

## **Anregungskonzepte und Modellierung piezoelektrischer Trägheitsmotoren**

***Dipl.-Ing. Matthias Hunstig,***

***Dr.-Ing. Tobias Hemsel,***

***Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro***

*Universität Paderborn, Mechatronik und Dynamik*

*Fürstenallee 11, 33102 Paderborn*

*Tel.: +49 (0) 5251 60 62 74, Fax: +49 (0) 5251 60 62 78*

*E-Mail: matthias.hunstig@uni-paderborn.de*

### **Zusammenfassung**

Piezoelektrische Trägheitsmotoren nutzen die Trägheit einer bewegten Masse, um diese in kleinen Schritten durch abwechselnde Haft- und Gleitphasen voranzutreiben. Eine Kernfrage bei der Entwicklung eines piezoelektrischen Trägheitsmotors ist, welches elektrische Ansteuersignal für das gewünschte Motorverhalten optimal ist. Das elektrische Signal führt zu einer Bewegung des piezoelektrischen Aktors und damit der Antriebsstange, die den reibschlüssigen Vortrieb bewirkt. Entsprechend wird diese Fragestellung in zwei Teilen untersucht: Anhand eines Starrkörpermodells werden zunächst Bewegungsverläufe für die Antriebsstange ermittelt, mit denen die maximale Geschwindigkeit erreicht wird. Dabei werden drei Antriebsmodi identifiziert. Mit allen kann eine höhere Geschwindigkeit als mit der heute häufig verwendeten Sägezahnanregung erreicht werden. Anschließend wird ein einfaches dynamisches Modell eines piezoelektrischen Aktors genutzt, um die notwendigen elektrischen Ansteuersignale für die verschiedenen Antriebsmodi zu bestimmen. Es zeigt sich, dass das gewählte einfache Modell hierzu nur bedingt geeignet ist.

### **Schlüsselwörter**

Piezoelektrischer Trägheitsmotor, Stick-Slip-Motor, Modellierung

## **1 Einleitung und Motivation**

Piezoelektrische Trägheitsmotoren nutzen die Trägheit einer bewegten Masse, um diese in kleinen Schritten durch abwechselnde Haft- und Gleitphasen voranzutreiben. Bild 1 verdeutlicht das Funktionsprinzip. Trägheitsmotoren existieren in einer Vielzahl verschiedener Bauformen und können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden: Den Typ „feststehender Aktor“ und den Typ „bewegter Aktor“. In der Fachliteratur sind diese Typen auch als „stick-slip drive“ bzw. „impact drive“ bekannt [Zes97, S.36]. „Stick-slip

drive“ wird jedoch gleichzeitig häufig als Oberbegriff für sämtliche piezoelektrischen Trägheitsmotoren verwendet.

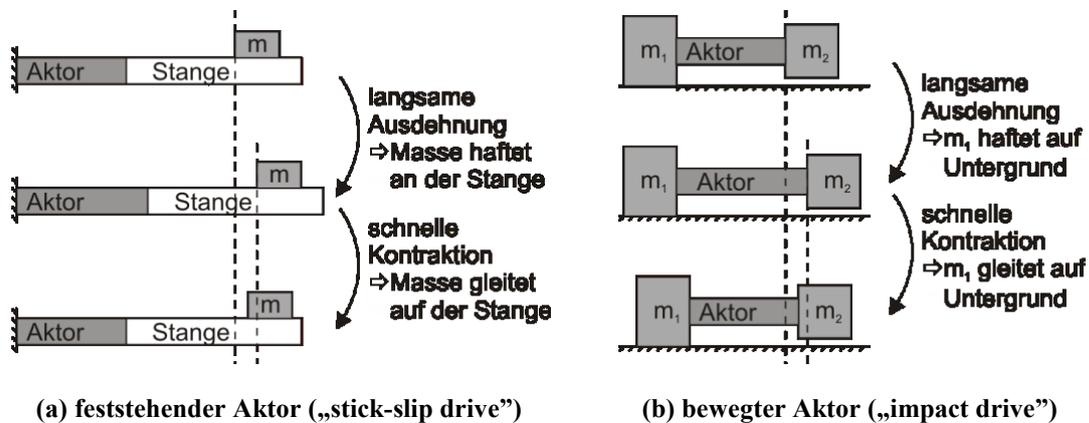


Bild 1: Funktionsprinzipien piezoelektrischer Trägheitsmotoren

Verglichen mit anderen piezoelektrischen Motoren ist der Aufbau von Trägheitsmotoren sehr einfach: Sie bestehen aus wenigen, einfach zu fertigenden Bauteilen und werden mit einem einzigen Eingangssignal angesteuert. Zum Einsatz kamen solche Motoren zuerst als Feinpositionierungseinrichtungen, z. B. in der Mikroskopie [Poh87], [ATH87]. Mittlerweile werden sie beispielsweise auch zum Verwacklungsschutz in Digitalkameras [Kon08-ol] und in Zoomobjektiven von Mobiltelefonen und PDAs eingesetzt, wo ihre gute Miniaturisierbarkeit genutzt wird [MOY+07], [Uch08].

Das zur Ansteuerung des piezoelektrischen Aktors verwendete Signal ist entscheidend für die Funktion einer Trägheitsmotors. Das klassische und nach wie vor am häufigsten verwendete Anregungssignal ist ein Sägezahnverlauf [Poh87], [ATH87], [EO96], [BB03], [ZZH+08], ebenfalls verbreitet sind Variationen mit komplett oder teilweise zyklidem [RNK+90], [LCL94] oder parabolischem [HYF+90], [FHY+98] Verlauf.

Unser Ziel ist die Bestimmung von Ansteuersignalen, mit denen die maximale effektive Geschwindigkeit des Schlittens erreicht werden kann. Hierzu werden in einem ersten Schritt anhand eines Starrkörpermodells Weganregungssignale für die Antriebsstange ermittelt, mit denen die maximale Geschwindigkeit erreicht wird. Dieser Schritt wird in Kapitel 3 beschrieben, nachdem in Kapitel 2 der untersuchte Motor beschrieben wurde. Um aus den ermittelten Wegsignalen in einem zweiten Schritt die geeigneten elektrischen Eingangssignale für den piezoelektrischen Aktor herzuleiten, muss das dynamische Verhalten des Aktors bekannt sein. Die Modellierung des Aktors und seine dynamische Antwort auf die Ansteuerung mit dem berechneten Anregungssignal werden in Kapitel 4 vorgestellt.

Durch diesen modellbasierten Ansatz kann das Modell des Trägheitsmotors mit Modellen weiterer Komponenten wie beispielsweise der Ansteuerungselektronik und der Last verknüpft werden, um das Verhalten eines Gesamtsystems zu analysieren. Zudem kön-

nen Trägheitsmotoren unter Berücksichtigung anwendungsspezifischer Randbedingungen modellbasiert schneller und kostengünstiger entwickelt werden.

## 2 Untersucher Motor

Der für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen aufgebaute Versuchsmotor ist eine Weiterentwicklung des in [HH09] vorgestellten Motors. Er ermöglicht die weitgehend unabhängige Variation mehrerer für den Antriebsmechanismus relevanter Parameter, wie Reibpaarung, Anpresskraft und Last. Er basiert auf einem vorgespannten piezoelektrischen Vielschicht-Aktor vom Typ PSt 150/5/20 der Piezomechanik GmbH. Auf diesem Aktor montiert ist die zylindrische Antriebsstange. Der Schlitten aus Aluminium kann mit verschiedenen Reibbelägen ausgerüstet werden. Er wird durch eine variable Zahl von Magneten an die Antriebsstange gepresst, seine Masse kann durch Gewichte variiert werden. Bild 2 zeigt den aufgebauten Motor im Labor.

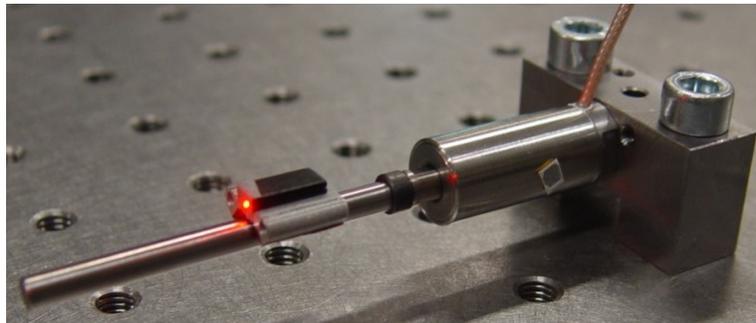


Bild 2: Versuchsmotor bestehend aus vorgespanntem piezoelektrischem Vielschicht-aktor, Antriebsstange und Schlitten mit Magneten

## 3 Antriebsmodi für maximale Geschwindigkeit

### 3.1 Modellbildung

Das in Bild 3 dargestellte Starrkörpermodell für die wegangeregte Antriebsstange und den Schlitten eines Trägheitsmotors ist Ausgangspunkt für die folgenden Untersuchungen. Darin sind  $x_r$  und  $x_s$  die Koordinaten von Antriebsstange bzw. Schlitten und  $m_r$  und  $m_s$  die Massen der beiden Teile.  $F_c$  bezeichnet die Kontaktkraft zwischen Stange und Schlitten,  $F_f$  die wirkende Reibkraft.  $F_M$  ist eine externe, durch einen Haltemechanismus, z. B. eine Feder oder einen Magneten, bewirkte Anpresskraft. Die Gewichtskraft  $F_g$  wirkt im Winkel  $\alpha$  zur Kontaktkraft. Der Winkel  $\alpha$  ist der Neigungswinkel der Antriebsstange, d. h. für waagerechte Bewegung ist  $\alpha=0^\circ$ , für senkrechte Bewegung nach oben ist  $\alpha=90^\circ$ . Dieser Winkel wird wie die übrigen Parameter als variabel betrachtet, um in einer späteren Sensitivitätsanalyse seinen Einfluss bestimmen zu können. Dies ist besonders für Anwendungen mit veränderlichem Neigungswinkel relevant, beispielsweise bei Verwendung des Trägheitsmotors in einer Digitalkamera.

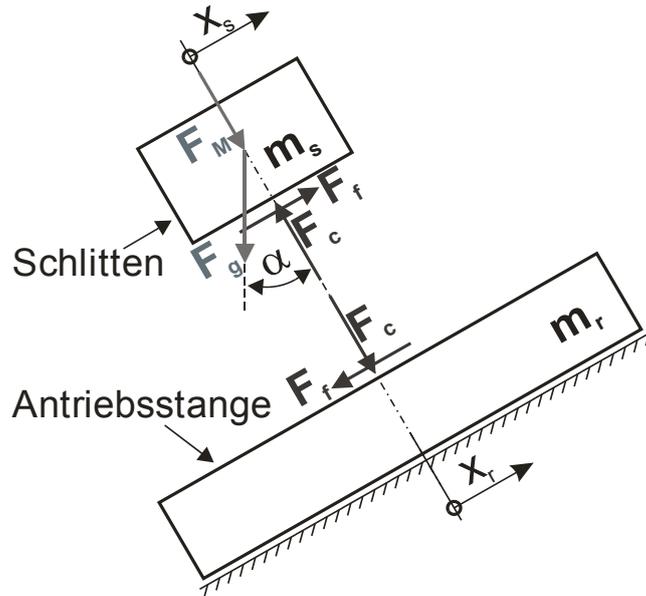


Bild 3: Starrkörpermodell eines Trägheitsmotors

Es werden folgende Annahmen in Bezug auf das Starrkörpermodell getroffen:

- Antriebsstange und Schlitten können als Starrkörper betrachtet werden, es werden keine Schwingungen in den Körpern angeregt. Diese Annahme kann bei Anregung mit Frequenzen weit unterhalb der ersten Eigenfrequenz von Stange bzw. Schlitten als gültig betrachtet werden.
- Die Antriebsstange wird rein axial angeregt.
- Die Auslenkung  $x_r$  der Antriebsstange kann mit folgenden Einschränkungen, die die begrenzte Auslenkung und Dynamik des piezoelektrischen Aktors abbilden, frei verändert werden:  $0 \leq x_r \leq x_{r,max}$ ,  $|\ddot{x}_r| \leq a_{r,max}$
- Es herrscht Coulombsche Reibung zwischen Antriebsstange und Schlitten.
- Außer der Schwerkraft  $F_g$  und der zusätzlichen Anpresskraft  $F_M$  wirken auf den Schlitten keine externen Kräfte.

Die Schlittenbewegung in  $x_s$ -Richtung wird beschrieben durch

$$m_s \ddot{x}_s = -F_g \sin \alpha + F_f = -m_s g \sin \alpha + F_f$$

mit  $F_f = f(\mu_s, \mu_d, F_c)$ ,

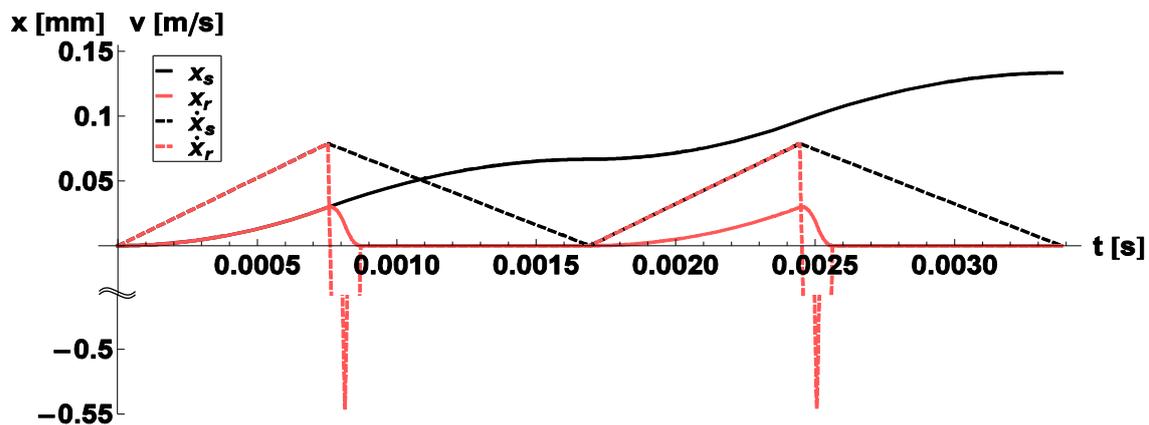
$$F_c = F_g \cos \alpha + F_M = m_s g \cos \alpha + F_M.$$

Darin ist  $\mu_s$  der Haftbeiwert,  $\mu_d$  der Gleitreibungsbeiwert.

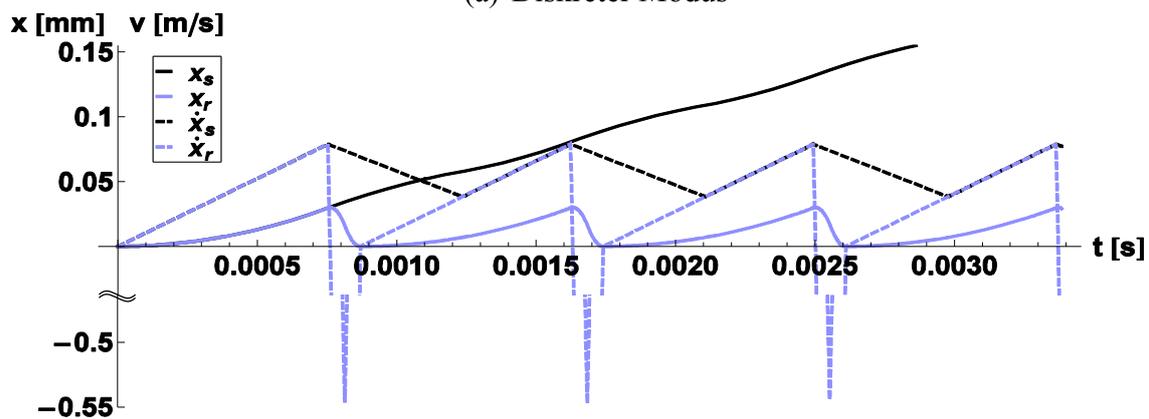
Im Folgenden werden drei Weganregungs-Modi zur Maximierung der effektiven Schlittengeschwindigkeit hergeleitet. Bild 4 zeigt die Bewegung von Antriebsstange und Schlitten in diesen drei Modi, berechnet mit den Parametern eines Versuchsmotors. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Parameter für die Motorsimulation

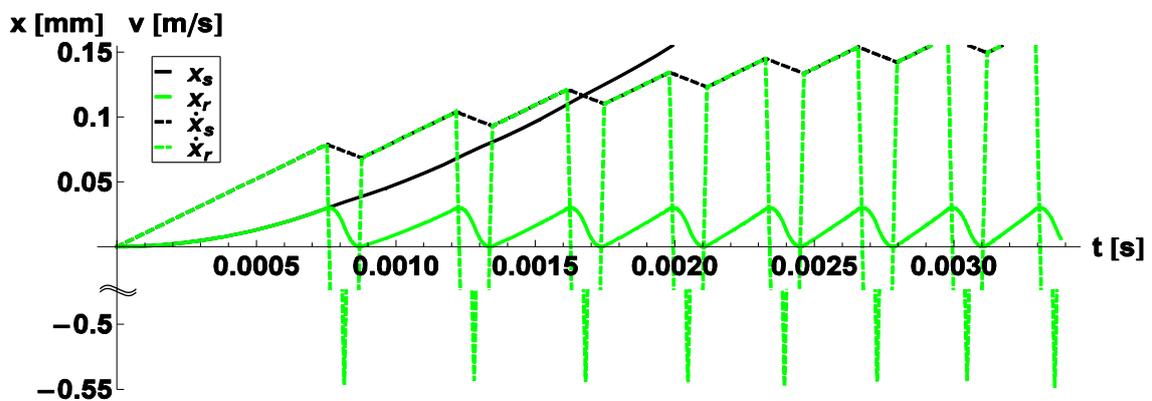
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	$\alpha = 60^\circ$	$F_M = 1,5 \text{ N}$	$m_s = 2 \text{ g}$
$\mu_s = 0,15$	$\mu_d = 0,1$	$x_{r,max} = 30 \text{ }\mu\text{m}$	$a_{r,max} = 10^4 \text{ m/s}^2$



(a) Diskreter Modus



(b) Kontinuierlicher Modus



(c) Beschleunigender Modus

Bild 4: Bewegung von Antriebsstange und Schlitten in den drei Antriebsmodi

### 3.2 Diskreter Modus

Trägheitsmotoren benutzen im Allgemeinen eine Haftphase zum Beschleunigen des angetriebenen Körpers (Schlitten) und eine anschließende Gleitphase, in der der antreibende Körper in seine Ausgangsposition zurückkehrt.

Während der Haftphase gibt es keine Relativverschiebung zwischen Antriebsstange und Schlitten, die Geschwindigkeit der beiden Körper ist gleich:  $\dot{x}_s = \dot{x}_r$ . Damit kein Gleiten auftritt, darf die Reibkraft die Losreißkraft  $F_{f,max} = \mu_s F_C$  nicht überschreiten.

In der Haftphase soll die größtmögliche Verschiebung des Schlittens in der kurzstmöglichen Zeit erreicht werden. Die dafür erforderliche Maximierung von  $\ddot{x}_s$  wird mit  $F_f = F_{f,max}$  erreicht. Für eine Bewegung in positive  $x_s$ -Richtung lautet die Bewegungsgleichung des Schlittens dann:

$$\ddot{x}_s = a_0 = -g \sin \alpha + \frac{\mu_s F_C}{m_s}$$

Für einen gegebenen Neigungswinkel  $\alpha$  ist dieser Ausdruck konstant, d. h. während der Haftphase sollten sich die Antriebsstange und damit der Schlitten mit einer konstanten Beschleunigung bewegen. Diese wird mit  $a_0$  bezeichnet.

Zur Geschwindigkeitsmaximierung muss der Schlitten so lange wie möglich beschleunigt werden. Die Antriebsstange beginnt idealerweise mit dem Abbremsen mit  $-a_{r,max}$  also genau so, dass sie bei maximaler Auslenkung  $x_{r,max}$  die Geschwindigkeit Null erreicht. Sobald sie abzubremesen beginnt, tritt wegen  $a_{r,max} > a_0$  Gleiten auf. Der Schlitten wird durch die Gleitreibung gleichmäßig verlangsamt mit

$$a_s = -g \sin \alpha - \frac{\mu_d F_C}{m_s}$$

Die Bewegung des Schlittens in der Gleitphase ist unabhängig von der Bewegung der Antriebsstange. Um zu verhindern, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Körpern null wird, während der Schlitten noch in Bewegung ist, sollte die Stange möglichst schnell in ihre Ausgangsposition zurückkehren. Dies garantiert, dass Haftung erst auftritt, wenn beide Körper in Ruhe sind. Die sich so für den diskreten Modus ergebenden Weg- und Geschwindigkeitsverläufe von Stange und Schlitten sind in Bild 4(a) dargestellt.

### 3.3 Kontinuierlicher Modus

Im diskreten Modus existiert am Ende eines jeden Schritts eine relative lange Phase, in der die Antriebsstange sich nicht bewegt, der piezoelektrische Aktor also ruht und nicht zur Motorleistung beiträgt. Wird diese Ruhezeit eliminiert, so beginnt die Antriebsstange ihre Bewegung direkt nach der Rückkehr in ihre Ausgangsposition. Nach einiger Zeit erreicht sie die Momentangeschwindigkeit des Schlittens und es tritt Haften auf, der Schlitten wird wieder beschleunigt. Er bleibt in diesem Antriebsmodus kontinuierlich in

Bewegung. Die Weg- und Geschwindigkeitsverläufe im kontinuierlichen Modus zeigt Bild 4(b).

### 3.4 Beschleunigender Modus

Im kontinuierlichen Modus hat die Antriebsstange sich bereits um einen signifikanten Teil ihrer maximalen Auslenkung bewegt, bevor sie mit dem Schlitten aufschließt und diesen wieder beschleunigen kann. In derselben Zeit hat der Schlitten bereits deutlich an Geschwindigkeit verloren. Um die effektive Geschwindigkeit des Schlittens weiter zu steigern, muss die Länge dieser Gleitphase weiter reduziert werden. Hierzu beschleunigt die Antriebsstange mit ihrer maximalen Beschleunigung  $a_{r,max}$ , bis sie dieselbe Geschwindigkeit hat wie der Schlitten. Dann setzt Haften ein und die Antriebsstange beschleunigt den Schlitten weiter mit  $a_0$ . Die mittlere Geschwindigkeit des Schlittens nimmt so kontinuierlich zu, bis eine Sättigungsgeschwindigkeit erreicht wird. Dieser Antriebsmodus wird daher als beschleunigender Modus bezeichnet und ist in Bild 4(c) dargestellt.

### 3.5 Sägezahnanregung

Beim Vergleich der drei Antriebsmodi hinsichtlich der erreichbaren Geschwindigkeit soll auch eine Sägezahnanregung berücksichtigt werden. Das Sägezahnsignal soll einen Betrieb mit diskreten Schritten ermöglichen. Um ein realisierbares Signal ohne Geschwindigkeitssprünge zu erhalten, werden für das Sägezahnsignal dieselben maximalen Beschleunigungen für Haft- und Gleitphase,  $a_0$  und  $a_{r,max}$  wie für die anderen Modi angesetzt. Die Geschwindigkeiten der steigenden und der fallenden Flanke des Sägezahnsignals werden mit  $v_{max,1} = 0,2 \frac{m}{s}$  bzw.  $v_{max,2} = 0,02 \frac{m}{s}$  angenommen. Je höher diese Geschwindigkeiten sind, desto größer ist der parabolische Anteil des Sägezahnverlaufs und damit die Ähnlichkeit zum Signal des diskreten Modus. Bild 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

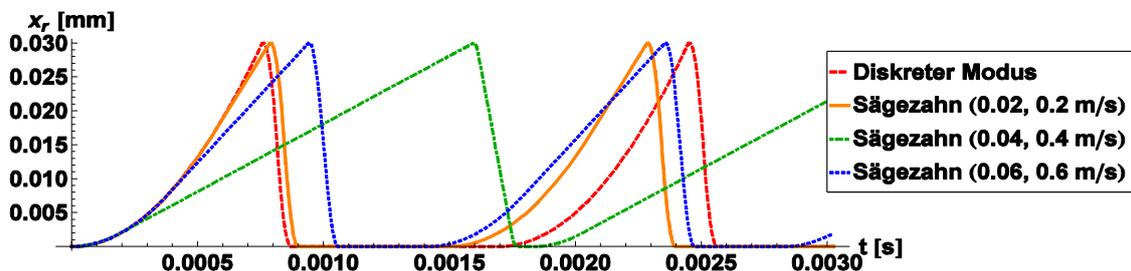


Bild 5: Signal des diskreten Modus und Sägezahnanregung mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten im Vergleich

### 3.6 Vergleich und Fazit

Bild 6 zeigt die Schlittenbewegung bei Anregung mit den vier verschiedenen Signalen für die ersten 5 ms nach dem Start aus der Ruhelage.

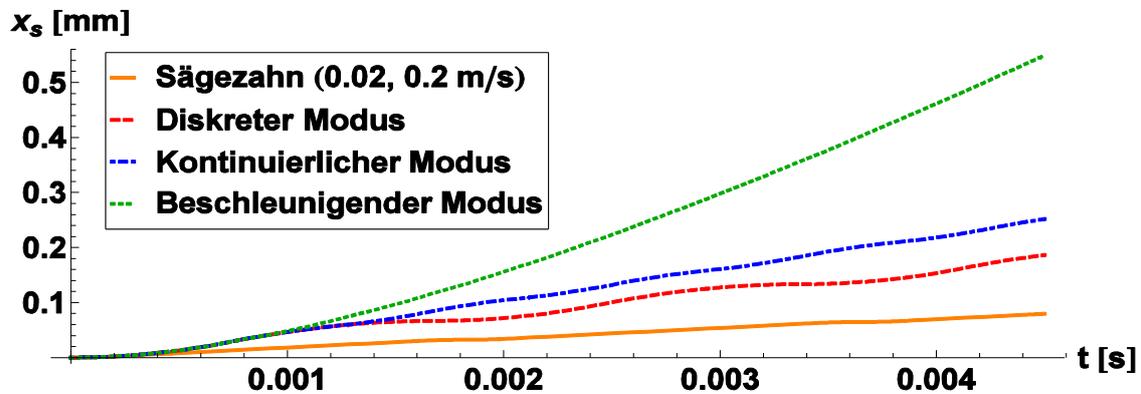


Bild 6: Schlittenbewegung bei verschiedenen Anregungssignalen

Tabelle 2 enthält die Schrittgröße und -dauer sowie die effektive Geschwindigkeit, die sich nach einer eventuellen Beschleunigungsphase ergibt. Wie erwartet wird im beschleunigenden Modus die mit Abstand höchste Geschwindigkeit erreicht. Es folgen der kontinuierliche und der diskrete Modus und schließlich die Sägezahnanregung.

Tabelle 2: Schrittgröße und -dauer und effektive Geschwindigkeit nach der Beschleunigungsphase bei unterschiedlicher Anregung

	Schrittgröße	Schrittdauer	Effektive Geschwindigkeit
<b>Diskrete Sägezahnanregung</b>	32,2 $\mu\text{m}$	1,77 ms	18,2 mms
<b>Diskreter Modus</b>	66,7 $\mu\text{m}$	1,69 ms	39,4 mm/s
<b>Kontinuierlicher Modus</b>	51,0 $\mu\text{m}$	0,87 ms	58,6 mm/s
<b>Beschleunigender Modus</b>	57,5 $\mu\text{m}$	0,27 ms	210,3 mm/s

Eine Untersuchung von verschiedenen Möglichkeiten, die Geschwindigkeit eines Trägheitsmotors zu steuern ergab, dass eine Geschwindigkeitssteuerung am einfachsten und mit dem besten Ergebnis im diskreten Modus umzusetzen ist [HH10]. Der beschleunigende Modus ist der ansteuerungstechnisch am schwierigsten umzusetzende, da das Signal bis zum Erreichen der Sättigungsgeschwindigkeit mit jedem Schritt verändert werden muss. Für die korrekte Berechnung des Signals muss die Geschwindigkeit des Schlittens bekannt sein. Messtechnisch ist dies in einer kommerziellen Anwendung kaum mit vertretbarem Aufwand zu realisieren. Die Berechnung der Schlittengeschwindigkeit anhand eines Modells ist möglich, reagiert jedoch empfindlich auf Modellungenauigkeiten und Störungen, da diese nicht ohne weiteres erkannt und ausgeglichen werden können. Eine kommerzielle Anwendung dieses Modus erscheint deshalb

schwierig. Daher empfehlen wir in Anwendungen, in denen Einzelschrittbetrieb oder einstellbare Geschwindigkeit gefordert sind, die Verwendung des diskreten Modus und für Anwendungen mit hoher konstanter Geschwindigkeit den kontinuierlichen Modus.

## 4 Modellierung des piezoelektrischen Aktors

Für die Herleitung der Antriebsmodi in Kapitel 3 wurde eine Weganregung der Antriebsstange angenommen. In einem realen Motor wird die Antriebsstange durch einen piezoelektrischen Aktor bewegt, der zudem im Allgemeinen auch die Abstützung der Antriebsstange übernimmt. Ein solcher Aktor kann ladungs- oder spannungsgeregelt betrieben werden. Während der Zusammenhang von Spannung und Auslenkung hysteresebehaftet ist, verhalten sich Auslenkung und Ladung nahezu linear zueinander [Jen95]. Ein ladungsgeregelter Verstärker ist jedoch aufwendiger und wird in vielen möglichen Anwendungen piezoelektrischer Trägheitsmotoren nicht zu integrieren sein. Daher sollen Spannungssignale ermittelt werden, mit denen der Aktor die in Kapitel 3 ermittelten Auslenkungsverläufe zeigt. Hierzu ist ein Modell des Aktors erforderlich, das die Dynamik des Spannungs-Auslenkungszusammenhangs ausreichend genau wiedergibt.

### 4.1 Modellbildung

Die Abbildung piezoelektrischer Aktoren durch ein elektrisches Modell mit konzentrierten Parametern [Lit03] ist weit verbreitet. Die Parameteridentifikation für ein solches Modell erfolgt meist aus einer Admittanzmessung in der Nähe einer, im Allgemeinen der ersten, Resonanzfrequenz. Ein solches Modell ist nur in der Nähe der betrachteten Resonanzfrequenz gültig. Trägheitsmotoren verwenden jedoch nichtharmonische Schwingungen, die eine Vielzahl von Frequenzen enthalten. Für die Modellierung des Aktors soll daher ein vereinfachtes dynamisches Modell in Form eines PT2-Gliedes verwendet werden. Die Übertragungsfunktion des Modells lautet:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{1 + 2dT s + T^2 s^2}$$

Die Parameter der Übertragungsfunktion können aus einer gemessenen Sprungantwort des Systems ermittelt werden [Föl94].

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

Für die Identifikation wurde der Aktor des in Abschnitt 2 beschriebenen Motors mit einem Spannungssprung von 0 V auf 40 V angesteuert. Das Signal aus einem Funktionsgenerator wurde mit einem Verstärker D\*ASS AVB 250/30P verstärkt. Geschwindigkeit und Auslenkung des Aktors wurden mit einem Laservibrometer gemessen.

### 4.1.2 Modellvalidierung

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Sprungantwort-Messung gemeinsam mit der Antwort des aus der gemessenen Sprungantwort identifizierten Systems auf einen idealen Spannungssprung sowie auf den gemessenen, tatsächlichen Spannungssprung. Zum Vergleich ist die Antwort eines statischen Modells mit der Übertragungsfunktion  $G(s) = K$  auf den realen Sprung dargestellt.

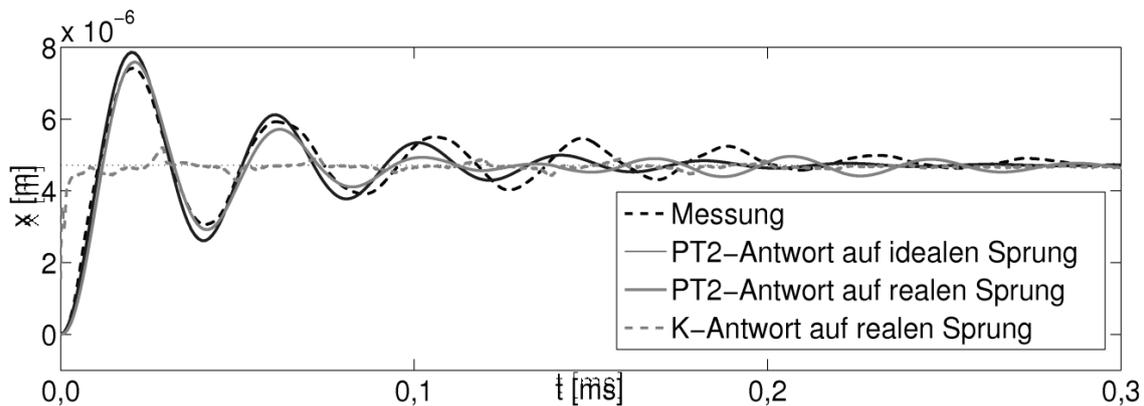


Bild 7: Antwort des piezoelektrischen Aktors auf einen 40-V-Sprung

Bild 7 zeigt deutlich, dass keines der Modelle den gemessenen Verlauf genau wiedergibt. Auch durch Anpassung der Parameter kann keine wesentliche Verbesserung der Übereinstimmung erreicht werden. Es zeigen sich zwei wesentliche Abweichungen in den Sprungantworten: Zum einen ist offenbar mehr als eine einzige Eigenschwingung angeregt worden. Daraus ergeben sich eine Verformung des Auslenkungsverlaufs und eine Frequenzverschiebung, die in Bild 7 insbesondere ab dem vierten Auslenkungsmaximum erkennbar sind. Zudem scheint die Dämpfung des realen Systems nicht konstant zu sein, die Schwingungsamplitude sinkt nicht exponentiell. Dieser Effekt kann jedoch auch durch die Überlagerung mehrerer Eigenschwingungen entstehen.

Das Verhalten eines vorgespannten piezoelektrischen Aktors kann durch ein PT2-Glied somit nicht vollständig abgebildet werden. Für eine exakte Abbildung des Aktorverhaltens sind aufwendigere Modelle notwendig. Jedoch liefert auch dieses einfache Modell eine deutlich bessere Repräsentation des Systems als ein statisches Modell. Die Parameteridentifikation ist vergleichsweise einfach.

Es kann aufgrund seiner linearen Übertragungsfunktion recht einfach für die näherungsweise Berechnung eines elektrischen Ansteuerungssignals für eine gewünschte Aktorbewegung genutzt werden. Bild 8 zeigt die gemessene Verschiebung zusammen mit dem berechneten idealen Auslenkungsverlauf und den Modellantworten auf das gemessene Spannungssignal. für den diskreten Betriebsmodus mit einer Frequenz von 1500 Hz (siehe auch Abschnitt 0).

Es zeigen sich zwei wesentliche Abweichungen zwischen dem PT2-Modell und der Messung: In der steigenden Flanke des Signals ist die Hysterese des Aktors deutlich er-

kennbar, sie ist jedoch nicht im Modell enthalten. Zudem lässt das lange Nachschwingen des gemessenen Signals im Vergleich zum Modell darauf schließen, dass die Dämpfung des PT2-Modells zu hoch ist. Dies ergibt sich daraus, dass die Dämpfung über das logarithmische Dekrement aus den ersten beiden Maxima der Sprungantwort ermittelt wurde, während die beobachtete Dämpfung wie oben beschrieben nicht konstant ist.

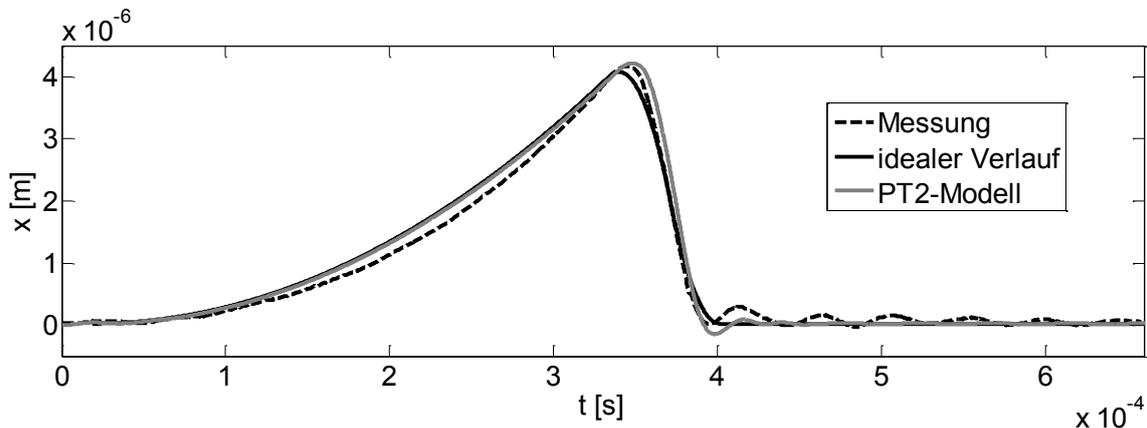


Bild 8: Gemessene Auslenkung und Modellantwort bei Anregung im diskreten Modus

## 4.2 Fazit

Mit dem bestehenden Modell ist das gemessene Systemverhalten des Aktors nur bedingt nachvollziehbar. Mit einem detaillierteren Modell, das insbesondere auch Hysterese abbildet, sind bessere Ergebnisse zu erwarten. Das untersuchte PT2-Modell liefert jedoch deutlich bessere Ergebnisse als ein statisches Modell und eignet sich gut für den Einsatz in einer Vorsteuerung des Aktors. Seine Parameter sind vergleichsweise leicht zu identifizieren.

## 5 Resümee und Ausblick

Ausgehend von einem einfachen Starrkörpermodell eines piezoelektrischen Trägheitsmotors wurden drei Ansteuerungsmodi zur Maximierung der Geschwindigkeit hergeleitet. Alle drei Modi erreichen höhere Geschwindigkeiten als die in bestehenden Motoren häufig verwendete Sägezahnanregung. Daraus kann geschlossen werden, dass die Geschwindigkeit piezoelektrischer Trägheitsmotoren durch geeignete Ansteuerungssignale deutlich verbessert werden kann. Die bei der modellbasierten Herleitung der Ansteuerungsmodi gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss der einzelnen Motorparameter (vgl. Tabelle 1) sind zudem bei der Entwicklung verbesserter Motoren nützlich.

Um ein geeignetes Spannungssignal zur experimentellen Validierung dieser Ergebnisse zu ermitteln, wurde ein vereinfachtes dynamisches Modell des piezoelektrischen Aktors aufgestellt. Es zeigte sich, dass das Modell nur eingeschränkt genau ist. Der nächste Schritt wird daher das Aufstellen eines detaillierteren Modells des piezoelektrischen

Aktors sein. Dieses Modell soll in einer Vorsteuerung des piezoelektrischen Trägheitsmotors für die Berechnung von Spannungssignalen genutzt werden, um die drei berechneten Ansteuerungsmodi im Versuch anzuwenden.

## Literatur

- [ATH87] ANDERS, M.; THAER, M.; HEIDEN, C.: Simple micropositioning devices for STM. *Surf. Sci.* 181, Nr. 1-2, 1987
- [BB03] BERGANDER, A.; BREGUET, J.-M.: Performance improvements for stick-slip positioners. *Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2003
- [EO96] ERLANDSSON, R.; OLSSON, L.: A three-axis micropositioner for ultrahigh vacuum use based on the inertial slider principle. *Rev. Sci. Instrum.* 67, Nr. 4, 1996
- [FHY+98] FURUTANI, K.; HIGUCHI, T.; YAMAGATA, Y.; MOHRI, N.: Effect of lubrication on impact drive mechanism. *Prec. Eng.* 22, Nr. 2, 1998
- [Föll94] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*, S. 44. 8. Aufl., Hüthing Verlag, Heidelberg, 1994
- [HH09] HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.: Modellbasierte Entwicklung piezoelektrischer Trägheitsmotoren. 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe, 2009
- [HH10] HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.: Drive Signals for Maximizing the Velocity of Piezoelectric Inertia Motors. *J. Korean Phy. Soc.*, 2010 – Abstract angenommen
- [HYF+90] HIGUCHI, T.; YAMAGATA, Y.; FURUTANI, K.; KUDOH, K.: Precise positioning mechanism utilizing rapid deformations of piezoelectric elements. *Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, 1990
- [Jen95] JENDRITZA, D. J. und weitere: „Technischer Einsatz neuer Aktoren“, S. 197ff. 2. Aufl., expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995.
- [Kon08-ol] [http://www.konicaminolta.com/about/research/core\\_technology/picture/antiblur.html](http://www.konicaminolta.com/about/research/core_technology/picture/antiblur.html); aufgerufen am 27.02.2008
- [LCL94] LE LETTY, R.; CLAEYSSSEN, F.; LHERMET, N.: Numerical Modelling of Piezoelectric Inertial Stepping Motors. *ACTUATOR 1994 Conference Proceedings*, Bremen, 1994
- [Lit03] LITTMANN, W.: Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. *Dissertation, Universität Paderborn*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2003
- [MOY+07] MATSUSAKA, K.; OZAWA, S.; YOSHIDA, R.; YUASA, T.; SOUMA, Y.: Ultracompact optical zoom lens for mobile phone. *Proceedings of SPIE*, Vol. 6502, 2007
- [Poh87] POHL, D. W.: Dynamic piezoelectric translation devices. *Rev. Sci. Instrum.* 58, Nr. 1, 1987
- [RNK+90] RENNER, C.; NIEDERMANN, P.; KENT, A.-D.; FISCHER, O.: A vertical piezoelectric inertial slider. *Rev. Sci. Instrum.* 61, Nr. 3, 1990
- [Uch08] UCHINO, K.: Piezoelectric Motors for Camera Modules. *ACTUATOR 2008 Conference Proceedings*. Bremen, HVG Hanseatische Veranstaltungs-GmbH, 2008
- [Zes97] ZESCH, W.: Multi-Degree-of-Freedom Micropositioning Using Stepping Principles. *Dissertation, ETH Zürich*. 1997

[ZZH+08] ZHANG, H.; ZENG, P.; HUA, S.; CHENG, G.; YANG, Z.: Impact drive rotary precision actuator with piezoelectric bimorphs. *Frontiers of Mechanical Engineering in China* 3, Nr. 1, 2008

## Autoren

**Dipl.-Ing. Matthias Hunstig** studierte von 2002 bis 2007 Maschinenbau mit Fachrichtung Produktentwicklung an der Universität Paderborn. Seit Januar 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter, seit April 2009 akademischer Rat am Lehrstuhl Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte sind Energy Harvesting und piezoelektrische Antriebe.

**Dr.-Ing. Tobias Hemsel** ist stellvertretender Leiter des Lehrstuhls Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Nach seinem Studium des Maschinenbaus an der Universität Paderborn war er von 1996 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek. Er promovierte 2001 mit Auszeichnung und erhielt eine Dauerstelle als Oberingenieur. Tobias Hemsel ist seit 2003 akademischer Oberrat, wurde 2003 und 2005 mit dem Forschungspreis der Universität Paderborn ausgezeichnet und hat mehr als 40 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht. Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre liegen im Bereich der Sensorik und Aktorik mit Fokus auf piezoelektrische Systeme und Ultraschalltechnik.

**Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro** studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt in Mechanik, Mess- und Regelungstechnik an der Leibniz Universität Hannover und am Imperial College in London. Nach seinem Studium war er als Entwicklungsingenieur und Projektkoordinator für die Auslegung und Optimierung von Bohrsträngen zur Erdöl- und Erdgasförderung bei der Firma Baker Hughes Inteq im Drilling Research Center in Celle und in Houston, Texas, verantwortlich. Er kehrte als wissenschaftlicher Mitarbeiter an die Universität Hannover zurück und promovierte 1997 am Institut für Mechanik zum Thema „Schwingungsverhalten von Schaufelkränzen mit Reibelementen bei Frequenzverstimmung“. Seine Dissertation wurde im Jahre 1998 mit dem „Wissenschaftspreis Hannover“ ausgezeichnet. Anschließend habilitierte er sich auf dem Gebiet der Mechanik und veröffentlichte seine Habilitationsschrift mit dem Thema „Dynamical Contact Problems with Friction: Modells, Methods, Experiments and Applications“ im Springer-Verlag. Im Februar 2004 folgte er einem Ruf als Professor an das Institut für Mechanik und Getriebelehre der Technischen Universität Graz in Österreich. Prof. Sextro hat zum 1. März 2009 die Leitung des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik übernommen. Für seine Forschungsaktivitäten erhielt er den Forschungspreis 2009 der Universität Paderborn.