Entwicklung eines Lautsprecherantriebs aus dielektrischem Elastomer

Petko Bakardjiev[1], M. Ercan Altinsoy[1], Jan Troge[2], André Bucht[2]

[1] *TU Dresden, Lehrstuhl Kommunikationsakustik E-Mail: petko.bakardjiev@tu-dresden.de*

[2] *Fraunhofer IWU E-Mail: jan.troge@iwu.fraunhofer.de*

Einleitung

Elektroaktive Polymere (EAP) insbesondere dielektrische Elastomere (DE) haben als **„Intelligente Werkstoffe“** bzw. „**Smart Materials“** in den vergangenen Jahren eine starke Entwicklung erfahren. In zahlreichen Veröffentlichungen wurde bereits das hohe Einsatzpotential von DE im Hinblick auf die robusten Eigenschaften und günstigen Materialkosten in Verbindung mit einfachen Strukturen nachgewiesen [1]. DE, auch als „künstliche Muskeln“ bezeichnet, haben je nach Materialzusammensetzung einen sehr großen Dehnbereich (bis 300%), Ansprechzeiten im ms-Bereich, können sehr hohe Leistungsdichten aufweisen und qualifizieren sich neben dem Einsatz in Aktoren auch für Sensor- und Generatoranwendungen [1]. Neben einer Vielzahl an Einsatzgebieten, die sich auf einen quasistatischen Betrieb konzentrieren, rücken zunehmend mehr dynamische Anwendungen, wie z.B. aktive Schwingungskompensation [2] in den Fokus. Insbesondere wird in diesem Zusammenhang der Einsatz für Schallquellen in der Literatur häufig erwähnt, wobei dazu bisher vergleichsweise wenige Realisierungen beschrieben wurden. Darunter sind insbesondere die Arbeiten [3] und [4] zu erwähnen. Sie zeigen das Potential, mittels DE zukünftig Schallquellen zu entwickeln, welche durch die hohe Leistungsdichte und eine erhöhte Funktionsintegration leichter, leistungsfähiger und effizienter im Vergleich zu elektrodynamischen Systemen sind. Die niedrigen Kosten und die einfache Verfügbarkeit der Ausgangsrohstoffe [5] von DE bieten darüber hinaus einen zusätzlichen ökonomischen wie auch ökologischen Anreiz diese Thematik weiter zu verfolgen.

In dieser Arbeit wird eine weitere Möglichkeit untersucht, eine Schallquelle mittels DE zu realisieren. Hierbei wird zur Funktionsdemonstration ein Wickelaktor als alternativer Antrieb für einen Lautsprecher verwendet. Im Vergleich zu den bei [3] vorgestellten Membranaktoren ist hierbei die Funktionsintegration geringer, jedoch lassen sich größere Eigenimpedanzen realisieren, wodurch sich potenziell höhere Schalldrücke erzeugen lassen.

Anhand messtechnischer Untersuchungen werden die Eigenschaften eines selbst aufgebauten Aktors bestimmt. Im Bereich der Hauptresonanz wird das Verhalten mittels eines elektromechanischen Netzwerks nachgebildet, welches anschließend durch die akustische Last ergänzt wird. Dadurch soll eine Vorhersage des tieffrequenten akustischen Verhaltens getroffen werden, welche abschließend messtechnisch überprüft wird.

Theoretischer Hintergrund

Die grundlegende Funktionsweise von DE ist weitestgehend unabhängig von der Aktorbauform. Bei DE handelt es sich um einen nachgiebigen elektrostatischen Kondensator, der aus zwei flexiblen Elektroden besteht, zwischen denen sich eine passive, inkompressible Elastomerfolie befindet. Bei Anlegen einer elektrischen Spannung ziehen sich die gegenüberliegenden Elektroden an und setzen das inkompressible Elastomer unter Druck, welches nahezu volumenkonstant ist und sich dadurch seitlich ausdehnt (Abbildung1).

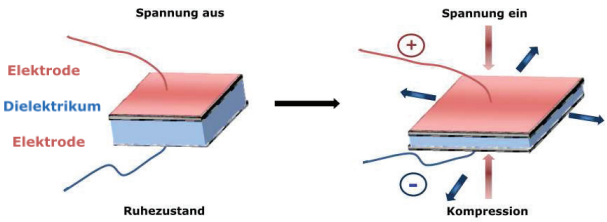

Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise eines dielektrischen Elastomerelements [5]

Das Verhalten ist dabei von zahlreichen Nichtlinearitäten geprägt. An dieser Stelle sollen der Einfachheit halber nur die wesentlichsten Zusammenhänge erläutert werden. Ausführliche Erläuterungen sind in [6], [7], [8] zu finden.

Der Druck zwischen den zwei Elektroden wird durch die Coulomb-Kraft der Ladungen verursacht.

$$P_z = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}^2 \tag{1}$$

Die mechanische Steifigkeit ist im Wesentlichen durch den E-Modul (Y) bestimmt, welcher jedoch für die hyperelastischen Eigenschaften der verwendeten Elastomere abhängig vom wirkenden Druck ist und sich nichtlinear verhält. Beschreibungen zum hyperelastischen Verhalten finden sich in den Modellen von Ogden, Mooney-Rivlin oder Yeoh. In erster Näherung kann der Zusammenhang für die Dickenänderung d_z der Folie über Gleichung (2) ausgedrückt werden [6].

$$d_z = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{E d_0^2} \tag{2}$$

Eine weitere wichtige Größe ist die Kapazität der jeweiligen DE-Anordnung, die zusammen mit den Kontakt- und Leitungswiderständen einen elektrischen Tiefpass bildet, welcher maßgeblich die Eingangsimpedanz bestimmt. Wobei die zustandsabhängige Änderung der Widerstände an dieser Stelle zunächst vernachlässigt werden kann. Die Kapazität ergibt sich aus

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{d^2} \tag{3}$$

Aufbau

Zur Erstellung der Lautsprechereinheit war ein Wickelaktor der Fa. Danfoss „*InLastor Push Actuator*“ vorgesehen, welcher im Rahmen von „evaluation kits“ bezogen werden konnte und darüber hinaus bereits in verschiedenen Arbeiten charakterisiert wurde [2], [6],[9]. Der „*InLastor Push Actuator*“ ist ein kernloser Wickelaktor, bestehend aus 7 m Folienmaterial mit einer aktiven Folienbreite (beidseitig elektrodiert) von 6 cm. Die Materialbasis ist das DE-

Folienmaterial „*Danfoss Polypower*“. Dieses besteht aus einer 80 µm dicken korrugierten (beidseitig gewellten) Silikonfolie welche auf beiden Seiten mit einer 90 nm starken Silberelektrode versehen ist. Die Korrugierung dient zur Vermeidung der Dehnung der unelastischen Metallelektrode und führt wie nachfolgend abgebildet zu einer Vorzugsrichtung der Ausdehnung quer zu den Wellen.

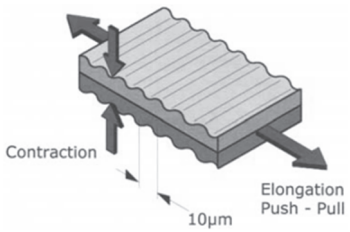

Abbildung 2: Schematische Darstellung der „*Polypower*“-Folienbeschaffenheit und Arbeitsweise [10]

Der „*InLastor Push Actuator*“ zeigte sich jedoch für den Einsatz als Lautsprecherantrieb in Verbindung mit dem verwendeten Hochspannungsverstärker „*RheCon“* der Fa. *Fludicon* als ungeeignet. Grund hierfür ist die niedrige Grenzfrequenz des elektrischen Tiefpasses. Der gesamte Aktor ist nur über zwei wenige Zentimeter große Flächen kontaktiert, die sich am äußeren Anfang der Wicklung befinden. Dadurch entsteht ein sehr hoher Übergangs- und Leitungswiderstand in Zusammenhang mit der sehr langen und nur 90 nm starken Elektrode. Durch diese hohe elektrische Last wurde der dynamische Einsatzbereich des Verstärkers sehr stark eingeschränkt. Weiterhin traten auf Grund von quer zur Wickelrichtung verlaufenden Irregularitäten der Elektrode bei Spannungen über 3 kV Oberflächenüberschläge auf, welche das Elektrodenmaterial an diesen Stellen zerstören. Das dahinterliegende Aktormaterial war anschließend nicht mehr kontaktiert. Stattdessen wurde aus verfügbarem „*Polypower*“-Material ein neuer Wickelaktor aufgebaut. Dieser wurde zur Verbesserung des elektrischen Verhaltens und der Betriebssicherheit entlang der gesamten Wicklung über eine Metallelektrode kontaktiert. Der Aktor ist 13 cm lang und besteht aus ca. 5,5 m Folie, wobei die aktive Breite 9 cm beträgt. Der Wickelaktor ist ebenfalls kernlos mit einem Innendurchmesser von 10 mm. An den Enden befinden sich im inaktiven Bereich Kunststoffhülsen mit Innengewinde zur mechanischen Befestigung.

Nach der messtechnischen Charakterisierung wurde der Aktor in ein konventionelles Lautsprecherchassis integriert (Ø = 10“) (Abbildung 3). Aus Sicherheitsgründen wurde zunächst auch eine Zentrierspinne verwendet, welche jedoch auf Grund der Kraftschlüssigkeit des Systems zukünftig entfallen kann.

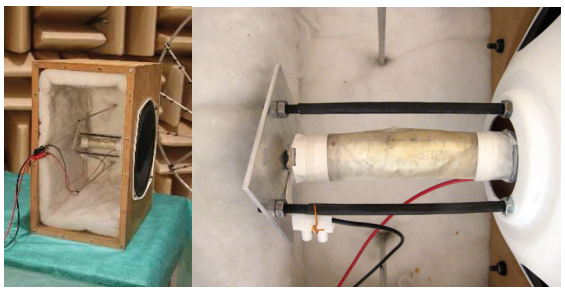

Abbildung 3: DE-Wickelaktor-Lautsprecherdemonstrator

Messtechnische Charakterisierung

Zur Festlegung des Arbeitspunktes sowie zur Bestimmung der für das elektromechanische Netzwerkmodell notwendigen Parameter wurden messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Dafür wurde der nachfolgend schematisch dargestellte Versuchsaufbau in unterschiedlichen Konfigurationen verwendet.

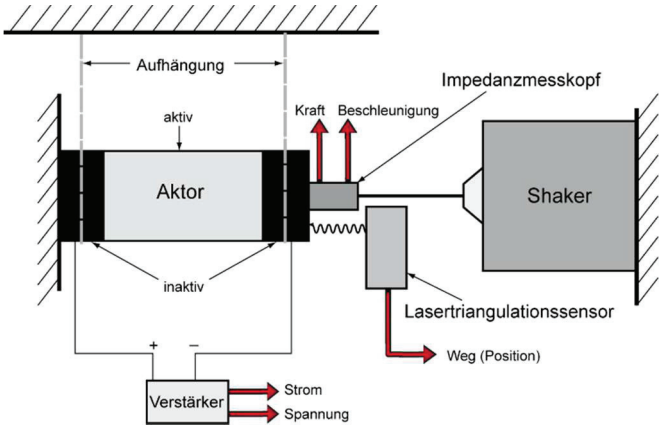

Abbildung 4: Schema des Versuchsaufbaus zur messtechnischen Charakterisierung des DE-Wickelaktors

Statisches Übertragungsverhalten:

Für einen dynamischen Betrieb des Aktors, ist die Wahl eines geeigneten Arbeitspunktes notwendig. Dazu wurde die statische Aktorauslenkung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung mittels Lasertriangulationssensor erfasst (Abbildung 5).

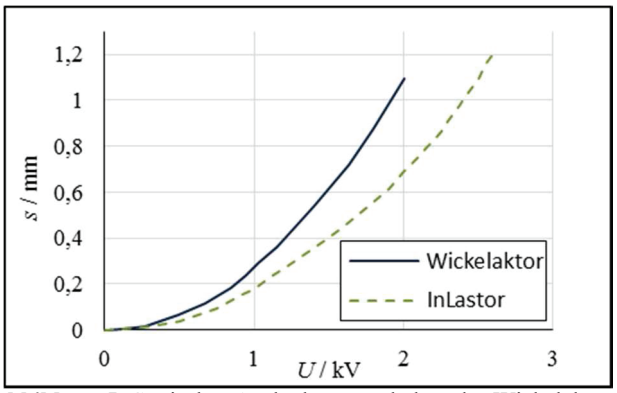

Abbildung 5: Statisches Auslenkungsverhalten des Wickelaktors im Vergleich zu *Danfoss InLastor*

Mit zunehmender elektrischer Vorspannung steigt der Übertragungsfaktor und somit der Wirkungsgrad. Dadurch wird zusätzlich die Last des treibenden Verstärkers vermindert, wodurch eine höhere nutzbare Bandbreite möglich wird. Ebenso verbessert sich die Linearität des Aktors um den eingestellten Arbeitspunkt. Die Vorspannung kann dabei sowohl elektrisch, als auch mechanisch erfolgen. Die obere Grenze der Vorspannung wird jedoch durch die Dehngrenze des Elastomers und dessen Durchschlagsfestigkeit begrenzt. Gemäß Angaben von Danfoss ist das verwendete Material [10] bis ca. 5 kV durchschlagssicher. Aus Sicherheitsgründen wurde die maximale Spitzenspannung jedoch auf 3 kV beschränkt. Für die messtechnischen Untersuchungen und für das Netzwerkmodell wurden Polarisationsspannungen (U_0) zwischen 1,5 kV und 2,5 kV verwendet.

Elektrische Parameter
Die elektrische Kapazität des Wickelaktors wurde mittels Multimeter an den Kontakten gemessen. Hierzu wurde der Aktor beidseitig festgebremst. Die Ungenauigkeit bei Nichtberücksichtigen der Dehnung von max. 2% wird vernachlässigt.
Der elektrische Widerstand wurde aus dem Frequenzgang von Strom und Spannung am ebenfalls mechanisch kurzgeschlossenen Aktor bestimmt. Mit zunehmender Frequenz sinkt der komplexe kapazitive Widerstand immer weiter ab, so dass sich der Gesamteingangswiderstand dem ohmschen Widerstand nähert. Die Grenzfrequenz entspricht dabei der Grenzfrequenz des elektrischen Tiefpasses bzw. der elektrischen Übertragungsfunktion.
Mechanische Impedanz
Die mechanische Impedanz, kann in der einfachsten Form in einem Netzwerkmodell als Parallelschaltung einer Masse, dargestellt werden [11]. Zur Bestimmung der mechanischen Parameter wurde der Frequenzverlauf der Schnelle am Eingang des einseitig fixierten Aktors im Bereich der ersten Resonanzfrequenz sowohl frei als auch mit Zusatzmasse gemessen. Die Frequenzverläufe sind in Abbildung 6 dargestellt.

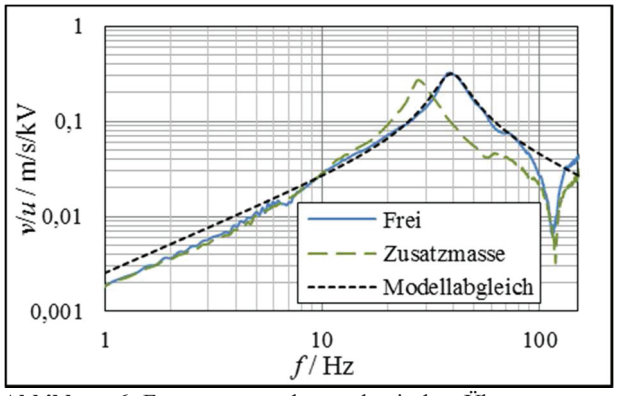

Abbildung 6: Frequenzgang der mechanischen Übertragungsfunktion (Schnelle/Spannung), U_0 = 1,5 kV, u=707 V

Unmittelbar nach der Resonanz des Aktors bricht dessen Übertragungsverhalten stark ein. Dies ist auf eine zu geringe Knickfestigkeit des Aktors zurückzuführen. D.h. dieser ist nicht ausreichend eigenstabil, sodass die Ausdehnung von Teilen des Aktors bei bestimmten Frequenzen nicht mehr ausschließlich in Richtung der Wickelachse erfolgt.
Anschließend wurde die mechanische Eingangsimpedanz bei Shakeranregung des elektrisch kurzgeschlossenen Aktors mit einem Impedanzmesskopf direkt gemessen (Abbildung 7).

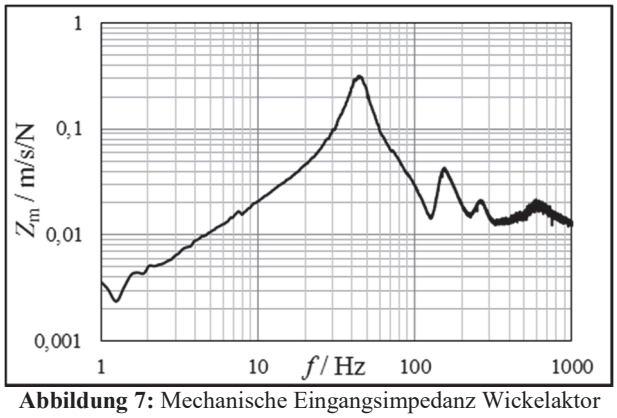

Abbildung 7: Mechanische Eingangsimpedanz Wickelaktor

Es ist zu erkennen, dass oberhalb der ersten Hauptresonanz weitere Resonanzen auftreten. Diese stehen jedoch in keinem harmonischen Zusammenhang. Als Ursache werden Resonanzeffekte höherer Ordnung vermutet, welche z.B. durch die Korrugierung der Folie, eine inhomogene mechanische Belastung des Aktormaterials und das viskoelastische Verhalten bedingt werden können. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit dieser Thematik soll Gegenstand weiterführender Arbeiten sein.
Wandlerkonstante
Die gyratorische Wandlerkonstante Y, bzw. der Übertragungsfaktor von Kraft zu Eingangsspannung wurde durch direkte Kraftmessung bestimmt. Dabei war der Aktor beidseitig mechanisch festgebremst, wobei die Messungen für unterschiedliche statische elektrische Vorspannungen durchgeführt wurden.
Parameter der Lautsprechererweiterung
Die Parameter Masse der Lautsprechermembran, Nachgiebigkeit der Aufhängung und des Gehäusevolumens (…l), sowie die Kolbenfläche, der akustische Massebelag und die akustische Lastimpedanz ergeben sich aus dem Gewicht, den geometrischen Abmessungen und der Federkraft der Sicken. Sie wurden mit den gängigen Verfahren messtechnisch ermittelt, bzw. gemäß der bekannten Literatur [11] errechnet und sollen diesbezüglich hier nicht näher erläutert werden.

Modellbildung und akustische Messung

Anhand der zuvor beschriebenen Untersuchungen konnte ein Parametersatz gewonnen werden, der es ermöglicht, für eine definierte Vorspannung im unteren Frequenzbereich ein einfaches elektromechanisches Netzwerkmodell des Aktors und des angekoppelten akustischen Systems zu erstellen. Das Modell und die bestimmten Netzwerkparameter sind nachfolgend angegeben.

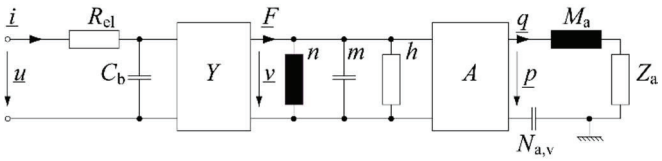

Abbildung 8: Elektromechanisches Netzwerkmodell des DE-Lautsprechers

Tabelle 1: Übersicht der Modellparameter, U_0 = 1.5kV, u = 50 V_{pp}

R_{el}	2 kΩ
C_b	131,6 nF
Y	1 N/kV
n	134 µm/N
m	52 g
h	0,35 N/(m/s)
A	0,0506 m²
M_a	0,035 Ns²/m⁵
$N_{a,v}$	2,82e-7 m⁵/N

Der Schalldruckfrequenzgang der Lautsprecheranordnung wurde im akustischen Freifeld gemessen. Nachfolgend sind die normierten Frequenzverläufe des Schalldrucks aus der Simulation und der Messung im akustischen Freifeld dargestellt (Abbildung 9). Bezugspunkt ist der Schalldruckpegel der Hauptresonanz der akustischen Messung.

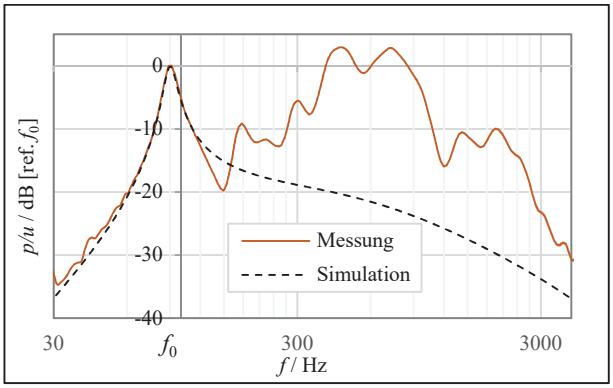

Abbildung 9: Normierter Frequenzgang (p/u) Messung und Simulation der DE-Lautsprecherinheit U_0 = 1,5 kV, u = 50 V_{pp}

Zu erkennen ist die hohe Güte, sowie der Abfall zu hohen Frequenzen, was durch den elektrischen Tiefpass ($f_g \sim 610$ Hz) bedingt wird. Die Frequenzverläufe des Modells und der Messung zeigen tieffrequent und bezüglich der oberen Grenzfrequenz eine sehr gute Übereinstimmung. Oberhalb der Hauptresonanz liegt der gemessene Verlauf deutlich über dem des vereinfachten Modells. Als Ursache hierfür werden die bereits bei der mechanischen Charakterisierung erwähnten Resonanzeffekte, sowie Moden der Lautsprechermembran vermutet.
Der Lautsprecher wurde mit maximal U = 3 kV betrieben. Dabei wurden in Einzelfrequenzen im Freifeld Schalldruckpegel von über 84 dB in 1 m Entfernung erreicht.

Zusammenfassung

DE-Schallwandler sind eine vielversprechende Alternative zu bestehenden Schallquellen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine weitere Möglichkeit bestehend aus einem Wickelaktor als Antrieb eines Kolbenstrahlers vorgestellt. Dazu wurde ein Wickelaktor als Antrieb in ein Lautsprecherchassis mit einem Gehäuse integriert.
Der manuell gefertigte Aktor, so wie die gewählte Lautsprechermembran- und die Gehäusekombination stellen dabei keine optimierte Lösung dar, da der Fokus zunächst auf der Funktionsdemonstration, der Modellbildung und der Betriebssicherheit lag.
Bereits in dieser frühen Entwicklungsstufe zeichnen sich neben der bloßen Verwendung günstiger Materialien zahlreiche Vorteile dieses Ansatzes ab. So ist z.B. der Aktor stets kraftschlüssig mit der Lautsprechermembran verbunden, wodurch zusätzliche Maßnahmen zur Zentrierung entfallen können. Geringe Ströme im Aktor führen zu einer vernachlässigbaren thermischen Belastung und das geringe Eigengewicht des Aktors verspricht in weiteren Entwicklungsschritten eine hohe erzielbare Leistungsdichte.
Es konnte gezeigt werden, dass bereits mit einem sehr einfachen Netzwerkmodell eine qualitative Vorhersage des Aktorverhaltens und der grundlegenden elektromechanischen und akustischen Wechselwirkungen getroffen werden kann. Der messtechnische Aufwand zur Parameterbestimmung ist dabei kaum größer als bei der Charakterisierung elektrodynamischer Lautsprecherantriebe.
Oberhalb der Hauptresonanz konnte eine deutlich erhöhte Leistungsfähigkeit beobachtet werden. Die Ursachen werden in komplexeren Resonanzeffekten, bedingt durch nichtlineares Verhalten, Beschaffenheit der Aktorfolien sowie Aktorfertigung gesehen. Dieses soll in weiterführenden Arbeiten untersucht und die Modellierung erweitert werden. Weiterhin soll, dass vollständige Potential von Wickelaktoren für die Erstellung von Schallquellen genauer untersucht werden. Die Verwendung elektromechanischer Netzwerkmodelle ist dabei ein wichtiges Hilfsmittel um die sehr hohe Parameterzahl und Bandbreite in Bezug auf Werkstoffe, Aktordimensionierung und akustische Lasten effizient bearbeiten zu können.

Literatur

[1] F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. E. Pelrine, and P. Sommer-Larsen, *Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology*. Elsevier, 2011.

[2] R. Sarban, “Active vibration control using DEAP transducers,” 2011.

[3] R. Heydt, R. Pelrine, J. Joseph, J. Eckerle, and R. Kornbluh, “Acoustical performance of an electrostrictive polymer film loudspeaker,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 2, pp. 833–839, 2000.

[4] T. Sugimoto, K. Ono, A. Ando, S. Chiba, M. Waki, and K. Kurozumi, “Sound generator structure for low-elastic electroactive polymer,” *Acoustical Science and Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 411–413, 2010.

[5] I. Jansen, A. Richter, O. Jost, and A. Schönecker, “Einzigartige Plattformtechnologie für Dielektrische Elastomer,” *www.projekt-candela.de*, 2010.

[6] W. Kaal and S. Herold, “Electroactive polymer actuators in dynamic applications,” *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 16, no. 1, pp. 24–32, 2011.

[7] M. Wissler and E. Mazza, “Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators,” *Smart Materials and structures*, vol. 14, no. 6, p. 1396, 2005.

[8] L. Patrick, K. Gabor, and M. Silvain, “Characterization of dielectric elastomer actuators based on a hyperelastic film model.” .

[9] M. Tryson, H.-E. Kiil, and M. Benslimane, “Powerful tubular core free dielectric electro activate polymer (DEAP) push actuator,” in *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2009, p. 72871F–72871F.

[10] Danfoss, “PolyPower A/S - White Paper,” 2012.

[11] R. G. Ballas, G. Pfeifer, and R. Werthschützky, *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik: Dynamischer Entwurf-Grundlagen und Anwendungen*. Springer Science & Business Media, 2009.