

## Titel

# Dielektrische Elastomersensoren zur Funktionsintegration mit industrieller Herstelltechnologie

## DELIGHT

IGF-Nr.: 01IF22691N

---

### Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF)  
Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt



Ansprechpartner beim LBF: Thorsten Koch  
+49 6151 705-391  
thorsten.koch@lbf.fraunhofer.de

### Danksagungen

Das IGF-Projekt „Dielektrische Elastomersensoren zur Funktionsintegration mit industrieller Herstelltechnologie“ (01IF22691N) wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

## **Ausgangssituation**

Im Kontext der Industrie 4.0 wächst die Nachfrage nach innovativen Sensortechnologien. In der heutigen digitalen Produktionsumgebung wird eine hohe Integrationsdichte von Sensoren in Maschinen und Anlagen gefordert, um Prozesse effizient überwachen und optimieren zu können. Die konventionellen Sensoren, die häufig in der Industrie verwendet werden, sind jedoch oftmals kostspielig und geräumig, was ihre Integration in bestehende Systeme erschwert.

Die Verwendung von dielektrischen Elastomeren (DE) bietet einen vielversprechenden Ansatz zur Überwindung dieser Herausforderungen, da sie sowohl als Aktoren als auch als Sensoren fungieren können. Die DELTA-C®-Technologie, die am Fraunhofer LBF entwickelt wurde, ermöglicht die Herstellung besonders dünner Kraftsensoren, die in der Lage sind, statische und dynamische Lasten in Dickenrichtung zu erfassen [1, 2]. Diese Sensoren zeichnen sich durch ihre ökologischen und ökonomischen Vorteile aus, da sie ausschließlich aus Elastomer und Metall bestehen, ohne den Einsatz kritischer Materialien.

Trotz der vielversprechenden Eigenschaften der DE-Sensoren stehen insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) vor Hemmnissen bei der Implementierung dieser Technologie. Aktuell fehlt es an einer industriell skalierbaren Herstellungstechnologie, die die exakten Spezifikationen und Anforderungen für den praktischen Einsatz der Sensoren definiert. Der manuelle Aufbau im Labor ist nicht für die Massenproduktion geeignet, was die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Sensoren beeinträchtigen.

Das Projekt zielt darauf ab, diese Herausforderungen zu adressieren, indem es eine automatisierte Herstellmethode entwickelt und die Integration von DE-Sensoren in Elastomerbauteile ermöglicht. Durch die Kombination bestehender Fertigungstechnologien mit innovativen Ansätzen soll eine skalierbare Lösung geschaffen werden, die sowohl den Anforderungen des Marktes gerecht wird als auch KMU den Zugang zu dieser Technologie erleichtert.

---

## **Forschungsziel**

Das Forschungsvorhaben verfolgt das übergeordnete Ziel, die Funktionalität und die Integration von DE-Sensoren in spezifischen Demonstrationsszenarien zu optimieren. Durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Unterstützerkreis, werden relevante Szenarien und deren quantitative Anforderungen identifiziert, um sicherzustellen, dass die entwickelten Lösungen praxisrelevant sind.

Ein zentrales Element ist die Etablierung eines industriell nutzbaren Herstellungsprozesses für DE-Sensorelemente. Dies beinhaltet eine Umrüstung einer bestehenden Fertigungsanlage [3], Automatisierung von Produktionsschritten sowie die Abstimmung von Materialien, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Darüber hinaus wird ein vertieftes Verständnis der Design- und der Prozessparameter angestrebt. Durch systematische Variationen dieser Parameter sollen die Korrelationen zu den Sensoreigenschaften charakterisiert werden, um gezielte Anpassungen und die Herstellung definierter Sensorelemente zu ermöglichen.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung einer Methodik zur präzisen Auslegung von DE-Sensorelementen, die es erlaubt, die notwendigen Design- und Prozessparameter basierend auf den spezifischen Anforderungen an die Sensoreigenschaften zu bestimmen. Die Kombination von numerischen Modellen mit empirischen Auslegungsmethoden ermöglicht eine fundierte Herangehensweise zur Optimierung der Sensorik.

Abschließend wird der Nachweis der Funktionalität der integrierten DE-Sensoren in den identifizierten Demonstrationsszenarien angestrebt. Hierzu wurden anwendungsspezifische Sensoren als Demonstratoren entwickelt und in verschiedenen Test-szenarien bewertet. Insgesamt zielt dieses Forschungsvorhaben darauf ab, die DE-Sensorik durch systematische Forschung und praxisnahe Lösungen zu optimieren, um deren Potenzial in industriellen Anwendungen voll auszuschöpfen.

---

## **Vorgehensweise und Forschungsergebnisse**

### **Aufbau und Funktionsweise von DE-Sensoren**

Wird eine dünne Elastomerschicht beidseitig mit elektrisch leitfähigen und elastischen Schichten versehen, können dem Material sensorische Eigenschaften aufgeprägt werden [4]. Der entstehende Schichtverbund, aus Elastomer und Elektroden, bildet einen flexiblen Plattenkondensator. Da dessen Kapazität sich bei Deformation durch mechanische Lasten in Dickenrichtung verändert, kann dieser als Kraftsensor verwendet werden. Wegen der Inkompressibilität des Elastomers geht die Dickenreduktion mit einer Flächenvergrößerung einher. Daher müssen die Elektrodenschichten nicht nur elektrisch gut leitfähig, sondern auch mechanisch äußerst dehnbar sein, um die Verformung des Elastomers nicht zu behindern. Die Realisierung einer geeigneten Elektroddierung stellt aufgrund dieses Zielkonflikts eine technische Herausforderung dar [5].

Am Fraunhofer LBF wurde mit DELTA-C® ein Konzept für dielektrische Elastomersensoren (DE-Sensoren) entwickelt, das auf metallischen und damit sehr gut leitfähigen Elektroden basiert [3]. Dabei handelt es sich um dehnstarre, strukturierte Elektroden, welche mindestens einseitig perforiert sind und somit dem Elastomer eine lokale Deformation ermöglichen, sodass eine makroskopische Kompressibilität des

Schichtverbundes erzeugt wird (s. Abbildung 1). Somit folgt trotz inkompressiblem Elastomermaterial eine einaxiale Verformung mit konstanter Fläche, was die Anbindung an bestehende Strukturen erleichtert. Daher können metallische Elektroden verwendet werden, deren hohe Leitfähigkeit für geringe elektrische Verluste sorgt und den nutzbaren Frequenzbereich erweitert, da der Elektrodenwiderstand gemeinsam mit der Sensorkapazität ein Tiefpassverhalten bewirkt.



Abb. 1: Funktionsweise dielektrischer Elastomersensoren (mit DELTA-C-Technologie)

## Identifizierung von Demonstrationsszenarien und Anforderungen

Zur Auswahl von geeigneten Demonstrationsszenarien und Ableitung der spezifischen Anforderungen an die DE-Sensoren, wurde eine Bewertungsmethodik erarbeitet und auf die Vorschläge aus dem Unterstützerkreis angewendet. Die Methodik basiert auf einer Skala von 0 bis 5, die bezogen auf relative Anforderungen von sehr niedrig bis sehr hoch reicht. Bei absoluten Anforderungen, wie z. B. der Flächenpressung, wird dabei von einem Standardwert ausgegangen (hier z.B.  $1 \text{ N/mm}^2$ ), der nach oben und unten entsprechend abgestuft wird. Die entsprechenden Standardwerte orientieren sich dabei an bisher vom Projektvorhaben unabhängig manuell am Fraunhofer LBF umgesetzten Funktionsmustern. Grundsätzlich kann dabei davon ausgegangen werden, dass die Herausforderung mit zunehmender Abweichung nach oben oder unten zunimmt, sodass die Bewertungen hinsichtlich der Kategorien Abmessungen, Flächenpressung, Genauigkeit, Umgebungsbedingungen und Integration jeweils auf die Herausforderungsstufen von 0 bis 5 (grün bis rot) abgebildet werden können. Insgesamt wurden aus dem Unterstützerkreis zehn Vorschläge für Demonstrationsszenarien gemacht, wovon letztlich vier ausgewählt wurden. Die einzelnen Vorschläge (siehe auch Abbildung 7) wurden entsprechend der von den Unterstützern gelieferten Anforderungen bewertet und in ein Netzdiagramm eingetragen (s. Abbildung 2).

Ein wesentlicher Punkt für die funktionale Demonstration ist die Variabilität der Anwendungsbereiche, die durch die unterschiedlichen Firmen aus dem Unterstützerkreis repräsentiert werden. So ist von jeder produzierenden Firma ein Vorschlag ausgewählt worden. Weiterhin wichtig ist auch, dass die Vorschläge unterschiedliche Herausforderungsstufen in den verschiedenen Kategorien repräsentieren, damit die Risiken möglichst verteilt sind.

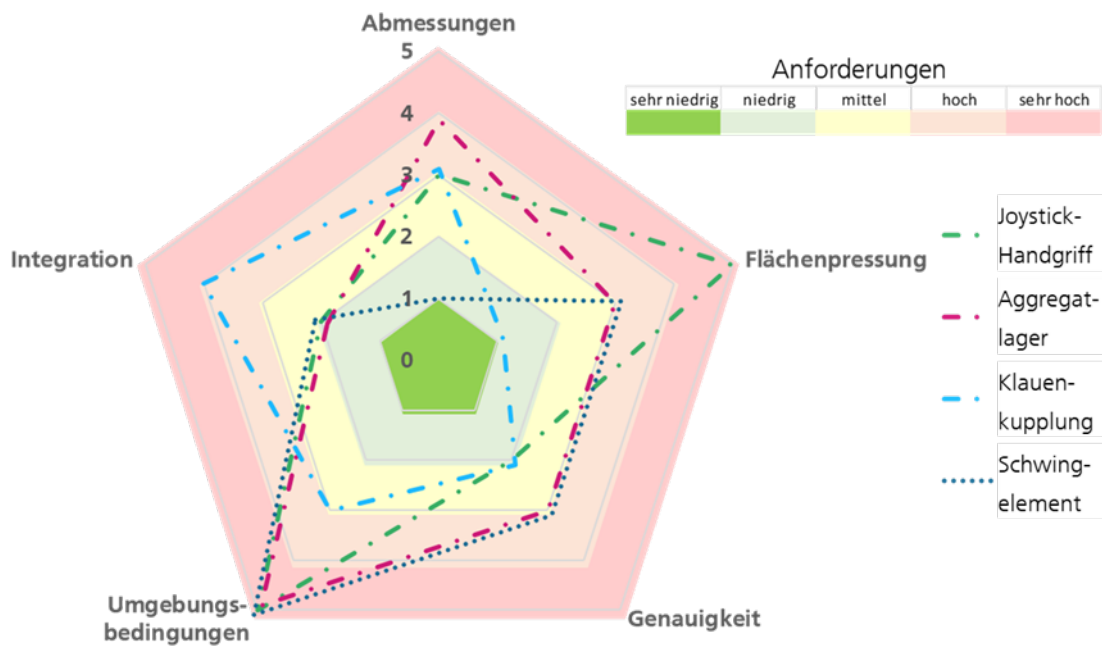


Abb. 2: Bewertung der ausgewählten Demonstrationsszenarien.

## Entwicklung einer industriellen Herstellungsmethodik

Der Produktionsablauf für DE-Sensoren mit der DELTA-C® Technologie wurde an der vorhandenen Anlage am Fraunhofer LBF für die Produktion rein elastischer DE-Sensoren optimiert (Vgl. Abbildung 3). Zunächst wird ein 2-Komponenten-Elastomer auf einen Glasträger aufgebracht und in einer Rakeleinheit verteilt. Nach dem Aushärten unter Heizstrahlern werden leitfähige Elektroden aufgesprüht, welche im Verlauf des Projektes durch starre Metallelektroden ersetzt wurden, die anfangs noch manuell und am Ende durch einen Roboterarm appliziert werden.

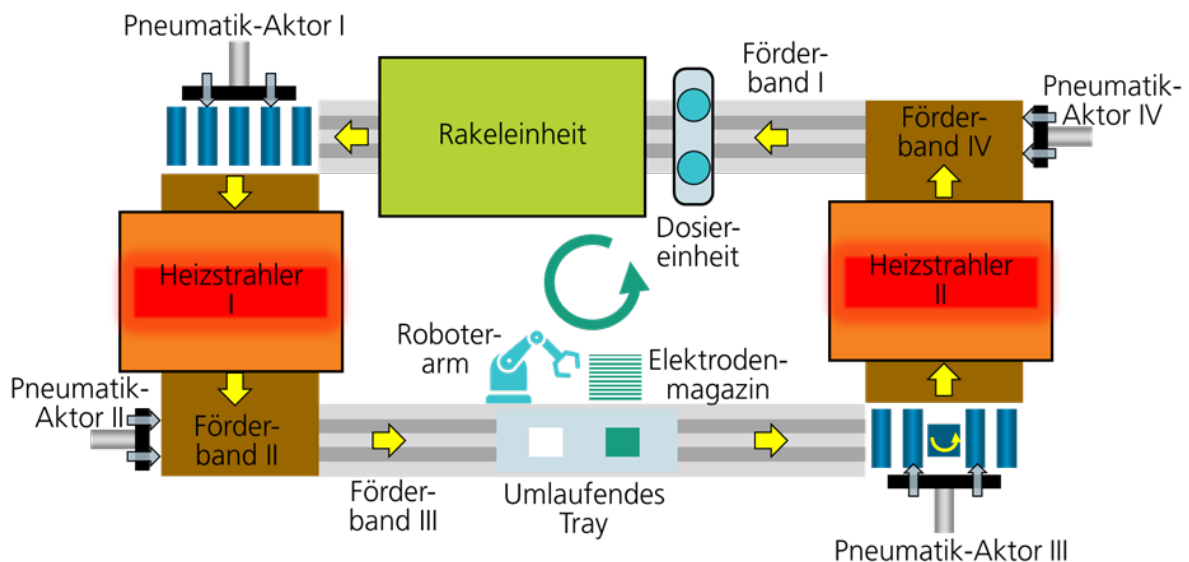


Abbildung 3: Finales Schema der DE-Wandler-Fertigungsanlage.

Die ursprünglichen Metallelektroden aus präzise geätztem Edelstahlblech werden durch kostengünstigere Siebgewebeelektroden ersetzt, die eine vergleichbare sensorische Wirkung erzielen. Um diese mit dem Roboterarm effizient handhaben zu können und zu verhindern, dass das 2-Komponenten-Elastomer die notwendigen Kavitäten vollständig zusetzt, ist es erforderlich das Siebgewebe einseitig mit einer Kupferklebefolie zu laminieren. Durch einen nachgeschalteten Walzprozess wird die laminierte Siebgewebeelektrode plangewalzt, so dass sie mit dem Vakuumgreifer des Roboterarms aus dem Elektrodenmagazin entnommen und präzise auf dem Träger platziert wird. Die Implementierung des Roboterarms und des Walzprozesses wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit [6] und einer Masterarbeit [7] umgesetzt.

Je nach Anforderungen an die Sensorik werden so mehrere Elastomerschichten im Wechsel mit Metallelektroden automatisiert auf einer Platine geschichtet, bis das gewünschte DE-Sensorelement fertiggestellt ist.

Durch die Implementierung des Roboterarms konnte unabhängig von der Fertigungsanlage auch eine alternative Methode zur automatisierten Stapelung von Elektroden und Elastomerschichten nachgewiesen werden. Hierzu wurden mehrere Magazine mit Platinen, Elastomerschichten und Elektroden im Bereich des Roboterarms platziert, so dass dieser nach Bedarf darauf zugreifen und entsprechend programmiert, automatisch die Komponenten für individuelle DE-Sensorelemente stapeln kann. Dadurch können auch automatisiert DE-Sensorelemente mit Elastomerschichten aus nicht rakelfähigem Elastomer hergestellt werden.

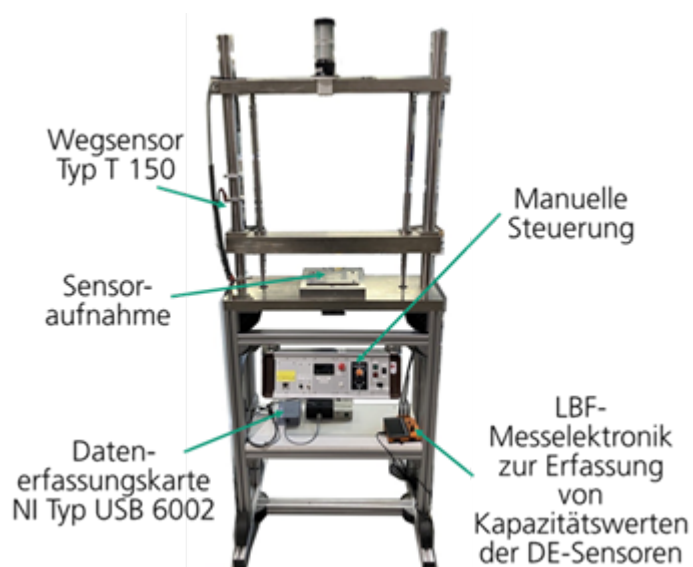


Abbildung 4: End-of-Line Prüfvorrichtung.

Zur Evaluierung der DE-Sensorelemente wurde eine End-of-Line-Prüfvorrichtung mit standardisiertem Prüfprotokoll im Rahmen einer Bachelorarbeit [8] aufgebaut (Abbildung 4). Durch diese können alle hergestellten Sensoren mit einem standardisierten Prüfverfahren getestet werden, um sensorspezifische Daten wie Grundkapazität, die nutzbare Kapazitätsänderung, die lineare Sensitivität sowie die relative Hysteresebreite zu ermitteln. Dadurch lassen sich die Einflüsse von

Parametervariationen untereinander besser vergleichen und zusätzliche Einflüsse aus separaten Aufbauten und individueller Versuchsdurchführung vermindern.

Mit der Laminier- und Walzvorrichtung für die Elektrodenherstellung und der Implementierung des Roboterarms, sowie der Abstimmung der Siebgewebefeinheit auf das verwendete 2K-Silikon und der Implementierung einer EoL-Prüfvorrichtung ist die Modifikation der DE-Wandler-Fertigungsanlage abgeschlossen (vgl. Abbildung 3) und demonstriert die industriell nutzbare und automatisierte Herstellung von DE-Wandlern mit dehnsteifen Elektroden.

### Untersuchung des Einflusses von Design- und Prozessparametern

Um das Zusetzen der erforderlichen Hohlräume des strukturierten Siebgewebes zu vermeiden, wurde das Siebgewebe einseitig foliert. Verschiedene Kunststofffolien wurden zunächst getestet, und die so hergestellten DE-Sensorelemente erzielten gute Ergebnisse, mussten jedoch manuell in die spezifizierte Elektrodenform zugeschnitten werden. Ein Zuschnitt durch Erodieren war nicht erfolgreich, da die Kunststofffolie nicht aufgeschmolzen wurde. Dies wurde mit Kupferklebeband gelöst, sodass Stapel von 50 und mehr laminierten Siebgewebestücken effizient erodiert werden konnten.

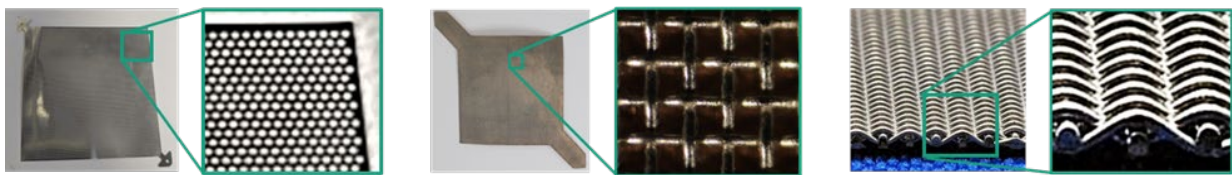


Abbildung 5: Elektrodenhalbzeuge, v.l.n.r. geätzte Metallfolie, Siebgewebe A, Siebgewebe B (Darstellung nicht maßstabsgerecht)

Die ursprünglich als Elektrodenhalbzeug verwendete geätzte Metallfolie (vgl. Abbildung 5, links) ist zunächst durch Siebgewebe A (Abbildung 5, mittig) mit variierten Maschenweiten zwischen 42  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  ersetzt worden. Größere Maschenweiten führten dabei zu geringerer Grundkapazität, aber höherer Sensitivität. Um die Ausschussquote zu reduzieren, wurde festgestellt, dass die Ebenheit des Siebgewebes eine entscheidende Rolle spielt. Ein neues, ebeneres Siebgewebe (Siebgewebe B, Abbildung 5 rechts) und das Walzen des mit Kupferklebeband laminierten Siebgewebes verringerte die Ausschussquote erheblich. Die Geometrie der Kavitäten veränderte sich dadurch aber so weit, dass dadurch keine einfach zu definierenden Kavitäten mehr entstehen, die über ein FE-Modell mit verhältnismäßigem Aufwand abstrahiert werden können.

Die Parameteroptimierung der Walzvorrichtung wurde im Zuge der Masterarbeit [7] durchgeführt. Durch die Justierung der Zustellung und des Kippwinkels beim Durchlauf des laminierten Elektrodenmaterials konnte die Ebenheit deutlich verbessert werden, was zum einen zu einer besseren Handhabbarkeit mit dem Roboterarm und zum anderen zu einer höheren Reproduzierbarkeit der Elektrodenqualität führt.

Darüber hinaus wurde noch die Trocknungsdauer optimiert, indem die Verfahrensgeschwindigkeit unter den Heizelementen sowie deren aktive Anzahl an die Dicke der gefertigten Silikonschicht angepasst wurde. Diese Maßnahme trägt dazu bei, dass bei der Positionierung der Elektroden durch den Roboterarm möglichst identische Voraussetzungen herrschen und die Elektroden zum einen gut anhaften, zum anderen aber auch die Kavitäten nicht durch eine noch zu niedrige Viskosität des noch nicht ausgehärteten Elastomers zu stark gefüllt werden, was zu einer geringeren Sensitivität und einer geringeren Kapazitätsänderung bei den Sensorelementen führen würde.

Abschließend ergibt sich die Erkenntnis, dass eine größere Maschenweite bzw. gröbere Filterfeinheit zu einer geringeren Grundkapazität, aber auch zu einer größeren Kapazitätsänderung und Sensitivität führt. Eine größere Silikonschichtdicke führt ebenfalls zu einer geringeren Grundkapazität, aber zu einer geringeren Kapazitätsänderung sowie Sensitivität. Durch gezielte Maßnahmen wurde die Ausschussquote von 56,5 % auf 8,2 % gesenkt.

### **Entwicklung einer Auslegungsmethodik**

Das bisherige Elektrodendesign, das auf geätzten Elektroden basiert, lässt sich numerisch gut mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) nachbilden. Hierdurch konnten bereits vor der manuellen Fertigung mit geätzten Metallelektroden und Elastomerfolie entsprechende Designparameter für die Anforderungen ausgewählt werden, um notwendige Sensorspezifikationen zu erzielen. Bezüglich der Designparameter ist dieser Modellierungsansatz hinsichtlich der Geometrie der Kavitäten und deren Abstand sowie der Materialauswahl sehr flexibel.

Da die geätzten Elektroden durch ein Siebgewebe ersetzt werden, musste auch der Modellierungsansatz des FE-Modells angepasst werden. Die Geometrie der Leinenbindung von Siebgewebe A kann abstrahiert und auf die wesentlichen Größen beschränkt werden. Eine derartige Abstraktion ist bei Siebgewebe B nicht mehr möglich, sodass ein parametrisiertes FE-Modell eine unverhältnismäßige Komplexität mit sich bringt. Da die Sensoreigenschaften im Wesentlichen nur von der Filterfeinheit und der Silikonschichtdicke beeinflusst werden, wurde auf eine FEM-Simulation zur Auslegung verzichtet und als Alternative eine durch experimentelle Messwerte gestützte Auslegungsmethodik verwendet. Eine vielversprechende Herangehensweise ist die Kennfeld-Auslegungsmethode, die eine detaillierte Analyse der Leistungsparameter ermöglicht und so zu einer effektiveren Optimierung des neuen Sensordesigns für die Demonstrationsszenarien führt. Die angewandte Methodik integriert Material- und Geometriedaten sowie halbempirische Ausgleichsfaktoren, die aus Messdaten abgeleitet werden, um das Modell zu optimieren. Die Ausgleichsfaktoren sind notwendig, um Vereinfachungen des Modells zu berücksichtigen und phänomenologische Einflüsse zu erfassen.



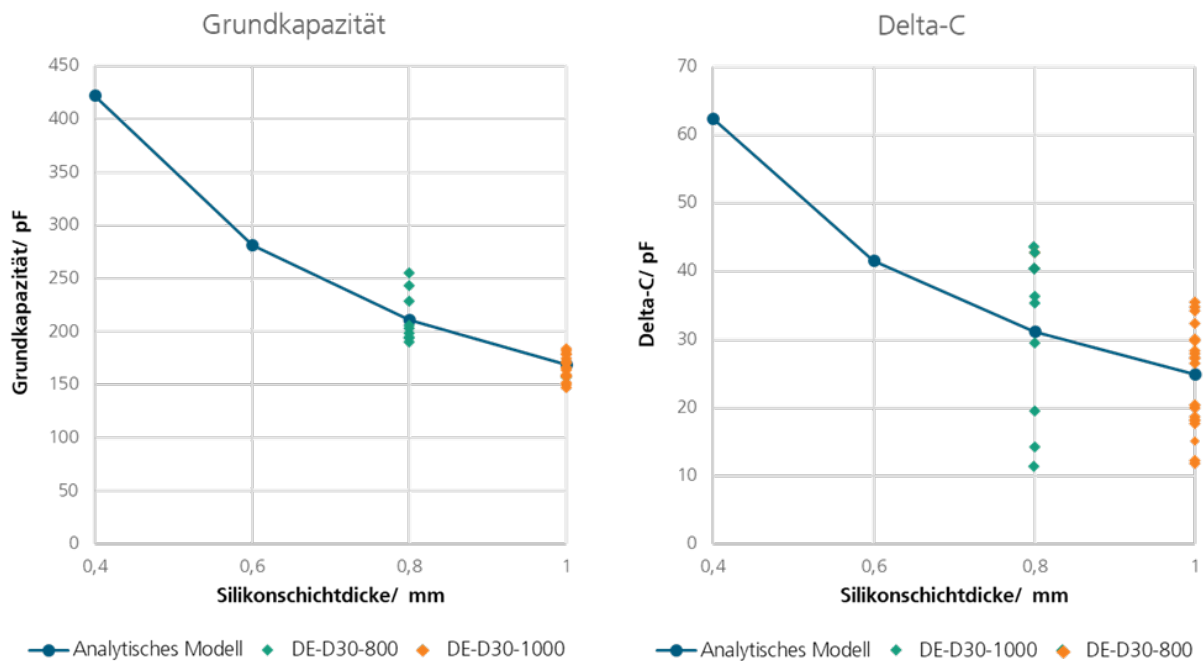


Abbildung 6: Links, Gemessene Grundkapazitäten (Siebgewebe B) verschiedener Silikonschichtdicken verglichen mit dem analytischen Modell, rechts, Gemessenes Delta-C verglichen mit dem analytischen Modell.

In Abbildung 6 ist der Vergleich zwischen dem analytischen Modell mit den entsprechenden Messwerten der mit Siebgewebe B gefertigten DE-Sensorelemente dargestellt. Hier zeigt sich auch, dass bei den mit Siebgewebe B gefertigten Elementen die gemessene Grundkapazität deutlich weniger schwankt als das Delta-C (Kapazitätsspannweite zwischen minimalem und maximalem Messwert). Da die Qualität des Modells stark von der Anzahl und der Qualität der verfügbaren Messdaten abhängig ist, ist die Vorhersage mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Im vorliegenden Fall ist eine Vorhersage mit dem analytischen Modell für die Grundkapazität für geringere Silikonschichtdicken voraussichtlich stabiler als die Vorhersage für das Delta-C. Grundsätzlich zeigt sich, dass mit abnehmender Silikonschichtdicke sowohl die Grundkapazität als auch das Delta-C ansteigt. Dieser Trend konnte auch schon bei der Verwendung des anderen Siebgewebes A beobachtet werden.

## Integration von Sensorelementen in Elastomerbauteile

Die Integration von Sensorelementen in Elastomerbauteile stellt eine komplexe Herausforderung dar, die in enger Zusammenarbeit mit dem Unterstützerkreis erfolgt. Dies ist entscheidend, um die optimale Größe und Position der Sensoren festzulegen (vgl. Abbildung 7), die Anbindung in die Lastrichtung und die Zugänglichkeit zur Kontaktierung zu gewährleisten.

Eine wesentliche Methode zur Integration der Sensoren ist die direkte Einbindung in die Bauteile, wobei Ansätze wie das Einvulkanisieren und Laminieren von DE-Sensoren in Polyamid-Folie erprobt wurden. Allerdings wurden einige dieser Methoden verworfen, da Bedenken hinsichtlich der Stabilität der Verbindungen aufkamen. Insbesondere die

chemische Inkompatibilität zwischen Silikon und Kautschuk wurde als kritisch eingestuft. Eine alternative Methode, die Umhüllung von Silikon-Sensoren mit flüssigem Latex oder Kautschuk, erwies sich ebenfalls als unzureichend, da mechanische Belastungen zu Delaminierung führten.

Zusätzlich wurde die mechanische Integration der Sensoren in Gehäuse untersucht. Beispielsweise kann ein flexibler Membrandeckel zur Kraftübertragung verwendet werden oder eine Kavität zur Fixierung der Sensorelemente geschaffen werden. Ein praktisches Beispiel ist die Integration eines DE-Sensors in einen Fahrradgriff, wo Sensorschichten manuell positioniert und mit einem Schrumpfschlauch ummantelt wurden. Diese Methode wurde vorläufig als akzeptabel eingestuft, um die Funktionalität zu demonstrieren, wobei der Joystick-Handgriff als Zieldemonstrator dient.



Abbildung 7: Festlegung der Positionierung von DE-Sensoren in den ausgewählten Bauteilen, v.l.n.r.: Joystick-Handgriff, Aggregatlager, Schwingelement, Klauenkupplung-Sattelstollen

Ein weiterer Ansatz umfasst das Vergießen von DE-Sensorelementen in speziell geformte Ersatzbauteile. Diese Methode nutzt eine zweiphasige Vergussstrategie, um eine stoffschlüssige Verbindung zu gewährleisten. Bei dieser Methode wird zunächst eine dünne Silikonschicht vergossen und ausgehärtet bevor das Sensorelement platziert wird. In der zweiten Phase wird die Form vollständig gefüllt. Diese Methode wird als akzeptabel und effektiv identifiziert, auch wenn die Eigenschaften der erzeugten Silikon-Bauteile noch nicht identisch mit den Originalteilen sind.

Die entwickelten Demonstrationsszenarien umfassen eine Silikonplatte für einen Maschinenschuh, eine ähnliche Platte für ein Schwinglager, Silikon-Sattelstollen für eine Klauenkupplung und Miniatur-Sensoren zur Integration in einen Joystick. Besonders herausfordernd ist die Integration in den Joystick, da der Bauraum begrenzt ist und das Gehäuse nicht aus Elastomer gefertigt ist. Hier wird eine Vertiefung auf der Außenseite des Gehäuses vorgesehen, in die das DE-Sensorelement eingelegt wird. Ein elastischer Schrumpfschlauch fixiert und versiegelt das Element, wodurch die äußere Kontur des Joysticks nur geringfügig verändert wird.

Für eine Klauenkupplung liegt der Fokus auf der Integration von DE-Sensorelementen in zwei von sechs Sattelstollen (vgl. Abbildung 8). Sechs baugleiche Sattelstollen werden aus Silikon in einer Gießform hergestellt, um gleichmäßige mechanische Eigenschaften sicherzustellen. Zwei dieser Stollen werden mit DE-Sensorelementen beim Vergießen integriert. Die Klauenkupplung wird in einem Versuchsstand

oszillierend betrieben, sodass keine besonderen Vorkehrungen für Energie- oder Datenübertragung zu den Sensoren notwendig sind.



Abbildung 8: V.I.n.r. Originalsattelstollen, Gussform, passiver Sattelstollen aus Silikon, Sattelstollen aus Silikon mit integriertem DE-Sensorelement.

Für Maschinenschuhe und Schwinglager sind nur ebene Platten erforderlich, die mit DE-Sensorelementen ausgestattet sind. Beim Maschinenschuh werden vier Platten an den Lagerungspunkten einer Papierschneidemaschine platziert, um die Belastungen im Betrieb zu messen. Beim Schwinglager wird ein Versuchsstand zur Prüfung der Schwinglager genutzt. Hierbei wird für jede Flanschfläche ein separat eigegossenes DE-Sensorelement verwendet, um die Kräfte und Momente während des Betriebs zu ermitteln. Die Gießformen für die Integration der DE-Sensorelemente wurden im Lasersinterverfahren in Polyamid designt und gedruckt, wobei eine dünne Schicht Elastomer als erste Schicht eingefüllt wird, bevor das DE-Sensorelement positioniert und die Form komplett mit Silikon gefüllt wird.

Insgesamt verdeutlicht die vorliegende Entwicklung, dass die Integration von Sensorelementen in Elastomerbauteile innovative Ansätze und gründliche Voruntersuchungen erfordert, um die gewünschten funktionalen Ergebnisse zu erzielen und die Herausforderungen der Technik zu bewältigen.

### **Demonstration der Funktionalität in der Anwendung**

Zur Integration der DE-Sensorelemente in die entsprechenden Demonstrationsszenarien sind im Wesentlichen die Sensorflächen angepasst worden. Beim Maschinenschuh und beim Schwinglager sind keine Größenanpassung erforderlich gewesen, da die Standardgröße der bisher hergestellten DE-Sensorelemente bereits passend ist. Für den Sattelstollen der Klauenkupplung war es erforderlich die Sensorfläche auf etwa 2/3 der Standardgröße zu reduzieren. Hierzu wurden sowohl die Platine als auch die Elektroden entsprechend manuell entlang einer Seitenkante gekürzt. Für die Herstellung mit der DE-Fertigungsanlage wurde dazu auch ein leicht modifizierter Vakuumgreifer gefertigt, der die angepassten Elektroden sicher auf dem Tray positioniert. Bei den DE-Sensorelementen für den Joystick ist die Sensorfläche auf etwa 1/6 der Standardgröße reduziert worden. Um den Aufwand gering zu halten, wurden die entsprechenden DE-Sensorelemente weitestgehend manuell gefertigt. Lediglich die Elastomerschichten wurden mit der Fertigungsanlage auf das Sensorelement gerakelt.

Die Herstellung und Charakterisierung der DE-Sensorelemente für den Maschinenschuh, Schwinglager und den Sattelstollen erfolgte nach der oben beschriebenen zweiphasigen Vergussstrategie und mit der End-of-Line Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Sensorkennwerte. Für die Integration in die entsprechenden Elastomerbauteile wurden je nach Anwendung DE-Sensorelemente ausgewählt, deren Kennwerte untereinander eine geringe Streuung aufweisen und ohne besonderen Befund waren. Die Elastomerkomponenten der Demonstrationsszenarien mit den integrierten DE-Sensorelementen wurden jeweils nach der beschriebenen zweiphasigen Vergussmethode hergestellt.

Für die Demonstration eines sensorintegrierten Schwinglagers sollten die Lagerungskräfte in einer Prüfmaschine für die Schwinglager getestet werden. Da die Schwinglager zwei Flansche aufweisen und während der Belastung auch Momente entstehen, sollen diese über zwei separat messende DE-Sensorelemente ermittelt werden. Die Gussform ist ähnlich der Gussform für die Maschinenschuhe aufgebaut, enthält aber noch zusätzlich eine Metallplatte, die sich mithilfe eines Primers stoffschlüssig mit dem Silikonverguss verbindet und nach dem Entformen eine verbesserte Kraftverteilung unter den geometrisch kleineren Flanschen des Schwinglagers ermöglicht (vgl. Abbildung 9).

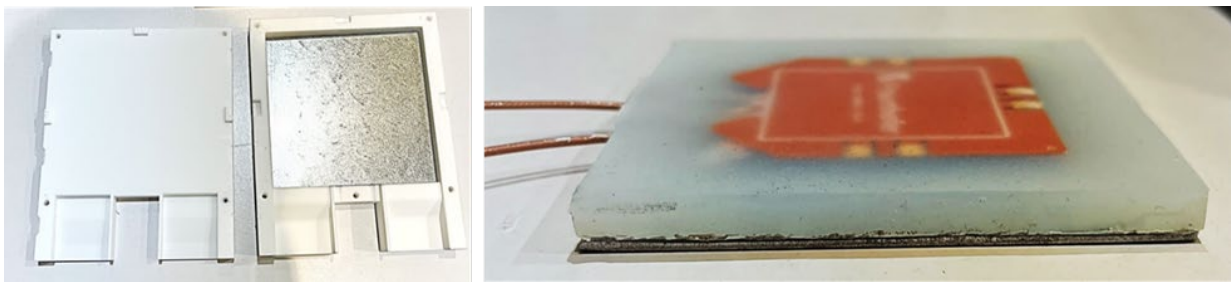


Abbildung 9: V.l.n.r. Gussform mit eingelegter Stahlplatte und fertig vergossener Schwinglagerflanschplatte mit DE-Sensorelement.

Für die Demonstration eines sensorintegrierten Maschinenschuhs sollten die Lagerungskräfte einer Papierschneidemaschine an vier Auflagerpunkten während des Betriebs gemessen werden. Hierzu wurden vier Silikonplatten ähnlich den Isoliermatten der Maschinenschuhe mit DE-Sensorelementen ausgestattet. Beim Sattelstollen soll ein oszillierendes Moment bei einer Klauenkupplung in einem Prüfstand ermittelt werden. Hierzu wurde ein Schenkel eines Sattelstollens mit einem DE-Sensorelement ausgestattet. Am Joystick sollen Griffkräfte bei der Nutzung des Joysticks ermittelt werden. Hierzu wurde das CAD-Modell einer Griffschale mit einer Mulde für ein DE-Sensorelement versehen und zusätzlich in insgesamt vier Teile (anstatt zwei) aufgeteilt, so dass ein Schrumpfschlauch über die mittlere Sektion des Joysticks gestülpt werden kann.

In Abstimmung mit den Firmen der ausgewählten Demonstrationsszenarien wurden Testszenarien entworfen, die es ermöglichen die mit den DE-Sensorelementen ausgestatteten Elastomerbauteile funktionell mit einer mechanischen Zug-Druck-Prüfmaschine vorab im Labor des Fraunhofer LBF zu testen. Dazu wurden für die einzelnen Szenarien verschiedene Aufnahmen passend zu den Elastomerbauteilen für

die Zug-Druck-Prüfmaschine konstruiert und aufgebaut. Die Prüfungsbedingungen (Vorlast, maximale Last, Wegamplitude und Prüffrequenz) wurden jeweils mit den Firmen abgestimmt und an die Anforderungen bei den darauffolgenden Prüfungen der Firmen so weit möglich angepasst.

Für die Auswertung der DE-Sensoren kam eine zuvor eigens entwickelte preiswerte Elektronik zur Verwendung mit DE-Sensoren zum Einsatz. Hierdurch ergaben sich zwar Einschränkungen hinsichtlich der Kalibrierung und Datenerfassung, ermöglichte aber den Firmen, die DE-Sensorik-Bauteile auch über die begleitete Prüfung hinaus zu Testen und Messwerte zu erfassen, ohne spezielles kostenintensives Labor-Messequipment erwerben zu müssen. Basierend auf den in Laborversuchen mit einer Prüfmaschine ermittelten Messwerte wird in der Elektronik eine Regressionskurve mit einem Polynom 3. Grades hinterlegt, durch die eine Umrechnung der Kapazität in Kraft für den entsprechenden DE-Sensor erfolgt. Es können verschiedene Abtastraten gewählt werden, die aber aufgrund der beschränkten Rechenkapazität mit höherer Abtastrate zu einer geringeren Messgenauigkeit führt. Je nach Demonstrationsszenario ist hier ein entsprechender Kompromiss zu suchen.

Zur Darstellung der Demonstrationsszenarien für die DE-Sensorelemente wurde jeweils ein Messtag mit den entsprechenden Firmen vereinbart. Gemeinsam mit den Mitarbeitern der unterstützenden Firmen wurden die DE-Sensor-Elastomerbauteile in die entsprechenden Maschinen implementiert und das Testprogramm durchgeführt.

Für das Demonstrationsszenario Schwinglager wurden zwei Schwinglagerflanschplatten mit DE-Sensorelementen (vgl. Abbildung 10, links) zusammen mit einem Schwinglager vom Typ AB 45 in einer Prüfmaschine für Schwinglager eingesetzt und mit Spannpratzen vorgespannt. Da in der Prüfmaschine die Anregung von unten erfolgt, sind die Schwinglagerflanschplatten oberhalb des Schwinglagers am fixen Teil der Maschine montiert worden. Als Anregung wurden statische und dynamische Wegamplituden bei verschiedenen Frequenzen vorgegeben. Aufgezeichnet wurden jeweils die Einzelkräfte der beiden Schwinglagerflanschplatten, sowie der (Gesamt-) Kraftwert der Prüfmaschine. Ziel war es dabei neben den Kraftwerten auch das Moment in der Einspannung zu ermitteln, welches aus dem mechanischen Aufbau des Schwinglagers resultiert. Aus den Einzelkraftwerten (grau und schwarz) wurde mit den Hebelarmen der Flanschpositionen das Drehmoment (grün) abgeleitet. Die zyklische sinusförmige Belastung wird qualitativ von den DE-Sensoren gut abgebildet (vgl. Abbildung 10, rechts). Die Summe aus beiden Kraftsensoren (blau) liegt dabei deutlich unterhalb des gemessenen Kraftwerts der Prüfmaschine (orange) und auch die Amplitude der zyklischen Anregung ist kleiner. Betrachtet man die DE-Sensor-Messwerte einzeln, so zeigt sich, dass durch die Schwinglagermechanik ein Moment in den Flansch eingeleitet wird und einer der beiden DE-Sensoren sehr stark und der andere fast gar nicht belastet wird. Darüber hinaus zeigen sich bei höheren Betriebsfrequenzen (ab 8 Hz) auch die Grenzen der Low-Cost-Elektronik, da die aufgezeichneten Messwerte trotz höher gewählter Abtastrate kein gleichmäßiges Sinussignal mehr darstellen.



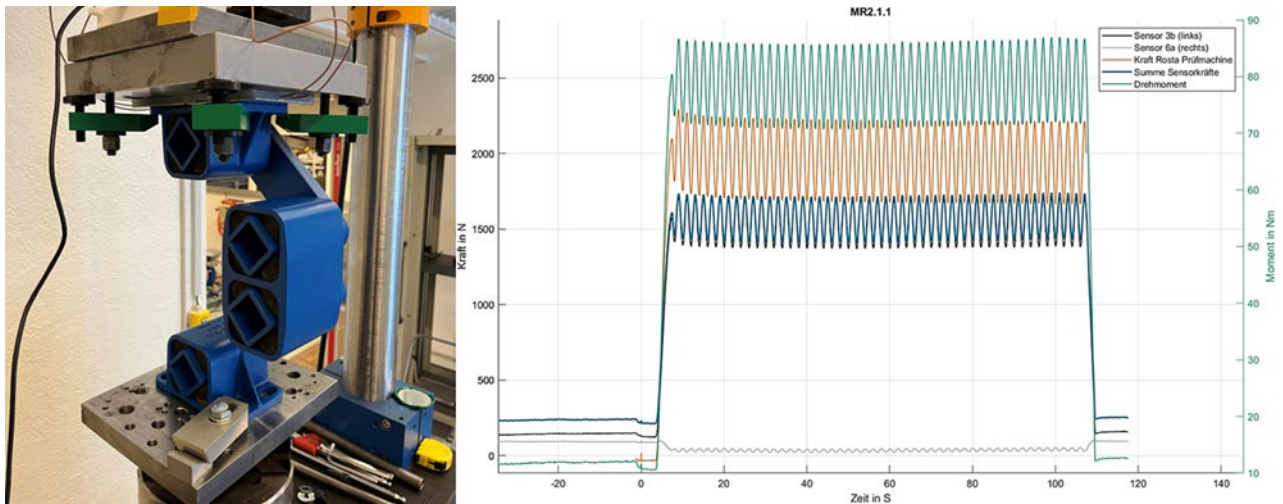


Abbildung 10: V.l.n.r. Prüfmachine der Firma Rosta mit DE-Sensorelementen ausgestattetem Schwinglager und exemplarischem Messwertverlauf unter einer statischen Weg-Belastung von 40 mm und einer zyklischen Weg-Belastung von  $\pm 4$  mm bei einer Frequenz von 0,5 Hz.

Beim Testen der Maschinenschuhe wurden vier Maschinenschuhe mit DE-Sensorelementen unter einer Papierschneidemaschine, in Reihe mit zusätzlichen Kraftmessaufnehmern platziert. Aufgrund des Ablaufs der Montage mussten die DE-Sensoren anhand der vorhandenen Sensoren kalibriert werden. Als Anregung wurden die Betriebslasten beim Schneiden von verschiedenen Isolationsplatten von allen Sensoren gleichzeitig aufgezeichnet und miteinander verglichen. Da die DE-Sensoren mit den vorhandenen Sensoren kalibriert wurden ist die Abweichung beim Kraftniveau eher gering. Die Messwerte bei den durch den Schneidvorgang hervorgerufenen Impulsen ist die Abweichung jedoch recht hoch. Die Impulse selbst können von den meisten Sensoren detektiert werden.

Für das Demonstrationsszenario Klauenkupplung wurde ein Sattelstollen mit DE-Sensorelement (vgl. Abbildung 8, rechts) und einer ohne in der gegenüberliegenden Position in eine Klauenkupplung integriert. Die Prüfung der Klauenkupplung erfolgte nach einem angepassten Prüfprotokoll in Blöcken mit 0,1 Hz, 1 Hz, 2 Hz und 10 Hz jeweils mit einem Drehmoment von  $625 \text{ Nm} \pm 250 \text{ Nm}$ . Bei 0,1 Hz Anregung zeigte das im Sattelstollen integrierte DE-Sensorelement ein deutlich höheres statisches Drehmoment von 778 Nm mit etwas kleinerer Amplitude von  $\pm 241 \text{ Nm}$ . Bei höheren Anregungsfrequenzen beginnt die Amplitude bei deutlich kleineren Werten am Anfang eines Frequenzblocks und steigert sich dann zum Ende des Frequenzblocks.

Für das Demonstrationsszenario des Joysticks konnten keine Messkampagnen mit der Firma aufgrund interner Priorisierung während der Projektlaufzeit durchgeführt werden. Insgesamt zeigten die Demonstrationsszenarien, dass die im Projekt hergestellten DE-Sensorelemente auch in Elastomerbauteile integriert, zumindest funktionsfähig sind und von der Größenordnung ähnliche Messwerte liefern können. Herausfordernd bleibt hier aber eine geeignete Low-Cost-Auswerteelektronik, die auch bei höheren Frequenzen eine ausreichende Genauigkeit liefert, sowie eine geeignete Methode zur Kalibrierung der DE-Sensoren in der Anwendung.

---

## Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung einer skalierbaren und automatisierten Herstelltechnologie von dielektrischen Elastomersensoren, sowie deren Integration in Elastomerbauteile in anwendungsnahe Demonstrationsszenarien. Anhand einer Bewertungsmethodik wurden vier Szenarien aus dem Unterstützerkreis ausgewählt, die aufgrund der Anwendungsbereiche unterschiedliche Anforderungen fokussiert haben. Somit entstanden unterschiedliche Herausforderungen bzgl. Abmessungen, Lastbereiche, Genauigkeiten, Umgebungsbedingungen und Integration.

Ein wesentlicher Fortschritt wurde in der Automatisierung der Herstellung von DE-Sensoren erzielt. Durch die Implementierung einer Laminier- und Walzvorrichtung sowie eines Roboterarms konnte die Qualität und die Reproduzierbarkeit deutlich verbessert werden. Durch die zusätzliche Abstimmung von Design- und Prozessparametern konnte die Ausschussquote von 56,5 % auf 8,2 % reduziert werden. Zudem wurde auch der Einfluss dieser Parameter auf die Sensoreigenschaften untersucht. Eine systematische Variation ermöglichte es, die Sensorelemente gezielt an die Anforderungen der verschiedenen Anwendungen anzupassen. Hier zeigte sich, dass eine größere Maschenweite bzw. gröbere Filterfeinheit zu einer geringeren Grundkapazität, aber auch zu einer größeren Kapazitätsänderung und Sensitivität führt. Während eine größere Silikonschichtdicke die Kapazitätsänderung und Sensitivität, aber auch die Grundkapazität verringert.

Aufgrund des Wechsels von geätzten Elektroden zu Siebgewebe, wodurch die Herstellungskosten deutlich reduziert werden konnten, war es nicht möglich eine Auslegungsmethodik auf vorhandenen numerischen Modellen aufzubauen. Als alternative wurde eine experimentelle messwertgestützte Auslegungsmethodik verwendet, welche die physikalischen Eigenschaften mit analytischen Beziehungen beschreibt und die Material- und Geometriedaten mit halbempirischen Ausgleichsfaktoren anpasst. Der Vergleich von Modell und Messdaten zeigt, dass eine Vorhersage der Sensoreigenschaften anhand der Designparameter für die Grundkapazität und das Delta-C möglich ist, aber die Unsicherheit des Modells stark von der Qualität der verfügbaren Messdaten abhängt.

Die Integration der silikonbasierten DE-Sensoren in kautschukbasierte Elastomerbauteile ist auch mit unterschiedlichen Herangehensweisen, aufgrund unvorhergesehener chemischer Inkompatibilitäten und Bedenken des Unterstützerkreises nicht durchgeführt worden. Stattdessen wurde die Integration der Sensoren zum Großteil auf Silikonbauteile beschränkt, wobei sich ein stufenweises Gießverfahren bewährt hat. Somit konnten insgesamt vier Isolationsplatten für Maschinenschuhe, zwei Sattelstollen für Klauenkupplungen und ein Flansch für ein Schwinglager mit Sensoren versehen werden. Bei dem Schwinglager war die Besonderheit, dass zwei Sensoren parallel verwendet wurden, um auch die Drehmomente am Flansch messen zu können. Zudem wurden die sensorischen Silikonplatten stoffschlüssig mit einer Metallplatte verbunden,

um eine flächige Krafteinleitung in den Sensor sicherzustellen. Nur beim Joystick erfolgte eine konstruktive Integration mit einer Ummantelung mittels Schrumpfschlauch.

Die Demonstration der DE-Sensoren zeigte, dass diese auch in der Anwendung funktionsfähig sind und die eingebrachten dynamischen Lasten qualitativ messen können. Die absoluten Messwerte zeigten teilweise größere Abweichungen, lagen aber zumindest in einer ähnlichen Größenordnung. Hier besteht noch Potenzial, was durch eine geeignete Methodik der Kalibrierung in der Anwendung verbessert werden kann. Zudem zeigte sich, dass bei höheren Frequenzen ( $> 2$  Hz) die eigens entwickelte Low-Cost-Auswerteelektronik bzgl. Abtastrate und Genauigkeit an ihre Grenzen kommt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine industrielle Herstelltechnologie für DE-Sensoren im Verlauf des Vorhabens nachgewiesen und das Verständnis des Einflusses von Design- und Prozessparameter auf die Sensoreigenschaften erweitert wurde. Die Technologie zeigt großes Potenzial bei der Integration sowie im Einsatz industrieller Anwendungen wodurch KMUs der Zugang erleichtert wird und der wirtschaftliche Nutzen besser abgeschätzt werden kann.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Thorsten Koch unter +49 6151 705-391.

#### Literatur:

- [1] Kaal, W.: "Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden für Anwendungen in der Strukturmechanik", Dissertation, TU Darmstadt, 2014.
- [2] Kaal, W.; Rieß, S.: Elastomere Sensorwerkstoffe zur Digitalisierung industrieller Prozesse, in: Konstruktion, 2019;5(IW4-IW6)
- [3] Uhl, D.; Aul, A.; Vierhaus, P.; Nierla, T.; Straus, M.; Rabindranath, R. und Böse, H. (2015): Planare dielektrische Elastomeraktoren in Multilayertechnologie für industrielle Anwendungen (PlanDE). FraunhoferGesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG); Fraunhofer-Institut für Silicidforschung ISC. Würzburg.
- [4] Biggs, J, et al. „Elektroaktive Polymere: Entwicklungen und Perspektiven dielektrischer Elastomere“, Angewandte Chemie 125, Nr. 36, S. 9581–9595, 2013
- [5] Rosset, S., Shea, H.: „Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators“, Applied Physics A 110, Nr. 2, S. 281–307, 2013



- [6] M. Neumann, „Bachelorarbeit: Entwicklung einer automatisierten Positioniervorrichtung,“ Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 2024.
- [7] L. Unverhau, „Masterarbeit: Entwicklung einer automatisierbaren Fertigungsanlage für strukturierte Metallelektroden und Optimierung der Fertigungsparameter,“ Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2024.
- [8] A. Shaat, „Bachelorarbeit: Entwicklung und aufbau einer automatisierten End-of-Line-Prüfung zur Charakterisierung von dielektrischen Elastomersensoren,“ Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 2023.