

Elektroaktive Polymere: Entwicklungen und Perspektiven dielektrischer Elastomere

James Biggs, Karsten Danielmeier,* Julia Hitzbleck, Jens Krause, Tom Kridl, Stephan Nowak, Enrico Orselli, Xina Quan, Dirk Schapeler,* Will Sutherland und Joachim Wagner

*In memoriam Werner Jenninger
und Karsten Dierksen*

Dehnfähige Elektroden · Dielektrische Elastomere ·
Elektroaktive Polymere · Polyurethane · Silicone

Wir präsentieren einen kurzen Rückblick über die Entwicklung und Anwendung dielektrischer Elastomere. In den vergangenen zehn Jahren hat die Bedeutung dieser Polymerklasse stetig zugenommen. Inzwischen setzen sich erste Produkte auf dem Markt durch, und weitere Anwendungen stehen vor der Markteinführung.

1. Einführung

Seit den frühen 1990er Jahren hat das Aufkommen von „elektroaktiven Polymeren“ (EAPs), die auf elektrische Stimulation durch Formänderung reagieren, die Kreativität vieler Wissenschaftler und Ingenieure angeregt. Das breite Anwendungsspektrum polymerer Materialien wurde hierdurch noch einmal deutlich erweitert. Da die Wirkungsweise gewisse Ähnlichkeit mit der von biologischen Muskeln hat, ist der Begriff „künstliche Muskeln“ in die Literatur eingegangen.^[1–4] Diese weichen, robusten Polymere ermöglichen in der Regel größere Dehnungen als herkömmliche Piezokeramiken, wobei die angelegten elektrischen Spannungen niedriger sind, was EAPs für viele Anwendungen besser geeignet macht.^[1]

Der Begriff EAP bezeichnet eine breite Familie von Polymeren. Im Allgemeinen wird bei EAPs zwischen „ionischen“ und „elektronischen“ unterschieden, die sich durch unterschiedliche Wirkungsweisen auszeichnen.^[4–7] Ionische EAPs umfassen Materialien wie Polymergele, leitende Polymere, Kohlenstoff-Nanoröhren und ionische Polymer-Metall-Verbünde, wobei die Wirkungsweise eine elektrisch gesteuerte Diffusion von Ionen innerhalb des Materials umfasst. Im Unterschied dazu sind elektronische EAPs Isolatoren, die auf Oberflächenladungen reagieren. Durch beidseitig aufgetragene Elektroden werden Ladungen zugeführt, die Coulomb-Kräfte erzeugen. Hierdurch wird das Material gedehnt. Elektronische EAPs werden in elektrostriktive Elastomere, ferroelektrische Polymere und dielektrische Elastomere (DE) unterteilt. All diese EAP-Polymeren haben Vor- und Nachteile, die sie für unterschiedliche Anwendungen geeignet machen. Unter ihnen bieten die dielektrischen Elastomere gute Eigenschaften in einem ungewöhnlich breiten Anwendungsspektrum, darunter Aktoren, Generatoren und Sensoren.^[3] Dementsprechend konzentriert sich dieser Kurzaufsatzt auf dielektrische Elastomere.

Der DE-Effekt wurde zuerst 1880 von Wilhelm Conrad Röntgen beobachtet, als eine Hochspannungs-Koronaentladung Ionen in der Luft erzeugte, die sich auf gegenüberliegenden Seiten eines Kautschukbandes anlagerten und das Band dazu brachten, sich zu dehnen.^[8] Wie in Abbildung 1 gezeigt, besteht ein DE-Element aus mindestens zwei dehbaren Elektroden, die durch eine Folie aus einem dielektrischen Elastomer getrennt sind. Die Aktivierung erfolgt durch Anlegen eines elektrischen Feldes, durch das sich die Elektroden gegenseitig anziehen und die Folie in Normalenrichtung komprimieren, wodurch die Folie in tangentialer Richtung expandiert. Dielektrische Elastomere sind durch schnelle Reaktion, große Betätigungsrate, hohe mechanische Energiedichte und die Fähigkeit gekennzeichnet, eine induzierte Verformung bei konstanter Spannung ohne Verbrauch elektrischer Energie zu erhalten. Diese Werkstoffe funktionieren am besten bei elektrischen Feldern nahe der Durchbruchsfeldstärke.^[7]

2. Grundprinzipien der dielektrischen Elastomere

[*] Dr. K. Danielmeier, Dr. J. Hitzbleck, Dr. J. Krause, Dr. S. Nowak, Dr. E. Orselli, Dr. J. Wagner
Bayer MaterialScience AG, Business Unit Coatings, Adhesives and Specialities; Functional Films
51368 Leverkusen (Deutschland)
E-Mail: karsten.danielmeier@bayer.com
Homepage: <http://www.materialscience.bayer.com/>
Dr. J. Biggs, T. Kridl, Dr. X. Quan, D. Schapeler, W. Sutherland
Artificial Muscle Inc., A Bayer MaterialScience Company
1320 Orleans Drive, Sunnyvale, CA 94089 (USA)
E-Mail: dschapeler@vivitouch.com

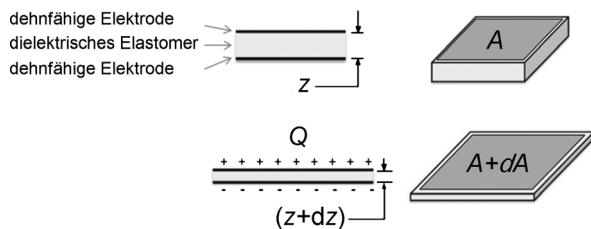


Abbildung 1. Aktorprinzip dielektrischer Elastomere. Oben: Ein DE-Wandler ist ein flexibler Kondensator mit zwei dehnfähigen Elektroden, zwischen denen sich ein dielektrischer Elastomerfilm befindet. Unten: Ein elektrisches Feld verteilt die Ladung Q und zieht die Elektroden gegenseitig an, wodurch sich die Dicke z des dielektrischen Elastomerfilms verringert und die Fläche A zunimmt.

Mithilfe einer Zwei-Platten-Kondensatoranordnung wird ein dielektrisches Elastomer dazu veranlasst, elektrische in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt. Die Wirkung ähnelt der eines elektrostatischen Aktors in einem mikroelektromechanischen System (MEMS) mit Parallelplatten, jedoch mit zwei wesentlichen Unterschieden: Erstens widersteht das DE typischerweise elektrischen Feldern, bei denen es in einem Luftspalt zu einem elektrischen Durchbruch kommen würde, sodass sich höhere Kräfte zwischen den Kondensatorplatten entwickeln können. Zweitens sind die Elektroden dehnfähig und in der Regel direkt auf dem DE-Material aufgebracht, das weitgehend inkompresibel ist und seine Form viel leichter ändert als das Volumen. Diese Anordnung der Platten direkt auf einem inkompresiblen Dielektrikum führt zu einer geometrischen Einschränkung der Bewegungsfreiheit des Systems. Ziehen sich die Platten an, erhöht sich auch ihre Fläche, wodurch sich die Kapazität der Anordnung aus zwei Gründen ändert – zum einen durch die Dickenänderung und zum zweiten durch die Flächenzunahme. Somit kann ein DE-Wandler Energie effizienter umwandeln als ein Wandler mit Luftspalt. Die Polarisierbarkeit des Dielektrikums, ausgedrückt als Dielektrizitätskonstante ϵ_r , verbessert die Speicherung elektrischer Energie weiter. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) Y des Dielektrikums bestimmt bei gleicher Deformation die Speicherkapazität für mechanische Energie.

Das Arbeitsprinzip von DE-Wandlern kann auf mehrere Arten hergeleitet werden.^[9,10] Ein von Pelryne und Kornbluh^[9] vorgeschlagenes Prinzip beschreibt differentielle Änderungen dU_e der elektrischen Energie U_e in einem Plattenkondensator der Dicke z und Fläche A , der eine Ladung Q

über die Kapazität C hält. Unter Annahme eines konstanten Volumens ($A dz + z dA = 0$) führt dies zu Gleichung (1).

$$dU_e = \left(\frac{Q}{C}\right) dQ - 2U_e \left(\frac{1}{A}\right) dA = \left(\frac{Q}{C}\right) dQ + 2U_e \left(\frac{1}{z}\right) dz \quad (1)$$

Der erste Term auf der rechten Seite stellt die Änderung der elektrischen Energie aufgrund der Änderung der elektrischen Ladung im Kondensator (dQ) dar. Der zweite Term stellt mechanische Arbeit dar, die am elektrischen Feld verrichtet wird. Bei konstanter Ladung Q wandelt jeder Effekt, der die Filmdicke erhöht (positives dz), mechanische Arbeit in elektrische Energie um. Auf diese Weise arbeitet der Wandler wie ein Generator oder Sensor. Umgekehrt entspricht ein Effekt, der die Dicke des Dielektrikums verringert (negatives dz), einer Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie, und der Wandler arbeitet als Aktor. Gleichung (1) bildet die Grundlage für die Diskussion der grundlegenden Betriebsarten bei konstanter Spannung, konstanter Energie oder konstanter Ladung.

Bei konstanter Ladung kann die obige Gleichung durch Substitution des Differenzials dz durch infinitesimale mechanische Arbeit, die durch die Konformationsänderung dz auf das Elastomer ausgeübt wird, so umgeformt werden, dass man die physikalische Dimension des Drucks erhält und weiterhin durch Einführung des Energiegehalts des Kondensators zu Gleichung (2) gelangt.

$$p = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{z}\right)^2 \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist p der Maxwell-Druck, ϵ_0 und ϵ_r sind die Permittivität (Dielektrizitätskonstante) des Vakuums bzw. des Materials, V ist die Spannung, die über der Dicke des Dielektrikums anliegt. Wenn sich das DE linear verhält, kann man unter Annahme einer freien Randbedingung und Einführung des Elastizitätsmoduls Y den Ausdruck für den freien Hub S_z in z -Richtung eines einschichtigen DE-Aktors herleiten [Gl. (3)].

$$S_z = \frac{1}{Y} \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{z}\right) \quad (3)$$

Mit ähnlichen Umformungen und Annahmen kann man die bestimmenden Gleichungen für den Fall herleiten, dass



Karsten Danielmeier promovierte 1995 in präparativer organischer Chemie unter Anleitung von Prof. E. Steckhan an der Universität Bonn. Seit 1996 arbeitet er bei Bayer und ist dort derzeit Vice President und Leiter F&E für funktionelle Filme.



Dirk Schapeler machte 1998 den Abschluss als Diplomingenieur in Mechatronik an der Fachhochschule Karlsruhe. Seit 2006 arbeitet er bei Bayer und ist derzeit CEO von Artificial Muscle Inc.

ein DE mit einer gegebenen Geometrie als Sensor oder Generator verwendet wird.

In den Gleichungen zur Beschreibung der Leistung von DE-Elementen sind die Leistungsparameter proportional zur Dielektrizitätskonstante und zum Quadrat des elektrischen Feldes (V/z) im Kondensator. Die Erhöhung von (V/z) und ϵ_r sind deshalb die offenkundigsten Mittel zur Optimierung der Effizienz eines DE-Wandlers.

Bei der Herleitung der Energiedichte im Dielektrikum ist es interessant festzustellen, dass bei kleinen Dehnungen S_z die Energiedichte im Aktor – die bestimmende Größe für die Effizienz von DE-Generatoren – vom Quadrat von S_z abhängt und damit von der 4. Potenz von (V/z).^[4,11] Andererseits hängt die elastische Energiedichte bei großen Dehnungen annähernd linear von S_z ab,^[4,11] was eine große Vielfalt an verschiedenen Betriebsmodi für Aktoren und Generatoren ermöglicht. Bei Aktoren mit hohem Hub ist ein kleiner Elastizitätsmodul entscheidend [siehe Gl. (3)]. Weitere Optimierungsparameter für DE-Materialien können mechanische Eigenschaften, Kriechen, spezifischer Widerstand oder Viskoelastizität^[12] sein, um nur einige zu nennen; allerdings setzt jeder von ihnen den Materialeigenschaften auch Grenzen. Zur Erhöhung der Energiedichte sind zwei grundsätzliche Methoden offen: Einsatz hoher elektrischer Felder (V/z) oder Erhöhung der Dielektrizitätskonstante ϵ_r . Das elektrische Feld (V/z) ist jedoch durch die elektrische Durchschlagsfestigkeit limitiert. Wird diese überhöht, kommt es zum elektrischen Durchschlag und damit zum (in der Regel endgültigen) Versagen des DE-Wandlers. Die Dielektrizitätskonstante kann durch Einbau polarer Gruppen in das molekulare Netzwerk erhöht werden, die Orientierungsfreiheitsgrade im Dielektrikum aufweisen. Um einen elektrischen Durchschlag zu vermeiden, müssen diese Dipole eine geringe translatorische Mobilität aufweisen. Diese Anforderungen können durch die Verwendung eines Elastomermaterials mit einer Polymerhauptkette, in die polare Gruppen eingebaut wurden, erfüllt werden.

Eine wichtige fundamentale Grenze des elektroaktiven Effekts ist die „Stabilitätsgrenze“, die bei Materialien mit rein linearer Elastizität (d.h., Y hängt nicht von der Dehnung ab) beim Wert von $S_z = -1/3$ auftritt. Jenseits einer durch den Maxwell-Druck induzierten Dickenreduzierung von 33 % wird der Film instabil und kollabiert aufgrund elektromechanischer Instabilität, was auch als „Pull-in-Instabilität“ bezeichnet wird.^[13]

In vielen Fällen sind lineare Modelle ungeeignet, um sowohl das mechanische als auch das elektrische Verhalten von DEs zu beschreiben.^[14] In der Literatur werden viele nichtlineare Modelle für das hyperelastische Verhalten von DE-Materialien verwendet.^[11,15–17] Anders als thermoplastische Materialien zeigen Elastomere bei hohen Dehnungen ein nichtlineares Verhalten der mechanischen Spannung mit der Deformation und damit auch des Moduls Y , wodurch die obige Stabilitätsgrenze vermieden werden kann.

3. Chemie und Materialentwicklung dielektrischer Elastomere

Nach Gleichung (3) ist für die Speicherung einer großen Menge an elektrischer Energie in einem gegebenen Volumen ein Material erforderlich, das sowohl eine hohe Dielektrizitätskonstante als auch eine hohe Durchschlagsfestigkeit hat. Eine hohe Dielektrizitätskonstante ist durch den Einbau polarer Gruppen mit einem Dipolmoment größer null zu erreichen. Elektronenziehende Gruppen wie Urethangruppen haben ein Dipolmoment von 2.4 Debye; SO_2^- , CO_2^- , Chlor-, Trifluormethyl- und Acetamidogruppen haben Werte von etwa 4 Debye; Nitro- und Cyangruppen liegen in der Größenordnung von 6 Debye. Die Kombination aus elektronenziehenden und -schiebenden Gruppen wie im Falle von Nitroanilinen ergibt Dipolmomente mit Werten von bis zu 10 Debye.^[18–20]

Um elektrische Energie für einen gewissen Zeitraum speichern zu können, sollte das Polymer eine sehr geringe spezifische Leitfähigkeit haben. Materialien mit hohen Leckströmen durch ionische Verunreinigungen und andere elektrische Verlustmechanismen sind bei der Energieumwandlung weniger effizient und können aufgrund resistiver (ohmscher) Erwärmung vorzeitig versagen. Hohe elektrische Felder in einem Polymer führen zur Akkumulation von polymerspezifischen Mengen an Raumladung, die einen Einfluss auf das elektrische Alterungsverhalten des Polymers haben kann.

Da der elastische Kondensator leicht verformbar sein muss, sollte das Polymer eine niedrige Glasübergangstemperatur aufweisen. Die reversible Aktuierung erfordert eine hohe mechanische Elastizität, insbesondere eine ausreichend große Bruchdehnung und eine sehr geringe Spannungsrelaxation. Für DE-Wandler, die zu einer starken Verformung unter elektrischer Last fähig sein sollen, ist ein sehr niedriger E-Modul entscheidend, jedoch sollte der Modul hoch genug sein, um elektromechanische Instabilitäten zu verhindern. Das Polymer sollte außerdem reißfest sowie chemisch und thermisch stabil sein.

In der Praxis der Materialentwicklung wird oftmals eine wechselseitige Abhängigkeit dieser Parameter beobachtet, d.h., die Optimierung eines Parameters bedeutet oft die Verschlechterung anderer Eigenschaften. Beispielsweise korreliert in der Regel eine Erhöhung der Dielektrizitätskonstante mit einer Abnahme der Durchschlagsfestigkeit aufgrund einer erhöhten mobilen Ladungsdichte. Dies ist bei Untersuchungen der „elektrischen Alterung“ der Polymere zu beobachten.^[21]

Viele Materialklassen wurden für DE-Anwendungen untersucht, darunter Acrylate,^[4,22] Silicon,^[6,11] Urethane,^[6,11] Kautschuke,^[23,24] Latexkautschuk,^[6,11] Acrylnitril-Butadien-Kautschuk^[25] sowie olefinische,^[6] fluorierte^[26] und Styrolcopolymeren.^[27,28] Einige der am besten untersuchten Materialien werden in der Folge kurz beschrieben.

3.1. Acrylate

Acrylate gehören zu den ersten Materialien, die für EAP-basierte Anwendungen untersucht wurden. Kommerziell erhältliche Klebefilme von 3M, insbesondere die VHB-Familie der Transferbänder von Acryl-Haftklebstoffen, wurden in der EAP-Literatur umfassend untersucht (siehe z.B. Lit. [4] und [22]). VHB-Klebefilme sind in hoher Filmqualität^[29] und zu akzeptablen Kosten gut verfügbar und weisen unter bestimmten Bedingungen eine akzeptable Leistung auf. Es wurden hohe Leistungen bei Verformungen > 50% beschrieben.^[27] Abbildung 2 zeigt, wie sich Verformungen leicht

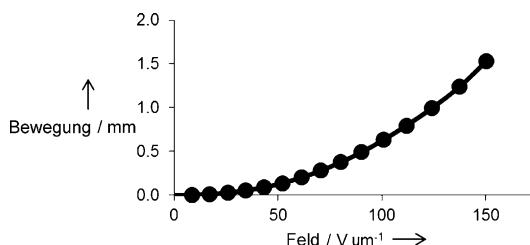


Abbildung 2. Aktorleistung für einen Acrylataktor als Funktion des angelegten Feldes.^[18]

in der Größenordnung von Millimetern bewegen können, allerdings mit relativ hohen elektrischen Feldern. Diese Daten stammen von einem Aktor mit 50 mm Durchmesser und einem 250-µm-VHB-Film, der biaxial auf 300 % vorgedeht und aus der Ebene vorgespannt wurde.

Tabelle 1: Standardeigenschaften von 3M VHB 4910.^[22,27,30]

Transferband mit Acryl-Haftklebstoff

Dielektrizitätskonstante	4.7; 3.21 bei 1 kHz
Durchschlagsfestigkeit	630 V mm ⁻¹ (25 Vu ⁻¹)
Durchgangswiderstand	3×10^{15} Ohm cm
Schubmodul	0.3–0.6 MPa
Elastizitätsmodul	1–2 MPa
Dehnung	> 600%
Langzeit-Nutzungstemperatur	93 °C

Tabelle 1 zeigt die typischen Eigenschaften für den 3M-Acrylatfilm VHB 4910. Die VHB-Acrylate weisen eine relativ hohe Dielektrizitätskonstante und dielektrische Durchschlagsfestigkeit auf (Tabelle 1). Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, ist die Spannungs-Dehnungs-Kurve für den VHB-4910-Acrylatfilm bis zu 300 % Dehnung sehr flach. Sie zeigt extrem niedrige Moduli bei hohen Dehnungen. Im Unterschied dazu können Versteifung oder zugverhärrende Materialien wie Silicon bei geringer Dehnung eine ausgeprägte Beugung in den Kurven aufweisen, und die Steigung der Silicondenaten ist nach dem Wendepunkt höher als die des Acrylates, was auf einen wesentlich höheren Modul hindeutet.

Der Vorteil dieses flachen Verhaltens ist, dass Acrylate bei viel höheren Vordehnungen verwendet werden können (in der Größenordnung von 200–300 %), wohingegen bei Si-

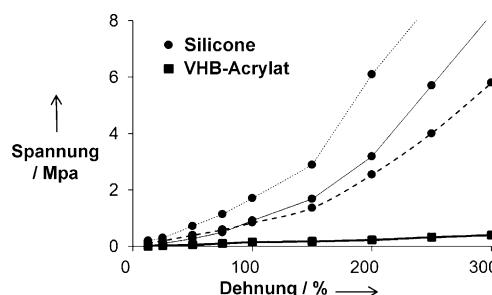


Abbildung 3. Zugdaten eines 3M-VHB-Acrylat-Klebefilms und experimenteller Siliconfilme.^[18]

liconen und anderen Elastomeren die Vordehnung auf weniger als 50 % beschränkt sein kann. Hohe Vordehnungen können kostengünstigere Herstellungsverfahren ermöglichen, da sich Filme mit einer höheren Ausgangsdicke verwenden lassen. Wie Abbildung 4 zeigt, kann eine Vordehnung die Leistung von DE-Wandlern verbessern, die aus biaxial gestreckten (vorgedehnten), dielektrischen Filmen hergestellt wurden. Darüber hinaus kann die Durchschlagsfestigkeit von Acrylaten durch Vordehnung deutlich erhöht werden, was die Verwendung von höheren elektrischen Feldern ermöglicht und somit auch zu einer höheren Leistung führt.

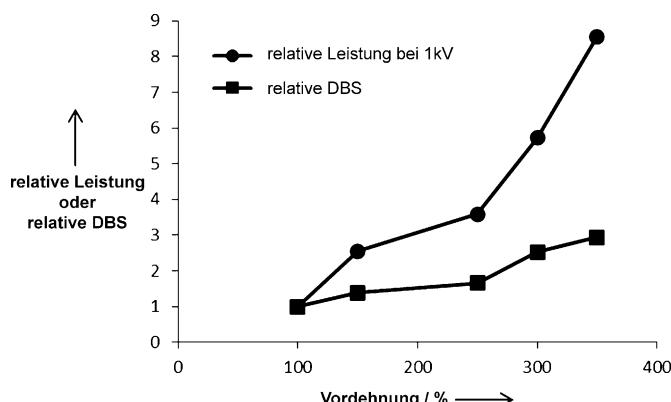


Abbildung 4. Wirkung der biaxialen Vordehnung auf die Performance und Durchschlagsfestigkeit von Acrylatfilmen; DBS = dielektrische Durchbruchsfeldstärke.^[18]

Trotz aller Vorteile, die wesentlich zur Entwicklung der EAP-Technologie beigetragen haben, konnten Acrylatfilme nicht in kommerziellen EAP-Aktoren genutzt werden. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass Acrylat-basierte DE-Wandler sehr temperaturempfindlich sind, was den Temperaturbereich für einen möglichen Einsatz erheblich einschränkt. Wie aus Abbildung 5 für einen 3M-VHB-Acrylatfilm ersichtlich ist (Daten mit leerem Kreis), kann die Leistung bei Temperaturen außerhalb des Bereichs von 0–70 °C mehr als 25 % niedriger sein als die Leistung bei 20 °C. Bei –30 °C fällt die Bewegung auf null. Im Allgemeinen ist diese Verschlechterung der Leistung reversibel, auch wenn es bei erhöhten Temperaturen zu einer langfristigen Materialschädigung kommen kann.

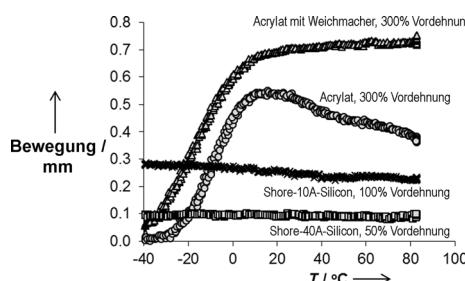


Abbildung 5. Leistung von Acrylat- und Siliconaktoren in Abhängigkeit von der Temperatur.^[18]

Ein weiteres Problem mit Acrylat-basierten DE-Wandlern ist, dass sie wegen der Viskoelastizität des Polymernetzwerks langsame Reaktionszeiten aufweisen können.^[31] Wie in Abbildung 6 gezeigt, kann ein Acrylataktor eine lange Zeit brauchen, um ein stabiles Leistungsniveau zu erreichen; die Leistung dieser DE-Wandler erhöht sich um 25 % im Verlauf einer Aktuierung von 1 s.

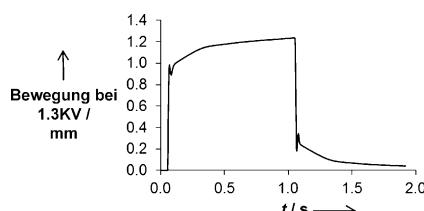


Abbildung 6. Leistung eines Acrylataktors als Funktion der Zeit. Die Aktuierungsspannung wird bei 0.05 s angelegt und bei 1.05 s entfernt.^[18]

Nach Entfernen des elektrischen Feldes dauert es eine ähnliche Zeitspanne, um in den Ausgangszustand zurückzukehren. Dies kann den Einsatz solcher Aktoren in Anwendungen wie haptischen Bedienelementen oder Audiogeräten stark einschränken, da diese ein Ansprechen bei Hochfrequenz erfordern. Um die viskose Dämpfung auszugleichen, muss zusätzliche elektrische Energie zugeführt werden, sodass die Energieumwandlung dieser Materialien niedrig sein kann.

Hohe Viskoelastizität kann auch zur einer langfristigen Relaxation der Leistung unter konstantem Feld führen, da die Polymerketten im Laufe der Zeit relaxieren. Es wurde berichtet, dass zur langfristigen Relaxation auch der hohe Leckstrom dieser Materialien einen Beitrag leisten kann, was den Stromverbrauch erhöht, sodass das Material nicht in der Lage ist, eine Dehnung lange Zeit zu halten.^[32] Der Leckstrom kann sich sowohl mit der Temperatur als auch mit der Feuchtigkeit erhöhen, was die Anwendung dieser DE-Wandler einschränkt.

Dabei ist die Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit vielleicht die größte Einschränkung von Acrylat-basierten Aktoren. Wie oben erwähnt, verringert die Erhöhung des Leckstroms infolge von Feuchtigkeit die Ladungshaltefähigkeit des dielektrischen Films und begrenzt seine langfristige Leistungsfähigkeit. Hierbei tritt ein kritischerer Versagensmodus schon bei relativ moderater Luftfeuchtigkeit auf.

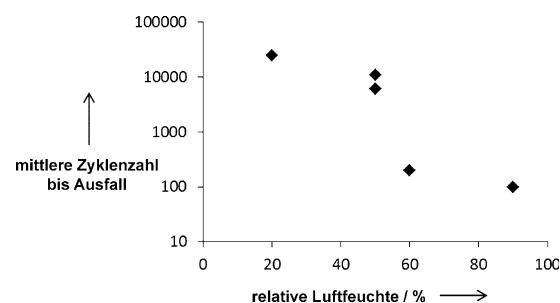


Abbildung 7. Auswirkung der relativen Feuchte (rF) auf die mittlere Zeit bis zum Ausfall von Acrylaktoren bei Raumtemperatur.^[18]

Abbildung 7 zeigt die mittlere Zahl der Zyklen bis zum Versagen des Dielektrikums für Acrylaktoren, die bei 25 °C und verschiedenen relativen Luftfeuchten unter den gleichen Aktivierungsbedingungen getestet wurden. Während bei 20 % rF (relativer Luftfeuchte) nach 25000 Zyklen keine Ausfälle festgestellt werden, fällt die mittlere Lebensdauer bei über 50 % rF rapide ab. Daher müssen Acrylaktoren für die meisten Anwendungen in einer Umgebung mit kontrollierter Luftfeuchtigkeit betrieben werden.

In die Verbesserung der Eigenschaften von Acrylat-EAP-Wandlern wurde viel Arbeit investiert. So können Weichmacher in Acrylatfilme eingebaut werden, oder diese können mit Weichmachern getränkt werden, um den Temperaturbereich für den Einsatz von Acrylat-EAP-Aktoren zu erweitern, wie Abbildung 5, oben zeigt.^[27] Dies ist besonders wichtig für Anwendungen, die bei niedrigen Temperaturen betrieben werden sollen. Der Weichmacher kann den Elastizitätsmodul und die Glasübergangstemperatur des Polymernetzwerks verringern, ohne dabei an Elastizität einzubüßen. Allerdings können sich Weichmacher auch verflüchtigen oder migrieren, wodurch die Lebensdauer oder die Anwendung der DE-Wandler begrenzt werden würde.

Um die Einschränkungen durch Weichmachermigration zu vermeiden und die mechanische Stabilität eines Acrylatfilms zu verbessern, können reaktive Weichmacher und Monomere eingeführt werden. Diese können entweder in das vorhandene Acrylatnetzwerk eingearbeitet werden oder in einem getrennten Netzwerk miteinander reagieren, um ein interpenetrierendes Netzwerk (IPN) zu bilden.^[33,34] Durch die Verwendung von IPNs können die viskoelastischen Einschränkungen von Standardacrylatfilmen wie Kriechen und Hysterese verringert werden. Mit der Auswahl geeigneter Additive kann die Leistungsfähigkeit durch höhere Dielektrizitätskonstanten und niedrigeren Modul verbessert werden.

Es wurde auch versucht, das proprietäre Acrylat in 3M-VHB-Filmen zu ersetzen (z.B. Lit. [33,35–37]). Im Allgemeinen werden Acrylate durch radikalische Polymerisation von Vinylmonomeren hergestellt, wie in Abbildung 8 dargestellt.

Die Acrylatchemie ist aufgrund verfügbarer Monomere und multifunktioneller Vernetzer äußerst vielseitig. Da viele von ihnen mischbar sind, ist es möglich, Polymere und Copolymeren mit einer breiten Palette von Eigenschaften maßzuschneidern. Darüber hinaus gibt es viele Synthesemög-

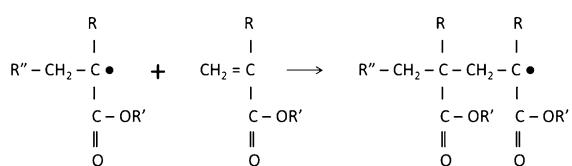


Abbildung 8. Radikalische Polymerisation von Acrylatmonomeren.

lichkeiten, da Filme im Gießverfahren oder durch thermische Polymerisation und/oder Photopolymerisation hergestellt werden können. Lombardi und Gasper geben eine hervorragende Einführung in die Chemie der Acrylatpolymere.^[38]

Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Leistung ist es, Füllstoffe wie Janus-Partikel,^[39] Aluminiumoxid^[40] und Titaendioxid^[41] zu verwenden, um die effektive dielektrische Konstante zu erhöhen oder den Kriechwiderstand zu verbessern. Allerdings erhöht sich in vielen Fällen der Modul, und Dehnung sowie Reißfestigkeit nehmen ab, sodass bei vielen Anwendungen keine Verwendung dieser Verbundmaterialien möglich ist.

3.2. Silicone

Auch Silicone sind schon lange untersucht worden.^[6] Sie bilden die Grundlage kommerzieller Produkte von Bayer MaterialScience^[42] sowie in der Entwicklung befindlicher Aktoren von Unternehmen wie Danfoss, CTS und Optotune. Anders als bei Acrylaten, wo sich die Arbeit auf 3M-VHB-Klebefilme konzentriert hat, haben die Forscher ihre eigenen Filme aus vielen verschiedenen, kommerziell erhältlichen Materialien gegossen, darunter: Nusil CF19-2186,^[11] Dow Corning Sylgard 186,^[6,11] Dow Corning HSIV,^[6] Dow Corning HS III^[6,11] und Dow Corning DC3481.^[30,43] Die Dielektrizitätskonstanten sind üblicherweise etwa 3; der Modul liegt im Bereich von 0.1 bis 1 MPa. Im Allgemeinen steigt die Durchschlagsfestigkeit mit dem Modul.^[30]

In den meisten Fällen wurden die Filme mithilfe von durch Vinyladdition vernetzten Siliconen hergestellt. In diesen Materialien reagiert ein Silan in der Regel in Gegenwart eines Platin-Katalysators mit einer Vinylgruppe (Abbildung 9).

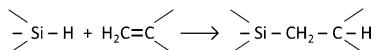


Abbildung 9. Hydrosilanisierung.

Hydrosilanisierungen haben den Vorteil, dass sie lösungsmittelfrei sein können und bei der Reaktion keine Nebenprodukte erzeugen. Sowohl Lösungsmittel als auch Nebenprodukte können zu Defekten führen, wenn sie während des Beschichtungsprozesses aus dem Film entfernt werden. Solche Defekte können zum Versagen des Dielektrikums führen und den Einsatzbereich der EAP-Aktoren stark einschränken.

Die Materialeigenschaften von Siliconen sind eher für die Anforderungen von DE-Wandlern geeignet. Der elektrische Widerstand liegt in der Größenordnung von 10^{13} Ohm m, und

Leckströme können um eine Größenordnung niedriger sein als bei Acrylaten. Siliconfilme können sehr elastisch sein, wie die engere Hysteresekurve in Abbildung 10 zeigt. Die Elastizität ist in Abbildung 11 beschrieben und weist eine sehr schnelle Reaktionszeit sowie sehr kleine Änderungen der Antwort über die Zeit auf.

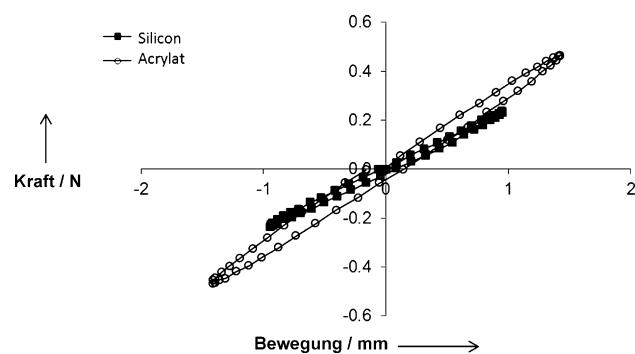


Abbildung 10. Betriebszyklus für einen EAP-Aktor, wenn die Betriebsspannung angelegt und wieder entfernt wird. Der Bereich innerhalb der Kurve hängt mit Hysterese zusammen und weist auf die Viskoelastizität des Materials hin.^[18]

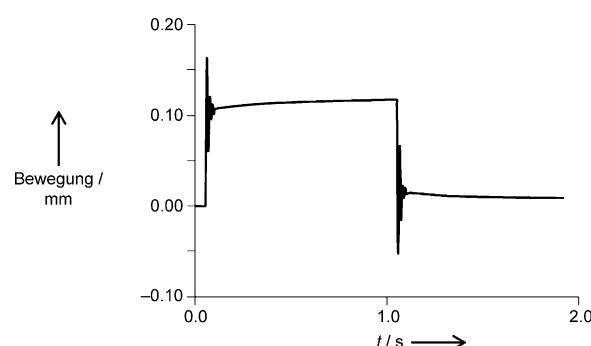


Abbildung 11. Leistung eines Siliconaktors als Funktion der Zeit. Die Betriebsspannung wird bei 0,05 s angelegt und bei 1,05 s entfernt.^[18]

Silicone haben einen breiten Temperaturbereich, der von -40 bis 80°C eine konstante Aktuierungsantwort gibt, wobei diese im Allgemeinen geringer als bei den Acrylatfilmen ist (Abbildung 5). Silicon-basierte EAP-Aktoren sind weniger von den Umgebungsbedingungen abhängig und zeigen eine deutlich bessere langfristige Zuverlässigkeit als Acrylat-basierte DE-Wandler. Es wurden Aktoren mit nahezu einer Milliarde Zyklen unter Umgebungsbedingungen getestet.^[18] Die mittlere Zeit bis zum Versagen kann selbst bei hoher Luftfeuchtigkeit in der Größenordnung von 10 bis 100 Millionen Zyklen liegen. Beispielsweise lag diese Zeit bei $65^\circ\text{C}/85\% \text{ rF}$ bei mehr als 20 Millionen Zyklen für eine Reihe von Silicon-basierten Aktoren, die bereits 7.6 Millionen Zyklen bei $25^\circ\text{C}/70\% \text{ rF}$ durchlaufen hatten.^[18]

Trotz ihrer vielen Vorteile haben Silicone Defizite, die ihre kommerzielle Anwendung zunächst verlangsamt haben. Diese unpolaren Polymere haben im Allgemeinen niedrigere Dielektrizitätskonstanten als Acrylate und Polyurethane und damit eine geringere Aktorleistung. Außerdem wird die

Leistungsfähigkeit durch Einschränkungen bezüglich der anwendbaren Vordehnung begrenzt. Wie Abbildung 3, oben zeigt, weisen viele Silicone selbstverstärkendes Verhalten auf, bei dem Zugspannung und Modul (die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve) bei 50–150% Dehnung schnell steigen. Dies kann die Vorteile einer erhöhten Vordehnung zunichten machen, wie in Abbildung 12 gezeigt. So ist bei DE-

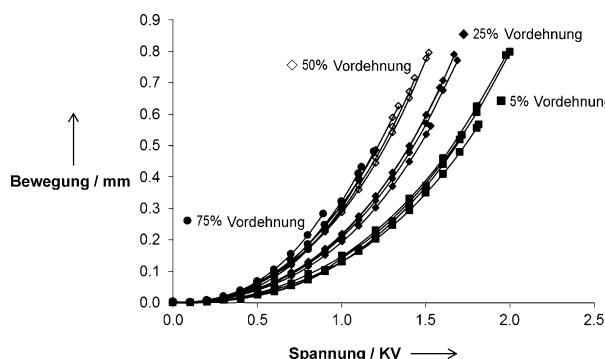


Abbildung 12. Wirkung der Vordehnung auf die Leistung von Siliconaktoren.^[18]

Wandlern, die aus derselben Basisfolie hergestellt wurden und bei gleichen Betriebsspannungen betrieben werden, keine Leistungssteigerung festzustellen, wenn die Vordehnung von 50 auf 75% erhöht wird. Die niedrigen Vordehnungswerte in Abbildung 12 können auch zu Problemen bei der Herstellung führen, da dünnere Filme hergestellt und verarbeitet werden müssen, um die Betriebsspannungen zu reduzieren.

Es gibt noch andere Hürden bei der Herstellung von Siliconfilmen. Durch deren ausgezeichnete chemische Beständigkeit und geringe Oberflächenenergie kann es schwierig sein, sie zu beschichten oder sie auf andere Materialien zu kleben, die im endgültigen Produkt erforderlich sind. Außerdem sind die Rohstoffe wesentlich teurer als die meisten organischen Materialien wie Acrylate, Olefine und Polyurethane.

Obwohl es bei der Modifizierung der Chemie von Siliconen nicht so viel Spielraum gibt wie bei der von Acrylaten oder Polyurethanen, finden sich doch einige Ansätze zur Verbesserung der Leistung von Silicon-basierten EAP-Aktoren. Zur Erhöhung der Dielektrizitätskonstante kann ein Copolymer aus Dimethyl- und Diphenylsiloxangruppen hergestellt werden, wobei diese Materialien bei einigen Molekulargewichten nicht miteinander kompatibel sind und es zur Phasentrennung kommt. Ebenfalls untersucht wurden Floursilicone, die die Dielektrizitätskonstante um mehr als den Faktor 2 erhöhen können.^[6,22] Allerdings weisen die Polymere oft einen hohen Leckstrom auf. Sie sind auch sehr teuer und in ihren Hafteigenschaften eingeschränkt, was die kommerzielle Anwendung erschwert.

Die Dielektrizitätskonstante von Siliconen kann auch durch Propfen von Additiven auf funktionelle Gruppen im Siliconnetzwerk modifiziert werden. Beispielsweise wurde festgestellt, dass die Dielektrizitätskonstante durch Addition von fluorierten Allylverbindungen an (nicht umgesetzte Si-

H-Gruppen in einer Siliconmatrix verdoppelt werden kann, wenn auch etwas auf Kosten von Durchschlagsfestigkeit und mechanischer Festigkeit.^[18] Ähnliche Ergebnisse wurden von Böse et al.^[19] und Kussmaul^[20] et al. erhalten, die eine signifikante Erhöhung der Dielektrizitätskonstante und EAP-Leistung durch Propfen von Allylverbindungen mit starken Dipolen wie Anilin- und Cyangruppen demonstrierten. Stark polare Gruppen können, abgesehen von ihrer potenziell nachteiligen Wirkung auf den spezifischen Widerstand und die Durchschlagsfestigkeit von dielektrischen Materialien, auch dazu führen, dass die Polymere anfälliger für Feuchtigkeitsaufnahme werden, was die Lebensdauer der DE-Wandler bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit deutlich verringert kann.^[18]

Auch Verbundmaterialien und Mischungen sind von vielen Gruppen untersucht worden. Einige ausgewählte Beispiele sind Additive mit hoher Dielektrizitätskonstante wie Polyethylenglycol,^[44] Phthalocyanin-Oligomere,^[43] metallische Nanopartikel,^[45] Graphen,^[45] Titandioxid,^[46] Calcium-Kupfer-Titanat^[47] und Bariumtitantanat.^[48] In allen Fällen muss die erhöhte Dielektrizitätskonstante gegenüber Veränderungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Mischungen optimiert werden.

3.3. Polyurethane

In starkem Gegensatz zu den bisher diskutierten, rein chemisch vernetzten Elastomeren sind Polyurethane eine einzigartige Klasse von Elastomeren, die von physikalisch vernetzten thermoplastischen Polyurethanen (TPU) bis hin zu physikalisch und chemisch vernetzten Systemen reicht, die speziell für DE-Anwendungen entwickelt wurden.

Im Allgemeinen werden (Poly)urethane durch Umsetzung von Isocyanaten mit Alkoholen hergestellt (Abbildung 13). Es bilden sich Wasserstoffbrücken, und/oder es

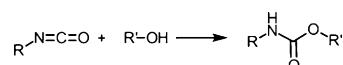


Abbildung 13. Kondensationsreaktion zur Bildung einer Urethanbindung.

findet eine anteilige Kristallisation der Polyurethangruppen statt, die sich in Regionen mit hohem Modul trennen können („Hartsegmente“), um ein physikalisch vernetztes Netzwerk zu schaffen. Dies ist die Basis thermoplastischer Polyurethane (TPU), die bei hohen Temperaturen als Schmelze verarbeitet werden können, sich aber nach dem Abkühlen wie Elastomere verhalten. Mithilfe von Mischungen aus multifunktionalen Präpolymeren kann zusätzlich eine chemisch vernetzte Polymerarchitektur maßgeschneidert werden.

Die Kombination aus chemischen (kovalenten) und physikalischen (Van-der-Waals-)Vernetzungen, mit alternierenden Strukturen von Hart- und Weichsegmenten, sowie die Vielfalt geeigneter Monomere [(Poly)isocyanate, Polyole, (Poly)amine] eröffnet nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, das Polymerrückgrat maßzuschneidern.^[49] Die kontrollierte chemische Struktur des Netzwerks unterscheidet Poly-

urethane von anderen Elastomermaterialien und gibt ihnen über einen weiten Temperaturbereich konsistente mechanische Eigenschaften.

Die meisten Elastomere haben eine niedrige Dielektrizitätskonstante auf dem Niveau eines Isolators (2.5–4) und brauchen daher Additive zur Erhöhung der Konstante. Dies führt zu einer Störung der Polymerstruktur und in den meisten Fällen zu einer deutlichen Verringerung der Durchschlagsfestigkeit. Polyurethane haben eine intrinsisch hohe Dielektrizitätskonstante (über 7), die auf der polaren Natur der Polyurethanfragmente basiert. Diese Fragmente können in die Hartsegmente wie die Urethangruppe oder ähnliche Modifikationen, wie Biuret, Trimer oder Allophanat, und in die Weichsegmente getrennt werden, die auf Bausteinen aus Polyetherpolyol (C2–C4) oder (aliphatischen oder aromatischen) Polyester basieren.^[50] Wie Abbildung 14 zeigt, können die Fragmente signifikant unterschiedliche Dipolmomente haben, die sich auf die Dielektrizitätskonstante des Polyurethanmaterials auswirken.



Abbildung 14. Links: Biuretgruppe (auf Basis von HDI (1,6-Hexamethylendiisocyanat)) $\mu = 3.3$. Rechts: Urethan (auf Basis von HDI) $\mu = 2.4$ Debye.^[18]

Der Einfluss der PU-Mikrostruktur auf die dielektrischen Eigenschaften ist signifikant, wie in Abbildung 15 dargestellt ist. Hierbei ergibt sich eine lineare Beziehung zwischen der Urethangruppendichte und der Dielektrizitätskonstante.^[18] Durch sorgfältige Auswahl der Rohstoffe kann eine hohe Dielektrizitätskonstante erreicht werden, ohne die elastomeren Polymereigenschaften zu beeinflussen.

Weitere Polarität kann in die Weichsegmente eingebaut werden, vergleichbar mit den für Silicon berichteten Verfahren mit Nitro- und Nitrilgruppen oder fluorierten Gruppen.^[51,52] Allerdings führt dies oft zu schlechteren elektrischen und/oder mechanischen Eigenschaften. Es wurde gezeigt, dass solche polaren Bausteine zu einem erheblich verringerten elektrischen Widerstand (um bis zu zwei Größenordnungen niedriger als bei Siliconen) oder zu einer Abnahme der Durchschlagsfestigkeit führen können.^[18]

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Polyurethane, zusätzlich zur hohen intrinsischen Dielektrizitätskonstante, ist die leichte Verarbeitbarkeit der PU-Formulierungen, die mit nahezu allen in der Kunststoffindustrie bekannten Verfahren

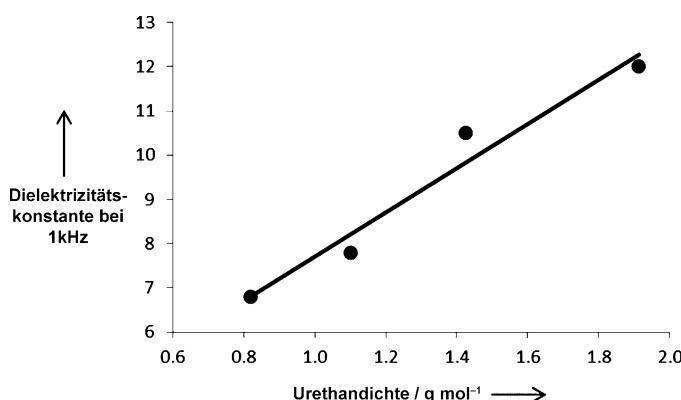


Abbildung 15. Einfluss der Mikrostruktur einer homologen Reihe von Polyurethanen auf die Dielektrizitätskonstante ϵ_r ^[18]

zu dünnen Filmen verarbeitet werden können.^[49] Das Gießen von Zwei-Komponenten-Systemen in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess ermöglicht die Herstellung dünner Filme (bis zu 5 µm) in hoher Qualität mit hoher Durchschlagsfestigkeit.

In Tabelle 2 werden die Eigenschaften der gegossenen Polyurethanfolie Bayfol EA 102, das speziell auf die Bedürfnisse von DE-Anwendungen angepasst wurde, mit denen eines extrudierten thermoplastischen Standardpolyurethans (TPU), eines typischen Silicon, eines Acrylates (3M VHB 4905) und eines Fluorpolymers (Solvay Solvane 250) verglichen. Es ist ersichtlich, dass die geringe Konzentration an chemischer Vernetzung im TPU und Acrylat (was an ihrem äußerst niedrigen Modul deutlich wird) unter

Tabelle 2: Eigenschaften verschiedener DE-Filme.^[18,53,54]

Elastomermaterial	Film-dicke [µ]	Bruchdehnung [%]	E-Modul bei 50% [MPa]	Kriechen [%]	ϵ_r bei 1/8 Hz	Durchschlagsfestigkeit [V u ⁻¹]
Polyurethan TPU LP-T 4210 UT50	50	421	3.36	24	6.0	218
Polyurethan Bayfol EA102	50	300	1.44	2.9	7.1	130
Silicon (propriätäre Formulierung)	45	422	0.25	16	2.4	80
Acrylat 3M VHB 4905	498	879	0.04	70	4.5	31
Fluorpolymer Solvane 250	300	525	800		14	250

Aktierungsdehnung zu einem hohen Maß an Kriechen oder dauerhafter Verformung bei diesen Materialien führt.

Dennoch ist für den breiten kommerziellen Einsatz von Polyurethanen bei DE-Anwendungen noch weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Die hohe Polarität der Polyurethane kann im Vergleich zu Siliconen zu einer leicht erhöhten Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit führen. Auch weisen die meisten kommerziell erhältlichen Materialien einen höheren Elastizitätsmodul auf. Einige Systeme auf Basis von Polyether-Polyolen sind durch einen niedrigen elektrischen Widerstand beeinträchtigt, während andere (vor allem auf Polyesterbasis) zu hohe Glasübergangstemperaturen haben. Allerdings deuten jüngste Befunde darauf hin, dass für DE-

Anwendungen geeignete Polyurethanformulierungen machbar sind.^[18]

Durch die Kombination aus intrinsischen positiven Eigenschaften und der enormen Vielseitigkeit der Polyurethanchemie werden die Polyurethane zu äußerst geeigneten Kandidaten für die DE-Entwicklung. Wegen der hohen Zahl an Kombinationen zur Schaffung einer perfekten Polymerarchitektur haben die Materialwissenschaftler fast unbegrenzte Möglichkeiten, um die Polyurethanchemie zu modifizieren, auch wenn es immer noch eine anspruchsvolle Aufgabe ist, die richtigen elektromechanischen Eigenschaften einzustellen.

3.4. Fluoropolymere

Fluorelastomere, insbesondere Copolymerne aus Polyvinylidenfluorid mit Trifluorethylen, Tetrafluorethylen und/oder Esafluorpropylen, sind im Hinblick auf den Einsatz in EAP-Aktoren untersucht worden.^[26] Solvay Solexis hat diese Systeme unter dem Handelsnamen Solvane^[53,54] auf den Markt gebracht, und Strategic Polymer Systems entwickelt EAP-Aktoren mit diesen Materialien.

Wie Acrylate werden Fluoropolymere in der Regel durch radikalische Polymerisation synthetisiert. Während Acrylate jedoch häufig aus reinen Monomersystemen produziert werden, werden Fluoropolymere üblicherweise durch Emulsions- oder Suspensionspolymerisation hergestellt. Zur Verringerung der Kristallinität und Verbesserung der elastomerischen Eigenschaften wurden Copolymerne entwickelt. Diese ermöglichen auch die Verarbeitung durch Schmelzen bei niedriger Temperatur oder in vielen Fällen die Verarbeitung in Lösung. Ameduri gibt einen guten Überblick über die Fluoropolymerchemie.^[55]

Fluorelastomere zeichnen sich durch sehr hohe Dielektrizitätskonstanten (ca. 15), Durchschlagsfestigkeiten von mehr als $200 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$, ausgezeichnete Temperaturstabilität, elektrischen Widerstand, chemische Stabilität und Zähigkeit aus.^[53] Im Gießverfahren können sehr dünne Folien hergestellt werden, sodass die Nutzung niedriger Betriebsspannungen möglich ist. Allerdings ist der Modul dieser Materialien sehr hoch, in der Größenordnung von 0.5–10 GPa, und die Leistung kann gering sein, wenn nicht sehr hohe elektrische Felder angelegt werden, z.B. 1% Dehnung bei $100 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$. Außerdem sind diese Materialien in der Regel teilkristallin, sodass diese Aktoren Probleme mit Kriechen und Relaxation haben können. Schließlich sind die Kosten für diese Polymere – wie bei den meisten fluorierten Polymeren – hoch, und es sind unter Umständen spezielle korrosionsbeständige Anlagen erforderlich, um sie zu verarbeiten.

Zur Verbesserung dieser Materialien wurden Arbeiten durchgeführt, die die Optimierung der Copolymerformulierungen und den Einbau von Verbindungen mit hoher Dielektrizitätskonstante, wie leitfähigen Polymeren (z.B. Polyanilin (PANI))^[56] und Oligomeren von Kupferphthalocyanin, umfassen.^[57] Die letztgenannte Arbeit berichtet von Dielektrizitätskonstanten über 200 und einer Dehnung von 2% bei $13 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$. Untersuchungen deuten darauf hin, dass nicht nur Maxwell-Kräfte, wie bei dielektrischen Elastomeren wie den

oben erwähnten Acrylaten und Siliconen, vorhanden sind. Zusätzlich scheint eine ungleichmäßige Verteilung des elektrischen Feldes, die auf die heterogene Verbundstruktur dieser Mischungen zurückzuführen ist, einen Beitrag zu leisten. Das teilkristalline Matrixmaterial selbst hat eine heterogene Morphologie, und es ist außerdem davon auszugehen, dass es wegen der Polarisation der Polymerketten einen elektrostrikтивen Effekt hervorruft.

4. Dehnfähige Elektroden

Zusammen mit der dielektrischen Membran spielen die Elektroden eine Schlüsselrolle, die weit verbreitete Verwendung von DEs für Aktoren, Sensoren und Generatoren zu ermöglichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Elektroden an der Elastomermembran haften und ihrer Verformung „folgen“ müssen, ohne diese dabei mechanisch oder elektrisch einzuschränken. Hierbei sollten sie in der Lage sein, große Verformungen ohne Verlust an Leitfähigkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden diese Elektroden auch als „compliant“ bezeichnet. Idealerweise sollten diese Elektroden:

- 1) leitfähig sein (Schichtwiderstand < $1 \text{ kOhm } \text{sq}^{-1}$, je nach Anwendung),
- 2) großen Verformungen standhalten und dabei leitfähig bleiben (10–100% je nach Anwendung),
- 3) gut an der dielektrischen Membran haften,
- 4) weicher als das Elastomer sein ($E\text{-Modul} < 1 \text{ MPa}$),
- 5) leicht aufzubringen sein,
- 6) die Eigenschaften der Membran nicht verändern,
- 7) geringe mechanische und elektrische Verluste haben,
- 8) selbstheilend sein,
- 9) Millionen von Zyklen ohne Leistungsverlust standhalten.

Im Folgenden werden die einschlägigsten Ansätze für diese Elektroden diskutiert. Einen guten Überblick bietet auch der Übersichtsartikel von Rosset und Shea.^[58]

Kohlenstoff-basierte Elektroden (in der Regel auf Grundlage von Ruß und Graphit) sind am weitesten verbreitet, vor allem wegen ihrer geringen Kosten, geringen Auswirkungen auf die Steifigkeit und einfachen Herstellung. Im Allgemeinen werden lose Partikel (Kohlenstoffpulver) eingesetzt, die in einem viskosen Medium (Fett) oder in einem Elastomer (leitfähiger Kautschuk) dispergiert sind. Hierbei hat der leitfähige Kautschuk einige interessante Vorteile gegenüber den anderen beiden Ansätzen, wobei die wichtigsten seine Robustheit, niedrigen mechanischen Verluste und eine gute Haftung auf der dielektrischen Membran sind. Besonders effektiv für Elektrodenformulierungen sind Kohlenstoffe mit hohem Aspektverhältnis und andere leitfähige Teilchen.^[59] Die Konzentration an Fasern und Plättchen, die nötig ist, um einen bestimmten Grad an Leitfähigkeit zu erreichen, ist viel geringer als bei Teilchen mit niedrigem Aspektverhältnis. Dementsprechend können die mechanischen Eigenschaften des Elektrodenverbunds besser die Eigenschaften des Matrixmaterials widerspiegeln. Eine detaillierte vergleichende Untersuchung mehrerer Kohlenstoff-

basierter Elektroden wurde 2003 von Carpi et al. durchgeführt.^[60]

Eine verbreitete Alternative zu Kohlenstoff-basierten Elektroden sind metallische Dünnfilme, die mit Standardverfahren wie Elektronenstrahlverdampfung und Sputtern abgeschieden werden. Diese Elektroden haben den Vorteil, dass sie dünn, strukturierbar und hoch leitfähig sind. Die geringe Dicke kann ihnen den Vorteil der Selbstheilung oder der Fehlertoleranz verleihen.^[61] Bei der Selbstheilung wird die Elektrode lokal an der Stelle ausgebrannt, an der es zu einem Kurzschluss durch den dielektrischen Film gekommen ist, wodurch der kurzgeschlossene Bereich effektiv isoliert wird. Selbstheilende Elektroden können somit erheblich zur Verbesserung der Lebensdauer von EAP-Aktoren beitragen.

Die Verwendung von dünnen Metallfilmen als Elektroden ist jedoch nicht ganz einfach, da sie kaum dehnbar (2–3%) und im Allgemeinen sehr steif sind (E-Modul im Bereich von GPa). Um diese Einschränkungen zu überwinden, stützen sich die erfolgreichsten Lösungen auf gewellte oder strukturierte Elektroden.^[59] Gewellte Elektroden können durch Abscheiden einer dünnen Metallschicht auf einer bereits gewellten Membran oder durch Wölben der Elektrode aus der Ebene infolge der Entspannung einer vorgedehnten oder vorgewärmten Membran hergestellt werden. Ein von Benslimane et al. entwickelter Ansatz beruht auf der Herstellung einer gewellten Membran durch Applizieren eines Siliconelastomers auf eine Gussform mit sinusförmigem oder periodischem Profil.^[62] Anschließend wird eine dünne Silberschicht auf der gewellten Oberfläche der Elastomer-membran abgeschieden. Für die endgültige Kondensatorkonfiguration werden zwei dieser Filme mit ihren flachen Seiten aufeinander laminiert. Auf diese Weise können Dehnungen bis zu 80% ohne Reißer der Elektrode erzielt werden. Die wichtigste Einschränkung dieses Ansatzes ist, dass die Aktuierung nur unidirektional möglich ist, was den Einsatz bei einigen Anwendungen begrenzen kann.

Ein ähnlicher Ansatz nutzt aus der Ebene gewölbte Elektroden, die in der Regel durch Druckspannung einer vorgewärmten^[63] (oder vorgedehnten)^[64] dielektrischen Membran gebildet werden; nach der Beschichtung mit einer dünnen Metallschicht wird die Membran abgekühlt (oder entspannt), was zu einer Kontraktion führt, die wiederum die Elektrode komprimiert und sie zwingt, sich aus der Ebene zu wölben.^[61] Mit diesem Verfahren hergestellte Elektroden können einer biaxialen Dehnung unterzogen werden; über begrenzte Dehnungen bis zu 28% ist berichtet worden.^[64] Ähnliche Ergebnisse können mit strukturierten Elektroden erzielt werden, die so gestaltet wurden, dass sie eine gewisse Dehnbarkeit ermöglichen. Es wurden verschiedene Gestaltungsformen untersucht (z.B. Zickzack- und Hufeisenmuster), mit denen Dehnungen bis zu 100% ohne Verlust der Leitfähigkeit erreicht werden konnten.^[65] Die meisten dieser Elektroden sind auch auf unidirektionale Verformung beschränkt.

Außer den oben genannten Verfahren für Elektroden sind auch andere, eher ungewöhnliche Techniken beschrieben worden, darunter die Verwendung von Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT)^[66–68] oder silberbasierten Elektroden,^[69,70] Pt-

Salzreduktion,^[71] der Einsatz leitfähiger PANI-Nanofasern^[72] und die Implantation metallischer Nanocluster.^[73,74]

Yuan et al. berichteten, dass einwandige CNTs sowie leitfähige PANI-Nanofasern in der Lage sind, sehr dehnfähige Elektroden mit einem fehlertoleranten (selbstheilenden) Verhalten zu bilden.^[68,75,76] PANI-Elektroden können jedoch unter hohen elektrischen Feldern „de-dotieren“, was ihre langfristige Lebensdauer und Anwendung einschränken kann.^[18]

Der von Rosset et al. verfolgte Ansatz für dehnfähige Elektroden beruht auf der „Implantation“ von metallischen Nanoclustern in die ersten zehn Nanometer unter der Elastomeroberfläche.^[73,74] Gegenüber einer einfachen dünnen Schicht werden die Dehnbarkeit der Elektrode sowie ihre Haftung und Robustheit durch dieses Verfahren erheblich verbessert. Darüber hinaus haben Metall-Nanocluster-Elektroden keine Einschränkung bezüglich der Dehnungsrichtung.

Delille et al. haben eine Elektrode auf Basis eines Pt-Salzes entwickelt, das in eine photoempfindliche Elastomer-matrix dispergiert wird.^[71] Diese Elektrode wird mit UV-Licht photostrukturiert und anschließend in ein Reduktionsmittel getaut, wobei das Pt-Salz auf der Oberfläche zu metallischem Platin reduziert wird. Die Autoren berichteten über Dehnungen bis zu 150% ohne Verlust der Leitfähigkeit, allerdings muss die Auflösung dieses Strukturierungsverfahrens noch verbessert werden.

Die jüngsten Fortschritte bei dehnbaren Elektroden sind eine wichtige Voraussetzung für die Verbesserung der Leistung von EAP-Elektroden, und einige Produkte sind bereits auf dem Markt erhältlich. Allerdings müssen noch die Dehn- und Leitfähigkeit der Elektroden verbessert werden, und zwar nicht nur im Hinblick auf die Zusammensetzung der Elektroden, sondern auch durch Optimierung des Herstellungsprozesses. Um die Auswirkungen des Elektrodenwiderstands auf das Zeitverhalten der EAP-Aktoren zu veranschaulichen, sind in Abbildung 16 die Hübe von zwei Aktoren aufgetragen, die mit Elektroden mit Standardwiderstand und hohem Widerstand hergestellt wurden.

Elektroden mit hohem Widerstand können die Kinetik der Aufladung der Elektroden beim Anlegen der Betriebsspannung begrenzen und die Zeit bis zum Erreichen der

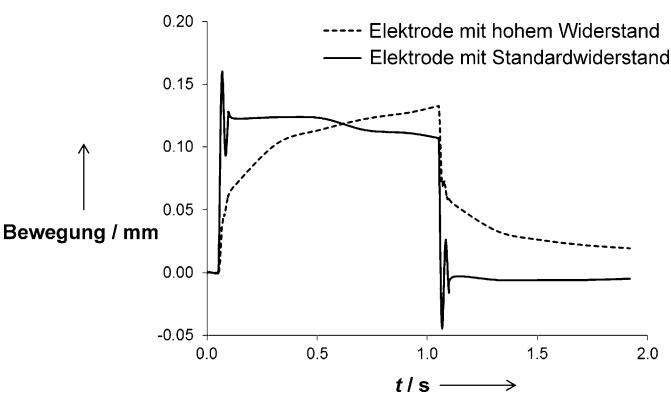


Abbildung 16. Wirkung des Elektrodenwiderstands auf das Zeitverhalten von EAP-Aktoren.^[18]

vollen Bewegung oder Rückstellung des Aktors erhöhen. Der Elektrodenwiderstand kann durch verbesserte Formulierungen und oft auch durch Erhöhen der Dicke der abgeschiedenen Elektrode verringert werden. Allerdings können dicke Elektroden die Leistung des Aktors signifikant verringern, wie Abbildung 17 zeigt.

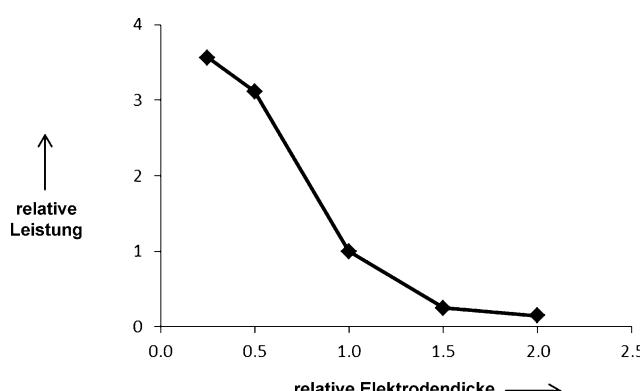


Abbildung 17. Wirkung der Dicke der Elektrode auf die Leistung.^[18]

Dieser Effekt wird ausgeprägter, wenn die Dicke des dielektrischen Films verringert wird, um niedrigere Betriebsspannungen verwenden zu können. Wenn die intrinsischen Eigenschaften der Elektrode verbessert werden und die Verwendung dünnerer Elektroden (< 300 nm) ermöglicht wird, trägt dies dazu bei, die Auswirkungen auf die Steifigkeit zu verringern und Selbstheilung zu erlauben.

Schließlich können sich die Hauptanforderungen an Elektroden je nach der Endanwendung unterscheiden. Außer als Aktoren können elektroaktive Polymere auch als Sensoren und Generatoren verwendet werden. Für Sensoren müsste eine gute Elektrode hauptsächlich einen gut kontrollierten Oberflächenwiderstand, begrenzte Verschlechterung bei zyklischen Belastungen und geringe Hysterese des Widerstandes bei Dehnungen aufweisen. Dies bedeutet, dass z.B. leitfähiger Kautschuk gegenüber Kohlenstoffpulver, Kohlenstoff-haltigen Fetten oder metallischen Dünnenschicht-elektroden vorzuziehen ist. Andererseits müssen Elektroden für Energiegewinnungszwecke sehr großen Dehnungen (> 50%) und Millionen von Zyklen standhalten und dabei eine hohe Leitfähigkeit haben, um Energieverluste zu minimieren. Beim bisher erfolgreichsten Ansatz für große Generatoren wurden dünne metallische Schichten auf gewellten Membranen eingesetzt, wie von der Firma SBM Offshore gezeigt.^[77]

5. Mechanische Gestaltung der Wandler

Im Rahmen dieses Kurzaufsatzes ist es nur möglich, einige grundlegende Gestaltungsformen für DE-Wandler anzusprechen. Detaillierte Gestaltungsformen und Konzepte für die Analyse sind an anderer Stelle zu finden.^[2,78,79]

5.1. Aktormodus

DE-Aktoren lassen sich grob in Membranen, Stapel und Rollen einteilen.

5.1.1. Membranen

Die „Graben“-Konfiguration (Abbildung 18, links) entspricht dem einfachsten Membranaktor. Das Aufladen eines mit Elektroden versehenen Bereiches (Abbildung 18, schwarzer Bereich) spannt die Membran und macht sie dünner, wodurch sich der Abstand zwischen den Stäben an den Kanten erhöht. Dies ist für Laboruntersuchungen komfortabel.

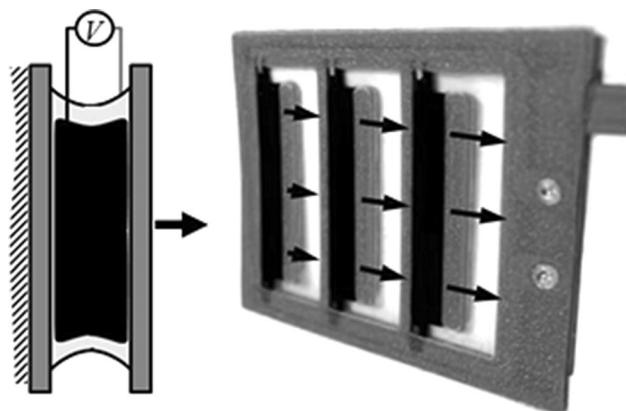


Abbildung 18. Zwei Membranaktoren, „Graben“ (links) und „Stabanordnung“ (rechts).

bel, jedoch sind die freien Elastomerkanten rissanfällig. Eine kommerziell hergestellte „Stabanordnung“ (Abbildung 18, rechts) stabilisiert die Kanten mit einem Rahmen.^[18] Mehrere Stäbe werden für zusätzliche Kraft miteinander verbunden, die von der Gesamtlänge der Stabkanten abhängt.^[80] Dies ist eine dünne Konstruktion, die leicht mit Produktionsverfahren für gedruckte Elektronikbauteile herstellbar ist.

Von diesem Ausgangspunkt ausgehend folgt eine Reihe von Alternativen. Wenn der aufgehängte Körper beispielsweise eine zentrale Scheibe ist, kann diese ringförmig mit Elektrodensegmenten umgeben werden, die für eine biaxiale planare Bewegung sorgen. Das mechanische Vorspannen der zentralen Scheibe aus der Ebene erzeugt den „Universal Muscle Actuator“, der sich besonders für Pumpen und Ventile eignet, da die Membran die Scheibe zentriert, wodurch der Bedarf an zusätzlichen mechanischen Führungskomponenten verringert wird.^[81]

Andere Membranaktoren werden durch Laminieren auf ein nicht dehnbare Substrat hergestellt. Die unimorphen und bimorphen Geometrien (laminiert auf eine oder beide Seiten des Substrates) sorgen für große Biegebewegungen aus der Ebene bei geringer Kraft. Hohe elektrische Felder an einer laminierten Membran können zu einer „Falte-zu-Trichter“-Verformung führen, durch die die Membranoberfläche spontan von z.B. biologischer Verschmutzung befreit wird.^[82] Falls das Substrat mit flüssigkeitsgefüllten Taschen versehen ist, kann alternativ die Aktuierung im „Reißverschlussmo-

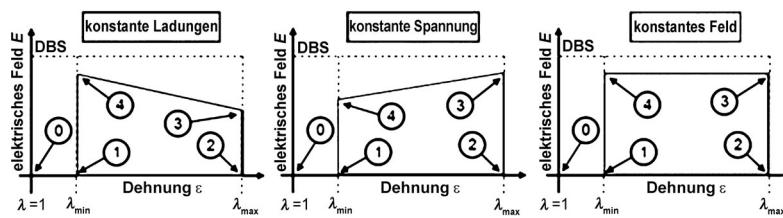


Abbildung 19. Drei Generatorarbeitszyklen.^[96]

dus“ die Membran in die Taschen beugen und die Flüssigkeit so bei moderatem Druck pumpen.^[83] Falls das Substrat runde Öffnungen hat und die Membran mit Druck vorgespannt ist, schafft dies die „gebogenes Diaphragma“-Konfiguration, die für taktile Displays,^[84] Brailleschrift^[85] und flüssige Linsen^[86] einsetzbar ist.

5.1.2. Stapel

Das Stapeln vieler Schichten ist ein Verfahren, um effizient einen Aktor mit höherer Kraft und höherer absoluter Deformation in einem kleinen Volumen herzustellen. Bei diesen Konstruktionen wird die Last effektiv mit der Oberfläche der mit Elektroden versehenen Membranen gekoppelt, nicht mit ihrer Kante, sodass die Kraft von der Stapelfläche abhängig ist. Es wurden verschiedene Verfahren zur abwechselnden Schichtung von Elektrode und Dielektrikum verwendet, um gestapelte Aktoren herzustellen, darunter Falten,^[87] Schichtung von Elastomerfilmen zwischen perforierte Metallelektroden,^[88] Schneiden und Stapeln mit Elektroden versehener Filme^[89] und abwechselnde Beschichtung des Dielektrikums und Strukturierung der Elektroden.^[90] Es können Aktoranordnungen erstellt werden, um taktile Displays und peristaltische Pumpen herzustellen. Für einen Output mit höherer Deformation bei geringerer Kraft wird durch Hinzufügen weicher passiver Platten gesorgt, die bei der Aktivierung auch dünner werden und damit den Deformationseffekt des reinen DE verstärken.^[91]

5.1.3. Rollen

Die Herstellung von Rollen ist ein weiteres Verfahren, um viele Schichten aus Dielektrikum und Elektrode in einem kleinen Volumen unterzubringen.^[92] Bei manchen Konstruktionen werden die Filme einfach gerollt und bilden einen Hohlkern;^[93] bei anderen werden sie um eine vorgespannte Feder gewickelt.^[94] Rollen werden typischerweise für Zug- oder Druckdeformation entlang der Kernachse verwendet.

5.2. Generatormodus

DE-Wandler wirken als Generatoren wie auch als Aktoren. In diesen Wandlern wird mechanische Energie, die durch Strecken oder Verformen eines elastomeren Films in ihm gespeichert ist, durch erhöhte Ladungsdichte auf der Oberfläche des Films in elektrische Energie umgewandelt, wenn der Film in einen weniger verformten Zustand übergeht. Generatoren sind für einen breiten Anwendungsbereich

entwickelt worden, von tragbaren Energie-Scavengern^[95] bis hin zu großen röhrenförmigen Wellenenergiekonvertern.^[77] Viele verschiedene Generator-Arbeitszyklen^[96] sind innerhalb der energetischen Grenzen des Materials^[97] möglich; allerdings sprechen Kosten und Komplexität der Hochspannungselektronik in der Regel für den „konstante Ladung“-Zyklus (Abbildung 19). Bei autonomen Anwendungen kann sich eine selbstversorgende Elektronik bis zu hoher Spannung aufladen, um für die erste Aufladung zu sorgen, die den Arbeitszyklus startet.^[98]

5.3. Sensormodus

Als Sensoren ermöglichen dielektrische Elastomerwandler hohe Dehnungen und flexible, nichtplanare Konfigurationen.^[99] Sie sind nichtlinear und empfindlicher als kapazitive Luftspaltsensoren. Da Verformungen, die das Dielektrikum um den Faktor $\lambda = z/z_0$ dünner machen, gleichzeitig die Fläche der Kondensatorplatten vergrößern und da beide Effekte die Kapazität erhöhen, ist letztere vom inversen Quadrat abhängig: $C = C_0(1/\lambda^2)$. Falls es notwendig ist, die Zahl der Zuleitungen gering zu halten, kann die Kapazität eines dielektrischen Elastomerwandlers über die gleichen Leitungen gemessen werden, über die er betätigt wird,^[100] was geschlossene Regelkreise einfacher macht.

6. Anwendungsbiete

DE-Wandler können für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, in denen kleine elektrische Motoren, Aktoren, Kraft-/Dehnungssensoren und Stromgeneratoren oder sogar Kombinationen von diesen genutzt werden. In den 1990er Jahren wurde die EAP-Forschung hauptsächlich von militärischen Einrichtungen finanziert. Im Fokus standen Anwendungen wie kleine Roboter für nachrichtendienstliche Operationen oder kleine tragbare Energie-Harvester (z.B. Fersentritt-Generatoren^[4])

Kleine Elektromotoren auf EAP-Basis ermöglichen leichtere, leisere, energieeffizientere, schnell ansprechende und besser steuerbare Systeme als die herkömmlichen elektromagnetischen Antriebe. Der weiche, flexible Charakter eines EAP-Films macht völlig neue Formfaktoren und Konfigurationen für Motoren und Aktoren zugänglich.

2011 wurden EAP-Aktoren erstmals auf den Markt gebracht und boten ein hochauflösendes haptisches Feedback bei einem Computerspiel.^[42] Diese Anwendung nutzte den kleinen Formfaktor, die hohe Energieeffizienz, den großen

Frequenzbereich und vor allem die schnelle Reaktionszeit von EAP-Aktoren. Zu anderen Anwendungen, die kurz vor der Markteinführung stehen, zählen optische Positioniersysteme, Pumpen, Ventile und Einwegsensoren. Magnetspulen in Stellungsreglern und Ventilen, die von DE-Aktoren angetrieben werden, ermöglichen eine Senkung des Energieverbrauchs um bis zu 80 % und verwenden weniger bewegliche Teile, was die Betriebs- und Wartungskosten senkt. Optische Anwendungen wie Aktoren für Blenden und zur Objektivpositionierung, besonders für kleine mobile Geräte, erlauben die Kombination von kleinem Formfaktor, präziser Auslenkung und Energieeffizienz.

Bayer MaterialScience hat EAP-Aktoren entwickelt, die die Sounddimensionen von Kopfhörern für ein realistischeres Audioerlebnis verbessern. Diese Anwendung könnte zu einem Hörgerät mit kleinem Formfaktor weiterentwickelt werden. In Zukunft könnten leistungsstärkere Versionen dieser Aktoren Prothesen antreiben.^[10] Die Industrie steht erst am Anfang bei der Nutzung des Potenzials neuer, revolutionärer Aktordesigns.

In den nächsten drei bis fünf Jahren werden die Vorteile von EAP-Aktoren in energiebewussten und geräuschlosen Anwendungen mit geringer Auslenkung, geringer Kraft und geringem Gewicht genutzt werden. Mit der fortschreitenden Entwicklung der EAP-Materialien und des Aktordesigns wird die Technologie auch für anspruchsvollere Anwendungen eingesetzt werden und dadurch ihren Anteil am wachsenden Aktormarkt erhöhen.

EAP-Sensoren ermöglichen die Herstellung von Kraft-/Dehnungssensoren mit großen Flächen und mit hoher Präzision zu einem Bruchteil der Kosten der heutigen Lösungen. Sie sollen in den Markt für medizinische und industrielle Anwendungen eingeführt werden, wo es oft einen ungedeckten Bedarf an präzisen Sensormessungen und Einwegsensoren gibt.

EAP-basierte Generatoren werden derzeit als vielversprechende Option zur Erzeugung von Energie aus Meeresswellen erforscht. Erste Ergebnisse scheinen dieses Konzept zu bestätigen.^[77]

Die bisher unveröffentlichten Daten im vorliegenden Kurzaufsatz wurden mit freundlicher Genehmigung von unseren Kollegen bei AMI und der EAP-Gruppe bei Bayer MaterialScience zur Verfügung gestellt.

Eingegangen am 7. März 2013

Online veröffentlicht am 22. Juli 2013

- [1] *Electroactive polymers (EAP) actuators as artificial muscles. Reality, Potential, and Challenges*, 2. Aufl. (Hrsg.: Y. Bar-Cohen), SPIE, Bellingham, WA, 2004.
- [2] *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers* (Hrsg.: F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelnire, P. Sommer-Larsen), Elsevier, Oxford, 2008.
- [3] F. Carpi, D. De Rossi in *Biomaterials Fabrication and Processing Handbook* (Hrsg.: P. Chu, X. Liu), CRC, Boca Raton, 2008, S. 483–495.
- [4] R. Pelnire, R. Kornbluh, Q. Pei, J. Joseph, *Science* **2000**, 287, 836–839.

- [5] G. Kofod, R. Kornbluh in *Intelligent Materials* (Hrsg.: M. Shahinpoor, H.-J. Schneider), Royal Society of Chemistry, London, 2008, S. 396–423.
- [6] R. Pelnire, R. Kornbluh, J. Joseph, *Sens. Actuators A* **1998**, 64, 77–85.
- [7] Y. Bar-Cohen, Q. Zhang, *MRS Bull.* **2008**, 33, 173–177.
- [8] W. Röntgen, *Ann. Phys. neue Folgen* **1880**, 13, 771–786.
- [9] R. Pelnire, R. Kornbluh in *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology* (Hrsg.: F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelnire, P. Sommer-Larsen), Elsevier, Oxford, 2011, S. 3–12.
- [10] Q. Zhang, J. Scheinbeim in *Electroactive Polymers (EAP) Actuators as Artificial Muscles* (Hrsg.: Y. Bar-Cohen), SPIE, Bellingham, WA, 2004, S. 95–150.
- [11] R. Pelnire, R. Kornbluh, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, S. Chiba, *Matls. Sci. Eng. C* **2000**, 11, 89–100.
- [12] P. Lochmatter, G. Kovacs, M. Wissler, *Smart Mater. Struct.* **2007**, 16, 477–486.
- [13] J.-S. Plante, S. Dubowsky, *Int. J. Solids Struct.* **2006**, 43, 7727–7751.
- [14] G. Kofod, *J. Phys. D* **2008**, 41, 215405.
- [15] M. Mooney, *J. Appl. Phys.* **1940**, 11, 582–592.
- [16] R. Ogden, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1972**, 328, 567–583.
- [17] O. Yeoh, *Rubber Chem. Technol.* **1990**, 63, 792–805.
- [18] Bayer MaterialScience, unveröffentlichte Ergebnisse.
- [19] H. Böse, D. Uhl, R. Rabindranath, EuroEAP 2012 Intl. Conf. Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers and artificial muscles, Potsdam, 2012, Poster 2.3.5.
- [20] B. Kussmaul, S. Risse, M. Wegener, G. Kofod, H. Krueger, Proc. ACTUATOR 2012, 13th Intl. Conf. on New Actuators, Bremen, 2012, S. 374–378.
- [21] Prof. Morshuis, TU Delft, persönliche Mitteilung.
- [22] G. Kofod, R. Kornbluh, R. Pelnire, P. Sommer-Larsen, Smart Structures and materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices **2001**, S. 141–146.
- [23] S. J. A. Koh, C. Keplinger, T. Li, S. Bauer, Z. Suo, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* **2011**, 16, 33.
- [24] „Method for manufacturing actuator“: A. Nozawa, H. Ito, M. Tamura, US20090127734, 21. Mai, 2009.
- [25] K. Jung, J. Lee, M. Cho, J. Koo, J. Nam, Y. Lee, H. Choi, Smart Structures and materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2006.
- [26] Y. Cheng, V. Bharti, T.-B. Xu, H. Xu, T. Mai, Q. Zhang, *Sens. Actuators* **2001**, 90, 138–147.
- [27] „Electroactive Polymers“: Q. Pei, R. Pelnire, R. Kornbluh, US6812624, 2. November, 2004.
- [28] G. Kofod, H. Stoyanov, M. Kollosche, S. Risse, H. Ragusch, D. McCarthy, R. Wache, D. Rychkov, M. Dansachmuller, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011, San Diego, 2011, S. 79760J.
- [29] 3M. 3M VHB Tapes Technical Data Sheet. <http://multimedia.3m.com/mwsmediawebserver?66666UuZjcFSLXTtnxMtLXs6EVuQEcuZgVs6EVs6E666666>.
- [30] X. Zhang, M. Wissler, B. Jaehne, R. Broennimann, G. Kovacs, Proc. SPIE Smart Structures and materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2004, S. 78–86.
- [31] J.-S. Plante, S. Dubowsky, *Smart Mater. Struct.* **2007**, 16, S227–S236.
- [32] H. Zhang, L. Düring, G. Kovacs, W. Yuan, X. Niu, Q. Pei, *Polym. Int.* **2010**, 59, 384–390.
- [33] R. Arshady, B. Reddy, M. George, *Polymer* **1986**, 27, 769–776.
- [34] P. Brochu, X. Niu, Q. Pei, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators & Devices (EAPAD), 2011.
- [35] „Electroactive Polymers and Articles Containing Them“: V. Bharti, T. Tran, US20110254408, 20. Oktober, 2011.

- [36] Z. Yu, W. Yuan, P. Brochu, B. Chen, Z. Liu, Q. Pei, *Appl. Phys. Lett.* **2009**, *95*, 192904.
- [37] W. Hu, X. Niu, X. Yang, Q. Pei, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators & Devices (EAPAD) XV.
- [38] R. Lombardi, J. Gasper in *Coatings Technology Handbook*, 3. Aufl., Marcel Dekker, New York, **2001**.
- [39] H.-Y. Chen, A. Maliakal, I. Kretschmar, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), **2012**, S. 83402W.
- [40] N. Tangboriboon, P. Wongpinthong, A. Sirivat, R. Kunanruksapong, *Polym. Compos.* **2010**, *32*, 44–51.
- [41] A. Maliakal, J. Cui, I. Kretschmar, L. Zhu, PMSE Synthesis and Self-Assembly Approaches to Polymer-Inorganic Hybrid Nanoparticles, 235 ACS Nat. Mtg, New Orleans, **2008**.
- [42] Artificial Muscle Inc., a Bayer MaterialScience Company. <http://www.vivitouch.com>.
- [43] X. Zhang, C. Löwe, M. Wissler, B. Jähne, G. Kovacs, *Adv. Eng. Mater.* **2005**, *7*, 361–367.
- [44] H. Liu, L. Zhang, D. Yang, N. Ning, Y. Yu, L. Yao, B. Yan, M. Tian, *J. Phys. D* **2012**, *45*, 485303.
- [45] J. Quinsaat, F. Nuesch, H. Hofmann, S. Michel, D. Opris, EuroEAP 2012 Intl. Conf. Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers and artificial muscles, Potsdam, **2012**.
- [46] F. Carpi, D. De Rossi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2005**, *12*, 835–843.
- [47] L. Romasanta, P. Leret, M. Hernandez, M. de La Rubia, J. Fernandez, M. Lopez-Manchado, R. Verdejo, EuroEAP 2012 Intl. Conf. Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers and artificial muscles, Potsdam, **2012**.
- [48] Z. Zhang, L. Liu, J. Fan, K. Yu, Y. Liu, L. Shi, J. Leng, Proc. SPIE Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures, **2008**, S. 692610-1–692610-8.
- [49] *Polyurethane*, Vol 7 (Hrsg.: G. Oertel, L. Abele), Hanser Verlag, München, **1993**.
- [50] „Electromechanical converter with a polymer element on the basis of a mixture of polyisocyanate and isocyanate-functional prepolymer and a connection with at least two isocyanate reactive hydroxyl groups“: W. Jenninger, S. Doerr, J. Wagner, EP2280034, 2. Februar, **2011**.
- [51] B. Kussmaul, S. Risso, G. Kofod, R. Wache, M. Wegener, D. McCarthy, H. Kruger, R. Gerhard, *Adv. Funct. Mater.* **2011**, *21*, 4589–4594.
- [52] H. Böse, D. Uhl, K. Flittner, H. Schlaak, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011 **2011**, 7976, 79762H.
- [53] solvène technical data sheet. http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Solvay%20Plastics%20Literature/BR_solvène_The_Electro_Active_Polymer_Solution_for_Printed_Electronics_EN.pdf.
- [54] solvène 250 data sheet. http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Solvay%20Plastics%20Literature/TB_Solvène_EAP.pdf.
- [55] B. Ameduri, *Chem. Rev.* **2009**, *109*, 6632–6686.
- [56] J. Li, C. Huang, Q. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *84*, 3124–3126.
- [57] Q. Zhang, H. Li, M. Poh, F. Xia, Z.-Y. Cheng, H. Xu, C. Huang, *Nature* **2002**, *419*, 284–287.
- [58] S. Rosset, H. Shea, *Appl. Phys. A* **2013**, *110*, 281–307.
- [59] „Electroactive polymers“: Q. Pei, R. Pelrine, R. Kornbluh, US7259503, August 21, **2007**.
- [60] F. Carpi, P. Chiarelli, A. Mazzoldi, D. De Rossi, *Sens. Actuators A* **2003**, *107*, 85–95.
- [61] „Fault-tolerant materials and methods of fabricating the same“: S. Biggs, M. Senesky, US7911761, March 22, **2011**.
- [62] M. Benslimane, P. Gravesen, P. Sommer-Larsen, Proc. SPIE 4695, Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 150, San Diego, **2002**.
- [63] N. Bowden, S. Brittain, A. Evans, J. Hutchinson, G. Whitesides, *Nature* **1998**, *393*, 146–149.
- [64] S. Lacour, J. Jones, Z. Suo, S. Wagner, S. Wagner, *IEEE Electron Device Lett.* **2004**, *25*, 179–181.
- [65] R. Verplancke, F. Bossuyt, D. Cuypers, J. Vanfleteren, *J. Micromech. Microeng.* **2012**, *22*, 015002.
- [66] L. Cai, J. Li, P. Luan, H. Dong, D. Zhao, Q. Zhang, X. Zhang, M. Tu, Q. Zeng, W. Zhou, S. Xie, *Adv. Funct. Mater.* **2012**, *22*, 5238–5244.
- [67] M. Shin, J. Oh, M. Lima, M. Kozlov, S. Kim, R. Baughman, *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 2663–2667.
- [68] W. Yuan, L. Hu, Z. Yu, T. Lam, J. Biggs, S. Ha, D. Xi, B. Chen, M. Senesky, G. Gruner, Q. Pei, *Adv. Mater.* **2008**, *20*, 621–625.
- [69] F. Xu, Y. Zhu, *Adv. Mater.* **2012**, *24*, 5117–5122.
- [70] P. Lee, J. Lee, H. Lee, J. Yeo, S. Hong, K. Nam, D. Lee, S. Lee, S. Ko, *Adv. Mater.* **2012**, *24*, 3326–3332.
- [71] R. Delille, M. Urdaneta, K. Hsieh, E. Smela, Proc. 13th Annual Intl. Symposium on Smart Structures and Materials, EAPAD, San Diego, **2006**, S. 61681Q1–6168111.
- [72] H. Stoyanov, M. Kollosche, S. Risso, R. Wache, G. Kofod, *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 578–583.
- [73] S. Rosset, M. Niklaus, P. Dubois, H. Shea, *Sens. Actuators A* **2008**, *144*, 185–193.
- [74] S. Rosset, M. Niklaus, P. Dubois, H. Shea, *Adv. Funct. Mater.* **2009**, *19*, 470–478.
- [75] W. Yuan, T. Lam, J. Biggs, L. Hu, Z. Yu, S. Ha, D. Xi, M. Senesky, G. Gruner, Q. Pei, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, **2007**, S. 65240N1–6524012.
- [76] T. Lam, H. Tran, W. Yuan, Z. Yu, S. Ha, R. Kaner, Q. Pei, Proc. SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, **2008**, S. 69270O.
- [77] P. Jean, A. Wattez, G. Ardoise, C. Melis, R. Van Kessel, A. Fourmon, E. Barrabino, J. Heemskerk, J. Queau, Proc. SPIE 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012, San Diego, **2012**, S. 83400C-83400C-21.
- [78] G. Kofod, Dielectric Elastomer Actuators, Dissertation, **2001**, The Technical University of Denmark.
- [79] X. Zhao, Z. Suo, *J. Appl. Phys.* **2008**, *104*, 123530–123537.
- [80] S. J. Biggs, R. Hitchcock, Proc. SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010, San Diego, **2010**, S. 76420I.
- [81] M. Rosenthal, C. Weaver, I. Polyakov, A. Zarrabi, P. Gise, Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, San Diego, **2008**, S. 692704.
- [82] Q. Wang, L. Zhang, X. Zhao, *Phys. Rev. Lett.* **2011**, *106*, 118301.
- [83] P. Gebbers, C. Gratzel, L. Maffli, C. Stamm, H. Shear, Proc. SPIE 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012, San Diego, **2012**, S. 83402P.
- [84] I. M. Koo, K. Jung, J. C. Koo, J.-D. Nam, Y. K. Lee, H. R. Choi, *IEEE Trans. Robotics* **2008**, *24*, 549–558.
- [85] Siehe Lit. [36].
- [86] H. Wang, S. Cai, F. Carpi, Z. Suo, *J. Appl. Mech.* **2012**, *79*, 031008.
- [87] F. Carpi, C. Salaris, D. De Rossi, *Smart Mater. Struct.* **2007**, *16*, S300–S305.
- [88] W. Kaal, S. Herold, persönliche Mitteilung.
- [89] G. Kovacs, L. During, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, **2009**, S. 72870A.
- [90] P. Lotz, M. Matysek, H. Schlaak, *IEEE/ASME Trans. Mechantron.* **2011**, *16*, 58–66.
- [91] H. Prahlad in *Dielectric Elastomers and Electromechanical Transducers*, Elsevier, Oxford, **2008**, S. 217–226.
- [92] „Methods for fabricating an electroactive polymer device“: M. Rosenthal, Q. Pei, N. Bonwit, US7761981, 27. Juli, **2010**.
- [93] „Electroactive polymer device“: M. Rosenthal, Q. Pei, N. Bonwit, US8093783, 10. Januar, **2012**.

- [94] „Rolled electroactive polymers“: M. Rosenthal, Q. Pei, N. Bonwit, US7233097, 19. Juni, **2007**.
- [95] C. Jean-Mistral, S. Basrour, J.-J. Chaillout, Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, San Diego, **2008**, S. 692716.
- [96] C. Graf, J. Maas, D. Schapeler, Proc. SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010, San Diego, **2010**, S. 764217.
- [97] S. J. A. Koh, C. Keplinger, L. Tiefeng, S. Bauer, Z. Suo, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* **2011**, 16, 33–41.
- [98] T. McKay, B. O'Brien, E. Calius, I. Anderson, *Smart Mater. Struct.* **2010**, 19, 055025.
- [99] „Electroactive polymer sensors“: R. Pelnine, R. Kornbluh, Q. Pei, J. Eckerle, US6809462, 26. Oktober, **2004**.
- [100] K. Jung, K. J. Kim, H. R. Choi, *Sens. Actuators A* **2008**, 142, 343–351.
- [101] SRI. Electroactive Polymer „Artificial Muscle“. <http://www.sri.com/engage/products-solutions/epam>.