

# Nachgiebige monolithische fluidisch angetriebene Aktuatoren mit neuartigem Verformungsverhalten

L. Zentner, V. Böhm

*In diesem Artikel wird der Umkehreffekt, ein Verformungseffekt nachgiebiger monolithischer fluidisch angetriebener Aktuatoren, beschrieben. Nach diesem Effekt führen die im Artikel beschriebenen Aktuatoren unter steigendem Hohlraumdruck eine Umkehr in ihrer Bewegung aus. Darausfolgend bieten diese mehrere Vorteile im Vergleich zu konventionellen Aktuatoren. Es werden prinzipielle Realisierungsmöglichkeiten und charakteristische Merkmale derartiger Aktuatoren anhand mehrerer Strukturvarianten betrachtet. Der Umkehreffekt wird analytisch und numerisch untersucht, sowie experimentell bestätigt.*

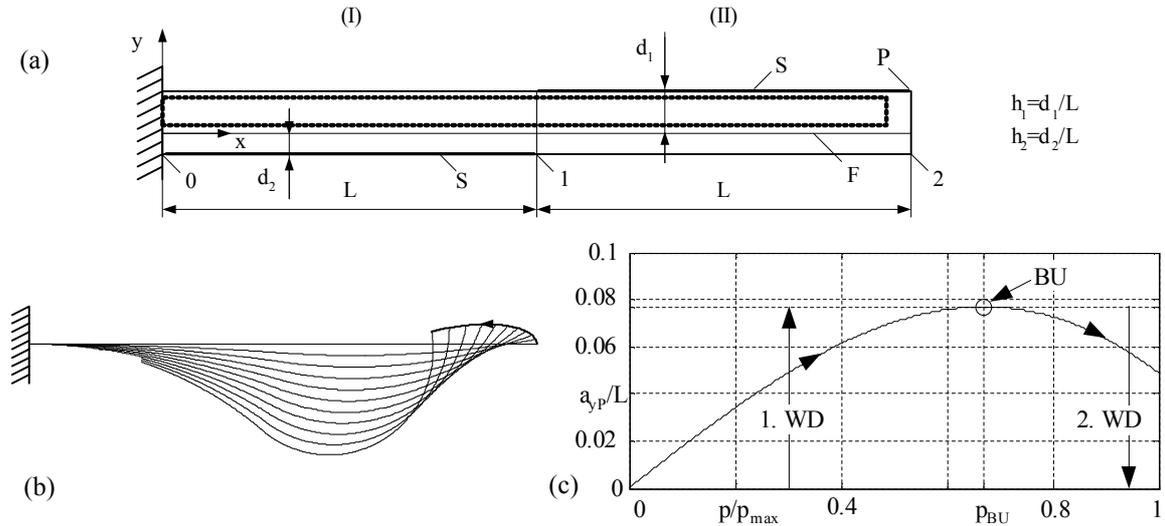
## 1 Einleitung

Nachgiebigkeiten in mechanischen Strukturen stellen in vielen Bereichen der Technik eine unerwünschte Eigenschaft dar, deren Auswirkungen durch konstruktive oder regelungstechnische Maßnahmen beseitigt bzw. kompensiert werden müssen. In der Mensch-Maschine-Interaktion („human friendly robotics“) und bei Manipulations- und Lokomotionsaufgaben ist hingegen eine spezifische Nachgiebigkeit technischer Systeme oft eine dringende Voraussetzung (Cham, 2002; Zinn, 2004). Die Nachgiebigkeit technischer Systeme wird entweder durch Kontrolle oder durch strukturelle bzw. stoffliche Eigenschaften gewährleistet (Suzumori, 1996). Der Vorteil der letzteren Möglichkeit besteht in der konstruktiven, herstellungs- bzw. regelungstechnischen Einfachheit des Systems (Suzumori, 1996). Die Nachgiebigkeit dieser Systeme wird durch den Antrieb (s. hierfür u. a. Daerden, 1999; Moehl, 2000; Klute, 2002) und/oder durch die angetriebenen Strukturteile gewährleistet (s. hierfür u. a. Sur, 1997; Lim und Tanie 2000). Fluidisch bzw. thermofluidisch angetriebene elastomere Biegeaktuatoren sind Strukturen, bei denen Antriebselemente und Mechanismenanteile als eine monolithische nachgiebige Einheit realisiert werden können. Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften, von denen besonders die einfache Bauweise und die großen realisierbaren Bewegungsbereiche hervorzuheben sind, haben diese Aktuatoren auch in der Mikrotechnik eine Anwendung gefunden (Lauschke, 1997; Kawai, Cusin und Konishi, 2001; Tabata, 2001; Lu und Kim, 2003; Mutzenich, Vinay und Rosengarten, 2004). Die Verformung derartiger monolithischer („fully compliant“) stofflich und/oder geometrisch asymmetrischer Aktuatoren entsteht infolge ihrer Hohlraumdruckbelastung (Zentner und Böhm, 2005). Ihre maximale Biegedeformation ist durch die zulässige Stoffbeanspruchung begrenzt. Eine Vielzahl solcher Systeme ist bekannt, wobei die Strukturen mit einem ebenen Bewegungsbereich am meisten verbreitet sind (siehe u. a. Dohta, Ban und Matsushita, 2000; Noritsugu, 2000). Ihr einheitlich charakteristisches Merkmal ist, dass eine steigende oder sinkende Druckbelastung eine Bewegung des Aktuator-Wirkelementes nur in eine Arbeitsrichtung bewirkt bzw. dass die Grenze des Bewegungsbereiches durch den maximalen Antriebsdruck bestimmt ist. Neueste Entwicklungen auf diesem Gebiet konzentrieren sich auf die Verbesserung von quantitativen Eigenschaften, wie beispielsweise die Erweiterung des Bewegungsbereiches bzw. der Belastbarkeit bei gleichzeitig kompakter Bauweise. Im Gegensatz dazu werden in diesem Artikel die konstruktiv bedingt nachgiebigen Eigenschaften der Aktuatoren so definiert, dass ein qualitativ neues Deformationsverhalten dieser Strukturen hervorgerufen wird. Der neue Verformungseffekt, hier als Umkehreffekt bezeichnet, basiert darauf, dass die Wirkelemente dieser Aktuatoren unter steigendem Hohlraumdruck in ihrer Bewegung eine Umkehr ausführen. Somit können in Abhängigkeit von der Größe des steigenden Überdruckes, Bewegungen in zwei entgegengesetzten Arbeitsrichtungen verwirklicht werden. Im Vergleich zu bekannten Strukturen können mit Aktuatoren dieser Art demgemäß komplexe Bewegungspfade nur mit wachsendem Überdruck einfach realisiert werden. Diese Eigenschaft ist sowohl in Manipulations- als auch in Lokomotionssystemen ein wichtiges Entwurfskriterium. Resultierend aus dem neuen Effekt ist der Bewegungsbereich dieser Aktuatoren in der ersten Arbeitsrichtung bei gegebenen Werkstoffeigenschaften durch die geometrische Formgebung begrenzt, wodurch der sensorische Aufwand beim Einsatz in Greifern minimiert bzw. eingespart werden kann. Im Mittelpunkt des Artikels stehen analytische und numerische Untersuchungen und die experimentelle Bestätigung des Umkehreffektes anhand mehrerer

Konstruktionsvarianten. Vorteile und charakteristische Merkmale dieser Strukturen werden im Vergleich zu konventionellen Aktuatoren diskutiert.

## 2 Realisierungsmöglichkeiten und Erläuterung des Effektes am Beispiel I

Der zu betrachtende Effekt kann unter Anwendung nachgiebiger Mechanismen prinzipiell (1) durch Kaskadierung von mehreren konventionellen Biegeaktuatoren oder (2) durch einen elementaren, nichtkonventionellen Aktuator mit einer entsprechenden geometrischen und werkstoffseitigen Gestaltung erreicht werden. Fall (1) wird am Beispiel I in diesem Abschnitt und Fall (2) am Beispiel II in den Abschnitten 3,4,5 beschrieben.



**Bild 1:** (a): Schematische Darstellung der folienbeschichteten Struktur; (b) Verformung bei steigendem Druck; (c): Verschiebung des Endpunktes P in die y-Richtung in Abhängigkeit des Antriebsdruckes. (BU): Ort der Bewegungsumkehr, (1. WD): 1. Arbeitsrichtung, (2. WD): 2. Arbeitsrichtung.

Als Beispiel I für den Fall (1) wird das im Bild 1 dargestellte einfache Kontinuumsmodell - ein innendruckbelasteter hohler Stab betrachtet. Die Arbeitsrichtung ist die y-Richtung, die Wirkelement-Bewegung bei steigendem Druck wird durch die Bewegung des Punktes P charakterisiert. Der Stab besteht aus zwei Teilen gleicher Länge. In beiden Teilen ist eine undeformbare Folienschicht in der Längsrichtung eingebracht, so dass das Problem auf ein ebenes zurückzuführen ist. Es werden folgende Annahmen getroffen: (1) Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese und das Prinzip von Saint-Venant, (2) linear elastisches, isotropes Materialverhalten, (3) konstanter Stabquerschnitt, (4) keine Aufweitung des Querschnittes beider Stabteile. Die Gleichgewichtsgleichungen nach der Theorie 2. Ordnung mit den getroffenen Annahmen lauten:

$$\frac{d\kappa_i}{ds} = 0, \quad \frac{d\theta_i}{ds} = \kappa_i, \quad \frac{da_{xi}}{ds} = \cos\theta_i, \quad \frac{da_{yi}}{ds} = \sin\theta_i, \quad i=I, II. \quad (1)$$

Dabei charakterisieren die dimensionslosen Größen  $\kappa_i$  die Krümmung,  $a_{xi}$  bzw.  $a_{yi}$  die Verschiebungen der Biegelinie für den jeweiligen Teil des Stabes und  $s$  die laufende Koordinate der Biegelinie bezogen auf die Länge  $L$ , sowie  $\theta_i$  den Neigungswinkel zwischen der Tangente zur Biegelinie und der x-Achse. Die Randbedingungen der Verformungsgleichungen für  $i=1$  sind:  $\kappa_1(1)=f_D h_1$ ,  $\theta_1(0)=0$ ,  $a_{x1}(0)=0$ ,  $a_{y1}(0)=0$ . Eine Randbedingung und die Übergangsbedingungen für  $i=2$  lauten:  $\kappa_2(2)=f_D h_2 g$ ,  $\theta_1(1)=\theta_2(1)$ ,  $a_{x1}(1)=a_{x2}(1)$ ,  $a_{y1}(1)=a_{y2}(1)$ , mit  $g=(E_1 I_1)/(E_2 I_2)$ , wobei  $E_i I_i$  die Biegesteifigkeiten sind. Die Parameter  $h_1$  bzw.  $h_2$  beschreiben die dimensionslosen Abstände der Folienschichten (S) von der neutralen Faser (F) in der y-Richtung bezogen auf die Länge  $L$ . Für den Parameter  $f_D$  gilt:  $f_D=(pAL^2)/(E_1 I_1)$ , mit dem Innendruck  $p$  und der Innenquerschnittsfläche  $A$  des Stabes. Die Integration der Gleichgewichtsgleichungen ergibt als Lösung für die verformte Stabteile (I) und (II):

$$a_{xi} = \frac{\sin(f_D h_i s)}{f_D h_i}, \quad (2)$$

$$a_{yI} = \frac{\cos(f_D h_1 s) - 1}{f_D h_1}, \quad (3)$$

$$a_{xII} = -\frac{\sin(f_D ((h_2 g - h_1) - h_2 g s))}{f_D h_2 g} + \frac{(h_2 g - h_1) \sin(f_D h_1)}{f_D h_1 h_2 g}, \quad (4)$$

$$a_{yII} = \frac{\cos(f_D ((h_2 g - h_1) - h_2 g s))}{f_D h_2 g} + \frac{(h_2 g - h_1) \cos(f_D h_1) - h_2 g}{f_D h_1 h_2 g}. \quad (5)$$

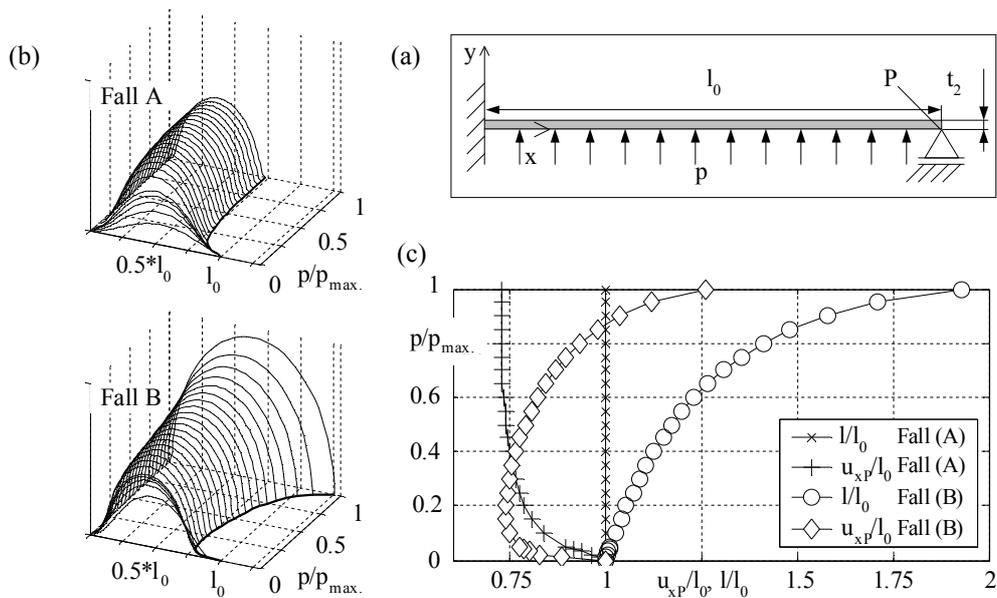
Bei entsprechend gewählten Parameterwerten wird die y-Koordinate des Punktes P bei Erhöhung des Hohlraumdruckes zunächst wachsen und dann ab  $p=p_{BU}$  fallen (Bild 1). Das Wirkelement der Struktur führt bei  $p=p_{BU}$  eine Umkehr in ihrer Bewegung aus (BU), wobei der Übergang von der ersten Arbeitsrichtung (1. WD) in die andere (2. WD) kontinuierlich ist. Resultierend aus dem Umkehreffekt können mit diesen Strukturen im Vergleich zur Funktionsweise herkömmlicher Aktuatoren zwei Arbeitsrichtungen mit Überdruck erreicht werden. Welche Bewegungsrichtung des Aktuator-Wirkelementes ausgeführt wird, hängt von der Größe des Überdruckes ab. So kann mit einem auf dieser Weise arbeitenden Manipulationssystem wahlweise Außen- oder Innengreifen einfach ausgeführt werden. Da der Bewegungsbereich des Wirkelementes in der ersten Arbeitsrichtung unabhängig von der Größe des Überdruckes begrenzt ist, ist auch die vom Aktuator erzeugte maximale Greifkraft in dieser Richtung beschränkt. Eine Überlastung des gegriffenen Objektes kann somit ausgeschlossen werden. Der hierfür sonst erforderliche zusätzliche sensorische Aufwand entfällt. Der Umkehreffekt ermöglicht mit weniger Aktuatoren und somit mit einfacher Ansteuerung die Realisierung komplexer Bewegungstrajektorien, die auch in Lokomotionsaufgaben von großer Bedeutung sind.

### 3 Modellannahmen, Berechnungsmerkmale für das Beispiel II

Der monolithische Aufbau bzw. das Bestreben nach großen Bewegungsbereichen der Aktuatoren des Falles 2 verlangt nach Werkstoffen mit einer großen reversiblen Verformbarkeit und Dehnbarkeit. Diese Anforderungen werden von Elastomeren erfüllt, deren mechanische Werkstoffeigenschaften weitgehend nichtlinear sind. Die zu untersuchenden großen Bewegungsbereiche der Strukturen erfordern geometrisch nichtlineare Untersuchungen. Resultierend aus diesen Nichtlinearitäten und aus der komplexen dreidimensionalen Geometrie ist die analytische Beschreibung des Aktuatorverhaltens mit einem enormen Aufwand verbunden. Die weiteren Untersuchungen werden deshalb numerisch mit der Finite-Elemente-Methode (Programmpaket ANSYS® 6.1) unter Berücksichtigung von geometrischen und werkstoffseitigen Nichtlinearitäten durchgeführt. Das isotrope, ideal elastische Werkstoffverhalten wird qualitativ, mit dem physikalisch begründeten nichtlinearen Neo-Hooke'schem Materialmodell berücksichtigt ( $a_{10}=0.125 \text{ N/mm}^2$ ). Es werden statische Berechnungen vorgenommen, die Druckbelastung wird schrittweise gleichmäßig verteilt im Aktuator-Hohlraum aufgebracht. Es wird die Verschiebung des Aktuator-Wirkelementes (charakterisiert durch den Punkt P) in Abhängigkeit der Druckbelastung ermittelt. Die Wirkung der Schwerkraft wird vernachlässigt.

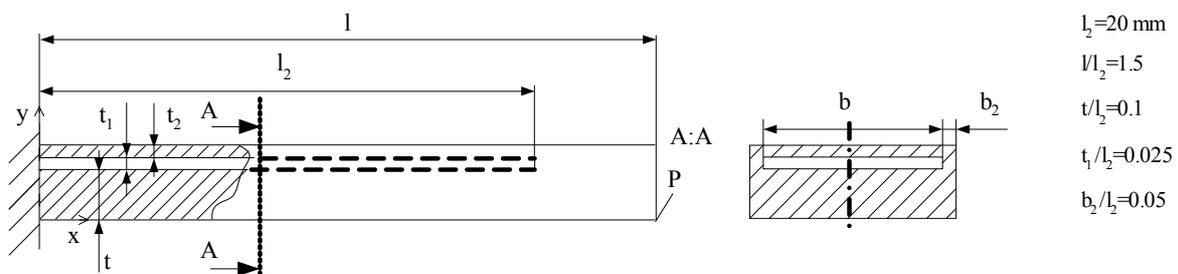
### 4 FEM-Untersuchungen zu dem Beispiel II

Zunächst wird die im Bild 2 dargestellte hochelastische ebene Platte betrachtet. Die an einem Rand fest eingespannte, am anderen beweglich gelagerte Struktur wird gleichmäßig mit schrittweise steigendem Druck belastet. Es wird zwischen zwei Fällen unterschieden: im Fall (A) ist die Platte mit einer biegeschlaffen nicht dehnbaren Folie versehen, im zweiten Fall (B) wird die Struktur ohne Folie betrachtet. Die Plattenlänge im Querschnitt ist im unverformten Zustand mit  $l_0$ , im verformten Zustand mit  $l$  bezeichnet.



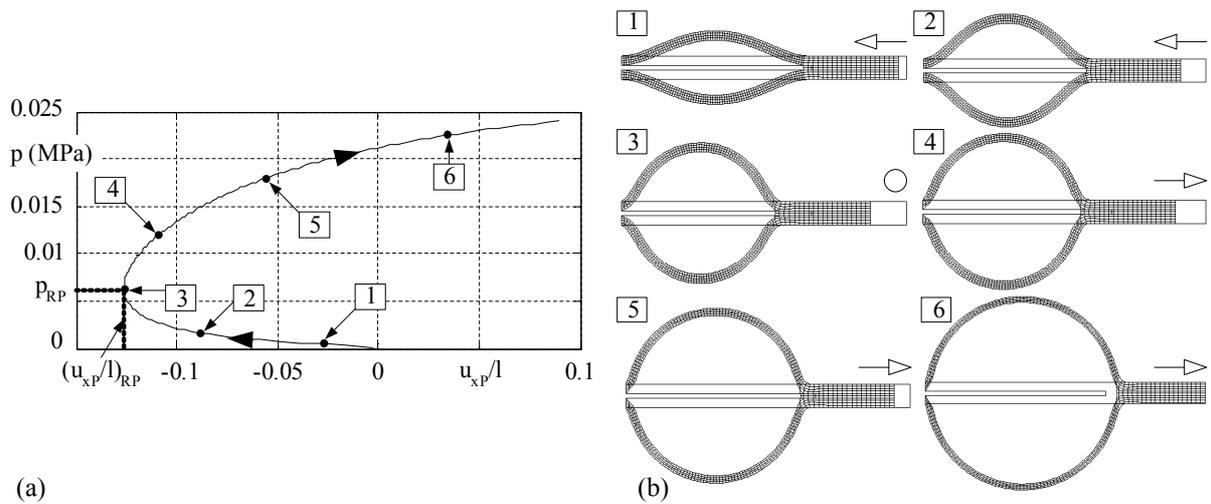
**Bild 2:** (a): Querschnittsdarstellung der hochelastischen Platte bzw. (b): deren Verformung unter steigender Druckbelastung mit Folienbeschichtung im Fall (A) und ohne Folienbeschichtung im Fall (B); (c): Verschiebung des Endpunktes P und Längenänderung für beide Fälle.

Eine steigende Druckbelastung bewirkt im Fall (A) eine Krümmung der Struktur und die Verschiebung des beweglichen Randes entlang der x-Achse ( $u_{xP}$ ) in die negative x-Richtung. Ab einer bestimmten Belastung wird eine strukturabhängige Endform erreicht, die aufgetragene Folie verhindert eine weitere Bewegung (Bild 2/a) der Struktur. Im Fall (B) erfolgt bei steigender Last zunächst eine zum Fall (A) ähnliche Verformung des beweglichen Randes in die negative x-Richtung, große Verformungen sind mit kleiner Längsdehnung verbunden. Die Längsdehnung spielt mit der Druckerhöhung in der Bewegung der Struktur eine immer ausgeprägtere Rolle und löst bei einem bestimmten Druckwert eine Umkehr in der Verschiebung des beweglichen Randes aus. Eine weitere Laststeigerung führt zur Verschiebung des Randes in die positive x-Richtung (Bild 2/a).



**Bild 3:** Der Aktor mit geometrischen Parametern

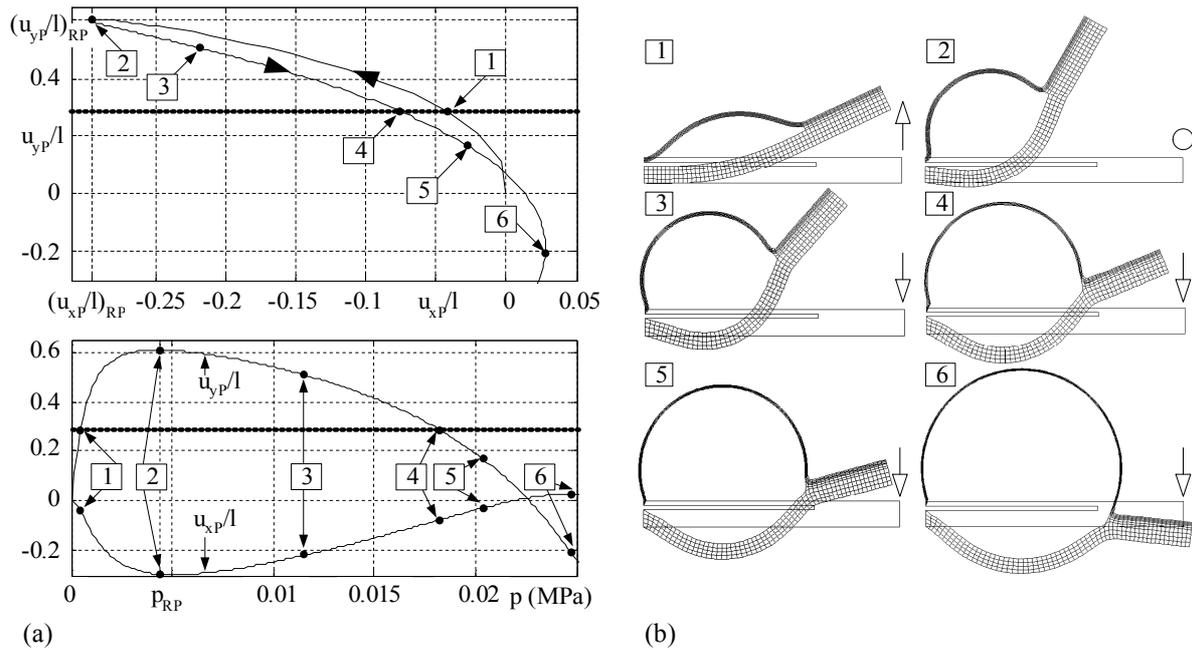
Sinngemäß kann dieser Effekt mit der parallelen Kopplung und Verbindung von zwei Platten bzw. mit dem im Bild 3 dargestellten Aktuator verwirklicht werden. Im Mikromaßstab hergestellte fluidisch angetriebene Aktuatoren aus hochelastischem Werkstoff mit ähnlicher Geometrie sind bereits in (Kawai, Cusin und Konishi, 2001; Tabata, 2001; Lu und Kim, 2003) erwähnt. Der Effekt der Bewegungsumkehr wurde in diesen Arbeiten nicht nachgewiesen, da sich die theoretische Beschreibung bzw. experimentelle Erprobung dieser Strukturen nur auf kleine Wirkelement-Verschiebungen in der ersten Bewegungsrichtung beschränkt hat.



**Bild 4:** Formänderung des Aktors (b) bzw. axiale Verschiebung des Endpunktes P bei steigendem Antriebsdruck (a) für  $t=t_2=2$  mm (2D Modell). (Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

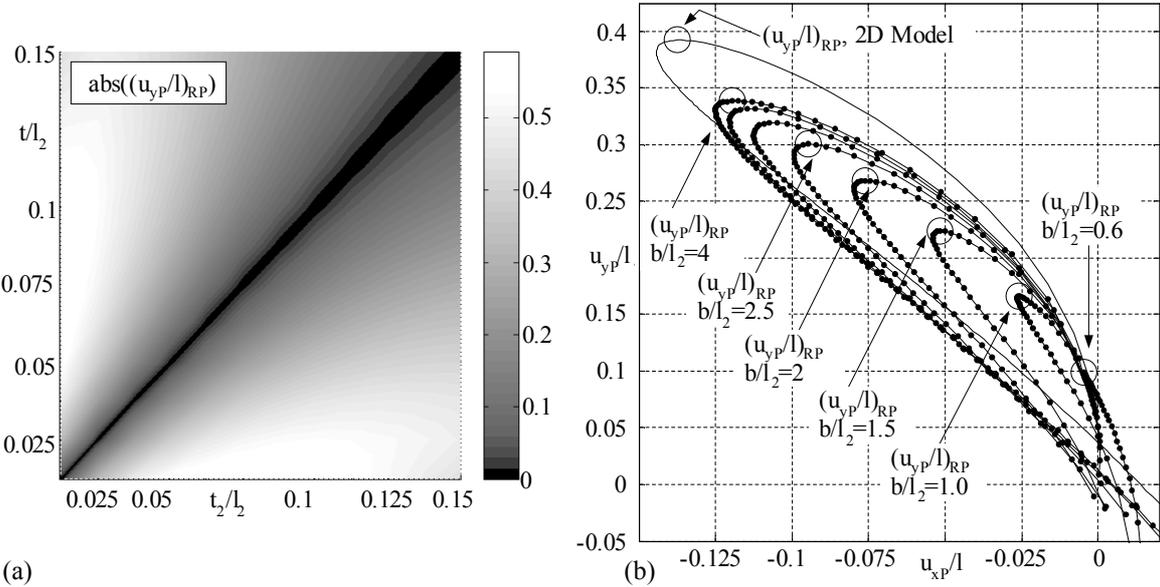
Zunächst wird das Querschnittsmodell des Aktuators (Bild 3) betrachtet. Dieses Modell ist zur qualitativen Beschreibung des Umkehreffektes für hinreichend große  $b/l_2$ -Verhältnisse geeignet. Wie oben beschrieben erfolgt im Falle  $t=t_2$  bei steigender Druckbelastung eine Umkehr in der axialen Bewegung des Aktuator-Wirkelementes (Bild 4). Der Ort der Bewegungsumkehr  $(u_{xP}/l)_{BU}$  ist bei gegebenen Werkstoffparametern vom  $t/l_2$ -Verhältnis bestimmt. Eine konstruktive Asymmetrie, wie beispielsweise  $t \neq t_2$ , bewirkt bei Druckerhöhung die Änderung der Bewegungsrichtung des Wirkelementes. Resultierend aus der unterschiedlichen Nachgiebigkeit der mit  $t$  und  $t_2$  charakterisierten Strukturteile erfolgt bei Druckbelastung eine Biegedeformation des Aktuators - das Wirkelement beschreibt eine komplexe Bahn in der x-y Ebene. Die Bewegungsumkehr des Wirkelementes bleibt jedoch auch in diesem Fall ein charakteristisches Merkmal (Bild 5). Die Lage der Umkehr  $((u_{xP}/l)_{BU}, (u_{yP}/l)_{BU})$  und der Bewegungsbereich des Aktuator-Wirkelementes sind in der ersten Arbeitsrichtung durch das Verhältnis der Wandstärken  $t/t_2$ , sowie durch das Verhältnis einer der Wandstärke zur Innenraumlänge  $t/l_2$  wesentlich beeinflussbar. Der gleiche vorgegebene Bewegungsbereich kann in der ersten Arbeitsrichtung mit verschiedenen geometrischen Parameterkombinationen  $t/t_2$  realisiert werden, wobei jede Parameterkombination zu einem anderen Verhalten der Struktur führt. Das Bild 6/a zeigt die erreichbare maximale Verschiebung des Endpunktes P in der ersten Bewegungsrichtung (y-Richtung) bei Variation des Verhältnisses  $t/t_2$ .

Resultierend aus der Druck-Verformungs-Charakteristik (s. Bild 5/a) gehören zu einer gegebenen Höhe des Wirkelementes bei  $0 < u_{yP}/l \leq (u_{yP}/l)_{max}$  zwei unterschiedliche verformte Zustände des Aktuators, die im Bild 5 durch die Zustände (1) und (4) mit dem Wert  $u_{yP}/l=0.285$  demonstriert. Diese zwei Zustände entstehen durch unterschiedlich große Druckbelastungen und dementsprechend weisen unterschiedliche Festigkeiten auf: dem Zustand (1) entspricht der Druck  $p=45$  Pa und der Zustand (4) wurde mit dem Druck  $p=18200$  Pa erreicht.



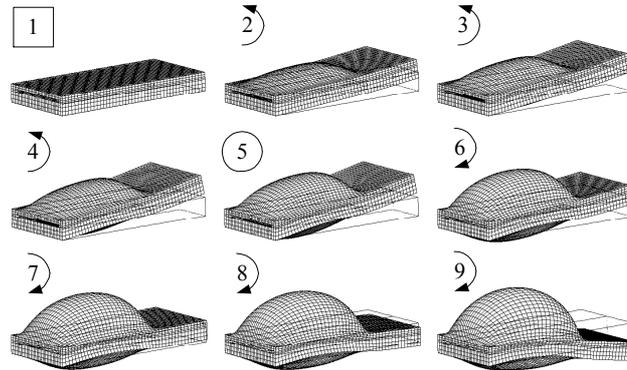
**Bild 5:** Formänderung des Aktors (b) bzw. Verschiebung des Endpunktes P bei steigendem Antriebsdruck (a) für  $t=2 \text{ mm}$ ,  $t/t_2=4$  (2D Modell). (Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

Im Folgenden wird das 3D Modell betrachtet. Das Bild 6/b zeigt bei steigender Druckbelastung die beschriebene Bahn des Endpunktes P für den zweidimensionalen Fall und bei unterschiedlichen Strukturbreiten ( $b/l_2=4, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.6$ ) für den dreidimensionalen Fall sowie Bild 7 die verformten Zustände bei einem steigenden Antriebsdruck. Die Deformationscharakteristik der 3D Modelle entspricht qualitativ der 2D Struktur, die Umkehr in der Bewegung des Aktuator-Wirkelementes ist für jede untersuchte Strukturbreite zu beobachten. Infolge der seitlichen Verbindung ist die Beweglichkeit der mit  $t$  und  $t_2$  charakterisierten Strukturteile und dadurch der Bewegungsbereich des Aktuators in der ersten Arbeitsrichtung um so kleiner, je kleiner die Strukturbreite ist.



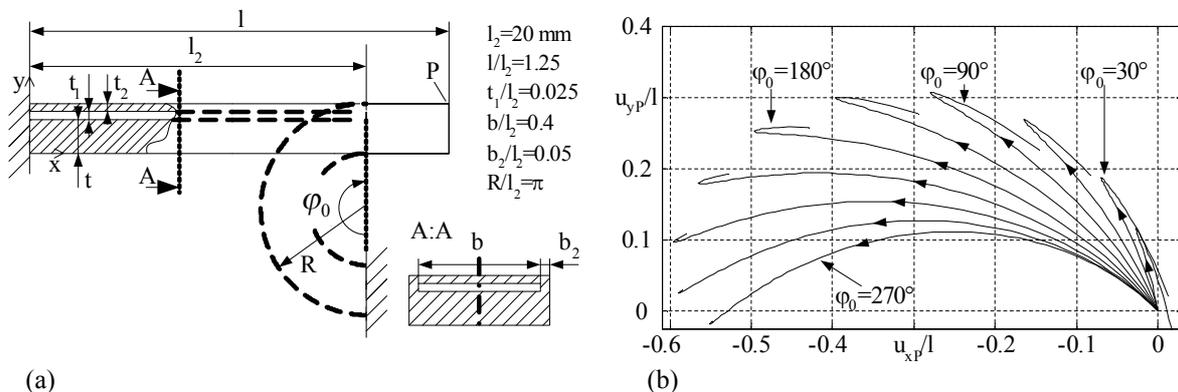
**Bild 6:** (a): Maximale Verschiebung des Punktes P in der ersten Arbeitsrichtung bei der Umkehr für Strukturvarianten mit unterschiedlichen Wandstärken  $t$  und  $t_2$  (weitere geometrische Parameter: s. Bild 3); (b): Verschiebung des Punktes P des 2D Modells und des 3D Modells bei unterschiedlichen Strukturbreiten bei steigendem Antriebsdruck ( $t=2 \text{ mm}$ ,  $t/t_2=2$ ).

Ähnlich der geometrischen Asymmetrie führt eine werkstoffseitige bereichsbezogene Verfestigung der den Hohlraum umgebenden Strukturteile eines geometrisch symmetrischen Aktuators ( $t=t_2$ ) ebenfalls zum betrachteten Umkehreffekt. Die Aktuatorcharakteristik kann in diesem Fall mit den Elastizitätsunterschieden beeinflusst bzw. den Anforderungen entsprechend angepasst werden.



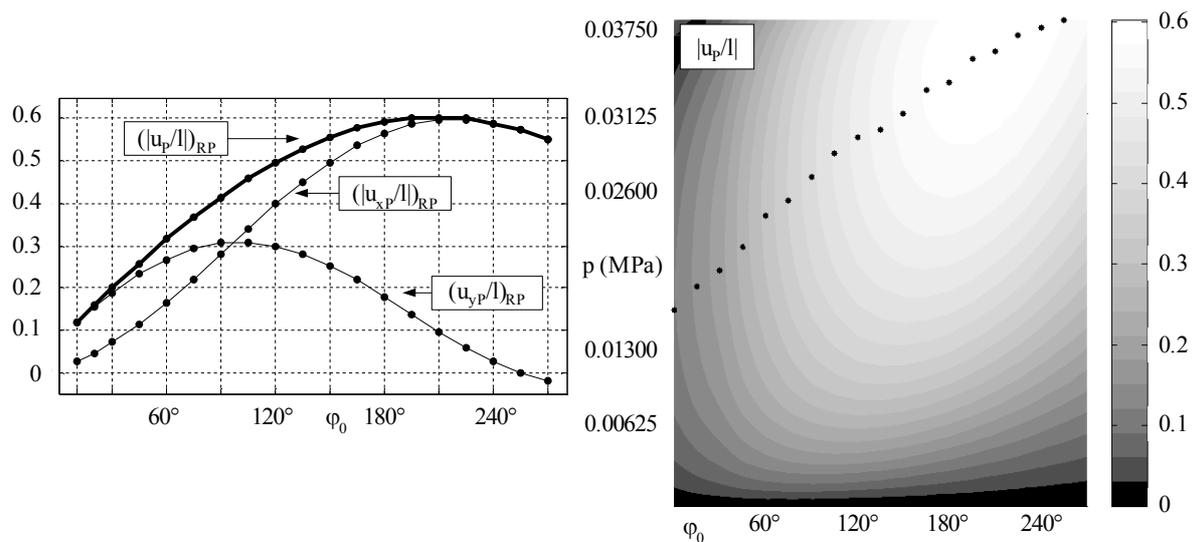
**Bild 7:** Verformung der Strukturvariante mit  $t=2$  mm,  $t/t_2=4$  (sonstige geometrische Parameter siehe Bild 3). ((1): Ausgangskonfiguration, (2-9): Verformung bei steigendem Hohlraumdruck, (5): Umkehr in der Wirkelement-Bewegung, Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

Die Einprägung einer Krümmung entlang der Stabachse in die im Bild 3 gezeigte Struktur beeinflusst neben den genannten Möglichkeiten effektiv die Größe des Bewegungsbereiches in der ersten Arbeitsrichtung (Bild 8/a). Der Bewegungsbereich kann bei  $t > t_2$  mit Vergrößerung der Krümmung in der ersten Arbeitsrichtung deutlich erhöht werden. Diesbezüglich zeigt sich ein Optimum für die vereinbarten Parameterwerte im Bereich von  $\varphi_0=195^\circ$  bis  $\varphi_0=225^\circ$  (Bild 9). In diesem Bereich sind im Vergleich zum Aktuator ungekrümmter Längsachse bis zu 5-mal größere maximale Verformungen in der ersten Arbeitsrichtung zu realisieren.



**Bild 8:** (a): Schematische Darstellung der gekrümmten Strukturvariante mit unterschiedlichen  $\varphi_0$ -Winkeln bzw. (b) ihre Endpunkt-Verschiebung in der x-y Ebene bei steigendem Hohlraumdruck ( $t=2$  mm,  $t/t_2=4$ ).

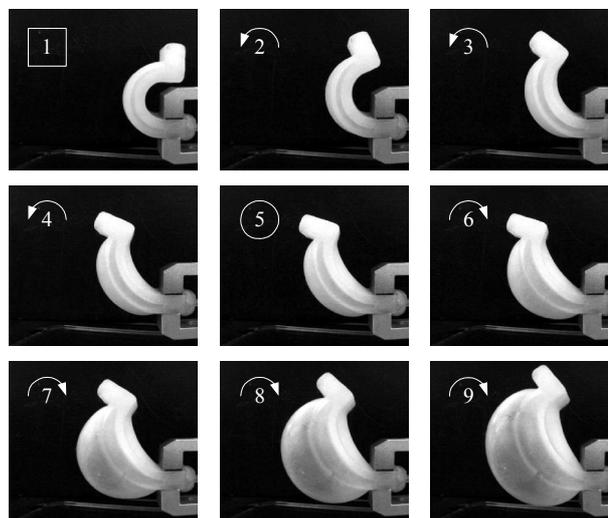
Für  $t < t_2$  führt hingegen eine in der gleichen Weise eingeprägte Krümmung zur qualitativen Veränderung der Aktuatorcharakteristik. In Abhängigkeit vom Krümmungswinkel und vom  $t/t_2$ -Verhältnis ist in diesem Fall die Umkehr in der Bewegung des Aktuator-Wirkelementes bei steigendem Antriebsdruck  $p$  nicht mehr zu verzeichnen.



**Bild 9:** Maximale Verschiebung des Punktes P der gekrümmten Strukturvariante in der ersten Bewegungsrichtung mit unterschiedlichen  $\varphi_0$ -Winkeln ( $t=2$  mm,  $t/t_2=4$ , Punkte: Ort der Bewegungsumkehr).

## 5 Experimentelle Bestätigung des Umkehreffekts

Zur praktischen Erprobung des dargestellten Umkehreffektes wurden erste Makromodelle mit gekrümmter Längsachse mit unterschiedlichen  $t/t_2$ -Verhältnissen aus Silikon-Elastomer hergestellt und getestet. Die experimentellen Untersuchungen bestätigen den Umkehreffekt, der zunächst theoretisch beschrieben wurde. Das Bild 10 zeigt die Verformung einer Strukturvariante bei steigendem Antriebsdruck.



**Bild 10:** Verformung einer hergestellten Strukturvariante ((1): Ausgangskonfiguration, (2-9): Verformung bei steigendem Hohlraumdruck, (5): Umkehr in der Wirkelement-Bewegung, Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

## 6 Zusammenfassung, zukünftige Aufgaben

Es wurde ein Effekt fluidisch angetriebener monolithischer miniaturisierbarer Biegeaktuatoren beschrieben und theoretisch und experimentell nachgewiesen. Charakteristische Merkmale der nach diesem Umkehreffekt arbeitenden Aktuatoren sind:

- sie führen ebene Biegebewegungen in zwei zueinander entgegengesetzten Arbeitsrichtungen aus, wobei beide Arbeitsrichtungen durch Überdruck-Aktivierung des Aktuators ausgelöst werden,
- der Bewegungsbereich in der ersten Arbeitsrichtung ist unabhängig von der Größe der Druckbelastung konstruktiv bedingt begrenzt,
- in einem weiten Intervall ist eine gegebene Höhe des Aktuator-Wirkelementes durch zwei verschiedene Druckbelastungen und somit mit entsprechend unterschiedlichen Festigkeiten zu realisieren.

Der Umkehreffekt kann prinzipiell auf zwei Wege verwirklicht werden:

- durch Kaskadierung von mehreren konventionellen Strukturen,
- oder mit einem elementaren nichtkonventionellen Aktuator.

In den beiden Fällen kann eine derartige Charakteristik sowohl mit geometrischen Eigenschaften, als auch mit stofflichen Eigenschaften, wie Kombination von Werkstoffen unterschiedlicher Elastizität und/oder anisotrope Eigenschaften der Werkstoffe, verwirklicht werden. Die durchgeführten numerischen Untersuchungen bestätigten, dass die Aktuatorcharakteristik sowohl geometrisch als auch stofflich wesentlich beeinflussbar ist und somit spezifisch an gegebene Aufgabenstellungen zugeschnitten werden kann. Die beschriebenen Aktuatoren zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen miniaturisierten Biegeaktuatoren durch einen größeren Bewegungsbereich, größere Flexibilität und einen geringeren sensorischen Aufwand aus.

Gegenwärtig werden Designoptimierungen vorgenommen, um eine einfache mikrotechnische Herstellbarkeit der dargestellten Aktuatoren zu gewährleisten und deren Belastbarkeit zu erhöhen. Des Weiteren wird der Einfluss nichtlinear elastischer Werkstoffeigenschaften und dynamischer Lasten auf den dargestellten Umkehreffekt theoretisch und experimentell untersucht.

## Literatur

- Bütefisch, S.; Seidemann, V.; Büttgenbach, S.: Novel micro-pneumatic actuator for MEMS, *Sens. Actuators A Phys.* 97–98 (2002) 638–645.
- Cham, J. G.; Bailey, S. A.; Clark, J. E.; Full R. J.; Cutkosky M. R.: Fast and robust: hexapedal robots via shape deposition manufacturing, *The International Journal of Robotics Research*, (2002), 21: 869 - 882.
- Daerden, F.: *Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements*, Ph. D. Thesis, Vrije Universiteit, Brussel, (1999).
- Dohta, S.; Ban, S.; Matsushita, H.: Application of a flexible strain sensor to a pneumatic rubber hand, *Proc. of FLUCOME 2000* (2000) CD-ROM.
- Kawai, F.; Cusin, P.; Konishi, K.: Thin flexible end-effector using pneumatic balloon actuator, *Sens. Actuators A Phys.* 89 (2001) 28-35.
- Klute, G. K.; Czerniecki, J. M.; Hannaford, B.: Artificial Muscles: Actuators for biorobotic systems, *The International Journal of Robotics Research*, (2002), 21: 295 - 309.
- Lauschke, U.: *Analyse und Simulation des mechanischen Verhaltens faserarmerter, mehrlumiger Druckschlauchstrukturen*, Magdeburg, (1997).
- Lim, H.; Tanie, K.: Human safety mechanisms of human-friendly robots: passive viscoelastic trunk and passively movable base, *The International Journal of Robotics Research*, (2000) 19: 307 - 335.
- Lu, Y.; Kim, C.-J.: Micro-finger articulation by pneumatic parylene balloons, *IEEE Transducers '03 Conf.* (2003) 276-279.
- Moehl, B.: Bionic robot arm with compliant actuators, *Proc. of SPIE* Vol. 4196 (2000) pp. 82-85.
- Mutzenich, S.; Vinay, T.; Rosengarten, G.: Analysis of a novel micro-hydraulic actuation for MEMS, *Sens. Actuators A Phys.* 116 (2004) 525–529.

Noritsugu T.; Kubota, M.; Yoshimatsu, S.: Development of pneumatic rotary soft actuator, *Proc. of FLUCOME 2000* (2000) CD-ROM.

Sur, S.: *Robotic manipulation with flexible link fingers*, Ph. D. Thesis, Caltech, (1997).

Suzumori, K.: Elastic materials producing compliant robots, *Robotics and Autonomous Systems* 18 (1996) 135-140.

Tabata, O.; Konishi, S.; Cusin, P.; Ito, Y.; Kawai, F.; Hirai, S.; Kawamura, S.: Micro fabricated tunable bending stiffness devices, *Sens. Actuators, A Phys.* 89 (2001) 119-123.

Zentner, L.; Böhm, V.: Zur Anwendung nachgiebiger Mechanismen, *Konstruktion*, Springer Verlag, 11/12-(2005), S. 49-50.

Zinn, M.; Roth, B.; Khatib, O.; Salisbury J. K.: A new actuation approach for human friendly robot design, *The International Journal of Robotics Research*, (2004); 23: 379 - 398.

---

*Adresse:* Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner, Dr.-Ing. Valter Böhm, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, D-98684 Ilmenau.

E-Mail: [lena.zentner@tu-ilmenau.de](mailto:lena.zentner@tu-ilmenau.de); [valter.boehm@tu-ilmenau.de](mailto:valter.boehm@tu-ilmenau.de)