

Hochfrequent stellbare flächige und faserartige dielektrische Elastomeraktoren für komplexe Kinematiken

Muhammad Tahir¹, Hans Liebscher², Henriette Grellmann³, Felix Lohse³, Eric Haentzsch³, Andreas Nocke³, Gerald Gerlach², Chokri Cherif³, Sven Wießner^{1,4,*}

¹ Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF)

² Institut für Festkörperelektronik (IFE) der Technischen Universität Dresden

³ Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden

⁴ Institut für Werkstoffwissenschaft (IfWW) der Technischen Universität Dresden

*corresponding author

Zusammenfassung

Dieses Projekt verfolgt das Konzept, komplexe mechanische Konstruktionen, die auf konventionellen Antriebselementen basieren, durch textilverstärkte, intelligente Strukturen mit strukturintegrierten Aktoren aus dielektrischen Elastomeren (DEA) in den Anwendungsbereichen Robotik, Energietechnik, Automobil, Luftfahrttechnik etc. zu ersetzen. Im Rahmen dieses Beitrags werden die Entwicklungsarbeiten zu kovalent vernetzten als auch thermoplastischen dielektrischen Materialsystemen auf Polyurethanbasis, die Herstellung von flächigen und faserartigen dielektrischen Elastomeraktoren, die Herstellung und Integration von faserartigen Aktoren in textile Verstärkungen und das Simulationsverfahren zur gezielten Auslegung und anwendungsspezifischen Optimierung des Aktordesigns vorgestellt. Für jede Aktorkonfiguration wird der Funktionsnachweis erbracht. Entsprechend der Zielsetzung eines effizienten Designs einer funktionsoptimierten adaptiven Struktur wurde ein mathematischer Ansatz zur Vorhersage der Aktorik erfolgreich in die FEM-Simulation implementiert und dient somit der Optimierung von Material-, Prozess- und Strukturparametern eines adaptiven Multimaterialsystems. Abschließend wurde ein Funktionsdemonstrator einer textilbasierten Aktorbaugruppe entwickelt und anwendungsorientiert evaluiert.

Stichworte: Adaptive Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, Funktionstextilien, Elastomere, Verbundwerkstoffe, Dielektrische Elastomer-Aktoren, Modellierung und Simulation

1 Einleitung

Adaptive Systeme auf der Basis von textilverstärkten Elastomer-Verbundwerkstoffen gewinnen immer mehr an Bedeutung, um die konventionellen Antriebselemente, die komplexen Konstruktionen und die komplexe Mechanik der üblicherweise verwendeten mechanischen (hydraulischen, elektrischen, pneumatischen) Betätigungssysteme für große Stellwege zu ersetzen. Diese intelligenten adaptiven Systeme bringen eine deutliche Reduzierung der Systemmasse, eine Steigerung der Regeldynamik und eine starke Vereinfachung der mechanischen Konstruktionen mit sich, die sich insbesondere für Leichtbauanwendungen und autonome Systeme eignen. Ein besonderes Merkmal solcher energie- und leistungseffizienten Systeme sind die physikalischen Eigenschaften, die während der Nutzung aktiv verän-

dert werden können, wie die äußere geometrische Form einer adaptiven Faser-Elastomer-Verbundstruktur, die eine elektromechanische Wandlung auf der Basis dielektrischer Elastomere integriert [1-6].

Dielektrische Elastomere (DE) sind elektroaktive Komponenten adaptiver (intelligenter) Materialsysteme, die hohe Dehnungen (bis zu 300 %) erzeugen können. Der dielektrische Elastomer-Aktor (DEA) wandelt elektrische Energie direkt in mechanische Energie um. Das grundlegende Funktionsprinzip des DEA basiert auf einem einfachen Kondensator, der aus zwei nachgiebigen dehnbaren Elektroden besteht, die durch ein weiches Dielektrikum getrennt sind (siehe Abb. 1). Die Maxwell'sche Verformungsspannung (σ_z) beschreibt wichtige Aspekte des Aktors und steht in Beziehung zu dessen Material- und Betriebsparametern durch Gleichung 1.

$$\sigma_z = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{U}{d} \right)^2 \quad (1)$$

Die Anziehung der entgegengesetzt geladenen Elektroden beim Anlegen einer elektrischen Spannung (U) führt zu der Maxwell-Spannung, die wiederum zu einer Kompression in axialer (z) Richtung führt, um die Dicke (d) zu verringern und die Dehnung in lateraler Richtung (x, y) zu erhöhen. Die auf diese Weise erreichbare Dehnung ist proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke und hängt von der Permittivität ($\epsilon_0 \epsilon_r$) und dem Elastizitätsmodul des dielektrischen Elastomers ab [7,8]. Dies stellt die in diesem Projekt untersuchte Aufgabe der Materialentwicklung dar, bei der die hohe relative Permittivität (ϵ_r) ausgewählter Polyurethan-Elastomere durch Einbringen von Bariumtitanat-Partikeln ohne signifikante Erhöhung des Elastizitätsmoduls weiter gesteigert wird, damit die Nachgiebigkeit des Dielektrikums möglichst groß bleibt.

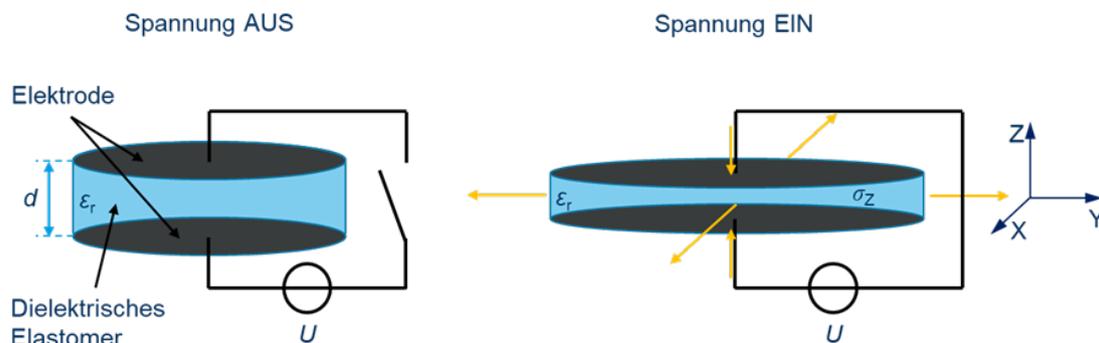


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines dielektrischen Elastomeraktors am Beispiel einer planaren kreisförmigen Konfiguration.

Polyurethan-Elastomere weisen eine hohe Permittivität ($\epsilon_r > 5$) im Vergleich zu den häufig untersuchten Silikon- und Acrylat-Elastomeren ($\epsilon_r \sim 2,5$) auf, was verbunden mit den Vorteilen größerer Festigkeiten und eines breiten Spektrums an Verarbeitbarkeit für die Konstruktion neuer textilkompatibler Aktoren neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Durch ein- oder zweiachsiges mechanisches Vorverstrecken von Elastomeren im Aktoraufbau kann die Schichtdicke und damit die elektrische Spannung für einen sicheren Betrieb reduziert werden [9-10]. Die Reduzierung der für die Betätigung erforderlichen elektrischen Spannung ist ein weiteres wichtiges angestrebtes Ergebnis der vorliegenden Studie. Ein weiterer Entwicklungsaspekt dieser Arbeit ist die Herstellung und Bewertung von Polyurethan-Elastomeren in verschiedenen Aktorkonfigurationen und deren Anordnungsmöglichkeiten durch Integration in textile Verstärkungshalbzeuge. Die entweder mittels Pressverfahren formbaren kovalent vernetzten Polyurethanelastomere einerseits sowie die schmelzspinnbaren thermoplastischen Polyurethan-Varianten andererseits werden für die Entwicklung flächiger bzw. coaxialer faserartiger Aktoren ausgewählt. Um die Designparameter einer anwendungsspezifischen textilintegrierten adaptiven Konstruktion zu identifizieren und zu optimieren, wird ein FEM-Modell entwickelt, welches

das hyperelastische Werkstoffverhalten von Elastomeren berücksichtigt. Schließlich wird in dieser Arbeit ein textilbasierter Funktionsdemonstrator mit adjustierbaren Aktoreigenschaften für komplexe Kinematiken entwickelt und evaluiert.

2 Materialien und Methoden

2.1 Materialien

Die Realisierung einer DEA-Konfiguration mit großen Aktordehnungen bei geringen elektrischen Feldstärken erfordert dielektrische Elastomere mit hoher Permittivität und geringer Steifigkeit (Elastizitätsmodul). Es wurden zwei Polyurethan-Varianten ausgewählt: ein kovalent vernetzbarer Polyurethankautschuk (PUR Urepan 50 EL 06 G, Rhein Chemie) für das Formpressen zu dünnen DE-Filmen und zwei thermoplastische Polyurethane (TPU), einerseits ein mit 10 Gew.-% CNTs beladenes TPU-Masterbatch (Plasticyl TPU 1001, Nanocyl SA, Sambreville, Belgien) und andererseits eine für das Schmelzspinnen geeignete ungefüllte TPU-Fasertyp (Desmopan 9370A, Covestro AG, Leverkusen, Deutschland) für die Herstellung faserförmiger Aktoren. Der kovalent vernetzbare Polyurethankautschuk wurde zusätzlich auch mit Bariumtitanat BaTiO_3 (BT)-Partikeln kombiniert, um Elastomerkomposite mit hoher Permittivität zu generieren. Mikroskaliges BaTiO_3 -Pulver wurde von Sigma-Aldrich bezogen und im Folgenden mit μBT bezeichnet. Die Partikelgröße wird mit weniger als $3 \mu\text{m}$ angegeben. Die Zusammensetzung der ungefüllten und der mit BT gefüllten PUR-Rezepturen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Formulierung der PUR-Mischungen in Teilen pro hundert Teile Kautschuk (phr).

Inhaltsstoffe	PUR	PUR_15 μBT	PUR_25 μBT
Kautschuk	100	100	100
BT	-	15	25
Rhenogran TAC 50/ Perkadox BC-40K-pd	0.5/0.75		

Die PUR-Mischungen wurden in einem zweistufigen Mischverfahren hergestellt; im PUR wurde im ersten Schritt in einem Innenmischer die μBT -Partikel dispergiert und anschließend auf einem Zweiwalzenmischwalzwerkstuhl die Vulkanisationsmittel compoundingiert. Anschließend erfolgte im Formpressverfahren bei 160°C die Vulkanisation zu dünnen Folien als Dielektrikum für die planaren Aktoren.

2.2 Mechanische Charakterisierung

Für die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften wurde die PUR-Mischungen zu Platten mit einer Dicke von 2 mm gepresst, aus denen hantelförmige Zugprüfkörper gestanzt wurden. Der einachsige Zugversuch wurde bei Raumtemperatur mit einer Universal-Zugprüfmaschine Zwick 8195.04 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) gemäß der DIN-Norm 53504 durchgeführt.

Die äquibiaxiale Zugprüfung der PUR-Proben wurde bei Raumtemperatur mit einem Biaxialprüfgerät (Coesfeld GmbH & Co. KG, Dortmund, Deutschland) durchgeführt. Für die Prüfung wurden spezifische quadratische und allseitig mit einer Klemmwulst versehene PUR-Proben ($77 \times 77 \text{ mm}$) mittels Pressvulkanisation hergestellt, in das Klemmsystem des Prüfgeräts eingespannt und äquibiaxial bis zu 100 % Dehnung belastet.

Für sog. reine Scherversuche (engl. Pure Shear = Zugbelastung mit eingeschränkter Querdeformation) wurden PUR-Rechteckstreifenproben entlang ihrer Längskanten (80 mm) im Prüfaufbau eingespannt und mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/min bis zu einer globalen Dehnung von 100 % belastet. Zur Ermittlung der lokalen Dehnung wurde die digitale Bildkorrelationstechnik eingesetzt.

2.3 Mikroskopische Charakterisierung der Morphologie

Die Größe und Struktur des BT-Pulvers und seine Dispersion in der PUR-Matrix wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Die PUR-Proben wurden mit dem Ultramikrotom (Leica UC6/FC6, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland) bei $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ geschnitten und mit Platin beschichtet, bevor sie mit dem Ultra Plus-Rasterelektronenmikroskop von Zeiss NTS (Oberkochen, Deutschland) untersucht wurden.

2.4 Dielektrische Charakterisierung von Elastomeren

Die PUR-Mischungen wurden zu dünnen dielektrischen Elastomerfolien formgepresst und mit einer selbst gefertigten Verstreckvorrichtung auf 45 % Dehnung radial vorgedehnt. Auf die vorgestreckte Elastomerfolie wurde ein Acrylring geklebt, um eine scheibenförmige Probe mit 150 mm Durchmesser und 250 μm Dicke zu erhalten. Das dielektrische Verhalten der vorgedehnten dielektrischen PUR-Elastomerfolien wurde mit einem Frequenzganganalysator (Solartron SI 1260, UK) untersucht. Die Impedanzspektroskopie wurde bei RT im Frequenzbereich von 100 MHz bis 1 MHz durchgeführt. Aus den Impedanzmesswerten wurde die relative Permittivität der Elastomerfolien ermittelt.

2.5 Herstellung und elektromechanische Charakterisierung der Aktoren

2.5.1 Planare dielektrische Elastomer-Aktoren

Planare Aktoren mit kreisförmiger und rechteckiger Geometrie wurden aus den dünnen dielektrischen Elastomerfilmen auf Basis von kovalent vernetztem Polyurethankautschuk (PUR) hergestellt.

2.5.1.1 Kreisförmiger Aktor

Die PUR-Folie wurde mit einer Verstreckvorrichtung auf 45 % Dehnung vorgedehnt (Abb. 2a). Ein Acrylring wurde auf die Folie geklebt, um eine vorverstreckte runde Probe (Durchmesser 150 mm, Dicke 250 μm) zu erhalten (Abb. 2b). Elektroden mit einem Durchmesser von 50 mm und Anschlussstreifen mit einer Breite von 3 mm aus Kohlenstoffpaste wurden mit Hilfe einer Klebeschablone auf beiden Seiten der kreisförmigen Probe angebracht. Die Anschlussstreifen führen zu Kupferklebeband, das für den Anschluss der Hochspannungsversorgung verwendet wird. Der mit diesem Verfahren hergestellte kreisförmige Aktor ist in Abb. 2c dargestellt.

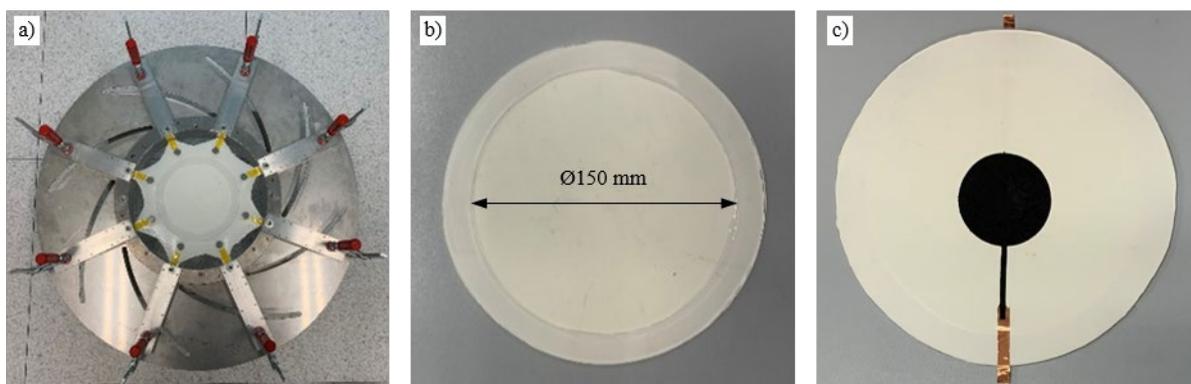


Abbildung 2. a) Radial vorgedehnte PUR-Folie mit aufgeklebtem Acrylring, b) ausgeschnittene Probe mit aufrecht erhaltener Vordehnung, c) Kreisförmiger Aktor mit konzentrischen Elektroden auf beiden Seiten der Elastomerfolie.

Zur elektromechanischen Charakterisierung der planaren kreisförmigen Aktoren wurde der in Abbildung 3 dargestellte Messaufbau verwendet. Die Aktoren werden mit einer Hochspannungsquelle (Peta-pico-Voltron) im Spannungsbereich von 0 bis 5000 V betrieben. Eine Kompaktkamera (Sony α 6400) mit einem Makroobjektiv (Sony SEL30M35) dient zur Aufzeichnung der Elektrodenverformung

während des Zu- und Abschaltens der elektrischen Spannung. Die Verarbeitung der Videodaten und die Extraktion der Elektrodenverformung erfolgen in MATLAB. Dabei wird die kreisförmige Elektrodenfläche, deren Flächeninhalt mit steigender Hochspannung zunimmt, als ideale Kreisfläche betrachtet.

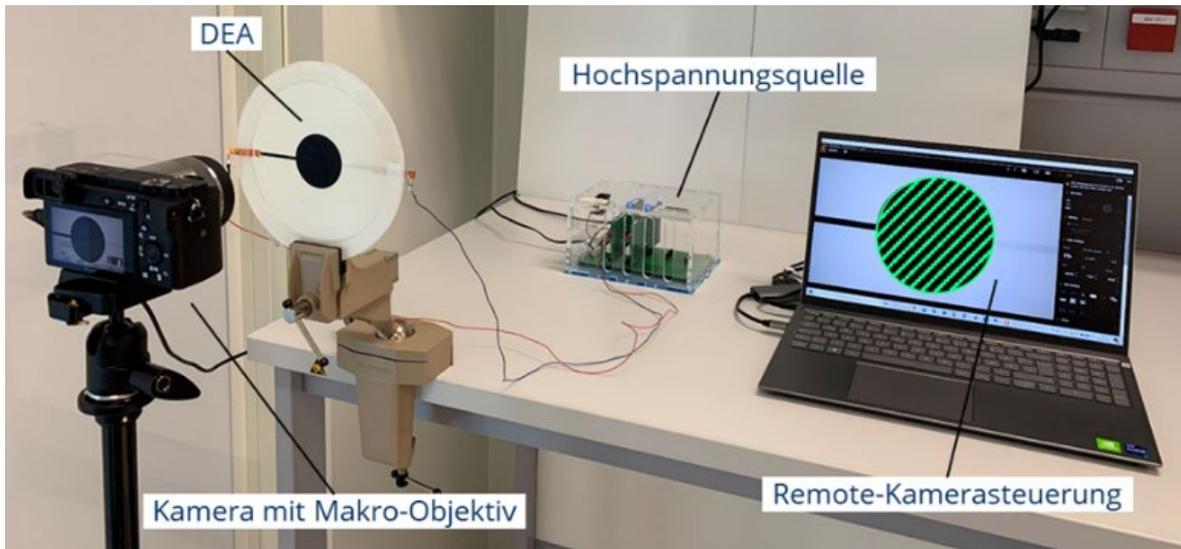


Abbildung 3: Messaufbau für die elektromechanische Charakterisierung von kreisförmigen DEA auf PUR-Basis.

2.5.1.2 Rechteckiger Aktor

Zu Vergleichszwecken wurde ein weiteres planares Aktordesign auf Basis einer rechteckigen Grundgeometrie entwickelt. Hierfür wurde eine 0,2 mm dünne PUR-Folie in eine rechteckige Probe von 50 x 18 mm geschnitten. Das mit Carbon-Nanotubes (CNT) gefüllte Silikon Sylgard® 184 wurde als dünne Elektrodenschicht auf die Vorderseite der Probe aufgetragen. Die Elektrode wurde dann bei 80°C ausgehärtet. In ähnlicher Weise wurde eine dünne Elektrodenschicht auf die Rückseite der Probe aufgetragen und ausgehärtet. Die gegenüberliegenden Elektroden überlappen sich in der Mitte des dielektrischen Elastomers, so dass ein rechteckiger Aktor mit planarer Konfiguration entsteht (siehe Abb. 4).

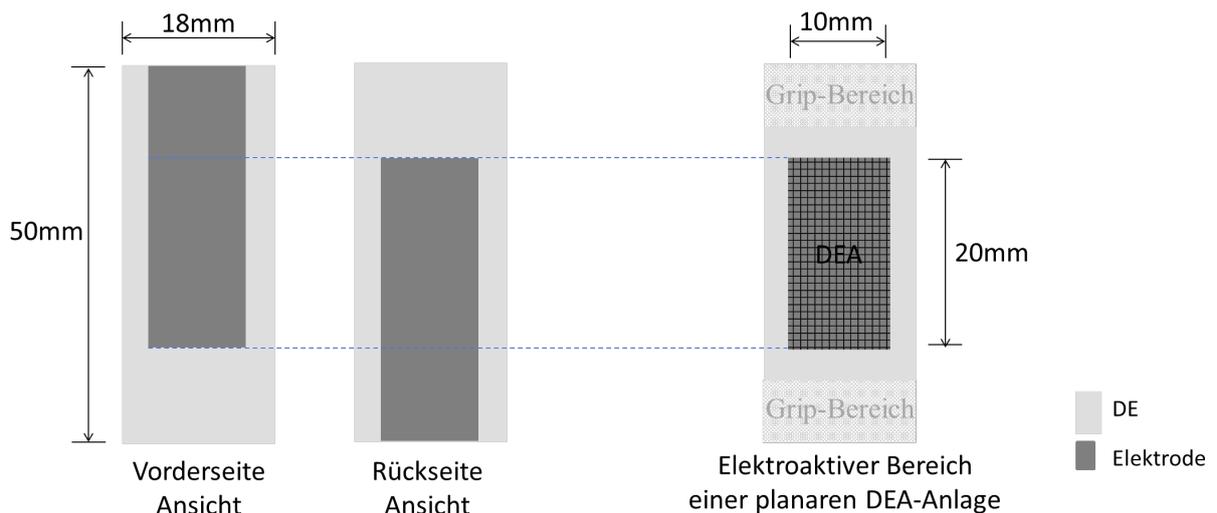


Abbildung 4: Konstruktion eines planaren rechteckigen Aktors auf PUR-Basis.

Ein am IPF entwickelter und gefertigter Smart Rubber Analyzer (SRA) wurde verwendet, um das elektromechanische Verhalten der rechteckigen Aktoren in Form einer Verformungskraft zu untersuchen. Der rechteckige Aktor wurde im SRA eingespannt (siehe Abb. 5) und für die Prüfung des Aktorverhaltens uniaxial auf 10 % Dehnung vorgedehnt. Anschließend wird der DEA über die im SRA integrierte

Hochspannungsquelle einem Spannungsimpuls ausgesetzt. Dies führt zu einer Dickenreduktion des Dielektrikums und somit zu dessen Ausdehnung in transversaler und longitudinaler Richtung. Daraus folgt eine Reduktion der im nicht aktivierten vorgedehnten Zustand anliegenden Verformungskraft. Die Amplitude des Spannungsimpulses wird schrittweise von 1 kV bis 10 kV erhöht. Dabei wird die entsprechende Änderung der Verformungskraft bei elektromechanischer Betätigung aufgezeichnet.



Abbildung 5: Smart Rubber Analyzer und vorgedehnter rechteckiger DEA auf PUR-Basis.

2.5.2 Faserartige, koaxiale Elastomer-Aktoren

Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau und die Funktionsweise der zu entwickelnden koaxialen DEA in Faserform. Bei dieser Aktorkonfiguration wurden sowohl feste als auch flüssige Elektrodenkonfigurationen betrachtet und jeweils technologische Lösungen zu deren Herstellung erarbeitet.

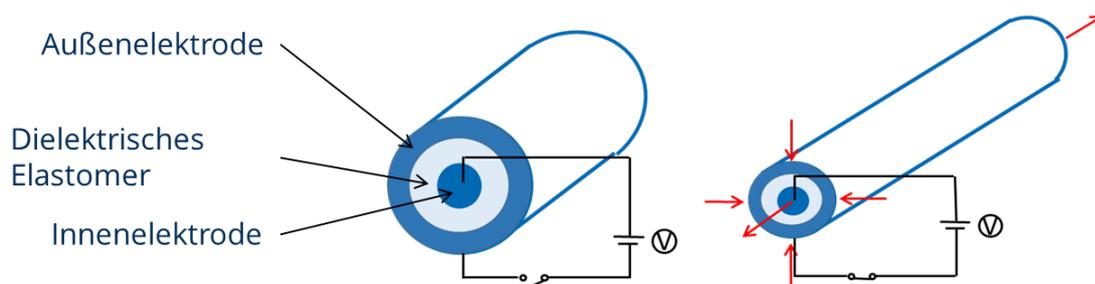


Abbildung 6: Aufbau und Funktionsweise koaxialer DEA in Faserform.

2.5.2.1 Festelektroden basierte Aktoren

Um die Innenelektrode und das umgebende Dielektrikum herzustellen, werden in einem Bikomponentenschmelzspinnverfahren (Biko-Spinnen) ein TPU-CNT-Compound und reines TPU gemeinsam zu einem Biko-

Filamentgarn in einer Kern-Mantel-Konfiguration verarbeitet. Dabei wird das TPU-CNT-Compound im Filamentkern eingesetzt und bildet so eine elastische, elektrisch leitende Innenelektrode. Im Filamentkern wird reines TPU ausgesponnen, sodass um den elektrisch leitenden Filamentkern eine elektrisch isolierende Schicht als Dielektrikum gebildet wird. Abbildung 7 stellt lichtmikroskopische Aufnahmen verschiedener Filamentspezifikationen gegenüber. Zu erkennen ist dabei, dass sich die CNT im Filamentkern ansammeln, während sich im äußeren Bereich eine Schicht aus nahezu reinem TPU bildet. Dieses Verhalten ist umso stärker ausgeprägt, je mehr CNT im versponnenen Compound enthalten sind. In Abbildung 7a-b ist zu erkennen, dass bei einem CNT-Gehalt von 2 bis 4 Masse-% die CNT-Konzentration zwar in radialer Richtung abnimmt, jedoch bis zum äußeren Filamentrand CNT im gesamten Querschnitt enthalten sind. Die in Abbildung 7c-d dargestellten Spezifikationen mit 6 Masse-% CNT zeigen, dass in den Filamentrandbereichen keine elektrisch leitenden Partikel mehr enthalten sind und sich in diesen äußeren Bereichen eine Schicht aus fast reinem TPU bildet.

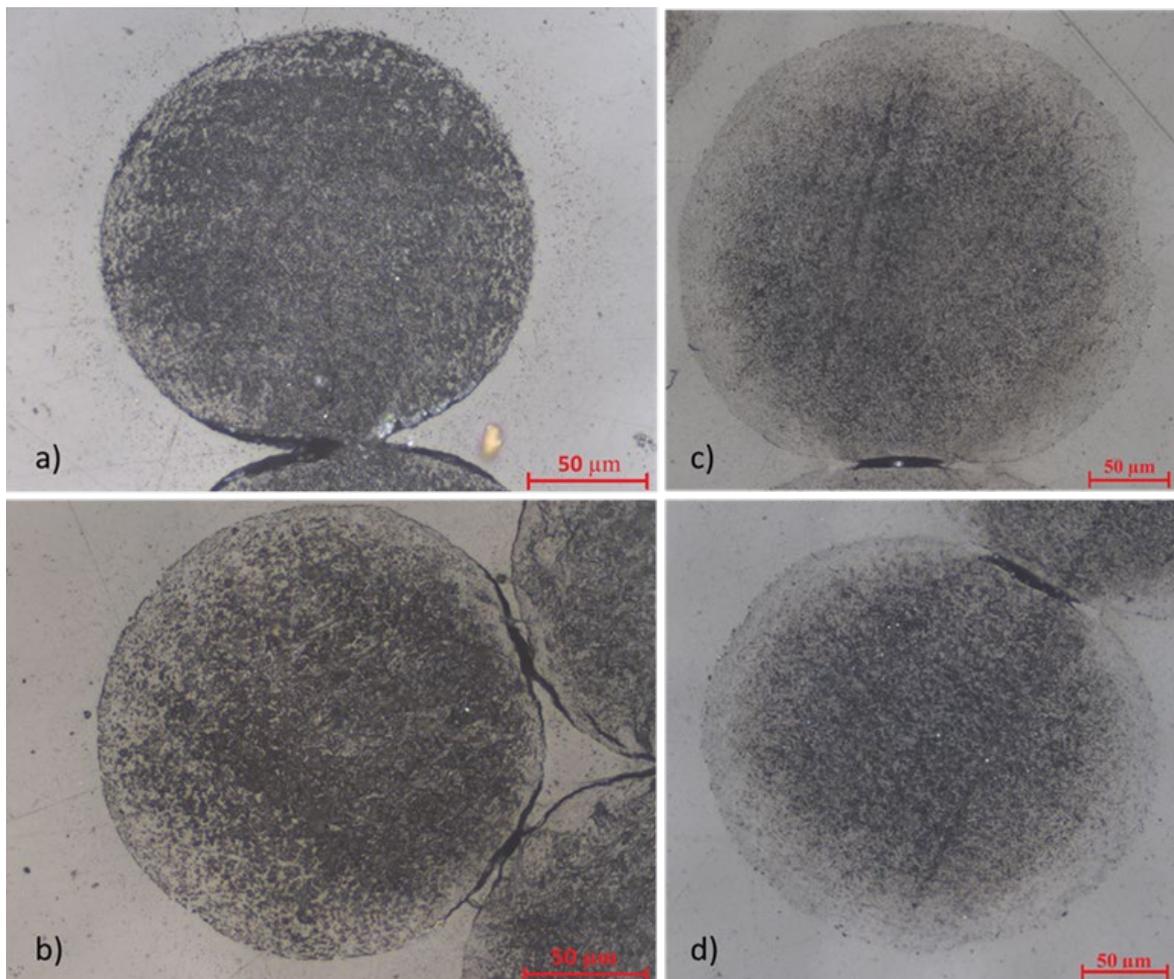


Abbildung 7: Lichtmikroskopieaufnahmen von TPU-CNT-Biko-Filamenten, a) CNT-Gehalt: 2 Masse-%, Abzug: 37 m/min; b) CNT-Gehalt: 4 Masse-%, Abzug: 30 m/min; c) CNT-Gehalt: 6 Masse-%, Abzug: 10 m/min; d) CNT-Gehalt: 6 Masse-%, Abzug: 17 m/min.

In einem weiteren, nachgelagerten Prozessschritt wird die Außenelektrode auf das schmelzgesponnene Kern-Mantel-Filament aufgetragen. Dabei handelt es sich um eine elastische, elektrisch leitende Beschichtung, welche auf TPU und CNT basiert. Die Schicht der Außenelektrode wurde im Tauchverfahren hergestellt. Zur Herstellung der Beschichtungslösung werden die beiden Ausgangsstoffe Desmopan 9370A und Plasticyl TPU1001 in N-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP) gelöst. Garne, bestehend aus mehreren Kern-Mantel-Filamenten, werden kurz in die Beschichtungslösung getaucht. Nach dem Herausnehmen aus der Lösung wird ein Koagulationsprozess durchgeführt, indem die beschichteten Garne 60 s lang in 50

°C warmes Wasser gelegt werden. Dabei wird das NMP aus der Beschichtung ausgefällt, und nur der Feststoffgehalt (FG) verbleibt als Beschichtungsmasse auf den Filamenten. Anschließend werden die Garne bei Raumtemperatur und ausreichender Belüftung 30 Minuten lang getrocknet. Sollen größere Beschichtungsmassen aufgebracht werden, können die Schritte Tauchbeschichtung und Koagulation beliebig oft wiederholt werden. Abbildung 8 zeigt Schliffbilder der beschichteten Garne. Die Bilder zeigen deutlich, dass die Schichtdicke mit zunehmendem Feststoffgehalt durch wiederholte Tauchbeschichtungs- und Koagulationsschritte zunimmt.

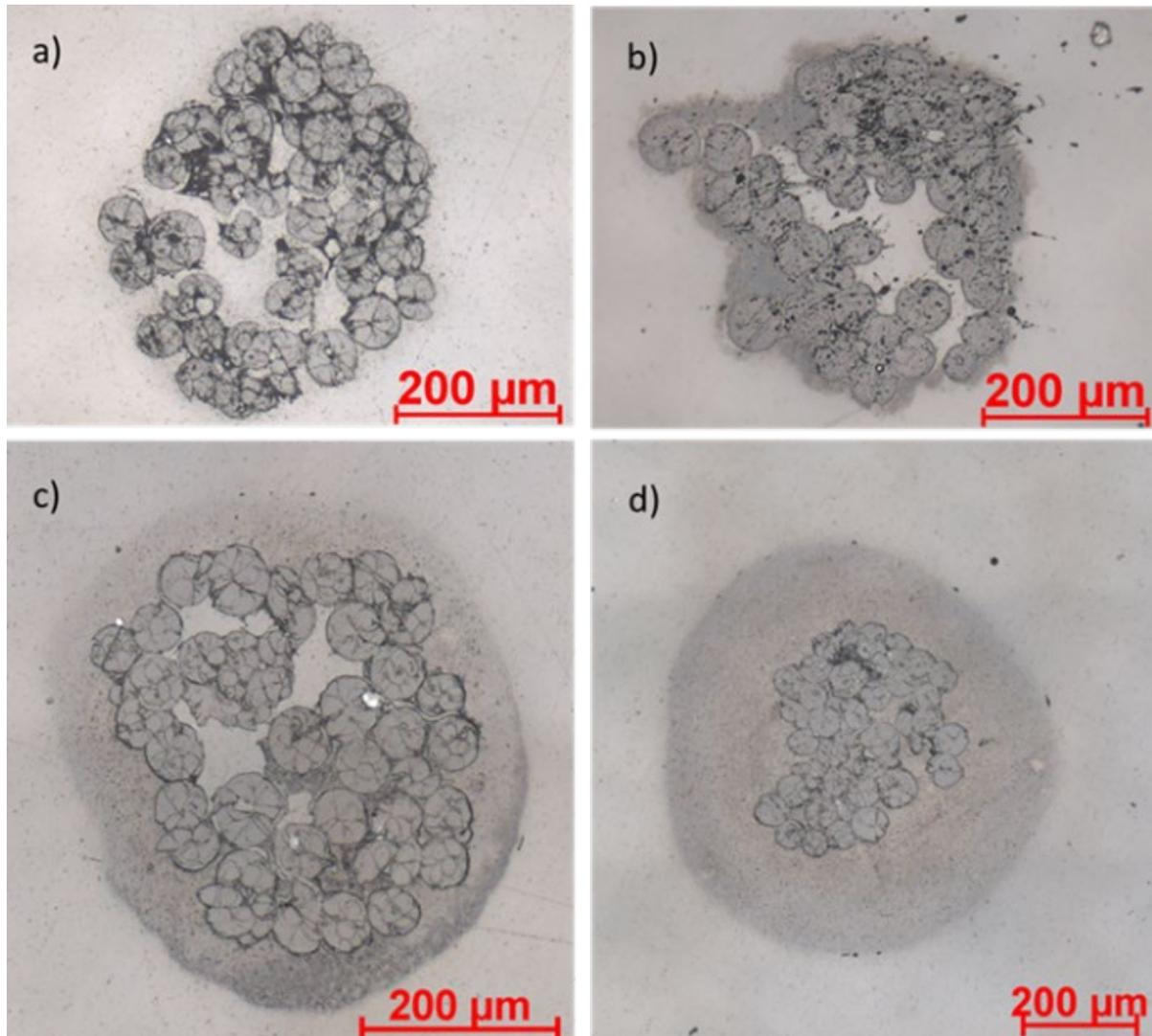


Abbildung 8: Lichtmikroskopische Aufnahmen beschichteter TPU-Garne, Beschichtungsspezifikationen: a) 2 Masse-% FG, 10 Masse-% CNT im FG; b) 6 Masse-% FG, 10 Masse-% CNT im FG; c) 8 Masse-% FG, 10 Masse-% CNT im FG; d) 10 Masse-% FG, 10 Masse-% CNT im FG.

2.5.2.2 Flüssigelektroden basierter Aktor

Neben dem koaxialen Aktor mit deformierbaren Festelektroden können auch DEA mit einer flüssigen Innen- und/oder Außenelektrode realisiert werden. Abbildung 9 zeigt ein Schema des Aufbaus eines solchen Aktors mit flüssigen Innen- und Außenelektroden, wobei das Flüssigmetall Galinstan als Innenelektrode und Kochsalzlösung als Außenelektrode verwendet wird.

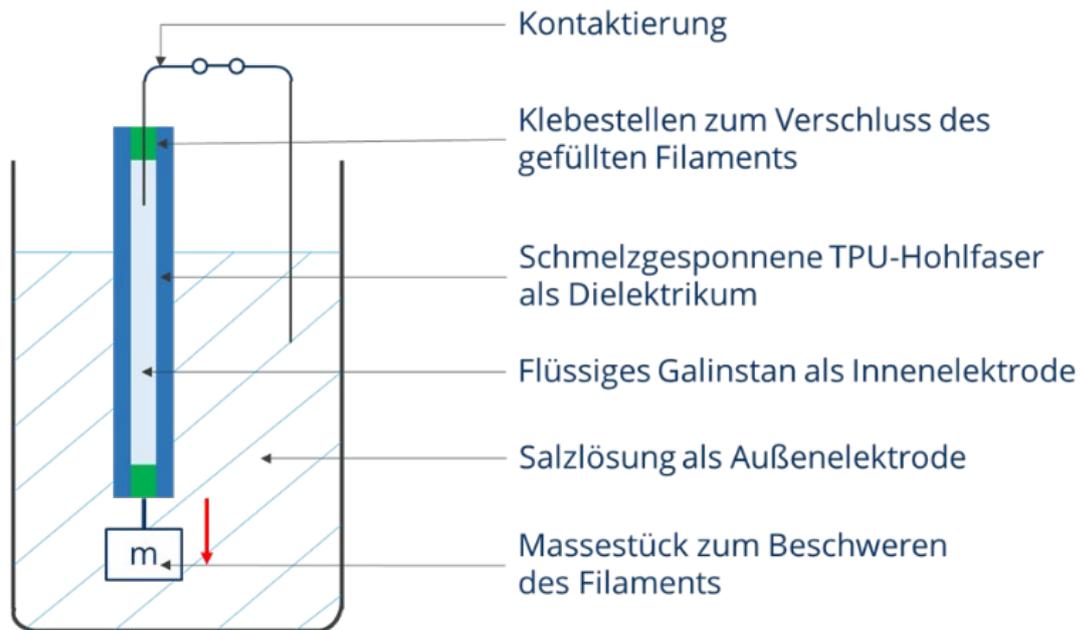


Abbildung 9: Faserförmiger DEA mit flüssiger Innen- und Außenelektrode

Um ein mit Galinstan gefülltes Filament herzustellen, wird zunächst ein Kern-Mantel-Filament mit TPU im Mantel und Polyvinylalkohol (PVA) im Kern in einem Biko-Spinnverfahren gesponnen. PVA ist ein wasserlösliches Polymer, das nach dem Spinnprozess aus dem Filament extrahiert werden kann. Zu diesem Zweck werden die gesponnenen Filamente in Abschnitte definierter Länge geteilt und für 5 Tage in ein mit Wasser gefülltes Ultraschallbad gelegt. Abbildung 10 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines hohlen Filaments, nachdem die Kernkomponente herausgelöst worden ist.

Die TPU-Hohlfilamente werden dann mit Hilfe einer Einwegspritze und Kanüle mit dem Flüssigmetall Galinstan gefüllt und mit UV-härtendem Klebstoff flüssigkeitsdicht verschlossen. Beim Verschließen des Filaments muss darauf geachtet werden, dass die Innenelektrode auch nach dem Aushärten des Klebers noch zuverlässig kontaktiert werden kann. Deshalb wird ein zur Kontaktierung verwendeter Metalldraht direkt mit eingeklebt.



Abbildung 10: Mikroskopische Aufnahme eines TPU-Hohlfilaments nach Ablösung der PVA-Kernkomponente.

2.6 Hyperelastisches Materialmodell zur FEM-Simulation der Aktorfunktion

Zur Vorhersage der elektrostatischen Aktorfunktion und zur Optimierung der Material-, Prozess- und Strukturparameter für eine anwendungsspezifische Aktorkonstruktion werden zunächst Materialdaten prüftechnisch für drei funktionsrelevante Verformungsarten erfasst und ein geeignetes hyperelastisches Materialmodell identifiziert. Abbildung 11 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Charakteristik bei uniaxialer (ua), äquibiaxialer (eb) und reiner Scher-Belastung (ps) von ungefülltem PUR und ihre hyperelastische Kurvenanpassung unter Verwendung eines Mooney-Rivlin-Modells mit fünf Parametern. Es wird gezeigt, dass dieses Modell die mechanische Reaktion aller drei Verformungszustände zwischen 20 % bis 60 % Dehnung, also im Arbeitsbereich des Aktors, sehr genau reproduzieren kann.

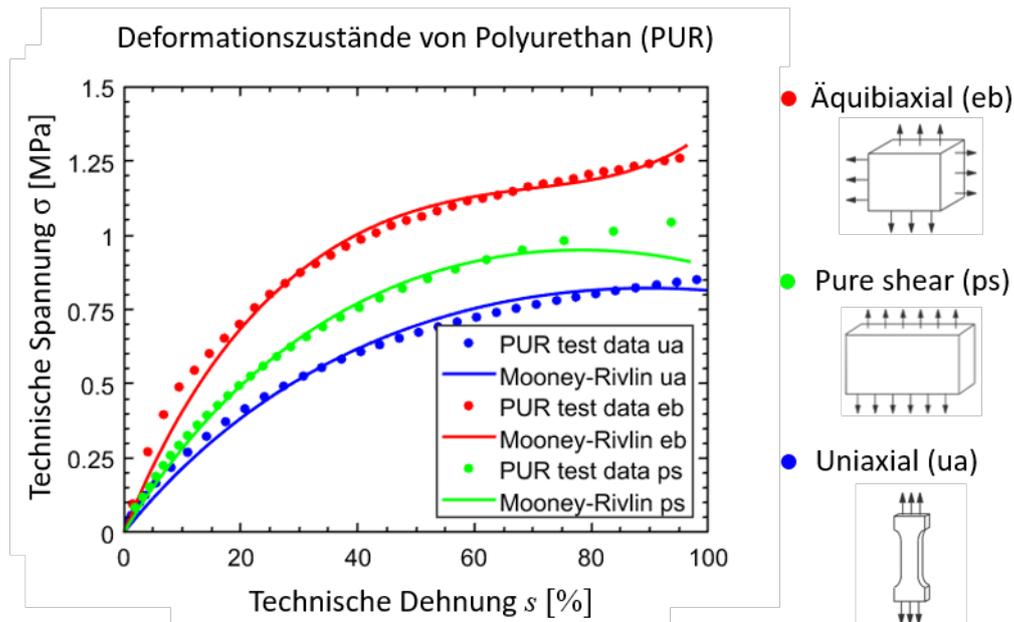


Abbildung 11. Spannungs-Dehnungs-Testdaten von Polyurethan für die Beanspruchungszustände uniaxial, äquibiaxial und reine Scherung (pure shear) und Kurvenanpassung unter Verwendung eines Fünf-Parameter-Mooney-Rivlin-Modells.

2.7 Konstruktion eines textilbasierten Funktionsdemonstrators

2.7.1 Glasfaser-Elastomer-Verbundfolie

Der Faser-Elastomer-Verbund besteht aus einer unidirektionalen Gestrickstruktur mit Schussfäden aus Glasfaserrovings. Die parallele Anordnung der Rovings wird durch einen Maschenfaden definiert. Als Matrixelastomer wurde Sylgard 184 Silikon verwendet. Nach der Silikonvernetzung wurde der Glasfaserverbund in 5 cm breite Streifen geschnitten (Abb. 12). Durch die unidirektionale Faseranordnung entsteht ein Verbund mit anisotropen Eigenschaften, die insbesondere Biegeverformungen quer zur Faserlängsrichtung zulassen.

GF-verstärktes Gestrück (ITM) GF-Orientierung

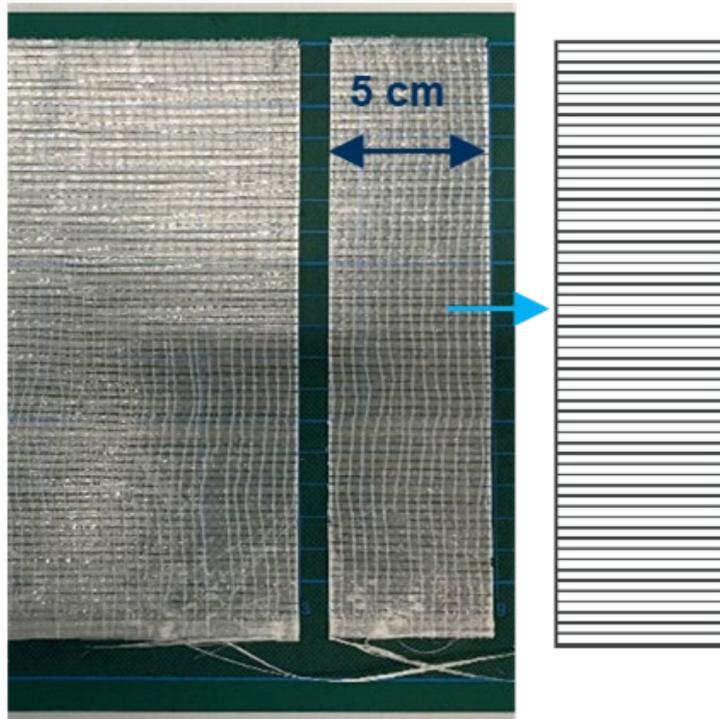


Abbildung 12: Glasfaserverstärktes Gestrück mit Sylgard 184 Elastomermatrix.

2.7.2 DEA mit Carbonfaser-Elektroden

Zur Realisierung der elastischen FKV-Strukturen wird ein Silikonmaterial als elastomere Matrix verwendet. Technologisch wird dazu ein Filmziehergerät mit zugehörigem Rakel eingesetzt. Mit dieser Technologie können textile Verstärkungshalbzeuge mit niedrigviskosen Elastomeren infiltriert und vorkonsolidierte Bauteile in einer Laborumgebung miteinander verbunden werden. Abbildung 13 zeigt die Infiltration einer Gelegestruktur aus unidirektional angeordneten Carbonfasern (UD-CF-Gelege) mit einem Zweikomponenten-Gießsilikon.

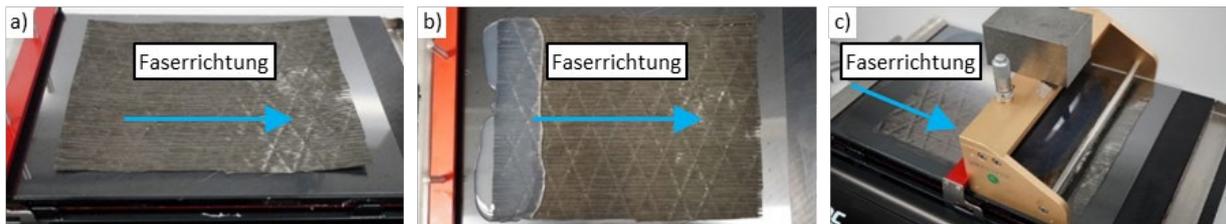


Abbildung 13: Filmziehergerät zur Infiltration textiler Halbzeuge mit niedrigviskosen Elastomeren. a) Positionierung einer exemplarischen Textilstruktur (UD-CF-Gelege) mit Faserlängsrichtung parallel zur Rakelrichtung auf einer Trägerfolie, b) Verteilung des Gießsilikons SF00 im Bereich der Startposition des Rakels, c) Bedeckung mit weiterer Trägerfolie und Rakeln mit Zusatzgewicht in Faserlängsrichtung.

Ein rechteckiges Stück kommerzielles UD-CF-Gelege (ZOLTEK PX35) wird so auf eine DIN A4-Trägerfolie (PET-GAG) gelegt, dass die Faserlängsrichtung parallel zur Rakelrichtung verläuft (siehe Abb. 13a). Das Gießsilikon (SF00) wird im Bereich der Ausgangslage des Rakels auf dem UD-CF-Gelege verteilt (siehe Abb. 13b). Anschließend werden die Komponenten mit einer weiteren PET-GAG-Folie abgedeckt, der Rakel (mit einer Spaltbreite von 0 mm und Zusatzgewicht) aufgelegt und der Infiltrationsvorgang mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/s durchgeführt (siehe Abb. 13c). Anschließend wird das infiltrierte UD-CF-Gelege, das sich noch zwischen den beiden Trägerfolien befindet, für 15 Minuten in einem Wär-

meschrank bei 55 °C gelagert. Nachdem das Silikon vernetzt ist, werden die beiden Trägerfolien entfernt. Das Ergebnis ist ein einstufiger Faser-Elastomer-Verbund mit einer Schichtdicke von ca. 250 µm, der sich zum Aufbau kinematischer Strukturen eignet. Das infiltrierte UD-CF-Gelege wird als Elektrodenelement verwendet (siehe Abb. 14). Zur Herstellung der oberen Elektrode wird die Elektrodengeometrie mit einem Skalpell aus dem infiltrierte Gelege ausgeschnitten und der in Abbildung 14 rot markierte Stabilisierungsfaden mit einer Pinzette entfernt. Dadurch lässt sich die Elektrode bei Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung sehr leicht verformen, ohne dass es zu Einschnürungen in Faserrichtung kommt. Bei der Herstellung der unteren Elektrode wird eine 100 µm dicke Silikonfolie (Elastosil 2030, Wacker) mit dem oben beschriebenen Infiltrationsprozess mit dem UD-CF-Gelege verbunden. Die Silikonfolie dient als elastisches Dielektrikum für den späteren DEA. Nach der Vernetzung erfolgen der Zuschnitt und die Entfernung des Stabilisierungsfadens. In einem weiteren Prozessschritt werden die obere und untere Elektrode übereinander ausgerichtet und auf einer Trägerfolie fixiert. Durch Zugabe von Gießsilikon, Abdecken mit einer weiteren Trägerfolie und Rakeln mit dem Filmziehergerät erfolgt die Verbundherstellung zum DEA.

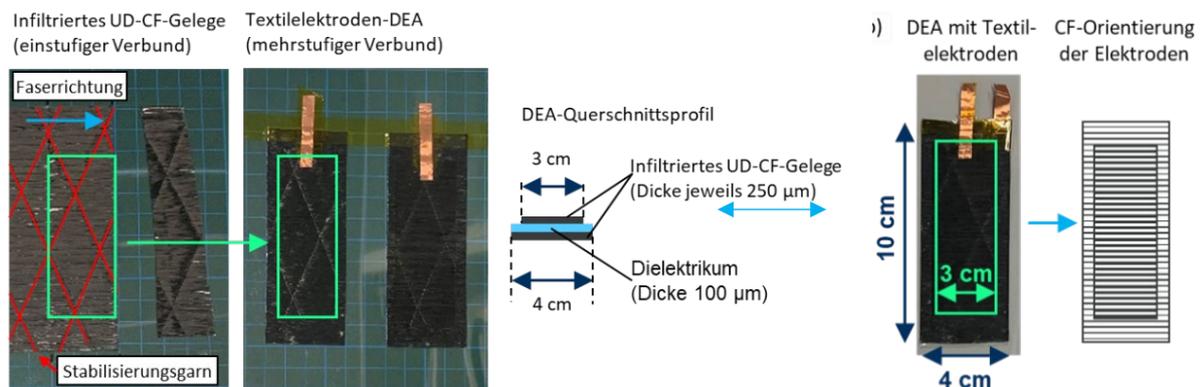


Abbildung 14: Aufbau eines Textilelektroden-DEAs (mehrstufiger Verbundaufbau).

2.7.3 Funktionsdemonstrator

Für den Aufbau der Funktionsdemonstratoren wurden ein Glasfaser-Elastomer-Verbund (Silikonelastomer-infiltrierte Glasfasergestrick) und ein mit textilen CF-Elektroden versehener DEA verwendet. Beide Komponenten sowie deren Faserorientierung und Abmessungen sind in Abbildung 15 dargestellt.

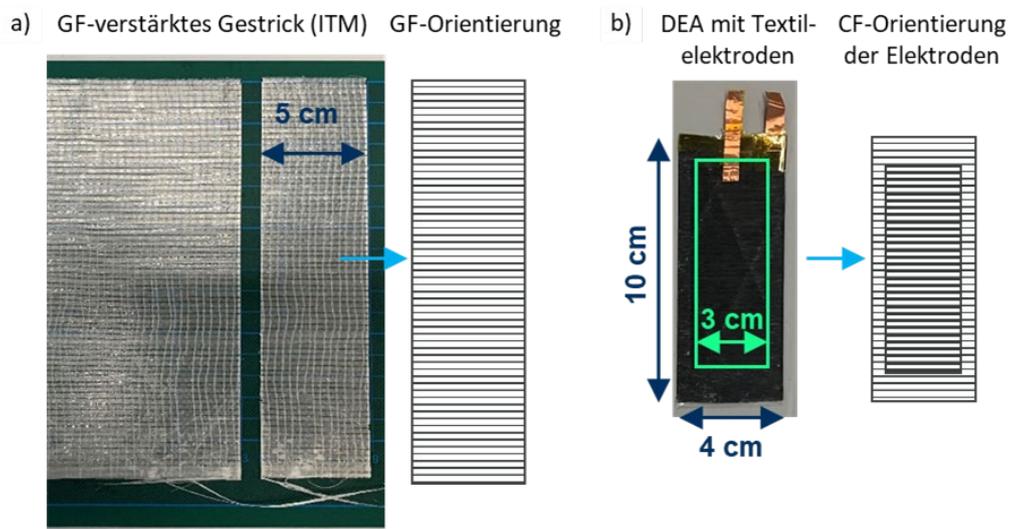


Abbildung 15: Komponenten zum Aufbau von Funktionsdemonstratoren. a) Unidirektional verstärktes Gestrick aus Glasfaserrovings infiltrierte mit Sylgard 184-Elastomermatrix, b) DEA mit Carbonfaser-Elektroden.

Abbildung 16 zeigt die Herstellung eines Funktionsdemonstrators aus den oben beschriebenen Komponenten DEA mit Carbonfaser-Elektroden und Glasfaser-Elastomer-Verbund. Der Glasfaserverbund wurde mit Kapton-Klebeband auf einer PET-GAG-Trägerfolie fixiert. Der ungedehnte textile DEA wurde dann auf dem Glasfaserverbund so ausgerichtet, dass die Kohlenstofffasern der Elektroden parallel zu den Glasfasern verlaufen (siehe Abb. 16a). Es folgte eine uniaxiale Vordehnung des aktiven DEA-Bereichs (Verstreckgrad ca. 1,3), um die Schichtdicke des Dielektrikums zu reduzieren und somit den mechanischen Arbeitspunkt zu definieren. Der vorgedehnte DEA wurde mit Kaptonband auf dem Glasfaserverbundwerkstoff fixiert und mechanisch mit dem Glasfaserverbundwerkstoff verbunden, indem die Struktur mit Hilfe eines Filmziehgeräts in das Gießsilikon SF00 eingebettet wurde (siehe Abb. 16b). Nach der Vernetzung des Silikons wurde der Demonstrator von der Trägerfolie entformt, indem überschüssiges Material mit einem Skalpell entfernt wurde. Aufgrund der DEA-Vordehnung und der elastischen Rückstelleigenschaften des Dielektrikums rollt sich der Glasfaser-DEA-Verbund nach der Entformung auf (siehe Abb. 16c).

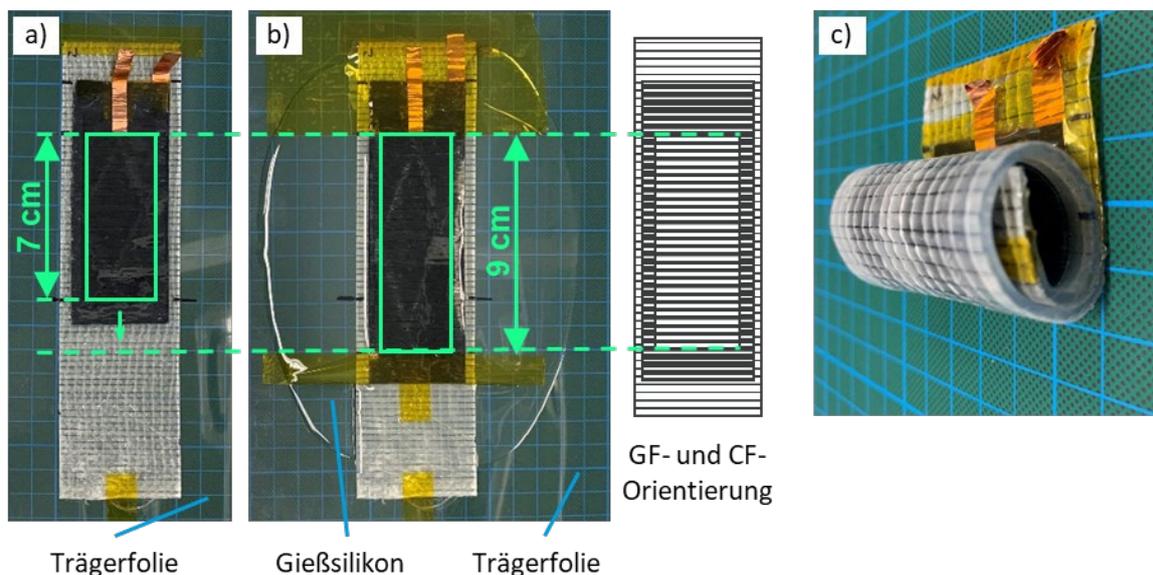


Abbildung 16: Herstellung eines Funktionsdemonstrators aus Glasfaser-Elastomerverbund und Textilelektroden-DEA. a) Positionierung des DEAs auf dem Glasfaserverbund, b) uniaxiale Vorverstreckung des DEAs und Einbettung des Aufbaus in das Gießsilikon SF00, c) aufgerollter Glasfaser-DEA-Verbund infolge der elastischen Rückstellung des Dielektrikums.

Zur Evaluierung des Verarbeitungsverhaltens der DEA-Garne bei der Integration in flächige textile Strukturen und zur Abschätzung ggf. erforderlicher Anpassungen (z. B. der Garnzuführungselemente) wurden zunächst Versuchsreihen durchgeführt, in denen die als Aktor fungierenden DEA-Garne als Teil- bzw. Schuss in einfache Maschenstrukturen eingearbeitet wurden. Die Einbindung der DEA-Garne als Schuss bzw. Teilschuss, d.h. quer zur Produktions- bzw. in Maschenreihenrichtung wurde dabei im Vergleich zur Einbindung in Produktions- oder Maschenstäbchenrichtung aufgrund der höheren Flexibilität als Vorzugslösung ausgewählt. Die Einarbeitung in Kett- oder Maschenstäbchenrichtung ist ebenfalls möglich, allerdings prinzipbedingt nur in gestreckter Form, d. h. als ununterbrochener Faden. Eine Einarbeitung als Maschenfaden ist aufgrund der Feinheit der im Rahmen des Projektes hergestellten Multifilamentgarne aus DEA nicht möglich, da diese in die Nadelköpfe der Stricknadeln nicht zuverlässig eingelegt werden können, ohne dass einzelne Filamente nicht erfasst werden. Das führt u. a. zu einer ungleichmäßig ausgebildeten Maschenstruktur.

Die Integration von DEA-Funktionsgarnen in textile Flächengebilde wurde mit Hilfe der Mehrlagenstricktechnik (MLG-Technologie) in Gestrickstrukturen auf einer konventionellen Flachstrickmaschine Steiger Aries 3D Technologie (Steiger Participations SA) untersucht und realisiert. Zu diesem Zweck wurde ein Glasfaser-Roving (Tt=410tex) in Kett- und Schussrichtung und als Maschenfaden ein Garn

aus Elastan für die Herstellung funktioneller Mehrlagengestricke (fMLG) verwendet, in die bei der Flächenbildung DEA-Garne ($T_t \geq 3.000 \text{ tex}$, 60 Filamente, $\varnothing_{\text{Filament}} \approx 200 \mu\text{m}$) in definierten Orientierungen integriert werden, um damit das Verformungsverhalten in daraus hergestellten Glasfaser-Elastomerverbund gezielt einstellen zu können. Es wurden die in Abb. 17 dargestellten Anordnungen von DEA-Garnen in fMLG-Konstruktionen konzipiert und umgesetzt.

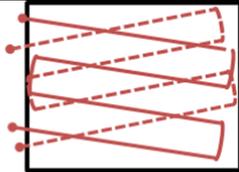
Funktionalisierte MLG (fMLG)	1	2	3
Querschnitt			
Draufsicht			
Kontaktierung	beidseitig		einseitig
Verformung	Biegung → Translation		Torsion → Rotation

Abbildung 17: Varianten der fMLG (rot: DEA-Funktionsgarn, Punkte - Kontaktierungsstelle).

Bei der Realisierung von fMLG1 werden die DEA-Fäden als Schuss über die gesamte Breite des Glasfasergestricks eingearbeitet. Abbildung 18a-b zeigt die DEA-Fäden in der 0/90° MLG-Grundstruktur, die als Schuss in jede bzw. jede zweite Maschenreihe eingearbeitet werden. Abbildung 18c zeigt die Einarbeitung des DEA-Garns als mäandrierenden Teilschuss in fMLG2. Aufgrund der Flexibilität der MLG-Technologie bei der Fertigung von mehrlagigen Verstärkungshalbzeugen können die DEA-Aktoren in zwei verschiedenen Tiefenebenen bezogen auf die neutrale Faser in die fMLG integriert werden, so dass Protagonist-Antagonist-Anordnungen zuverlässig realisiert werden können. Das fMLG3 wird aus mehreren Einzellagen der fMLG2 durch entsprechende Schichtung (Stacking) realisiert. Diese Funktionstextilien können mit Flüssigkautschuk imprägniert werden, so dass adaptive Glasfaser-Elastomerverbundstrukturen in ebener Geometrie entstehen, wie in Abb. 16 dargestellt. Da die in diesem Projekt realisierten DEA-Garne noch keine ausreichende Verformungsarbeit in der makroskopischen Verbundstruktur leisten können, sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, um die Material-, Prozess- und Designvariablen der DEA-Filamente, die große Verformungen aufweisen, nicht nur für die konzipierten einfachen, sondern auch anwendungsorientierten komplexen Bewegungen zu optimieren.

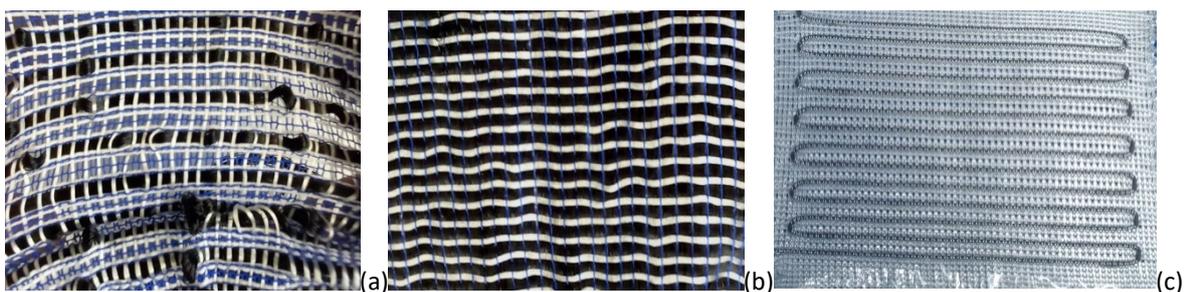


Abbildung 18: fMLG1 mit Einarbeitung des DEA-Garns in jeder 2. (a) bzw. jeder (b) Maschenreihe als Schuss sowie in fMLG2 als mäandrierenden Teilschuss.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Mikroskopische Beobachtungen von Partikeln und gefüllten Elastomeren

Abbildung 19a zeigt das REM-Bild des BT-Pulvers im Anlieferungszustand. Man erkennt die Größenverteilung und die unebene Oberfläche der BT-Partikel. Die BT-Teilchen im Submikron- (weniger als 1

μm) und Mikronbereich (ca. 2-3 μm) mit unregelmäßiger Oberfläche sind durch van-der-Waals-Anziehungskräfte agglomeriert. Während des Mischvorgangs werden die BT-Partikel-Cluster durch die Scherwirkung in einzelne Partikel zerlegt. Diese BT-Partikel scheinen sich homogen in der PUR-Matrix zu verteilen, was wahrscheinlich auf die Hydroxylgruppen an der Oberfläche zurückzuführen ist, die eine höhere Affinität zur polaren Polyurethanmatrix bewirken (siehe Abb. 19b). Die BT-Partikel agglomerieren nicht zu einer kohärenten Füllstoffnetzwerkstruktur und es bilden sich auch keine clusterförmigen Aggregate, vielmehr liegen die Partikel homogen dispergiert vor. Dies ist insbesondere für dynamische Anwendungen des DEA von Vorteil, da somit die für füllstoffverstärkte Elastomere typischen deformationsamplitudenabhängigen Steifigkeitsänderungen bei dynamischer Verformung weitgehend ausgeschlossen werden können.

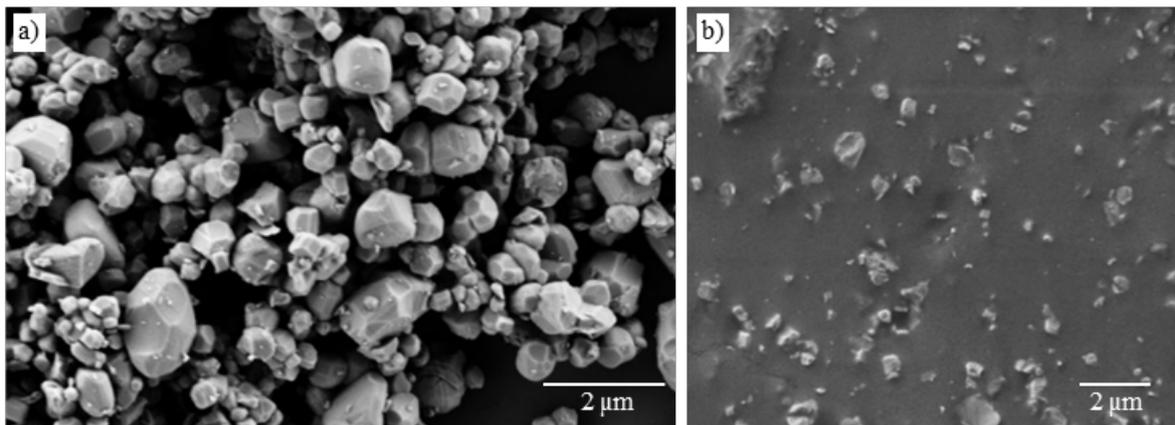


Abbildung 19: REM-Aufnahmen von BT-Partikeln (a) und μBT -gefülltem PUR-Elastomer (b).

3.2 Dielektrisches Verhalten und Spannungs-Dehnungs-Charakteristik der PUR-Elastomer in Abhängigkeit von der Additivierung mit BT

Wie vorher gezeigt, wurde PUR-Elastomer mit BT-Partikeln BaTiO_3 additiviert, um die elektromechanische Aktorleistung zu verbessern. Die Auswirkungen der BT-Partikel auf die dielektrischen Eigenschaften und die Zugfestigkeit von PUR sind in den vergleichenden Diagrammen in Abbildung 20a-b dargestellt. Im Betriebsfrequenzbereich von 10 Hz bis 10 kHz bleibt der Wert der relativen Permittivität (ϵ_r) für alle PUR-Mischungen nahezu konstant, was auf einen einheitlichen dielektrischen Polarisationsmechanismus hindeutet und für die aufgabenspezifische funktionale Anpassungsfähigkeit und kontrollierbare Kinematik des Aktors relevant ist. Außerdem steigt die relative Permittivität der PUR-Mischungen mit zunehmendem Gehalt an BT-Partikeln, was auf eine höhere Grenzflächenpolarisation in den BT-gefüllten PUR-Elastomeren hinweist. Was das einachsige Zugverhalten betrifft, so zeigen alle untersuchten PUR-Rezepturen die für Elastomere typische S-förmige Spannungs-Dehnungskurve mit großer Verformung. Der Bereich der Zugdehnung, der das Vordehnungsniveau und die spannungsaktivierte Verformung einer gedehnten dielektrischen Elastomerfolie abdeckt, d.h. der erwartete Arbeitsbereich eines Aktors, ist in Abbildung 21b mit dem grauen rechteckigen Bereich hervorgehoben. Interessanterweise verursacht das Vorhandensein der BT-Partikel bis zu einer Dehnung von ca. 250 % keine signifikante Versteifungs- oder Verstärkungswirkung, so dass keine hydrodynamische Verstärkungswirkung (Erhöhung des Elastizitätsmoduls durch Anwesenheit starrer Partikel) beobachtet wird. Dieses Verhalten ist vorteilhaft für den elektromechanischen Wandlereffekt. Die Einarbeitung von BT-Teilchen erhöht die relative Permittivität (ϵ_r) ohne die niedrige Steifigkeit des PUR-Elastomers zu beeinträchtigen, was eine verbesserte Betätigung bei einer geringeren erforderlichen elektrischen Feldstärke ermöglicht (unter der Annahme, dass die DE-Dicke konstant bleibt).

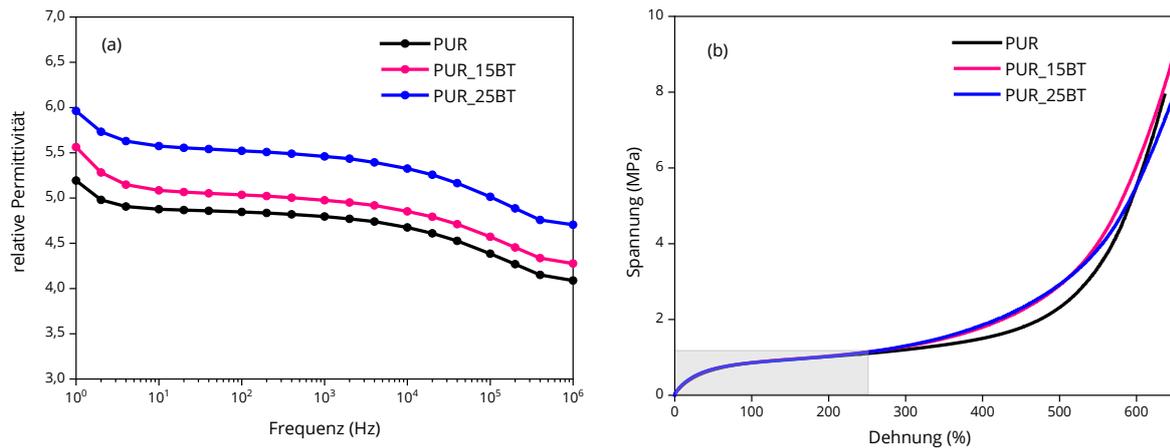


Abbildung 21: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität (a) und Spannungs-Dehnungs-Kurven der PUR-Elastomere mit und ohne BT-Partikel (b).

3.3 Mechanische und elektrische Eigenschaften der TPU-Garne

Die in Tabelle 2 zusammengefassten Ergebnisse der mechanischen und elektrischen Charakterisierung schmelzgesponnener TPU-Garne zeigen, dass die Elastizität der TPU-Garne sehr hoch ist. Mit den elektrisch leitfähigen Spezifikationen von 4 Massenprozent CNTs werden Bruchdehnungen von über 500 % und Elastizitätsmodule von weniger als 30 kPa erreicht. Es wurde festgestellt, dass bei konstantem CNT-Gehalt die Feinheit und die Bruchdehnung mit zunehmender Spinnengeschwindigkeit abnehmen, während der Elastizitätsmodul steigt.

Tabelle 2: Mechanische und elektrische Eigenschaften unterschiedlicher TPU-CNT-Garne.

CNT-Gehalt in Masse-%	Abzugsgeschwindigkeit in m/min	Feinheit in tex	Bruchdehnung in %	E-Modul in kPa	Spezifischer elektrischer Widerstand in Ωcm
0	400	53 ± 2	720 ± 90	37 ± 4	$> 2 \cdot 10^5$
	650	50 ± 5	790 ± 80	22 ± 7	$> 2 \cdot 10^5$
4	12	2100 ± 280	350 ± 40	27 ± 1	590 ± 410
	20	1110 ± 130	510 ± 40	46 ± 3	7950 ± 1840
	30	1210 ± 90	200 ± 30	30 ± 4	6770 ± 1790
5	8	2310 ± 290	290 ± 20	63 ± 3	120 ± 40
	10	2170 ± 420	400 ± 20	46 ± 6	110 ± 40
	15	1660 ± 90	380 ± 40	52 ± 4	2780 ± 260
6	10	2950 ± 210	340 ± 40	45 ± 2	110 ± 30
	15	2390 ± 260	330 ± 10	53 ± 2	940 ± 290
	17	1760 ± 220	290 ± 30	80 ± 3	2540 ± 490

Die inneren Elektrodenfäden für den koaxialen Aktuator müssen in den gewünschten Anwendungsszenarien auch unter großer Dehnung die elektrische Leitfähigkeit beibehalten. Um dieses Verhalten zu analysieren, werden elektromechanische Charakterisierungen durchgeführt, bei denen der elektrische

Widerstand in Abhängigkeit von der aufgetragenen mechanischen Belastung untersucht wird. Die Ergebnisse dieser Charakterisierung sind in Abbildung 21 beispielhaft für Filamente mit 5 Massenprozent CNT zu sehen. Die wichtigste Erkenntnis im Hinblick auf die Verwendung von schmelzgesponnenem TPU-CNT-Elastomer als Innenelektroden ist die Tatsache, dass die elektrische Leitfähigkeit auch bei sehr hohen mechanischen Belastungen von bis zu 100 % relativer Dehnung gegeben ist.

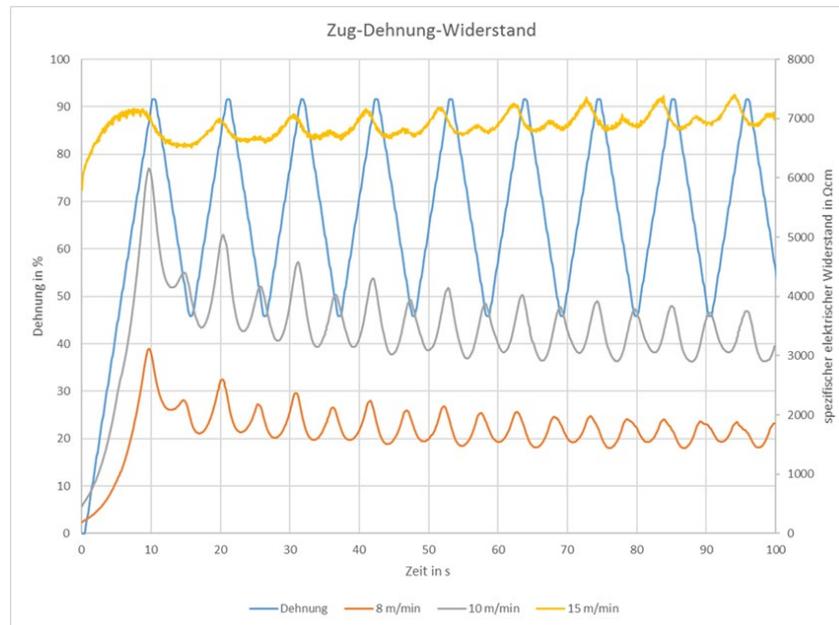


Abbildung 21: Mechanische Dehnung und spezifischer elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Prüfzeit für Filamente mit 5 Masse-% CNT und unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten.

3.4 Elektromechanische Betätigung der dielektrischen Elastomeraktoren

3.4.1 Kreisförmiger Aktor

Aktoren aus ungefülltem, mit 15 phr und mit 25 phr BT-Partikel gefülltem PUR wurden mit dem in Abbildung 3 in Abschnitt 2.5 gezeigten Messaufbau untersucht. Die Elektrodenfläche wurde über einen Zeitraum von 240 s während der Aktivierung und Deaktivierung per Video aufgezeichnet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Abbildung 22a zeigt die experimentellen Daten der zeitabhängigen radialen Dehnung der Elektrode von ungefüllten und BT-gefüllten PUR DEAs bei verschiedenen Spannungspegeln. Mit zunehmendem Anteil an BT-Partikeln ist eine erhöhte Verformung zu beobachten, insbesondere bei Spannungen ab 3000 V. Alle Aktoren zeigen ein viskoelastisches Verformungsverhalten beim Ein- und Ausschalten der Hochspannung. Abbildung 22b zeigt die radiale Elektrodenverformung in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke. Die angelegte elektrische Spannung ist auf die jeweilige DEA-Elastomerdicke (ca. 225 μm) bezogen. Auch diese Grafik zeigt deutlich, dass die Verformung des Aktors mit steigendem BT-Füllstoffgehalt zunimmt, insbesondere bei elektrischen Feldstärken über 15 $\text{V}/\mu\text{m}$. Das beobachtete Verformungsverhalten ist auf die Erhöhung der relativen Permittivität durch die Zugabe von BT-Partikeln zurückzuführen, wobei der Elastizitätsmodul nicht signifikant ansteigt (siehe Abb. 21b). Sowohl für die planaren rechteckigen als auch für die DEA-Aktoren mit kreisförmiger Struktur (Punktkontoren) konnten somit signifikante Verformungen und Kräfteinwirkungen nachgewiesen werden. Es wurde auch gezeigt und quantifiziert, dass bzw. inwieweit ein Additiv mit Bariumtitanatpartikeln zu einer erhöhten Aktorwirkung führt.

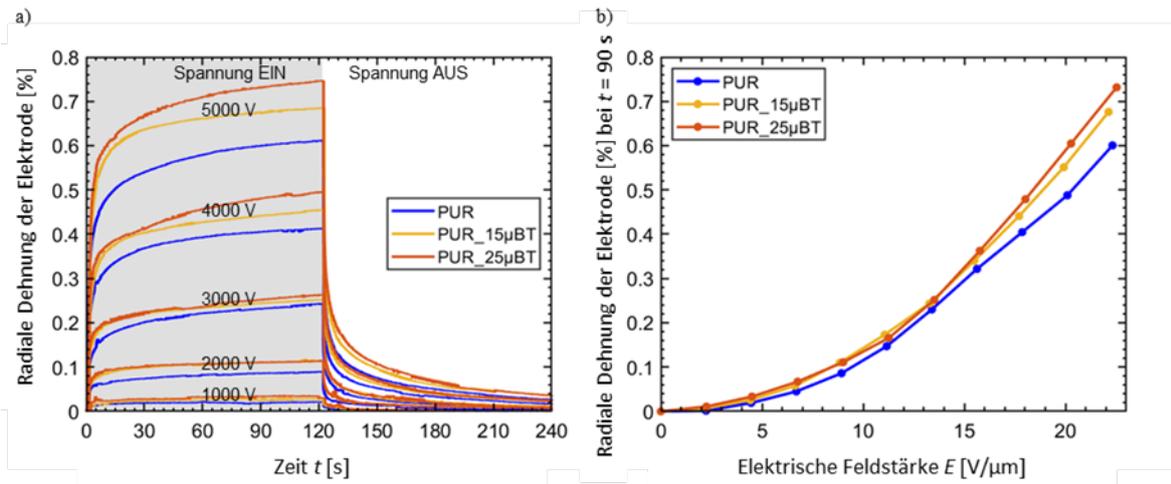


Abbildung 22: Elektrostatisches Aktivierungsverhalten von PUR-basierten DEAs bei verschiedenen elektrischen Spannungen. a) Zeitabhängige Elektrodenverformung, b) feldabhängige Elektrodenverformung bei einer Aktivierungszeit von $t = 90$ s.

3.4.2 Rechteckiger Aktor

Der planare rechteckige Aktor wurde am Smart Rubber Analyzer (SRA) befestigt (siehe Abb. 5) und durch eine Verformungskraft einachsrig auf 10 % Dehnung vorverstreckt. Gemäß dem Funktionsprinzip dielektrischer Elastomeraktoren wurde ein Spannungsimpuls über die Elektrode angelegt und die elektromechanische Betätigung als Änderung der Verformungskraft am SRA aufgezeichnet. Die Amplitude des Spannungsimpulses wurde schrittweise von 1 bis 10 kV erhöht, und die entsprechende Änderung der Verformungskraft wurde aufgezeichnet. Das Funktionsprinzip der SRA und die Ergebnisse der elektromechanischen Auslösetests sind in Abbildung 23 dargestellt. Es wurden sowohl ungefüllte als auch mit Bariumtitanat gefüllte PUR-Aktoren getestet. Die Erhöhung der relativen Permittivität von BT-gefülltem PUR spiegelt sich in einem höheren Beitrag zur axialen Verformungskraft im Vergleich zu ungefüllten dielektrischen Elastomeren wider.

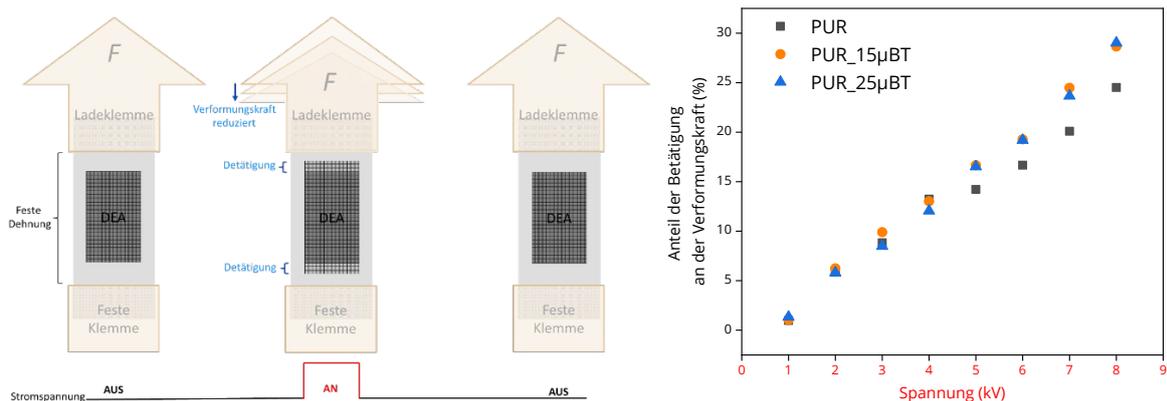


Abbildung 23: Funktionsprinzip des SRA, wobei die elektromechanische Betätigung eine Abnahme der Verformungskraft bewirkt, um die DEA-Probe bei einer festen Verformung zu halten (links), Der zunehmende Anteil der elektromechanischen Betätigung an der Verformungskraft ist als Funktion der angelegten Spannung am planaren DEA dargestellt (rechts).

3.4.3 Koaxialer Aktor in Faserform

Um die Aktorfunktionalität des koaxialen DEA zu analysieren, werden schmelzgesponnene Bikomponenten-Kern/Mantel-Fasern mit einem Kern aus TPU-CNT-Verbindung und einem Mantel aus TPU von

einer flüssigen Außenelektrode aus Kochsalzlösung umgeben. Das Filamentstück in wässriger Umgebung wird mit einem Massestück beschwert, das mit einem Speckle-Muster versehen wurde und während der Aktivierung mit einer Kamera und digitaler Bildkorrelation beobachtet wird. Abbildung 24 veranschaulicht den Versuchsaufbau.

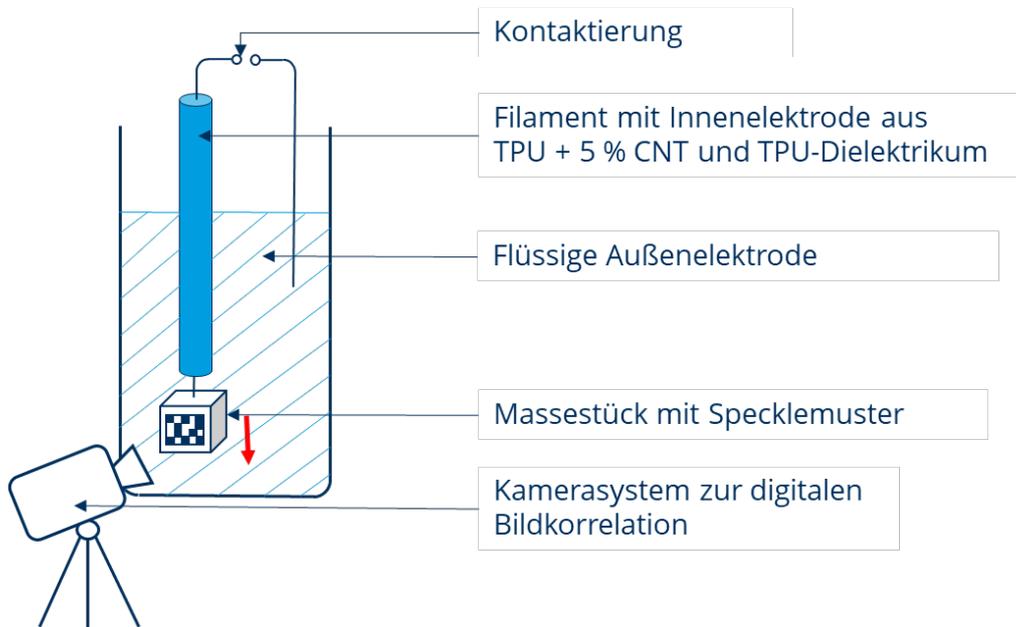


Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Erfassung des aktorischen Potenzials coaxialer DEA.

Wie aus Abbildung 25 ersichtlich ist, wird der Messpunkt bei Anlegen einer elektrischen Spannung von 2 kV um 1 mm verschoben. Wird die elektrische Spannung abgeschaltet, kehrt der Aktuator ungefähr in seine Ausgangsposition zurück. Wird eine elektrische Spannung von 3 kV angelegt, kommt es zum elektrischen Durchschlag durch das Dielektrikum.

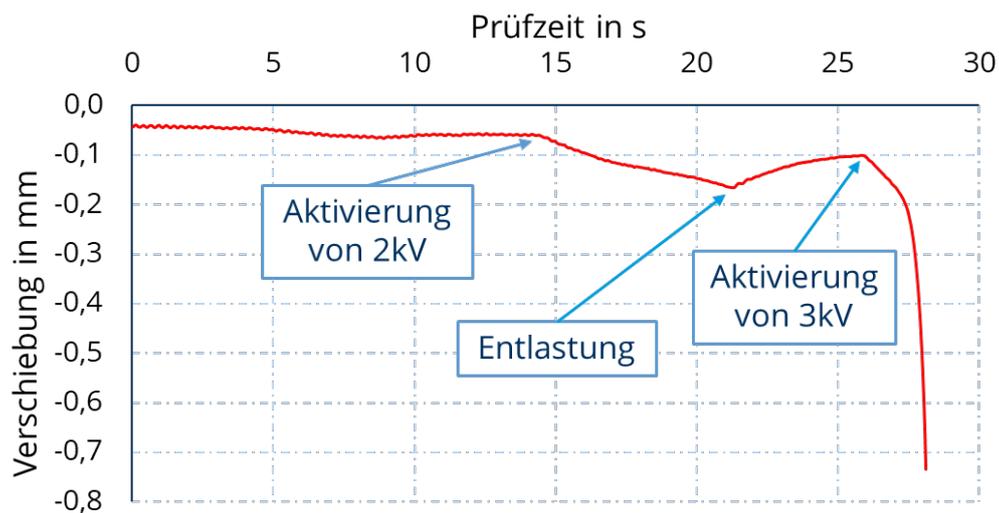


Abbildung 25: Aktorisches Verhalten eines coaxialen DEA.

Damit konnte der aktorische Funktionsnachweis von faserartigen, coaxialen DEA erfolgreich erbracht werden. Die funktionale Optimierung sollte Gegenstand weiterer F&E-Aktivitäten sein.

3.5 FEM-Simulation der Aktorfunktion

Die FEM-Simulation ermöglichte eine phänomenologische Beschreibung der radialen Verformung eines kreisförmigen DEA als Funktion des elektrostatischen Drucks. Die Elektroden aus Kohlenstoffpaste werden als vollständig nachgiebig angenommen, so dass diese die Verformung des PUR-Elastomers im Punktaktor nicht einschränken. Abbildung 26 zeigt ein Beispiel für den experimentellen Aufbau eines planaren Punktaktors und die entsprechende symmetrische Geometrie für die Simulation. Aufgrund des symmetrischen Aktoraufbaus muss nur ein Achtel der Aktorgeometrie mit den entsprechenden Randbedingungen für die FEM-Simulation modelliert werden (Halbierung der Dicke, Viertelung der Kreisfläche). Wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben, werden die mechanischen Eigenschaften des dielektrischen Elastomers durch das hyperelastische Materialmodell berücksichtigt.

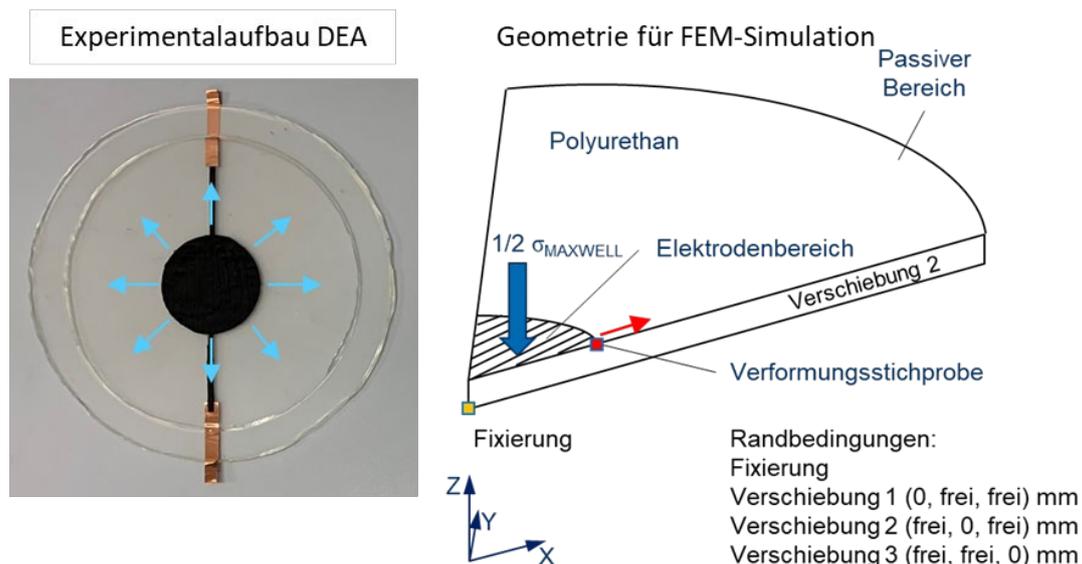


Abbildung 26: Experimentalaufbau und Simulationsgeometrie eines kreisförmigen DEAs.

Die Simulation ist in die drei Zustände Ausgangszustand, Vordehnung und Aktivierung unterteilt (siehe Abb. 27). Der Ausgangszustand ist durch die Abmessungen (Dicke und Radius) des elastischen Dielektrikums im mechanisch ungespannten Zustand definiert. Die radiale Vordehnung der Elastomerfolie bei der Aktorherstellung und der daraus resultierende dreidimensionale Spannungszustand im Elastomer werden in der Simulation berücksichtigt. Zur Ansteuerung wirkt der elektrostatische Druck als Last im Bereich der Elektrodenoberfläche unter Beibehaltung der Vordehnung. Die radiale Aktorverformung wird mit der ANSYS-Funktion "Verformungsprobe" ermittelt [11].

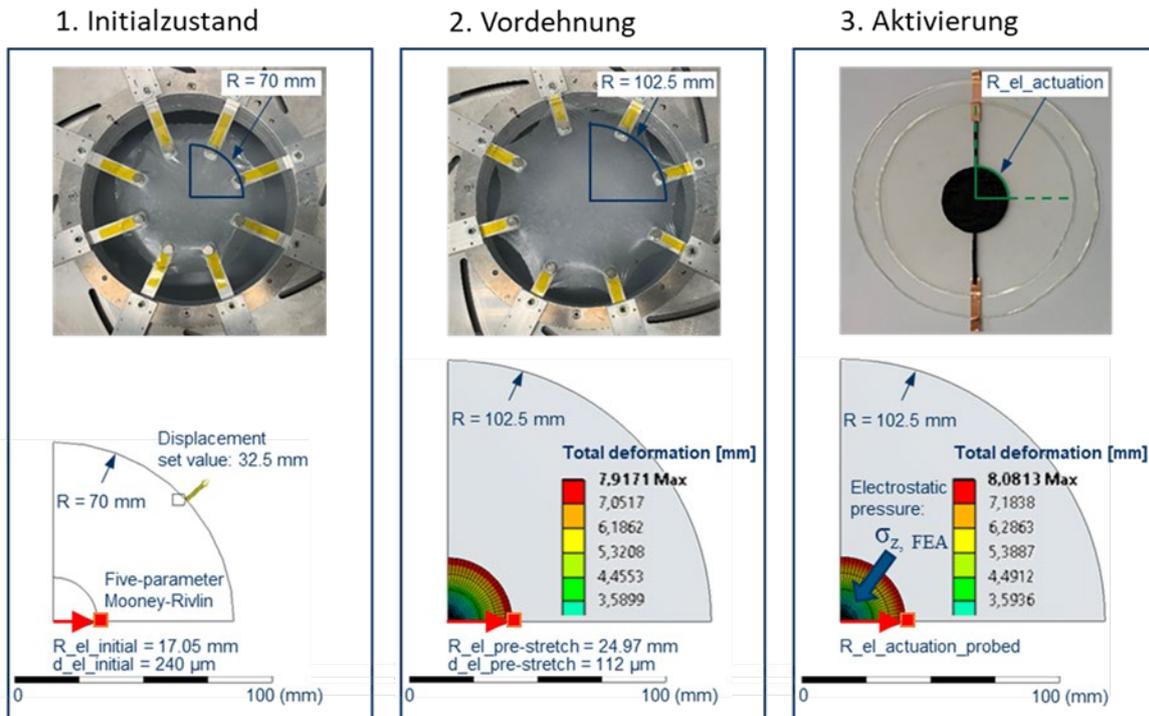


Abbildung 27: FEM-Simulation der radialen Aktordeformation.

Abbildung 28 zeigt die Datenpunkte der FEM-Simulation und des Experiments für einen DEA auf Polyurethanbasis. Es ist zu erkennen, dass die vorgestellte FEM-Simulation den experimentellen Versuch mit wenigen Prozent Abweichung sehr gut abbildet. Diese simulationsgestützte Auslegungshilfe bietet die Möglichkeit, das Aktorpotenzial von Elastomeren unter Berücksichtigung der mechanischen und dielektrischen Materialeigenschaften zu bewerten. Sie kann angepasst werden, um das Design des Aktors für eine bestimmte Funktion zu optimieren.

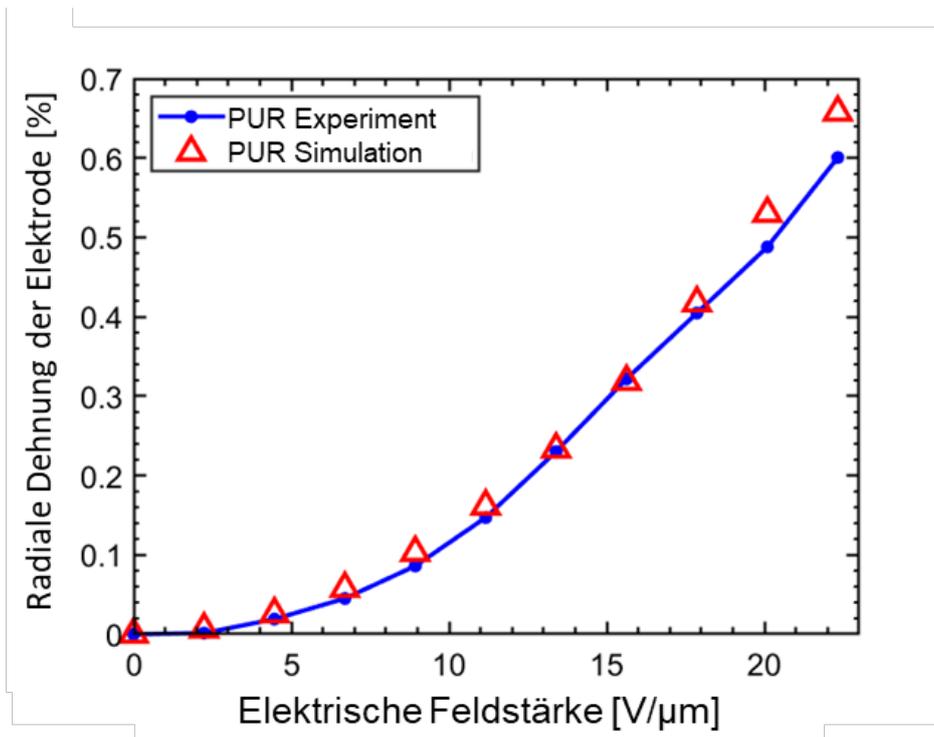


Abbildung 28: Vergleich von FEM-Simulation und experimenteller Erprobung.

3.6 Elektromechanische Betätigung des Funktionsdemonstrators

Für die elektromechanische Prüfung und Charakterisierung des Funktionsdemonstrators wurde dieser durch Anbringen einer zusätzlichen Masse in eine flache Konfiguration gebracht. Im Messaufbau in Abbildung 29a wird dies durch den blauen Bleistift erreicht, der an der Unterkante des Demonstrators befestigt ist. Die Position der Unterkante des Demonstrators wurde mit einem Laserprofilsensor (LJ-V7200, KEYENCE) aufgezeichnet während der DEA aktiviert wurde. Abbildung 29b zeigt die Durchbiegung der Verbundstruktur für rechteckförmige DEA-Aktivierungsspannungen mit unterschiedlichen Amplituden (Frequenz 2 Hz, Tastverhältnis 0,5). Abbildung 29b zeigt, dass eine Erhöhung der DEA-Aktivierungsspannung zu einer zunehmenden Verbundauslenkung führt und somit das Verformungsverhalten durch die DEA-Aktivierung gezielt beeinflusst werden kann. Der Funktionsdemonstrator zeigt, dass die Faser-Elastomer-Verbundtechnologie für die Herstellung von mehrstufigen Faser-Elastomer-Strukturen geeignet ist, die durch die Integration von Antriebsmechanismen aktiv verformt werden können [12].

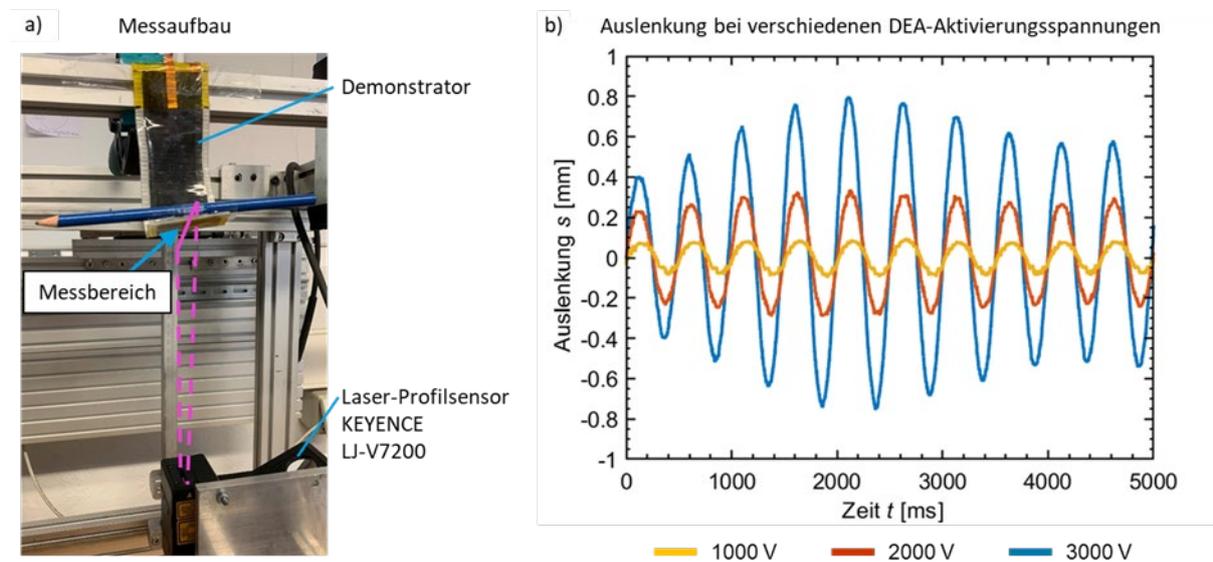


Abbildung 30. a) Messaufbau zur Erfassung von Auslenkungen eines Demonstrators, b) Auslenkungen bei rechteckförmigen DEA-Aktivierungsspannungen unterschiedlicher Amplitude (Frequenz 2 Hz, Tastgrad 0,5).

4 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurden formvariable Faser-Elastomer-Verbunde mit DEA-Integration konzipiert, entwickelt und bewertet. Für die Konzeption und Konstruktion der adaptiven Verbundstrukturen wurden neue dielektrische Elastomermaterialsysteme erfolgreich entwickelt. Polyurethan-Elastomere mit hoher relativer Permittivität und geringer Steifigkeit wurden hergestellt, um große Aktordehnungen bei geringen elektrischen Feldstärken zu erreichen. Eine geringe Zugabe von Bariumtitanatpartikeln führte zu einer Erhöhung der Aktorwirkung ohne Beeinträchtigung der Steifigkeit des Polyurethan-elastomers. Für das geforderte Materialkonzept der hochdehnbaren Elektrode wurde eine möglichst geringe Konzentration von CNTs in Elastomere eingearbeitet, um eine hohe Leitfähigkeit und eine möglichst geringe Erhöhung der aktorischen Steifigkeit dieser Komponente des Aktoraufbaus zu erreichen. Neue Materialkonzepte wurden zur Herstellung verschiedener Basisaktoren in planaren und koaxialen Konfigurationen eingesetzt. Die Implementierung eines neuen kovalent vernetzten Polyurethan-Elastomers in die Konstruktion eines planaren Aktors wurde durch die Herstellung eines sehr dünnen

Films durch Formpressen, symmetrisches Vorstrecken und Aufbringen der entwickelten Elektrodenmaterialien realisiert. Die Funktionsweise der planaren Aktoren wurde erfolgreich durch Dehnungs- und Kraftmessungen in einem konventionellen Punktaktor-Versuchsaufbau bzw. einem Smart Rubber Analyzer bewertet. Für koaxiale Aktoren wurden TPU-CNT- und reine TPU-Mischungen erfolgreich in der Zweikomponenten-Schmelzspinnentechnik verwendet, um eine symmetrische, Kern-Mantel-Struktur der internen Funktionskomponenten (interne Elektrode und elektrische Funktionsschicht) eines faserartigen Aktors herzustellen. Solche Kern-Mantel-Filamente zeigen elektrostatische Verformungen in einem innovativen Aktor-Versuchsaufbau mit einer flüssigen salzhaltigen Außenelektrode. Es wurde ein hyperelastisches Materialmodell in einer FEM-Simulationsumgebung verwendet, um die Verformungen eines kreisförmigen polyurethanbasierten DEAs vorherzusagen, was ein enormes Entwicklungspotenzial für das Design von Aktoren in komplexen kinematischen Schemata bietet. Mittels Mehrlagengestricktechnologie wurden die in diesem Projekt realisierten DEA-Garne in funktionelle Mehrlagengestricke (fMLG) in verschiedenen Anordnungen und Orientierungen maschinell integriert. Allerdings konnten diese noch keine ausreichende Verformungsarbeit in der makroskopischen Glasfaser-Elastomer-Verbundstruktur leisten. Um die Material-, Prozess- und Designvariablen der DEA-Filamente, die große Verformungen aufweisen, nicht nur für die konzipierten einfachen, sondern auch anwendungsorientierten komplexen Bewegungen zu optimieren, sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Schließlich wurde ein Funktionsdemonstrator, bestehend aus einer elastischen Glasfaserverbundstruktur mit integrierten Kohlefaser-Elektroden-DEAs entwickelt, gefertigt und erfolgreich auf seine Aktorfunktion getestet.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20786 BR „Hochfrequent stellbare, textilbasierte Aktoren für komplexe FKV-Kinematiken mit hohen Verformungsgraden - HoTexA“ der Forschungsvereinigungen Forschungskuratorium Textil e. V. und Deutsche Kautschuk- Gesellschaft e. V. wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

5 References

- [1] BEHR, T.: Daimler AG - Material concepts for the car body of the future. Dresden, In Proceedings: Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference. November 24-25, 2016.

- [2] MLEKUSCH, B.: AUDI AG - Lightweight design for the car body – a key factor to turn the weight spiral. Dresden, In Proceedings: 8th Aachen-Dresden International Textile Conference, November 27-28, 2014.
- [3] KLUGE, A.; NOCKE, A.; PAUL, C.; CHERIF, C.; LINSE, T.; ULBRICHT, V.: Development and characterization of textile-processable actuators based on shape-memory alloys for adaptive fiber-reinforced plastics. *Textile Research Journal* 83(2013)18, S. 1936–1948.
- [4] CHERIF, C.: *Textile Materials for Lightweight Constructions*. 1 Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. - ISBN 978-3-662-46340-6
- [5] ASHIR, M.; HINDAHL, J.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: Development of adaptive pleated fiber reinforced plastic composites. *Composites Science and Technology* 148(2017), S. 27–34.
- [6] ASHIR, M.; HAHN, L.; KLUGE, A.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: Development of innovative adaptive 3D Fiber Reinforced Plastics based on Shape Memory Alloys. *Composites Science and Technology* 126(2016), S. 43–51.
- [7] VENNEMANN, N. ARLINGHAUS, M., BRÖKER, D., KUMMERLÖWE, C., SIEBERT, A: Dielectrical and Electro-Mechanical Behavior of NBR at High Electrical Field Strength. Nuremberg, Germany, Proceedings DKT2018. July 2nd to 5th 2018.
- [8] ARMSTRONG D. P., SPONTAK. R. J.: Designing dielectric elastomers over multiple length scales for 21st century soft materials technologies. *Rubber Chemistry & Technology* 90(2017)2, S. 207–224.
- [9] HENKE, E.-F. MARKUS; PFEIL, S.; WILSON, K. E.; GERLACH, G.; RICHTER, A.: Soft dielectric elastomer robots (Hrsg.): Eighth international conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers & artificial muscles, 2018, S. 1415.
- [10] POIKELISPÄÄ, M.; SHAKUN, A.; DAS, A.; VUORINEN, J.: High actuation performance offered by simple diene rubbers. *Polymers for Advanced Technologies* 28(2017)1, S. 130–136.
- [11] LIEBSCHER, H.; TAHIR, M.; WIEßNER, S.; GERLACH, G.: Effect of barium titanate particle filler on the performance of polyurethane-based dielectric elastomer actuators. *Proc. SPIE 12042, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIV, 1204210, 06.-09.03.2022.*
- [12] WINGER, H.; ASHIR, M.; WIECZOREK, F.; HÄNTZSCHE, E.; NOCKE, A.; CHERIF C.: High-frequency actuatable textile-based active structures for complex kinematic FRP systems and smart textiles. In: Proceedings. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Stuttgart, 9. - 10. November 2021.