fall durch „Hebeln“, oder mechanische Krafteinwirkung entfernen, da die Kräfte direkt auf die Piezoaktoren übertragen werden und diese äußerst sensibel darauf reagieren. Vom Einsatz chemischer Lösungsmittel sollte ebenso abgesehen werden, da diese sehr leicht ins Innere des Kippspiegels eindringen und Schäden verursachen können.

Besonders bei der Spiegelapplikation oder Spiegelentfernung besteht die Gefahr, dass das robust erscheinende Piezokippsystem durch eine zu hohe Krafteinwirkung beschädigt wird. Die Montage des Spiegels durch den Anwender sollte anhand der Montageanleitung im Benutzerhandbuch des jeweiligen Systems erfolgen.

Zur Applikation des Klebstoffs wird eine 3-Punkt-Schablone empfohlen. Die Schablone gibt die Position der Klebepunkte auf der Kippplattform vor und beschränkt die Menge des applizierten Klebstoffs. So wird verhindert, dass überschüssiger Klebstoff in das Gehäuse eindringt. Um eine bestmögliche Klebstoffverbindung herzustellen sollte ein Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxidharzbasis mit einer Aushärtetemperatur von ca. 20 °C gewählt werden.

Es wird empfohlen, den Spiegel mithilfe einer Zentrierhilfe (Abb. 5) auf der Plattform zu positionieren. Die Klebeschablone, sowie die Zentrierhilfe können bei PI unter folgendem Link bestellt werden:

<https://www.physikinstrumente.de/de/produkte/zubehoer/adapterplatten-adapterwinkel/s-330xx-spiegel-zentrierhilfen-fr-s-330-und-s-331-412418450/>

Alternativ übernimmt PI die Spiegelmontage als Bestandteil des Auftrages.

Soll der Spiegel entfernt werden, empfiehlt PI den Spiegel lokal mittels Heißluftfön vorsichtig zu erhitzen, sodass der Klebstoff weich wird. Der Spiegel sollte sich damit leicht ablösen lassen.

Wird ein größerer Spiegel oder eine größere Masse wie z. B. ein Strahlteiler auf das System montiert, kann es bei dynamischen Anwendungen zu Performanceeinbußen, bzw. zu Abweichungen zu den von PI spezifizierten Eigenschaften kommen.

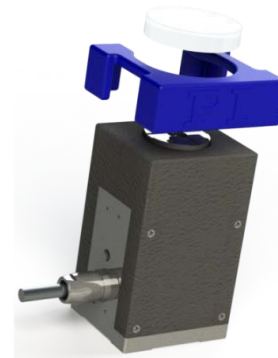


Abb. 5 Piezokippsysteme S-335.2SH mit 3D-gedruckten Zentrierhilfe (blau) zur Applikation eines 1-Zoll Spiegels (Bild: PI)

Die dynamischen Eigenschaften des Piezokippsystems und damit die jeweiligen Regelparameter im Controller reagieren sehr sensibel auf Änderungen des Massenträgheitsmomentes. Speziell Systeme, die durch PI ein auf die jeweilige Anwendung optimiertes Tuning erhalten haben, können durch eine Änderung der Last- und Trägheitsverhältnisse nicht mehr die geforderten Spezifikationen einhalten und müssen erneut, mittels Tuning, auf die neue Situation eingestellt werden.

5 Steuerung der Kippspiegelsysteme

5.1 Wahl der passenden Steuerelektronik

Zur Ansteuerung der Piezokippsysteme bietet PI Analog- und Digitalelektroniken an. Dabei sind digitale Elektroniken (Abb. 6) für Anwendungen zu empfehlen, bei denen die Ansprüche an die Performance des Systems variieren.



Abb. 6 Digitalcontroller E-727 (Bild: PI)

Mit der Software PIMikroMove® lassen sich die Regelparameter auf Knopfdruck anpassen. Durch den integrierten ID-Chip in den Piezokippsystemen ist es möglich, den Controller, oder auch das Piezokippsystem schnell und unkompliziert auszutauschen. Dabei werden die individuellen Parameter der Piezokippsysteme vom Controller automatisch gelesen und das individuelle Tuning damit übertragen.

In Kombination mit der Software PIMikroMove® bietet die Digitalelektronik einen großen Umfang an Funktionen und Darstellungsmöglichkeiten von Messwerten zur Diagnose und Prozesskontrolle.

Für die schnelle und einfache Einbindung der Systeme in komplexe OEM- und Endkundensysteme bietet PI die gesamte Mess- und Steuerungslogik selbstverständlich auch als Dynamic-Link-Library (DLL) an. Daneben bietet die LabVIEW-Integration eine optionale Labor- und Prototypenplattform während der Einführungsphase.

Der Einsatz einer Analogelektronik wird für Anwendungen empfohlen, bei denen die dynamischen Anforderungen hoch sind und die notwendige Leistung der Controller kostengünstiger mittels Analogtechnik zu realisieren ist. Hinzukommt, dass in diesem Fall der Systemaufbau, um weitere Kosten für eine aufwändige Anpassung an die neuen Systemeigenschaften zu vermeiden, langfristig geplant wird.

5.2 PIMikroMove®: Einfache Konfiguration und Inbetriebnahme

PIMikroMove® ist ein Bestandteil des umfassenden Softwarepakets, das bei jedem digitalen PI Controller im Standard-Lieferumfang mit inbegriffen ist. Die Software gewährleistet eine einfache und intuitive Inbetriebnahme des Komplettsystems.

Ist das System eingerichtet, steht dem Anwender die volle Bandbreite aller Funktionalitäten zur Verfügung. Neben einfacher Positions Vorgabe, Wahl der Schrittgröße und Beschleunigung, etc. können auch Makros für kontinuierliche Bewegungsabläufe implementiert werden. Dazu stehen bereits einige sogenannte „Controller-Makros“ zur Verfügung, die übernommen oder angepasst werden können.

„Host-Makros“, also Code für Bewegungsabläufe können direkt in PIMikroMove® erstellt werden. Für komplexe Bahnkurven wird empfohlen auf diverse Hochsprachen zurück zu greifen. PIMikroMove® unterstützt viele gängige Hochsprachen und grafische Softwaretools wie C, C++, C#, Python, LabVIEW sowie MATLAB und Simulink.

Systemoptimierungen bzw. das Tuning sind ein weiterer Bestandteil von PIMikroMove®. Um die bestmögliche Performance im Rahmen der Systembestandteile zu erhalten, kann in der Software auf P- und I-Anteile des Reglers zugegriffen werden. Damit kann das System auf die spezifische Anwendung optimiert werden.

Neben dem Tuning bietet PIMikroMove® die Möglichkeit einer Fehleranalyse des Systems. Integrierte Softwaretools testen dabei einzelne Funktionalitäten des Systems.

So kann beispielsweise der Graph des Stromverlaufs während der Auslenkung aufgezeichnet werden. Bei Veränderungen der Stromkennlinie, können so Rückschlüsse auf den Zustand des Systems gezogen werden.

!

Hinweis: Beim Tuning des Piezokippspiegels wird eine fundierte Kenntnis des Systems vorausgesetzt, um Beschädigungen zu vermeiden. Auf Anfrage übernimmt PI das Tuning der Piezokippspiegel, entsprechend der Kundenapplikation.

6 Während des Betriebs

6.1 Hysterese

Bei ungeregelten Systemen zeigen die Auslenkungskennlinien eine starke Hysterese, bedingt durch ferroelektrische Polarisierungseffekte der Piezokeramiken. Die „Öffnung“ der Spannungsauslenkungskurve erreicht 10-15 % des Auslenkwinkels – siehe Abb. 7.

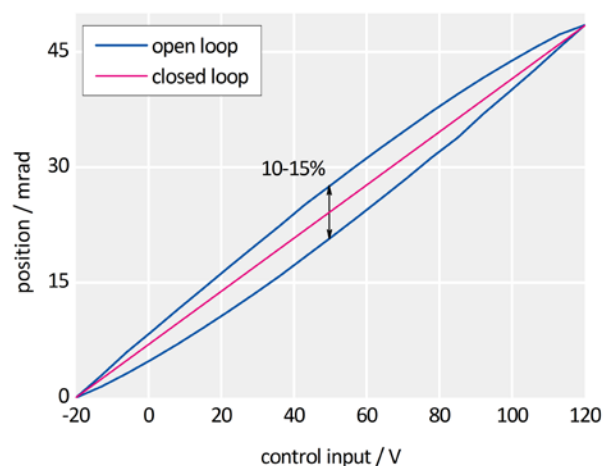


Abb. 7 Hysterese eines S-335.2SH bei einem Spannungsbereich von -20 bis 120 V (Bild: PI)

Positionsgeregelte Piezokippsysteme von PI minimieren diesen Effekt. Damit erreichen die Systeme die hohe Absolutgenauigkeit, Linearität und Wiederholbarkeit im Nanoradian- und Subnanoradianbereich.

6.2 Resonanzfrequenzen

Eine der wichtigsten technischen Eigenschaften für hochdynamische Anwendungen ist die Steifigkeit des mechanischen Piezokippsystems. Als Funktion der Steifigkeit wird die Resonanzfrequenz abgeleitet und dient zur Qualifizierung des Systems. Als Faustregel gilt: Je höher die Resonanzfrequenz ausfällt, desto höher ist die maximale Arbeitsfrequenz, mit der das System betrieben werden kann. Positionieranwendungen finden üblicherweise deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz statt. Beim Betrieb im geschlossenen Regelkreis wird die maximale Arbeitsfrequenz auch durch Phasen- und Amplitudengang des Systems begrenzt. Es gilt auch hier: Je höher die Resonanzfrequenz der Mechanik, desto höher kann die Regelbandbreite eingestellt werden. Die Resonanzfrequenz steht in direkter Abhängigkeit zu den Massen, die am Piezokippsystem angebracht werden. Die dynamische Performance wird durch größere zu bewegendende Massen reduziert.

Resonanzfrequenz eines idealen Feder-Masse-Systems:

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

f_0 = Resonanzfrequenz [Hz]

k_T = Federsteifigkeit [N/m]

m_{eff} = effektive Masse [kg]

Die obige Gleichung zeigt, dass zur Verdoppelung der Resonanzfrequenz eines Feder-Masse-Systems entweder die Steifigkeit um den Faktor 4 erhöht oder die effektive Masse auf 25 % des ursprünglichen Wertes reduziert werden muss. Bei extrem niedriger Resonanzfrequenz sind lediglich quasistatische Anwendungsfälle realisierbar.

Auch die Sensorbandbreite und Leistungsfähigkeit des Reglers (Digital-/ Analogelektronik, Filter- und Reglertyp, Bandbreite) können die Systembandbreite begrenzen.

Piezokippsysteme von PI sind auf anwendungsspezifische Massen (bspw. 1" Spiegel) optimiert.

In Abb. 8 sind die ersten Resonanzfrequenzen beim Einsatz von einem ½ Zoll und einem 1 Zoll Spiegel im Vergleich zum unbelasteten System aufgetragen.

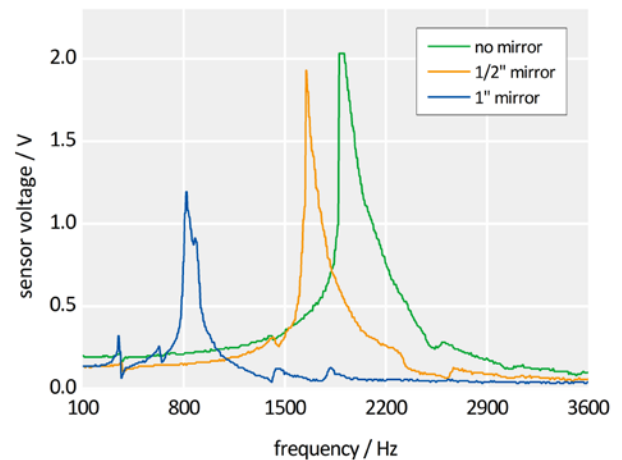


Abb. 8 Resonanzfrequenzen des Piezokippsystems S-335.2SH ohne Last, ½ Zoll Spiegel und 1 Zoll Spiegel (Bild: PI)

6.3 Schrittantwort und Einschwingzeit

Schnelles Ansprechverhalten ist eine charakteristische Eigenschaft von Piezoaktoren. Eine schnelle Änderung der Betriebsspannung bewirkt eine schnelle Änderung der Lage des Piezoaktors und damit eine Positionsänderung der Kippplattform.

Ein Piezoaktor kann bei schlagartigem Anstieg der Steuerspannung seine nominale Auslenkung in ca. 1/3 der Periode der Resonanzfrequenz erreichen, insofern die Spannungsquelle genügend Leistung bereitstellen kann. In diesem Fall kommt es zu einem starken Überschwingen über die eigentlich angesteuerte Position.

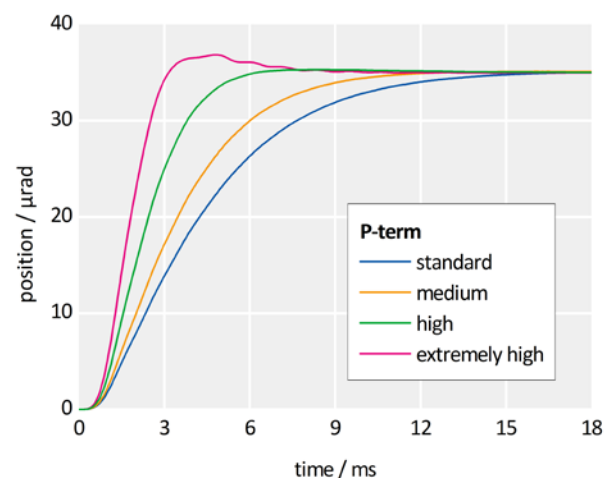


Abb. 9 Tuning eines S-335.2SH Piezokippsystems auf möglichst schnelle Auslenkung. Montiert ist ein 1" Spiegel (Bild: PI)

In Abb. 9 sind mehrere Schrittantworten, ausgehend von der Standard-Performance (Auslieferungszustand, ohne Tuning) eines S-335.2SH Piezosystems aufgetragen. Durch Tuning des Reglers kann die Schrittantwort des Systems beeinflusst werden.

Die Änderung der Last, beispielsweise durch den Wechsel der Spiegelgröße, beeinflusst ebenfalls die Systemperformance. Aus Abb. 10 kann entnommen werden, wie sich eine Änderung der Masse auf einen 50 %- Schritt (17,5 mrad, open loop) eines S-335-2SH Piezosystems auswirkt.

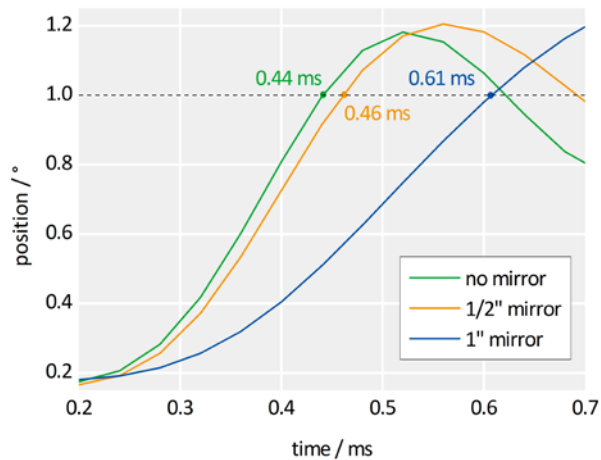


Abb. 10 Verhalten eines S-335.2SH Piezokippsystems, open loop; ohne Last, mit ½ Zoll- und 1 Zoll Spiegel (Bild: PI)

Die Wiederholbarkeit der Positionierung ist abhängig von der tatsächlichen Auslenkung des Piezokippsystems und der Art der verwendeten Sensoren. Grundsätzlich gilt, bei kleinen Stellwegen ist die Wiederholbarkeit bedeutend höher als bei großen Stellwegen.

In den meisten Piezokippsystemen sind DMS-Sensoren verbaut. Ein DMS bietet hierbei ausreichend Auflösung und kann platzsparend im System untergebracht werden. Durch die Auswertung der DMS-Sensoren, die direkt auf den Piezoaktoren angebracht sind, wird die Ist-Position ständig mit der Soll-Position abgeglichen. Restfehler ergeben sich hierbei aus der indirekten Positionsmessung (indirekte Metrologie) und der DMS-Sensorik selbst. Anhand der Piezoauslenkung kann auf die Position der Plattform geschlossen werden.

Die Wiederholgenauigkeit des Systems kann auf Anfrage von PI vermessen werden. Es werden dabei 100 Messpunkte aufgenommen und die Abweichung der Soll- von der Ist-Position als „position error“ erfasst. In Abb. 11 (linke Grafik) ist die Messung eines S-335.2SH Piezokippsystems aufgetragen. Rechts sind alle Abweichungen in einem Histogramm zusammengefasst.

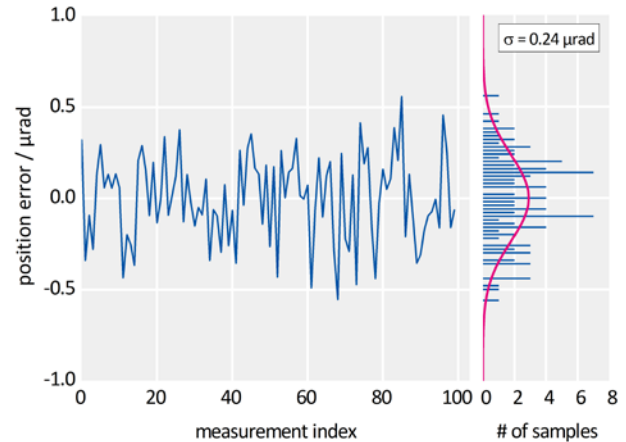


Abb. 11 Linker Graph: Messung der Wiederholgenauigkeit eines S-335.2SH. Rechter Graph: Histogramm mit Standardabweichung (Bild: PI)

6.4 Wärmeentwicklung im Dauerbetrieb

!

Hinweis: Positionsgeregelte Piezokippspiegel sind temperaturstabiler als unregelte Systeme. Die höchste Genauigkeit wird erreicht, wenn Arbeitstemperatur und Kalibrationstemperatur identisch sind. Piezokippspiegel von PI werden, wenn nicht anders spezifiziert, bei 22 °C kalibriert.

Im Langzeitbetrieb kann es vorkommen, dass die Arbeitsfrequenz durch Wärmeentwicklung begrenzt wird. Da sich Piezoaktoren wie kapazitive Lasten verhalten, steigen ihre Lade- und Entladeströme mit steigender Arbeitsfrequenz an. Die im Kippspiegel erzeugte thermische Verlustleistung hängt dabei neben der Arbeitsfrequenz maßgeblich von der Spannungsamplitude der Auslenkung ab, da diese quadratisch in die Verlustleistung eingeht.

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

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

δ= dielektrischer Verlustfaktor

f= Arbeitsfrequenz [Hz]

C= Aktor-Kapazität [F]

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

Die thermische Verlustleistung der Piezokeramiken beträgt ca. 8 bis 12% der eingebrachten elektrischen Leistung. Bei hohen Frequenzen und Amplituden könnten daher Kühlmaßnahmen notwendig werden.

In Abb. 12 ist die Temperaturänderung eines S-331.2SL Piezokippsystems bei 100 V Steuerspannung und 2000 Hz (Sinus) Arbeitsfrequenz über der Zeit aufgetragen. Die Temperaturänderung wurde an den Keramiken gemessen.

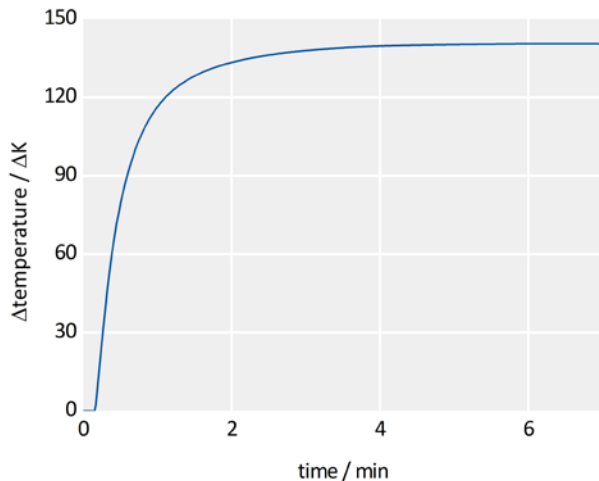


Abb. 12 Erwärmung eines S-331.2SL Piezokippsystems bei einer Steuerspannung von 100 V und einer Frequenz von 2000 Hz (Bild: PI)

6.5 Positionsdrift

Drift oder Kriechen beschreibt die Änderung der Auslenkung mit der Zeit, bei unveränderter Steuerspannung.

Bei geregelten Systemen findet stets eine Regelung auf den gewünschten Soll-Positionswert statt. Durch DMS-Sensoren wird die Ist-Position erfasst und die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert minimiert. Minimale Positionsabweichungen können dennoch auftreten, wenn es bspw. durch Temperaturschwankungen der Umgebung zu einer Materialausdehnung des Gesamtsystems kommt.

Der Drieffekt tritt stärker bei open-loop (ungeregelten) Systemen auf, da die Signale der DMS Sensoren nicht erfasst werden. Ein Vergleich der Ist- mit der Sollposition findet nicht statt. Somit wird die Messdifferenz nicht kompensiert und es kommt zum Positionsdrift.

6.6 Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Piezokeramik wird nicht durch Abnutzung oder Verschleiß begrenzt. Tests haben gezeigt, dass PICMA® Piezoaktoren unter angemessenen Umgebungsbedingungen auch nach 100 Milliarden Zyklen keinen messbaren Verschleiß aufweisen und ihre Spezifikationen einhalten.

Bei PICMA® Piezoaktoren ist die aktive Piezokeramik von einer vollständig keramischen Isolierschicht umgeben, die die Aktoren vor Luftfeuchtigkeit und gegen Ausfälle durch erhöhten Leckstrom schützt. Der monolithische Piezokeramikblock eines PICMA® Aktors erreicht selbst unter extremen Umgebungsbedingungen eine besonders hohe Zuverlässigkeit und erhöht auf diese Weise die Lebensdauer um mehrere Größenordnungen.

Seitliche Schlitze ("Slots") an den PICMA® Aktoren verhindern wirksam die Überhöhung der mechanischen Zugspannungen in den passiven Bereichen des Stapels und die Ausbildung unkontrollierter Dehnungsrisse, die zu elektrischen Durchschlägen und damit Schäden am Aktor führen könnten.

Der mäanderförmige Aufbau der äußeren Kontaktstreifen sichert den stabilen elektrischen Kontakt aller Innenelektroden selbst bei extremen dynamischen Belastungen (Abb. 13).



Abb. 13 PICMA® Aktoren mit patentierten Außenelektroden für bis zu 20 A Ladestrom (Bild: PI)

Es gibt keine allgemeine Formel mit der sich die Lebensdauer der Piezokeramik berechnen lässt, da zu viele Parameter wie z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Spannung, Beschleunigung, Druck- und Zugbelastung, Vorspannung, Arbeitsfrequenz und Isolationsmaterial einen nichtlinearen Einfluss bewirken.

PI Piezokeramiken sind nicht nur auf maximale Auslenkung optimiert, sondern vor allem auch auf eine hohe Lebensdauer unter praktischen Einsatzbedingungen.

7 OEM Engineering und Lösungen

Gemeinsames Erarbeiten von Lösungen verbindet. Mit dieser Intention leben die Mitarbeiter von PI den Kundenservice. Dieser beginnt mit dem ersten informativen Vorgespräch und reicht noch weit über die Auslieferung hinaus.

Da ein großer Teil des OEM-Geschäftes auf kunden-spezifischen Produkten basiert, sind das Know-How und die langjährige Erfahrung der Entwickler wichtige Voraussetzungen für den Erfolg.

Durch eine umfangreiche Test- und Fertigungsausrüstung kann PI schnell auf die Entwicklungs- und Produktionsanforderungen hochkomplexer Sonderprodukte und Baugruppen reagieren. Sämtliche Entwicklungsvorgänge und Produktionsprozesse, von der Idee bis zum Endprodukt, werden durch ein umfassendes Qualitätsmanagement kontrolliert.

Alle von PI hergestellten Systeme haben einen Langzeittest durchlaufen, bei dem verschiedene Belastungsarten, Betriebs- und Ansteuerbedingungen berücksichtigt wurden.

8 FEM-Optimierung

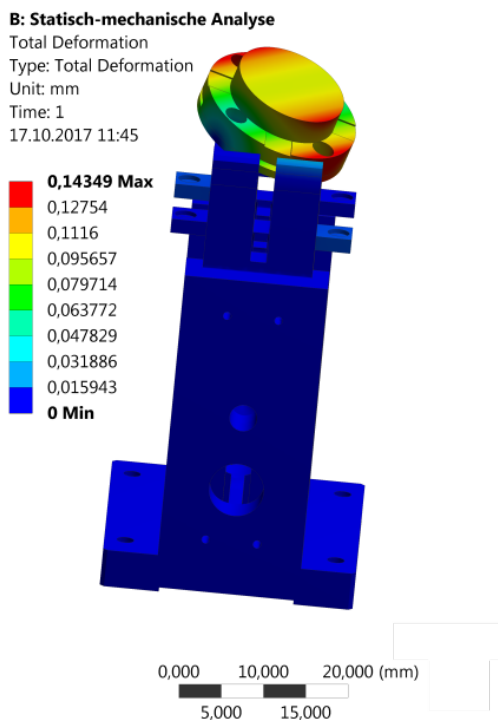


Abb. 14 FEM Simulation der Plattformverkipfung bei vorgegebener Steuerspannung am Beispiel des S-335.2SH (Bild: PI)

PI Entwicklungsingenieure setzen die neuesten FEM (Finite Elemente Methode) Analysetools sowie CAD-Software für die Simulation und Entwicklung neuer Mechaniksysteme ein. Dadurch werden Funktionalität, Präzision und Performance bereits vor dem Aufbau eines Prototyps sichergestellt.

Bei der Entwicklung von Piezokippsystemen werden auf diese Weise z. B. die Festkörpergelenke optimiert, die zur Führung der Plattform dienen. Die FEM-Optimierung maximiert die Steifigkeit lateral zur Bewegungsrichtung und verringert somit das unerwünschte Auswandern in dieser Richtung.

Mithilfe einer Modalanalyse können während der FEM-Optimierung Aussagen zur späteren Resonanzfrequenz und anderen dynamischen Eigenschaften des Systems getroffen werden. In Abb. 14 ist das Ergebnis einer FEM-Simulation zur Plattformauslenkung bei einer Steuerspannung von 100 V eines Piezokippsystems S-335.2SH dargestellt.

9 Simulation des Gesamtsystems

Die aus der Modalanalyse bekannten Resonanzfrequenzen stellen einen der Parameter für ein ganzheitliches Simulationsmodell dar. Zusätzlich sind elektrische Kapazitäten der Piezokeramiken, Regelparameter und die Systemdämpfung als Eingangswerte für die Simulation des Gesamtsystems relevant.

Das Simulationsmodell stellt damit einen Schritt zum digitalen Zwilling des Kippspiegels in Verbindung mit der Elektronikeinheit dar, das die Performance des realen Produktes virtuell abbildet. Machbarkeitsanalysen zu Kundenwünschen und eine frühzeitige Risikoanalyse zum Produkt können so sehr schnell und fundiert durchgeführt werden. PI Entwicklungsingenieure setzen die neuesten FEM (Finite Elemente Methode) Analysetools sowie CAD-Software für die Simulation und Entwicklung neuer Mechaniksysteme ein. Dadurch werden Funktionalität, Präzision und Performance bereits vor dem Aufbau eines Prototyps sichergestellt.

10 Autor

Armin Karle ist Entwicklungsingenieur in der Entwicklungsabteilung für Piezosysteme bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG in Karlsruhe.

11 Über PI

Das Unternehmen Physik Instrumente (PI) ist für die hohe Qualität seiner Produkte bekannt und nimmt seit vielen Jahren eine Spitzenstellung auf dem Weltmarkt für präzise Positioniertechnik ein. Seit über 40 Jahren entwickelt und fertigt PI Standard- und OEM-Produkte mit Piezo- oder Motorantrieben.

Eine kontinuierliche Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte, Produkte und Systemlösungen und über 200 Technologiepatente kennzeichnen heute die Unternehmensgeschichte. Dabei entwickelt, fertigt und qualifiziert PI alle Kerntechnologien selbst:

Von Piezokomponenten, -aktoren und -motoren und magnetischen Direktantrieben über Luftlager, Magnet- und Festkörperführungen bis hin zu Nanometrologie-Sensoren, Regeltechnik und Software. PI ist dadurch von den am Markt verfügbaren Komponenten unabhängig, um seinen Kunden die fortschrittlichsten Lösungen anzubieten. Die hohe Fertigungstiefe ermöglicht dabei eine vollständige Prozesskontrolle, um flexibel auf die Marktentwicklungen und neue Anforderungen zu reagieren.

Durch die Übernahme der Mehrheitsanteile an ACS Motion Control, einem weltweit führenden Entwickler und Hersteller modularer Motion Controller für mehrachsige Antriebssysteme, kann PI außerdem maßgeschneiderte Komplettsysteme für industrielle Anwendungen liefern, die höchste Präzision und Dynamik fordern.

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