

Flüssigkristalline Elastomere für die Mikrotechnik

Aktuormaterialien. Flüssigkristalline Polymere sind nicht nur Hochleistungsmaterialien für besondere Belastungen. Spezielle funktionalisierte flüssigkristalline Elastomere (Functional Liquid Crystalline Elastomers – FULCE) erzeugen Bewegungen, die neue technische Aktuatoren nach dem Prinzip des menschlichen Muskels ermöglichen. Technologie, Funktionsprinzip und Anwendung dieser Effektoren werden am Beispiel eines hybriden Mikrogreifers beschrieben.

TAMÁS FISCHL U. A.

Mit funktionalisierten flüssigkristallinen Elastomeren (Functional Liquid Crystalline Elastomers (FULCE)) beschäftigen sich seit 2003 sieben europäische Forschergruppen im Research Training Network FULCE, das von der Europäischen Union gefördert wird. Die Ilmenauer Forschergruppe verfolgt das Ziel, diese neuartigen Elastomere mit aktuatorischen Eigenschaften effektiv in mikromechanische Systeme zu integrieren.

Aktuatorische Eigenschaften erzeugen

Charakteristisches Merkmal von Polymeren ist ihr struktureller Aufbau aus langen Molekülketten. Flüssigkristalline Polymere (Liquid Crystal Polymers – LCP) verbinden diese Eigenschaften von Polymeren mit der Anisotropie von Flüssigkristallen. Spezielle kristalline Molekülbausteine (Mesogene) sind verantwortlich für das kristalline Verhalten. Diese Mesogene können grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen mit Polymerketten kombiniert werden [1]: Bei Hauptkettenpolymeren sind diese Mesogene direkt in die Polymer-

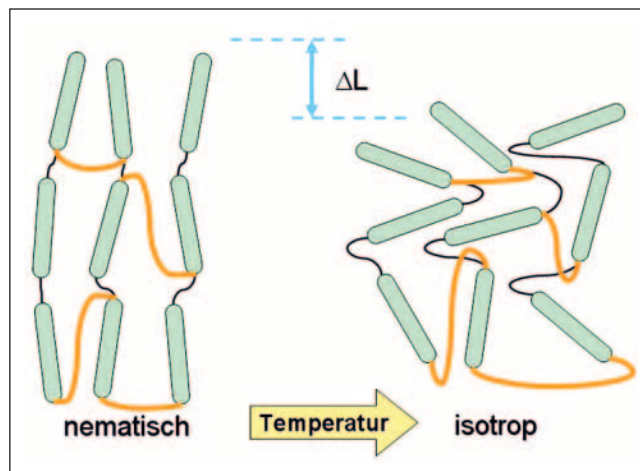


Bild 1. Schematische Darstellung der nematisch-isotropen Umwandlung von speziellen kristallinen Molekülbausteinen (Mesogene)

kette eingefügt; es entstehen flüssigkristalline Hauptkettenpolymere. Bei Seitenkettenpolymeren dagegen wird das Mesogen mit Hilfe eines Zwischenstücks mit dem Polymerrückgrat verbunden. Die Polymerisation des Rückgrats kann dabei vor oder nach der Anbindung der Me-

sogene stattfinden. Da Rückgrat und Mesogene unabhängig voneinander hergestellt werden können, ist die Produktion von Seitenketten-LCP besser beherrschbar als die von Hauptketten-LCP [2].

Flüssigkristalline Elastomere (LCE) entstehen durch schwache Vernetzung von

LCP. Durch die geringe Dichte der Polymerketten verfügt das entstehende Material über gummielastische Eigenschaften (Tabelle 1). Besonders interessant sind Polysiloxane als Grundgerüst, an die das Mesogen durch Platin-katalyse angebunden wird.

Voraussetzung für aktuatorische Eigenschaften ist die möglichst einheitliche Ausrichtung der Mesogene innerhalb des Netzwerks, d. h. eine hohe Anisotropie des Werkstoffs. Die von der Ilmenauer Gruppe verwendeten Elastomere mit Mesogenen in den Seitenketten – Seitenketten-LCE – wurden von der Universität Freiburg hergestellt [3]. Die Orientierung in diesen Seitenketten-LCE wurde durch uniaxiale mechanische Dehnung des Materials erzeugt. Die für die Elastomereigenschaften nötige Vernetzung des Materials startet unmittelbar vor der mechanischen Dehnung und „friert“ dadurch die durch Streckung erzielte geordnete Molekülanordnung ein.

Wird die Temperatur in der Umgebung des derart hergestellten Aktuormaterials erhöht, geht die Ordnung der Mesogene verloren [4]. Grund für diese Formänderung ist der Übergang des Materials

Eigenschaften		Kennwerte
Härte	Shore A	10–80
Zugfestigkeit	MPa	0,2–0,6
Aktuatorspannung	kPa	21–60
Uniaxiale Deformation (L_0/L)*100	%	140–160
T_{NI}	°C	30–120
T_G	°C	-10–24

Tabelle 1. Einige typische Eigenschaften von flüssigkristallinen Elastomeren

© KU103697

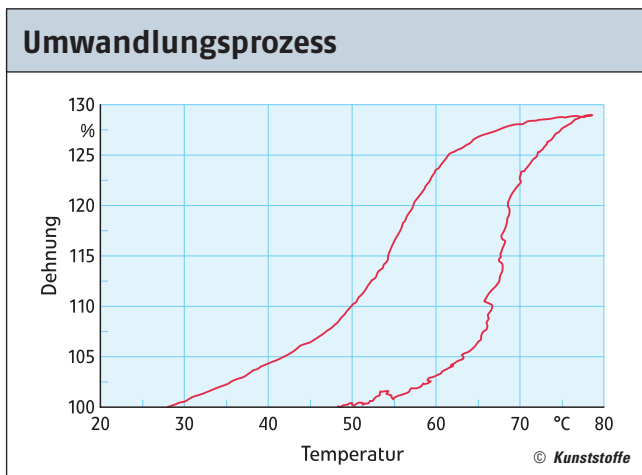


Bild 2. Dehnungs-Temperatur-Diagramm von thermoaktiven FULCE (Functional Liquid Crystalline Elastomers)

von einer flüssigkristallinen in die isotrope Phase durch thermische Fluktuation, d. h. nematisch-isotropische Umwandlung (Bild 1). Die Reversibilität beruht auf der Elastizität des Netzwerks, die bei der Rücktransformation den ursprünglichen Ausrichtungszustand wiederherstellt. Dies verursacht ein makroskopisches Zusammenziehen der Aktuatorfolie. Einen solchen thermo-mechanischen Umwandlungsprozess stellt Bild 2 in einem Dehnungs-Temperatur-Diagramm dar.

FULCE-Aktuatoren sind fähig, bei geringer mechanischer Spannung und hoher Dehnung unterschiedliche mechatronische Aufgaben zu erfüllen. FULCE wird oft als „künstlicher Muskel“ bezeichnet, was bereits auf die physikalischen Eigenschaften und Anwendungspotenziale des Materials hinweist. Theorie-

tisch werden eine Dehnung bis 400 % und eine mechanische Spannung bis 100 kPa vorausgesagt. Experimentell konnten bereits eine Dehnung bis 140 % und eine maximale mechanische Aktuatorspannung von 41 kPa nachgewiesen werden.

Mikrogreifer herstellen

Mit den Erkenntnissen über die charakteristischen Kurven aus Bild 2 wurde in Ilmenau der in Bild 3 zu sehende Greifer/Manipulator entworfen. Ziel ist es zu zeigen, dass es mit geringem Verlust möglich ist, eine Masse mit Hilfe von FULCE-Aktuatoren zu positionieren und diese Position problemlos längere Zeit halten zu können. Die in Bild 3 dargestellte Armstruktur ist die erste mit Mikro-Integration verwirklichte mikrotechnische Applikation mit ►

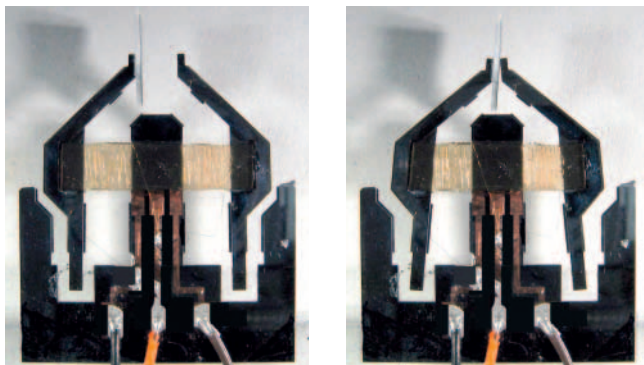


Bild 3. Geöffneter (links) und geschlossener (rechts) Zustand des Mikrogreifers: FULCE-Greifer mit elastischen Gelenken, Armlänge: 20 mm, Rahmenmaß: 22 x 25 mm²

FULCE-Aktuatoren. Um den Bewegungsverlust des Systems zu minimieren, wurden elastische Silikon- gelenke bei diesem Prototypen verwendet.

Um elektrische Anschlüsse herzustellen, wird im ersten Schritt der Siliziumwafer maskiert und mit Kupfer bedampft. Anschließend werden beide Seiten mit trockenchemischen Ätzprozessen (RIE → Oxid-Ätzen, ICP → Si-Ätzen) bearbeitet und so die Armstrukturen sowie die Bereiche für Gelenke und Aktuatorfolie gestaltet. Anschließend wird die Aktua-

torfolie auf die vorbereitete Verankerungsstelle hybrid aufgebracht. Die Platzierung der Folie kann auf zwei Arten erfolgen: Siliziumoberfläche und Aktuatorfolie können mit Hilfe von Sauerstoffplasma aktiviert werden, was zu einer besseren Haftung zwischen den beiden Oberflächen führt [5]; oder die Aktuatorfolie lässt sich direkt in Silikon einbetten.

Frühere Experimente haben bewiesen, dass für eine elektrothermische Erregung des Aktuators die Möglichkeit besteht, eine durch Rußpartikel elektrisch leitfähige FULCE-Vorpolymer-Lösung auf die Oberfläche aufzubringen (50 bis 80 µm dick). Der Greifer in Bild 3 nutzt eine andere Methode, um die Umgebung der Folie zu erwärmen: Es werden 8 bis 10 Windungen Golddraht mit einer Dicke von 25 µm um die Folie gewickelt. Die leitfähige Polymerschicht hat den Nachteil gegenüber dem gewickelten Golddraht, dass sie wegen des direkten Kontakts mit einer passiven Schicht an der Oberfläche einen 8 bis 10 %-igen Bewegungsverlust verursacht. Sie ist teuer und ermöglicht geometrische Längen bis etwa 10 mm.

Für die Herstellung der Gelenkar-me werden die Gelenke mit Silikon aufgefüllt. Danach schneidet ein Laser die Armstrukturen frei, wodurch auch die bei dem trockenchemischen Ätzprozess bewusst erhaltenen dünnen Stützstrukturen entfernt werden. Nach dem Ausschneiden sind die Arme ausschließlich durch elastische Elemente mit der Siliziumgrundstruktur verbunden. Das Ausschneiden mit einem Laser hat den

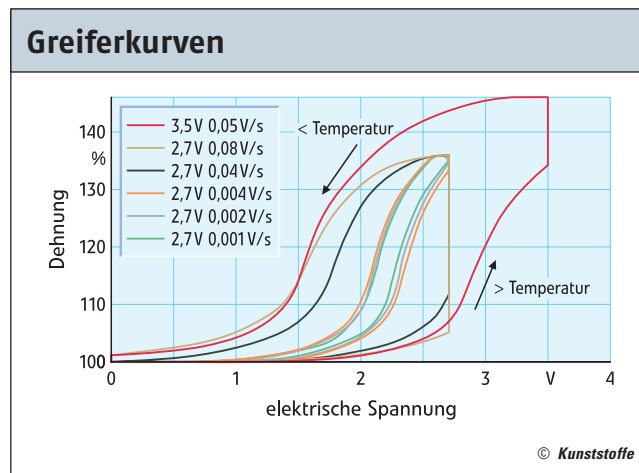


Bild 4. Lineare Erregungskurven des Greifers mit unterschiedlichen Erregungsgeschwindigkeiten

torfolie auf die vorbereitete Verankerungsstelle hybrid aufgebracht. Die Platzierung der Folie kann auf zwei Arten erfolgen: Siliziumoberfläche und Aktuatorfolie können mit Hilfe von Sauerstoffplasma aktiviert werden, was zu einer besseren Haftung zwischen den beiden Oberflächen führt [5]; oder die Aktuatorfolie lässt sich direkt in Silikon einbetten. Frühere Experimente haben bewiesen, dass für eine elektrothermische Erregung des Aktuators die Möglichkeit besteht, eine durch Rußpartikel elektrisch leitfähige FULCE-Vorpolymer-Lösung auf die Oberfläche aufzubringen (50 bis 80 µm dick). Der Greifer in Bild 3 nutzt eine andere Methode, um die Umgebung der Folie zu erwärmen: Es werden 8 bis 10 Windungen Golddraht mit einer Dicke von 25 µm um die Folie gewickelt. Die leitfähige Polymerschicht hat den Nachteil gegenüber dem gewickelten Golddraht, dass sie wegen des direkten Kontakts mit einer passiven Schicht an der Oberfläche einen 8 bis 10 %-igen Bewegungsverlust

Vorteil, dass die elastischen Strukturen keine mechanische Belastung während des Freischneidens erleiden. Der Wärmeeinfluss während des Freischneidens wird durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Siliziums gering gehalten, so dass dadurch die Aktuatorfolien nicht geschädigt werden.

i	Institute
<p>Techn. Universität Ilmenau Fakultät für Maschinenbau FG Mikromechanische Systeme Postfach100565 D-98864 Ilmenau Tel. +49 (0) 36 77/69-2487 Fax +49 (0) 36 77/69-1840 www.tu-ilmenau.de</p>	
<p>Universität Freiburg Institut für Makromolekulare Chemie D-79104 Freiburg Tel. +49 (0) 7 61/2 03-6258 Fax +49 (0) 7 61/2 03-6306 www.chemie.uni-freiburg.de/makro</p>	

Experiment gelungen

Die Untersuchungen zeigen einen linearen Verlauf der Gelenkcharakteristik. Dabei erreicht die Aktuatorspannung einen maximalen Wert von 41 kPa bei 80 °C und einen Querschnitt von 1,1 mm². Das bedeutet für diese Geometrie, dass bei der maximalen Aktuatorspannung der von der Rückstellkraft verursachte Aktuatorverlust etwa 52 % der Aktuatorleistung beträgt.

Mit Änderung der Steuer-spannung ändert sich auch die Temperatur um den Aktuator. Dadurch wird eine mechanische Spannung induziert und so letztendlich auch eine Bewegung der Arme verursacht. Die Dehnung in Abhängigkeit von der angelegten Steuer-

spannung für den Zyklus „Anregen, Halten, Entspannen“ bei unterschiedlichen Spannungs-Anstiegsgeschwindigkeiten zeigt Bild 4. Den geöffneten und geschlossenen Zustand des Greifers zeigt Bild 3.

Es konnten Schaltfrequenzen bis 0,15 Hz erreicht werden. Die Einstellzeiten innerhalb der Grenze von ±5 % der Endposition beträgt etwa 50 s. Derartige Aktuatoren sind prädestiniert für langsame, feinfühligere Stell- und Greifbewegungen.

Mit dem Prototypen eines Greifers/Manipulators sollte gezeigt werden, dass bei Verwendung von elastischen, passiven Elementen die Möglichkeit besteht, flüssigkristalline Elastomere in mikrotechnischen Komponenten zu verwenden, definierte Positionen

anzusteuern und diese längere Zeit zu halten.

Potenzielle Anwendungen

Die oben genannte Applikation oder das Prinzip kann bei der Mikromontage von optischen Bauelementen, SMD-Bauteilen oder bei der Einstellung solcher Elemente durch Schalten bzw. Bewegen optischer Fasern in beliebige Positionen genutzt werden. Die extreme Deformationsfähigkeit von FULCE-Materialien im Vergleich zu piezoelektrischen Materialien ermöglicht sehr große Bewegungen. Der PDMS [Poly (DiMethylsiloxane)]-ähnliche Molekülaufbau von FULCE-Materialien gestattet die Kombination mit anderen

PDMS-Materialien. FULCE ist wie PDMS auch wärmebeständig und gegen die meisten Säuren und Basen widerstandsfähig, so dass ein Einsatz unter aggressiven Umgebungsbedingungen möglich ist.

Bislang wurden nur thermo-mechanische Aktuatoren behandelt. In Zukunft besteht die Möglichkeit, die schon jetzt existierenden opto-mechanischen FULCE-Materialien für Aktuatoren mit kleiner Änderung der hier verwendeten Mikrotechnologie in unterschiedlichen Applikationen (z. B. Pumpen, Ventile und Schalter) einzusetzen. In Ilmenau wird an ersten Demonstratoren für mikromechanische Systeme mit steuerbaren Membranen gearbeitet. Das Ziel ist hier Faltenstrukt-

ren aus PDMS mit FULCE-Aktuatoren zu kombinieren, um hybride integrierte steuerbare Membranen zu bekommen. ■

DANK

Dieses Projekt wird von der Europäischen Union im Rahmen des Research Training Networks FULCE (HPKN-CT-2002-00169) gefördert. Besonderer Dank gilt auch den übrigen beteiligten Forschergruppen für die Diskussionen und die Zulieferung der Polymere, insbesondere Prof. Heino Finkelmann (Uni Freiburg) und seinen Mitarbeitern.

LITERATUR

1 Schwenk, N.; Boeffel, C.: Rheology of Side-Group Liquid-Crystalline Polymers: Effects of Isotropic-Nematic Transition and Evidence of Flow Alignment. *Macromolecules* 26 (1993) S. 2050–2056
 2 Demus, D.; Goodby, J.; Gray, G. W.; Spiess, H.-W.; Will, V.: *Handbook of Liquid Crystals*. Wiley-VCH, New York, 1998

3 Wermter, H.; Finkelmann, H.: Liquid Crystalline Elastomers as Artificial Muscles in e-Polymers. 2001, no. 013 <http://www.e-polymers.org>
 4 Tajbakhs, A.R.; Terentjev, E.M.: Spontaneous Thermal Expansion of Nematic Elastomers. *Eur. Phys. J. E* 6 (2001), S. 181–188
 5 Duffy, D. C.: Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane). *Anal. Chem.* 70 (1998), S. 4974–4978

DIE AUTOREN

DIPL.-ING. TAMÁS FISCHL, geb. 1980, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter für das Gebiet der FULCE im Fachgebiet Mikromechanische Systeme der Technischen Universität Ilmenau; tamas.fischl@tu-ilmenau.de.

DR.-ING. ARNE ALBRECHT, geb. 1964, ist Laborleiter im Fachgebiet Mikromechanische Systeme der Technischen Universität Ilmenau.

PROF. DR.-ING. HABIL. HELMUT WURMUS, geb. 1940, war bis 2005 Leiter dieses Fachgebiets an der Tech-

nischen Universität Ilmenau und hat die vorgestellten Arbeiten initiiert.

PROF. DR.-ING. HABIL. MARTIN HOFFMANN, geb. 1966, ist seit 2006 Leiter des Fachgebiets Mikromechanische Systeme an der Technischen Universität Ilmenau; martin.hoffmann@tu-ilmenau.de.

DIPL.-ING. MIKE STUBENRAUCH, geb. 1973, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Ilmenau.

DIPL.-CHEM. ANTONI SÁNCHEZ-FERRER, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Makromolekulare Chemie der Universität Freiburg.

SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

Liquid Crystalline Elastomers for Microengineering

ACTUATOR MATERIALS. *Liquid crystalline polymers are not just high-performance materials for applications requiring resistance to particular stresses. Special functional liquid crystalline elastomers (FULCE) produce movements that make it possible to develop new technical actuators based on the principle of the human muscle. The technology, mode of operation and use of these effectors are described using the example of a hybrid microgripper.*

NOTE: You can read the complete article by entering the document number **PE103697** on our website at www.kunststoffe-international.com