Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31

Simulationsgestützte Applikation biphasischer Dehnungsmesssensoren auf softe Aktoren

Propriozeption in der Soft Robotics

E. Müller, B. Cao, J. Peters, A. Raatz, M. Wurz

ZUSAMMENFASSUNG Softe Roboter setzen sich aus einem soften Aktor, der sich durch seine hochelastische Verformbarkeit auszeichnet, und einem Sensorsystem zur Positionsbestimmung zusammen. Herkömmliche Dehnungsmesssensoren werden auf einem Trägersubstrat gefertigt und können nur Dehnungen bis zu maximal 10 % abbilden. In diesem Beitrag wird daher die substratlose Applikation biphasischer Dehnungsmesssensoren auf flexible in der Soft Robotics verwendete Materialien und deren Positionierung untersucht.

STICHWÖRTER

Sensoren, Mikrotechnik, Industrieroboter

Simulation-Based Application of Biphasic Strain Gauges on Soft Actuators

ABSTRACT Soft robots consist of a soft actuator, which is characterized by its highly elastic deformability, and a corresponding sensor system for position determination. Conventional strain gauges are manufactured on a carrier substrate and can, however, only map strains of up to a maximum of 10 %. This work therefore investigates the substrate-free application of biphasic strain gauges on flexible materials used in soft robotics and their positioning.

1 Einleitung

Durch zahlreiche Anwendungen in der Medizintechnik [1], der Agrartechnik [2] und der Mensch-Maschine-Interaktion [3] wächst das Feld der sogenannten Soft Robotics. Roboter aus weichen Materialien bieten eine inhärente Sicherheit bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter und ermöglichen die Handhabung fragiler Bauteile oder Lebensmittel. Diese weichen Roboter, meist Kontinuumsroboter, bestehen aus nachgiebigen Materialien wie beispielsweise Silikon oder Textilien. Ebenso wie konventionelle Industrieroboter verfügen sie über mechanische Aktoren und entsprechende Sensoren. Die Aktoren sind für die Bewegung des Roboters verantwortlich, während die Sensoren eine präzise Regelung und Steuerung der Roboterkonfiguration sowie die Wahrnehmung von Umgebungsinteraktionen ermöglichen [4]. Die Funktion weicher Roboter basiert auf der hochelastischen Verformbarkeit des Aktormaterials, um verschiedene Konfigurationen zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Nachgiebigkeit des Systems zu gewährleisten. Eine Methode zur Bestimmung der räumlichen Konfiguration weicher Roboter ist die Messung der Verformungszustände der Aktoren. Anforderungen an entsprechende weiche Dehnungsmesssensoren umfassen nicht nur konventionelle Kriterien wie Messbereich und Sensitivität, sondern auch, dass die Nachgiebigkeit des Gesamtsystems nicht durch die Sensoren eingeschränkt wird.

Für die Soft Robotics existieren Sensortechnologien, die auf weiche Aktormechanismen abgestimmt sind, jedoch weisen diese anderen konstruktiven und steuerungstechnischen Einschränkungen auf, wie in Kapitel 2 erläutert wird. Die in Kapitel 3 vorgestellten Dehnungssensoren aus einer biphasischen Gold-Gallium Legierung erlauben dagegen die Messung hoher Dehnungen und lassen sich als Dünnfilm substratlos direkt auf die verwendeten Silikonkörper aufbringen. Zur Messung der Roboterkonfiguration ist die richtige Platzierung dieser Sensoren auf oder sogar im Material der Aktoren entscheidend. Mittels einer FEM-Simulation soll daher die optimale Position der Sensorik im Aktor bestimmt werden (Kapitel 4).

2 Stand der Technik

Aktive Sensoren wie piezoelektrische Sensoren sind aufgrund ihrer hohen mechanischen Steifigkeit und ihres Hysterese-Verhaltens nicht für große Dehnungen geeignet, weshalb in der Soft Robotics vorwiegend widerstands- oder kapazitätsbasierte Messmethoden verwendet werden. Auch konventionelle Dehnungsmesssensoren können aufgrund ihrer festen Metallschichten nur einen begrenzten Dehnungsbereich abbilden. Somit ist eine der größten Herausforderungen für flexible Sensorik das Fehlen von leitfähigen Materialien, die bei hohen Dehnungen leitfähig bleiben [5]. Aus diesem Grund existieren Konzepte, bei denen hochelastische Elastomere mit leitfähigen Partikeln, wie Carbon Black [6], Carbon Nanotubes [7], Nanopartikeln [8, 9] oder Graphen versetzt [10] werden. Solche Additive erhöhen jedoch die Steifigkeit der Elastomere. Generell sollten Sensoren in der Soft Robotics nachgiebiger sein als der Roboter selbst, um die Aktuierung nicht zu behindern und eine ausreichende Lebensdauer zu gewährleisten [9]. Als Alternative gelten daher sogenannte Flüssigmetallsensoren. Eine in der Forschung viel beachtete Variante ist die eutektische Gallium-Indium-Legierung (eGaIn), welche in Mikrokanäle gefüllt, direkt im soften Roboter leitfähige Sensorstrukturen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

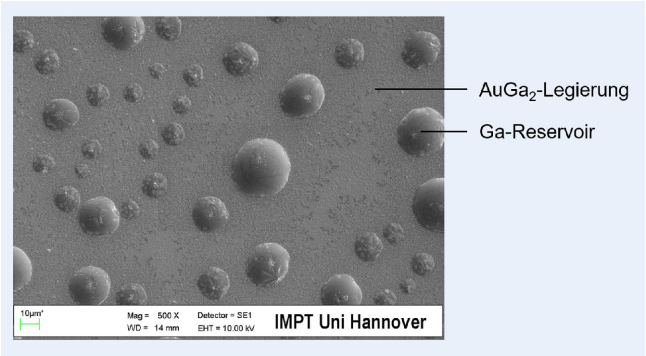


Bild 1. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der biphasischen Legierung. *Foto: IMPT*

erzeugt [11]. Aufgrund der direkten Integration des flüssigen Sensormaterials in den Aktor wird die mechanische Beeinflussung auf den Roboter minimiert. Die hohen Kosten für eutektisches Gallium-Indium, besonders aber die komplexe Herstellung von bereits einfachen Geometrien und damit einhergehende Limitationen bei der Auslegung und Fertigung softer Roboter schränken jedoch den Einsatz dieser eGaIn-Sensoren ein [5].

3 Herstellung, Applikation und Kontaktierung biphasischer Dehnungsmesssensoren

In dieser Arbeit wird daher die substratlose Applikation biphasischer Dehnungsmesssensoren auf flexible in der Soft Robotics verwendete Materialien und deren Positionierung untersucht. Die nanoskopischen biphasischen Dehnungsmesssensoren bestehen hierbei aus einer festen und flüssigen metallischen Komponente, sodass Risse, die bei hohen Dehnungen im festen Dünnfilm auftreten, durch die flüssigen Reservoirs wieder aufgefüllt werden können. Um biphasische Sensoren herzustellen, wird eine niedrigschmelzende Legierungskomponente, üblicherweise Gallium, auf eine dünne Schicht eines leitfähigen Metalls, wie beispielsweise Gold, aufgetragen. Ist das Verhältnis der flüssigen zur festen Metallkomponente ausreichend groß, geht die feste Schicht komplett in eine chemische Verbindung mit dem Flüssigmetall ein. Bei der Verwendung von Gallium und Gold liegt die Legierung somit namensgebend in den biphasischen Ga- und AuGa2-Anteilen vor. Überschüssiges Material der reinen Ga-Phase bildet an der Oberfläche der festen Schicht flüssige Reservoire (**Bild 1**), die für die Selbstheilungsfähigkeit der Sensorstruktur verantwortlich sind. [12]

Konventionelle Dehnungsmesssensoren, die beispielsweise auf Polyimidfolien gefertigt werden, können Dehnungen von bis zu 1 %, 2 % oder 5 % messen [13]. Speziell für hohe Dehnungen entwickelte Sensoren bilden eine maximale Dehnung von ±10 % ab [13]. Das Rissfüllverhalten der biphasischen Sensoren ermöglicht es, deutlich höhere Dehnungen zu messen [14, 15]. Gegenüber reinen Flüssigmetallsensoren besteht darüber hinaus der Vorteil, dass biphasische Dünnfilmsensoren mittels Batch-Produktion hergestellt werden können, indem zuerst die formbestimmende feste Phase aufgetragen wird. Danach erfolgt die Bedampfung mit dem flüssigen Bestandteil, der die Selbstheilungseffekte erzeugt und somit die wiederholte Anwendung in den entsprechend höheren Dehnungsbereichen erlaubt [16]. Eine gängige Herstellungstechnik für biphasische Sensoren ist die strukturierte Dünnschichtabscheidung auf dem flexiblen Substrat Polydimethylsiloxan (PDMS) [14]. Die Verwendung von den in der Soft Robotics genutzten silikonbasierten Materialien in Vakuumkammern führt jedoch zu einer irreversiblen Verunreinigung der Anlage und ist daher ungeeignet für eine Direktabscheidung der Sensoren. Zudem ist eine gleichmäßige Abscheidung der Legierung hierbei auf flache Substrate beschränkt, da dreidimensional gekrümmte Oberflächen aufgrund von Abschattungseffekten zu einer ungleichmäßigen Schichthöhe führen. Durch die Abscheidung der Sensoren auf einem wasserlöslichen Trägersubstrat, wie im folgenden Kapitel 3.1 erläutert, können jene unter Reinraumbedingungen gefertigt und anschließend auf beliebige Geometrien übertragen werden. Durch die Möglichkeit, die Sensoren mit einer Schichtdicke im Submikrometerbereich zu fertigen, sind sowohl der mechanische Einfluss auf die Aktorik als auch der von der Sensorik beanspruchte Raum im Robotersystem minimal.

3.1 Herstellung der Sensoren

Aus diesem Grund werden die Sensoren transferierbar auf einem wasserlöslichen Trägersubstrat gefertigt, wie in **Bild 2** dargestellt. Hierfür wird eine Polyvinylalkohol-Folie auf einem starren Trägersubstrat befestigt. Für die Batch-Produktion der Sensoren dient eine metallische Schattenmaske, die mithilfe einer magnetischen Halterung fixiert wird. Die erste Sensorschicht aus Gold wird mit einer Schichtdicke von 60 nm mittels der Katho-

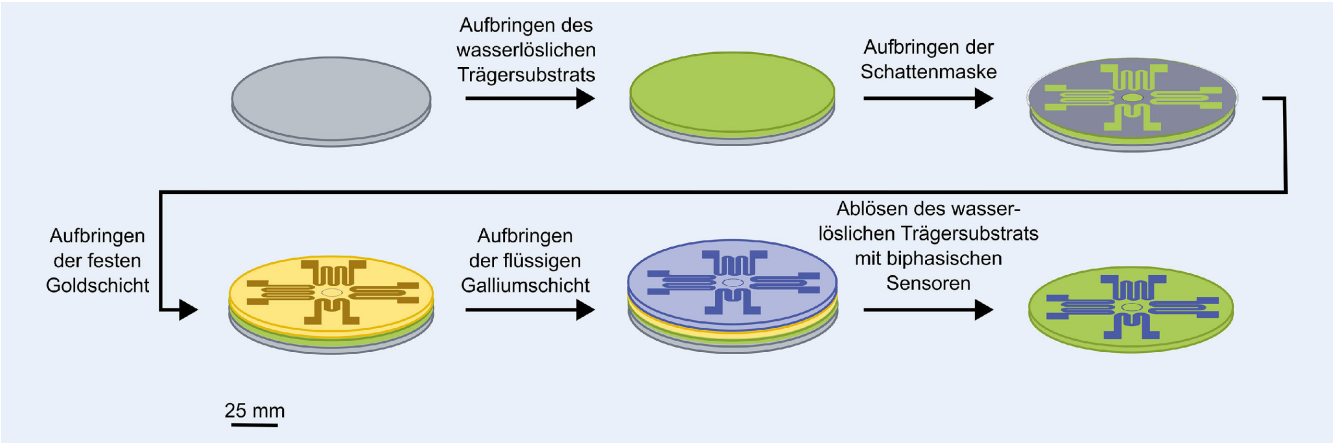


Bild 2. Prozessschema der transferierbaren biphasischen Sensoren. *Grafik: IMPT*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

denzerstäubung „MRC“ der Firma Kenotec abgeschieden. Anschließend wird Gallium mit einer Schichtdicke von 500 nm mittels Elektronenstrahlverdampfens mit der Aufdampfanlage „LAB500plus“ der Firma Leybold aufgebracht. Für den Transfer wird die Schattenmaske entfernt und die Folie mit den hergestellten Sensoren vom starren Trägersubstrat gelöst.

3.2 Applikation der Sensoren und elektrische Kontaktierung

Für die substratlose Applikation der Sensoren wird die Folie mit der Sensorseite auf das zu messende Objekt aufgebracht. Für die Auswertung im Zugversuch werden Proben aus dem flexiblen Material Polydimethylsiloxan (PDMS) verwendet. Durch die Flexibilität der Trägerfolie kann der Sensor auf verschiedenste Geometrien appliziert werden. Anschließend wird die wasserlösliche Trägerfolie im Wasserbad aufgelöst, sodass lediglich der Sensor auf der Oberfläche des Messobjekts zurückbleibt. Der elektrische Widerstand der Sensoren wurde vor und nach der Applikation gemessen (35,1 ± 0,5 Ω) und bestätigt einen erfolgreichen Transfer, da keine signifikanten Unterschiede auftraten. Auch die elektrische Kontaktierung der Sensoren ist den Dehnungen des soften Aktors ausgesetzt. Daher wird diese ebenfalls flexibel umgesetzt, indem eine flüssige GaIn-Legierung den elektrischen Kontakt zwischen Sensorschicht und Zuleitung gewährleistet. Zur Einkapselung und mechanischen Fixierung der Kontaktstellen wird ebenfalls PDMS verwendet. Ein transferierter und flexibel kontaktierter biphasischer Dehnungsmesssensor ist in **Bild 3** gezeigt.

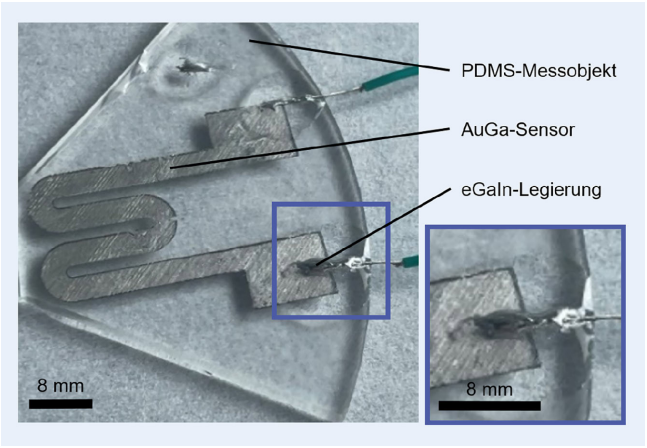


Bild 3. Transferierter und kontaktierter biphasischer Dehnungsmesssensor auf PDMS. *Foto: IMPT*

3.3 Sensorcharakterisierung

Zur Sensorcharakterisierung wird ein Zugversuch mit dem Zugprüfstand „MultiTest 2.5-xt“ der Firma Mecmesin durchgeführt. Hierbei wird mithilfe des Messdatenverstärkers „QuantumX MX1615B“ der Firma HBM die Widerstandsänderung des Sensors während der Belastung gemessen. Ein Ergebnis ist exemplarisch in **Bild 4** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Sensor bis zu einer Kraft von 15 N einen weitgehend linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Widerstand aufweist. Dies entspricht einer Dehnung von etwa 17 % des Messobjekts und liegt somit deutlich über den erreichbaren Dehnungen konventioneller Dehnungsmesssensoren. Das abrupte Abfallen des Widerstands bei höheren Kräften zeigt allerdings auch, dass der Sensor Dehnungen über 17 % nicht abbilden kann. Ebenfalls zu beobachten ist ein verhältnismäßig starkes Rauschen des Messsignals, das auf die flüssige Komponente des Sensors und die flexible Kontaktierung zurückzuführen ist. Ob dieses Rauschen durch eine Anpassung der Legierungszusammensetzung minimiert werden kann, muss hierbei noch weiter untersucht werden.

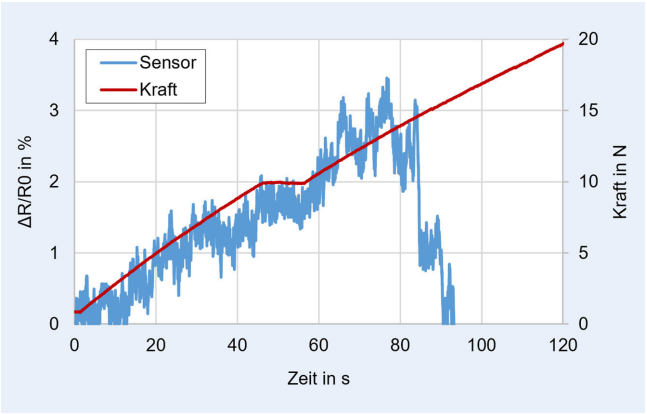


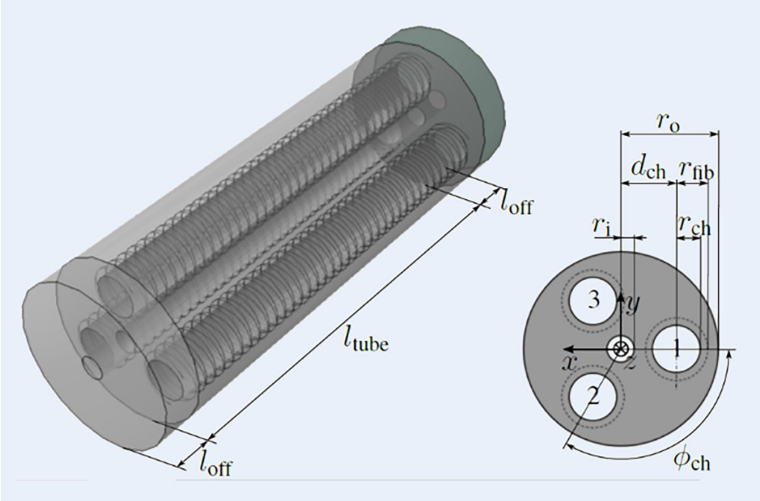
Bild 4. Relative Widerstandsänderung des Sensors im Vergleich zur aufgebrachten Kraft. *Grafik: IMPT*

4 Simulationsgestützte Untersuchung der Sensorpositionierung

Aus der Sensorcharakterisierung ergeben sich messbare Widerstandsänderungen bei Dehnungen von bis zu 17 %. Auch wenn damit ein höherer Messbereich realisiert werden kann als mit konventionellen Dehnungsmesssensoren (1 %, 2 % beziehungsweise 5 %) oder speziell für hohe Dehnungen entwickelte Sensoren (10 %), können in soften Aktoren weitaus höhere Dehnungen auftreten. Beispielhaft soll dafür im Folgenden der 3-Kammern-Biegeaktor analysiert werden. Dazu wird eine FEM-Simulation mithilfe des Programms Abaqus/CAE durchgeführt, um die im Aktor auftretenden Hauptdehnungen zu ermitteln. Diese geben Aufschluss über die geeignete Positionierung der Sensoren im Aktor.

Bild 5 zeigt den hier analysierten Aktor inklusive einer Schnittdarstellung [17]. Das dazugehörige Simulationsmodell und die zugehörigen Methoden zur Auswertung wurden bereits angewendet und validiert [18, 19]. Die Geometrie des Aktors ist rotationssymmetrisch und beinhaltet drei zylindrische Kammern zur pneumatischen Aktuierung. Durch das Aufbringen von Druck in einer oder zwei Kammern krümmt sich der Aktor aufgrund der Längenänderung der Kammern in die gegenüberliegende Richtung. Die größten Dehnungen im Aktor treten damit an der konvex gekrümmten Außenseite des Aktors auf. Für eine möglichst genaue Messung der Krümmung des Aktors sollten die Sensoren in einem Bereich großer Dehnung positioniert sein. Die Applizierung der biphasischen Mäanderstrukturen des Sensors auf der Oberfläche des Aktors, wie in **Bild 6** dargestellt, wäre damit hinsichtlich des Messbereichs ideal. Eine Dehnung über 17 % sollte jedoch ausgeschlossen sein.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY



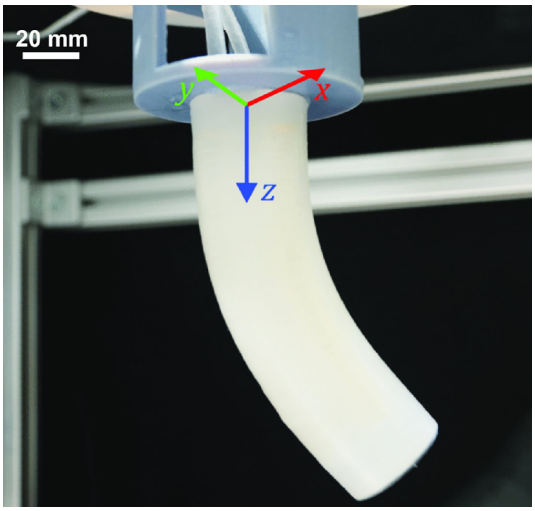


Bild 5. 3-Kammern-Biegeaktor: links: Geometrie und Querschnitt [17], rechts: Im Versuchsstand [18]. *Foto: [17, 18]*

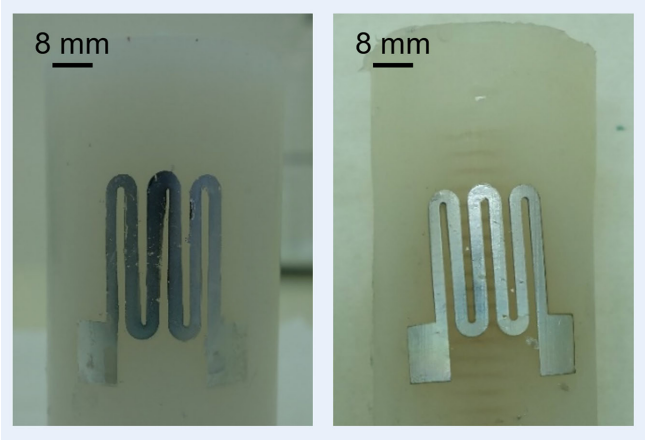
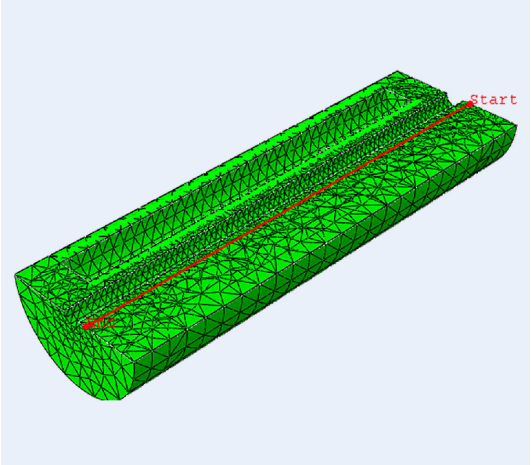


Bild 6. Biphasischer AuGa-Sensor transferiert auf Aktor-Oberflächen; links: Aktor aus „DragonSkin", rechts: Aktor aus „Ecoflex". *Foto: IMPT*

4.1 FEM-Simulation des Aktors zur Ermittlung der Hauptdehnungen

Bild 7 zeigt die Simulationsergebnisse in Abaqus/CAE. Eine Analyse der Hauptdehnungen zeigt maximale Dehnungen von über 20 % bei 80 kPa Aktuierungsdruck in zwei der drei Kammern. Die Anwendung von Dünnschichtsensoren, die wie in [12, 20] abgeschieden werden oder wie in Kapitel 3.2 auf eine Oberfläche aufgebracht werden, ist daher nicht möglich. Innerhalb der Aktorgeometrie existieren dagegen Bereiche mit homogenen und geringeren Dehnungen, welche in den Messbereich des Sensors fallen. Um mögliche Sensorpositionen innerhalb des Aktors zu ermitteln, wurden daher die Hauptdehnungen entlang verschiedener Pfade im Aktor ermittelt. Bild 7 rechts zeigt einen solchen Pfad im FEM-Modell. Die Pfade liegen zwischen den beiden aktuierten Kammern und bieten damit den größtmöglichen Platz für die Positionierung der Sensoren. Der Radius des Aktor-Querschnitts beträgt 20 mm und die Pfade wurden in 5 mm Abständen parallel zur Z-Achse definiert. Der vierte Pfad liegt damit bei 20 mm und damit auf der Außenseite des Aktors – dem Bereich größter Dehnung.



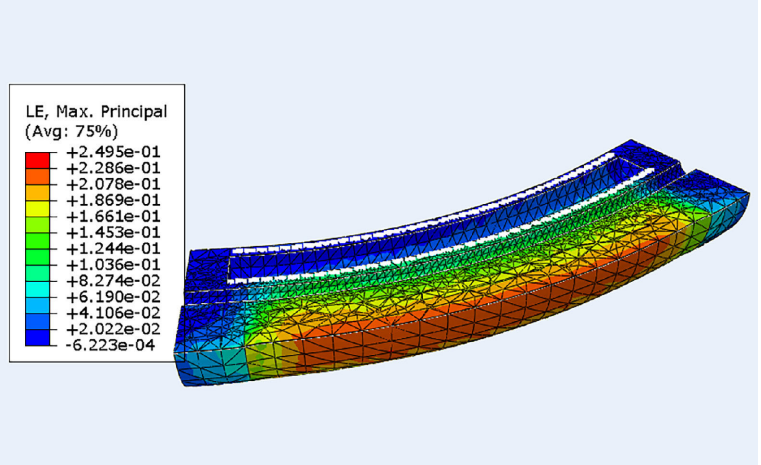


Bild 7. Links: Deformierter Aktor in der FEM-Simulation; rechts: Linienpfad entlang des nicht-deformierten FEM-Modells zur Ermittlung der Dehnung. Der Pfad liegt auf einem Radius von 5 mm und damit innerhalb des Aktormaterials. *Grafik: match*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

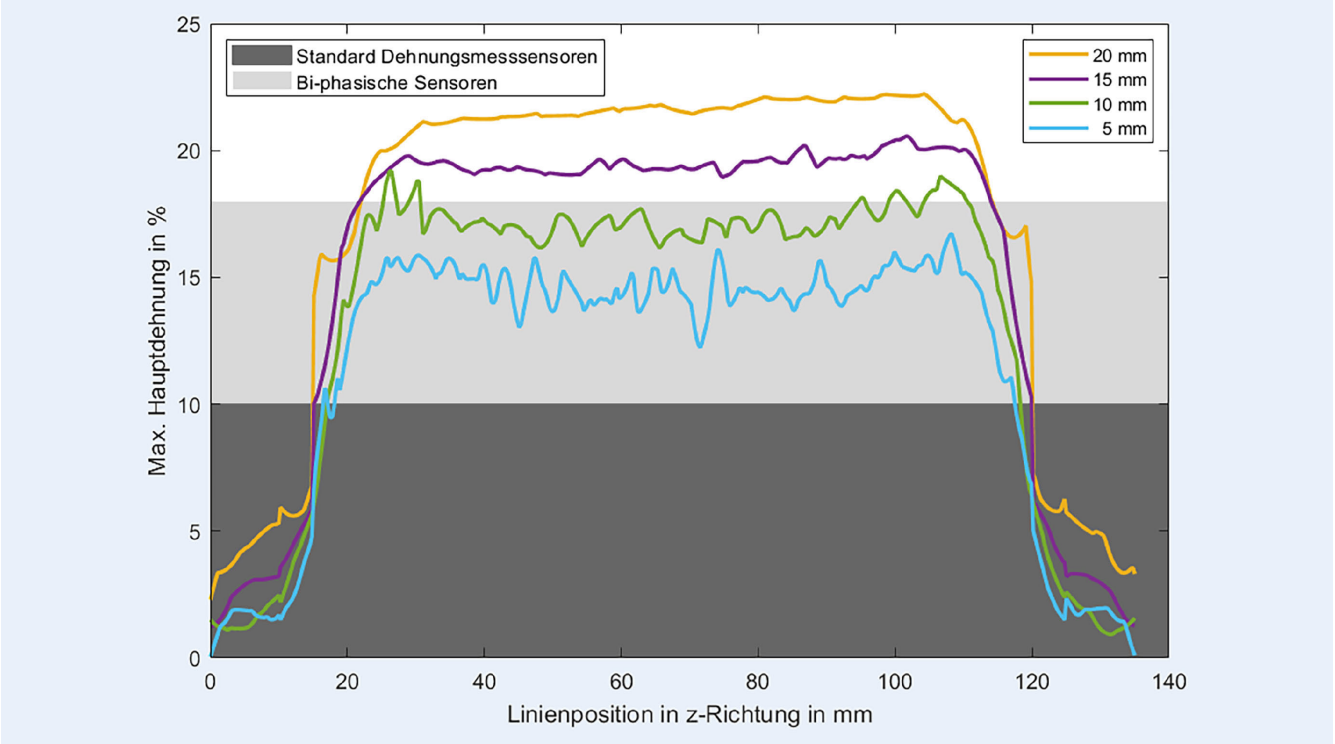


Bild 8. Die Hauptdehnung entlang der Linienpfade im Vergleich zu den Messbereichen der herkömmlichen und biphasischen Dehnungsmesssensoren. *Grafik: match*

Bild 8 zeigt die ermittelte Dehnung entlang der Pfade. Die Dehnung an den beiden Enden des Aktors ist gering, wohingegen im Bereich der Aktuierungskammern hohe, fast homogene Hauptdehnungen auftreten. Erwartungsgemäß zeigen Pfade, die weiter außen liegen, höhere Dehnungen als Pfade im Inneren. In hellgrau dargestellt ist der Dehnungsbereich, der mit dem Messbereich des hier vorgestellten biphasischen Dehnungsmesssensors übereinstimmt. Dehnungen über den Bereich von 17 % würden zur Zerstörung des Sensors führen, wohingegen Dehnungen unter 10 % (in dunkelgrau dargestelltem Bereich) auch durch bereits existierende Sensoren aufgenommen werden können. Mit der durchgeführten Simulation zeigt sich somit, dass eine Positionierung der Sensoren zwischen 5 mm bis 10 mm im Aktormaterial optimal zur Messung der Verformung des Aktors mittels biphasischer Dehnungsmesssensoren ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Messung der Verformung softer Aktoren wurden biphasische Dehnungsmesssensoren entwickelt und deren substratlose Applikation auf in der Soft Robotics verwendete Materialien untersucht. Vor und nach der Applikation zeigt der elektrische Widerstand der Sensoren keine Änderung und bestätigt somit deren erfolgreiche Transferierung. Eine weitere Charakterisierung der Sensoren erfolgte durch eine Zugprüfung, die eine Funktionsfähigkeit der Sensoren bis zu Dehnungen von 17 % zeigt. Somit übertreffen die biphasischen Sensoren die maximale Dehnbarkeit konventioneller Dehnungsmesssensoren, die selbst speziell für hohe Dehnung hergestellt nur einen Messbereich von maximal 10 % Dehnung abbilden können. Als Anwendungsbeispiel wurde der häufig in der Soft Robotics verwendete 3-Kammern-Biegeaktor mittels FEM-Simulation analysiert. Die dabei ermittelten Dehnungen geben Aufschluss über eine geeignete Positionierung der Sensoren. Es zeigte sich, dass die hohen Dehnungen auf der Außenseite der Aktoren den Messbereich der Dehnungsmesssensoren übersteigen. Innerhalb des Aktors konnte dagegen ein Bereich identifiziert werden, welcher zur Messung der Aktorverformung mittels biphasischer Dehnungsmesssensoren genutzt werden kann.

Zukünftig soll daher ein Verfahren zur substratlosen Applizierung mittels wasserlöslichem Trägersubstrat entwickelt werden, welches die Positionierung der Sensoren auch innerhalb des Aktormaterials ermöglicht. Aufgrund des flexiblen Trägermaterials wären dann auch dreidimensionale Strukturen denkbar, welche komplexere Verformungszustände der Aktoren messbar machen würden. Durch die geringe Dicke der Sensoren haben diese keinen Einfluss auf die weiche Aktorstruktur. Zusammenfassend ergibt sich das große Potenzial der hier vorgestellten biphasischen Dehnungsmesssensoren für die Soft Robotics durch die relativ günstige Fertigung in Batch-Produktion, den großen Messbereich mit derzeit bis zu 17 % Dehnung und die einflussfreie Integration direkt in das weiche Aktormaterial.

Literatur

[1] Peters, J.; Licher, J.; Hensen, B.; Wacker, F.; Raatz, A: Soft Robotic Actuator Leveraging Switchable Strain-Limiting Structures for Tumor Biopsy and Ablation in MRI. IEEE 7th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), San Diego, CA, USA, 2024, pp. 983–989

[2] Liu, Y.; Hou, J.; Li, C.; Wang, X.: Intelligent Soft Robotic Grippers for Agricultural and Food Product Handling: A Brief Review with a Focus on Design and Control. Adv. Intell. Syst., 5: 2300233 (2023),. https://doi.org/10.1002/aisy.202300233

[3] Peters, J.; Anvari, B.; Licher, J.; Wiese, M.;Raatz, A.; Wurdemann, H. A.: Acceptance and Usability of a Soft Robotic, Haptic Feedback Seat for

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Autonomy Level Transitions in Highly Automated Vehicles. In: IEEE Transactions on Haptics, doi: 10.1109/TOH.2024.3392473
[4] Zhang, H.; Kumar, A.; Fuh, J. Y. H.; Wang, M. Y.: Design and development of a Topology-Optimized Three-Dimensional printed soft gripper. Soft robotics, 5 (2018) 5, 650–661. https://doi.org/10.1089/soro.2017.0058
[5] Singh, G.; Krishnan, G.: Designing Fiber-Reinforced soft actuators for planar curvilinear shape matching. Soft robotics, 7 (2020) 1, 109–121. https://doi.org/10.1089/soro.2018.0169
[6] Yang, Y.; Li, Y.; Chen, Y.: Principles and Methods for stiffness modulation in soft robot design and Development. Bio-Design and Manufacturing, 1 (2018 (1), 14–25. https://doi.org/10.1007/s42242–018–0001–6
[7] Hu, M.; Gao, Y.; Jiang, Y.; Zeng, H.; Zeng, S.; Zhu, M.; Xu, G.; Sun, L.: High-performance strain sensors based on bilayer carbon black/PDMS hybrids. Advanced Composites And Hybrid Materials/Advanced Composites And Hybrid Materials, 4 (2021) 3, 514–520. https://doi.org/10.1007/s42114–021–00226-z
[8] Pyo, S.; Eun, Y.; Sim, J.; Kim, K.; Choi, J.: Carbon nanotube-graphene hybrids for soft electronics, sensors, and actuators. Micro And Nano Systems Letters, 10 (2022) 1. https://doi.org/10.1186/s40486–022–00151-w
[9] Lee, J.; Kim, S.; Lee, J.; Yang, D.; Park, B. C.; Ryu, S.; Park, I.: A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection. Nanoscale, 6 (2014) 20, 11932–11939.https://doi.org/10.1039/c4nr03295k
[10] Preller, T.; Runge, G.; Zellmer, S.; Menzel, D.; Saein, S. A.; Peters, J.; Raatz, A.; Tiersch, B.; Koetz, J.; Garnweitner, G.: Particle-reinforced and functionalized hydrogels for SpineMan, a soft robotics application. Journal of Materials Science, 54 (2018) 5, 4444–4456. https://doi.org/10.1007/s10853–018–3106–6
[11] Chun, S.; Choi, Y.; Park, W.: All-graphene strain sensor on soft substrate. Carbon, 116 (2017), 753–759.https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.058
[12] Cho, G.; Park, Y.: Soft gripper with EGAIN soft sensor for detecting grasp status. Applied Sciences, 11 (2021) 15, S. 6957. https://doi.org/10.3390/app11156957
[13] Hirsch, A., et.al.: Intrinsically Strechable Biphasic (Solid-Liquid) Thin Metal Films. Adv. Mater. 28 (2016) S. 4507–4512.
[14] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2024). Produktkatalog: Dehnungsmessstreifen – Erste Wahl für Dehnungsmessungen.
[15] Dickey, M. D.: Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals. Adv. Mater. (29), 27 (2017)
[16] Wu, Y.-H., et.al.: A Novel Strategy for Preparing Stretchable and Reliable Biphasic Liquid Metal. Adv. Funct. Mater. 29 (2019) S. 1–8
[17] Li, J., et.al.: Recent Progress in Flexible Pressure Sensor Arrays: From Design to Applications. Journal of Materials Chemistry C, 6 (2018) 44, 11878–92
[18] Wiese, M.; Cao, B.; Raatz, A.: Towards accurate modeling of modular soft pneumatic robots: from volume FEM to Cosserat rod. 2022 IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots And Systems (IROS). https://doi.org/10.1109/iros47612.2022.9981628
[19] Wiese, M.; Runge-Borchert, G.; Cao, B.; Raatz, A.: Transfer learning for accurate modeling and control of soft actuators. 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). https://doi.org/10.1109/robosoft51838.2021.94793000
[20] Runge, G.; Peters, J.; Raatz, A.: Design optimization of soft pneumatic actuators using genetic algorithms. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). https://doi.org/10.1109/robio.2017.8324449
[21] Dejace, L.; Laubeuf, N.; Furfaro, I.; Lacour, S. P.: Gallium-Based Thin Films for Wearable Human Motion Sensors. Advanced Intelligent Systems, 1 (2019) 5. https://doi.org/10.1002/aisy.201900079

Eileen Müller, M.Sc.
mueller@impt.uni-hannover.de
Tel. 0511 / 76212289
Foto: IMPT/Petring

Prof. Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz
Institut für Mikroproduktionstechnik

Benjamin-Hieu Cao, M.Sc.

Jan Peters, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz
Institut für Montagetechnik und Industrierobotik

Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.impt.uni-hannover.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-31 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY