

Simon Stier

Multimodale und integrierte Elastomersensorik

Zusammenfassung: Dielektrische Elastomersensoren basieren auf alternierenden und strukturierten Schichten aus leitfähigen und isolierenden Elastomeren, die zusammen als Multi-Elektroden-Kondensator wirken. Die reversible Verformung eines solchen weichen dielektrischen Foliensystems durch externe mechanische Kräfte ist daher durch die Änderung der Kapazität einer oder mehrerer Elektroden messbar.

Auf diesem Wege sind beispielsweise Dehnungs-, Druck- und Kraftsensoren realisierbar, bzw. durch oberflächliche Elektroden auch kapazitive Näherungssensorik. Im Gegensatz zu konventionellen, auf metallischen oder halbmetallischen Strukturen basierenden Sensoren sind Elastomersensoren im hohen Maße flexibel und dehnbar, können beliebige Oberflächengeometrien einnehmen und sind auf Grund ihres einheitlichen Aufbaus hervorragend miteinander kombinierbar.

Am Center Smart Materials des Fraunhofer ISC werden insbesondere Sensorsysteme entwickelt, die durch eine solche Kombination mehrere physikalische Größen gleichzeitig (multimodal) und orts aufgelöst erfassen können. Dies kann beispielsweise die orts aufgelöste Kombination aus einem Näherungssensor und einem Drucksensor sein, die gleichzeitig sowohl berührunglose als auch taktile Wahrnehmung erlaubt. Neben der Entwicklung von Materialsystemen und Fertigungsverfahren ist hierbei auch die Anbindung und Integration der Messelektronik ein wesentlicher Aspekt.

Die Anwendungsfelder multimodaler und integrierter Elastomersensorik sind ebenso breit wie ihr Gestaltungsspielraum und reichen von Sicherheitsfunktionen für Roboter über Bedienelemente im Automobil bis hin zu Messsystemen in der Medizin.

Schlüsselwörter: Multimodal Elastomer Sensor kapazitiv flexibel elastisch smart Material Silicon Automotiv Robotik Medizin

1 Einleitung

Elastomersensoren sind teilweise oder ganz aus einem Elastomer bestehende Systeme, die die Verformung durch eine externe mechanische Einwirkung auf eine einfacher messbare Ausgangsgröße umformen. In den meisten Fällen handelt es sich bei der Ausgangsgröße um elektrische Kapazität (dielektrische Sensoren) oder elektrischen Widerstand (resistive Sensoren). Im Allgemeinen weisen dielektrische Sensoren gegenüber resistiven eine höhere Sensitivität, bessere Temperaturstabilität, geringeren Energieverbrauch und ein breiteres Anwendungsspektrum auf [1, 2], weshalb sich die folgenden Erläuterungen auf dielektrische Sensoren beschränken. Die Auswahl des konkreten Elastomers basiert dabei nicht nur auf seinen mechanischen Eigenschaften, sondern auch auf dessen Verarbeitbarkeit und Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen. Silicone zeichnen sich hierbei u.a. durch weitreichende Modifizierbarkeit und gute Verarbeitbarkeit sowie hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen aus [3], weshalb sie in den folgenden Ausführungen als Material bevorzugt werden. Je nach Anforderungen kommen jedoch auch weitere Vertreter wie z.B. thermoplastische Polyurethane oder Naturkautschuk in Frage.

Im Folgenden soll daher ein grundlegender Überblick über die Konzepte, Materialien und Anwendungsmöglichkeiten dielektrischer Elastomersensoren auf Siliconbasis gegeben werden.

2 Aufbau und Funktionsweise

2.1 Grundprinzip

Ein dielektrischer Sensor besteht zumindest aus einer Elektrode, deren Kapazität in Bezug auf mindesten eine weitere Elektrode gemessen wird. Diese muss nicht zwingend Teil des eigentlichen Sensors sein. Vereinfacht entspricht diese Anordnung einem Plattenkondensator aus zwei parallelen Elektroden mit Fläche A und Abstand d . Die Kapazität eines solchen Aufbaus mit einem dazwischen liegenden Dielektrikum mit relativer Permittivität ϵ_r ist durch Gleichung (1) mit ϵ_0 als Permittivität des Vakuums gegeben.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

Für einen kapazitiven Sensor folgt hieraus, dass die zu messende Eingangsgröße mindestens eine der Größen ϵ_r , A oder d beeinflussen muss.

2.2 Monomodale Sensoren

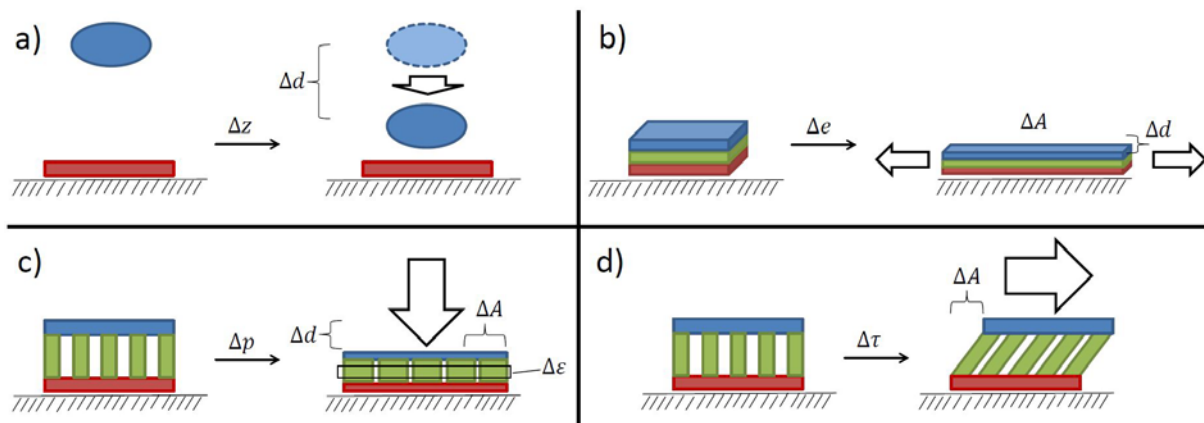


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines dielektrischen Näherungs- (a), Dehnungs- (b), Druck- (c) und Schersensors (d) mit Änderung der kapazitätsbezogenen Größen Fläche ΔA , Permittivität $\Delta \epsilon$ und Elektrodenabstand Δd sowie der Eingangsgrößen Objektstand Δz , Dehnung Δe , Druck Δp und Scherung $\Delta \tau$

Zur Erfassung eines sich nähernden Objekts genügt bereits die Verwendung einer einzelnen Elektrode, da die entsprechende Gegenelektrode von der Umgebung gebildet wird (vgl. Abb. 1a). Stark vereinfacht verursacht eine Änderung der Entfernung des Objekts je nach elektrischen Eigenschaften eine Veränderung der Permittivität des von der Elektrode erfassten Volumens (nichtleitfähige Materialien mit $\epsilon_r > 1$) oder eine Verringerung des effektiven Elektrodenabstands (leitfähiges und geerdetes Material).

Ein Dehnungssensor besteht hingegen aus zwei Elektroden mit einem dazwischenliegenden inkompressiblen Dielektrikum (vgl. Abb. 1b). Dieses besteht in der Regel aus einer durchgängigen Elastomerschicht. Die Kapazität des damit gebildeten Plattenkondensators ist gemäß Gleichung (1) durch den Abstand und die Fläche der Elektroden sowie der Permittivität des dazwischen liegenden Dielektrikums definiert. Die Dehnung des Gesamtaufbaus verringert den Abstand der Elektroden bei Erhalt oder zusätzlicher Vergrößerung der Elektrodenfläche und erhöht damit die Kapazität. Im Gegensatz zum Dehnungssensor besteht ein dielektrischer Drucksensor aus zwei Elektroden mit einem kompressiblen Dielektrikum. Hierzu kann das Dielektrikum eine Porosität oder eine Hohlstruktur wie etwa ein Noppenprofil aufweisen. In letzterem Fall führt ein auf die Oberfläche des Sensors ausgeübter Druck zu einer Änderung aller für die Kapazität relevanten Größen (vgl. Abb. 1c). Zum einen vergrößert sich die Elektrodenfläche geringfügig bei gleichzeitiger deutlicher Verringerung des Abstandes. Zum anderen wird der Luftanteil des Volumens des Dielektrikums

durch Verdrängung verringert, was zur einer erhöhten Permittivität führt. Dabei führt jede einzelne Änderung zu einer Erhöhung der Kapazität. Sie steigt also stetig mit dem Druck ungeachtet der Gewichtung der Größenänderungen untereinander. Die Empfindlichkeit des Aufbaus ist maßgeblich über die mechanischen Eigenschaften des Elastomers und die Strukturierung des Dielektrikums einstellbar. Spezielle Aufbauten des Dielektrikums können die Druckwirkung zusätzlich zum Teil in Dehnungswirkung umformen und damit die Empfindlichkeit nochmals deutlich steigern. [4, 5] Wird der zuvor beschriebene Drucksensor-Aufbau, statt in Richtung der Flächennormalen gestaucht, parallel zur Fläche gesichert, tritt ebenfalls eine Kapazitätsänderung auf. Diese beruht auf der Verringerung der Überlappungsfläche der beiden Elektroden. Es kann also von einer kleineren effektiven Elektrodenfläche gesprochen werden (s. Abb. 1d). Zur Erhöhung der Empfindlichkeit sollte das Dielektrikum derart strukturiert sein, dass eine Verformung parallel zur Ebene möglichst leichtgängig erfolgen kann.

2.3 Multimodale und orts aufgelöste Elastomersensoren

Wie im Abschnitt 2.2 dargelegt, können durch Anordnung von leitfähigen und isolierenden Elastomerschichten Näherung, Dehnung, Druck und Scherung kapazitiv erfasst werden. Durch den einheitlichen Aufbau der Konzepte sind sie grundsätzlich zu multimodalen Systemen kombinierbar, etwa durch eine Übereinanderlagerung der einzelnen sensorischen Schichten. Wichtig ist hierbei, dass keine Verfälschung der zu messenden Größe durch vorgelagerte Schichten erfolgt und die Abhängigkeiten der gemessenen Kapazitäten von den verschiedenen Eingangsgrößen auflösbar bleiben. Dies erfolgt sowohl durch Strukturierung der dielektrischen Schichten, um deren Verformung möglichst selektiv für eine Eingangsgröße zu machen, als auch durch gezielten Entwurf der Messschaltung zur Minimierung von Quereinflüssen.

Zur Ortsauflösung einer oder mehrere Modalitäten kann ein Elastomerfolienelement oder -volumenkörper in mehrere Abschnitte unterteilt werden, denen jeweils ein Messwert zuordbar ist. Im einfachsten Fall bestehen diese Abschnitte aus eigenständigen Sensorelementen die separat kontaktiert werden. Für eine hohe Ortsauflösung und damit hohe Anzahl an Sensorelementen wird der Aufwand zur Kontaktierung jedoch erheblich, weshalb z.B. Matrixanordnungen mit einer gegenüber Einzelsensoren reduzierten Anzahl an Elektroden in diesen Fällen eine effizientere Lösung darstellen.

Wie bei der Übereinanderlagerung von verschiedenen sensorischen Schichten gilt es auch bei Nebeneinanderlagerung gleich sensorischer Elemente ein mechanisches oder elektrisches Übersprechen der einzelnen Elemente zu verhindern.

3 Materialien

Für die im Abschnitt 2.2 beschriebenen Konzepte muss in jedem Fall die dielektrische Schicht elastische Eigenschaften aufweisen. Nur so ist eine reversible Rückstellung auch nach einer starken Verformung (je nach Sensor wenige Prozent bis einige hundert Prozent) möglich. Die Elektrodenschichten müssen bei Näherungs-, Druck- und Scherungssensoren für die eigentliche Messung nicht zwingen elastisch sein, solange die Verformung einheitlich auf der gesamten Fläche des Sensors stattfinden soll. Für eine lokale punktuelle Verformung sind elastische Eigenschaften der involvierten Elektroden hingegen erforderlich. Aus Applikationssicht bieten eine Flexibilität und Dehnbarkeit des Gesamtaufbaus den Vorteil, planar gefertigte Strukturen später auf zweidimensional gekrümmten Oberflächen (z.B. Halbkugel) oder nachgiebigen Substraten (z.B. Polster) installieren zu können.

3.1 Dielektrikum

Kernaufgabe der dielektrischen Schichten ist die Isolation der Elektroden sowie die Ermöglichung einer reversiblen Deformation. Die Charakteristik dieser Deformation und damit des gesamten Sensors ist dabei durch die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Elastomers definiert. Hierzu gehören das frequenz- und amplitudenabhängige Elastizitäts- und Schubmodul, sowie das abgeleitete Hysterese-, Dämpfungs- und Verzögerungsverhalten. Diese Eigenschaften sind maßgeblich von der genauen Ausgestaltung des Polymernetzwerks bestimmt, welches bei Siliconen bereits im Labormaßstab sehr gut kontrollierbar ist. Zu den Parametern gehören die Länge und die Funktionalisierung des Basispolymers, des Vernetzers und des Kettenlängenmodifizierers sowie der Eintrag von Additiven und mechanisch wirkenden Füllstoffen.

3.2 Elektroden

Während es ein breites Spektrum an flexiblen elektrisch leitfähigen Materialien gibt (Metallfolien, leitfähige Polymere), ist die Auswahl bei elastischen Materialien deutlich eingeschränkter. So sind intrinsisch leitfähige Polymere im Allgemeinen spröde und nicht dehnbar. Durch Beimengung von leitfähigen Partikeln können Elastomere jedoch extrinsisch leitfähig werden. Der Vorteil hierin liegt in der freien Auswahl der Elastomermatrix, während die elektrische Leitfähigkeit weitgehend unabhängig von den mechanischen Eigenschaften durch Partikelart und Füllgrad einstellbar ist.

Als leitfähige Füllstoffe werden vor allem verschiedene Kohlenstoffmodifikationen, insbesondere Ruß, metallisierte Glaspartikel sowie mikro- und nanometerskalige Metallpartikel eingesetzt. So erreichen Materialkomposite mit Ruß spezifische Leitfähigkeiten von bis zu $10^1 S/m$, mit versilberten Kupferflakes bis zu $10^4 S/m$ [6]. Die erreichbaren spezifischen Leitfähigkeiten verhalten sich dabei synchron zu den Kosten, bei Nanopartikeln kommen Herausforderungen in der Handhabung hinzu.

Hohe Leitfähigkeiten der Sensorelektroden sind aus messtechnischer Sicht jedoch vorteilhaft. So erlauben sie durch Verringerung der Signaldämpfung eine höhere Frequenz des kapazitiven Messsignals und damit in der Regel auch höhere Abtastraten. Ebenso wird durch die niederohmige Anbindung die Einkopplung von Störfeldern minimiert, womit das Messrauschen reduziert wird.

4 Anwendungsbeispiele

Die grundsätzlich flexiblen und dehnbaren Elastomersensoren ermöglichen in der Ausprägung als dielektrische Sensoren auf Siliconbasis eine weitreichende Anwendung auf nahezu beliebigen Oberflächen, in Temperaturbereichen von -50 bis 200 °C und unter harschne Umgebungsbedingungen (UV-Strahlung, Feuchtigkeit, korrosive Medien). So wurden bereits zahlreiche Anwendungen wie etwa Sensorhandschuhe [7], Sitzsensoren [9] oder Eingabeinstrumente [11] realisiert.

Ein weiteres Anwendungsfeld multimodaler Elastomersensorik ist die Robotik. Hier ist es im Allgemeinen Ziel durch eine großflächige Sensorhaut die Interaktion mit Objekten (v.a. Greifen) und Menschen (v.a. Kollisionserkennung) zu ermöglichen. Besonderes Potential hat dabei die Kombination von ortsaufgelöster Näherungs- und Drucksensorik. Diese kann sowohl eine ungewünschte Kollision vorzeitig erkennen und verhindern als auch einen gewünschten Kontakt quantifizieren. Zusätzlich ermöglicht der Aufbau die Erkennung von kontaktlosen Gesten im Luftvolumen über dem Sensor als auch die Erkennung von taktilen Gesten auf der Sensoroberfläche. Folglich vereint der Sensor gleichzeitig Sicherheits- und Bedienfunktionalitäten in einem Aufbau.

In Abb. 2 (links) ist ein solcher kombinierter Druck- und Näherungssensor mit vier Einzelfeldern gezeigt. Jedes Einzelfeld kann sowohl Näherung als auch Druck erfassen. Der Sensor ist exemplarisch auf einem schwarzen zylindrischen Testkörper appliziert um die übliche Geometrie eines Roboterarms nachzuempfinden. Zur Charakterisierung des Gesamtsystems wurde ein geerdeter Prüfstab über eine Kraftmesseinheit an einem Roboterarm montiert und mit diesem sowohl das Volumen über dem Sensor (Näherungsmessung) als auch die Oberfläche des Sensors (Druckmessung) abgetastet. Mit den Ergebnissen kann unter anderem der maximale Detektionsabstand z zwischen Probekörper und Sensoroberfläche (s. Abb. 2 Mitte) oder die minimal detektierbare Kontaktkraft F (s. Abb. 2 rechts) in Abhängigkeit von der Position x, y relativ zur Sensormitte definiert werden.

Der maximale Detektionsabstand des Gesamtsensors zeigt dabei ein Maximum von 5 cm mit radial zum Sensorrand abfallenden Verlauf. Die minimal detektierbare Kontaktkraft des Gesamtsensors beträgt innerhalb der Einzelelemente ca. 0,6 N, in den Totbereichen zwischen den Elementen und an den Randbereichen maximal 1,2 N.

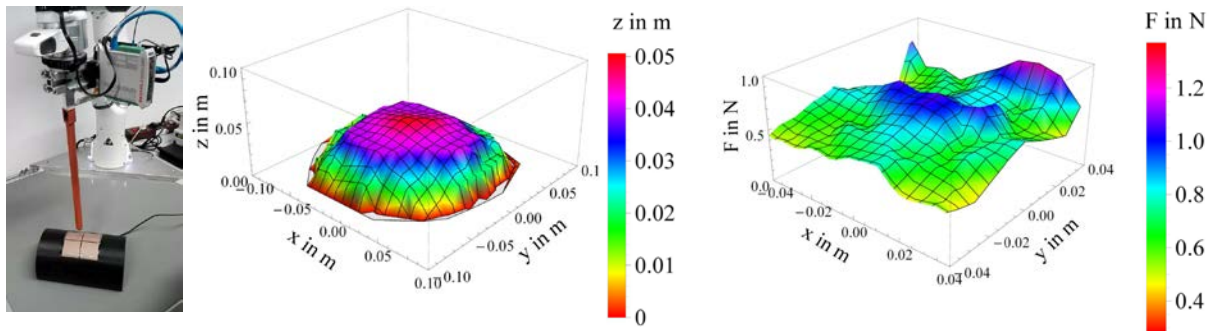


Abbildung 2: Kombierter Druck- und Näherungssensor mit vier Einzelfeldern während der roboter-gestützten Charakterisierung mittels geerdetem Prüfkörper (links). Abhängigkeit des detektierbaren maximalen Abstandes (z) zwischen Probekörper und Sensoroberfläche von der Position (x, y) relativ zur Sensormitte (Mitte). Minimal detektierbare durch den Probekörper ausgeübte Kraft (F) in Abhängigkeit von der Position (x, y) relativ zur Sensormitte (rechts).

Weiterhin kann mit der robotergestützten Charakterisierung eine Beurteilung der modalen und räumlichen Separierbarkeit der einzelnen Sensorelemente erfolgen. In Abb. 3 sind dazu die Charakteristiken einzelner Sensorelemente dargestellt. Abb. 3 (links) zeigt den Verlauf der gemessenen Kapazität eines Druck- und Näherungssensorelements bei Verringerung des Abstandes z zum Prüfkörper. Für $z > 0$ mm zeigt die Kapazität des Näherungssensors einen Anstieg mit kleiner werdendem Abstand, die Kapazität des Drucksensors bleibt hingegen unverändert bei Null. Erst bei Kontakt ($z = 0$ mm) und beginnendem Eindringen der Sensoroberfläche bei $z < 0$ mm steigt auch diese mit zunehmender ausgeübter Kraft an. Der Näherungssensor ist hier nur scheinbar auch zur Druckmessung geeignet, da z. B. bereits ein nicht geerdeter Prüfkörper deutlich abweichende Messwerte verursacht. Zudem kann der Übergang zwischen Annäherung und Eindringen nicht eindeutig aus dem Verlauf der Näherungsmessdaten bestimmt werden. Der Drucksensor spricht hingegen nur auf das Eindringen des Sensors an und zeigt deutlich den tatsächlichen Kontakt zwischen Sensor und Prüfkörper an. Somit ist es möglich, beide Modalitäten eindeutig voneinander zu unterscheiden.

In Abb. 3 (Mitte) ist der Erfassungsbereich eines einzelnen Näherungssensorelements dargestellt. Dieser überlappt auf Grund der Aufweitung des elektrischen Feldes im Luftvolumen zwar deutlich mit den benachbarten Sensorelementen, ist jedoch eindeutig über dem zugeordneten Sensorelement lokalisiert. Der Erfassungsbereich eines Drucksensorelements ist durch die Beschränkung des elektrischen Feldes auf das Volumen zwischen den Elektroden deutlich schärfer abgegrenzt (s. Abb. 3 rechts). Zudem findet durch die Elastizität des Aufbaus kein wesentliches mechanisches Übersprechen statt. Insgesamt ist damit auch die räumliche Separierbarkeit der Messung gegeben.

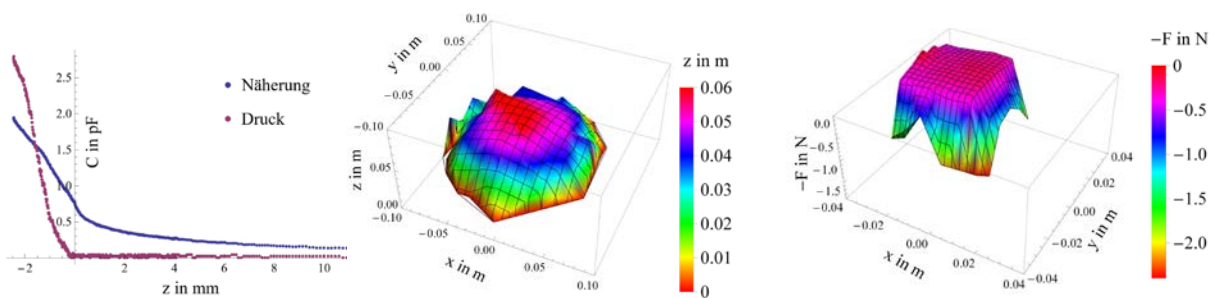


Abbildung 3: Verlauf der gemessenen Kapazität eines Druck- und Näherungssensorelements bei Verringerung des Abstandes (z) zum Prüfkörper, mit Kontakt bei $z = 0$ und Eindringen der Sensoroberfläche bei $z < 0$ (links). Erfassungsbereich (maximal detektierbarer Abstand (z) zum Probekörper mit Position (x, y) relativ zur Sensormitte) eines einzelnen Näherungssensorelements (Mitte). Erfassungsbereich (minimal detektierbare Kraft (F) mit Position (x, y) relativ zur Sensormitte) eines einzelnen Kraftsensorelements (rechts), wobei die Kraftachse zur besseren Darstellung invertiert ist. Für Bereiche ohne Wertzuordnung ergibt sich unabhängig von der ausgeübten Kraft keine signifikante Auswirkung auf das Messsignal des ausgewählten Elements.

Der beschriebene Aufbau und die genannten Kennwerte sind dabei nur exemplarisch zu sehen. Auflösungen und Messbereiche könne gezielt an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Zudem sind die Anzahl und Größe der Elemente in weiten Bereichen variierbar.

5 Herausforderungen in der Anwendung

Für die konkrete Anwendung von Elastomersensoren ist es nicht nur erforderlich, die sensorischen Eigenschaften gezielt anzupassen, sondern auch die Integrierbarkeit in übergeordnete Gesamtsysteme sicher zu stellen. Hierzu gehören u.a. Fragestellungen zur mechanischen Fügung, elektrischen Kontaktierung sowie visuellen und haptischen Einbindung.

5.1 Mechanische Integration

Die Verarbeitung des Elastomers im flüssigen Zustand erlaubt in vielen Fällen eine formschlüssige Verbindung mit porösen Oberflächen, z.B. durch Hinterspritzen des Substrates. Dazu gehören insbesondere Textilien, jedoch auch beispielsweise mit Bohrungen versehene Leiterplatten. Für Silicone eignen sich durch das wenig ausgeprägte Kriechverhalten zudem Klemm- oder Quetschverbindungen, beispielsweise durch Einspannen zwischen zwei parallelen Oberflächen oder durch radiale Einschnürung.

Zur Verklebung mit anderen Werkstoffen sind bei Siliconen in der Regel zusätzliche Arbeitsschritte notwendig. Üblich ist die Oberflächenfunktionalisierung von Metallen und Kunststoffen durch Haftvermittler [8] (sog. Silanisierung), die anschließend eine kovalente Bindung zum Siliconnetzwerk ausbilden können. Alternativ kann die Oberfläche einer oder beider Komponenten durch eine Plasmabehandlung aktiviert werden [10].

5.2 Elektrische Integration

Die zuvor genannten Verfahren zur mechanischen Integration kommen grundsätzlich auch zur elektrischen Kontaktierung in Frage. Insbesondere geeignet ist das Klemmen mit metallischen Hülsen und Verkleben mit leitfähigen Klebstoffen. Für eine Vielzahl dicht aneinander liegender Kontakte sind solche Verfahren jedoch sehr aufwändig und fehleranfällig. Bevorzugt und gleichzeitig kompatibel zur konventionellen Elektronikfertigung ist daher die Lötverbindung. Leitfähige Elastomere sind an sich nicht für Lötverbindungen geeignet, selbst wenn sie hoch gefüllt mit metallischen Partikeln sind. Derartige gefüllte Elastomere können jedoch nachträglich metallisiert werden, insbesondere mit kostengünstigen galvanischen Abscheidungsverfahren. Die festanhaftende Metallschicht ist anschließend für konventionelle Lötverfahren wie etwa im Reflow-Prozess geeignet (vgl. Abb. 4 links).

5.3 Visuelle und Haptische Integration

Silicone weisen grundsätzlich eine hohe Oberflächenhaftung auf und sind von glänzendem Aussehen. Beide Eigenschaften sind für haptische und sichtbare Bedien- oder Messelemente in der Regel nicht erwünscht. Zur Veränderung der Oberflächeneigenschaften stehen jedoch eine Vielzahl von Modifikationsmöglichkeiten zur Verfügung. So kann die Deckschicht des Aufbaus bereits bei der Herstellung durch Abguss entsprechender Vorlagen oder durch nachträgliche laserbasierte Strukturierung im Mikrometermaßstab angepasst werden. Die damit

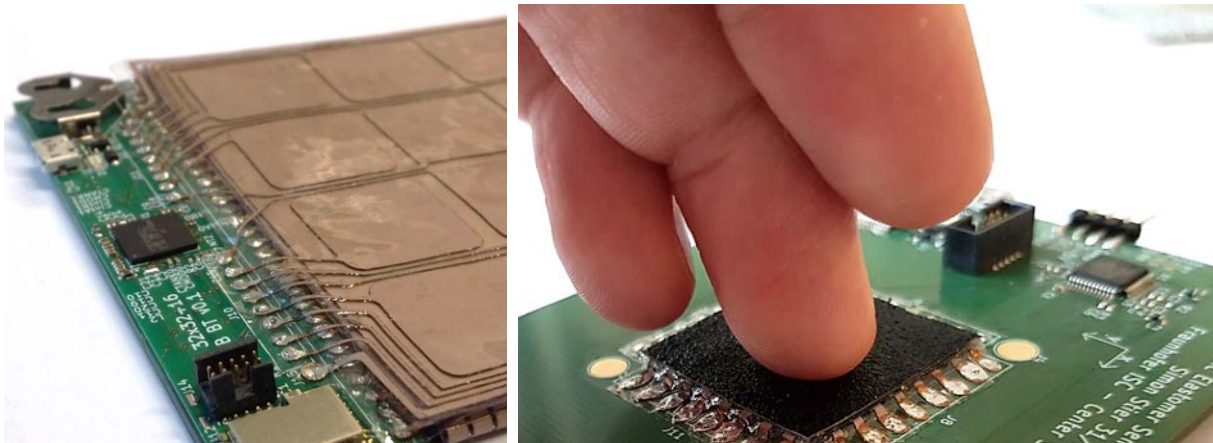


Abbildung 4: Seitliche Anbindung eines ortsaufgelösten Näherungs- und Drucksensors an eine Messplatine (links) und oberflächliche Montage eines ortsaufgelösten Drucksensors mit strukturierter und gefärbter Oberfläche auf einer Messplatine (rechts)

einhergehende Erhöhung der Oberflächenrauigkeit verringert die Haft- und Reflexionsfähigkeit. Ähnliche Effekte lassen sich auch durch die Einarbeitung von Partikeln in die Deckschicht erreichen, mit diesen kann zudem die Farbgebung gezielt beeinflusst werden (vgl. Abb. 4 rechts). Weiterhin ist es möglich die Sensoroberfläche mit einem dünnen, elastischen Textil zu bespannen, dies ist insbesondere für die Ausstattung von Möbeln und Polstern relevant.

6 Fazit

Dielektrische Elastomersensoren sind eine Antwort auf aufkommende neue Anforderungen an Mess- und Detektionsprozesse, die nicht punktuell auf starren Strukturen, sondern großflächig auf nachgiebigen Oberflächen oder in weichen Volumen angewendet werden. Die Umsetzung dielektrischer Elastomersensoren als flexible und dehnbare Folienelemente erlaubt eine Verschiebung der Sensorik direkt hin zur involvierten Oberfläche. Variationen in der Elektroden- und Dielektrikumsgeometrie ermöglichen wie in Abschnitt 2 beschrieben die Erfassung von unterschiedlichen Wechselwirkungen. Insbesondere mit Silicon als Basismaterial lassen sich die mechanischen und elektrische Eigenschaften in weiten Bereichen zielgerichtet anpassen. In Abschnitt 4 wurde exemplarisch eine konkrete Anwendung und Auswertung eines multimodalen und orts aufgelösten Elastomersensors gezeigt. Dennoch stellt die mechanische und elektrische Integration weicher Sensoren grundsätzlich eine Herausforderung dar. Welche Möglichkeiten zur Anbindung an etablierte Fertigungsmethoden möglich sind, wurde in Abschnitt 5 dargelegt, insbesondere die Möglichkeit der Metallisierung und Verarbeitung im Lötverfahren. Damit stehen Elastomersensoren an der Schwelle zu einer breiten industriellen Anwendung, nicht nur als Alternative zu bestehenden Technologien, sondern insbesondere als Wegbereiter für völlig neue Konzepte.

Literaturverzeichnis

- [1] DAHIYA, R.S., et al.: Tactile Sensing—From Humans to Humanoids. *IEEE Transactions on Robotics*, Band 26 (2010) Heft 1, S. 1–20.
- [2] MARTINEZ-HERNANDEZ, U.: Tactile Sensors. In: Prescott, T.; Ahissar, E.; Izhikevich, E. (Hrsg.): *Scholarpedia of Touch*. Paris: Atlantis Press, 2016, S. 783–796.
- [3] SHIT, S.C.; SHAH, P.: A Review on Silicone Rubber. *National Academy Science Letters*, Band 36 (2013) Heft 4, S. 355–365.
- [4] BÖSE, H.; FUB, E.; LUX, P.: *Influence of design and material properties on the performance of dielectric elastomer compression sensors*. San Diego, California, United States, Sunday 8 March 2015.
- [5] BÖSE, H.; FUB, E.: *Novel dielectric elastomer sensors for compression load detection*. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring San Diego, California, USA, Sunday 9 March 2014.
- [6] BÖSE, H.; UHL, D.: *Dielectric elastomers with novel highly-conducting electrodes*. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring San Diego, California, USA, Sunday 10 March 2013.
- [7] BÖSE, H.; THUY, M.; STIER, S.: *Wearable operation device with different types of dielectric elastomer sensors*. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XX Denver, United States, 4/3/2018 - 8/3/2018.
- [8] MCMORDIE, R.; KING, G.E.: Evaluation of primers used for bonding silicone to denture base material. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Band 61 (1989) Heft 5, S. 636–639.
- [9] BÖSE, H.; OCAK, D.; EHRLICH, J.: *Applications of pressure-sensitive dielectric elastomer sensors*. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring Las Vegas, Nevada, United States, Sunday 20 March 2016.
- [10] SUNKARA, V., et al.: Simple room temperature bonding of thermoplastics and poly(dimethylsiloxane). *Lab on a chip*, Band 11 (2011) Heft 5, S. 962–965.
- [11] HOLGER BÖSE, DENIZ OCAK, STEPHAN WIRTHMANN, JOHANNES EHRLICH: Kapazitive Elastomersensoren zur Detektion von Fingerdrücken. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany (2016).