



universitätsverlag
ilmenau

Chaykina, Alexandra; Griebel, Stefan; Zentner, Lena:

Richtungsabhängiger Berührungssensor zur Sensorisierung von nachgiebigen Mechanismen

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-079-9

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-079-9>

Erschienen in:

Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš : Technische Universität Ilmenau, 29. - 31. August 2012. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - S. 79-90. (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 1)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-034-1 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142>

RICHTUNGSABHÄNGIGER BERÜHRUNGSSENSOR ZUR SENSORISIERUNG VON NACHGIEBIGEN MECHANISMEN

Alexandra Chaykina, Stefan Griebel*, Lena Zentner**

* TU Ilmenau, Fachgebiet Mechanismentechnik, Ilmenau

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Prinzip eines richtungsabhängigen Berührungssensors aus leitfähigem Silikon für monolithische, nachgiebige Mechanismen vorgestellt. Das Prinzip basiert auf der Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften eines leitfähigen Silikons von dem mechanischen Belastungszustand. Durch Integration des Sensors aus leitfähigem Silikon in einen halbkugelförmigen, nachgiebigen Mechanismus aus nicht leitfähigem Silikon können neun Richtungen einer äußeren Kräfteinwirkung unterschieden werden. Hierdurch wird das Potential einer sensorischen Erweiterung von nachgiebigen Mechanismen aufgezeigt.

Abstract

This paper presents a principle of a directional tactile sensor consisting of conductive silicone rubber for monolithic compliant mechanisms. The principle is based on the dependence of electric properties on mechanical stress state of conductive silicone rubber. By integration of the sensor consisting of conductive silicone rubber into a hemispheric, compliant mechanism, it is possible to differentiate nine directions of an external force effect. Hence, the potential of a sensory extension of compliant mechanisms is demonstrated.

1. Einführung

Nachgiebige Mechanismen finden ihre Anwendung in der Medizintechnik, an der Schnittstelle zwischen Maschine und biologischen Objekt und bei Manipulations- und Lokomotionsaufgaben [1]. Das Verhalten der nachgiebigen Mechanismen kann zum einen durch die geometrischen und zum anderen durch die stofflichen Parameter beeinflusst und festgelegt werden. Ein für diese Mechanismen durch seine stofflichen Eigenschaften geeignetes Material ist Silikon, welches für alle weiteren Betrachtungen herangezogen wird. Besonders für die Anwendungen am und im biologischen Objekt zeichnen sich die Eigenschaften dieses Materials, wie z. B. der geringe E-Modul, die Biokompatibilität und die große Verformungsfähigkeit, besonders aus.

Die Vorteile von nachgiebigen Mechanismen im Allgemeinen sind: die Möglichkeit der monolithischen und einfachen Fertigung sowie die gute Voraussetzung zur Miniaturisierung. Durch die Verringerung der Anzahl von Bauteilen ist mit weniger Reibung bzw. Schmierungs- und somit geringerem Wartungsaufwand zu rechnen. Nachteilig sind die Ermüdungserscheinungen des polymeren Materials bei großen Verformungen sowie die nur geringe Rissbeständigkeit.

Wenn die Sensorik innerhalb des nachgiebigen Mechanismus gewünscht oder notwendig ist, so sollte diese ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen wie das verwendete Material des nachgiebigen Mechanismus. Dies ist notwendig, um dessen gewünschtes Verformungsverhalten bei äußerer Belastung möglichst nicht zu beeinflussen.

Eine Möglichkeit für die Integration von Sensorik bieten leitfähige Polymere. Diese weisen aufgrund der im Material beinhalteten Füllstoffe, wie z. B. Ruß, eine elektrische Leitfähigkeit grösser Null auf [2]. Werden diese leitfähigen Polymere gedehnt, kommt es zu einer Veränderung der Leitfähigkeit und somit zur Vergrößerung des spezifischen Widerstandes [3]. Dieser Effekt kann für eine sensorische Erweiterung der nachgiebigen Mechanismen verwendet werden.

Hierdurch können Einflüsse sowie Zustandsänderungen der Außenwelt, z. B. das Wirken einer äußeren Kraft oder eine Temperaturänderung, detektiert werden und als Eingangsgröße für eine Regelung des Gesamtsystems verwendet werden.

Eine mögliche Umsetzung zur Lokalisation der Position von 121 einzelnen Druckpunkten innerhalb einer planaren Ebene zeigt die Arbeit von Spiel-

mann [4]. Dieser entwickelte eine ca. 1,3 mm dicke Sensorfolie bestehend aus vier einzelnen Silikonschichten. Aufbauend auf einer 0,4 mm dicken nicht leitenden Silikonträgerfolie wurden zwei senkrecht zueinander liegende, 0,3 mm starke, elektrisch leitfähige Silikonstreifenebenen aufgelegt. Die jeweils elf einzelnen Silikonstreifen wurden durch eine 0,2 mm starke nicht leitende Silikonfolie voneinander getrennt. Nachteilig erscheint hier die aufwendige Sandwich-Bauweise sowie fehlende Detektion mehrerer Druckpunkte gleichzeitig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Berührungssensors zur Richtungsdetektion für einen halbkugelförmigen nachgiebigen Mechanismus. Dafür müssen folgende Teilaufgaben gelöst werden:

- Erbringung eines Nachweises, dass das gewählte leitfähige Material als Sensormaterial verwendet werden kann;
- Erarbeitung eines Konzeptes für die Anordnung des Sensormaterials zur Detektion von mehreren Richtungen der Kräfteinwirkung gleichzeitig, angewendet auf den gewählten nachgiebigen halbkugelförmigen Mechanismus;
- Integration des sensorischen Materials in den Mechanismus als Fertigungsprozessschritt;
- Funktionsnachweis des richtungsabhängigen Berührungssensors.

2. Material und Methoden

2.1. Leitfähiges Polymer und Versuchsstand

Als Material für den Sensor wurde das leitfähige Silikon POWERSIL® 466 A/B VP der Firma Wacker [5] mit einer Shore-Härte von 37 und einem spezifischen Durchgangswiderstand von $50 \Omega\text{-cm}$ untersucht. Das Material hat geeignete mechanische und stabile elektrische Eigenschaften. Die Vernetzung von POWERSIL® 466 A/B VP erfolgt bei der Temperatur von 165°C . Zur Einstellung der endgültigen Eigenschaften muss das Silikon nach der Vulkanisation 4 h bei 200°C getempert werden.

Zur Untersuchung der Widerstandsänderung des Silikons unter verschiedenen Belastungszuständen wurden an Silikon-Proben uniaxiale Zugversuche durchgeführt. Die Zugproben/Sensorelemente wiesen eine Einspannlänge

von 100 mm, sowie eine Querschnittsfläche von $0,5 \times 5 \text{ mm}^2$ auf. Auf jeder Seite des Probekörpers wurde ein Kupferdrahtnetz einvulkanisiert und jeweils mit einem Kabel elektrisch kontaktiert. Dieser Bereich wurde beidseits, monolithisch mit einem nicht leitfähigem Silikonkörper (im weiteren Verlauf Kontaktkörper genannt) verbunden. Der im Querschnitt um ein Vielfaches als die Zugprobe größere Kontaktkörper wurde formschlüssig in eine Haltevorrichtung für eine Materialprüfmaschine beidseits fixiert, um eine Zugentlastung der Kontaktierung zu erreichen.

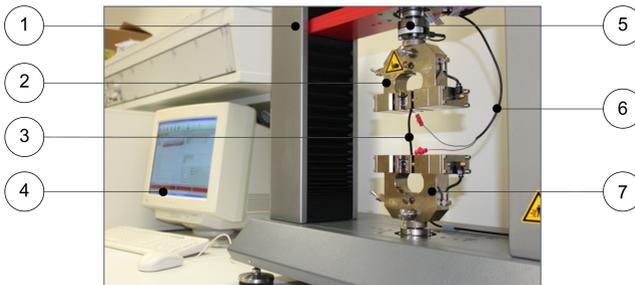


Abb. 1: Versuchsstand mit eingespannter Zugprobe:
 1 Materialprüfmaschine, 2 obere pneumatische Spannbacke,
 3 Zugprobe, 4 Mess- und Steuerrechner, 5 Kraftsensor,
 6 elektrische Kontaktierung, 7 untere pneumatische Spannbacke

Es wurden zyklische Zugversuche durchgeführt. Hierzu wurde eine Materialprüfmaschine der Firma Zwick Roell (ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005), die mit einem Mess- und Steuerrechner ausgestattet ist, eingesetzt (vgl. Abb.1).

Zur Ermittlung der Widerstandsänderung der Proben unter Belastung wurde ein Spannungsteiler (Halbbrücke) verwendet.

2.2 Voruntersuchungen des leitfähigen Silikons

Zusammenhänge zwischen elektrischen und mechanischen Parametern von verschiedenen leitfähigen Polymeren sind u. a. in den Arbeiten [6]-[8] beschrieben. Hierauf beruhend wurde die Untersuchungsmethodik von POWERSIL® 466 A/B VP ausgearbeitet. Ziel des zu entwickelnden Berührungssensors ist, die Richtung kleiner, äußerer Kräfte ($< 1 \text{ N}$) anzuzeigen. Aus diesem Grund wurden die elektrischen Eigenschaften von POWERSIL® 466 A/B VP unter verschiedenen maximalen Dehnungen ermittelt. Zur Aus-

wertung wurden die Änderungen des elektrischen Widerstandes während der mechanischen Zugbelastung ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Messungen dienen der Charakterisierung der Sensorelemente und erleichtern die Erstellung eines Algorithmus zur späteren Datenverarbeitung.

Um das Dehnungs-/Widerstandsänderungsverhalten bei den zyklischen Be- und Entlastungen zu erfassen, wurden jeweils ohne Pause 25 Dehnungs-/Entspannungszyklen mit einer Geschwindigkeit von jeweils 500 mm/min für eine maximale Dehnung von 5 %, 10 % und 15 % durchgeführt. Wegen des qualitativ ähnlichen Verlaufs der auf den Widerstand R_{start} bezogenen Änderung ΔR , sind für drei Dehnungsbereiche die Be- und Entlastungskurven für eine maximale Dehnung von 5 % in der Abbildung 2 dargestellt. Dabei entspricht R_{start} der Größe des Widerstandes der entlasteten Zugprobe.

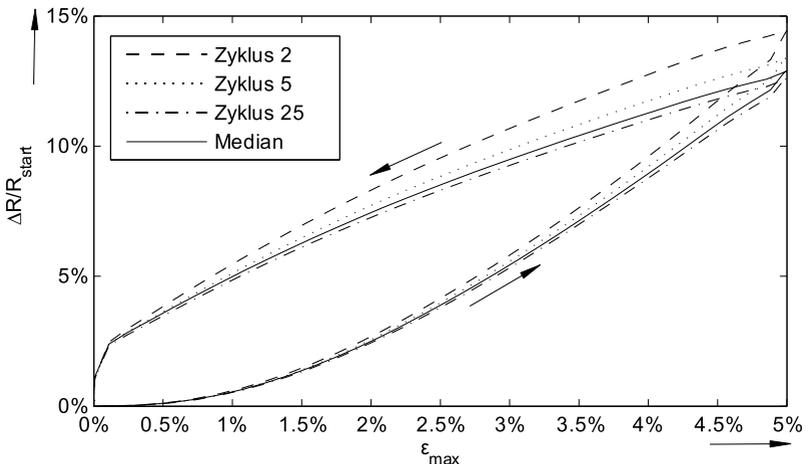


Abb. 2: Zyklischer Zugversuch: Darstellungen der Widerstandsänderung über die Dehnung bei maximaler Dehnung von 5 % unter steigender Belastungszyklenzahl

Dargestellt sind jeweils der 2., 5. und 25. Zyklus sowie der Median der 25 Zyklen von einer Probe.

Die Widerstandsänderung wurde mit folgender Formel ermittelt:

$$\Delta R = R - R_{start}, \quad (2.1)$$

Die Voruntersuchungen der leitfähigen Silikonstreifen aus POWERSIL® 466 A/B VP haben zusammenfassend folgendes gezeigt:

- eine Längenänderung von der Silikonprobe führt zur Widerstandsvergrößerung der Probe;
- der Anstieg der Dehnungs-Widerstandsänderungskennlinie nimmt mit zunehmender Zykluszahl ab;
- die einzelnen Be-/Entlastungskurven nähern sich jeweils bei zunehmender Zykluszahl asymptotisch einander an;
- im Punkt der maximalen Dehnung sind die Werte der Neukurve größer als die der darauffolgenden Zyklen (da der Unterschied zwischen Neukurve und Median 10 % und mehr betragen kann, wurde die Neukurve nicht dargestellt und nicht betrachtet);
- die Änderung der auf den R_{start} bezogenen Widerstandsänderung bei einer maximalen Dehnung von 5 % nähert sich asymptotisch einen Wert von ca. 12 % an;
- bei größeren maximalen Dehnungen sind größere maximale Widerstandsänderungen zu erreichen; die beiden Größen verhalten sich überproportional zueinander.

Bezogen auf die Aufgabenstellung kann geschlussfolgert werden, dass sich das gewählte Material, POWERSIL® 466 A/B VP, als Sensormaterial für nachgiebige Mechanismen eignet.

3. Sensorisierung des nachgiebigen Mechanismus

3.1 Konzeptentwurf für die Anordnung der Sensorstreifen

Der zu sensorisierende Mechanismus hat die Form einer monolithischen Halbkugel, die aus dem Silikon Elastosil R420/30 [9] mit einer Shore-Härte von 30 gefertigt wurde. Die geometrischen Abmessungen können Abb. 3a entnommen werden. Als einfachste Prinziplösung für eine Richtungserkennung wurden zwei sich senkrecht kreuzende, leitfähige Silikonstreifen verwendet, die an den Enden jeweils zwei und im Kreuzungspunkt den 5. Kontaktpunkt boten. Hierfür wurde eine dünne Silikonfolie aus POWERSIL® 466 A/B VP mit der Dicke von 0,5 mm gefertigt, aus der danach ein Kreuz ausgeschnitten wurde. Das Kreuz wurde mit einem Silikonkleber Elastosil E41 [10] mit einer Shore-Härte von 30 auf den Mechanismus aufgeklebt. Auf die fünf Kontaktpunkte, P1 bis P4 und C, wurde das unvulkanisierte POWER-

SIL® 466 A/B VP aufgebracht und mit einem Kupferdrahtnetz einvulkanisiert. Das Kupferdrahtnetz wurde jeweils mit einem Draht elektrisch kontaktiert (vgl. Abb. 3b).

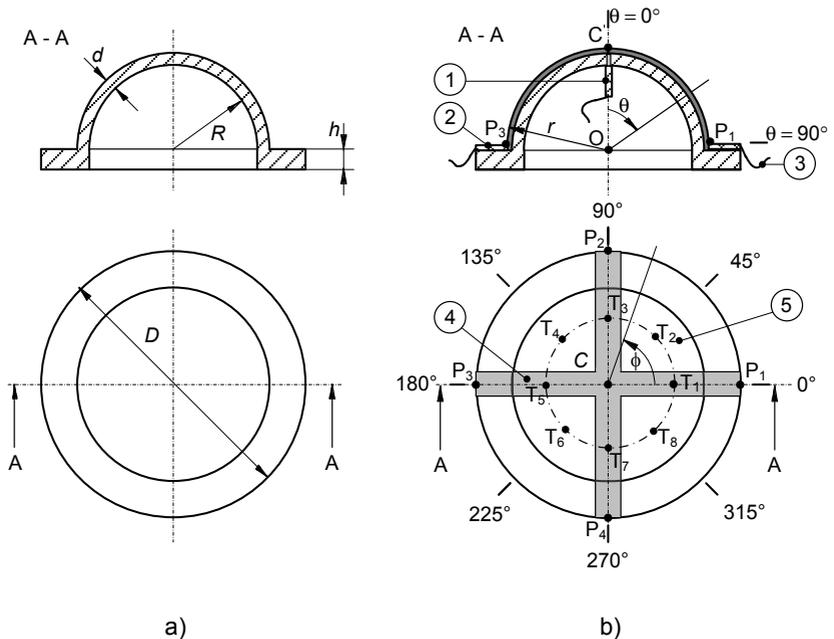


Abb. 3: a) Nachgiebiger Mechanismus in der Draufsicht und in der Schnittdarstellung: $d = 3$ mm, $R = 31,85$ mm, $h = 15$ mm und $D = 86$ mm; b) Sensorisierter nachgiebiger Mechanismus in der Draufsicht und in der Schnittdarstellung: 1, 2 Kupferdrahtnetz, 3 elektrische Kontaktierung/Kabel, 4 Sensorstreifen aus leitfähigem Polymer; 5 nachgiebiger Mechanismus

3.2. Signalverarbeitung und -ausgabe

Zur Ermittlung der Widerstandsänderung der Sensorelemente wurden Spannungsteiler verwendet (vgl. Abb. 4). Je einer der vier Streifenendpunkte besitzt über den Streifenabschnitt und den Kreuzungspunkt einen dehnungsabhängigen Widerstand, der jeweils mit einem Referenzwiderstand eine Halbbrücke bildet. Im Falle einer Dehnung eines Streifenabschnittes konnte eine Spannungsänderung gemessen werden.

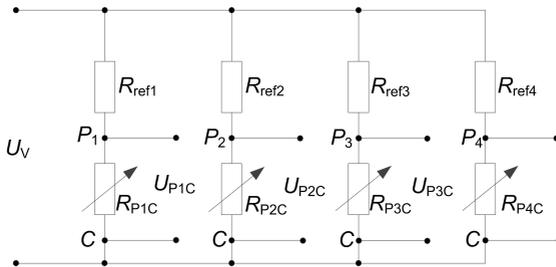


Abb. 4: Messschaltung; U_V - Versorgungsspannung; R_{P_jC} - der zu ermittelnde Widerstand; $R_{ref,j}$ - Referenzwiderstand, U_{P_jC} - Spannungsabfall über dem zu ermittelnden Widerstand

Die Signalverarbeitung und -ausgabe erfolgt über ein LabVIEW-Programm, das über ein Multifunktions-Datenerfassungsmodul (NI PCI-6221) mit der Messschaltung verbunden ist. Im Programm kann die Messfrequenz f zur Erfassung der Spannungsabfälle U_{P_jC} für $j = 1, \dots, 4$ zwischen 0,5 und 20 Hz und der Schwellwert U_S für eine Spannungsänderung ΔU_{P_jC} , für $j = 1, \dots, 4$, die eine Berührung detektiert, mit 16-Bit Genauigkeit eingestellt werden.

Das Auslesen der aktuellen Spannungen U_{P_jC} der einzelnen Streifenabschnitte erfolgt parallel. Es wird jeweils die Differenz zwischen den Spannungsabfällen über den einzelnen leitfähigen polymeren Streifenabschnitten zweier zeitlich aufeinander folgenden Messungen ermittelt (siehe Formel 3.1).

$$\Delta U_{P_jC} = |U_{P_jC}(t_{i+1}) - U_{P_jC}(t_i)|, \quad \text{mit } j \in 1, \dots, 4; i \in \mathbb{N} \text{ und } t_0 = 0 \quad (3.1)$$

Diese so gebildeten Differenzen werden mit dem Schwellwert verglichen.

$$\Delta U_{P_jC} = \begin{cases} \geq U_S & \text{entsprechend zugeordnete LED leuchtet} \\ < U_S & \text{entsprechend zugeordnete LED leuchtet nicht} \end{cases} \quad (3.2)$$

Sind diese grösser oder gleich dem Schwellwert, wird die Richtung einer äußeren Kraft mittels LED¹ auf der Bedieneroberfläche (Front Panel) des Programmes (vgl. Abb. 5) angezeigt.

Eine Berührung wird bei Überschreiten einer von der Messfrequenz f und dem Schwellwert U_S abhängigen Verformungsänderung des nachgiebigen Mechanismus detektiert.

¹ LED: lichtemittierende Diode

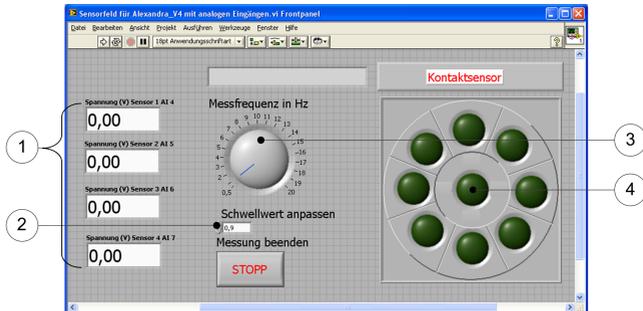


Abb. 5: Front Panel des LabVIEW-Programms: 1 Spannungsanzeige, 2 SchwellwertEinstellung, 3 Messfrequenzeinstellung, 4 LED-Anzeige

Insgesamt gibt es neun LEDs. Vier LEDs sind direkt den $R_{P,C}$ für $j = 1, \dots, 4$ zugeordnet. Die dazwischen liegenden LEDs werden aktiviert, wenn eine äußere Kraft zwei benachbarte Sensorstreifen soweit dehnt, dass jeweils der Schwellwert gleichzeitig überschritten wird. Ändern sich die Spannungen aller Sensorstreifen gleichzeitig und wird jeweils der Schwellwert überschritten, leuchtet die mittlere LED auf. Greifen zwei äußere Kräfte um 180° versetzt so an, dass sich die Spannungen zweier gegenüber liegender Sensorstreifen gleichzeitig ändern und die zeitlich gebildeten Differenzen größer als der Schwellwert sind, so leuchten zwei gegenüber liegende LEDs auf.

3.3. Funktionsnachweis

Zur Erbringung eines Funktionsnachweises wurde ein sensorisierter Mechanismus gefertigt und untersucht. Dafür wurden auf diesem die Belastungspunkte T_k mit Koordinaten $(r=R+d, \phi_k = 45^\circ (k-1), \theta = 45^\circ)$ für $k = 1, \dots, 8$ markiert (vgl. Abb. 3b). Diese sind den acht LEDs, die in einem Kreis liegen zugeordnet. Der Punkt C mit den Koordinaten $(r=R+d, 0, 0)$ ist der neunten, mittleren LED zugeordnet. Bei dem Detektieren einer Berührung können somit die Richtungen der Krafteinwirkung von den neun definierten Punkten zum Punkt O $(0, 0, 0)$ angezeigt werden.

Der Mechanismus wurde mit der Messschaltung und angepassten Referenzwiderständen ($R_{ref,j}$, $j = 1, \dots, 4$) kontaktiert. Es wurden Referenzwiderstände gewählt, die die gleiche Größe, wie der zu untersuchende leitfähige Polymerstreifen besaßen. Die Versorgungsspannung von 5 V lieferte ein

stabilisiertes Spannungsnetzteil. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 abgebildet. Als Messfrequenz wurde 1 Hz und als Schwellwert wurde $U_S = 0,2 \text{ V}$ gewählt.

Der sensorisierte Mechanismus wurde mit einem 2-ten halbrunden Körper, einem Stab, der eine Verrundung am Ende mit einem Radius von $r = 4 \text{ mm}$ aufwies, senkrecht zur Oberfläche in die Richtungen T_k für $k = 1, \dots, 8$ zum Punkt $O(0, 0, 0)$ belastet. Hierfür wurde der Mechanismus um $\theta = 45^\circ$ mit Hilfe einer Verstellvorrichtung gekippt und mit der oben genannten Materialprüfmaschine belastet.

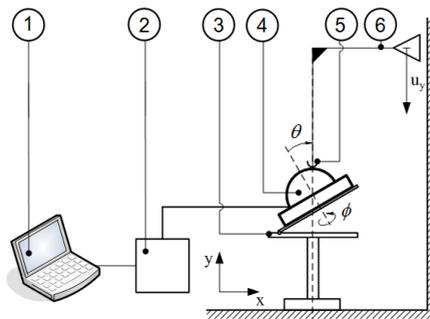


Abb. 6: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Demonstrationsmodells:
 1 PC mit LabVIEW, 2 Datenerfassungsmodul,
 3 Verstellvorrichtung, 4 nachgiebiger Mechanismus, 5 Stab,
 6 Materialprüfmaschine

Als Belastung wurde eine Verschiebung u_y in negative y -Achsenrichtung linear mit einer Geschwindigkeit von 500 mm/min aufgebracht. Der Mechanismus wurde in 45° Schritten um die 2-te Koordinatenachse (ϕ) gedreht und dabei an den Punkten T_1 bis T_8 (vgl. Abb. 4) jeweils um 5 mm in Richtung des Kugelzentrums $O(0, 0, 0)$ deformiert. Als Ausgangsposition wurde die Stellung $\phi = 0$ gewählt, wobei der Stab im Punkt T_1 den Mechanismus minimal berührte. Als Haltezeit im belasteten Zustand wurden 0 Sekunden gewählt. Anschließend wurde der Mechanismus linear mit der gleichen Geschwindigkeit von 500 mm/min entlastet.

3.4. Ergebnisse

Anhand der durchgeführten Untersuchungen folgt, dass der vorgeschlagene Berührungssensor eine Kräfteinwirkung in neun Richtungen, von den Punk-

ten T_k mit Koordinaten $(r=R+d, \phi = 45^\circ (k - 1), \theta = 45^\circ)$ für $k = 1, \dots, 8$ zum Punkt O $(0, 0, 0)$ und dem Punkt C $(r=R+d, 0, 0)$ zum Punkt O $(0, 0, 0)$ unterscheiden kann. Eine Berührung wird bei Überschreiten einer von der Messfrequenz und Schwellwert abhängigen Verformungsänderung des nachgiebigen Mechanismus detektiert. Die Maximalverformung muss dabei unterhalb eines Maximalwertes bleiben, so dass die Kontaktpunkte (P1 – P4, C) nicht verformt werden und Bewegungsartefakten der Kontaktpunkte auszuschließen sind.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Prinzip eines richtungsabhängigen Berührungssensors für monolithische, nachgiebige Mechanismen vorgeschlagen und umgesetzt. Hierfür wurden die elektrischen Eigenschaften eines leitfähigen Polymers verwendet.

Durch Voruntersuchungen stellte sich heraus, dass das gewählte leitfähige Polymer, POWERSIL® 466 A/B VP, als Sensormaterial geeignet ist. Die vorgeschlagene Konzeption einer Sensoranordnung erlaubte die Integration des Sensors in den Mechanismus. Der Funktionsnachweis als richtungsabhängiger Berührungssensor konnte erfolgreich demonstriert werden.

Ziel zukünftiger Arbeiten sollte die Erhöhung der Auflösung der Richtungsdetektion sein. Es sollte auch eine optimale Sensoranordnung für unterschiedliche nachgiebige Mechanismen gefunden werden.

Des Weiteren sollte die Vulkanisation des nicht leitfähigen und leitfähigen Polymers in einem Fertigungsschritt geschehen. Ebenfalls sollte der Fertigungsprozess zur Integration des Sensormaterials in den nachgiebigen Mechanismus automatisiert werden, um eine annehmbare Reproduzierbarkeit des Berührungssensors zu erlangen.

Limitation des eigenen Ansatzes: durch den Berührungssensor können nur dynamische Prozesse erfasst werden, da nur die Spannungsänderung für sensorische Zwecke verwendet wird.

Für weiterführende Untersuchungen sind verschiedene Belastungsarten und Bewegungsfunktionen der Belastung denkbar, sowie die Ermittlung der dazugehörigen optimalen Messfrequenzen.

Des Weiteren sollten von dem halbkugeligen Mechanismus abweichende nachgiebige Körper auf ihre Eignung hin überprüft werden.

Alle Untersuchungen wurden mit einem inneren Druck von 0 bar durchgeführt. Untersuchungen mit einem Druck > 0 bar erscheinen sinnvoll, um ein einstellbare Sensitivität gegenüber der äußeren Belastung einzustellen.

Der Sensor ermöglicht eine Sicherheitsfunktion bei dynamischen Prozessen, beispielsweise zur Erkennung von Zusammenstößen zwischen Menschen und Maschinen.

Literatur

- [1] Zentner, Lena, Böhm, Valter: „Zum Verformungsverhalten nachgiebiger Mechanismen.“, Konstruktion, Springer-VDI-Verl., Düsseldorf, ISSN 07205953, Bd. 60 1/2, S. 67-71, 74, 2008.
- [2] Mair, Hans J., Roth, Siegmund: Elektrisch leitende Kunststoffe, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1989.
- [3] Valenta, László, Bojtos, Attila: “Mechanical and Electrical Testing of Electrically Conductive Silicone Rubber”, Materials Science Forum, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 589, pp 179-184, 2008.
- [4] Spielmann, Christian, Böhm, Valter: Entwicklung eines Sensors für einen ferrofluidischen Flächenaktor, Diplomarbeit, Ilmenau, 2006.
- [5] POWERSIL® 466 A/B VP, Datenblatt, Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2004
- [6] Snyder, Wesley E., Clair Joseph St.: “Conductive Elastomers as Sensor for Industrial Parts Handling Equipment.” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE Instrumentation and Measurement Society, Vol. 27, No. 1, pp 94-99, 1978
- [7] Mansour, S. A.: “Effect of extensional cyclic strain on the mechanical and physico-mechanical properties of PVC-NBR/graphite composites”, eXPRESS Polymer Letters, Vol.2, No.12, pp 836–845, 2008
- [8] Flandin, Lionel et al.: “Effect of Strain on the Properties of an Ethylene–Octene Elastomer with Conductive Carbon Fillers.”, J. of applied Polymer Science, JOHN WILEY & SONS INC, Vol. 76, Issue 6, pp 894-905, 2000
- [9] Elastosil R 420/30, Datenblatt, Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2011
- [10] Elastosil E41, Datenblatt, Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2011