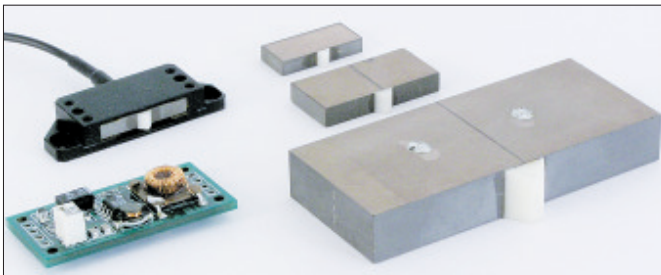


# Schnelle Piezolinearantriebe für große Stellwege – Funktion und Anwendungen

Obwohl weltweit seit Jahrzehnten an Piezomotoren geforscht wird, waren bis vor kurzem nur wenige Produkte kommerziell erhältlich. Dieses Bild hat sich in den letzten zwei Jahren deutlich geändert und heute stehen dem Konstrukteur eine Anzahl leistungsfähiger Motoren zur Verfügung.



**Bild 2**

Die Keramikplatten verschiedener Piezolinearmotoren sowie ein kompletter Motor mit einer Treiberelektronik

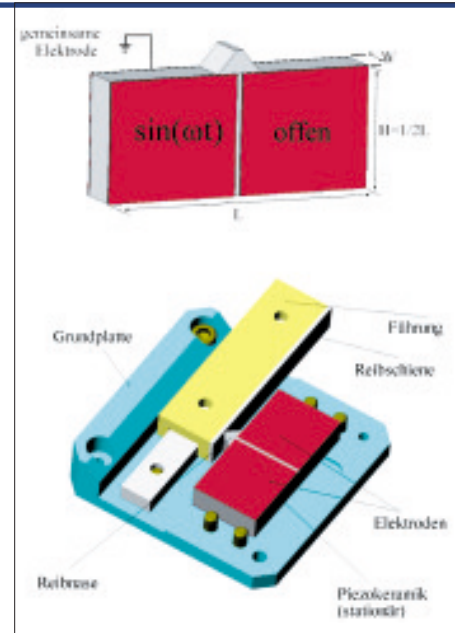
Piezolinearmotoren dürfen nicht mit Piezolinearaktoren verwechselt werden. Bei diesen keramischen Elementen wird eine Auslenkung proportional zur angelegten Spannung zum präzisen Positionieren mit Sub-nm-Auflösung oder zum extrem schnellen Verstellen mit  $\mu$ s-Reaktionszeiten eingesetzt. Kräfte bis in den 10 kN-Bereich sind erreichbar, die Stellwege liegen jedoch üblicherweise unter 1 mm.

Piezolinearmotoren hingegen bieten geringere Kräfte, jedoch erheblich längere Stellwege. Sie ermöglichen Anwendungen, die mit Elektromotoren nicht möglich sind.

## 1 Funktion

Piezolinearmotoren lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: Kontinuierliche Motoren und Schrittmotoren. Dieser Artikel beschäftigt sich mit neuen Entwicklungen aus der ersten Gruppe (Ultraschallantriebe) und deren Anwendungen. Diese neuen Motortypen zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau aus und ermöglichen die Konstruktion unkomplizierter, kostengünstiger Aktoren und Mikropositioniersysteme.

Kernelement der Antriebe ist eine rechteckige piezokeramische Platte (Stator), die in zwei Segmente mit unabhängigen Elektroden unterteilt ist (Bild 1, 2). Während des Betriebes wird je nach Verstellrichtung entweder die rechte oder linke Elektrode mit einer sinusförmigen Spannung angeregt, die andere bleibt passiv (Bild 4). Dadurch entsteht eine asymmetrische zweidimensionale stehende Ultraschallwelle in der Keramik. Die asymmetrische Schwingung des Stators wird durch den Reibschluss einer sogenannten Reibnase aus Aluminiumoxid auf eine Ab-



**Bild 1**

Stator eines piezokeramischen Ultraschalllinearmotors (oben) und Integration in einen Präzisionssteltisch (unten)

triebsschiene übertragen, die mit der zu bewegendenden Mechanik verbunden ist. Jeder Schwingungszyklus erzeugt einen mikroskopisch kleinen Schritt von wenigen Nanometern, so dass in der Summe eine gleichmäßige Bewegung mit praktisch unbegrenztem Stellbereich entsteht.

Die Schubkraft wird dabei aus der Energie der longitudinalen Schwingung gewonnen. Die transversale Schwingung wird zum Anpressen / Abheben des Kontaktpunktes an die Reibschiene genutzt. Die Energie dieser Schwingung bestimmt die maximale Reibkraft und damit die Halte- bzw. Schubkraft des Antriebes.

## 2 Eigenschaften und Betrieb

### 2.1 Kräfte/ Stellgeschwindigkeit

Ultraschallmotoren ermöglichen sehr hohe Beschleunigungen bis 20 g und Geschwindigkeiten bis zu 800 mm/s, ihre Krafterzeugung liegt prinzipbedingt jedoch unter dem, was z. B. mit Spindelantrieben erreichbar ist. Die li-

### Autor

Dipl. Ing. (FH) Stefan Vorndran,  
Director of Corporate Marketing  
Communications, PI (Physik Instrumente) L.P. in Auburn, MA,  
USA

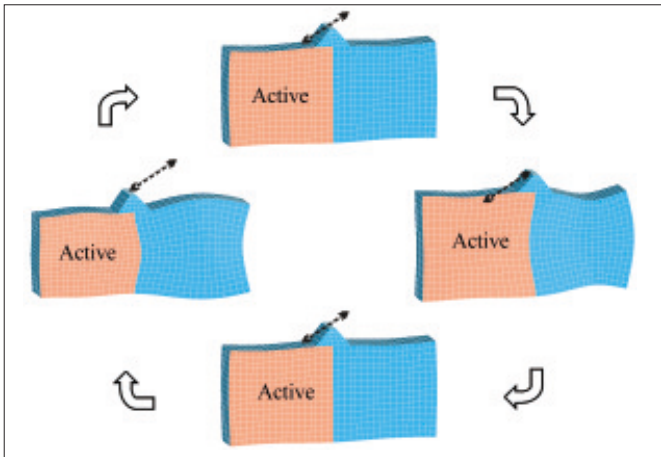
Kontakt:  
Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG  
Auf der Römerstrasse 1  
76228 Karlsruhe/Palmbach  
Tel.: 07 21/48 46-0  
Fax: 07 21/48 46-100  
E-Mail: info@pi.ws  
www.pi.ws

### Eigenschaften von Ultraschall-Piezolinearmotoren

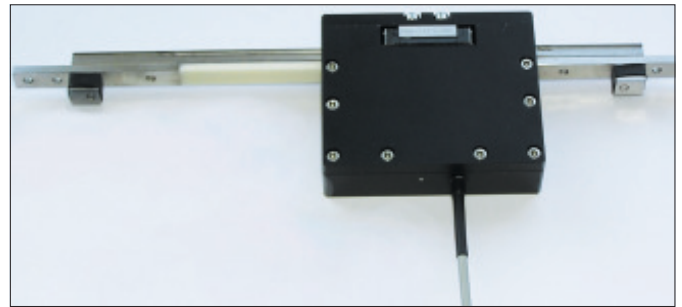
- Kompakter einfacher Aufbau, keine rotierenden Verschleißteile.
- Vakuum kompatibel. Die Motoren bestehen aus Keramik und benötigen keine Schmierung.
- Magnetfeldfreiheit: Ultraschallmotoren erzeugen weder elektromagnetische Felder, noch werden sie davon beeinflusst.
- Schnelles Ansprechverhalten. Die Motoren können in wenigen Mikrosekunden angeschaltet werden und erreichen Beschleunigungen bis 20 g sowie Geschwindigkeiten bis 800 mm/s. Durch die hohe Steifigkeit sind Einschwingzeiten von wenigen Millisekunden möglich.
- Hohe Auflösung. Ca. 50 nm sind im Ultraschallmodus möglich, noch kleinere Schritte u. U. im Analogmodus.
- Kompakt. Das Direktantriebsprinzip erlaubt den Aufbau extrem kleiner Translationstische. Ein System mit 20 mm Stellweg kann in einem Volumen von 20 x 25 x 8 mm<sup>3</sup> untergebracht werden.
- Umkehrspielfreiheit. Keine Wellen, Zahnräder, Spindeln.
- Selbsthemmend im stromlosen Zustand. Hohe Positionsstabilität, kein Kriechen oder Regelrutschen nach Erreichen der Endposition, kein Bedarf für externe Bremsen.

**Bild 3**

Eigenschaften von Ultraschall-Piezolinearmotoren



**Bild 4**  
Vier Schwingungsphasen einer Periode des Linear-motors



**Bild 5**  
Piezolinearmotoren der neuesten Generation liefern Kräfte von bis zu 60 N

mitierte Kraft hat jedoch auch Vorteile. Die Gefahr von Verletzungen und Beschädigung des Systems durch Fehlbedienung oder einen Systemcrash ist wesentlich geringer als bei Spindelantrieben, die über ein wesentlich höheres Trägheitsmoment verfügen und z. T. über Rutschkupplungen oder Kraftsensoren abgesichert werden müssen.

Die stärksten in den letzten Jahren kommerziell verfügbaren Ultraschall-Linearmotoren waren auf Kräfte im Bereich von 5 N begrenzt. Motoren der neuesten Generation (Bild 5) erzeugen bis zu 60 N. Die Kraft- / Geschwindigkeitskennlinie ist in Bild 6 dargestellt.

Für noch höhere Kräfte können sogenannte Piezowalk-Linearmotoren eingesetzt werden,

bei denen der Vorschub durch ein abwechselndes Klemmen und Freigeben des bewegten Abtriebsesementes stattfindet (Bild 7). Hier stehen Motoren mit Kräften von mehreren 100 N zur Verfügung, die Auflösungen von unter einem Nanometer ermöglichen. Die Stellgeschwindigkeit ist jedoch deutlich geringer (einige mm/s) als bei Ultraschallmotoren.

### 2.2 Positionsauflösung

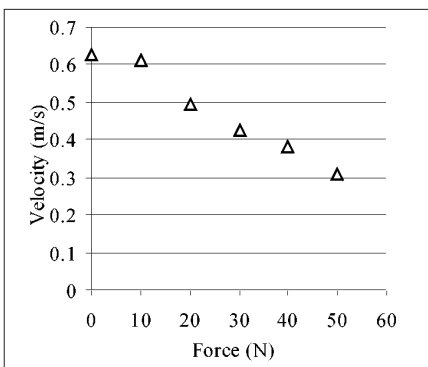
Die Positionsauflösung von Ultraschallmotoren erreicht typischerweise bis zu 50 nm. Da der Antrieb auf Reibung basiert, sind noch kleinere Werte im Ultraschallmodus kaum reproduzierbar. Im Analogmodus (Auslenkung der Keramik proportional zur angelegten Span-

nung) können jedoch theoretisch Auflösungen im Nanometerbereich erreicht werden.

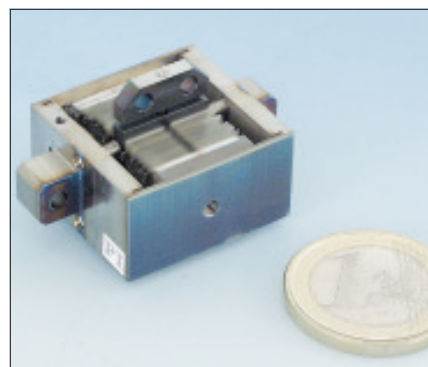
## 3 Steuerung

Die Steuerung von Ultraschallmotoren ist komplexer als die von DC- oder Schrittmotoren. Der Motorhersteller muss eine spezialisierte Treiberelektronik zur Erzeugung der Ultraschallschwingungen für den Motor liefern. Da jeder Motor eine geringfügig andere Eigenfrequenz hat, muss die Arbeitsfrequenz der Treiber entweder auf den Motor abgeglichen werden, oder sich über eine Autotuningfunktion selbständig einstellen.

### 3.1 Offener Regelkreis



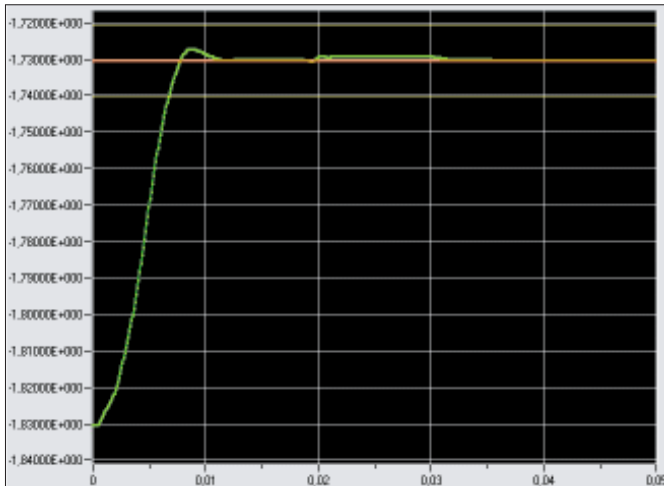
**Bild 6**  
Die Kraft- / Geschwindigkeitskennlinie eines leistungsfähigen Piezolinearmotors



**Bild 7**  
Ein Piezowalk Linear-motor mit einer Kraft-erzeugung von bis zu 500 N

**SKF Mini-Linearlager**  
Attraktive Technik. Faszinierende Lösungen.

Die **kleinste Führung**



**Bild 8**

Einschwingverhalten eines mit 100 g belasteten M-663 Piezomotorisches von PI. Der Tisch ist nach einem 0,1 mm großen Schritt in nur 10 ms auf ein Inkrement (0,1  $\mu\text{m}$ ) genau eingeschwingen



**Bild 9**

Miniaturstell Tisch mit Piezomotorantrieb. Euro-Münze zum Größenvergleich

Ultraschallmotoren können im offenen und geschlossenen Regelkreis betrieben werden.

Für den Betrieb im offenen Regelkreis kommen oft gepulste Treiberelektroniken zum Einsatz, die immer die volle Schwingungsamplitude liefern. Die Positions- und Geschwindigkeitsregelung erfolgt dann über die Einschalt-dauer, die beispielsweise über ein TTL-Signal gesteuert werden kann. Der Motor reagiert auf Einschaltimpulse ab ca. 10  $\mu\text{s}$ , und Schritte ab etwa 50 nm sind erzielbar.

Da jedoch keine festen „Rasterstellungen“ wie bei Schrittmotoren existieren, kann die Länge der einzelnen Schritte mit den Umge-

bedingungen variieren; bei Anwendung die über ein externes Feedback verfügen (z. B. die Augen und Hände eines Bedieners) oder den schnellen Wechsel zwischen zwei Positionen bedingen, ist ein gepulster Treiber eine effektive und preisgünstige Lösung.

### 3.2 Geschlossener Regelkreis

Zur exakten Positionierung mit hoher Reproduzierbarkeit wird ein Messsystem (z. B. ein Linearenkoder) und ein geschlossener Regelkreis benötigt. Analoge Treiber mit variabler Amplitude ermöglichen ein besseres Regelver-

halten als gepulste Systeme. Um die Vorteile des Antriebsprinzips wie Selbsthemmung im Ruhezustand voll nutzen zu können, sind Controller empfehlenswert, die über spezielle Regelparameter für Ultraschallantriebe verfügen. Ein besonders gutes dynamisches Verhalten mit kürzesten Einschwingzeiten lässt sich erzielen, wenn die Regelelektronik über eine dynamische Parameterumschaltung verfügt (Bild 8). Dabei kann beim Übergang vom statischen in den dynamischen Betrieb und umgekehrt jeweils ein optimaler Parametersatz verwendet werden. Solche spezialisierten Elektronik sind heute von verschiedenen Herstellern als Stand-Alone-Geräte oder PC-Einsteckkarten verfügbar.

## 4 Anwendungen

Durch eine Reihe spezifischer Eigenschaften lohnt sich der Einsatz von Piezomotoren besonders in Anwendungen, bei denen es auf minimale Abmessungen ankommt und / oder hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten entscheidend sind. Obwohl die Motoren momentan (noch) teurer sind als einfache DC- oder Schrittmotoren, können durch das direkte Linearantriebsprinzip und die Selbsthemmung Komponenten wie Spindeln, Getriebe und Bremsen entfallen und dadurch die Systemkosten erheblich gesenkt werden.

Generell gibt es zwei Hauptanwendungsgebiete für Piezolinearmotoren: Präzisionspositionierung und Automatisierungstechnik.

### 4.1 Präzisionspositionierung

Wie oben erwähnt, eignen sich Piezomotoren gut als Antriebe für miniaturisierte Präzisionsstellsysteme. Bild 10 zeigt einen Mikropositioniertisch, der bei einem Volumen von nur 20 x 25 x 8 mm<sup>3</sup> einen Hub von 20 mm erlaubt. Der integrierte Motor erreicht Beschleunigungen von bis zu 20 g und eine Maximalgeschwindigkeit von 800 mm/s. Die erzeugte Antriebs- und Haltekraft liegt bei 2–5 N, je nach Vorspannung. Vergleichbare Systeme mit konventionellen Antrieben sind momentan nicht verfügbar.

Bei Mikroskopietischen ist neben hoher Auflösung die Bauhöhe ein kritischer Parameter. Durch den Wegfall von Getrieben und Antriebsspindeln können mit Piezomotoren sehr flache XY-Systeme konstruiert werden (siehe Bild 10, oben links). Die Selbsthemmung im Ruhezustand sorgt darüber hinaus für hohe Positionsstabilität und Regelrauschfreiheit.

Der rein keramische Aufbau eröffnet neue Einsatzmöglichkeiten in Anwendungen, die magnetische Aktoren nicht tolerieren. Hier können die Elektronenstrahl-Lithographie oder Magnetspin-Tomographie als Beispiele dienen.

Ultraschallmotoren sind auch für Vakuumanwendungen prädestiniert, da keine Schmier-



**Bild 10**

Verschiedene ein- und mehrachsige Mikrostell-systeme mit Piezolinearmotoren. Oben rechts ist eine Regelelektronik mit dynamischer Parameterumschaltung und integriertem Ultraschall-treiber abgebildet

stoffe zum Betrieb benötigt werden und die Keramikplatten ausgasfrei sind.

#### 4.2 Automatisierungstechnik

Neben der Präzisionspositionierungstechnik bietet die Automatisierungstechnik Anwendungen für Piezomotoren. Dabei ist die Genauigkeit weniger von Bedeutung als die hohe Beschleunigung, durch die sich Schaltzeiten im Millisekundenbereich realisieren lassen. Piezolinearmotoren können in manchen Anwendungen selbst mit pneumatischen Aktoren konkurrieren, weil sie besser steuerbar sind und durch den Wegfall von

Pressluftleitungen ein kompakter Aufbau sowie auf die Dauer günstigerer Betrieb möglich wird.

#### 5 Ausblick

Ultraschallmotoren werden elektromagnetische Motoren in nächster Zukunft nicht vom Markt verdrängen. Die neueste Generation von Piezomotoren und Steuerungen ermöglichen aber die Konstruktion von Systemen, die mit Elektromotoren überhaupt nicht, oder nur mit deutlich höherem Aufwand möglich sind. Steigende Stückzahlen und neue Verfahren beim

Herstellungsprozess senken die Kosten und erschließen dadurch immer neue Anwendungsfelder.

#### Literatur

[1] PI ultrasonic drives and stages, [http://www.physikinstrumente.de/products/section7/piezo\\_motor\\_index.htm](http://www.physikinstrumente.de/products/section7/piezo_motor_index.htm)

[2] W. Wischnewskiy, S. Kovalev, J. Rapp, O. Vyshnevskyy, „Simple

New Ultrasonic Piezoelectric Actuators for Precision Linear Drives“, 2004 International Conference on New Actuators  
[3] PI Gesamtkatalog, 2005

## Parallelkinematik-Maschine

Die „Flexmotion“ Tripod-Parallelkinematikmaschine von Faude ist eine Ergänzung zu den bisher bekannten Robotersystemen. Sie ist derzeit die einzige Tripod-Parallelkinematik, die auf dem Markt als multifunktionales System mit hoher Genauigkeit und Präzision erhältlich ist. Flexmotion bietet sowohl Multifunktionalität als auch Parallel- Processing und Handling. Ebenfalls möglich sind Bearbeiten, Umformen, Fügen, Dispensen, Schweißen in Kombination mit bandsynchronem Pick & Place. Besonders wirtschaftlich ist die Flexmotion durch Flächen- und Kosteneinsparung, durch Integration von Prozess und Handling in einer Station und durch Verwendung von Gleichteilen. Die Multifunktionalität wird durch eine Plattformkonzeption und durch schnelle Umstellung auf neue Prozesse erreicht. Durch 3D-Simulation wird der Arbeitsraum auf die Bedürfnisse des Kunden angepasst. Der Grundgedanke – ein multifunktionales System zu entwickeln, das auf dem gleichen Grundkonzept basiert – wurde hier kundenspezifisch umgesetzt.

Faude  
71116 Gärtringen  
Tel.: 0 70 34/25 67-0  
Fax: 0 70 34/25 67-67  
E-Mail: [faude@faude.de](mailto:faude@faude.de)  
[www.faude.de](http://www.faude.de)



Die „Flexmotion“ Tripod-Parallelkinematik wird auf der Hannover Messe präsentiert

## Bissfest?

Natürlich - die Dichtung ist von Parker und sie ist nicht nur bissfest, sondern auch dauerelastisch, beständig gegen Speichel, Karies, Milchsäure und Tränenflüssigkeit.

Was Parker Dichtungen leisten, wo sie seit Jahrzehnten sicher und zuverlässig eingesetzt werden, welche Spezialitäten wir für Sie entwickeln können u.v.m. beantworten wir Ihnen gerne auf Anfrage.

Schreiben Sie an [seal-europe@parker.com](mailto:seal-europe@parker.com) oder schauen Sie auf unsere Homepage:

[www.parker.com/euroseal](http://www.parker.com/euroseal).

Wir stellen aus:

  
**HANNOVER  
MESSE**  
11. - 15. April 2005  
Halle 20, Stand B31



Ihr System-Partner für Dichtungen!

  
**Dichtungen**

**Parker Hannifin GmbH**  
Seal Group Europe

D-74385 Pleidelsheim  
Telefon 07144 206-0  
e-mail: [seal-europe@parker.com](mailto:seal-europe@parker.com)  
[www.parker.com/euroseal](http://www.parker.com/euroseal)