

## Detailanalyse von DE-Rollenaktoren für Lautsprecherantriebe

Petko Bakardjiev<sup>1</sup>, Markus Franke<sup>2</sup>, Uwe Marschner<sup>2</sup>, Andreas Richter<sup>2</sup>, M. Ercan. Altinsoy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professur für Akustik und Haptik, TU-Dresden,

<sup>2</sup> Professur für Mikrosystemtechnik, TU-Dresden,

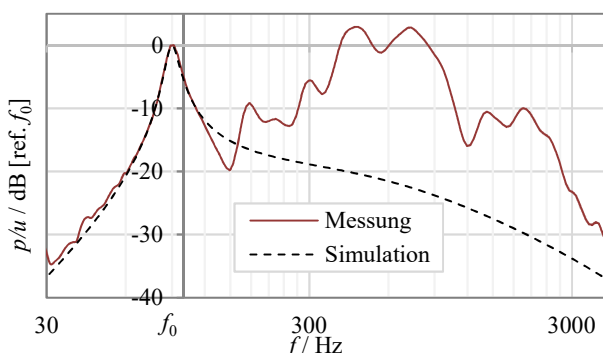
E-Mail: petko.bakardjiev@tu-dresden.de

### Einleitung

Dielektrischen Elastomeren (DE) werden auf Grund ihrer Reaktionsgeschwindigkeiten und Dehnungseigenschaften in der Literatur oft eine besondere Eignung zur Realisierung von Schallquellen zugesprochen, die in speziellen Anwendungen elektrodynamischen Lautsprechern überlegen sein können. Die sehr hohe Vielfalt an möglichen Aktorformen mit spezifischen konstruktiven Freiheitsgraden und möglichen Materiallösungen bei den verwendeten Elastomeren und dehnbaren Elektroden, gepaart mit dem von zahlreichen Nichtlinearitäten geprägten Verhalten stellen jedoch eine bedeutende Herausforderung bei der Realisierung anwendungsoptimierter Lösungen dar.

Hierzu ist ein sehr detailliertes Systemverständnis notwendig welches es ermöglicht mit den Mitteln des computergestützten Systementwurfs mit vertretbarem Aufwand gute Vorhersagen über das zu erwartende Verhalten zu treffen.

Bereits [1] wurde ein robuster Lautsprecherantrieb auf Basis von dielektrischem Elastomer in Form eines Funktionsdemonstrators vorgestellt. Hierbei handelt es sich um einen mechanisch nicht vorgespannten Rollenaktor (push-Konfiguration) der zum Antrieb einer konventionellen Lautsprechermembran verwendet wird. Der Aktor wurde messtechnisch untersucht und mittels eines elektromechanischen Netzwerkmodells nachgebildet. Dieses wurde dann um ein akustisches Netzwerk so erweitert, dass der durch die Erweiterung um Lautsprechermembran und Lautsprechergehäuse zu erwartende Schalldruck vorausgerechnet werden konnte.



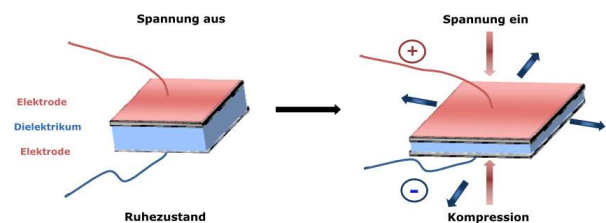
**Abbildung 1:** Normierter Frequenzgang ( $p/u$ ) Messung und Simulation der DE-Lautsprechereinheit  $U_0 = 1,5 \text{ kV}$ ,  $u = 50 \text{ V}_{pp}$

Die abschließenden akustischen Untersuchungen wiesen einen charakteristischen Frequenzgang auf der eine wesentlich größere nutzbare Bandbreite und Amplitude bei höheren Frequenzen aufwies, als es mittels des verwendeten Modells prognostiziert wurde.

In dieser Arbeit wird die erweiterte Modellbildung und Analysen auf deren Grundlage vorgestellt, welche im Rahmen weiterführender Studien und messtechnischer Analysen entwickelt wurden. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten [2, 3] kann das zu erwartende Aktorverhalten nur anhand von Material- und Konstruktionsparametern mit guter Übereinstimmung ohne extensive messtechnische Untersuchungen und Parameterfittings mittels elektromechanischen Netzwerken vorausgerechnet werden. Dies bietet neben einem verbesserten Systemverständnis auch die Möglichkeit zur Durchführung extensiver Parameterstudien hinsichtlich aller Freiheitsgrade und insbesondere eine Abschätzung des technologischen Einsatz- und Leistungspotenzials in Bezug auf konkrete Leistungsanforderungen.

### Grundlagen

Dielektrische Elastomere (DE) und daraus gefertigte Aktoren (DEA) bestehen aus einem elastischen, inkompressiblen Dielektrikum mit beidseitig angebrachten dehnbaren Elektroden. Durch Anlegen einer Spannung und die resultierende Anziehungskraft der Elektroden entsteht ein Druck, welcher das Elastomer verformt.



**Abbildung 2:** Prinzipielle Funktionsweise eines dielektrischen Elastomerelements

Der entstehende gerichtete Kraftfluss kann zur Verrichtung von Arbeit genutzt werden. Zur Realisierung hoch dynamischer Anwendung eignen sich insbesondere silikonbasierte (PDMS) Elastomere, welche sehr umweltstabil sind und über einen sehr hohen Frequenzbereich nahezu konstante Materialeigenschaften aufweisen [4–6].

Durch materialtechnische Modifikation und Strukturierung [5, 6] ist es möglich, die Eigenschaften der DE für verschiedene Anwendung anzupassen. Eine für den Rollenaktor wesentliche Eigenschaft ist ein anisotropes Dehnungsverhalten, bei dem die Querkontraktion fast ausschließlich in der axialen Richtung erfolgt. Dies trägt zu einer erheblichen Leistungssteigerung bei.

Die Anisotropie kann u.a. durch Vordehnung, flexible Stützmechanismen [7] oder Oberflächenstrukturierung [8]realisiert werden und wird für die betrachtete Anordnung als grundlegend vorausgesetzt.

## Konstruktion

In der nachfolgenden Abbildung ist der schematische Aufbau eines Rollenaktors aus dielektrischem Elastomer (DERA) dargestellt.

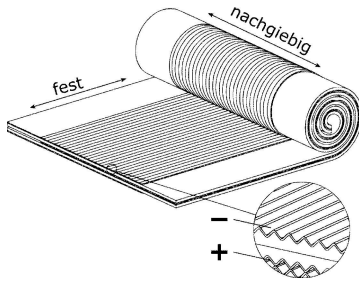


Abbildung 3: Aufbau eines gewickelten DERA aus PolyPower[3]

Dieser besteht aus mehreren zylindrisch angeordneten Lagen von DE. Eine Fertigungsmöglichkeit ist das Aufwickeln einer langen DE-Bahn, welche zur Verhinderung des Kurzschlusses einmalig gefaltet ist [9]. An den Randbereichen des Aktors befinden sich zur Verhinderung eines elektrischen Überschlages durch passive Bereiche die über keine oder nur eine einseitige Elektrode verfügen. Diese dienen ebenfalls der Kontaktierung der Elektroden. Die passiven Bereiche an den Aktorstirnflächen stellen im statischen Fall passive Federelemente dar, welche u.a. die erzielbare blockierte Kraft deutlich reduzieren, weshalb versucht wird, diese so gering wie möglich zu halten.

In den durchgeführten Arbeiten wurden Rollenaktoren auf Basis von PolyPower hergestellt. Die Aktoren wurden dabei in einem manuellen Prozess auf zerlegbaren Wickelkörpern aufgewickelt. Die passiven Bereiche wurden auf nur 5 mm reduziert und werden im Rollen Kern von einer Ringhülse gestützt, welche auch für mechanische Schnittstellen dient.

## Modellbildung/Simulation

Die Funktionsweise eines DEA ist im weitesten mit einem elektrostriktiven, bzw. elektrostatischen Aktor vergleichbar. Das bedeutet, dass ein bidirektionaler Betrieb ohne mechanische Vorstreckung ebenfalls nur mittels einer Polarisierungsspannung  $U_0$  realisierbar ist, welche je nach Konfiguration mehrere kV betragen kann.

Im Gegensatz zu einem reinen Elektrostaten ist bei DEA durch die dehnbaren Elektroden und die Inkompressibilität der Kraftkopplungsfaktor jedoch doppelt so groß.

Die Modellierung kann demnach durch eine Linearisierung des Verhaltens um den Arbeitspunkt [10, 11] mittels elektromechanischer und akustischer Netzwerke erfolgen.

Vor der Erstellung des Netzwerkmodells und seiner Parameterbestimmung muss zunächst eine numerische iterative Berechnung der Parameterzustände des Aktors im gewünschten Arbeitspunkt erfolgen.

Der Arbeitspunkt beschreibt dabei ein statisches Gleichgewicht aus elektrostatischer Kraft, mechanischen Lasten und Randbedingungen und den Spannungszuständen im DE. Dabei sind die wesentlichen nichtlinearen Zusammenhänge, wie z.B. das hyperelastische Materialverhalten und die Dehnungsbeziehung zu berücksichtigen. So können sich im Arbeitspunkt vor allem Abweichungen in der Geometrie und dem effektiven

E-Modul im Vergleich zum unbelasteten Aktor ergeben. Weiterhin muss auch eine Abschätzung bezüglich des Erreichens der Durchbruchfeldstärke, bzw. einer elektromechanischen Instabilität (Pull-In) erfolgen.

Anhand der ermittelten Arbeitspunktparameter kann das elektromechanische Wandlerverhalten analog zu elektrostatischen Aktoren über die blockierte Kapazität  $C_b$  den Koeffizienten des Gyratorischen Wandlers  $Y$ , so wie die Kurzschlussnachgiebigkeit  $n_k$  bestimmt und abgebildet werden (siehe Abbildung 5).

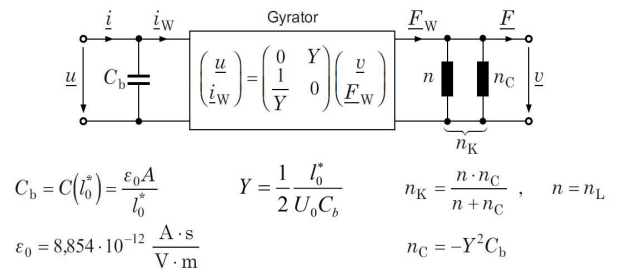


Abbildung 4: Vierpolschaltbild eines verlustfreien dielektrischen Elastomer-Wandlers

Letztere besteht dabei aus der Parallelschaltung der mechanischen Nachgiebigkeit  $n$  und der elektrostatischen Feldnachgiebigkeit  $n_c$ . Der Elektrodenabstand im Arbeitspunkt wird durch  $l_0^*$  beschrieben.

Die mechanischen Parameter sind hierbei zunächst nur auf die Feldrichtung bezogen. Zur Übersetzung des Wirkverhaltens in die axiale Richtung kann aufgrund der Volumenkonstanz durch einen Transformator, dessen Übertragungskoeffizient sich aus den Flächen-, bzw. Längenverhältnissen ergibt, erfolgen. Dieser Transformator kann mit dem elektromechanischen Wandler-Gyrator zu einem effektiven Gyrator zusammengefasst werden, der die elektromechanische Wandlung in axialer Richtung beschreibt. Des Weiteren sind noch die wirksame Aktormasse, sowie weitere wirksame mechanische und akustische Lasten und Randbedingungen an den mechanischen Schnittstellen zu ergänzen. In axialer Richtung verfügt ein Rollenaktor über zwei Schnittstellen (an jeder Stirnfläche), wodurch sich im mechanischen Netzwerk ein Dreitor ergibt, dessen Symmetriepunkt sich je nach angeschlossenen Lasten und Randbedingungen an verschiedenen Stellen entlang der Aktorachse befindet. Dies macht eine Diskretisierung der Nachgiebigkeits-, Massen- und Verlustkomponenten in axialer Richtung notwendig. Es bietet sich somit eine Betrachtung des DE-Rollenaktors als eindimensionaler Wellenleiter an. Die Netzwerkstruktur ist dabei ähnlich der eines piezoelektrischen Längsschwingers [10]. Aus der resultierenden Wellenimpedanz kann u. a. die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  anhand der Beziehung

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

aus dem E-Modul ( $E$ ) (im Arbeitspunkt) und der Dichte ( $\rho$ ) bestimmt werden [10]. Für silikonbasierte DE befinden sich die Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 20 und 40 m/s. Sie liegen deutlich unterhalb der angegebenen

Schallgeschwindigkeit von Silikonem im Bereich von 1200 – 1500 m/s [12]. Diese niedrigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten machen eine weiterführende Diskretisierung notwendig, damit die Bedingung  $\Delta l < \lambda / 4$  für die Netzwerkdarstellung erfüllt ist.

Der Wellenleitercharakter von DERA weist typische Ausprägungen von Resonanzen und Antiresonanzen (Bewegung an den Stirnflächen) auf, welche sich je nach Randbedingungen, angeschlossenen Lasten und Ausführung der Schnittstellen unterschiedlich ausprägen können. Deren weiterführende Betrachtung ist daher zur vollständigen Beschreibung des Übertragungsverhaltens unabdingbar.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen und Messungen konnte so u. A. gezeigt werden, dass die passiven Endbereiche als mechanische Resonatoren zu einer zusätzlichen Überhöhung und steilen Abfall des Frequenzgangs in höheren Bereichen beitragen und somit den potenziell nutzbaren Frequenzbereich signifikant beeinflussen.

Nachfolgend ist hier exemplarisch der simulierte Beschleunigungsfrequenzverlauf eines lastfreien einseitig fixierten Rollenaktors aus PolyPower (6 cm x 5 m) mit verschieden großen passiven Bereichen dargestellt.

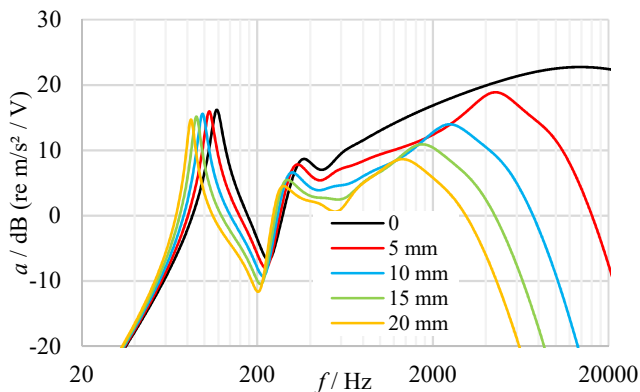


Abbildung 5: Simulation des Beschleunigungsfrequenzgangs eines DERA mit unterschiedlich langen Passivbereichen

Zum Erreichen einer hohen Bandbreite ist der passive Bereich und sein Nachgiebigkeitsverhalten so gering wie möglich zu halten, was durch geeignete Fertigungsmethode und Ausführung der mechanischen Schnittstellen erfolgen kann.

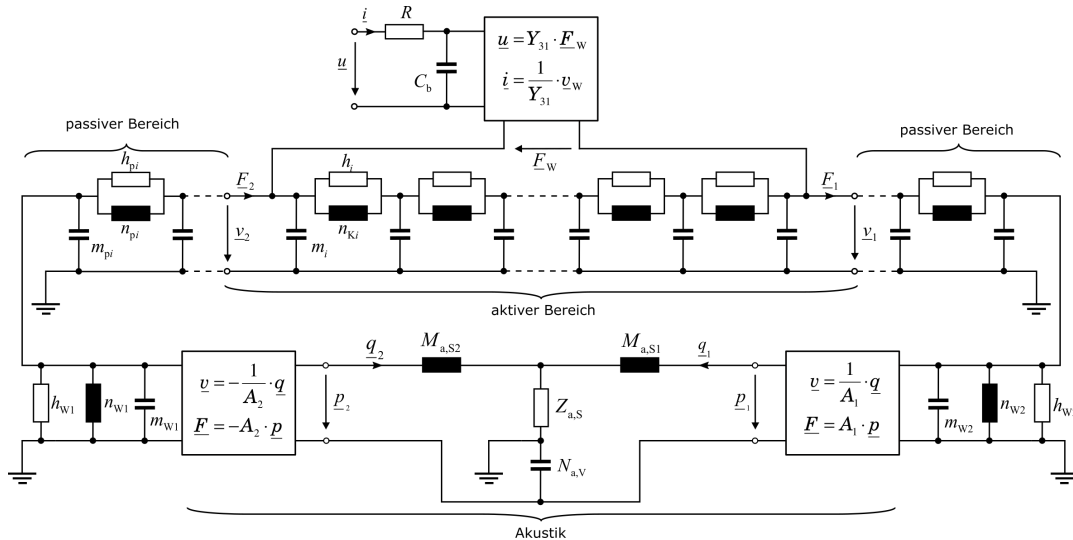


Abbildung 7: Netzwerkmodell eines DERA mit beidseitig angebrachten Lautsprechermembranen mit einem gemeinsamen Rückraumvolumen

In Abbildung 6 ist die Struktur eines elektromechanisch-akustisches Netzwerkes eines DERA-Lautsprechers gegeben, welcher beidseitig zwei Lautsprechermembrane antreibt, die über ein gemeinsames Rückraumvolumen verfügen.

Die mechanischen Verlustadmittanzen welche sich aus dem Materialverhalten aber auch dem Aktoraufbau ergeben sind nicht direkt vorausberechenbar. Der Wert wird anhand der ersten Resonanz eines einseitig fixierten Aktors bestimmt, der eine spezifischen Güte zugewiesen wird. Aus Erfahrungswerten vorangegangener Versuche liegt diese Güte für Rollenaktoren aus PolyPower im Bereich 6 – 11 (typ. 7,5). Die deutlichen Schwankungen sind zumeist durch die Fertigung und die mechanischen Schnittstellen bedingt.

Aufgrund der wirksamen Dämpfung sind bilden sich die Moden höherer Ordnung (ab ca. 6. Mode) nur noch sehr schwach ausgeprägt, so dass Diskreditierung auf ein praktikables Maß beschränkt werden kann.

Nachfolgend sind der gemessene und simulierte Frequenzgang eines gefertigten DERA gegenübergestellt.

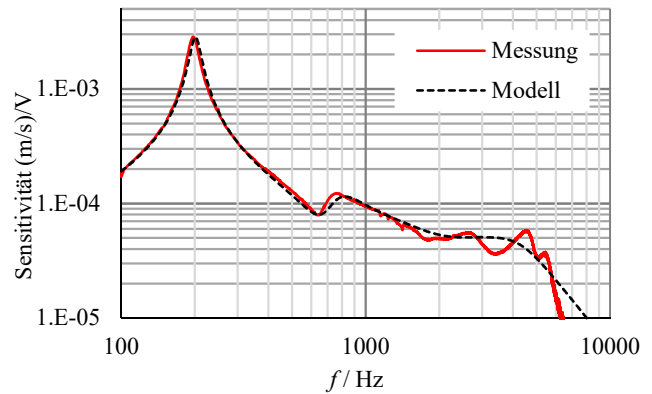
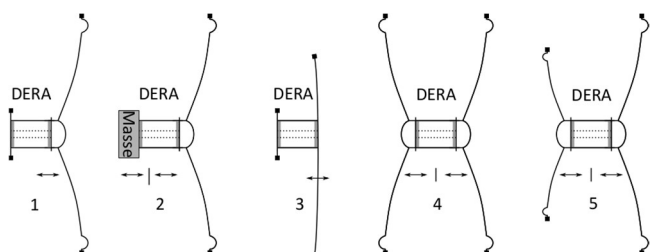


Abbildung 6: Vergleich von Modellvorhersage und Messung des Frequenzgangs eines DERA

Es ist zu erkennen, dass durch die Resonanzüberhöhungen höherer Ordnung der ersten Resonanz zu einen z. T. deutlich höheren Schnellepegel im Vergleich zu einem einfachen Feder-Masse-Systemen aufweisen, wodurch ein Pegelgewinn in diesem Bereich beobachtet werden kann.

## Akustische Erweiterung

Zur Realisierung von Lautsprechern können die DERA durch Befestigung von Lautsprechermembranen erweitert werden. Hierbei ergeben sich durch die zwei vorhandenen mechanischen Schnittstellen zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten, von denen einige nachfolgend exemplarisch dargestellt sind.



**Abbildung 8:** Mögliche Konfigurationen für Schallwandler mit DERA-Antrieb; 1, 2) Einseitig befestigte Lautsprechermembran, 4,5) Beidseitige Membranen (symmetrisch und asymmetrisch) mit gemeinsamen, bzw. getrennten Rückraumvolumen und 3) Körperschallanreger (Biegewellenlautsprecher).

Im Gegensatz zu elektrodynamischen Lautsprechern, benötigen DERA Lautsprecher u. A. keinen schweren Magnetkreis und Zentrierspinne. Ebenso kann die Sickennachgiebigkeit sehr groß gewählt werden, da diese für das Zurückbewegen der Membran nicht notwendig ist. Entsprechend der gewählten Konfiguration kann das entwickelte elektromechanische Modell zur Vorausberechnung des Übertragungsverhaltens um akustische Netzwerke [10, 11] erweitert werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass DERA sich durch ihre eingeschränkte Auslenkung insbesondere für den Antrieb mittlerer bis großer Lautsprechermembranen, bzw. als Körperschallerreger für Tief- bzw. Mittelhochtöner eignen (bis ca. 6 kHz). In bisherigen Versuchen auf Basis von *PolyPower*, konnten ohne Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten Schalldruckpegel von über 80 dB in einem Meter Entfernung (Freifeld) erzielt werden.

Die hier vorgestellten Netzwerkmodelle ermöglichen eine gute Prognose der Amplitudenfrequenzgänge von DERA-Lautsprechern und erlauben eine Vielzahl an weiterführenden Betrachtungen sowie extensive Parameterstudien. Anhand dieser Studien sollen in weiterführenden Arbeiten DERA-Lautsprecher entwickelt werden, mit denen sich für spezifische Anwendungsszenarien Vorteile gegenüber der Verwendung elektrodynamischer Systeme realisieren lassen.

Weiterhin wird daran gearbeitet, das Wiedergabeverhalten mittels geeigneter Signalkonditionierung (DSP) und Leistungselektronik weiter zu verbessern. So sind kann u. A. der Wirkungsgrad durch den Einsatz von Verstärkern mit Ladungsrückgewinnung und Verringerung der Widerstände beträchtlich erhöht werden [2].

## Danksagung

Die Arbeiten in diesem Projekt wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

## Literatur

- [1] P. Bakardjiev, E. Altinsoy, J. Troge, A. Bucht, "Entwicklung eines Lautsprecherantriebs aus dielektrischem Elastomer," *Proceedings of the DAGA'16*.
- [2] M. J. Tryson, R. Sarban, and K. P. Lorenzen, "The dynamic properties of tubular DEAP actuators," in San Diego, California, USA, 2010, 764200.
- [3] Sarban R., Jones R., Mace B.R., and Rustighi E., "A Tubular Dielectric Elastomer Actuator: Fabrication, Characterisation and Active Vibration Isolation,"
- [4] J. Vaicekauskaite, P. Mazurek, S. Vudayagiri, and A. L. Skov, "Mapping the mechanical and electrical properties of commercial silicone elastomer formulations for stretchable transducers," *J. Mater. Chem. C*, vol. 8, no. 4, pp. 1273–1279, 2020, doi: 10.1039/C9TC05072H.
- [5] Federico Carpi & Danilo de Rossi & Roy Kornbluh & Ronald Edward Pelrine & Peter Sommer-Larsen, "Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology,"
- [6] "Electromechanically Active Polymers-Carpi 2016,"
- [7] F. Klug, S. Solano-Arana, N. J. Hoffmann, and H. F. Schlaak, "Multilayer dielectric elastomer tubular transducers for soft robotic applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 10, p. 104004, 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab1ed3.
- [8] Danfoss Polypower A/S, "White Paper," 2012.
- [9] M. Tryson, H.-E. Kiil, and M. Benslimane, "Powerful tubular core free dielectric electro activate polymer (DEAP) push actuator," in San Diego, California, USA, 2009, 72871F.
- [10] A. Lenk, R. G. Ballas, R. Werthschützky, and G. Pfeifer, *Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics*: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [11] U. Marschner and R. Werthschützky, *Aufgaben und Lösungen zur Schaltungsdarstellung und Simulation elektromechanischer Systeme: In Mikrotechnik und Mechatronik*: Springer-Verlag, 2015.
- [12] M. Lethiecq, F. Levassort, D. Certon, and L. P. Tran-Huu-Hue, "Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications," *Chapter*, vol. 10, pp. 191–215, 2008.