

**DIELEKTRISCHE ELASTOMERE – GRUNDLAGE FÜR
ENERGIEEFFIZIENTE UND KOMPAKTE ANTRIEBSSYSTEME
IN DYNAMISCHEN SCHALT- UND FLUIDANWENDUNGEN**

DISSERTATION

**ZUR ERLANGUNG DES GRADES DES DOKTORS DER
INGENIEURWISSENSCHAFTEN DER NATURWISSENSCHAFTLICH-
TECHNISCHEN FAKULTÄT DER UNIVERSITÄT DES SAARLANDES**

VON

PHILIPP LINNEBACH

SAARBRÜCKEN

2020

Tage des Kolloquiums: 11.05.2021

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jörn Erik Walter

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chihao Xu

Akad. Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Michael Roland

*„Eine wirklich gute Idee erkennt man daran, dass ihre
Verwirklichung von vorne herein ausgeschlossen erscheint.“*

- Albert Einstein -

Gewidmet meiner geliebten Familie.

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme. Sie wurde im Rahmen meiner Promotion im Fachbereich Systems Engineering an der Universität des Saarlandes angefertigt.

Der Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme an der Universität des Saarlandes ist eng mit dem in Saarbrücken ansässigen Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH vernetzt, in dem er auch räumlich angesiedelt ist. Ziel ist die anwendungsorientierte Forschung und industriennahe Entwicklung in den Bereichen Sensorik und Aktorik, Fertigungs- sowie Montageverfahren und deren Automatisierung. Gesellschafter des Instituts sind zu 60% das Saarland und zu jeweils 20% die Hochschule für Technik und Wirtschaft und die Universität des Saarlandes. Die Arbeitsgruppe von Prof. Seelecke ist auf dem Gebiet der Dielektrischen Elastomere als eine der weltweit führenden Forschungseinheiten ausgewiesen und beschäftigt derzeit 26 wissenschaftliche Mitarbeiter sowie 14 Hilfwissenschaftler. Der Lehrstuhl forscht an der Entwicklung mechatronischer Antriebs- und Sensorsysteme auf Basis intelligenter Materialien. Dazu zählen unter anderem magnetische und thermische Formgedächtnislegierungen, Piezomaterialien sowie dielektrische Elastomere, welche auch das Forschungsgebiet meiner Arbeit darstellen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten, Mitwirkern und Unterstützern dieser Arbeit bedanken. Dieser Dank gilt allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Ihre Unterstützung in zahlreichen Gesprächen und Diskussionen. Ein besonderes Dankeschön gilt dem Lehrstuhlinhaber Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil Stefan Seelecke, der mir die Möglichkeit eröffnete meine Promotion anzufertigen. Namentlich zu nennen sind außerdem Benedikt

VIII

Holz, der mich stets beim Aufbau und der Entwicklung von Elektroniklösungen für Demonstratoren unterstützt hat sowie Jun.-Prof. Dr. Gianluca Rizzello für das Korrekturlesen meiner Veröffentlichungen. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für das Interesse an meiner Arbeit und deren Begutachtung.

Ein großes Dankeschön gilt auch der Wacker Chemie AG, der Alfmeier Präzision SE, dem ABB AG Forschungszentrum Deutschland sowie der Parker Hannifin Corporation für ihre materielle und finanzielle Unterstützung.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau Hannah Linnebach, die mir stets unterstützend und beratend zur Seite stand.

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Charakterisierung und anwendungsspezifischen Optimierung diverser Bauarten Dielektrischer Elastomeraktoren hinsichtlich Schnelligkeit, Energieeffizienz, Dynamik und Kompaktheit. Ein solcher Aktor ist ein mechatronisches Antriebssystem, das durch die Kopplung eines oder mehrerer Vorspannelemente und einer dielektrischen Elastomermembran bei Anlegen einer elektrischen Spannung Bewegungen ausführen kann.

Innerhalb der Arbeit wird zunächst der Einsatz in einem elektrischen Schaltschütz untersucht. Das entwickelte Antriebssystem zeigt bei gesteigerter Performance eine erhebliche Effizienzsteigerung und benötigt lediglich 0,5% der Energie einer herkömmlich verwendeten Magnetspule. Außerdem wird im Rahmen dieser Arbeit ein quasistatisches Auslegeverfahren erweitert und an periodische Anwendungen wie haptische Displays, Vibrationsrinne und Pumpen angepasst. Nach erfolgreicher Validierung des neuen Schemas werden zwei Kompressoren mit unterschiedlicher Bauform entwickelt und validiert. Bei einem der Prototypen wird dabei der nahezu siebenfache Normvolumenstrom und 21-fache Maximaldruck im Vergleich zu der bis dahin leistungsstärksten DE-basierte Pumpen aus der Literatur erreicht. Zur Verbesserung der anwendungsspezifischen Skalierbarkeit wird schließlich innerhalb dieser Arbeit ein für die anwendungsspezifische Anpassung neuartiges Mehrlagenkonzept entworfen, das mit standardisierten Serienprozessen gefertigt werden kann.

ABSTRACT

The present work focuses on experimental characterization and application-specific design optimization of different types of dielectric elastomer actuators. Such mechatronic drive systems obtained by combining a dielectric elastomer membrane with a mechanical pre-loading mechanism are capable to perform a stroke when applied a high voltage. By means of the developed design methodologies, dielectric elastomer actuators can be optimized in terms of speed, energy efficiency, dynamics, and compactness.

In the first part of this thesis, the use of dielectric elastomer technology in a contactor is examined. The developed drive system shows considerable energy savings. With the same dynamic performance, it only requires 0.5% of the energy of the conventionally used magnetic coil. In the second part of the work, a quasi-static design method is expanded and adapted to dynamic applications, such as haptic displays, vibratory feeder, and compressors. After successful validation, two compressor prototypes based on actuators with different geometries are developed and validated. One of the prototypes achieves an almost seven times higher standard volume flow and 21 times higher maximum pressure, compared to the most powerful DE-based pump currently reported in the literature. To improve the application-specific scalability of DE actuators, a novel multilayer concept has also been designed within this work. In the future, it will allow manufacturing with standardized industrial processes.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	VII
KURZZUSAMMENFASSUNG	IX
ABSTRACT	XI
INHALTSVERZEICHNIS	XIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XVII
FORMELZEICHEN	XIX
KAPITEL 1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	2
1.2 Ziele	3
1.3 Vorgehensweise	4
KAPITEL 2 GRUNDLAGEN DIELEKTRISCHER ELASTOMERE	7
2.1 Elektromechanisches Grundprinzip	7
2.1.1 Sensor	8
2.1.2 Aktor	9
2.1.3 Generator	11
2.2 Verwendete Materialien	12
2.2.1 Dielektrikum	12
2.2.2 Elektrode.....	13
2.3 Aktorbauarten	14
2.3.1 Stapelaktor.....	15
2.3.2 Membranaktoren	17
2.4 Herstellung von Membranaktoren.....	24
KAPITEL 3 ELEKTRISCHES SCHALTSCHÜTZ	27
3.1 Charakterisierung Schaltschütz	28
3.1.1 Funktionsweise	28
3.1.2 Charakterisierung der Antriebseigenschaften.....	30

3.2	Antriebskonzept und -vorauslegung.....	33
3.3	Charakterisierung von DEA und Vorspannsystem	36
3.3.1	COP-DEA	36
3.3.2	Vorspannmechanismus	41
3.4	Finale messwertbasierende Antriebsauslegung	42
3.5	Demonstrator: Konstruktion und Aufbau	44
3.6	Validierung und Ergebnisse.....	45
3.7	Zusammenfassung und Fazit.....	51
KAPITEL 4	DYNAMISCHES ENTWURFSSHEMA	53
4.1	Erweitertes Kräftemodell.....	54
4.2	Dynamische Eigenschaften Dielektrischer Elastomere.....	57
4.2.1	Bauform COP-DEA	57
4.2.2	Bauform SIP-DEA	60
4.3	Dynamischer Antriebssystementwurf	63
4.3.1	Bauform COP-DEA	63
4.3.2	Bauform SIP-DEA	65
4.4	Validierung	66
4.4.1	Bauform COP-DEA	66
4.4.2	Bauform SIP-DEA	67
4.5	Zusammenfassung und Fazit.....	69
KAPITEL 5	PUMPEN UND KOMPRESSOREN	71
5.1	Pneumatischer Pumpendemonstrator	72
5.1.1	Funktionsweise.....	72
5.1.2	Charakterisierung	74
5.1.3	Systementwurf und Konstruktion	75
5.1.4	Validierung und Ergebnisse	76
5.2	Anwendungsspezifischer Pumpenprototyp	80
5.2.1	Aufgabe	80
5.2.2	Charakterisierung des konventionell verwendeten Kompressors.....	81
5.2.3	Lösungskonzept.....	82
5.2.4	Herstellung des SIP-DEA Stapels	84
5.2.5	Mechanische Charakterisierung der Aktoren	85
5.2.6	Elektrische Charakterisierung der Aktoren	87
5.2.7	Pumpenmechanismus	88
5.2.8	Vereinfachter Pumpendemonstrator.....	90
5.2.9	Aufbau und Validierung der Pumpe.....	94
5.3	Zusammenfassung und Fazit.....	97
KAPITEL 6	MEHRLAGENKONZEPT.....	101
6.1	Stand der Technik.....	101

6.1.1	Kontaktieren durch Stechen	102
6.1.2	Stirnseitig kontaktieren	103
6.1.3	Kupferband als Kontaktierung	104
6.1.4	Gefaltet kontaktieren	105
6.2	Optimiertes Mehrlagenkonzept	106
6.2.1	Aufbau	106
6.2.2	Herstellungsprozess	106
6.2.3	Ausführungsbeispiele	107
6.3	Zusammenfassung und Fazit	116
KAPITEL 7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	119
LITERATURVERZEICHNIS	123
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	135
TABELLENVERZEICHNIS	143
EIGENE PUBLIKATIONEN	145

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

SMA	Formgedächtnislegierung (engl. <i>Shape memory alloy</i>)
PEC	Piezokeramik (engl. <i>Piezoelectric ceramics</i>)
EAP	Elektroaktives Polymer (engl. <i>Electroactive polymer</i>)
DEAP	Dielektrisches elektroaktives Polymer (engl. <i>Dielectric electroactive polymer</i>)
DE	Dielektrisches Elastomer (engl. <i>Dielectric elastomer</i>)
DEA	Dielektrischer Elastomeraktor (engl. <i>Dielectric elastomer actuator</i>)
EM	Elektromagnetisches Antriebsprinzip
DEA-S	DEA mit Silikon als Dielektrikum
DEA-A	DEA mit Acryl als Dielektrikum
SIP-DEA	Streifenförmiger DEA, der in der Ebene arbeitet (eng. <i>Strip in-plane DEA</i>)
CIP-DEA	Ringförmiger DEA, der in der Ebene arbeitet (eng. <i>Circular in-plane DEA</i>)
SOP-DEA	Streifenförmiger DEA, der aus der Ebene herausarbeitet (eng. <i>Strip out-of-plane DEA</i>)
COP-DEA	Ringförmiger DEA, der aus der Ebene herausarbeitet (eng. <i>Circular out-of-plane DEA</i>)

FORMELZEICHEN

A	Fläche des beidseitig beschichteten Dielektrikums
C	Kapazität
E	Elektrisches Feld
E_M	Benötigte Energiemenge der Magnetspule
f_c	Grenzfrequenz des RC-Glied
F_{DEA}	Kraft des Dielektrischen Elastomers in Bewegungsrichtung
F'_{DEA}	Kraft des Dielektrischen Elastomers in Richtung der Folienebene
F_L	Kraft einer externen Last
F_{LBS}	Kraft des linearen Vorspannsystems
F_{NBS}	Kraft des nichtlinearen Vorspannsystems
F_{SZ}	Kraft des elektrischen Schaltschützes
F_T	Trägheitskraft
i	Stromstärke
k	Steifigkeit der Zylinderfeder
k_0	Federsteifigkeit der Feder im Feder-Masse-System
l_0	Differenz zwischen äußerem und innerem Radius bei einem COP-DEA
m	Bewegte Masse
m_0	Bewegte Masse im Feder-Masse-System
P	Elektrische Leistung
p	Druck in der Pumpenkammer
p_M	Maxwell Druck
R	Widerstand in einem RC-Glied
s_z	Dehnung des Dielektrikums

XX

t	Zeit
T	Maximale Zeit für Energiemengenberechnung
U	Elektrische Spannung
V	Volumen
x	Weg des Systems
\dot{x}	Geschwindigkeit des Systems
\ddot{x}	Beschleunigung des Systems
x_{vor}	Vorspannweg der Zylinderfeder
Y	Elastisches Modul
z	Dicke des verwendeten Dielektrikums
z_0	Dicke der nicht ausgelenkten Folie
\hat{z}	Amplitude der harmonischen Schwingung
α	Winkel zwischen Folienebene und Bewegungsebene
ϵ_0	Permittivität in Vakuum
ϵ_r	Relative Permittivität
ω_0	Eigenkreisfrequenz eines linearen Feder-Masse-Systems
ω	Kreisfrequenz der Bewegung

Kapitel 1 EINLEITUNG

Im industriellen sowie im alltäglichen Umfeld sind wir heutzutage von einer Vielzahl kleiner Antriebe umgeben, deren Zahl aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung und Automatisierung stetig steigt. Diese elektromechanischen Antriebselemente werden auch Aktoren genannt. Ob als Steuerelement in der Kaffeemaschine, als haptisches Display im Auto oder als Ventil in der automatisierten Produktion, überall werden Aktoren zum Steuern und Positionieren eingesetzt. Gleichzeitig wächst das Bedürfnis nach kleineren und kostengünstigeren alternativen Antriebskonzepten bei gleichbleibender Leistung. Intelligente Materialien können die genannten Anforderungen erfüllen und werden somit immer häufiger in modernen Produkten verwendet. Außerdem eröffnen diese neue Anwendungsfelder, die mit herkömmlichen Antriebsprinzipien wie z.B. pneumatischen oder elektromagnetischen Antrieben, nicht möglich sind. Zu diesen sogenannten intelligenten Werkstoffen gehören unter anderem die Formgedächtnislegierung (engl. *Shape memory alloy*, SMA), die Piezokeramik (engl. *Piezoelectric ceramics*, PEC) und das elektroaktive Polymer (engl. *Electroactive polymer*, EAP). Von diesen drei Technologien sind die PECs bereits mit mehreren Produkten am Markt etabliert (z.B. Ultraschall- und Beschleunigungssensor [1], Einspritzdüse [2], hochpräzise Positionierbühne [3] und aktiver Schwingungsdämpfer [4]). Die SMAs werden bisher nur in wenigen Anwendungen kommerziell verwendet (z.B. Kamerastabilisierung, Ventile und temperaturabhängige Volumenstromregler [5], [6]), befinden sich jedoch auf dem Vormarsch. Die neuste und damit die kommerziell am wenigsten etablierte Antriebstechnologie sind die EAPs [7]. Diese lassen sich wieder in mehrere Untergruppen untergliedern. Die vorliegende Arbeit fokussiert dabei die dielektrischen EAPs (engl. *Dielectric electroactive polymer*, DEAP). Sie bieten eine einzigartige Kombination aus elektromechanischen Eigenschaften [8]. Obwohl

dieser Effekt der reversiblen, elektrisch induzierten Dehnung anhand eines Streifens aus Naturkautschuk schon 1880 durch Röntgen beschrieben wurde [9], konnte er lange nicht genutzt werden. Erst mit der Weiterentwicklung der benötigten Materialien, dem Fortschritt in den Werkstoffwissenschaften und den ersten grundlegenden Untersuchungen in den späten 80er Jahren [10], [11] wurde der Grundstein für die weitere Erforschung der dielektrischen Elastomere (engl. *Dielectric elastomer*, DE) gelegt. Die ersten Untersuchungen der aktorischen Eigenschaften fanden in den frühen 90er Jahre am Stanford Research Institute in den USA [12], [13] und am Risø National Laboratory in Dänemark [14] statt. In der Funktion als Antrieb werden sie häufig als dielektrischer Elastomeraktor (engl. *Dielectric elastomer actuator*, DEA) bezeichnet.

1.1 Motivation

Die Eigenschaften der drei genannten intelligenten Materialien sowie das elektromagnetische Antriebsprinzip (EM) sind in Tabelle 1.1 gegenübergestellt. Vergleichswerte sind die in der Aktorik wichtigsten Parameter: die mögliche Dehnung durch Aktuierung, die maximale mechanische Spannung, die Energiedichte, die Effizienz sowie die Geschwindigkeit des jeweiligen Antriebsprinzips. Die DEs werden dabei nochmals in zwei mögliche Basiswerkstoffe des Dielektrikums, Silikon (DEA-S) und Acryl (DEA-A), untergliedert.

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften des elektromagnetischen Antriebsprinzips und den intelligenten Materialien in Anlehnung an [15]

Antriebsprinzip	DEA-S	DEA-A	SMA ⁺	PEC ⁺⁺	EM ^o
Max. Dehnung in %	63	380	> 5	0,5	50
Max. mechanische Spannung in MPa	3,0	7,2	> 200	110	0,1
Spez. elastische Energiedichte in J/g	0,75	3,4	> 15	0,013	0,003
Elastische Energiedichte in J/cm³	0,75	3,4	> 100	0,1	0,025
Max. Effizienz in %	90	60-80	< 10	90	> 90
Relative Geschwindigkeit	Schnell	Mittel	Langsam	Schnell	Schnell

⁺ Nickel-Titan (NiTi)

⁺⁺ Blei-Zirkonat-Titanat bei einem maximalen elektrischen Feld von 4 V/μm

^o Werte basieren auf einer Anordnung von 0,01 m dicken Schwingspulen, 50% Leiter, 50% Permanentmagnet, 1 T Magnetfeld, 2 Ohm-cm spezifischer Widerstand und 40.000 W/m² Verlustleistung

Ersichtlich ist, dass die genannten Antriebsprinzipien sehr unterschiedlich sind und jede in einem bestimmten Bereich überzeugt. Dies bedeutet, dass jeder Einsatz individuell betrachtet und analysiert werden muss. Die SMAs sind z.B. für langsame Anwendungen vorteilhaft, bei denen eine große Kraft mit kleinem Hub erforderlich ist und nur ein kleiner Bauraum zur Verfügung steht. PECs hingegen eignen sich für große Kräfte bei kleinem Hub mit hoher Ansteuerfrequenz. Die DEAs überzeugen mit überdurchschnittlicher Dehnung, hoher Energieeffizienz und durchschnittlicher Energiedichte. Sie bilden somit die Basis für leichte, kompakte und energieeffiziente mechatronische Systeme [16]. Darüber hinaus sind sie bekannt für schnelle, lautlose und hocheffiziente Antriebslösungen. Bezüglich dieser Eigenschaften können in der Literatur einige Anwendungsbeispiele gefunden werden: Ventile [17], [18], optische Schalter [19], [20], Pumpen [21], [22], Braillezeilen [23], Lautsprecher [24], [25], Greifer [26], [27], Positionierbühnen [28] und schnell verstellbare Linsen [29].

Zusätzlich zu den hervorragenden Antriebseigenschaften besitzen DEs sensorische Eigenschaften, die den Aufbau eines Drucksensors [30] oder einer Waage [31] ermöglichen. Diese Charakteristik ermöglicht den Bau intelligenter Aktoren auf Basis dielektrischer Elastomere, die zu jeder Zeit den Dehnungszustand des DEA ohne zusätzliche externe Sensorik messen können [32]. Die Technologie kann außerdem zum Aufbau von Generatoren genutzt werden [33]–[35] und ist aufgrund der weichen Strukturen sehr gut geeignet für den Einsatz in der Soft-Robotik [36].

1.2 Ziele

Die oben genannten Beispiele sind nur eine kleine Auswahl an möglichen Anwendungen für DEs. Jeder Einsatz hat seine eigenen anwendungsspezifischen Anforderungen. Um die Akzeptanz bei Entwicklungsingenieuren zu steigern und die Technologie der breiten Masse zugänglich zu machen, wird eine Designvorschrift benötigt. Der Grundstein hierfür wurde in [37] mit einer allgemeinen quasistatischen Vorgehensweise gelegt. Darin wurden auch die Skalierungsgesetze bezüglich Kraft und Hub der verschiedenen Bauformen erarbeitet. Durch das Ersetzen herkömmlicher Antriebe sollen Dielektrische Elastomere zukunfts- und marktfähig werden. Auf diese Weise können die DEs disruptiv in den Markt eingeführt werden. Hierfür ist das Erarbeiten der Vorteile von DEs in spezifischen, vielversprechenden

Anwendungen, in denen konventionelle Antriebssysteme zum Einsatz kamen, essenziell für den Erfolg.

Daraus resultiert das Ziel, die verschiedenen Bauformen und -größen hinsichtlich Schnelligkeit, Energieeffizienz, Dynamik und Kompaktheit zu charakterisieren, experimentell zu untersuchen und für verschiedene Anwendungen zu optimieren.

1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise, um das in 1.2 definierte Ziel zu erreichen, ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt. Hierfür müssen zu Beginn in Kapitel 2 die Grundlagen erarbeitet und zusammengetragen werden. Darin wird auf das elektromechanische Grundprinzip eingegangen und die verschiedenen Effekte näher erläutert. Auch für die unterschiedlichen Materialien, die als Dielektrikum oder elektrisch leitfähige Elektrode verwendet werden können, wird eine Übersicht erstellt. Außerdem werden verschiedene Aufbauarten sowie deren Herstellung erklärt.

Kapitel 3 zeigt das Potenzial der Technologie als Antrieb in einem elektrischen Schaltschütz. Dort können die DEs, die ein elektromagnetisches Antriebssystem ersetzen, mit Geschwindigkeit und hoher Energieeffizienz überzeugen. Hierzu wird zu Beginn das Schütz gesamtheitlich charakterisiert und das neue Antriebskonzept auf Basis Dielektrischer Elastomere vorausgelegt. Die anschließende Charakterisierung der zuvor entworfenen und hergestellten DEs bildet die Basis für die finale messwertbezogene Antriebsauslegung. Der daraus resultierende Demonstrator wird validiert und die Ergebnisse den anfangs aufgenommenen Leistungsdaten des Schützes gegenübergestellt.

Ein sehr vielversprechendes Einsatzgebiet für DEAs sind dynamisch, periodische Anwendungen wie Pumpen, Kompressoren, Vibrationsförderer oder haptische Bedienflächen. Hierfür wird in Kapitel 4 das aus [37] bekannte Designschema um dynamische Kräfte erweitert. Zu diesem Zweck wird ein erweitertes Entwurfsschema entwickelt und zwei Bauformen von DEAs systematisch, dynamisch charakterisiert. Darauf aufbauend werden für beide Bauarten, anhand eines vereinfachten Prototyps, ohne externe Lasten Validierungen der entwickelten Designvorschrift vorgenommen.

Die Ergebnisse fließen in Kapitel 5 in die Entwicklung eines Pumpendemonstrators auf Basis aus der Ebene arbeitenden DEAs sowie einem anwendungsspezifischen Pumpenprototyps.

Denn gerade in der Mobilfluidik wird verstärkt nach alternativen Antriebslösungen gesucht, die bei gesteigerter Effizienz und gleichzeitig verringerter Geräuschemission eine bisher unmögliche Bauform zulassen. Hierzu wird in diesem Abschnitt der Elektromotor zum Betreiben einer Minimembranpumpe durch einen DE-Streifenantrieb ersetzt. Im Rahmen dieses Beispiels werden die verwendeten DEAs bezüglich ihrer dynamischen Eigenschaften experimentell charakterisiert. Diese Untersuchungen münden im Aufbau eines zweiten Prototyps mit bis dahin undenkbarem Formfaktor. Die Daten aus der Validierung werden anschließend den Leistungsdaten der herkömmlichen Minimembranpumpe gegenübergestellt.

Die dielektrischen Elastomere selbst sind sehr dünn und müssen, wie die Anwendungen in Kapitel 3 und Kapitel 5 zeigen werden, sehr oft in Antriebssystemen für die anwendungsspezifische Anpassung zur Kraftskalierung gestapelt werden. Auch im Bereich der Sensorik kann das Stapeln der Membranen vorteilhaft zur Sensitivitätssteigerung eingesetzt werden. Ein optimiertes Konzept zur robusten, zuverlässigen, kompakten und serienreifen Herstellung dieser Stapelverbindungen für Membranaktoren und -sensoren wird in Kapitel 6 vorgestellt.

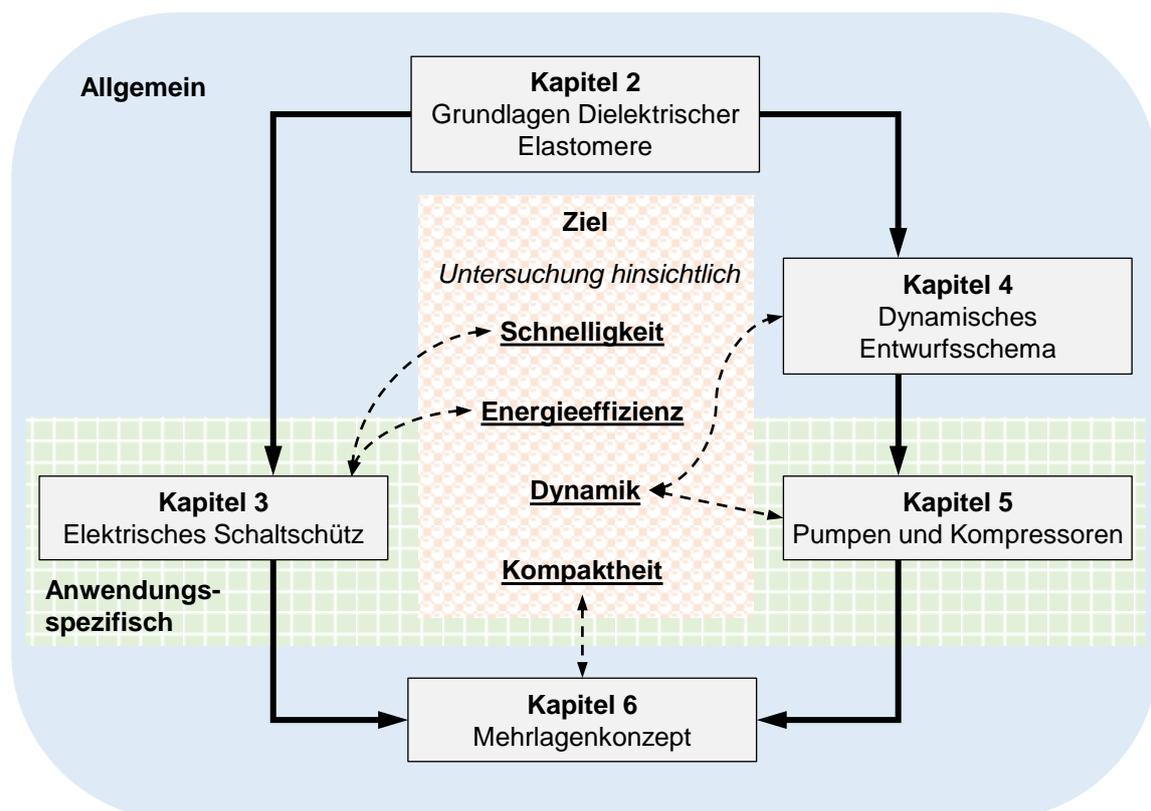


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zum Erreichen der Ziele.

Kapitel 2 GRUNDLAGEN DIELEKTRISCHER ELASTOMERE

Dielektrische Elastomere sind elektromechanische Wandler, gehören zu den elektroaktiven Polymeren und werden den smarten Materialien zugeordnet. Sie fungieren als Getriebe zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Die Umsetzung von elektrischer in Richtung mechanischer Energie wird in einem Antrieb bzw. Aktor genutzt (DEA). Umgekehrt kann dieser Wandler in Sensoren oder Generatoren mechanische in elektrische Energie umformen. In diesem Kapitel wird auf das elektromechanische Grundprinzip eingegangen, verschiedene mögliche Materialien und Konfigurationen erläutert sowie eine Auswahl an verschiedenen Herstellungsarten vorgestellt.

2.1 Elektromechanisches Grundprinzip

Dielektrische Elastomere bestehen im Grundaufbau, wie in Abbildung 2.1 (a) gezeigt, aus einem Dielektrikum, das beidseitig mit einer elektrisch leitfähigen Beschichtung, einer Elektrode, versehen ist. Dieser Aufbau resultiert in einem flexiblen Kondensator, dessen Kapazität C durch

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{z} \quad (2.1)$$

beschrieben werden kann. Dabei ist ε_0 die Permittivität im Vakuum, ε_r die relative, materialspezifische Permittivität des Dielektrikums, A die Fläche der Elektrode und z der Abstand zwischen den Elektroden bzw. die Dicke des Dielektrikums.

Ausgehend von diesem Grundaufbau können zwei unterschiedliche Basisanwendungen verfolgt werden, der Sensor (Abbildung 2.1 (b), Kapitel 2.1.1) und der Aktor oder Antrieb (Abbildung 2.1 (c), Kapitel 2.1.2). Durch die inverse Nutzung der Aktorcharakteristik

können Dielektrische Elastomere ebenfalls in der Energiegewinnung als Generator eingesetzt werden (Kapitel 2.1.3). Eine Kombination aus Aktor und Sensor ist ebenfalls möglich. Dabei ist das Resultat ein intelligenter Antrieb, bei dem beispielsweise zu jeder Zeit die Position ohne zusätzliche externe Bauelemente bestimmt werden kann.

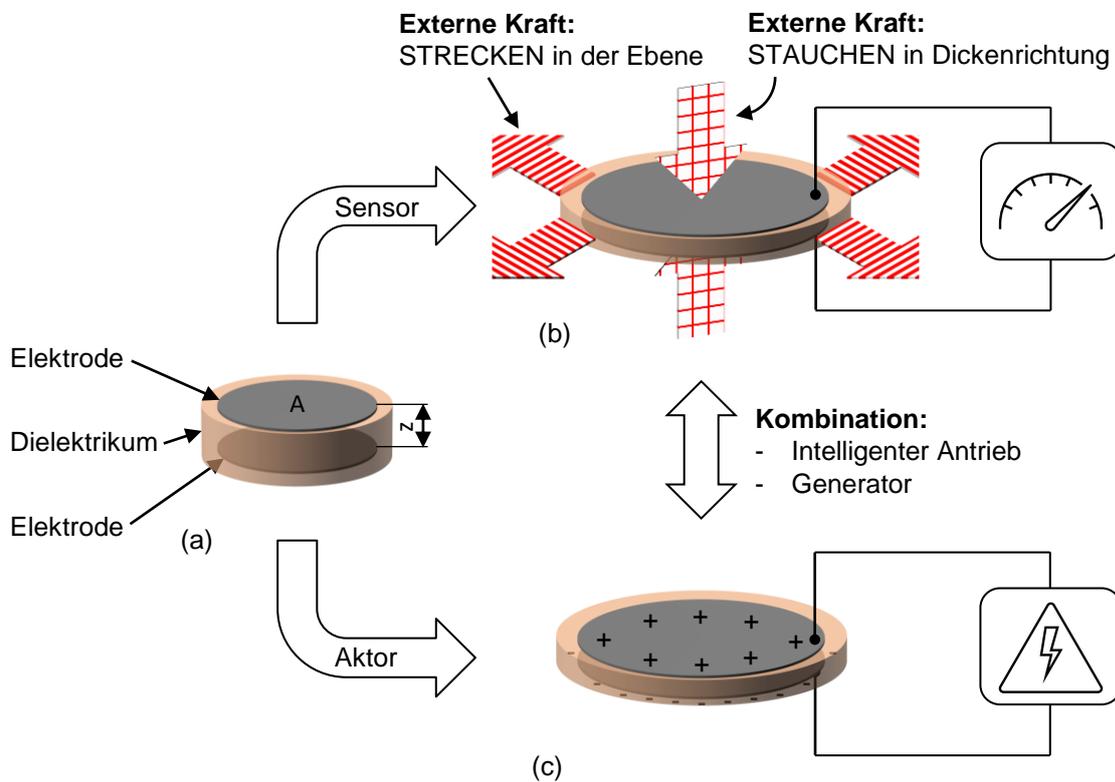


Abbildung 2.1: (a) Grundaufbau eines Dielektrischen Elastomers. (b) Durch externe Kraft verformter Grundaufbau mit Kapazitätsmessung. (c) Mit elektrischer Spannung beaufschlagter Grundaufbau, wodurch eine Verformung hervorgerufen wird.

2.1.1 Sensor

Wird der Basisaufbau in Abbildung 2.1 (a) durch eine externe Kraft in der Ebene gedehnt, respektive in der Dicke gestaucht, vergrößert sich in beiden Fällen die Kapazität C (Abbildung 2.1 (b)). Zusätzlich bleibt aufgrund der Inkompressibilität des Dielektrikums das Volumen $V = Az$ konstant. Damit kann 2.1 erweitert werden zu

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A^2}{V} \quad (2.2)$$

oder

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V}{z^2} . \quad (2.3)$$

Daraus ergibt sich, dass die Kapazität direkt mit nur einem Geometrieparameter, der Fläche A oder der Dicke z , in Beziehung gesetzt werden kann, welche in Abbildung 2.2 qualitativ dargestellt sind.

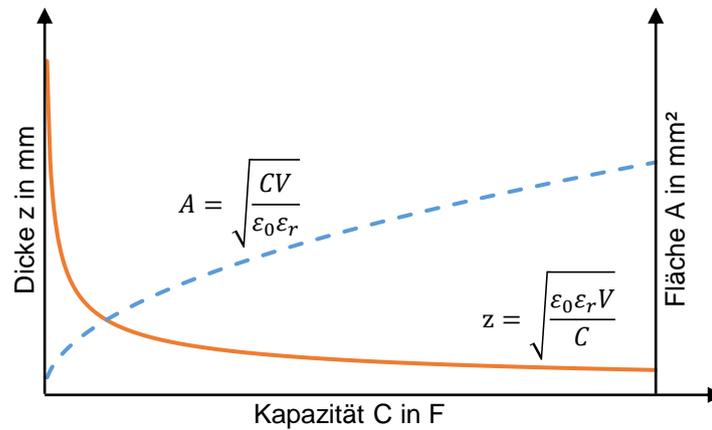


Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung der Dicke z und Fläche A des Dielektrischen Elastomers als Funktion der Kapazität C .

Diese Eigenschaft führt dazu, dass der DE als Sensor genutzt werden kann. Allein durch das Auslesen der Kapazität können Rückschlüsse auf die Verformung gezogen werden, was z.B. in Weg- oder Drucksensoren genutzt werden kann [30], [31].

2.1.2 Aktor

Aus Abbildung 2.1 ist auch die Funktionsweise eines Antriebs ersichtlich. Wenn der Kondensator in Abbildung 2.1 (a) durch Anlegen einer elektrischen Spannung geladen wird, ergeben sich unterschiedlich gepolte Elektrodenflächen, die sich gegenseitig anziehen. Aufgrund der Volumenkonstanz wird der Kondensator dünner und in der Fläche etwas größer (Abbildung 2.2 (c)). Beide Effekte können aktorisch genutzt werden. Typischerweise wird bei einer Dielektrikumsdicke von 10 μm bis 100 μm eine Spannung zwischen 1 kV und 10 kV angelegt. Die aus dem Anlegen der elektrischen Spannung resultierende mechanische Kraftausbeute kann, wie in 2.4 gezeigt, direkt mit dem Maxwell Druck p_M in Relation gesetzt werden.

$$p_M = \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{U}{z} \right)^2 \quad (2.4)$$

Hierbei ist E das angelegte elektrische Feld, das sich aus der angelegten Spannung U und der Dicke des Dielektrikums z ergibt. Die Herleitung dieser Gleichung kann [38] entnommen

werden. Zu beachten sind zwei entscheidende Annahmen. Das verwendete Material muss perfekt elastisches Verhalten ohne mechanische Verluste aufweisen und das Volumen zu 100% konstant bleiben [39]. Ziel ist die Maximierung dieses Maxwelldrucks, da dieser direkt mit der aktorisch nutzbaren Energie zusammenhängt. Die Permittivität ϵ_0 ist konstant und kann somit nicht optimiert werden. Augenmerk liegt damit auf der relativen Permittivität ϵ_r und dem angelegten elektrischen Feld E . In Abbildung 2.3 ist der quadratische Zusammenhang zwischen dem Maxwelldruck und dem elektrischen Feld (Abbildung 2.3 (a)) sowie der lineare Zusammenhang zwischen dem Maxwelldruck und der relativen Permittivität des verwendeten Dielektrikums (Abbildung 2.3 (b)) dargestellt.

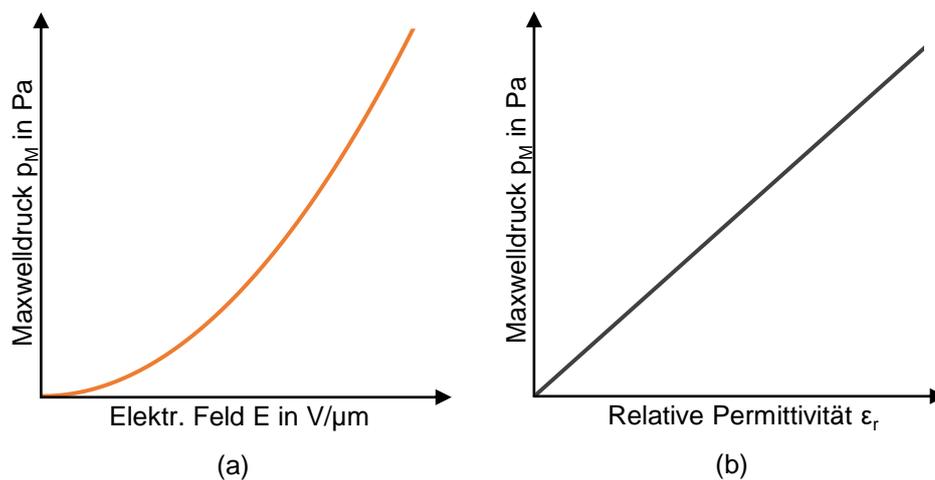


Abbildung 2.3: (a) Zusammenhang zwischen Maxwelldruck und dem angelegten elektrischen Feld. (b) Zusammenhang zwischen Maxwelldruck und der relativen Permittivität des Dielektrikums.

Diese Grafik zeigt, dass Optimierungen im Bereich des elektrischen Feldes einen viel stärkeren Einfluss haben als im Bereich der materialspezifischen relativen Permittivität. Da die Durchschlagsspannung jedoch begrenzt ist, ist ein umso dünneres Dielektrikum wichtig für eine gute Performance im Bereich der DEAs.

Die aus der angelegten elektrischen Spannung resultierende Dehnung s_z in Dickenrichtung kann für unbelastete, in alle Raumrichtungen frei bewegliche DEs durch

$$s_z = -\frac{p_M}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{Y} \quad (2.5)$$

mit Hilfe des elastischen Moduls Y beschrieben werden. Durch die Annahme der freien Beweglichkeit in allen Raumrichtungen kann diese stark vereinfachte Gleichung der Dehnung hergeleitet werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten vorgespannten Antriebe gilt diese Gleichung jedoch nicht und wird somit nicht weiter erörtert.

2.1.3 Generator

Dielektrische Elastomere können auch zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Dabei sind aus der Literatur verschiedene Bauarten sowie Methoden zur Optimierung bekannt [33], [40]. Im Folgenden wird der Prozess des Generatorbetriebs in Anlehnung an [41] näher erläutert. Als Energiebehälter werden zwei Batterien über eine externe Drei-Wege-Schaltung an den DE gekoppelt (Abbildung 2.4). Hierbei befindet sich eine Batterie auf einem niedrigen Spannungsniveau U_{tief} und eine auf einem höheren Spannungsniveau U_{hoch} . Über einen Schalter S kann der DE entweder mit einer der Batterien verbunden oder geöffnet werden.

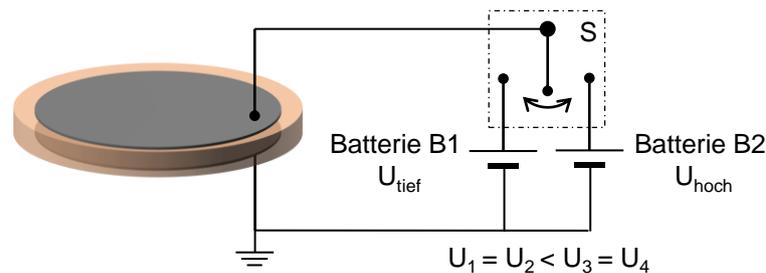


Abbildung 2.4: Exemplarische Darstellung einer Drei-Wege-Schaltung mit zwei Batterien für den Betrieb eines Generators im Modus „konstante Spannung“.

In der Ausgangssituation (Zustand 1) liegt der DE in einem mittleren Dehnungszustand vor und ist auf eine elektrische Spannung U_1 geladen. Im Prozess A wird der DE über eine externe Kraft gedehnt. Diese Dehnung kann durch Meereswellen, Vibrationen oder manuell hervorgerufen werden [42], [43]. Um die Spannung U_1 konstant zu halten ist der DE an die Batterie B1 angeschlossen ($U_2 = U_1 = U_{tief}$). Bei der Zustandsänderung $2 \rightarrow 3$ ist die elektrische Schaltung geöffnet. Die sinkende Kapazität bewirkt dabei eine steigende elektrische Spannung. Bei Zustand 3 wird dieser über die Drei-Wege-Schaltung an die Batterie B2 mit höherer Spannung angeschlossen. Diese hält die Spannung während Prozess C wieder konstant. Da währenddessen auch die Kapazität sinkt, wird elektrische Energie vom DE auf die Batterie übertragen. In Prozess D wird der DE bei geöffneter Schaltung gedehnt und erreicht wieder die Ausgangssituation (Zustand 1).

Zusammengefasst beschreibt dieser Zyklus die Konvertierung von mechanischer in elektrische Energie in einem kontinuierlich arbeitenden Generator und ist in Abbildung 2.5 exemplarisch dargestellt.

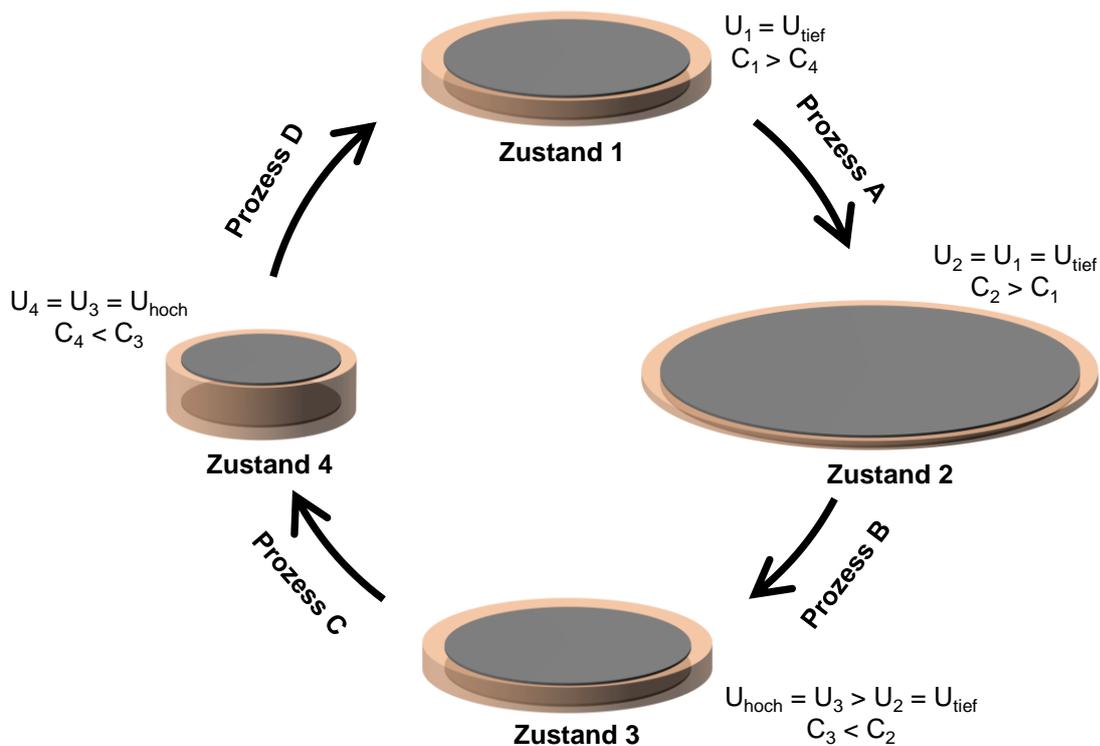


Abbildung 2.5: Darstellung eines Zyklus im Generator-Kreisprozess bei der Verwendung eines DEs in Verbindung mit einer Drei-Wege-Schaltung nach dem Prinzip „konstante Spannung“.

2.2 Verwendete Materialien

Bei Dielektrischen Elastomeren sind das Dielektrikum sowie die Elektrode von entscheidender Bedeutung. Für jedes in Kapitel 2.1 beschriebene elektromechanische Grundprinzip gelten eigene spezifische Anforderungen an das zu verwendende Material. Diese Anforderungen umfassen zum einen technische, aber auch wirtschaftliche Aspekte. Hauptaugenmerk liegt im Folgenden auf der Verwendung der DEs als Antrieb.

2.2.1 Dielektrikum

Neben der sehr dünnen Elektrode ist das verwendete Dielektrikum ausschlaggebend für die Performance eines Antriebs. Die drei Haupttypen der verwendeten Dielektrika bestehen entweder aus Silikon, aus Acrylat oder aus Polyurethan (PU). Auch Naturkautschuk wird im Bereich der DEs verwendet, jedoch meist im Bereich der Generatoren [35], weshalb dieses Material hier nicht weiter betrachtet wird. Da neben den technischen Werten auch die kommerzielle Verfügbarkeit eine große Rolle spielt, wird die Silikonfolie Elastosil®2030 der Firma Wacker Chemie AG mit in den Vergleich

aufgenommen. Als Acrylat bildet das oft in der Forschung verwendete VHB 4910 der Firma 3M die Grundlage der verwendeten Vergleichswerte.

Die in Tabelle 2.1 gezeigten Daten dienen lediglich der Orientierung. Die exakte Bestimmung der Werte ist stark abhängig von den verschiedenen Zusätzen im Grundmaterial und den Rahmenbedingungen der Versuche.

Tabelle 2.1: Vergleich verschiedener Dielektrika in den für die Aktorik ausschlaggebenden Daten.

Dielektrikum	Silikon	Elastosil®2030	PU	VHB 4910
Durchschlagsfestigkeit in kV/mm*	80 ... 130 [44]	80 ... 100 [45]	160 [46]	55 ... 412 [47]
Permittivität	2,8 ... 3,7 [46]	2,8 [48]	7 [46]	4,8 [47]
Reaktionszeit	µs ... ms	µs ... ms	ms ... s	ms ... s
Maximale Dehnung in %	140 ... 700 [44]	450 [45]	250 ... 420 [40]	> 600 [49]
Betriebstemperatur in °C	--	-45 ... 150 [45]	--	-10 ... 90 [49]

*abhängig von der Vorspannung im Material [47]

Das in der Forschung aufgrund der geringen Kosten und hohen Verfügbarkeit oft verwendete VHB weist zwar eine hohe Durchschlagsfestigkeit und eine hohe mögliche Dehnung auf, ist jedoch aufgrund der enormen viskoelastischen Verluste [50], [51] sehr langsam und somit nur sehr begrenzt für kommerzielle Anwendungen geeignet. Polyurethane weisen eine hohe Sensitivität gegenüber Luftfeuchtigkeit [52] sowie Temperatur [53] auf, was in der Aktorik nur bedingt akzeptabel ist.

Fazit des Vergleiches ist, dass silikonbasierte Dielektrika den besten Kompromiss zwischen verschiedenen Eigenschaften darstellen. Aufgrund der signifikant geringeren viskoelastischen Verluste [44], [54], sind auch hochfrequente [29] bzw. Anwendungen mit geringer Reaktionszeit möglich.

2.2.2 Elektrode

Wie eingangs schon erwähnt ist die elektrisch leitfähige Elektrode ausschlaggebend für ein gut funktionierendes System auf Basis Dielektrischer Elastomere. Sie muss über eine große Dehnung hinweg und über mehrere Millionen Zyklen mit einem möglichst konstanten

Widerstand elektrisch leitfähig bleiben. Dehbare Elektroden finden neben DEAs in vielen Anwendungen Platz. In der Regel ist die Dehnung in herkömmlichen Anwendungen bei ca. 20% limitiert, wohingegen die Anforderungen bei DEAs im Bereich von 10% bis 100% biaxialer Dehnung liegen [55].

Der Widerstand der Elektrode sollte im k Ω -Bereich oder darunter liegen. In Antriebsanwendungen limitiert ein zu hoher Widerstand die mögliche Betriebsfrequenz. Bei Sensoren hat ein zu hoher Widerstand negative Auswirkungen auf die mögliche Abtastrate, die je nach Anwendung so hoch wie möglich sein muss.

Die am meisten verwendeten Elektroden basieren auf Kohlenstoff oder sind metallische Dünnschichtelektroden. Kohlenstoffbasierte Elektroden werden als loser Ruß, in Öl vermennt oder als in einer Elastomer-Matrix eingebetteten Masse verwendet. Diese werden meist auf das Dielektrikum per Sprühen [56], Spinnbeschichtung [57], Tampondruck [58], Tintenstrahl [59] oder Siebdruck [60] aufgetragen. Metallische Dünnschichtelektroden werden hingegen z.B. durch Sputtern [61], Aufdampfen oder Galvanisieren aufgetragen [62]. Eine Zusammenfassung der möglichen Elektrodentypen und Herstellungsverfahren ist in [55] ausführlich beschrieben.

Um die Kommerzialisierung voranzutreiben werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgrund der aufgrund der Skalierbarkeit des Herstellungsverfahrens die verwendeten DEAs per Siebdruck hergestellt. Vor allem hinsichtlich der Prozesskosten und der Reproduzierbarkeit bietet diese Herstellungsverfahren hinsichtlich einer Serienfertigung essentielle Vorteile [60]. Dieses Verfahren wird in Kapitel 2.4 näher erläutert.

2.3 Aktorbauarten

Ein großer Vorteil von DE-Antrieben sind ihre Flexibilität sowie ihre Skalierbarkeit. Sie können auf nahezu alle Anwendungen angepasst und optimiert werden. Seit dem Beginn der aktiven Forschung in diesem Gebiet in den späten 80er Jahren [10], [12] sind viele verschiedene Aktorbauformen entstanden. Diese lassen sich anhand des in Kapitel 2.1.2 beschriebenen elektromechanischen Effektes in zwei Hauptgruppen unterteilen, die Stapelaktoren und die Membranaktoren. Erstere basieren auf der Ausnutzung der Dickenänderung, wohingegen die Flächenänderung in Kombination mit einem Vorspannsystem [63] in Membranaktoren Anwendung findet.

2.3.1 Stapelaktor

Diese sehr bekannte Form des Aktorbaus hat den Vorteil, dass sie in der Lage ist Drucklasten aufzunehmen, wobei sie kompakt und monolithisch ist. Hierdurch ist sie einfach in bestehende Systeme zu integrieren. In der Literatur sind viele Arten zum Aufbau und zur Herstellung solcher Systeme bekannt [57], [64]–[66]. Außerdem ist diese Art von DEA eine der wenigen kommerziell verfügbaren Aktoren [67].

Der Aufbau eines solchen sechslagigen Aktors ist ohne angelegte Aktivierungsspannung exemplarisch in Abbildung 2.6 (a) dargestellt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung werden die einzelnen Lagen dünner und der gesamte Aktor zieht sich zusammen (Abbildung 2.6 (b)). Aufgrund der Ausnutzung der Dickenänderung des Dielektrikums ist der Hub Δx direkt abhängig von der Foliendicke z (1-100 μm) und kann mit der Anzahl der Lagen linear skaliert werden. In der Literatur bewegt sich die Anzahl der Lagen zwischen 50 und 100. Die Dickendehnung beträgt standardmäßig weniger als 30% [46] und bei dem Stapelantrieb von CTsystems nur bis zu 4% [67]. Die Kraft eines Stapelaktors kann hingegen mit der aktiven Fläche skaliert werden.

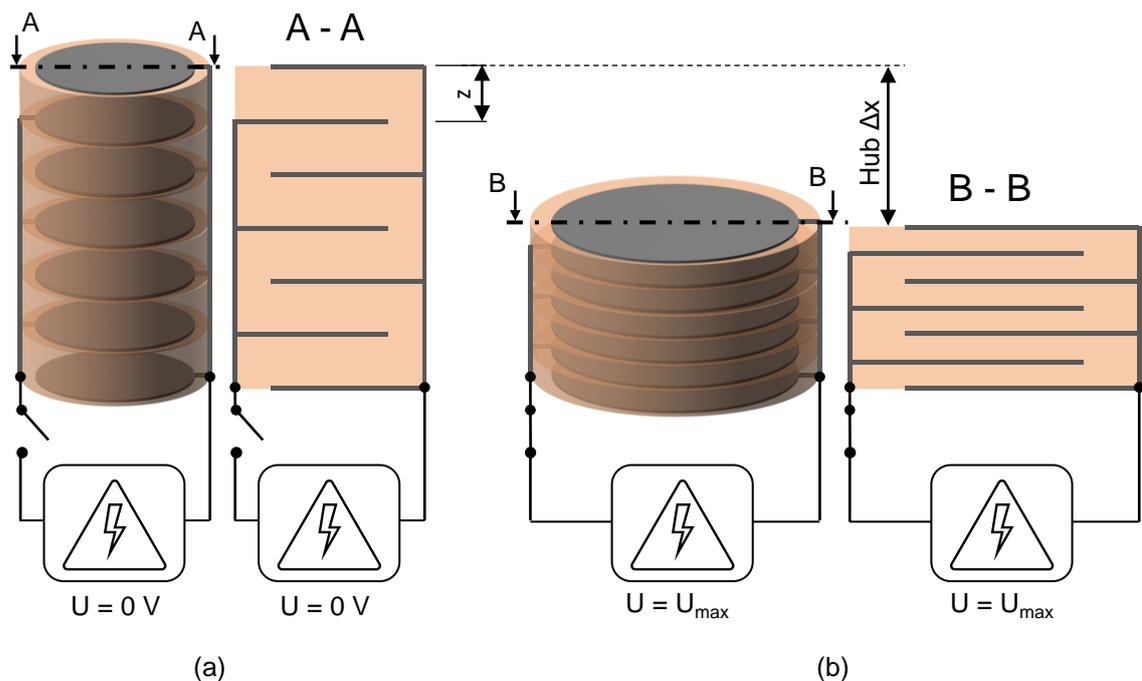


Abbildung 2.6: Exemplarischer Aufbau eines Stapelaktors (a) ohne Aktivierungsspannung und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.

Die Dehnungen in Dicke und Fläche sind hier zur besseren Sichtbarkeit stark vergrößert dargestellt. Gerade die Flächendehnung der unteren und oberen Lagen werden durch die Verbindung zu den zu bewegenden Strukturbauteilen unterdrückt, wodurch sich der Stapel in der Mitte etwas ausbeult. Dieser Effekt kann in der Praxis zu verschiedenen Problemen führen [64], [68].

Bei der Herstellung von Stapelaktoren kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Diese Unterscheidung beruht darauf, ob das Dielektrikum flüssig oder als vernetzter Film für den Stapelprozess vorliegt. Abbildung 2.7 zeigt einige Stapelaktoren, die in unterschiedlichen Prozessen hergestellt wurden.

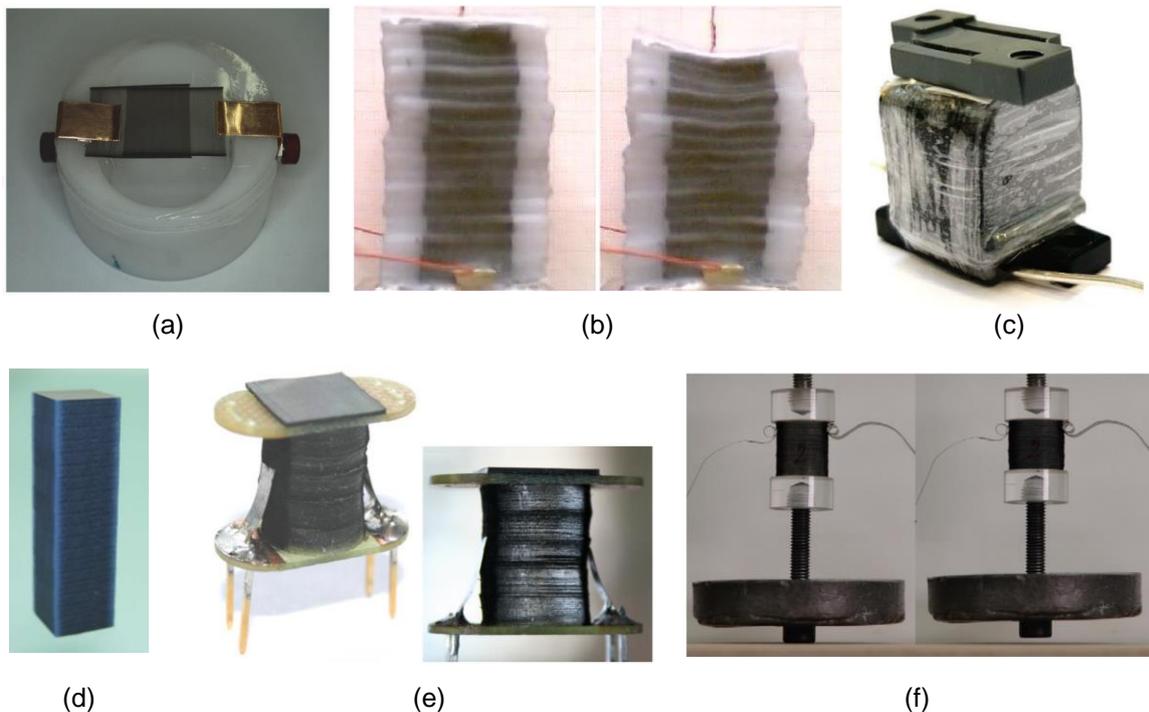


Abbildung 2.7: Beispiele von Stapelaktoren. (a) Ein im Aerosol-Jet-Druck hergestellter Stapel mit zwei Lagen [65]. (b) Ein durch Falten hergestellter Stapelaktor [69]. (c) Ein in einem automatisierten Prozess hergestellten Stapelaktor an der Universität Ostwestfalen-Lippe [56]. (d) Kommerziell verfügbarer Stapelaktor der Firma CTsystems AG [67]. (e) Ein mit einer Dichtung ausgestatteter Stapelaktor zur Verwendung in einem Ventil [18]. (f) Ein am EMPA, Schweiz, hergestellter Stapelaktor durch Falten, der ein Gewicht anhebt [64].

In [57] wird ein Prozess beschrieben, bei dem zuerst das flüssige Dielektrikum durch Spinnbeschichtung aufgetragen wird, worauf die Vernetzung durch Wärmezufuhr folgt. Auf diese Schicht wird eine leitfähige Elektrode über eine Schattenmaske aufgesprüht und wieder mit flüssigem Dielektrikum überzogen. Dieser Prozess wird so oft wiederholt, bis die gewünscht Anzahl an Lagen erreicht ist.

In [65] werden das Dielektrikum sowie die Elektrode nacheinander mittels Aerosol-Jet-Druck aufgetragen. Zwischen den einzelnen Schichten muss hier das aufgesprühte Material ebenfalls durch Wärmezufuhr vernetzt werden (Abbildung 2.7 (a)).

Bei dem Prozess zur Verwendung von vernetzten Dielektrika steht an erster Stelle das Aufbringen der Elektrode auf das Dielektrikum bzw. den Film. Danach werden entweder die einzelnen Lagen ausgeschnitten und gestapelt (Abbildung 2.7 (c)) [64] oder der beschichtete Film zu einem Stapel zusammengefaltet (Abbildung 2.7 (b)) [56], [69].

2.3.2 Membranaktoren

Membranaktoren sind die zweite große Kategorie im Bereich der DEAs. Sie nutzen zur Bewegungserzeugung die Flächenänderung bei Anlegen einer elektrischen Spannung. Diese Art von Aktoren benötigt im Gegensatz zu den Stapelaktoren ein Vorspannsystem. In seiner einfachsten Form besteht dieses aus einer Masse, kann je nach Anwendung aber auch aus einer linearen Feder [70], einer nichtlinearen Feder [71], Magneten [72], Fluiden [73], [74] oder anderen unter mechanischer Spannung stehenden Elementen [27], [75], [76] bestehen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zwei Membranaktoren selbst gegeneinander zu verspannen [77].

Bei den Stapelaktoren, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wird der Weg über die Anzahl der Lagen und die Kraft über die aktive Fläche skaliert. Diese Charakteristik ist bei den Membranaktoren invertiert. Durch Stapeln mehrerer DEAs werden die einzelnen Dielektrika mechanisch parallel belastet. Dadurch wird eine Kraftskalierung erreicht. Wird die aktive Fläche vergrößert, kann hingegen auch der Hub eines solchen Antriebs an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Diese Gesetze der Kraft- und Wegskalierung werden in [78] genauer beschrieben.

Aus der Literatur sind eine Vielzahl von verschiedenen Bauformen eines Membranaktors bekannt. Zum einen können Bewegungsprofile, zum anderen geometrische Eigenschaften der jeweiligen Bauform zur Namensgebung beitragen. Die in dieser Arbeit verwendeten Membranaktoren sind die Ebenenaktoren, welche immer in der Folienebene des DEs bleiben, und die Keilaktoren, die sich aus der Ebene heraus bewegen und dabei einen Keil zwischen Befestigungs- und DE-Ebene aufspannen. Weitere, aus der Literatur bekannte, hier vorgestellte Bauformen sind die Roll- oder Röhrenaktoren sowie die Ballonaktoren.

2.3.2.1 Ebenenaktor

Membranaktoren, deren Bewegung in einer Ebene ausgeführt wird, können entweder als Streifen [79] (engl. Strip in-plane Dielectric Elastomer Actuator (SIP-DEA)) oder als Kreis [80], [81] (engl. Circular in-plane Dielectric Elastomer Actuator (CIP-DEA)) gestaltet werden. In [82] werden diese Bauformen als Standard zur Materialcharakterisierung von Elektrode und Dielektrikum definiert.

Abbildung 2.8 (a) zeigt einen SIP-DEA, der mit einem Vorspannsystem verbunden ist, das mit einer Kraft F den DEA in der Ebene vorspannt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung ziehen sich die gegensätzlich geladenen Elektrodenflächen an, der DE wird in der Fläche größer und durch die vom Vorspannsystem eingeprägte Vorzugsrichtung entsteht eine Bewegung mit dem Hub Δx .

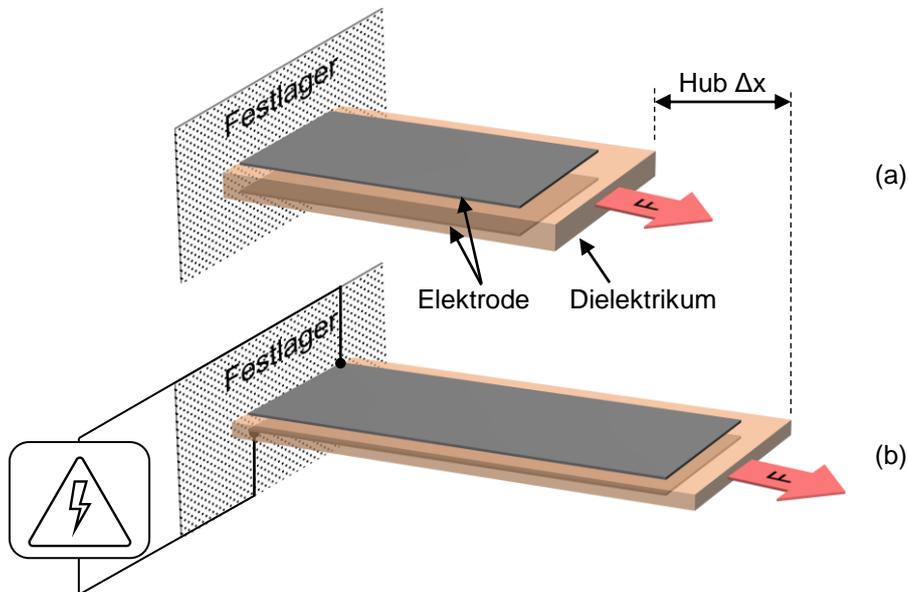


Abbildung 2.8: (a) Inaktiver SIP-DEA und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.

Eine Auswahl an aus der Literatur bekannten Ebenenaktoren in unterschiedlichen Formen und Anwendungen zeigt Abbildung 2.9.

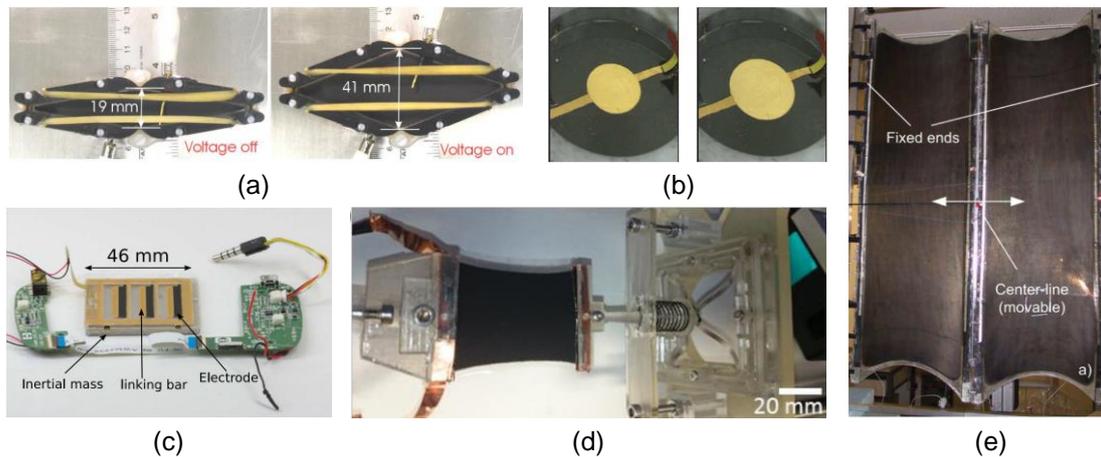


Abbildung 2.9: Beispiele an Ebenenaktoren. (a) Diamantaktor, eine spezielle Form des Ebenenaktors [83]. (b) Ein CIP-DEA zur Validierung einer Modellierung von DEs [80]. (c) SIP-DEA mit zugehöriger Elektronik für haptisches Feedback für den iPod Touch [84]. (d) Ein SIP-DEA mit zugehörigem optimierten Vorspannsystem, eingebaut in einem Prüfstand zur Charakterisierung [79]. (e) Protagonist-Antagonist-Ebenenaktor [85].

2.3.2.2 Keilaktor

Auch die Keilaktoren können mit einer streifenförmigen (engl. Strip out-of-plane Dielectric Elastomer Actuator (SOP-DEA)) oder runden Fläche (engl. Circular out-of-plane Dielectric Elastomer Actuator (COP-DEA)) ausgebildet sein. Der COP-DEA wird oft auch als „cone“ oder „diaphragm“ bezeichnet.

Abbildung 2.10 (a) zeigt einen solchen COP-DEA in seiner Ausgangssituation. Er besteht aus einer biaxial vorgedehnten Dielektrikumsfolie. Darauf wird beidseitig ringförmig die Elektrode aufgebracht und mit einer stabilen Rahmenstruktur verbunden. Ein Schnitt durch den Aufbau eines solchen DEA ist in Abbildung 2.10 (b) gezeigt. Dabei wird standardmäßig der äußere Teil des Rahmens auf einem als Festlager fungierenden Bauteil angebracht. Der innere Teil hingegen ist über die beschichtete Folie schwingend gelagert. Diese innere Scheibe dient auch der Ankopplung des Vorspannsystems sowie als Kraft- und Bewegungsabtrieb.

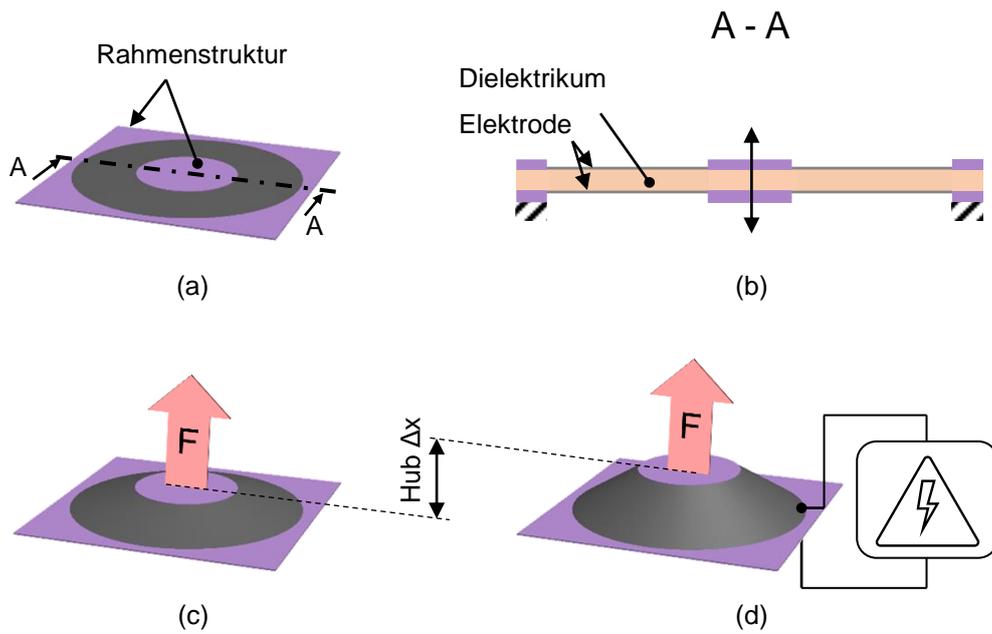


Abbildung 2.10: (a) Keilaktor im Ausgangszustand ohne elektrische Spannung und ohne Vorspannsystem. (b) Schnitt durch den inaktiven COP-DEA ohne Vorspannung. (c) nicht aktivierter vorgespannter COP-DEA. (d) An das Vorspannsystem gekoppelter COP-DEA mit angelegter elektrischer Spannung.

Wird eine Kraft F über das Vorspannsystem auf den COP-DEA aufgebracht, so lenkt sich dieser in eine Ausgangssituation aus, an der der innere Teil aus der Ebene herausragt (Abbildung 2.10 (c)). Bei Betätigung des Systems in Abbildung 2.10 (d), durch Anlegen einer elektrischen Spannung, ziehen sich die unterschiedlichen geladenen Elektrodenflächen an und der innere Teil kann vom Vorspannsystem in eine Richtung bewegt werden.

Die folgende Abbildung 2.11 zeigt eine Auswahl der aus der Literatur bekannten Ausführungsformen eines Keilaktors.

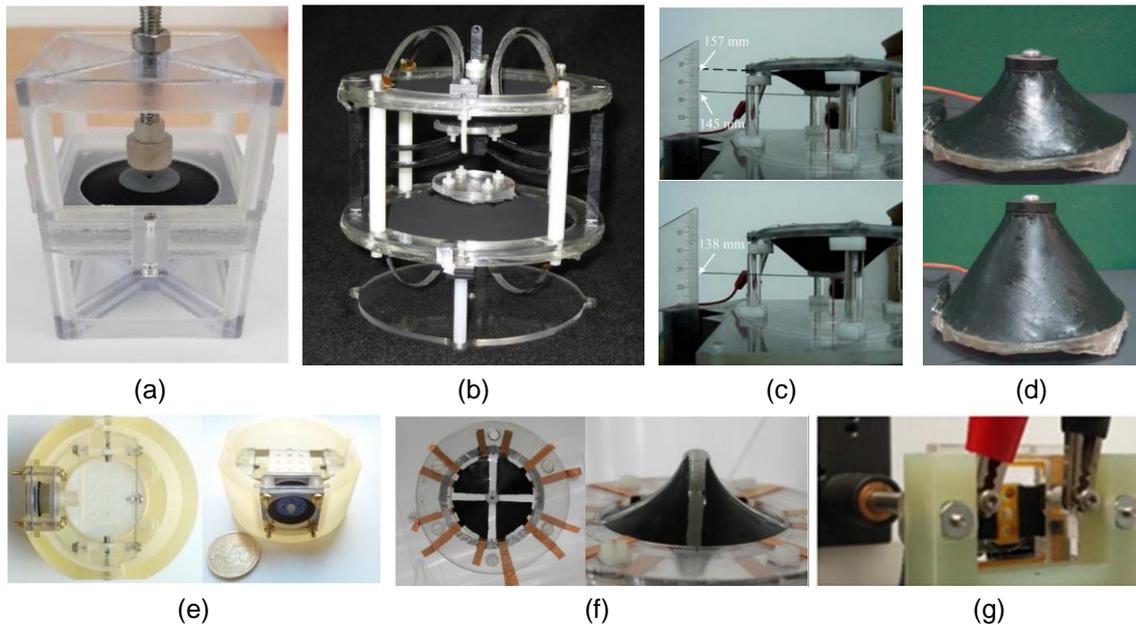


Abbildung 2.11: Beispiele für Keilaktoren. (a) Ein mit einem Magnet als Vorspannsystem aufgebauter Demonstrator mit Keilaktor [72]. (b) Antagonistisches bistabiles Modul mit Keilaktor [86]. (c) Keilaktor, vorgespannt mit einer Masse im aktivierten und nicht aktivierten Zustand [87]. (d) Prototyp eines Keilaktors mit innenliegendem Vorspannsystem im aktivierten und nicht aktivierten Zustand [71]. (e) Eine mit zwei gegeneinander arbeitenden Keilaktoren angetriebene Positionierbühne [28]. (f) Keilaktor mit fünf Freiheitsgraden durch Segmentierung der Elektrodenflächen in der Drauf- und Seitenansicht [88]. (g) Streifenförmiger Keilaktor [89].

2.3.2.3 Röhren- und Rollaktor

Durch Aufrollen eines beschichteten Dielektrikums entstehen Röhren- bzw. Rollenaktoren. Der Unterschied besteht in der Anzahl der Windungen, die der Aktor aufweist. Bei der Verwendung von nur einer Lage, wie in Abbildung 2.12 gezeigt, wird von einem Röhrenaktor gesprochen. Wird das beschichtete Dielektrikum jedoch über mehrere Windungen aufgerollt, ist die Rede von einem Rollenaktor. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass zwischen den einzelnen Windungen nochmals eine Isolierschicht, normalerweise wird hierzu das Dielektrikum verwendet, eingebracht wird. Im Querschnitt des Rollenaktors entsteht damit eine Doppelspirale. Durch die Anzahl der Windungen vergrößert sich der mechanisch belastete Querschnitt, womit im Umkehrschluss die Kraft skaliert werden kann. Der Hub wird über die Länge des Aktors eingestellt.

Ohne angelegte elektrische Spannung befindet sich der Antrieb, wie in Abbildung 2.12 (a) gezeigt, im Ausgangszustand. Wird die Stromzufuhr aktiviert, verlängert sich der Aktor und Arbeit kann verrichtet werden (Abbildung 2.12 (b)).

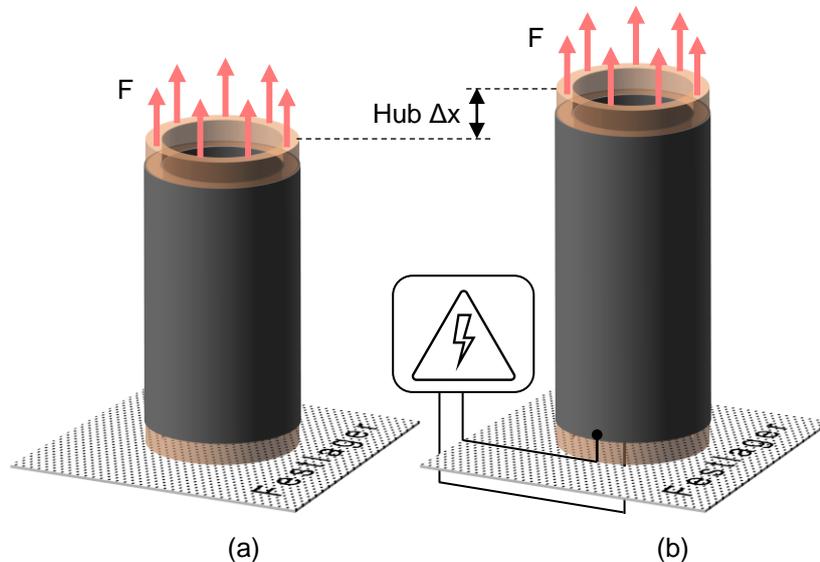


Abbildung 2.12: An das Vorspannsystem angeschlossener Röhrenaktor (a) ohne und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.

Das Vorspannsystem sitzt bei dieser Art von Antrieben aus Platzgründen oft im inneren bzw. bildet den Kern. Auch hier kann dieses z.B. aus linearen [20], [90] (Abbildung 2.13 (c), Abbildung 2.13 (e), Abbildung 2.13 (f)) bzw. nichtlinearen Federn [91], [92] (Abbildung 2.13 (a), Abbildung 2.13 (g)) bestehen.

Die meist als Linearaktor verwendete Rollenform, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, kann durch Segmentierung auch Biegebewegungen ausführen. Dabei sind die jeweilig gegenüberliegenden Seiten gegeneinander vorgespannt. Damit der Aufbau jedoch stehen bleibt, besteht der Kern aus einer Zylinderfeder. Wie in Abbildung 2.13 (d) gezeigt, wurde mit diesem biegbaren Rollenaktor eine bewegliche Plattform aufgebaut [93].

Die in Abbildung 2.13 (b) gezeigten Aktoren besitzen kein eigenes Vorspannsystem. Sie wurden für eine Vibrationsdämpfung entworfen. Durch das Positionieren der zu dämpfenden Masse werden diese Aktoren erst in der Anwendung mechanisch vorgespannt.

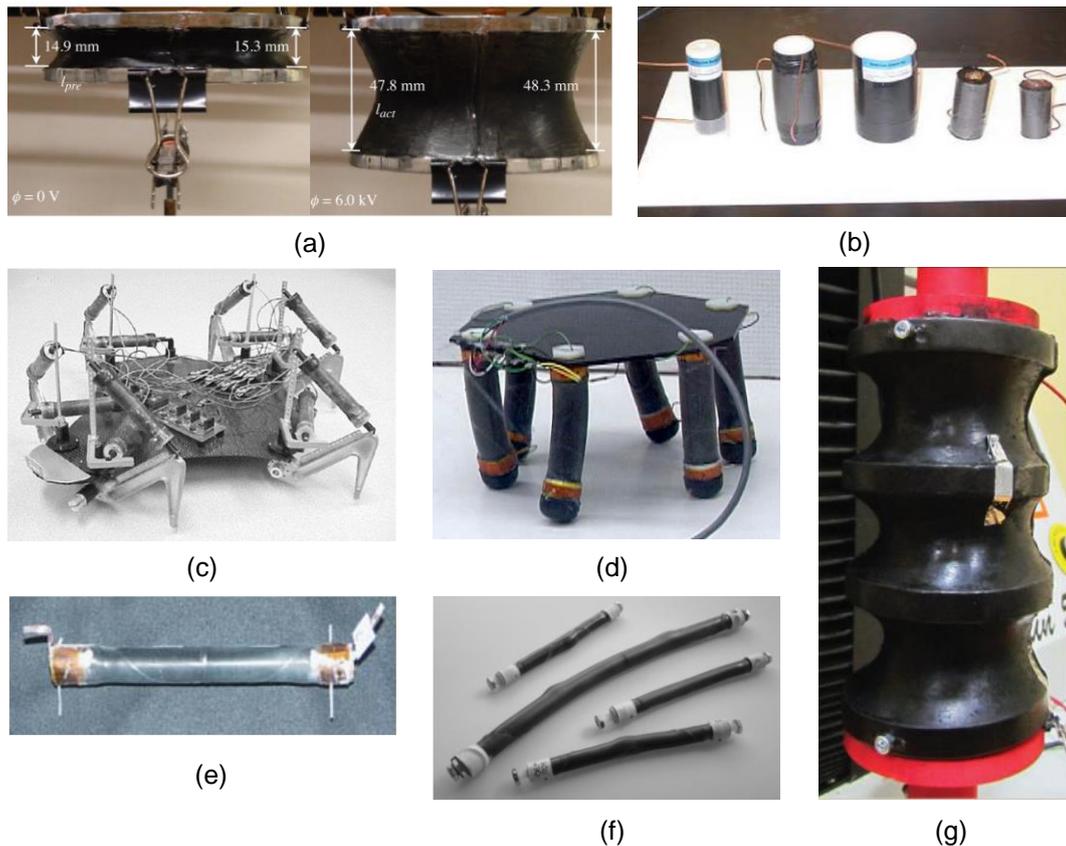


Abbildung 2.13: Beispiele für Roll- bzw. Röhrenaktoren. (a) Ein Röhrenaktor aus VHB im inaktiven und aktiven Zustand mit einer Dehnung von 218% [92]. (b) Rollenaktoren mit Polyurethan und Silikon als Dielektrikum [94], [95]. (c) Eine von Insekten inspirierter Roboter mit Rollenaktoren auf Basis von Acrylfolie [20]. (d) Eine durch mit mehreren Freiheitsgraden beweglichen Rollaktoren bewegende Plattform [93]. (e) Rollenaktor [96]. (f) Verschiedene Rollenaktoren für Roboterarme [90]. (g) Rollenaktor mit innenliegendem, nicht linearem Vorspannsystem [91].

2.3.2.4 Ballonaktor

Bei dieser Art von Aktoren wird eine beschichtete Membran kreisrund an den freien Seiten eingespannt. Der dadurch unter dem DE entstehende Raum wird mit Druckluft beaufschlagt und somit der DE aus der Ebene heraus wie ein Luftballon aufgeblasen. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wird der Widerstand gegen den Luftdruck etwas geringer und der Ballon weitet sich weiter aus. Wird der DEA wieder inaktiv geschaltet, so geht er in seine Ausgangssituation zurück.

Ein solcher Aktor wurde in [24] (Abbildung 2.14 (a)) bezüglich seiner Nutzung als Lautsprecher untersucht. Eine Weiterentwicklung in Abbildung 2.14 (c) zu einer Ballonaktoren-Matrix, die als Lautsprecher benutzt werden kann, ist in [25] beschrieben.

Ein Beispiel für einen mit Wasser gefüllten Ballonaktor ist in Abbildung 2.14 (b) gezeigt [74]. Der in Abbildung 2.14 (d) dargestellte Ballonaktor ist mit Druckluft vorgespannt und weist eine maximale Flächendehnung von 1692% auf [73]. Bei beiden ist das Drucksystem offen. Dieser Druckraum kann jedoch auch, wie in [97] vorgestellt, geschlossen sein.

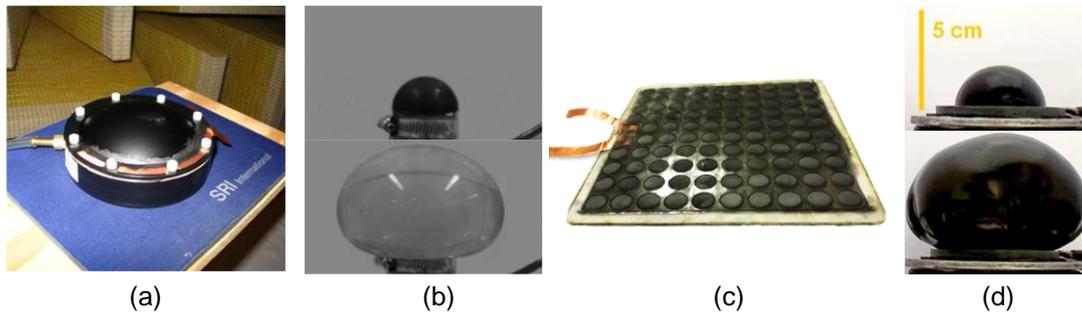


Abbildung 2.14: Ballonaktoren. (a) Prototyp des Stanford Research Institute [24]. (b) Ballonaktor im inaktiven und aktiven Zustand mit fluidischer Vorspannung [74]. (c) Eine Ballonaktoren-Matrix als Lautsprecher [25]. (d) Ballonaktor im inaktiven und aktiven Zustand, der mit Druckluft vorgespannt ist [73].

2.4 Herstellung von Membranaktoren

Verschiedene Herstellungsverfahren zu den vielfältigen Aktorbauformen wurden eingangs beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich SIP-DEAs und COP-DEAs verwendet. Die SIP-DEAs werden hierbei ausschließlich am Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme der Universität des Saarlandes gefertigt. Die verwendeten COP-DEAs sind entweder auch am Lehrstuhl gefertigt worden oder wurden von der Parker Hannifin Corporation bereitgestellt, wobei die Herstellungsverfahren sich ähneln. Das Herstellungsverfahren am Lehrstuhl wird im Folgenden erläutert.

Als Dielektrikum wird kommerziell verfügbarer Film, in diesem Fall Elastosil®2030 der Wacker Chemie AG, in einer Stärke von 50 μm verwendet. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, sind verschiedene Arten von Elektrodenfarben und Aufbringungsarten bekannt und getestet. Jede Herstellungsvariante hat eigene Vor- und Nachteile. Der Autor wählt das Siebdruckverfahren mit kohlenstoffbasierter Elektrodenfarbe. Gründe hierfür sind die gute Zuverlässigkeit, günstige Prozesskosten und hohe Reproduzierbarkeit für eine eventuelle Serienfertigung bei der Kommerzialisierung der Technologie bei gleichzeitig überschaubarem Aufwand für die Herstellung im Prototypenbau in kleinen Stückzahlen und hoher Variantenvielfalt.

Zu Beginn wird das verwendete Dielektrikum, wie in Abbildung 2.15 (a.1), auf einen Metallrahmen mit einer gewissen biaxialen Vordehnung aufgebracht. Dieser Schritt ist für das folgende Siebdruckverfahren sowie die Leistungsfähigkeit der Aktoren notwendig [47], wobei bei den SIP-DEAs die Vordehnung auch uniaxial ausgeführt sein kann. Die Vordehnung steigert zudem die Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums [98].

Die benötigten Siebe für Elektrode (Abbildung 2.15 (a.2)) und das Rahmenmaterial (Abbildung 2.15 (c.1)) werden so vorbereitet, dass nur noch die Stellen offen sind, an denen entweder Elektrode oder Rahmenmaterial auf die zu bedruckende Folie aufgebracht werden sollen. Hierzu wird das Sieb mit Fotoemulsion beschichtet. Die zuvor in schwarz auf eine Folie gedruckte Vorlage wird anschließend auf dem beschichteten Sieb positioniert. Mittels UV-Lampe wird diese Einheit belichtet. Dadurch härtet überall dort, wo die Vorlage nicht schwarz bedruckt ist, die Fotoemulsion komplett aus. Anschließend können die nicht ausgehärteten Stellen mit Wasser ausgespült werden. Ergebnis ist das für den Druckprozess vorbereitete Sieb.

Im dritten Vorbereitungsschritt wird das zu verwendende Elektrodenmaterial angemischt (Abbildung 2.15 (a.3)). Dieses besteht aus Wackers RTV-2 Polydimethylsiloxan (PDMS) und Silikonöl AK100K sowie dem Kohlenstoffruß Printex XE2 der Firma Orion. Um die Siebdruckfähigkeit herzustellen, werden VM1 und VD60 der Firma Coats Screen Inks zugemischt. Mit Hilfe dieser beiden Materialien kann auch die Dicke der späteren Elektrode eingestellt werden. Zur besseren Verarbeitbarkeit des Gemisches und zur Erzielung weniger Elektrodenfehler wird die gesamte Masse in einer Dreiwalzenmühle homogenisiert.

Der vorgedehnte Silikonfilm wird im halb-automatischen Siebdrucker ESC-AT 60P durch das Elektrodensieb mit Elektrodenfarbe bedruckt (Abbildung 2.15 (b.1)) und anschließend im Ofen ausgehärtet (Abbildung 2.15 (b.2)). Nachfolgend wird der Trägerrahmen gedreht und die gegenüberliegende Seite wird gedruckt und ausgehärtet (Abbildung 2.15 (c.1), Abbildung 2.15 (c.2)). Resultat ist eine von beiden Seiten beschichtete Silikonfolie, die den Grundaufbau eines DEs widerspiegelt. Studien über verschiedene Druck- und Prozessparameter wurden in [60] durchgeführt.

Das Elektrodensieb wird anschließend mit dem Rahmensieb (Abbildung 2.15 (d.1)) getauscht und ein Epoxidharz (Abbildung 2.15 (d.2)) als steifes Rahmenmaterial einseitig

auf den mit Elektroden beschichteten Silikonfilm aufgebracht (Abbildung 2.15 (d.3)) und ausgehärtet (Abbildung 2.15 (d.4)). Nach dem Ausschneiden ergibt sich ein einsatzbereiter Membranaktor (Abbildung 2.15 (d.5)), in diesem Beispiel ein SIP-DEA.

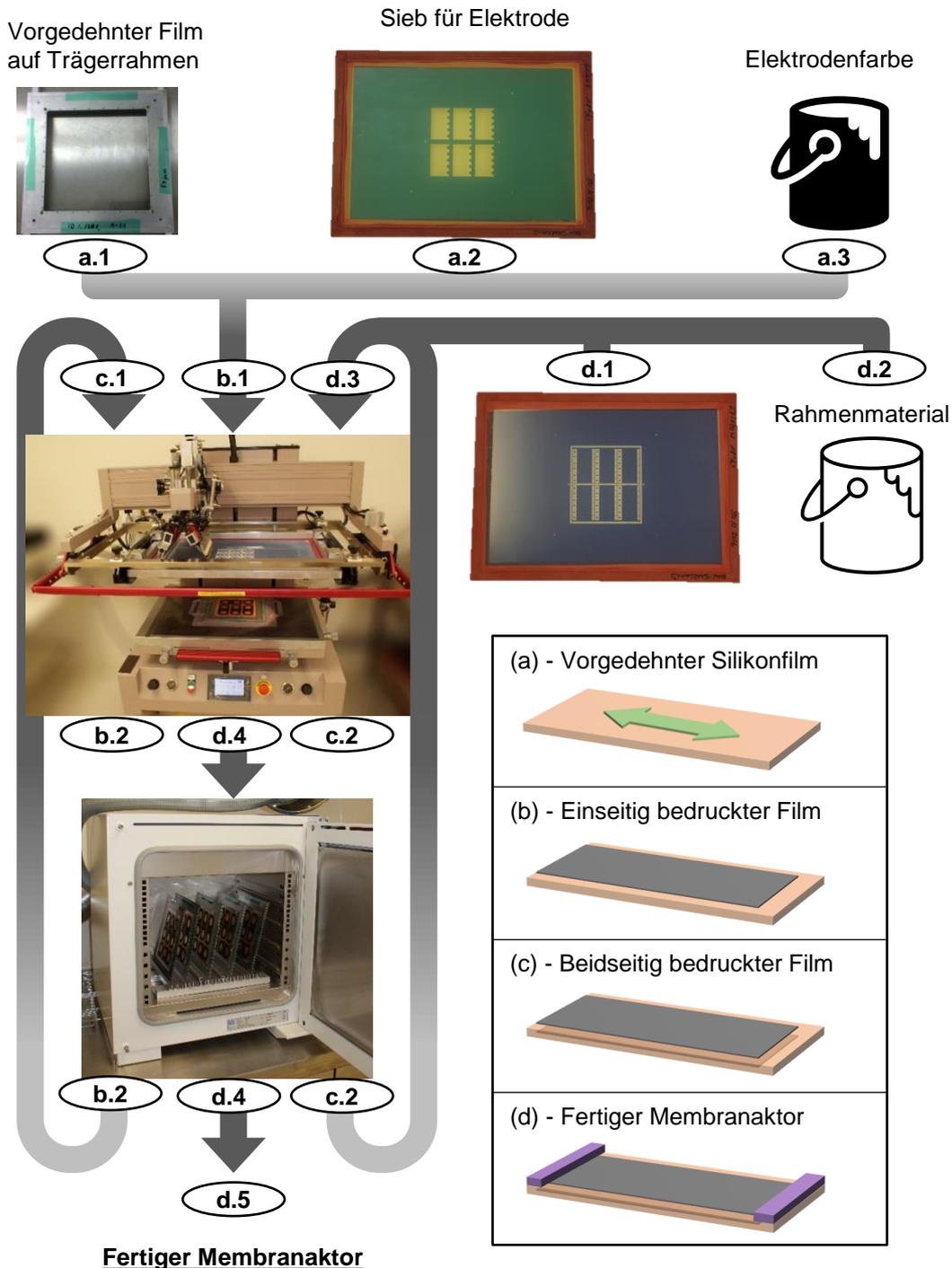


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von Membranaktoren. (a) Vorbereitungen von Film, Sieb und Elektrodenfarbe. (b) Einseitige Beschichtung. (c) Wenden und Beschichtung der gegenüberliegenden Seite. (d) Rahmensieb und Rahmenmaterial sowie die Aufbringung des steifen Rahmens zum fertigen Membranaktor.

Kapitel 3 ELEKTRISCHES SCHALTSCHÜTZ

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben repräsentieren DEAs kompakte, lautlose, flexible mechatronische Systeme mit hoher Geschwindigkeit und hoher Energieeffizienz [99]. Außerdem ist die Betrachtung des Gesamtsystems von hoher Bedeutung [100], da gerade bei den Membranaktoren in Kombination mit dem Vorspannmechanismus viele Parameter eingestellt und angepasst werden können.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Arbeit von Linnebach et al., welche mit dem Konferenzbeitrag [101] und dem Beitrag in einer Fachzeitschrift [102] publiziert wurden. Der Hauptfokus liegt auf der Auslegung, Herstellung und experimentellen Validierung eines neuen optimierten DEA Designs anhand eines schnell schaltenden elektrischen Schaltschützes. Ähnlich eines Relais werden elektrische Kontakte über eine, in den meisten Fällen eingesetzte, Magnetspule geschlossen. Ein Nachteil einer solchen Spule ist die benötigte kontinuierliche Bestromung, wenn die Kontakte geschlossen gehalten werden sollen. Diese dauerhafte Ansteuerung führt zu einer hohen Erwärmung, was wiederum zu einem hohen Leistungsbedarf führt.

Die Eigenschaft der schnellen energieeffizienten Bewegung von DEs eröffnet die Möglichkeit die Spule nachhaltig zu ersetzen und viel Energie einzusparen. Die stark nichtlineare und frequenzabhängige Charakteristik [103] sowie die Komplexität des Vorspannsystems erschweren die Auslegung eines solchen Systems stark. Auf Basis des in [37] vorgestellten Vorgehens wird dieses Antriebssystem systematisch ausgelegt und entwickelt. Dieses wird im Anschluss aufgebaut und experimentell validiert. Die Ergebnisse werden final mit den Messungen des mit der Magnetspule angetriebenen Schütz gegenübergestellt und verglichen.

Hierzu wird in Kapitel 3.1 die Funktionsweise des elektrischen Schaltschützes komplett untersucht und die für die Aktorik wichtigen Kraft-Weg Diagramme aufgenommen. Im folgenden Abschnitt 3.2 wird der DE-Antrieb vorausgelegt. Mit den aus 3.3 resultierenden realen Charakteristiken der DEAs und des Vorspannsystems wird in 3.4 der Antrieb final ausgelegt und die Performance vorausgesagt. Der in Kapitel 3.5 konstruierte Demonstrator wird im folgenden Abschnitt 3.6 validiert und mit der herkömmlichen Magnetspule verglichen.

3.1 Charakterisierung Schaltschütz

Der Aufbau eines Antriebs für ein elektrisches Schaltschütz erfordert eine experimentelle Untersuchung, welche im vorliegenden Fall in zwei Phasen unterteilt ist. Im ersten Schritt wird eine Funktionsanalyse durchgeführt, um die notwendigen Systemparameter herauszufinden. Darauf aufbauend werden im zweiten Schritt die zuvor definierten Parameter ermittelt.

3.1.1 Funktionsweise

Das in Abbildung 3.1 (a) gezeigte Schütz kann in zwei Teile untergliedert werden. Der untere Teil besteht aus der Antriebseinheit, der Magnetspule, die durch das zu entwickelnde Antriebssystem ersetzt werden soll. Der obere Teil beinhaltet die eigentliche Funktion des Schützes, die Kontakte, die geöffnet und geschlossen werden sollen.

Eine schematische Darstellung des Schaltschützes ist in Abbildung 3.1 (b) gezeigt. Dieses besitzt auf jeder Seite vier Anschlüsse (2) mit feststehenden Kontaktflächen (1). Als mittlerer Teil verfügt der Trägerschlitten über die Kontaktbrücken (3). In der in Abbildung 3.1 (b) gezeigten Position ist die Magnetspule spannungsfrei und die Kontakte sind geöffnet. Bei Anlegen einer Spannung zieht die Spule am Hebelarm. Dieser rotiert dadurch gegen den Uhrzeigersinn und drückt den Trägerschlitten nach links. Während der Bewegung werden die Rückstellfedern (5) (dargestellt in Rot) bis zu einer quasistatischen Mittelposition in Abbildung 3.1 (c) komprimiert. In dieser Position schließen alle Kontaktbrücken fast gleichzeitig. Ab diesem Zeitpunkt arbeitet die Magnetspule zeitgleich gegen alle vier Kontaktfedern (4) (dargestellt in Gelb) und die zwei Rückstellfedern (5) (dargestellt in Rot). Das komplett geschlossene Schütz ist in Abbildung 3.1 (d) zu sehen.

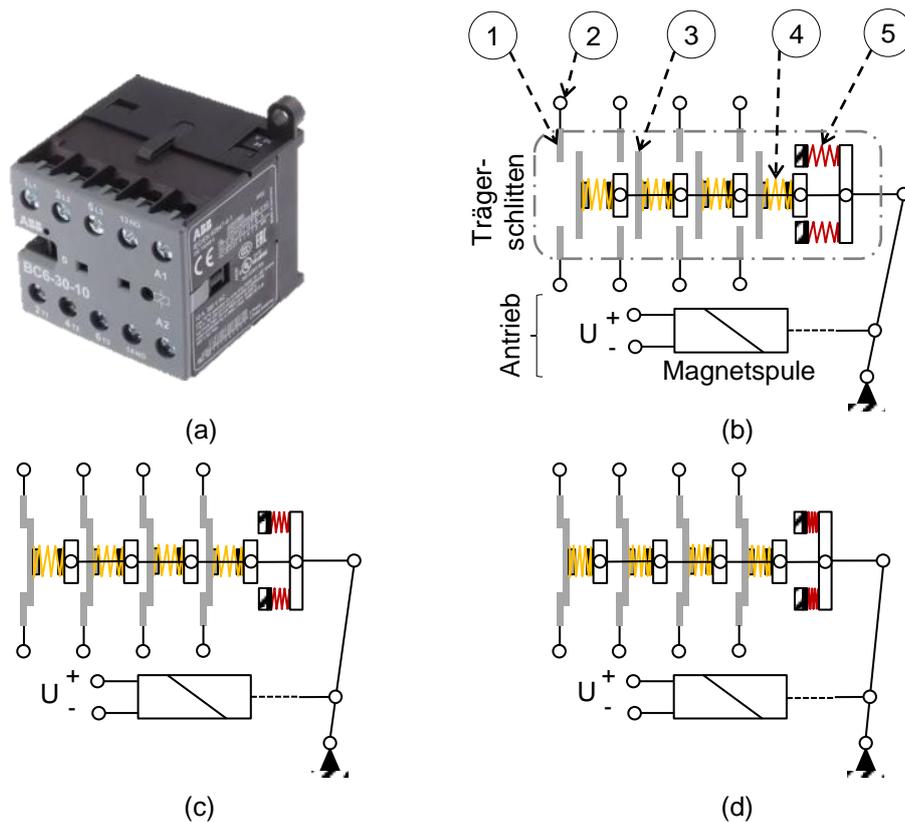


Abbildung 3.1: (a) Bilder des elektrischen Schaltschützes. (b) Schematische Darstellung mit komplett geöffneten Kontakten, (c) in einer quasistatischen Mittelposition und (d) komplett geschlossen.

Wird die Spannung an der Spule abgeschaltet, drücken die Rückstellfedern den Trägerschlitten wieder zurück in die Ausgangsposition (Abbildung 3.1 (b)), was zu einem erneuten Öffnen der Kontaktbrücken führt. Der kritischste Punkt des Schließ- oder Öffnungsvorgangs ist die Mittelposition in Abbildung 3.1 (c) bei der gerade die Kontaktbrücken die Verbindung herstellen oder lösen. Genau in diesem Augenblick, kurz vor dem Schließen bzw. kurz nach dem Öffnen entsteht in dem Luftspalt zwischen feststehendem Kontakt und Kontaktbrücke ein Lichtbogen. Schalten kann das Schütz laut Datenblatt Spannungen bis 960 V [104]. Laut [105] besitzt Luft eine Spannungsfestigkeit von 3 kV/mm. Aus diesen Werten resultiert die Annahme, dass bei einem Luftspalt zwischen 0 mm und 0,23 mm ein Überschlag entsteht und ein Lichtbogen erscheint. Dadurch entstehen auf den Kontakten sehr hohe Temperaturen, die die Flächen stark abnutzen. Im schlimmsten Fall kann eine Verschweißung der Kontaktflächen entstehen. Um dieses Phänomen zu minimieren, muss die kritische Zwischenposition mit einer gewissen Mindestgeschwindigkeit überfahren werden.

Aus dieser Funktionsanalyse können nun die benötigten Parameter herausgesucht werden. Dabei ist in diesem Fall neben den klassischen Aktorcharakteristiken auch, wie vorausgehend beschrieben, die Geschwindigkeit um die Zwischenposition herum ausschlaggebend für ein funktionierendes Antriebskonzept. Zum Vergleich wird außerdem die Leistungsaufnahme der Magnetspule gemessen.

3.1.2 Charakterisierung der Antriebseigenschaften

Um alle im vorigen Kapitel beschriebenen Parameter ermitteln zu können, sind zwei unterschiedliche Experimente notwendig. Der erste Versuch hat das Ziel die Geschwindigkeit, den Systemhub sowie die Leistungsaufnahme zu ermitteln. Hierzu wird der Verfahrweg des Trägerschlittens mit einem Lasersensor LK-G37 der Marke Keyence gemessen. Dieser wird über den Controller LK G300 1P an ein Datenerfassungsmodul NI 9205 angeschlossen. Die Spannung für die Magnetspule wird über einen Schalter NI 9472 mit der Spannungsquelle HMC8042 verbunden. Zur Visualisierung werden die beiden NI-Module der Firma National Instruments über den Embedded Controller NI cRio 9074 an den Computer angeschlossen. Die Datenaufnahme erfolgt auf dem integrierten FPGA (engl.: Field Programmable Gate Array). Die Programmierung wird mit Hilfe von Labview 2014 und die Datenaufbereitung mit Matlab 2015 durchgeführt.

Die Messung des Hubs des Trägerschlittens über die Zeit ist in Abbildung 3.2 (a) dargestellt. Darin sind zwei Messungen abgebildet, eine bei der im Datenblatt angegebenen Nennspannung U_{CC} von $U = 24 \text{ V}$ (dargestellt in roter Strichpunktlinie) und eine bei $U = 14 \text{ V}$ (dargestellt in blauer durchgehender Linie). Aus diesen Messungen können die exakte Position des kritischen Zwischenzustandes ($x_C = 1,9 \text{ mm}$) und der Gesamthub des Systems ermittelt werden ($x_S = 2,7 \text{ mm}$). Außerdem kann die Geschwindigkeit an der Mittelposition gemessen werden. Diese Berechnungen sind für das Schließen, also das aktive Ansteuern der Magnetspule (Abbildung 3.2 (b)) und für das Öffnen und damit das Spannungsfreischaalten (Abbildung 3.2 (c)) erforderlich.

Die Betriebsspannung der Magnetspule bzw. des Schützes liegt laut Datenblatt in einem Bereich von $U = 20 \text{ V}$ (83% von U_{CC}) und $U = 26 \text{ V}$ (108% von U_{CC}). In diesen Grenzen liegt die Geschwindigkeit abhängig von der Ansteuerspannung an der kritischen Position beim Schließen zwischen 384 mm/s und $583,3 \text{ mm/s}$.

Die Geschwindigkeit beim Öffnen der Kontakte hängt hauptsächlich von den Rückstellfedern ab, die den Trägerschlitten in Ausgangsposition drücken. Lediglich das spannungsabhängige Phänomen der Restmagnetisierung führt zu einer kleinen Variation der Geschwindigkeit beim Öffnen der Kontakte von 348,4 mm/s bis 362,1 mm/s. Grund hierfür ist, dass der Stromfluss in der Spule, der das Magnetfeld erzeugt, der angelegten Spannung mit einer Verzögerung folgt, was auf die dynamischen Eigenschaften dieser RL-Schaltung zurückzuführen ist.

Je höher die angelegte Spannung, desto schneller wird eine Stromstärke erreicht, die ein ausreichendes Magnetfeld erzeugt. Diese Aussage wird durch die Strommessungen in Abbildung 3.2 (d) bestätigt.

Die jeweilige benötigte Leistung P basiert auf der Ansteuerspannung U und der gemessenen Stromstärke i , welche somit im gesamten Bereich ermittelt werden kann. Um das Schütz für eine Minute geschlossen zu halten, kann die benötigte Energie E_M mit

$$E_M = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T U(t) i(t) dt \quad (3.1)$$

berechnet werden. Das Ergebnis ist eine Energie von $E_M = 190,2 \text{ J}$.

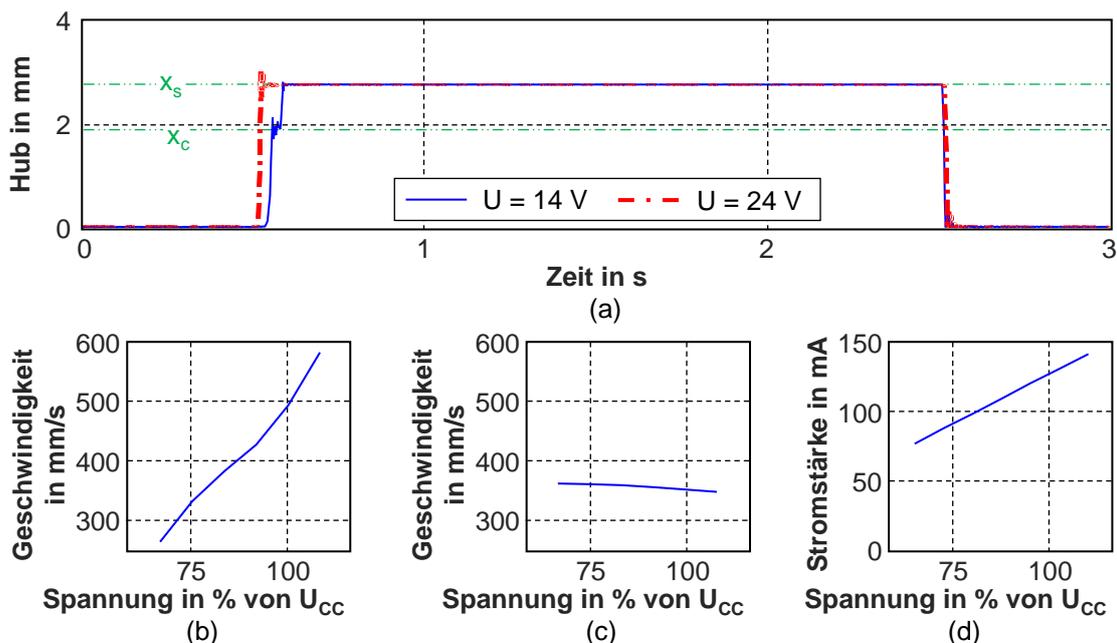


Abbildung 3.2: (a) Kraft-Weg-Messungen als Sprungantwort für zwei verschiedene Ansteuerspannungen. (b) Geschwindigkeit beim Schließen an der Zwischenposition vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC} . (c) Geschwindigkeit beim Öffnen an der Zwischenposition vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC} . (d) Stromstärke vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC}

Um im zweiten Test die benötigte Aktorkraft zu messen, wird der Versuchsstand um eine Linearachse ANT-25LA der Firma Aerotech sowie eine Kraftmessdose FUTEK LSB200-51b ergänzt, welche in Abbildung 3.3 (a) abgebildet sind. Die Linearachse bewegt, wie in Abbildung 3.3 (b) schematisch dargestellt, kontinuierlich den Trägerschlitten in Richtung geschlossener Position und die Kraftmessdose nimmt dabei simultan die benötigte Kraft auf. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abbildung 3.3 (c) dargestellt. Außerdem sind in dieser Grafik auch wieder die beiden Schlittenpositionen x_c und x_s ersichtlich.

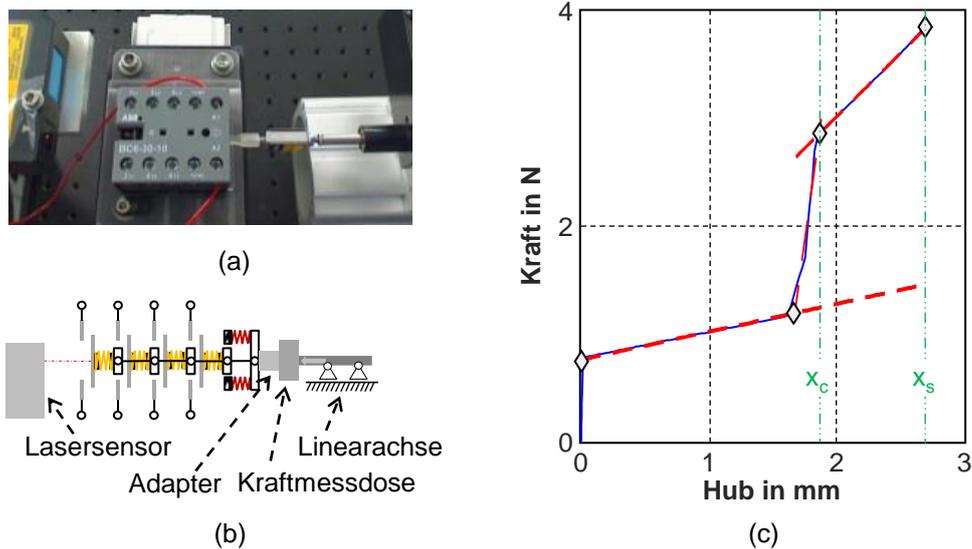


Abbildung 3.3: (a) Draufsicht auf den Prüfstand. (b) Schematische Darstellung des Schließmechanismus mit Linearachse und Kraftmessdose. (c) Kraft-Weg-Charakteristik des Trägerschlittens.

Diese Charakteristik kann in drei Teile aufgeteilt werden. Der erste lineare Bereich ist auf die Rückstellfedern zurückzuführen. Die Steigung entspricht somit der Federsteifigkeit dieser Federn. Der lineare Bereich am oberen Ende der Messung ist auf die Rückstellfedern sowie die Kontaktfedern zurückzuführen. Nach dem Schließen im mittleren sehr steilen Bereich werden alle enthaltenen Federn komprimiert. In diesem mittleren Teil der Messung schließen die Kontaktbrücken und die Vorspannung der vier Kontaktfedern führt zu einem abrupten Anstieg der Kraft. Der Gesamtsprung hat somit eine Höhe entsprechend der Summe der Vorspannungen jeder Kontaktfeder. In einem idealen System würden alle Kontaktbrücken exakt zur gleichen Zeit schließen und die Kraft würde in einem Sprung ansteigen. Aufgrund der Fertigungstoleranzen schließen die Kontakte nicht gleichzeitig und auch die Vorspannungen sind nicht genau gleich. Daraus resultiert eine große endliche

Steigung anstelle einer unendlichen Steigung eines Sprungs während der Brückenschließphase.

3.2 Antriebskonzept und -vorauslegung

Ersetzt werden soll die vorhandene Magnetspule durch ein Antriebssystem auf Basis von COP-DEAs. Der Aufbau und die Funktionsweise wurden in Kapitel 2.3.2 ausführlich beschrieben. Ein solcher Aufbau mit innenliegendem Vorspannmechanismus, in diesem Fall eine Zylinderfeder (LBS), ist in Abbildung 3.4 skizziert. Wird Hochspannung (engl. High Voltage (HV)) im Bereich bis zu 2,5 kV angelegt, wird die Steifigkeit des COP-DEAs aus der Ebene heraus, aufgrund der Maxwellspannungen, etwas geringer und das Vorspannsystem drückt den inneren Ring in einen neuen Gleichgewichtspunkt. Aus der angelegten Spannung resultiert somit eine regelbare Bewegung.

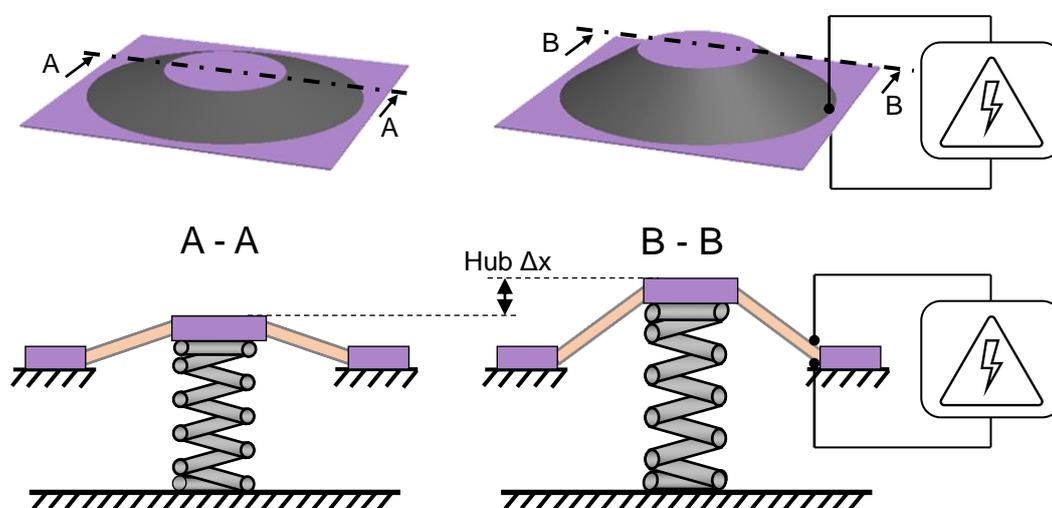
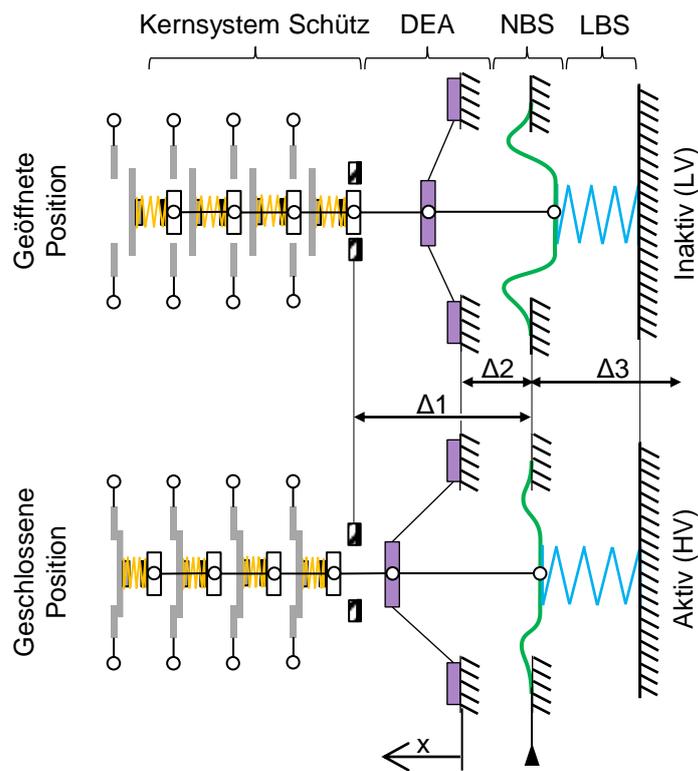


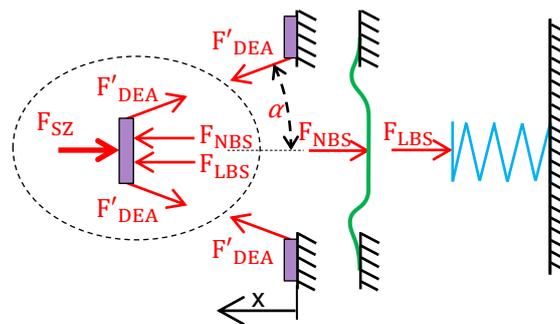
Abbildung 3.4: Darstellung eines inaktiven und aktiven COP-DEA mit LBS als Vorspannsystem.

In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht nur eine LBS, sondern auch eine NBS im Vorspannmechanismus verwendet. Grund dafür ist eine signifikante Verbesserung von Hub und Geschwindigkeit des entstehenden Antriebssystems [71], [100], [103], [106].

Durch Ausnutzen der beschriebenen Eigenschaften besteht somit die Möglichkeit die Magnetspule durch einen DEA zu ersetzen. Das dadurch entstandene System ist schematisch in Abbildung 3.5 (a) dargestellt. Um die Kraft des DE-Elementes zu vergrößern werden mehrere COP-DEAs gestapelt und somit mechanisch parallel belastet. Zu beachten ist, dass im Gegensatz zu dem herkömmlichen Kernsystem des Schützes (Abbildung 3.1), an dieser Stelle kein Hebelarm mehr verwendet wird.



(a)



(b)

Abbildung 3.5: (a) Antriebskonzept des Gesamtsystems, bestehend aus Kernsystem des Schützes (links) und COP-DEA, NBS und LBS (rechts), ohne HV (oberer Teil) und mit HV (unterer Teil) unter Angabe der zu optimierenden Parameter. (b) Kräftefreischnitt des Antriebssystems.

In der oberen Konfiguration in Abbildung 3.5 (a) ist keine Spannung angelegt und der COP-DEA hält das Schütz in der geöffneten Position. Dieser Status wird auch LV (engl. Low Voltage) genannt. Das Vorspannsystem ist maximal unter Spannung. Bei Anlegen der Hochspannung wird der DEA weicher und das Vorspannsystem kann das Schütz schließen. Bei Wechsel zu LV vergrößert sich die Steifigkeit des DEA wieder, der Vorspannmechanismus wird gespannt und das Schütz öffnet sich.

Um das Antriebssystem auszulegen, muss eine komplette Kräftebetrachtung des Gesamtsystems durchgeführt werden. Ein Kräftefreischnitt ist hierzu in Abbildung 3.5 (b) dargestellt. Die Kraft F_{SZ} ist dabei die zuvor ermittelte Kraft des Schützes. Die anderen Kräfte F'_{DEA} , F_{LBS} und F_{NBS} sind die inneren Kräfte des Antriebs und beschreiben den Stapel an parallel geschalteten DEAs, die LBS und die NBS. Durch Bildung des Kräftegleichgewichts können die einzelnen Elemente so ausgelegt werden, dass das Schütz zuverlässig öffnet und schließt. In den Gleichgewichtspunkten muss also

$$F_{SZ} = F_{LBS} + F_{NBS} - F_{DEA} \quad (3.2)$$

gelten, wobei

$$F_{DEA} = F'_{DEA} \cos \alpha \quad (3.3)$$

die Kraft des Elastomerstapels in Richtung der Bewegung ist. F'_{DEA} ist hierbei von der angelegten Spannung abhängig. Somit kann über die an dem COP-DEA angelegten Spannung der Gleichgewichtspunkt verschoben werden. Daraus folgend muss für ein korrekt arbeitendes System mit zwei festen Positionen die Gleichgewichtsbedingung bei LV und HV, also im offenen und geschlossenen Zustand, erfüllt sein.

Um die Kraftcharakteristiken des DEA Stapels und der Federn anzupassen sind zwei Möglichkeiten gegeben. Auf der einen Seite können die Geometrieparameter $\Delta 1$, $\Delta 2$, und $\Delta 3$ angepasst werden, um die relativen Positionen zu ändern und damit die Vorspannungen der einzelnen Elemente. Auf der anderen Seite können auch die intrinsischen Eigenschaften der einzelnen Elemente variiert werden. Bei der LBS wären solche Eigenschaften die Steifigkeit und die Vorspannung. Bei der NBS können die Vorspannung der Balkenfedern, die Dicke, die Balkenbreite und das Material angepasst werden. Eine ausführliche Beschreibung der Herstellung der NBS ist in [107] dargelegt. Für den COP-DEA sind die anpassbaren Eigenschaften der innere und äußere Durchmesser sowie die Anzahl im Stapel.

Ziel ist durch Anpassen der oben genannten Parameter das Kräfteprofil des Schützes zwischen den beiden Aktorkurven bei LV und HV zu platzieren [108]. Hierzu wird ein Materialmodell zur Abschätzung von F_{DEA} genutzt, das die Membrangeometrie, die angelegte Spannung sowie die Anzahl der Lagen berücksichtigt [70]. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Die markierten Schnittpunkte korrespondieren mit der geschlossenen und offenen Position des Schützes.

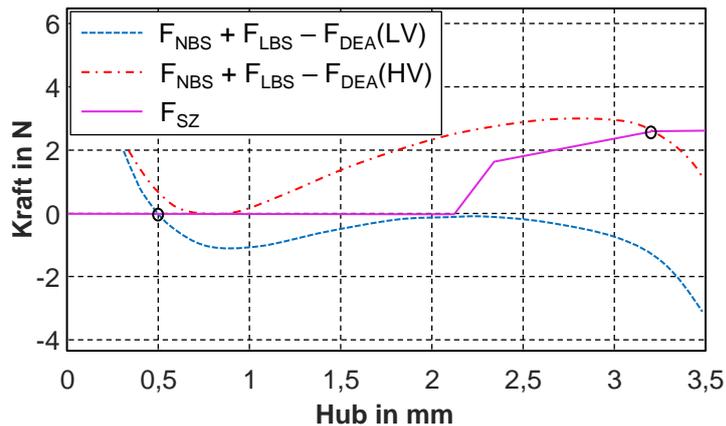


Abbildung 3.6: Grafische Auslegung mit Hilfe des Kräftegleichgewichts.

Laut der Auslegung sind 26 COP-DEA Lagen mit einem inneren Durchmesser von $d = 13,1$ mm und einem äußeren Durchmesser von $D = 21$ mm notwendig. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass die Berechnungen nicht die frequenzabhängige Hysterese von F_{DEA} abbilden.

3.3 Charakterisierung von DEA und Vorspannsystem

Im Folgenden wird die Herstellung der individuellen Teile des Antriebssystems beschrieben. Dazu gehören DEA und Vorspannsystem, welche nach ihrer Fertigung auch validiert werden.

3.3.1 COP-DEA

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben besteht der hier verwendete COP-DEA aus einer $50 \mu\text{m}$ dicken Silikonfolie der Firma Wacker Chemie AG mit dem Markennamen Elastosil®. Diese wird beidseitig beschichtet und mit einem steifen Rahmen zur Handhabung versehen (Abbildung 3.7 (a)). Um den benötigten Bauraum der COP-DEAs zu optimieren, werden sie als Module entworfen, wobei jedes, wie in Abbildung 3.7 (b) ersichtlich, zwei aktive Lagen aufweist (engl. Double Layer, DL) [107]. Ein DL besteht aus einer äußeren doppelten Elektrode, welche über die spätere Faltkante miteinander verbunden ist und eine innere Elektrode, welche für beide aktiven Lagen genutzt wird. Dieser Aufbau reduziert die Dicke des COP-DEA Stapels erheblich, da der steifere Rahmen den dicksten Teil des DEAs darstellt und auch der Rahmen nur auf der Seite der Doppelelektrode aufgebracht wird.

Das Entwerfen solcher DL-DEAs bringt jedoch einige praktische Herausforderungen hinsichtlich der zuverlässigen elektrischen Kontaktierung mit sich. Insbesondere die

Verbindung zur inneren Elektrode ist sehr schwierig. Denn auch durch die Kontaktierung soll der Stapel nicht dicker werden. Um das zu erreichen, ist, wie in Abbildung 3.7 (a) gezeigt, der Rahmen mit zwei Aussparungen versehen. Durch eine dieser Aussparungen kann die äußere Doppelelektrode mit einem Kupferstreifen versehen werden. Um den Kontakt zur inneren Elektrode sicherzustellen, wird ein weiterer Kupferstreifen direkt auf diese aufgebracht. Bei Faltung an der in Abbildung 3.7 (c) gezeigten Linie des DL, passt dieser genau in die noch freibleibende Aussparung im Rahmen. Beide Streifen werden mit einem selbst entwickelten, leitfähigen, auf Epoxid basierendem Kleber befestigt. Der aus diesem Prozess hervorgehende DL ist in Abbildung 3.7 (d) gezeigt. Ein Bild des hergestellten Faltaktors ist in Abbildung 3.7 (e) dargestellt.

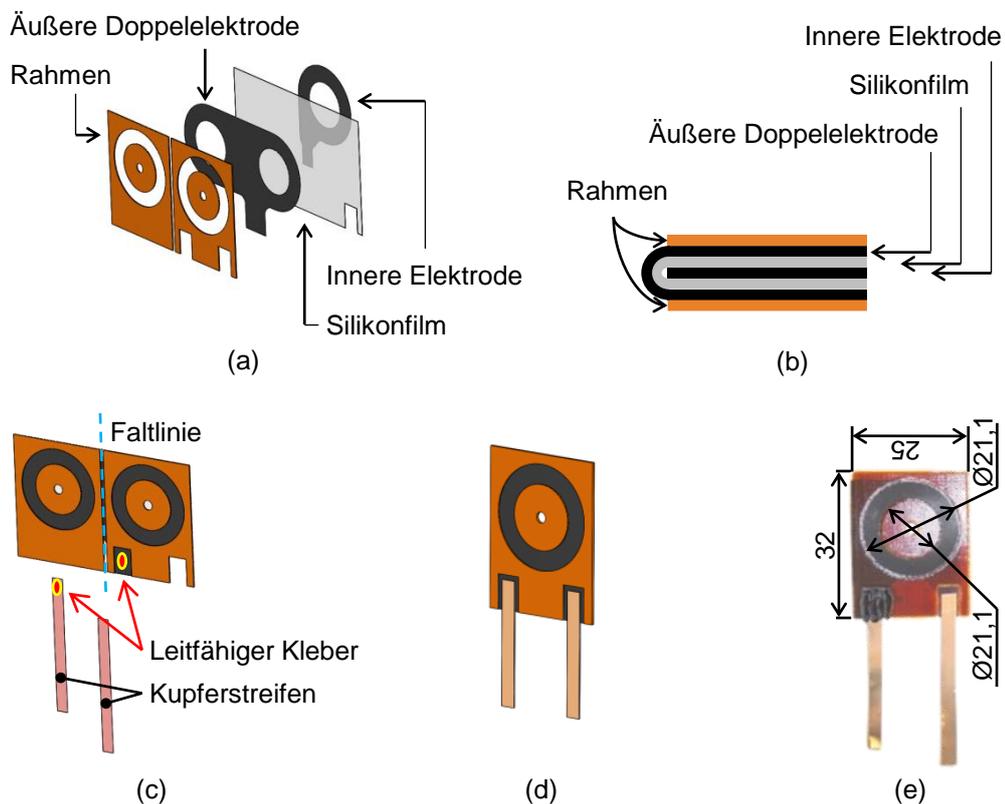


Abbildung 3.7: COP-DEA design. (a) Aufbau des Doppellagenaktors. (b) Schematische Darstellung des Schichtaufbaus. (c) Elektrische Verbindung. (d) CAD Modell des fertigen COP Doppellagenmoduls. (e) Bild des fertigen COP Doppellagenmoduls.

Unvermeidbare Ungenauigkeiten im beschriebenen manuellen Herstellungsprozess können in Kombination mit Inhomogenitäten im Material zu einer Fehlfunktion der COP-DEAs führen. Um einen korrekten Betrieb der späteren Antriebssysteme zu gewährleisten,

werden nach der Herstellung vorläufige Qualitätstests durchgeführt. Der am häufigsten auftretende Versagensmechanismus ist der elektrische Durchschlag durch Erzeugen eines elektrischen Feldes, welches aus dem Anlegen einer elektrischen Spannung resultiert. Somit liegt der einfachste durchzuführende Qualitätstest darin, an die unverformten DEAs das maximale elektrische Feld anzulegen, welches sie später im Antriebssystem erfahren werden. Das elektrische Feld E kann mit

$$E = \frac{U}{z} = \frac{U}{z_0} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{l_0}\right)^2} \quad (3.4)$$

berechnet werden [70], wobei U die angelegte Spannung, z_0 und z die Dicke der unverformten und verformten Silikonfolie, l_0 die Differenz zwischen äußeren und inneren Radius des COP-DEAs und x die Bewegung aus der Ebene heraus ist. Aus der Gleichung (3.4) ist ersichtlich, dass das elektrische Feld E mit der angelegten Spannung U und der Auslenkung x steigt. Daraus ergibt sich durch die in der Systemkonfiguration (Abbildung 3.6) verwendeten Maximalwerte für die angelegte Spannung ($U = 2,5 \text{ kV}$) und die Auslenkung aus der Ebene heraus ($x = 3,2 \text{ mm}$) ein maximales elektrisches Feld von $E = 92,6 \text{ V}/\mu\text{m}$ in der späteren Anwendung.

Für die im Qualitätstest erforderliche Prüfspannung am nicht ausgelenkten COP-DEA ($x = 0 \text{ mm}$) wird 3.4 umgestellt und das oben berechnete elektrische Feld um einen Sicherheitsfaktor von 5% erhöht. Die daraus folgende Spannung $U = 3,38 \text{ kV}$ kann anschließend für die Validierung der hergestellten Doppelmodule genutzt werden ohne sie zu verformen.

Um Stromspitzen durch das Aufladen des Kondensators (COP-DEA) zu vermeiden, wird die Spannung innerhalb einer Sekunde auf den Maximalwert linear erhöht. Bei intakten Modulen liegt der Strom beim Beladen im positiven und beim Entladen im negativen μA -Bereich. Bei defekten DEAs hingegen kollabiert aufgrund des Kurzschlusses die Spannung und die Stromstärke springt an die Grenze der Spannungsquelle. Durch dieses Phänomen können die funktionierenden DEAs sehr gut herausgefiltert werden.

Nach der Herstellung und Validierung der Doppelmodule müssen sie charakterisiert werden. Zur Aufnahme der Kraft-Weg-Charakteristik wird ein Prüfstand aufgebaut. Ein Computer ist mit einem Linearmotor der Firma Stable Micro Systems und dem NI cRio 9076 verbunden, welches die beiden Module NI 9237 und NI 9205 beinhaltet. Diese werden

benötigt, um die Strom- und Spannungsmonitore der Spannungsquelle Ultravolt 4HVA24-P1 sowie die Daten der verwendeten Kraftmessdose LCM300-50lb der Firma Futek auszulesen. Der Linearmotor ist in Galgenbauweise entworfen. Zur Befestigung der zu untersuchenden Teile verfügt sie über eine Testplattform. Dahinter befindet sich eine vertikal angeordnete Linearführung, auf der sich der Kragarm bewegen kann. An der Spitze dieses Armes ist die Kraftmessdose über zwei Gewinde zwischen Adapter zu EAP oder NBS und Linearachse angebracht. Die Bewegung wird mit Hilfe eines Lasersensors Keyence LK-G37 gemessen. Der allgemeine Aufbau ist in Abbildung 3.8 (a) schematisch dargestellt. Ein Bild des Versuchszustandes mit zu vermessendem COP-DEA Stapel (links) und NBS (rechts) ist in Abbildung 3.8 (b) zu sehen. Ergänzt wird diese Prüfumgebung mit einem NI 9401 um die Spannungsquelle freizugeben und ein NI 9263, um die benötigte Hochspannung einzustellen. Programmiert und gesteuert werden die Versuche über Labview 2014 und die Datennachbereitung geschieht über Matlab 2015.

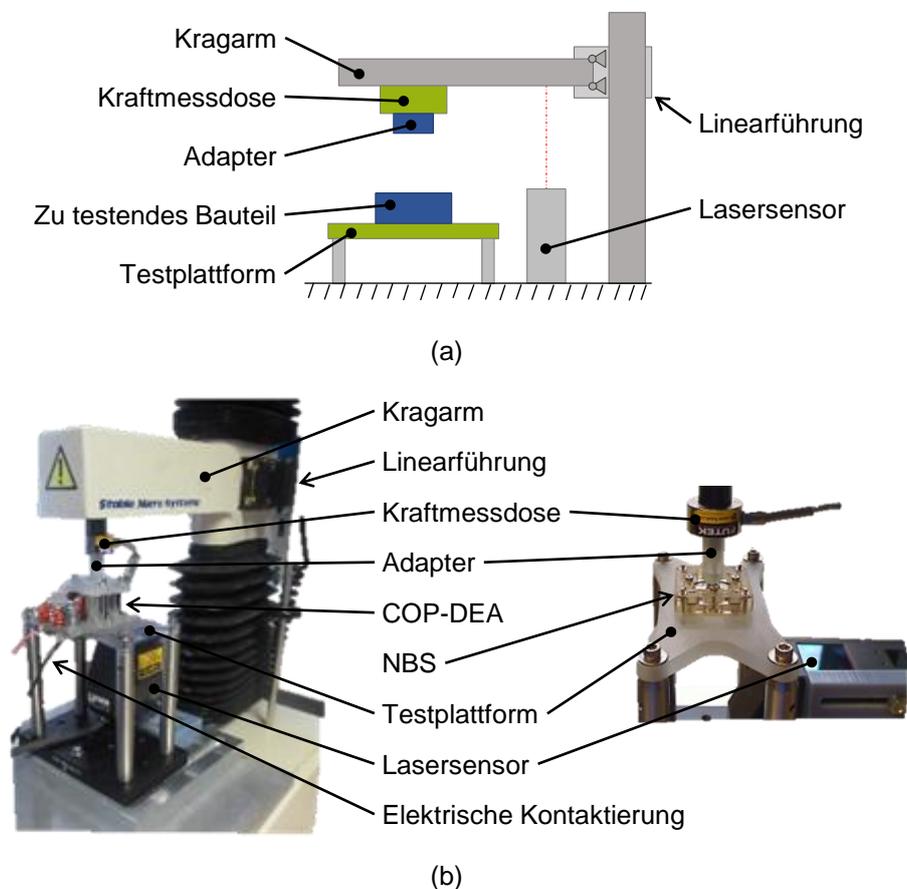


Abbildung 3.8. (a) Schematische Darstellung des Versuchszustandes zur experimentellen Charakterisierung. (b) Versuchszustand mit COP-DEA Stapel (links) und NBS (rechts).

Die COP-DEAs werden charakterisiert, indem der äußere Rahmen fest geklemmt wird während der Linearmotor über die Kraftmessdose und den Adapter den inneren beweglichen Rahmenkreis inklusive der Membran auslenkt. Simultan wird kontinuierlich der Weg über den Lasersensor und die Kraft über die Kraftmessdose aufgenommen. Die gemessenen Kraft-Weg-Kurven sind in Abbildung 3.9 (a) bei verschiedenen angelegten Spannungen und bei einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit von 1 mm/s gezeigt.

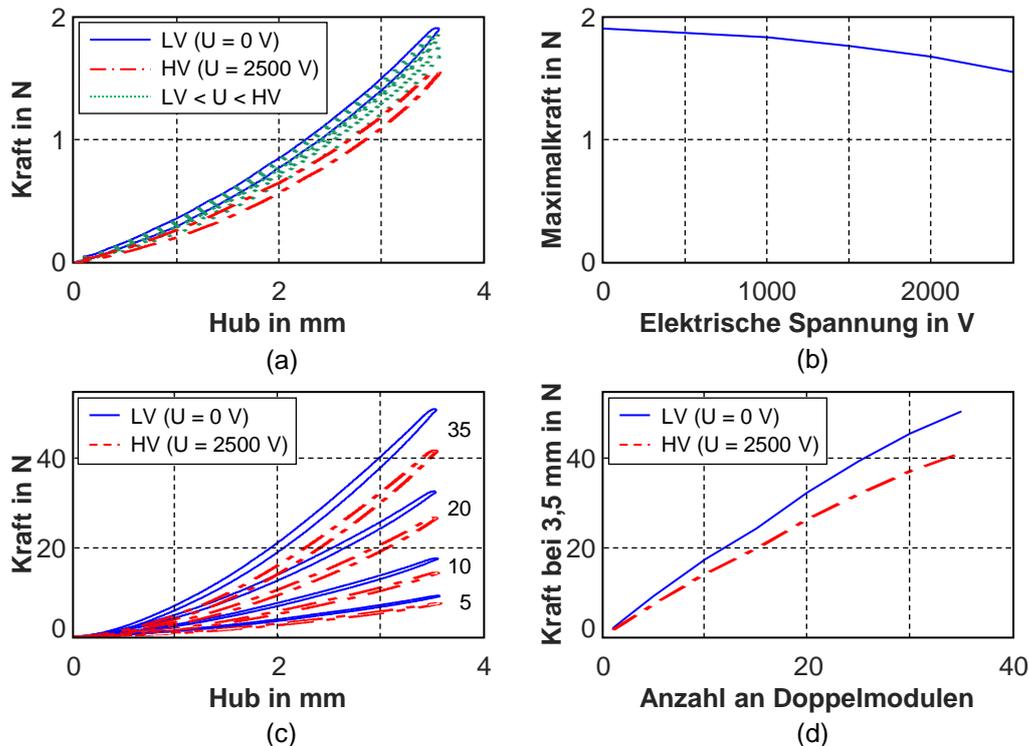


Abbildung 3.9: (a) Kraft-Weg-Charakteristik eines Doppelmoduls bei verschiedenen elektrischen Spannungen. (b) Maximale Kraft als Funktion der angelegten Spannung. (c) Charakteristik verschiedener DEA Stapel mit unterschiedlicher Anzahl an Doppelmodulen bei HV und LV. (d) Blockierkraft bei einer Auslenkung von 3,5 mm bei HV und LV als Funktion der Anzahl an Doppelmodulen im Stapel.

Die Maximalkraft dieser Messungen ist in Abbildung 3.9 (b) als Funktion der angelegten Spannung dargestellt. Dabei ist ein quadratischer Zusammenhang zu erkennen, der mit dem Maxwell Druck aus Gleichung (2.4) zu erklären ist. Das Anlegen einer elektrischen Spannung führt zu einer mechanischen Spannung in Dickenrichtung, was wiederum aufgrund der Inkompressibilität zu einer äquivalenten Ausdehnungsspannung entlang der Folienebene führt. Diese Expansionsspannung hat den Effekt, dass die mechanische Kraft in der Ebene bei gleicher radialer Dehnung verringert wird, was auch zu einer Verringerung der gemessenen Kraft aus der Ebene heraus führt. Da diese Spannung immer noch durch

Gleichung (2.4) gegeben ist, stellt die resultierende Abnahme der mechanischen Kraft eine quadratische Funktion der angelegten elektrischen Spannung dar, was mit den Beobachtungen in Abbildung 3.9 (b) übereinstimmt. Die maximal zulässige HV wird auf 2,5 kV fixiert und LV ist definiert mit 0 V.

Die Messungen werden für mehrere Stapel mit verschiedener Anzahl an enthaltenen Doppelmodulen wiederholt (Abbildung 3.9 (c)). Das Diagramm in Abbildung 3.9 (d) zeigt die Blockierkraft bei einer Auslenkung von 3,5 mm für HV und LV. Zu beobachten ist, dass die Kraft linear mit der Anzahl der DL steigt, da die DEs mechanisch parallel belastet werden. Die leichten Abweichungen sind auf Toleranzen sowie auf Unterschiede in Herstellung und Zusammenbau zurückzuführen.

3.3.2 Vorspannmechanismus

Die NBS besteht aus 0,004 Inch dickem rostfreiem Stahl mit einer Balkenbreite von 2,5 mm und wird durch Laserschneiden hergestellt (Abbildung 3.10 (a)). Nach dem Schneiden wird die NBS, wie in Abbildung 3.10 (b) gezeigt, in einen 3D Druckrahmen mit einer Kompression von 96% eingespannt. Die eingespannte NBS hat zwei stabile Positionen am oberen und unteren Totpunkt, was in Abbildung 3.10 (c) zu sehen ist. Im instabilen Bereich weist dieses Vorspannelement eine negative Steigung auf.

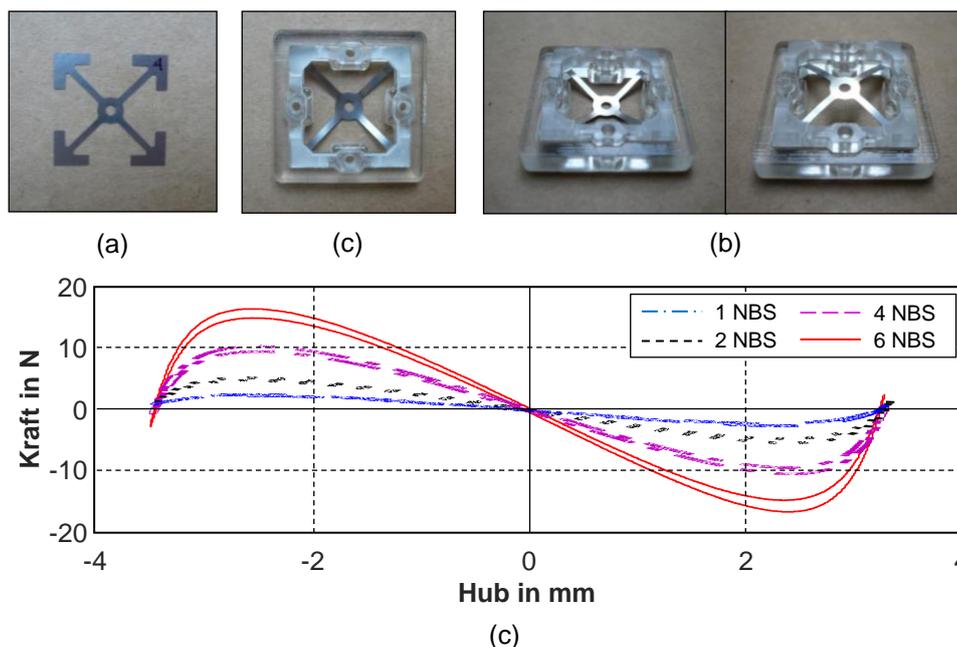


Abbildung 3.10: (a) Lasergeschnittenes Federkreuz. (b) Eingebaut in 3D Druckrahmen. (c) Abbild des unteren und oberen Totpunktes. (d) Charakterisierung bei verschiedener Anzahl an Federkreuzen.

Um die NBS zu charakterisieren, wird derselbe Prüfstand verwendet, der auch zur Charakterisierung der COP-DEAs genutzt wurde. Der Versuch wird mehrmals mit verschiedener Anzahl an Federkreuzen durchgeführt. Wie beim Stapeln der COP-DEAs werden die Federn mechanisch parallel belastet, was eine lineare Erhöhung der Kraft in den Totpunkten zur Folge hat. Daraus resultiert auch eine lineare Steigerung der negativen Steifigkeit in Abhängigkeit der Anzahl (Abbildung 3.10 (d)).

In dieser Arbeit wird eine kommerziell verfügbare LBS genutzt. Die Steifigkeit sowie die geometrischen Abmessungen können dem Datenblatt entnommen werden. Somit ist eine Charakterisierung der LBS nicht notwendig.

3.4 Finale messwertbasierende Antriebsauslegung

Nachdem alle in Gleichung (3.2) aufgeführten Kräfte bekannt sind, wird die Antriebsauslegung nochmals basierend auf diesen Messwerten ausgelegt. Hierzu wird Gleichung (3.2) umgestellt zu

$$F_{SZ} + F_{DEA} = F_{LBS} + F_{NBS}, \quad (3.5)$$

wobei F_{DEA} abhängig von der angelegten elektrischen Spannung ist. Da beide Seiten das gleiche Vorzeichen haben gestaltete sich die grafische Auslegung intuitiver. Diese wird in Matlab 2015 durchgeführt und das daraus resultierende Ergebnis ist in Abbildung 3.11 gezeigt. Alle für die Herstellung relevanten Parameter zum Aufbau des Antriebs sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

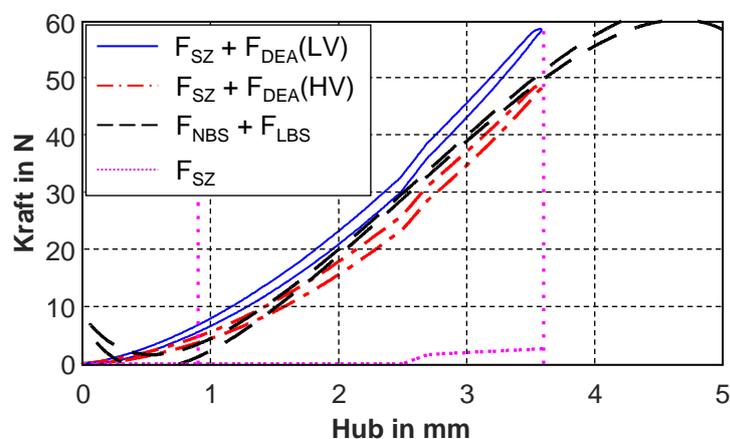


Abbildung 3.11: Finaler, messwertbasierender, grafischer Antriebsentwurf auf Basis des Kräftegleichgewichts.

Tabelle 3.1: Konstruktionsparameter für das Antriebssystem des elektrischen Schaltschütz

	Symbol	Benennung	Wert	Einheit
COP-DEA	D	Äußerer Durchmesser	21,1	mm
	d	Innerer Durchmesser	13,1	mm
	$\Delta 2$	Abstand zwischen DEA und NBS	5,2	mm
		Anzahl an DL	40	Stk.
LBS	k	Steifigkeit	1,53	N/mm
	x_{lbs}	Vordehnung	12,75	mm
NBS	e	Kantenlänge	25,4	mm
	b	Balkenbreite	2,5	mm
	t	Dicke	0,004	in
	c	Kompression	0,96	
		Anzahl an NBS	7	Stk.
		Material	Rostfreier Stahl	
Last	$\Delta 1$	Abstand zwischen Last und NBS	66,5	mm

Mit dem Vorgehen aus Kapitel 3.2 wird auch hier die Anzahl der benötigten COP-DEAs ermittelt. Die simulierten Werte der Kraft F_{DEA} werden durch die experimentell aufgenommenen Messwerte ersetzt. In dieser Auslegungsphase bleiben jedoch der innere und äußere Durchmesser bestehen und lediglich die Anzahl der COP-DEAs wird variiert. Dieses Vorgehen resultiert daraus, dass bei Veränderung eines Durchmessers ein kompletter Neuentwurf der Doppelaktoren erforderlich wäre und das Variieren der Anzahl durch einfaches Stapeln weiterer COP-DEAs realisierbar ist. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass die Kraft F_{DEA} linear mit der Anzahl skaliert und somit gut als Parameter genutzt werden kann.

Die Gesamtzahl an Doppelaktoren wird im Vergleich zur Vorauslegung in Kapitel 3.2 etwas erhöht. Diese Abweichung ergibt sich aus kleinen Ungenauigkeiten im Modell [70] sowie, der nicht mit einbezogenen, Hysterese aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Silikons und der Elektrode. Außerdem addieren sich hierzu auch Fehler aufgrund des viskoelastischen 3D-Druckmaterials. Aus diesen genannten Gründen erfolgt final eine Anpassung der Parameter von LBS und NBS.

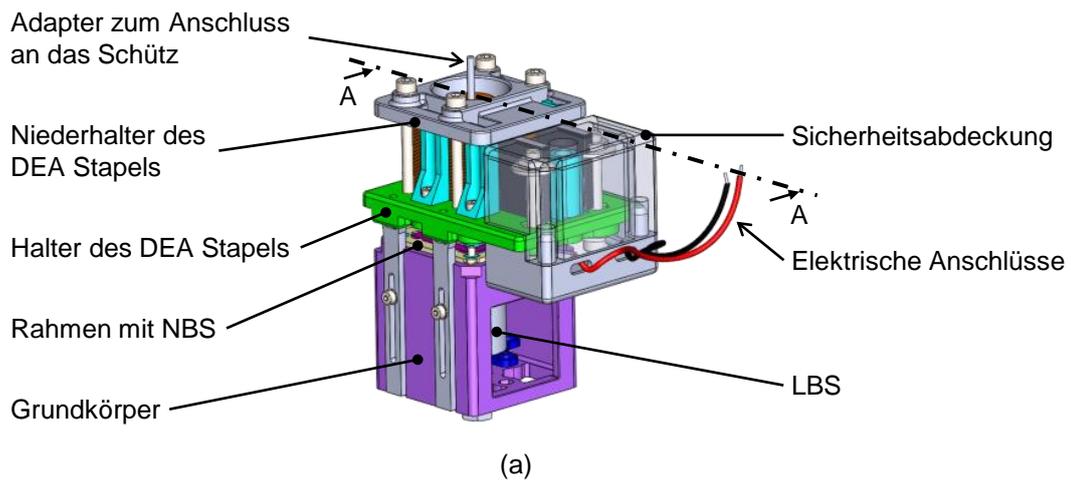
Aus Abbildung 3.11 geht außerdem hervor, dass das entworfene Antriebssystem aufgrund der Hysterese der COP-DEAs nicht den gesamten Hub des Schützes abbilden kann. Theoretisch besteht die Möglichkeit die DEs noch weiter zu stapeln, um den Bereich zwischen HV und LV zu skalieren. Weil der Stapel dann jedoch sehr dick werden würde, verursacht dies weitere konstruktive Probleme. Bei diesem Antriebssystem steht die Funktionsweise im Vordergrund, die auch ohne den gesamten Hub abzubilden gezeigt werden kann. Eine mögliche Lösung dieses Problems wird in Kapitel 6 erarbeitet.

3.5 Demonstrator: Konstruktion und Aufbau

Um die Performance des Antriebssystems bewerten zu können, wird ein Demonstrator mit den in Tabelle 3.1 angegebenen Parametern aufgebaut. Dieser Demonstrator ist in Abbildung 3.12 (a) abgebildet. Alle benötigten Strukturbauteile werden mit einem 3D-Drucker hergestellt.

Das Vorspannsystem, bestehend aus NBS und LBS ist im Grundkörper enthalten. Darüber sitzt der Halter des DEA Stapels, der verstellbar am Grundkörper angebracht ist. Zwischen diesem Halter und dem Niederhalter ist der äußere Rahmenteil der COP-DEAs geklemmt. Zur besseren Positionierung wurden Seitenführungen angebracht. Am oberen Ende sitzt der Adapter zum Kraftabtrieb bzw. zur Kraftübertragung an das elektrische Schaltschütz. Vorne am Demonstrator, unter der Sicherheitsabdeckung, laufen alle Kupferstreifen der einzelnen Doppelaktoren zusammen. Diese werden dort mit den elektrischen Anschlüssen verbunden.

Zur besseren Sichtbarkeit des gesamten Antriebsstrangs, ist in Abbildung 3.12 (b) eine Schnittansicht des Demonstrators dargestellt. Sichtbar ist das Vorspannsystem im Grundkörper, der fixierte Rahmen der NBS, das Zwischenstück zur LBS und das System zur Verstellung der Vorspannung der LBS. Außerdem ist zu erkennen, dass im Grundkörper ein hinterer Anschlag eingebaut wurde.



A - A

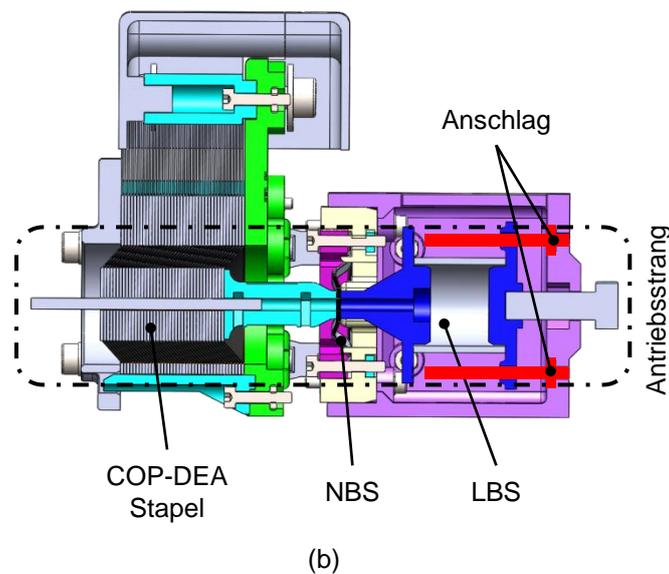


Abbildung 3.12: Konstruktion des Demonstrators in der (a) isometrischen Ansicht und (b) in einer Schnittansicht zur besseren Sichtbarkeit des Antriebsstrangs.

3.6 Validierung und Ergebnisse

Zur Validierung des zuvor aufgebauten Antriebssystems wird dieses in den zur Vermessung von NBS und COP-DEA verwendeten Prüfstand eingebaut. Bilder von dem sich im Prüfstand befindlichen Demonstrator sind in Abbildung 3.13 (a) und Abbildung 3.13 (b) zu sehen. Wie bei den Vermessungen der Einzelkomponenten fährt der Linearmotor positionsgeregelt einen bestimmten Weg, während simultan Kraft und Hub aufgenommen werden. Dieser Versuch wird bei HV und LV durchgeführt. Die dazugehörigen Aktorkurven für die jeweilige angelegte Spannung sind in Abbildung 3.13 (c) und Abbildung 3.13 (d) gezeigt.

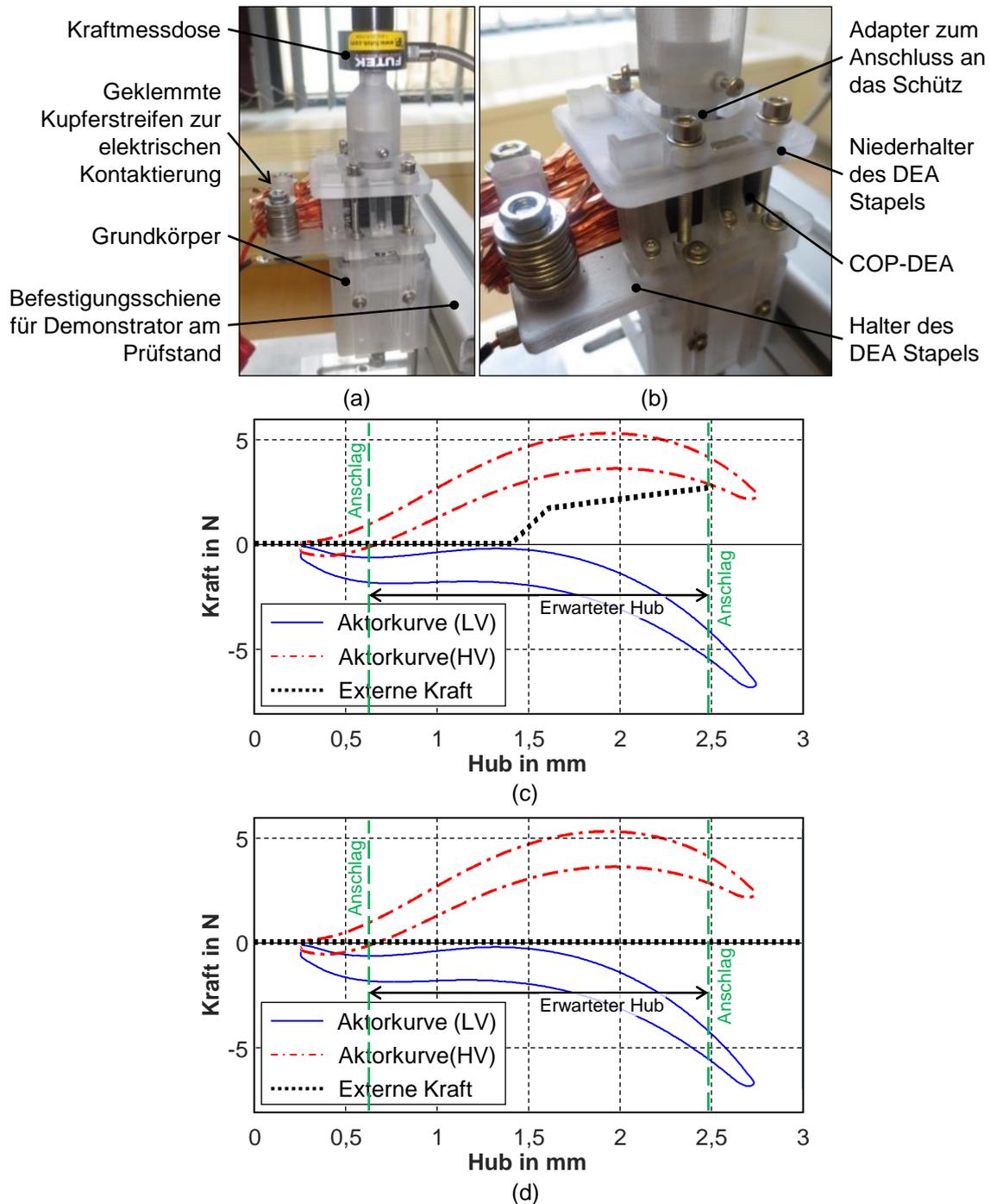


Abbildung 3.13: (b), (c) Prüfstand zur Aufnahme der Aktorcharakteristik. (c) Voraussage der Antriebsleistung beim Anschluss an das Schütz. (d) Voraussage der Antriebsleistung beim Arbeiten ohne externe Last.

In jeder dieser Grafiken ist eine andere externe Last zu Grunde gelegt. In Abbildung 3.13 (c) entspricht diese dem Lastprofil des Schützes, während in Abbildung 3.13 (d) das System ohne externe Last arbeitet. In beiden Konfigurationen wird auf der linken Seite ein Anschlag eingeführt und nur für die Konfiguration ohne externe Last auch auf der rechten Seite. Der

linke Anschlag ist ein Teil des Demonstrators (Abbildung 3.12 (b)), wohingegen der rechte Anschlag ein externes Bauteil ist. Aus beiden Grafiken resultiert eine Vorhersage des zu erreichenden Hubs von 1,8 mm.

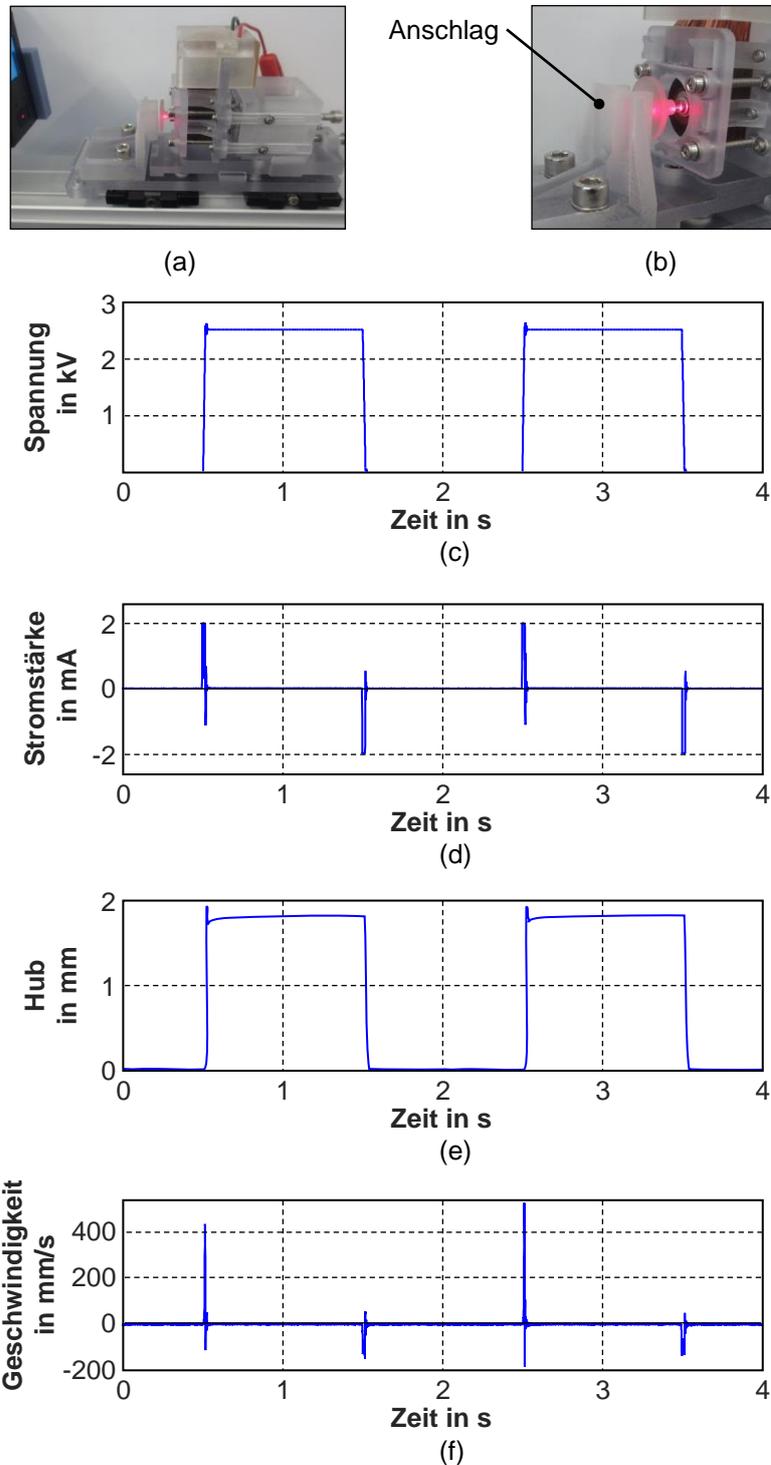


Abbildung 3.14: Vermessung des Antriebssystems ohne externe Last. (a), (b) Bilder des Systems. (c) Ansteuerspannung. (d) Gemessene Stromstärke. (e) Gemessener Hub. (f) Berechnete Geschwindigkeit.

Als erstes wird die Konfiguration ohne externe Last getestet. Diese ist in Abbildung 3.14 (a) gezeigt. Der externe Anschlag ist in Abbildung 3.14 (b) gut erkennbar. Der Hub wird mit dem Lasersensor Keyence LK-G37 gemessen und die Hochspannung durch einen Trek 610E bereitgestellt. Der benötigte Strom wird direkt an einem Messausgang des Verstärkers als Analogsignal abgenommen. Als Ansteuerung wird ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 0,5 Hz, einer Amplitude von HV für eine Zeit von zwei Periodendauern verwendet (Abbildung 3.14 (c)). Die aus der Spannungsbeaufschlagung resultierende Stromstärke ist in Abbildung 3.14 (d) und der erreichte Hub in Abbildung 3.14 (e) dargestellt. Wie erwartet wird ein Hub von 1,8 mm gemessen.

Die Geschwindigkeit des Antriebssystems, welche über das Differenzial des Hubs berechnet wird, kann in Abbildung 3.14 (f) abgelesen werden. Bei Anlegen der Hochspannung wird eine Maximalgeschwindigkeit von 524,2 mm/s erreicht. Die Geschwindigkeit beim Zurückgehen in Ausgangsposition beträgt 147,2 mm/s. Aus dem Vergleich von gemessener Stromstärke und angelegter Spannung kann gefolgert werden, dass die Geschwindigkeit auf der Zeit basiert, in der die COP-DEAs aufgeladen bzw. entladen werden. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeit direkt mit der maximalen Stromstärke, die der Verstärker zur Verfügung stellt, korreliert. Je schneller die Hochspannung anliegt, d.h. je schneller die kapazitive Last geladen bzw. entladen ist, desto schneller kann das Antriebssystem schalten. In diesem Fall ist die Stromstärke durch den Verstärker auf 2 mA begrenzt.

Im zweiten Versuch wird das Antriebssystem an das zu schaltende Schütz adaptiert, was in Abbildung 3.15 (a) und Abbildung 3.15 (b) gezeigt ist. Als Ansteuerspannung wird das gleiche Signal wie im Test ohne externe Last verwendet (Abbildung 3.15 (c)). Auch hier stimmt der Maximalhub von 1,8 mm mit der Voraussage überein (Abbildung 3.15 (e)). Die durch Bildung des Differenzials berechnete Geschwindigkeit (Abbildung 3.15 (f)) zum Schließen beträgt 410,2 mm/s und liegt somit über der geforderten Minimalgeschwindigkeit von 384 mm/s, die am Magnetspulen betriebenen Schütz gemessen wurde. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt jedoch nur 149 mm/s und erreicht damit nur 43% der geforderten Geschwindigkeit. Die kumulierte Energieaufnahme des Antriebssystems über die gesamte Versuchsdauer ist in Abbildung 3.15 (g) gezeigt. Der Antrieb benötigt eine Energiemenge von $E_{close} = 0,06 \text{ J}$ zum Laden der COP-DEAs und danach eine Leistung von $P_{hold} = 0,015 \text{ W}$ um die Kontakte geschlossen zu halten.

Theoretisch sollte keine Leistungsaufnahme bei konstanter Position zu beobachten sein. Die im Experiment beobachtete benötigte Leistung beruht auf Leckageströme im COP-DEA Stapel durch das Dielektrikum bzw. auf Strompfade über die Oberflächen der restlichen Strukturbauteile.

Auf Basis der aufgenommenen Messwerte kann die Energieaufnahme berechnet werden, die benötigt wird, um das Schütz zu schließen und für 60 s geschlossen zu halten. Dieses Szenario wurde ebenfalls für die Magnetspule in Kapitel 3.1.2 berechnet. Die resultierende Energiemenge für das DE angetriebene Schütz beträgt $E_{DE} = 0,96$ J. Im Vergleich zu der Magnetspule ($E_M = 190,2$ J) können 99,5% der Energie gespart werden. Diese Ersparnis kann bis auf 99,9% durch optimale Ansteuerungsstrategien erhöht werden, wenn die Energie, die beim Entladen der DEs frei wird, wieder genutzt werden kann und die Leckageströme minimiert werden.

Die Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen sowie die Berechnungen der benötigten Energien sind in der folgenden Tabelle 3.2 gegenübergestellt.

Tabelle 3.2: Vergleich zwischen COP-DEA betriebenen und Magnetspule betriebenen Schaltschütz

		Magnetspule	COP-DEA	Einheit
Betriebsgeschwindigkeit	Schließen	384	410,2	mm/s
	Öffnen	348,4	149	mm/s
Energieaufnahme , um das Schütz zu schließen und 60 s geschlossen zu halten		190,2	0,96	J

Um die Geschwindigkeit zu erhöhen, muss eine Spannungsquelle mit einem größeren Maximalstrom verwendet werden. Dadurch kann der COP-DEA Stapel, welcher eine kapazitive Last darstellt, schneller geladen werden. Je kürzer die Ladephase, desto schneller kann das Antriebssystem arbeiten.

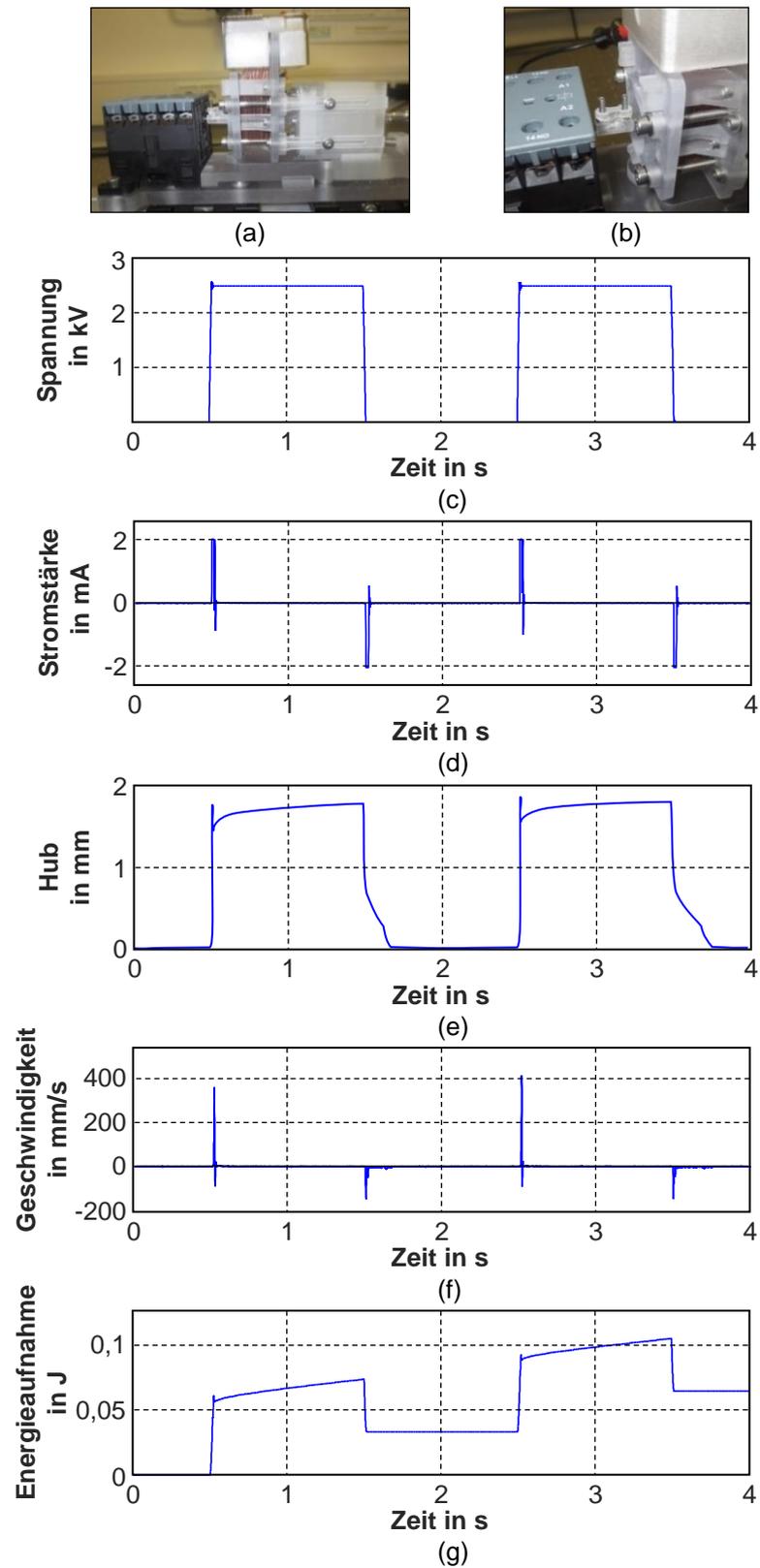


Abbildung 3.15 Vermessung des an das Schütz adaptierten Antriebssystems. (a), (b) Bilder des Systems. (c) Ansteuerspannung. (d) Gemessene Stromstärke. (e) Gemessener Hub. (f) Berechnete Geschwindigkeit. (g) Berechnete Energieaufnahme.

3.7 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde die Vorgehensweise einer Auslegung eines Antriebssystems zum Betrieb eines elektrischen Schaltschützes erläutert. Im Detail wurden der Entwurf, die Herstellung, die Validierung, die Durchkontaktierung im Stapel, Qualitätstests sowie die Charakterisierung des Antriebssystems beschrieben. Außerdem wurde eine systematische Herangehensweise zur grafischen Auslegung von DE-Systemen, die gegen externe Lasten arbeiten, dargestellt.

Verschiedene experimentelle Ergebnisse haben gezeigt, dass das entworfene Antriebssystem bei großen Dehnungen hohe Geschwindigkeiten bei gleichzeitig sehr geringer Energieaufnahme erzeugen kann. Insbesondere erlauben DEs die gleiche Performance wie Magnetspulen, benötigen jedoch nur 0,5% ihrer Energie. Um die erforderliche Geschwindigkeit zu erreichen, ist lediglich ein höherer Entladestrom notwendig.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, kann das entworfene Antriebssystem nicht den gesamten Hub abbilden. Hierzu ist ein weiteres Stapeln der COP-DEAs notwendig. Das in dieser Arbeit aufgebaute System ist jedoch wie in Abbildung 3.15 (a) ersichtlich bereits zu groß für das zu schaltende Schütz. Auch in vielen weiteren Anwendungen werden viellagige Membranaktoren auf engstem Bauraum benötigt. Daraus ergibt sich, wie dargelegt, das Problem der dicken inaktiven Rahmenstruktur. Bisher ist jedoch kein Verfahren bekannt, nachdem ein mehrlagiger, kompakter Membranaktor zuverlässig hergestellt werden kann.

Kapitel 4 DYNAMISCHES ENTWURFSSCHEMA

Das folgende Kapitel beruht auf den Arbeiten von Linnebach et al., die als Konferenzbeiträge [109], [110] präsentiert wurden sowie dem ersten Teil eines veröffentlichten Artikels in einer von Experten begutachteten Fachzeitschrift [111]. Besonderes Augenmerk gilt den Designaspekten von DEAs in dynamischen Anwendungen. DE-basierte Antriebssysteme sind leise [36], präzise [112] sowie für hohe Geschwindigkeiten [102] geeignet.

Obwohl in der Literatur mehrere funktionierende Prototypen von dynamischen DE-basierten Antriebssystemen, insbesondere Pumpen [113]–[115], existieren, wurde bisher der Entwicklung systematischer Entwurfsmethoden, die speziell auf solche Anwendungen ausgerichtet sind, nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Im Allgemeinen wird der Entwurf von DEA-Systemen mithilfe einfacher grafischer Regeln erreicht, die es ermöglichen, den resultierenden Hub und die resultierende Kraft mithilfe von Überlegungen zum Kraftgleichgewicht vorherzusagen [71], [116], [117]. Da diese Methoden im Wesentlichen auf der grafischen Lösung des stationären Kraftgleichgewichts beruhen, eignen sie sich nur für quasistatische Leistungsvorhersagen [107], [118]. Wenn die spezifischen Anwendungen nicht zu vernachlässigende dynamische Kräfte beinhalten, wie z. B. in Pumpen und haptischen Anzeigen [23], können die oben genannten Entwurfsmethoden nicht mehr angewendet werden. Infolgedessen kann die vorhergesagte Leistung erheblich von der gemessenen abweichen, sodass eine wesentliche Anpassung des ursprünglichen Entwurfs erforderlich ist. Um das Design von DEA-angetriebenen, hochfrequenten Systemen effektiv anzugehen, können die am Betätigungsprozess beteiligten dynamischen Kräfte mittels dynamischer Modelle, wie z.B. in [70], [119], [120], explizit berücksichtigt werden. Von solchen Ansätzen wird erwartet, dass sie genaue und zuverlässige Ergebnisse liefern. Sie

erfordern jedoch komplexe Kalibrierungsexperimente und zeitaufwändige Simulationsstudien. Dies fügt dem Entwurfsprozess zwangsläufig eine Komplexitätsebene hinzu, die für eine Reihe praktischer Probleme unnötig sein könnte, bei denen nur eine Schätzung der dynamischen Effekte erster Ordnung ausreicht, um die gewünschte Leistung zu erzielen.

Der Hauptbeitrag dieses Kapitels besteht in der Erweiterung der grafischen DEA-Entwurfsmethode aus [71] und [116], die nur für die quasistatische Betätigung gilt, auf den allgemeineren Fall, in dem auch dynamische Lasten beteiligt sind. Die Erweiterung wird anhand der beiden Aktorbauarten SIP-DEA und COP-DEA ausgeführt. Für beide Arten von Antrieben wird zur Validierung ein System ohne externe Last aufgebaut und experimentell untersucht.

Zu Beginn dieses Kapitels wird im Paragrafen 4.1 die Auslegevorschrift erweitert und um die dynamischen Kräfte ergänzt. Im Anschluss werden ein COP-DEA sowie ein SIP-DEA in Abschnitt 4.2 mechanisch und elektrisch im Hinblick auf dynamische Eigenschaften charakterisiert. Beides generiert grundlegendes Verständnis für die Verwendung von DEAs in dynamischen Anwendungen und deren Auslegung. In den Paragrafen 4.3 und 4.4 werden zwei vereinfachte Systeme, jeweils eines pro Aktorbauart, ohne externe Last entworfen, aufgebaut und experimentell validiert.

4.1 Erweitertes Kräftemodell

Ziel ist das Aufstellen des erweiterten Kräftemodells, das sowohl für COP-DEAs als auch für SIP-DEAs genutzt werden kann. Betrachtet werden somit zwei Antriebssysteme, die jeweils aus einem DEA und einer LBS bestehen. Abbildung 4.1 (a) zeigt ein solches System mit einem COP-DEA im Gleichgewichtspunkt ohne Hochspannung und Abbildung 4.1 (b) eines mit angelegter elektrischer Spannung. Gleichzeitig ist in Abbildung 4.1 (d) ein solches System mit SIP-DEA ohne und in Abbildung 4.1 (e) mit angelegter Hochspannung dargestellt. Im Gleichgewicht muss die Summe aus der DE Kraft, den Vorspannkräften und jeglichen externen Lasten gleich Null sein. Diese Tatsache stellt die Bedingung zur Nutzung der statischen Auslegevorschrift dar. Bei Betrachtung des Antriebssystems als dynamisches System ist dies jedoch nicht mehr der Fall und Trägheitskräfte müssen berücksichtigt werden. So werden diese ergänzt und können durch

$$\sum_i F_i = -F_{DEA}(x, U) + F_{LBS}(x) - F_L(x, p) = F_T \quad (4.1)$$

beschrieben werden, wobei $F_{DEA}(x, U)$ die Kraft des DEA, welche von Hub und angelegter Spannung abhängt, F_{LBS} die Kraft der Zylinderfeder, $F_L(x, p)$ die Kraft einer externen Last, z.B. eine Membrankraft die von einem Druck p abhängt und die Trägheitskraft F_T , welche durch

$$F_T = m\ddot{x} \quad (4.2)$$

mit m als bewegte Masse definiert ist. Wenn viele DEAs mechanisch parallel genutzt werden, muss F_{DEA} in (4.1) mit der Anzahl der gestapelten Elemente multipliziert werden. Alle in (4.1) genannten Kräfte sind im Kräftefreischnitt für COP-DEAs (Abbildung 4.1 (c)) und SIP-DEAs (Abbildung 4.1 (f)) gezeigt.

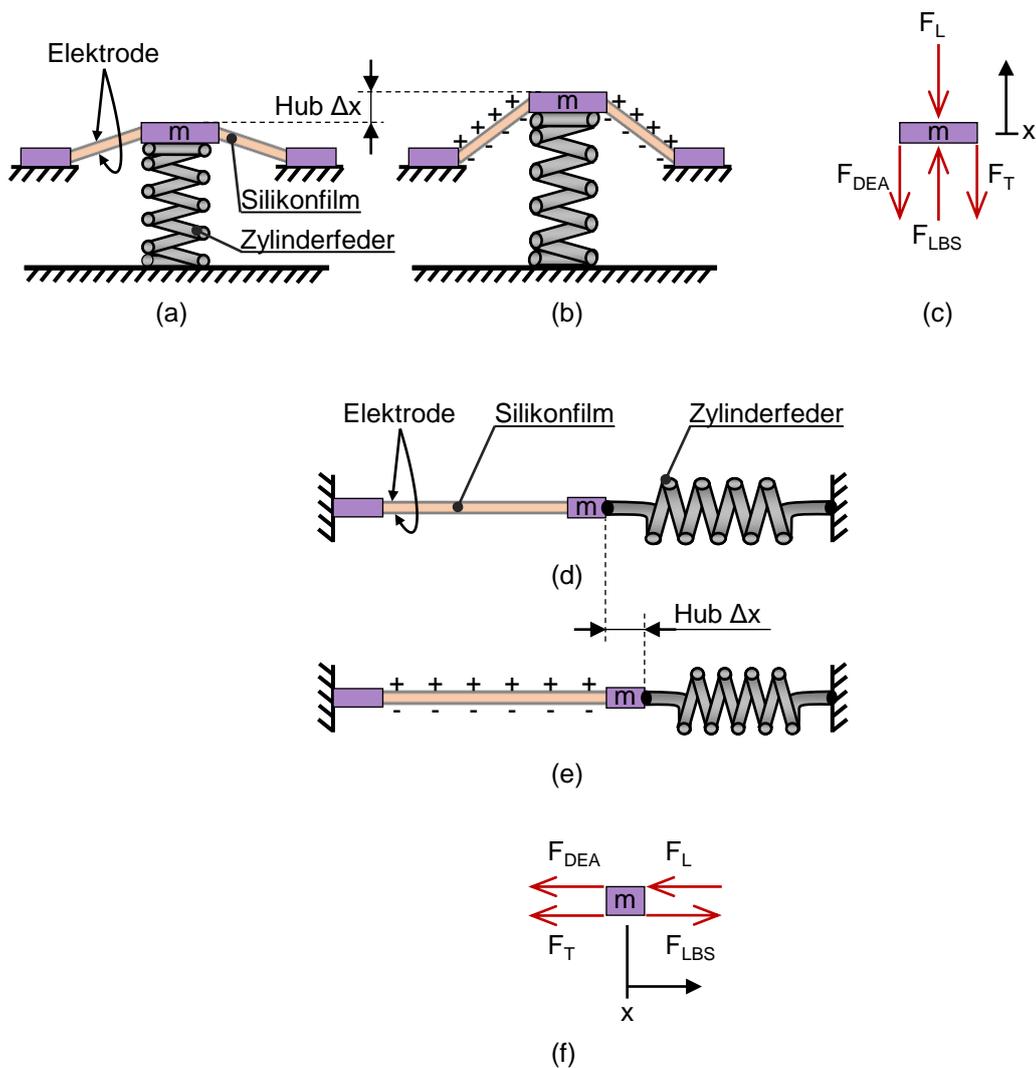


Abbildung 4.1: (a) Schnittansicht eines COP-DEA mit LBS im spannungslosen Zustand und (b) mit angelegter Hochspannung. (c) Kräftefreischnitt eines COP-DEA mit LBS. (d) SIP-DEA mit LBS ohne Spannung und (e) mit Hochspannung in der Schnittansicht. (f) Kräftefreischnitt des Systems, bestehend aus SIP-DEA und LBS.

Wenn ausreichend kleine Verformungen auftreten, kann die Beziehung von angelegter Hochspannung und der Verschiebung durch ein Tiefpass-Übertragungsmodell beschrieben werden [28], [121]. Infolgedessen wird erwartet, dass der DEA, egal ob SIP oder COP, unter sinusförmiger Anregung eine harmonische Schwingung erfährt. Mit \hat{z} wird die Amplitude und mit ω die Kreisfrequenz einer solchen harmonischen Schwingung bezeichnet. Der Hub x , die Geschwindigkeit \dot{x} und die Beschleunigung \ddot{x} können wie folgt als zeitabhängige Sinusfunktion beschrieben werden.

$$x = \hat{z} \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

$$\dot{x} = \omega \hat{z} \cos(\omega t) \quad (4.4)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 \hat{z} \sin(\omega t) \quad (4.5)$$

Das Einfügen von (4.5) in (4.2) resultiert zu

$$F_T = -m\omega^2 \hat{z} \sin(\omega t). \quad (4.6)$$

Das Betrachten von (4.3) und (4.6) führt zu

$$F_T = -m\omega^2 x. \quad (4.7)$$

Zusätzlich kann die Kraft der LBS durch

$$F_{LBS} = k(x_{vor} - x) \quad (4.8)$$

mit der linearen Steifigkeit k und der Vordehnung x_{vor} beschrieben werden. Durch Einsetzen von (4.7) und (4.8) in (4.1) und Umsortieren der einzelnen Terme wird das gesamte dynamische Kräftegleichgewicht sichtbar. Dieses ist definiert mit

$$-F_{DEA}(x, U) + k(x_{vor} - x) + m\omega^2 x = F_L(x, p) \quad (4.9)$$

und bildet die Basis für die Auslegung dynamischer Antriebssysteme. Dabei ist unerheblich ob ein COP-DEA oder ein SIP-DEA verwendet wird.

Zu beachten ist, dass als dynamische Effekte in (4.9) nur die Trägheitskräfte der bewegten Masse betrachtet werden. Aus früheren Untersuchungen, z.B. [119], [120], [122], ist jedoch bekannt, dass das Resonanzverhalten der DEAs auch von der viskoelastischen Materialdämpfung beeinflusst wird. Ist die Dämpfung, wie von einem DEA auf Silikonbasis zu erwarten, ausreichend klein, kann ein Frequenzgangargument herangezogen werden, das besagt, dass die stationäre Ausgangsschwingung praktisch nicht vom Dämpfungskoeffizienten abhängt. Vorausgesetzt die Eingangsfrequenz weicht nur geringfügig von der theoretischen Resonanzfrequenz ab, trifft diese Annahme zu. Darüber hinaus erscheint die dämpfungsfreie Approximation speziell für Hochfrequenzbereiche als

vernünftig, da die Trägheit mit dem Quadrat der Frequenz wächst, während die Dämpfung proportional dazu steigt. Da das Hauptziel dieser Arbeit die Entwicklung einer einfachen grafischen Entwurfsmethode für DEAs ist, werden in erster Näherung alle mit der Dämpfung verbundenen Effekte vernachlässigt.

4.2 Dynamische Eigenschaften Dielektrischer Elastomere

Zur Nutzung der Gleichung (4.9) müssen die dynamischen Eigenschaften der DEAs mechanisch und elektrisch experimentell untersucht werden. Dies geschieht zum einen an einem COP-DEA des Herstellers Parker Hannifin und zum anderen an einem am Lehrstuhl nach dem Verfahren in Kapitel 2.4 hergestellten SIP-DEA.

4.2.1 Bauform COP-DEA

Ein COP-DEA Element der Firma Parker Hannifin besteht aus vier Silikonlagen mit einer jeweiligen Dicke von 51 μm im nicht ausgelenkten Zustand. Sie weisen außerdem einen inneren Durchmesser von 20 mm und einen äußeren Durchmesser von 45 mm auf. Die kohlenstoffbasierte, elektrisch leitfähige Beschichtung wurde via Siebdruckverfahren aufgetragen.

4.2.1.1 Mechanische Dynamikcharakterisierung eines COP-DEA

Um die mechanische Charakterisierung durchzuführen, wird der äußere Rahmen des COP-DEA durch Klemmen fixiert und der innere, bewegliche Teil über eine Kraftmessdose (Futek FSH00103) an einem Linearmotor (Aerotech ANT-25LA) befestigt. In Kombination mit Komponenten von National Instruments wird Labview 2012 für die Steuerung und Messwertaufnahme genutzt.

Als erstes wird die mechanische Frequenzabhängigkeit des DEA untersucht. Hierzu wird der flache, spannungslose COP-DEA mit verschiedenen Frequenzen bis zu 10 mm aus der Ebene heraus ausgelenkt. Die Ergebnisse aus zwei ausgewählten Frequenzen (0,1 Hz und 5 Hz) sind in Abbildung 4.2 (a) gezeigt. Diese lassen eine viskoelastische Hysterese erkennen, welche sich mit höheren Frequenzen vergrößert.

In einem zweiten Schritt wird dieser Versuch bei konstanter Frequenz von 5 Hz mit unterschiedlichem Hub durchgeführt. Bei kleiner werdendem Hub, wird auch die Hysterese kleiner (Abbildung 4.2 (b)).

Zum Abschluss der mechanischen Charakterisierung wird der Zugversuch mit einer festen Frequenz von 1 Hz bei verschiedenen angelegten Hochspannungen durchgeführt. Hierzu wird der Prüfstand um eine Spannungsquelle Hivolt HA51U-3P5-3 erweitert. Die Messungen für eine Spannung von 0 kV, 2 kV und 3 kV sind in Abbildung 4.2 (c) dargestellt. Wie zu erwarten, sinkt die Maximalkraft mit Anlegen einer Spannung.

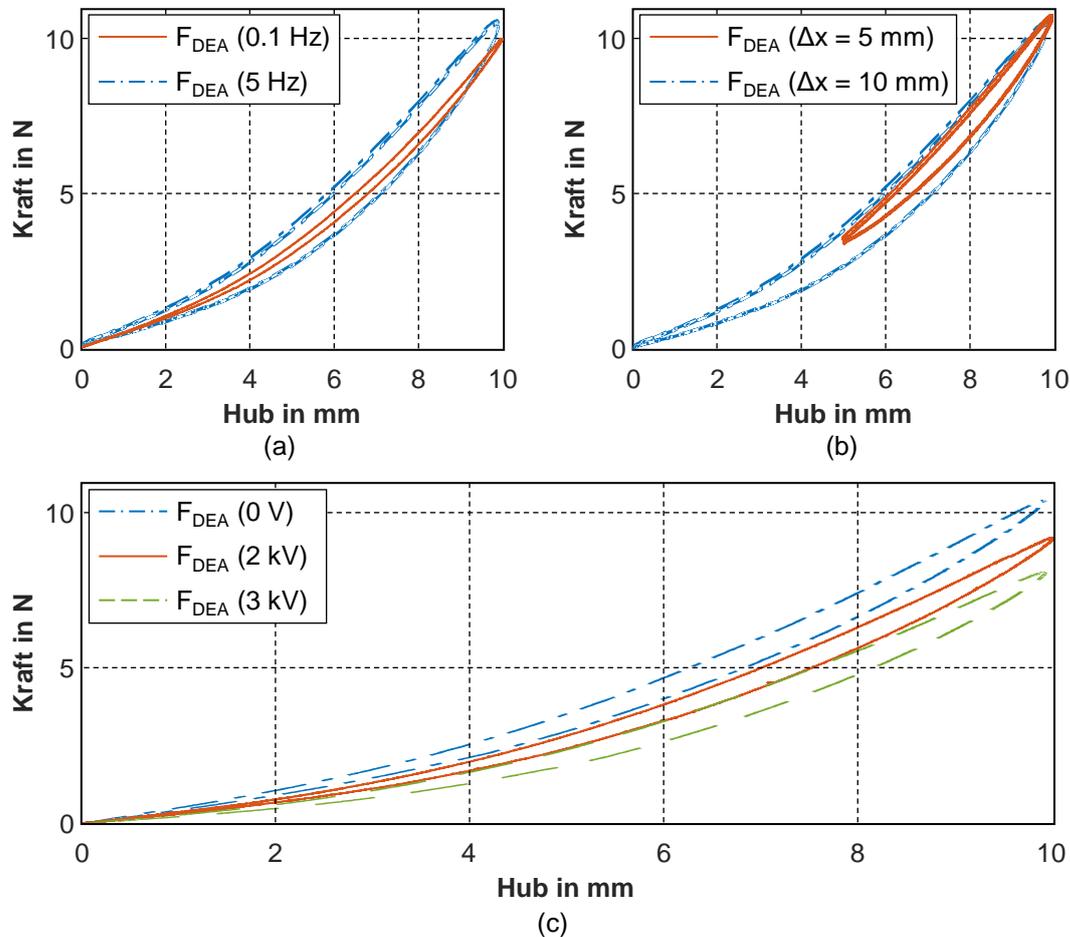


Abbildung 4.2: Mechanische Charakterisierung eines COP-DEA Elementes (a) mit verschiedenen Bewegungsfrequenzen, (b) mit unterschiedlichem Hub und (c) mit verschiedenen angelegten Spannungen.

4.2.1.2 Elektrische Dynamikcharakterisierung eines COP-DEA

Als elektrischer Schaltkreis gesehen, kann der DEA vereinfacht durch einen Widerstand R in Serie mit einer Kapazität C beschrieben werden (serielle RC-Schaltung). Das Ergebnis ist somit ein Tiefpassfilter zwischen angelegter Hochspannung und der Spannung, die sich auf dem DE befindet. Für eine solche RC-Schaltung wird die Grenzfrequenz f_c definiert durch

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4.10)$$

Das hier beschriebene Modell ist nachweislich genau genug für kleine Betriebsfrequenzen zwischen 0,1 Hz und 1 kHz [70]. Allgemein kann das elektrische Verhalten eines DEA realistischer durch ein Übertragungsmodell mit vielen parallelen RC-Schaltungen beschrieben werden [123]. In einem solchen Fall ist die Vorhersage der Grenzfrequenz f_c jedoch nicht mehr trivial und eine experimentelle Bewertung wäre einfacher und effektiver. Der, für die mechanische Charakterisierung verwendete Prüfstand kann auch für diese elektrischen Untersuchungen genutzt werden. Um den kritischen Wert f_c zu erhalten, wird der Test mit maximalem Widerstand und maximaler Kapazität durchgeführt. In [70] wird gezeigt, dass dieser Punkt bei der maximal zulässigen Dehnung erreicht wird. Aus diesem Grund wird der COP-DEA während des Tests auf einer konstanten Auslenkung von 10 mm gehalten, während ein sinusförmiges Spannungs-Chirp-Signal an den DE angelegt wird. Das Spannungssignal hat eine Dauer von 30 s, eine Amplitude zwischen 0 kV und 3 kV und eine über die Zeit linear ansteigende Frequenz von 0 Hz bis 150 Hz. Die ersten drei Sekunden dieses Anregungssignals, die einen Frequenzanstieg bis auf 15 Hz zeigen, sind in Abbildung 4.3 (a) dargestellt. Die zeitlich linearen Eigenschaften dieses Signals sind in einem Spektrogramm in Abbildung 4.3 (b) zu sehen, das die zeitabhängige spektrale Dichte des Spannungssignals visualisiert.

Die mögliche elektrische Bandbreite des DEA wird auf Basis der Blockierkraftmessung abgeschätzt. Diese bewegt sich zwischen maximaler Kraft bei 0 V und der minimalen Kraft bei 3 kV und kann über die, oben beschriebene, Kraftmessdose gemessen werden. Da somit die Blockierkraft direkt mit den Ladungen auf den Elektrodenflächen zusammenhängt, kann anhand dieses Wertes untersucht werden, ob die Grenzfrequenz überschritten wird. Konventionell wird bei einem Tiefpassfilter angenommen, dass diese Frequenz erreicht ist, wenn die Blockierkraft um 3 dB abnimmt. Die gemessene Kraft über die ersten Sekunden bzw. Frequenzen sind in Abbildung 4.3 (c) dargestellt. Zur besseren Analyse wird die normierte Blockierkraft $\Delta F/\Delta F_{max}$ als Funktion der Frequenz in Abbildung 4.3 (d) aufgetragen. Da dieses Diagramm keine signifikante Abnahme der Amplitude zeigt, kann geschlussfolgert werden, dass die Grenzfrequenz des verwendeten COP-DEA größer ist als die maximal genutzte Testfrequenz von 150 Hz. Bis zu dieser Ansteuerfrequenz kann das Antriebssystem somit zuverlässig arbeiten.

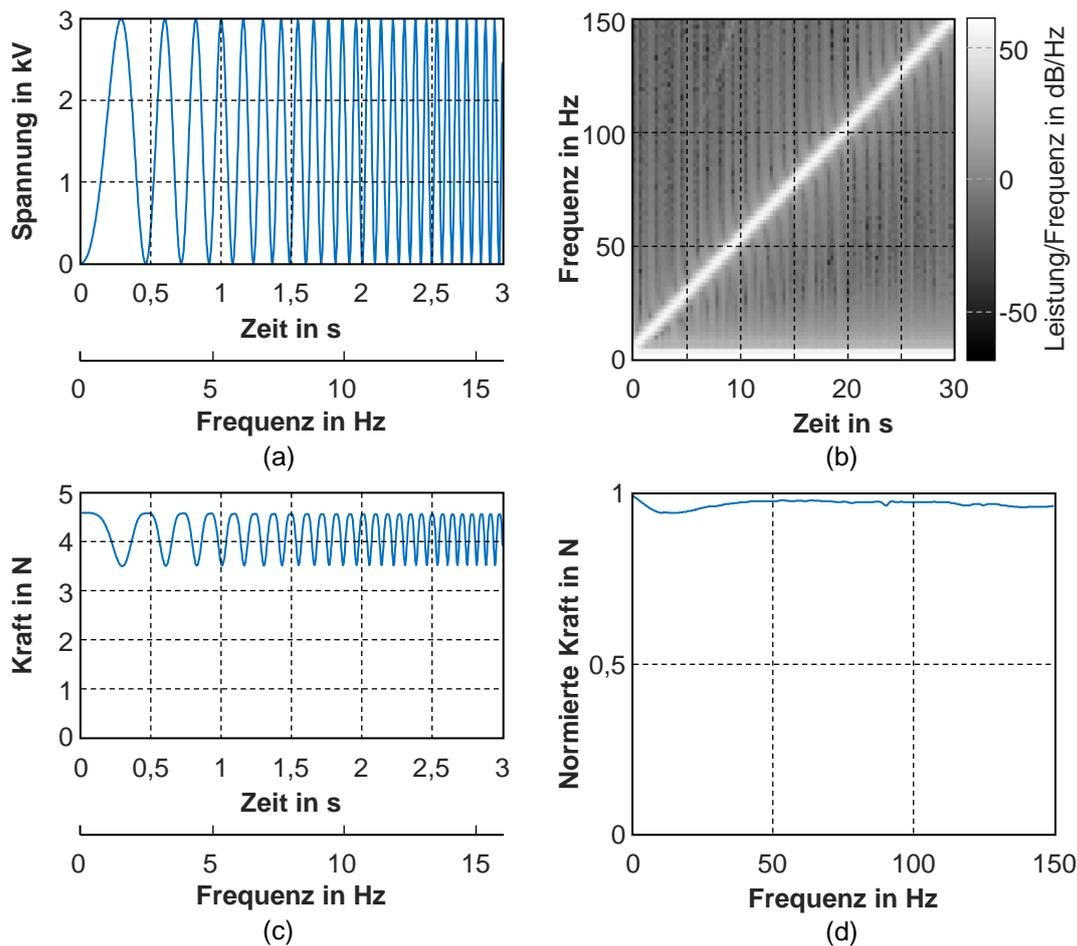


Abbildung 4.3: Elektrische Charakterisierung. (a) Die ersten drei Sekunden des Spannungseingangssignals der dynamischen Messungen, (b) das dazugehörige Spektrogramm über die gesamte Versuchsdauer, (c) die Kraftmessungen der ersten drei Sekunden und (d) die frequenzabhängige normierte Kraft über die gesamte Versuchsdauer von 30 s bzw. bis 150 Hz.

4.2.2 Bauform SIP-DEA

Hier kommt ein, durch das in Kapitel 2.4 beschriebene Verfahren hergestellter, SIP-DEA mit einer Länge von 28 mm und einer Breite von 35 mm zum Einsatz. Auch dieser wird mechanisch sowie elektrisch charakterisiert.

4.2.2.1 Mechanische Dynamikcharakterisierung eines SIP-DEA

Zur mechanischen Charakterisierung wird der SIP-DEA mit verschiedenen Frequenzen bis zu einer maximalen Dehnung von 60% gezogen. Hierzu wird der DEA auf einer Seite mit dem Linearmotor Aerotech ACT165 verbunden und auf der anderen Seite über eine Kraftmessdose (Futek FSH00103) fixiert. Auch hier werden Komponenten des Herstellers National Instruments und Labview 2014 zur Steuerung und Messwertaufnahme genutzt.

Während der kontinuierlichen Kraftmessung wird der DEA positionsgesteuert gedehnt. Die Hochspannung wird durch die Spannungsquelle Trek Model 5/80 erzeugt. Die Ergebnisse für 0 kV und 3 kV sind in Abbildung 4.4 (a) dargestellt. Die Messungen starten aufgrund der Limitierungen des Prüfstandes immer mit einer Vordehnung von 10%.

Dieser Test wurde ohne angelegte Spannungen auch mit verschiedenen Frequenzen (0,01 Hz; 0,1 Hz; 1 Hz; 10 Hz) durchgeführt. Da die Hysterese bei SIP-DEAs sehr viel geringer ausfällt als bei COP-DEAs, sind die Unterschiede nur sehr schwer zu erkennen. Aus diesem Grund wurde in der Mitte der Bewegung, bei 35% Dehnung, die Hysteresenbreite $\Delta F_{35\%}$, wie in Abbildung 4.4 (a) gezeigt, ermittelt und als Funktion der Frequenz in Abbildung 4.4 (b) visualisiert. In dieser Darstellung kann der umgekehrt exponentielle Zusammenhang der Hysteresenbreite zur mechanischen Frequenz gut erkannt werden, da die Achse der Frequenz logarithmisch verläuft.

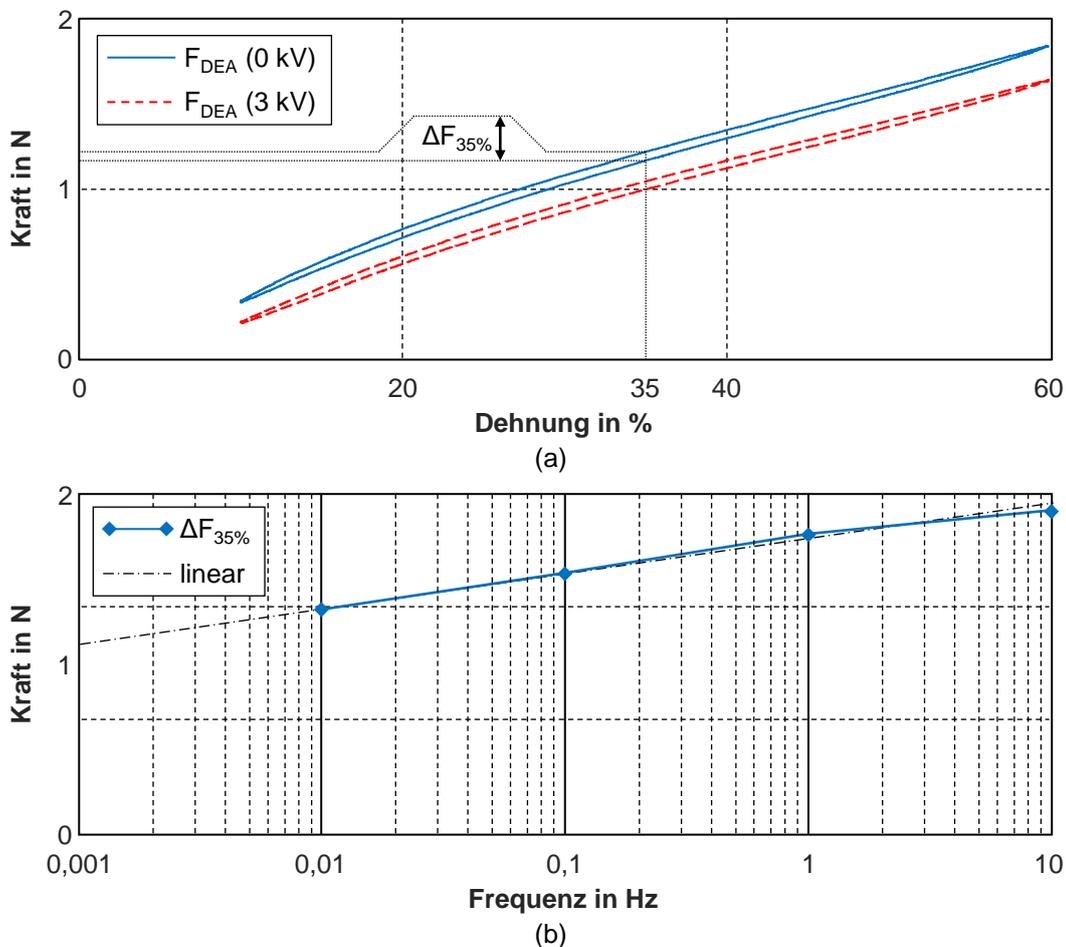


Abbildung 4.4: Mechanische Charakterisierung eines SIP-DEA Elementes (a) mit zwei verschiedenen Spannungen und (b) die Hysteresenbreite als Funktion der Bewegungsfrequenz.

4.2.2.2 Elektrische Dynamikcharakterisierung eines SIP-DEA

Wie auch bei der Charakterisierung des COP-DEAs wird hier bis zu einer Frequenz von 150 Hz getestet, ob die Grenzfrequenz erreicht wird. Hierzu wird der SIP-DEA maximal ausgelenkt, d.h. in diesem Fall auf eine konstante Dehnung von 60% gebracht. Anschließend wird das Spannungssignal mit einer Amplitude von 3 kV sinusförmig von 1 Hz bis 150 Hz mit einem Inkrement von einem Hertz erhöht. Jede Frequenz wird vier Perioden lang aufgebracht (Abbildung 4.5 (a)). Die dazugehörige Kraftmessung ist in Abbildung 4.5 (b) und die normierte Blockierkraft als Funktion der Kreisfrequenz in Abbildung 4.5 (c) gezeigt.

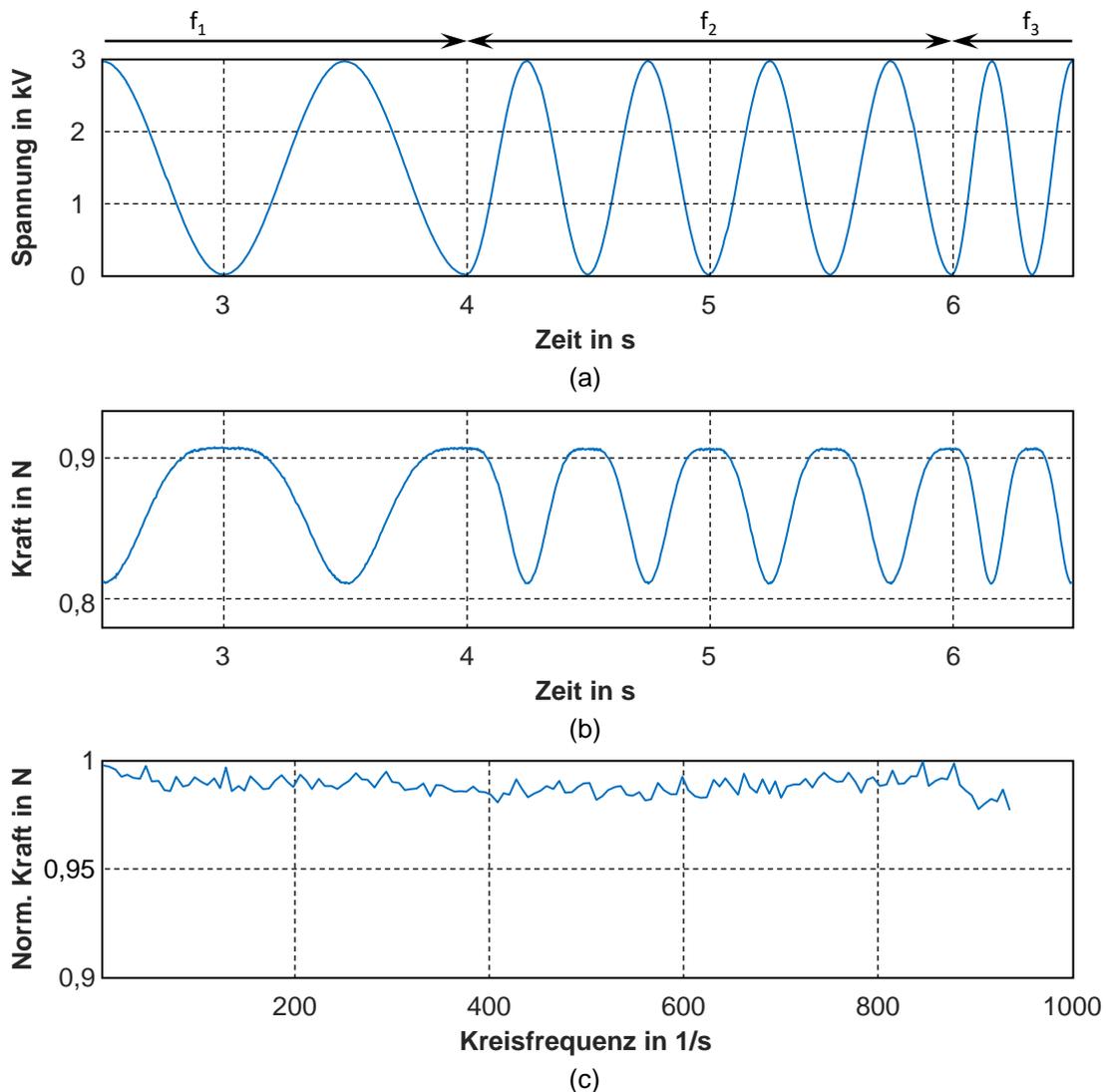


Abbildung 4.5: Elektrische Charakterisierung. (a) Zeitausschnitt aus dem Spannungseingangssignal der dynamischen Messungen, (b) die dazugehörige Kraftmessung und (d) die frequenzabhängige normierte Kraft über die gesamte Versuchsdauer bis zu einer Kreisfrequenz von 1.000 1/s.

Wie schon beim COP-DEA ist auch hier kein signifikanter Abfall der normierten Blockierkraft zu erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass auch ein System mit einem SIP-DEA als Antrieb mit einer Ansteuerfrequenz bis 150 Hz, bzw. 942 1/s, zuverlässig arbeitet.

4.3 Dynamischer Antriebssystementwurf

Im ersten Schritt der Validierung der Auslegevorschrift werden Antriebssysteme ohne externe Last auf Basis jeder Aktorform, dem COP-DEA und SIP-DEA, ausgelegt, aufgebaut und experimentell vermessen. Das daraus folgende Kräftegleichgewicht für den vereinfachten Demonstrator, unter der Annahme, dass $F_L(x, p) = 0$, lautet

$$F_{DEA}(x, U) = k(x_{vor} - x) + m\omega^2 x. \quad (4.11)$$

Diese Gleichung bildet die Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Auslegungen des Antriebssystems. Begonnen wird mit dem Entwurf des Systems mit dem COP-DEA.

4.3.1 Bauform COP-DEA

Alle in (4.11) genannten Kräfte sind in Abbildung 4.6 gezeigt. Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Kraft $F_{DEA}(x, LV)$ des DEAs bei 0 V (blaue Strichpunktlinie in Abbildung 4.6) und $F_{DEA}(x, HV)$ mit angelegten 2 kV (rote Strichpunktlinie in Abbildung 4.6). Hierbei wird in Abbildung 4.6 ein Stapel aus zwei COP-DEA Elementen betrachtet, von denen jedes vier Silikonlagen hat, einen inneren Durchmesser von $d = 20$ mm und einen äußeren Durchmesser von $D = 45$ mm. Für die verwendeten COP-DEAs beträgt die zulässige Maximalspannung für einen sicheren Betrieb, bis zu einer Auslenkung von 10 mm, 3 kV. Der Ausdruck $F_{LBS} - F_T$ auf der rechten Seite der Gleichung (4.11) steht für die äquivalente Kraft gegen den COP-DEA (schwarze durchgezogene Linie in Abbildung 4.6). Zu beachten ist, dass diese Kraft eine statische Kraft F_{LBS} (schwarze gepunktete Linie in Abbildung 4.6) und eine dynamische Kraft F_T (magentafarbene Strichlinie in Abbildung 4.6) beinhaltet. Die Schnittpunkte zwischen dieser Kurve und der Kurve des DEA bei LV und HV (rote Kreise in Abbildung 4.6) zeigen den vorausgesagten Hub des Antriebssystems. Um diesen zu maximieren, muss die durchgehende Linie so gut wie möglich zwischen die zwei gepunkteten Linien passen. Aufgrund der Hysterese der DEA-Kurven können mehrere potenzielle Schnittpunkte (Gleichgewichtspunkte) möglich werden. Da der tatsächliche Gleichgewichtszustand von der vorherigen Belastungshistorie abhängt, ist eine Voraussage des exakten Aktorhubs aus einem einfachen grafischen Entwurf nicht möglich. Um dieses

Problem zu lösen, wird die Leistungsabschätzung auf den Abstand zwischen den beiden innersten Schnittpunkten der DEA-Kurve gestützt. Dadurch kann eine Untergrenze für die tatsächliche Performance abgeleitet werden.

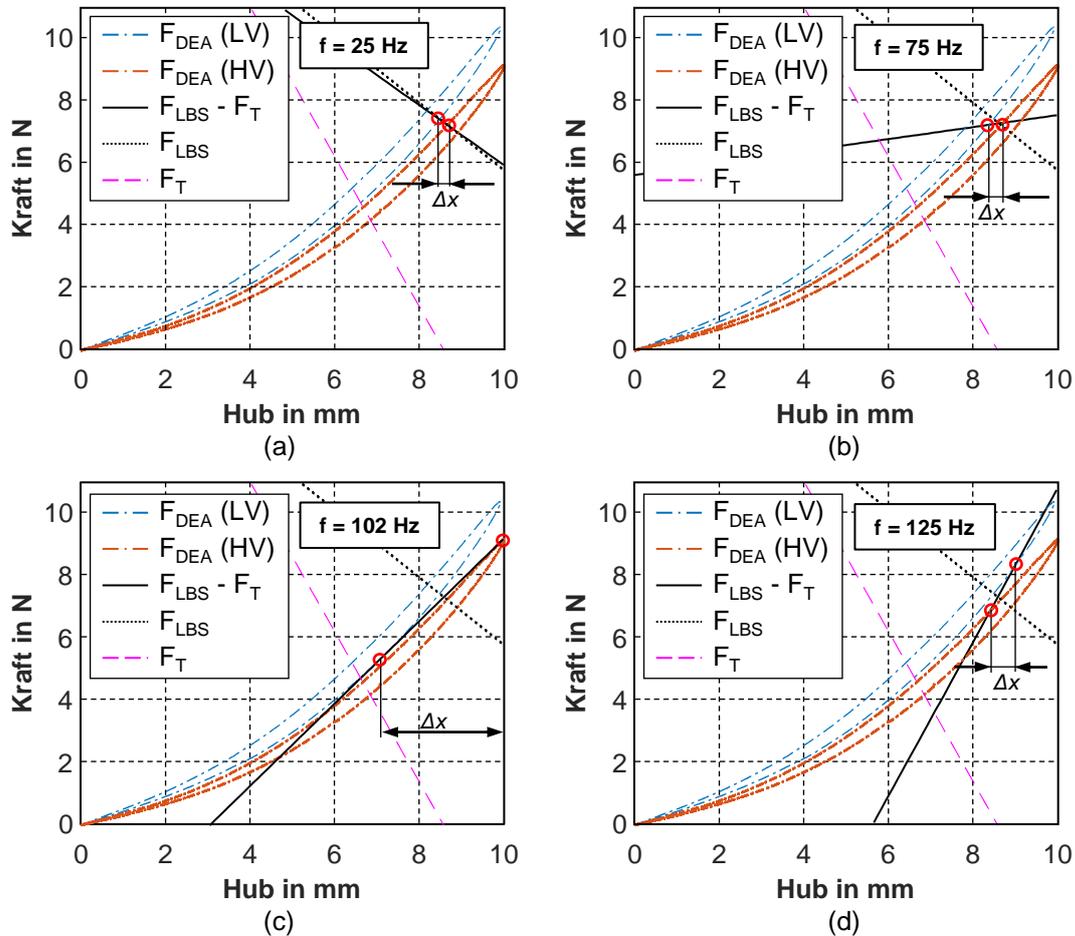


Abbildung 4.6: Dynamischer grafischer Entwurf eines vereinfachten Demonstrators mit COP-DEA mit den Kräften des DEA ohne Hochspannung $F_{DEA(LV)}$ und mit angelegter Spannung $F_{DEA(HV)}$, die Kraft der linearen Zylinderfeder F_{LBS} , die Trägheitskräfte F_T und die Summe aus diesen $F_{LBS} - F_T$ bei Betriebsfrequenzen von (a) 25 Hz, (b) 75 Hz, (c) 102 Hz und (d) 125 Hz.

Abbildung 4.6 zeigt verschiedene Entwürfe mit unterschiedlichen Anregungsfrequenzen. Abbildung 4.6 (a) zeigt das Antriebssystem mit einer Betriebsfrequenz von $f = 25 \text{ Hz}$, Abbildung 4.6 (b) mit $f = 75 \text{ Hz}$, Abbildung 4.6 (c) mit $f = 102 \text{ Hz}$ und Abbildung 4.6 (d) mit $f = 125 \text{ Hz}$. Dabei resultieren 102 Hz in einen höchstmöglichen Hub. Für die Notation wird dieser Wert, die Resonanzfrequenz, als $f_r = 102 \text{ Hz}$ festgelegt. Der Hub wurde durch Optimieren der freien Systemparameter maximiert. Diese grafische Auslegung führt zu einer Vorhersage des Aktorhubs von $\Delta x = 2,6 \text{ mm}$ bei einer Anregungsfrequenz von f_r . Diese

Prognose basiert auf einer Feder mit der Steifigkeit $k = 1,091 \text{ N/mm}$ mit einer Vordehnung $x_{vor} = 15,35 \text{ mm}$ und einer bewegten Masse von $m = 5,78 \text{ g}$.

Der Entwurf beruht auf den COP-DEA Messungen bei 1 Hz mit einer maximalen Auslenkung von 10 mm . Wie in Kapitel 4.2 gezeigt, wird die Hysterese bei steigender Frequenz größer und bei kürzerem Hub etwas kleiner. In dem hier gezeigten Entwurf wird davon ausgegangen, dass sich diese Effekte ungefähr gegeneinander aufheben.

4.3.2 Bauform SIP-DEA

Auch der Entwurf des vereinfachten Antriebssystems mit einem SIP-DEA basiert auf der Gleichung (4.11). Dabei gelten die gleichen Designregeln wie bei der Auslegung des COP-DEA betriebenen Systems. Die Kurve der Kraft $F_{LBS} - F_T$ muss, um einen höchstmöglichen Hub zu erreichen, so gut wie möglich zwischen die Kurven von $F_{DEA}(LV)$ und $F_{DES}(HV)$ passen. Die maximale Hochspannung beträgt in diesem Fall 3 kV und zur Kraftskalierung werden zwei SIP-DEAs gestapelt. Das Ergebnis dieser Optimierung ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

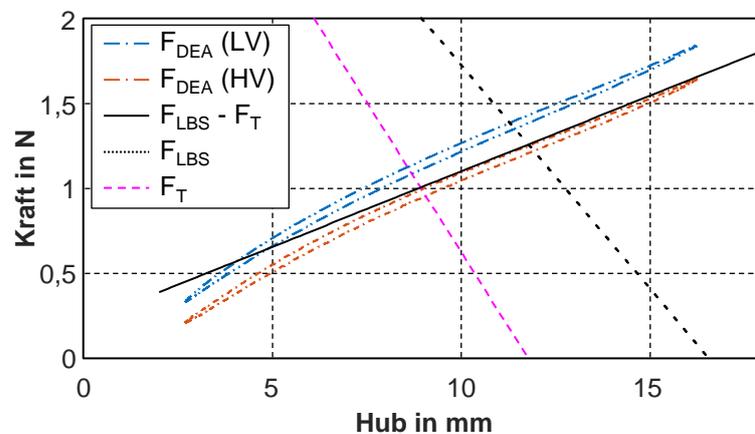


Abbildung 4.7: Dynamischer grafischer Entwurf eines vereinfachten Demonstrators mit SIP-DEA mit den Kräften des DEA ohne Hochspannung $F_{DEA}(LV)$ und mit angelegter Spannung $F_{DEA}(HV)$, die Kraft der linearen Zylinderfeder F_{LBS} , die Trägheitskräfte F_T und die Summe aus diesen $F_{LBS} - F_T$ bei einer Frequenzen von $46,3 \text{ Hz}$.

Den maximalen Hub wird dieses System laut dieser Auslegung bei $f_r = 46,3 \text{ Hz}$ erreichen. Als LBS wird eine Zylinderfeder mit einer Steifigkeit von $k = 0,263 \text{ N/mm}$ mit einer Vordehnung von $x_{vor} = 16,55 \text{ mm}$ eingesetzt. Bei einer bewegten Masse $m = 4,16 \text{ g}$ wird ein Hub von über $11,5 \text{ mm}$ prognostiziert. Dieser kann nicht genauer vorhergesagt werden, da der Aktor die DEAs in der Resonanz mehr als 60% dehnen wird, aber nur bis zu dieser Dehnung Messwerte vorliegen.

4.4 Validierung

Nach der Antriebsauslegung der, in Abbildung 4.1 (a) und Abbildung 4.1 (d) gezeigten, Systeme ohne externe Last, werden diese nacheinander aufgebaut und experimentell validiert.

4.4.1 Bauform COP-DEA

Dieses gezeigte Antriebssystem besteht aus COP-DEA, LBS und bewegter Masse. Nach Durchführung des Entwurfs gemäß den Ergebnissen in Abschnitt 4.3.1 wird das System zusammengebaut und anschließend charakterisiert. Für den Charakterisierungstest wird ein Spannungs-Chirp-Signal mit einer Amplitude von 2 kV und einer Frequenz im Bereich von 1 Hz bis 150 Hz verwendet. Der Prüfstand der elektrischen Dynamikcharakterisierung des COP-DEAs (Abschnitt 4.2.1.2) wird um einen Lasersensor Keyence LK-G157 erweitert, um Hubmessungen durchzuführen.

Abbildung 4.8 (a) zeigt die resultierende Antwort als Funktion der Frequenz. Im angelegten Frequenzbereich können zwei Spitzen beobachtet werden. Die erste kleinere wird durch die quadratische Abhängigkeit von F_{DEA} zur angelegten Spannung verursacht und tritt genau bei der Hälfte der Resonanzfrequenz auf und die zweite, größere Spitze tritt genau bei der Resonanzfrequenz auf [122]. Diese Ergebnisse ermöglichen die Bestimmung des Systemhubs in Abhängigkeit von der Eingangsfrequenz (Abbildung 4.8 (b)).

Ein Vergleich zwischen vorhergesagten und gemessenen Werten der Resonanzfrequenz f_r und des Hubs Δx ist in Tabelle 4.1 gezeigt. Die Abweichung zwischen Vorhersage und Messung der Resonanzfrequenz beträgt 0,1 Hz, was zu einem relativen Fehler von 0,10% führt. Die Hubvorhersage weicht um 0,04 mm von den Messungen ab, was einem Fehler von 1,56% entspricht.

Tabelle 4.1: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Werten des vereinfachten Antriebssystems ohne externe Last mit COP-DEA

Benennung	Formelzeichen	Prognose	Messung	Absoluter Fehler	Relativer Fehler
Resonanzfrequenz	f_r	102 Hz	102,1 Hz	0,1 Hz	0,10%
Systemgesamthub	Δx	2,6 mm	2,56 mm	0,04 mm	1,56%

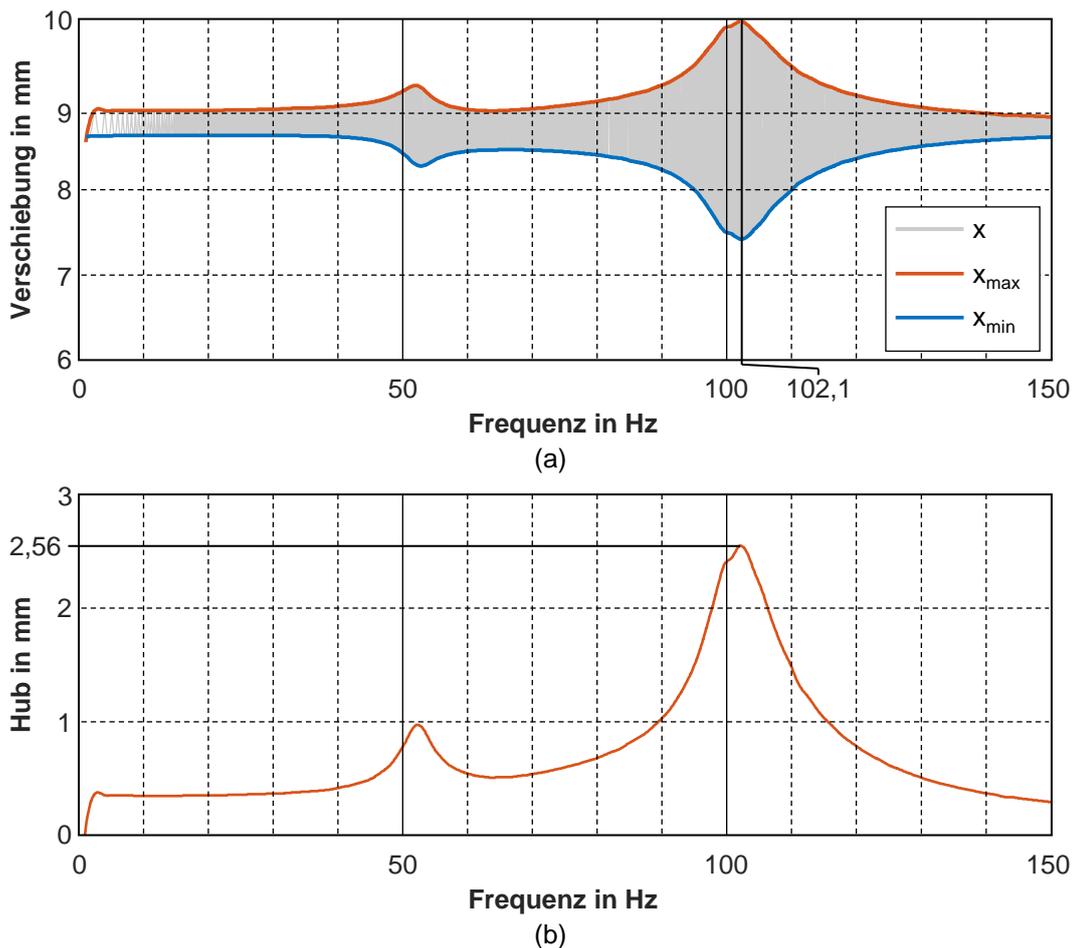


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Validierung des vereinfachten Antriebssystems mit COP-DEA ohne externe Last. (a) Messungen der frequenzabhängigen Verschiebung und (b) der daraus berechnete frequenzabhängige Gesamthub des Systems.

4.4.2 Bauform SIP-DEA

Auch das ausgelegte Antriebssystem, bestehend aus SIP-DEA, LBS und bewegter Masse, wird aufgebaut und in dem aus der elektrischen Charakterisierung bekannten Prüfstand vermessen. Hierzu wird dieser um einen Lasersensor Keyence LK-G87 erweitert. Als Eingangssignal wird ein Spannungs-Chirp-Signal mit einer Amplitude von 3 kV mit einer Startfrequenz von 30 Hz und einer Endfrequenz von 50 Hz angelegt. Die Ergebnisse des Messsignals sind in Abbildung 4.9 (a) dargestellt. Durch Bildung der Differenz der, in dieser Abbildung markierten, Maximal- und Minimalwerte kann der Systemgesamthub berechnet werden (Abbildung 4.9 (b)).

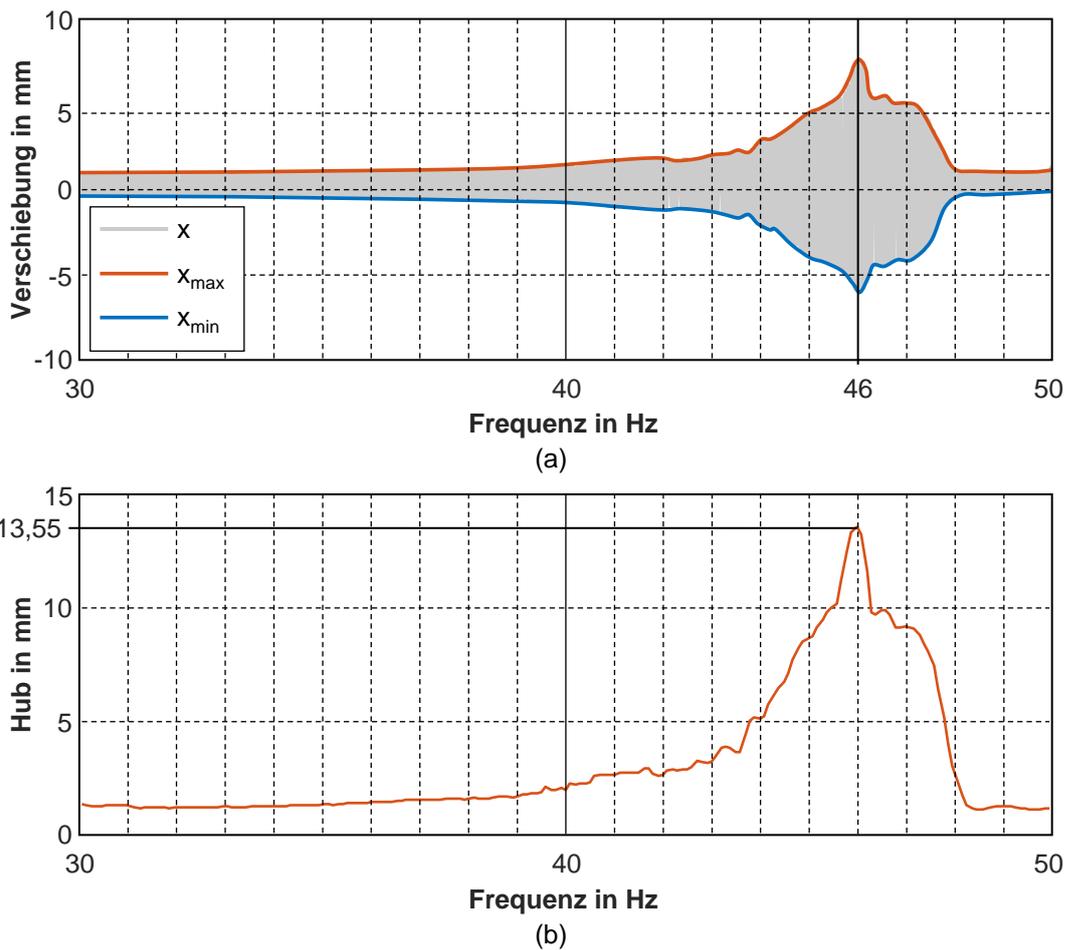


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Validierung des vereinfachten Antriebssystems mit SIP-DEA ohne externe Last. (a) Messungen der frequenzabhängigen Verschiebung und (b) der daraus berechnete frequenzabhängige Gesamthub des Systems.

Die prognostizierten und tatsächlich gemessenen Werte sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Die absolute Abweichung von vorhergesagter und experimentell bestimmter Resonanzfrequenz liegt bei 0,1 Hz, was einem Fehler von 0,65% entspricht. Beim Systemgesamthub kann jedoch nur festgehalten werden, dass die Voraussage stimmt. Eine quantitative Aussage ist hierbei nicht möglich.

Tabelle 4.2: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Werten des vereinfachten Antriebssystems ohne externe Last mit SIP-DEA

Benennung	Formelzeichen	Prognose	Messung	Absoluter Fehler	Relativer Fehler
Resonanzfrequenz	f_r	46,3 Hz	46 Hz	0,1 Hz	0,65%
Systemgesamthub	Δx	> 11,5 mm	13,55 mm	--	--

4.5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde eine neuartige grafische Methode zum Entwurf von DEA Antriebssystemen in dynamischen Anwendungen entwickelt und vorgestellt. Ausgehend von der standardmäßigen Entwurfsmethode, die nur für quasistatische Betätigung gilt, wurden die Auswirkungen der Trägheitskräfte im Kontext einer eindimensionalen Entwurfsgleichung quantifiziert und formuliert. Basierend auf dem entwickelten Modell und unter Verwendung experimenteller Kraft-Weg-Daten der jeweiligen Aktorbauform wurde das Konstruktionsschema, jeweils anhand eines vereinfachten Systems, validiert. Dabei wurden bemerkenswert geringe Abweichungen zwischen vorhergesagten und gemessenen Werten der Resonanzfrequenz und des Hubs beobachtet. Die Fehler zwischen Prognose und Messung erscheinen somit als signifikant klein, was die Wirksamkeit des Entwurfsansatzes bestätigt. Er hilft folglich bei der Entwicklung von Antriebssystemen mit DEAs und linearen Vorspannfedern für Hochfrequenz- und Hubanwendungen wie z.B. haptisches Feedback, Vibrationsförderer und schnell schaltende Ventile. Ein sehr großer Anwendungsbereich für dynamische Antriebe stellen auch pneumatische Pumpen dar. Daher wird im nächsten Kapitel mit Hilfe des zuvor entwickelten grafischen Modellierungsansatzes für dynamische Anwendungen zwei Kompressoren entworfen und validiert. Einer davon basiert auf COP-DEAs, der andere wird als anwendungsspezifische Lösung auf Basis von SIP-DEAs entwickelt.

Kapitel 5 PUMPEN UND KOMPRESSOREN

Das im vorangegangenen Kapitel 4 aufgestellte Entwurfsschema wird in diesem Abschnitt auf zwei unterschiedliche Pumpentypen, respektive Antriebsbauformen, angewendet. Der Inhalt beruht zum Teil auf den veröffentlichten Arbeiten von Linnebach et al. in einem Konferenzbeitrag [124] und dem zweiten Teil eines Artikels in einer, von Experten begutachteten, Fachzeitschrift [111].

Ein bestimmter dynamischer Anwendungsbereich der DEAs sind pneumatische Pumpen bzw. Kompressoren. Gerade die kleine Anzahl an bewegten Teilen in einem DE-Antriebssystem verspricht eine hohe Zuverlässigkeit und einen leisen Betrieb. Somit eignen sich DE-Pumpen sehr gut für Anwendungen im Bereich von Massagegeräten, Aufstehhilfen, Blutdruckmessgeräten und soften Robotern [20], [115]. In all diesen Systemen wird ein proportional geregelter Volumenstrom benötigt. Bei konventionellen Pumpen wird dieser normalerweise durch eine Drehzahländerung eingestellt. Diese Änderung verursacht jedoch auch eine Änderung der Frequenz der emittierten Geräusche. Des Weiteren ist der kleinste mögliche Volumenstrom abhängig von der kleinsten möglichen Drehzahl. Wird der Antrieb durch einen DEA ersetzt, kann der Volumenstrom bei konstanter Frequenz einfach über die Amplitude des Spannungssignals eingestellt werden. Daraus ergeben sich zwei große Vorteile. Auf der einen Seite erlaubt eine feste Frequenz eine Minimierung der akustischen Emissionen. Dies ist, gerade für Endverbraucheranwendungen, bei denen die Pumpe sehr nah am Körper ist, sehr wichtig. Zum anderen ermöglichen DEA betriebene Pumpen eine sehr präzise Regelung des Volumenstroms, auch in Richtung Null. Da DEA-Pumpen hauptsächlich nur über die Eingangsamplitude geregelt werden und nicht über die Frequenz, erzeugen sie, unabhängig vom Zielwert, immer einen sehr gering pulsierenden Volumenstrom, was sich positiv auf die Genauigkeit auswirkt und den Betriebsbereich

vergrößert. Wird eine konventionelle Pumpe mit niedriger Durchflussrate betrieben, wird diese in der Regel durch viele Pulsationen beeinflusst.

Zu Beginn wird in Kapitel 5.1 eine Membranpumpe für fluidische Anwendungen als Fallstudie zur Validierung der Entwurfsmethode in einer Anwendung betrachtet. Im herkömmlichen System wird diese Membranpumpe im Frequenzbereich zwischen 40 und 100 Hz mit einem festen Hub von 4,43 mm eingesetzt. Zur Auslegung wird die zuvor validierte Konstruktionsstrategie für COP-DEAs herangezogen und ein pneumatischer Pumpenprototyp entworfen. Diese neu entwickelte Pumpe wird aufgebaut und bezüglich klassischer Leistungsparameter von Kompressoren charakterisiert.

Wie eingangs in der Arbeit schon erwähnt, eröffnen DEAs neben dem disruptiven Einsatz auch die Möglichkeit, Antriebssysteme mit einem gewissen Formfaktor zu entwerfen, die mit konventionellen Technologien nicht erdenklich gewesen wären [16], [125], [126]. Davon ausgehend wird in Abschnitt 5.2 eine Anwendung in einem pneumatischen Sitzmassagesystem betrachtet. Dabei wird zu Beginn die konventionelle Pumpe bezüglich Druck und Volumenstrom charakterisiert. Diese Werte bilden die Grundlage für die darauffolgende Auslegung auf Basis der in Kapitel 4 entworfenen Vorgehensweise, welche hier auf SIP-DEAs angewendet wird. Hierzu wird ein Membranstapel entworfen, hergestellt und bezüglich dynamischer Kennwerte charakterisiert. Die Systemauslegung wird messwertbezogen durchgeführt und anschließend die Pumpe aufgebaut und validiert. Die Leistungsdaten werden schließlich den Werten der konventionellen Pumpe gegenübergestellt.

5.1 Pneumatischer Pumpendemonstrator

In diesem Abschnitt wird die oben dargestellte Entwurfsmethode auf das gesamte Pumpensystem ausgedehnt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird die druckabhängige Kraft $F_L(x, p)$ experimentell ermittelt. Anschließend kann die endgültige dynamische Auslegung der Pneumatikpumpe durchgeführt und validiert werden.

5.1.1 Funktionsweise

Die untersuchte pneumatische Pumpe besteht im Wesentlichen aus dem DEA-basierten Antriebssystem und dem Pumpenmechanismus der kommerziell verfügbaren Pumpe. Der Antrieb setzt sich, wie beschrieben, aus einem COP-DEA und einer LBS zusammen. Der

Pumpenmechanismus ist aus einer Pumpmembran und zwei Rückschlagventilen zur Steuerung des Luftstroms aufgebaut. Im unteren Punkt, der einem nicht betätigten DEA entspricht, wird Umgebungsluft durch das linke Rückschlagventil in die Pumpenkammer gesaugt (Abbildung 5.1 (a)). Bei Anlegen der Hochspannung an den COP-DEA in Abbildung 5.1 (b) drückt das Antriebssystem die Pumpmembran nach oben. Dadurch wird die zuvor eingezogene Luft durch das rechte Rückschlagventil aus der Pumpenkammer herausgedrückt. Durch Oszillieren dieser Ansteuerspannung wird am Ausgang ein kontinuierlicher Volumenstrom Q erzeugt.

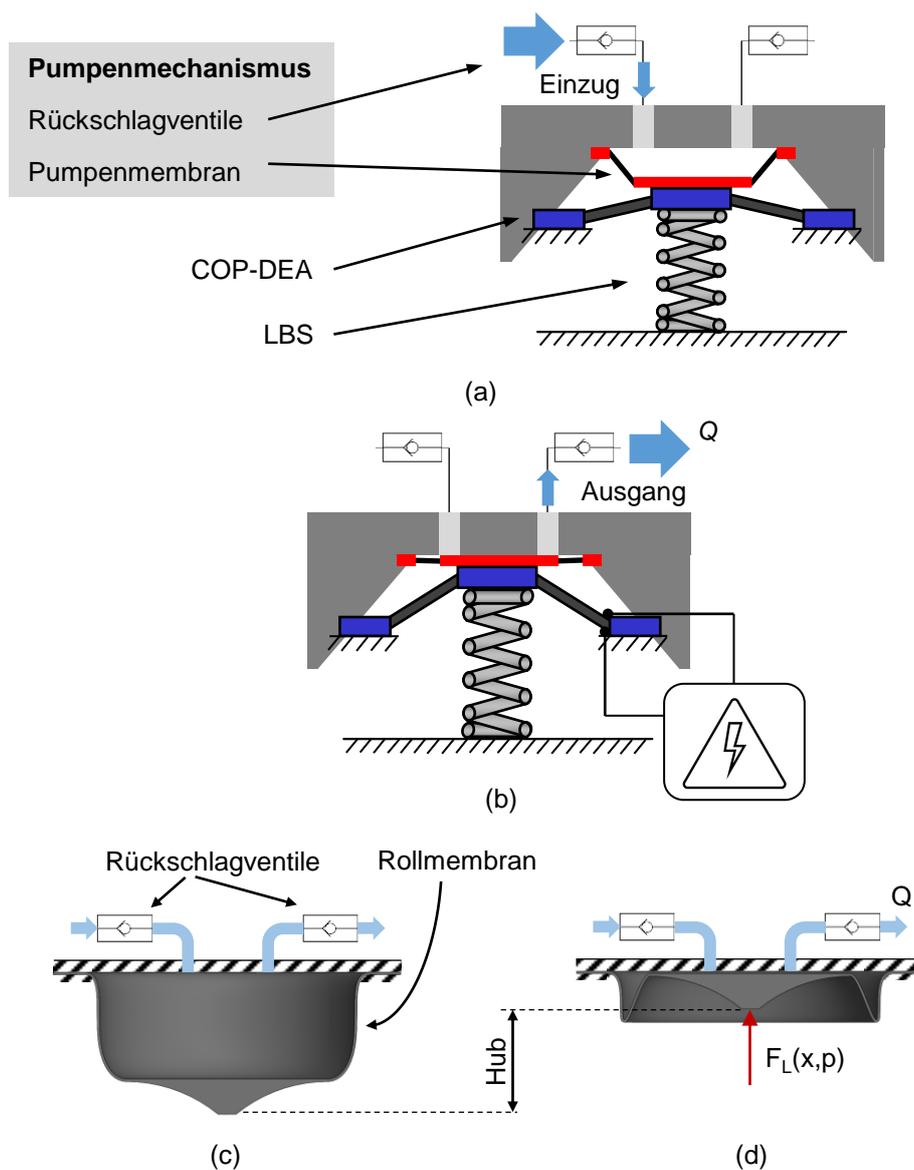


Abbildung 5.1: (a) Skizze einer DEA betriebenen Membranpumpe im unteren, inaktiven Zustand und (b) im oberen Zustand mit angelegter Hochspannung. (c) Rollmembran im unteren und (b) im oberen Totpunkt.

Der hier als experimentelle Plattform dienende Pumpenmechanismus besitzt als Pumpmembran eine Rollmembran. Diese ist ähnlich der in Abbildung 5.1 (c) schematisch dargestellten Membran. Wird eine Hochspannung am darunter sitzenden Antrieb angelegt, bewegt sich diese beim Herausdrücken der Luft durch das rechte Rückschlagventil nach oben (Abbildung 5.1 (d)). Der hier verwendete Pumpenmechanismus, bzw. die Rollmembran, lässt einen maximalen Hub von $\Delta x = 4,34$ mm zu und verdrängt dabei ein Volumen von $0,254$ cm³.

5.1.2 Charakterisierung

Um die in Abbildung 5.1 (d) markierte und für die Auslegung auf Basis der Gleichung (4.9) benötigte Kraft $F_L(x, p)$ zu bestimmen, wird der Versuchsaufbau der mechanischen Charakterisierung der COP-DEAs (Kapitel 4.2.1.1) verwendet. Hierzu wird die Hochspannungsquelle entfernt und der Pumpenmechanismus anstelle des COP-DEA eingebaut. Zu diesem Zweck werden der Pumpenkörper und die Rückschlagventile fest eingespannt, während die bewegliche Pumpenmembran über die Kraftmessdose am Linearmotor des Prüfstandes befestigt ist. Die Extremwerte der Last werden durch den minimalen und den maximal erreichbaren Druck bestimmt und sind in Abbildung 5.2 gezeigt. Die Charakterisierung erfolgt bei einer festen mechanischen Frequenz von 15 Hz. Die Frequenzabhängigkeit der Pumpenkräfte wird in einer ersten Näherung vernachlässigt. In diesem Fall sind der minimale Druck $p_{\min} = 0$ hPa und der maximale Druck $p_{\max} = 50$ hPa. Die gemessene Kraft ist die Summe aus der Verformung der Membran und der inneren Reibung zwischen Luftstrom und den Rückschlagventilen.

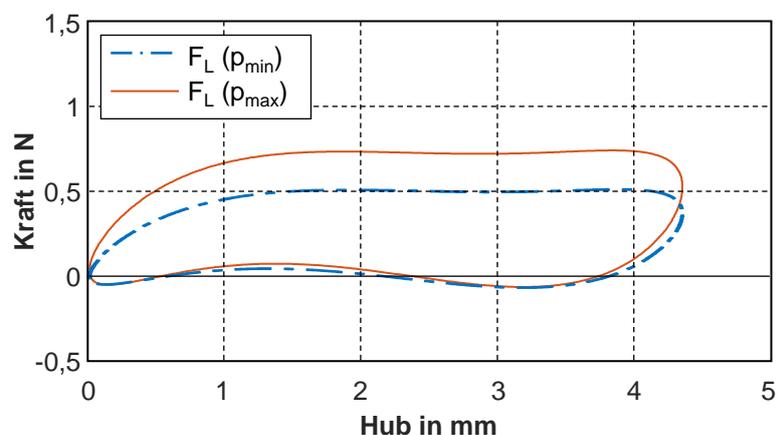


Abbildung 5.2: Wegabhängige Kraftcharakteristik bei Minimal- und Maximaldruck im System.

5.1.3 Systementwurf und Konstruktion

Bei der Betrachtung einer externen Last ist die Verwendung der durch die Kraftgleichgewichtsgleichung (4.9) gegebenen Form zweckmäßig. Das Ziel der grafischen Auslegung ist, das Einpassen der druckabhängigen Lastkurven zwischen die beiden Aktorkurven. Die Lastkurven repräsentieren die gemessenen Pumpenkräfte bei minimalem und maximalem Druck. Die Extremwerte der Aktorkurven sind durch die Summe der Kräfte auf der linken Seite von Gleichung (4.9) gegeben ($U = 0 \text{ V}$ bzw. $U = 3 \text{ kV}$).

Das Auslegungsziel wird somit erreicht, indem die Kurven der druckabhängigen Pumpenmembrankräfte zwischen der Kraft des Antriebssystems bei 0 V (gestrichelte blaue Linie in Abbildung 5.3) und der bei 3 kV (rote Strichpunktlinie in Abbildung 5.3) verläuft. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die frei einstellbaren Parameter optimiert. Dazu gehört die Steifigkeit k und die Vordehnung x_{pre} der LBS, die sich bewegende Masse m , die Betriebsfrequenz ω und schließlich die Anzahl der mechanisch parallel geschalteten COP-DEA Elementen. Die sich bewegende Masse m und die Frequenz ω lassen die Aktorkurven um das Bewegungszentrum drehen, wobei ω , aufgrund der quadratischen Abhängigkeit in Gleichung (4.9), einen höheren Einfluss hat. Das daraus resultierende optimale Design der Pneumatikpumpe ist in Abbildung 5.3 gezeigt. Der Entwurf basiert auf der Verwendung zweier COP-DEA Elementen von Parker Hannifin, die aus jeweils vier aktiven Schichten mit einem Innendurchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ und einem Außendurchmesser von $D = 45 \text{ mm}$ bestehen. Die ausgewählte Feder hat eine Federsteifigkeit von $k = 1,091 \text{ N/mm}$ mit einer Vorauslenkung von $x_{pre} = 14,85 \text{ mm}$.

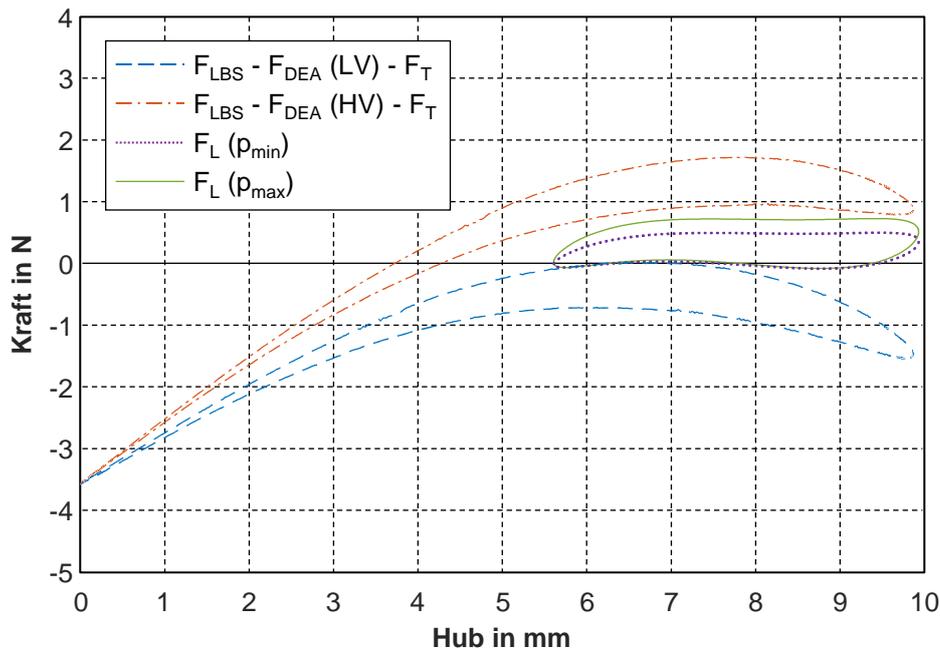


Abbildung 5.3: Grafischer Entwurf der COP-DEA betriebenen Pneumatikpumpe.

Die qualitative Beziehung zwischen Eigenkreisfrequenz ω_0 , der Masse m_0 und der Steifigkeit k_0 in einem linearen Feder-Masse-System ist gegeben durch

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_0}{m_0}}. \quad (5.1)$$

Die Durchflussmenge bzw. der erzeugte Volumenstrom hängt von der Betriebsfrequenz und dem maximalen Pumpvolumen pro Zyklus ab, welches durch geometrische Eigenschaften des Pumpenmechanismus definiert ist. Da die Betriebsfrequenz so nahe wie möglich an der Resonanzfrequenz gewählt wird, muss ihr Wert ausreichend groß sein, um die beste Pumpenleistung zu erzielen. Nach (5.1) ist dieser Zustand optimiert, wenn die bewegte Masse möglichst klein ist. Daher wird die Konstruktion so leicht wie möglich entworfen. Die resultierende bewegte Masse der optimierten Pumpenkonstruktion beträgt $m = 6,2$ g. Dies führt zu einer Resonanzfrequenz von $f_r = 98$ Hz. Unter Berücksichtigung dieses Wertes in Verbindung mit der konstruktionsbedingten Luftverdrängung von $0,254$ cm³ pro Zyklus wird ein Volumenstrom von $Q = 1,49$ l/min prognostiziert.

5.1.4 Validierung und Ergebnisse

Der zuvor entworfene und zusammengebaute Pumpenprototyp ist in Abbildung 5.4 für Demonstrationszwecke gezeigt. Die DEA betriebene Pneumatikpumpe ist auf einer

mobilen Hochspannungsversorgung montiert. Diese erlaubt die Amplitude sowie die Frequenz des Ansteuersignals über Drehknöpfe zu variieren. Durch diese zwei Parameter kann, wie die Messungen in Abbildung 5.5 zeigen, der Volumenstrom geregelt werden. Um dies zu visualisieren wird der erzeugte Volumenstrom durch eine mit Wasser gefüllte Plexiglasröhre geleitet. Mit Änderung des Durchflusses ändert sich auch die Anzahl und Größe der Luftblasen, was die oben beschriebenen Vorteile visualisiert.

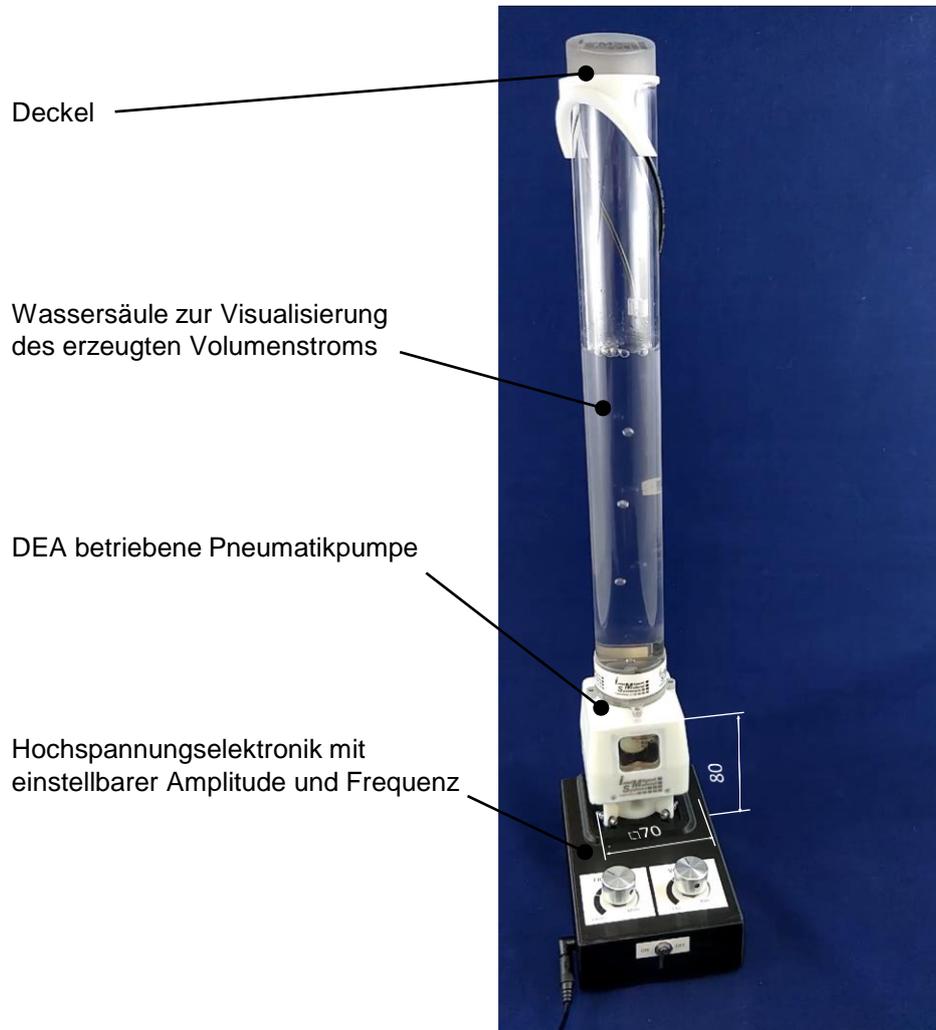


Abbildung 5.4: Pumpendemonstrator mit mobiler Hochspannungselektronik und Wassersäule zur Visualisierung des erzeugten Volumenstroms.

Zur Durchführung der experimentellen Validierung wird der Prüfstand um einen Durchflusssensor Honeywell AWM5104VN und einen Drucksensor Festo GRO-QS-6 ergänzt. Das Experiment wird mit unterschiedlichen Spannungsamplituden durchgeführt. Die Frequenz des Anregungssignals, in Form eines sinusförmigen Spannung-Chirp-Signals, steigt innerhalb von 15 s linear von 70 Hz auf 115 Hz an. Die Ergebnisse dieser Experimente sind in Abbildung 5.5 (a) grafisch dargestellt. Die den verschiedenen Spannungsamplituden entsprechenden Resonanzfrequenzen sind mit einem Stern markiert. Die Messungen zeigen mit zunehmender Spannungsamplitude eine abfallende Resonanzfrequenz. Wie in Abbildung 4.2 (c) beobachtet, wird das System bei niedrigerer maximal angelegter Hochspannung steifer und somit wird die Resonanzfrequenz in Übereinstimmung mit Gleichung (5.1) höher.

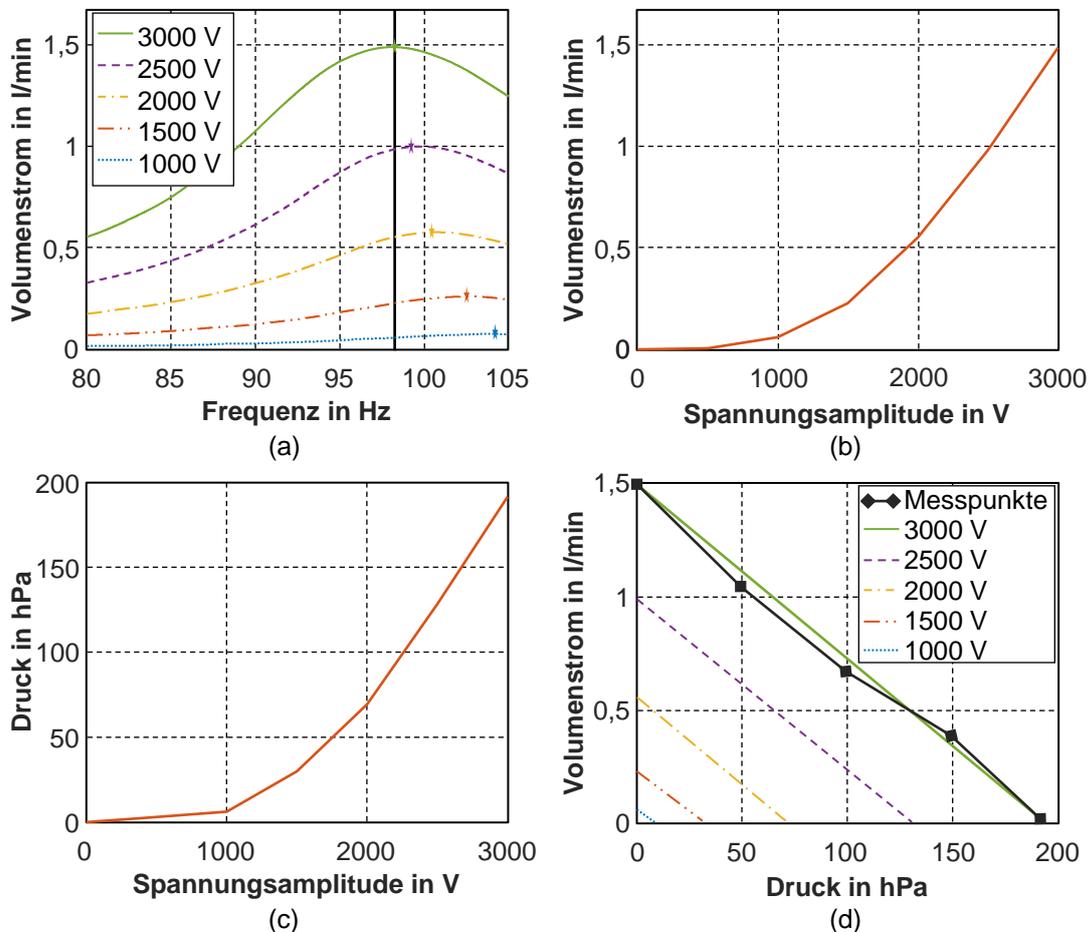


Abbildung 5.5: (a) Frequenzabhängiger Volumenstrom für verschiedene Spannungsamplituden und ihre jeweilige Resonanzfrequenz. (b) Maximaler Volumenstrom als Funktion der Spannungsamplitude bei fester Frequenz. (c) Maximal erreichbarer Druck in Abhängigkeit der Spannungsamplitude bei fester Frequenz. (d) Pumpencharakteristik – druckabhängiger Volumenstrom bei verschiedenen Spannungsamplituden.

Aus Abbildung 5.5 (a) kann eine Resonanzfrequenz von $f_r = 98,11$ Hz abgelesen werden. Für diese Frequenz wird bei maximaler Spannungsamplitude ein maximaler Volumenstrom von $Q = 1,48$ l/min erreicht. Der Unterschied zwischen gemessenen und vorhergesagten Leistungsdaten sowie die relativen Fehler sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Vergleich zwischen prognostizierten und experimentell gemessenen Vergleichswerten des entwickelten Pumpenprototyps.

Benennung	Formelzeichen	Prognose	Messung	Absoluter Fehler	Relativer Fehler
Resonanzfrequenz	f_r	102 Hz	102,1 Hz	0,1 Hz	0,10%
Systemgesamthub	Δx	2,6 mm	2,56 mm	0,04 mm	1,56%

Sobald der höchstmögliche Volumenstrom erreicht ist, wird die Betriebsfrequenz f_B , wie in Abbildung 5.5 (a) markiert, auf $f_B = 98,11$ Hz festgelegt. Der dazugehörige erzeugte Volumenstrom bei fester Betriebsfrequenz ist in Abbildung 5.5 (b) als Funktion der Spannungsamplitude aufgetragen. Hier ist gut zu erkennen, dass auch bei gleichbleibender Frequenz der Volumenstrom rein über die Amplitude des Eingangssignals geregelt werden kann. Die Druckmessung in Abbildung 5.5 (c) bei fester Betriebsfrequenz ist als Funktion der angelegten Spannungsamplitude dargestellt. Der quadratische Verlauf des spannungsabhängigen Volumenstroms (Abbildung 5.5 (b)) und spannungsabhängigen Drucks (Abbildung 5.5 (c)) kann durch den Maxwell Druck p_M aus Gleichung (2.4) erklärt werden. Die quadratische Nichtlinearität zwischen elektrischem Feld und elektrischer Spannung spiegelt sich direkt im parabolischen Trend des Volumenstroms und Drucks wider.

Die Ergebnisse aus Abbildung 5.5 (b) und Abbildung 5.5 (c) führen in Verbindung mit zusätzlichen Messungen bei verschiedenen Druckniveaus zu der in Abbildung 5.5 (d) angegebenen finalen Pumpenkennlinie. Diese Auswertung zeigt die spannungsamplitudenabhängige Leistung der konstruierten Pneumatikpumpe mit einer maximalen Durchflussmenge $Q_{max} = 1,48$ l/min und einem maximal erreichbaren Druck $p_{max} = 192,95$ hPa.

5.2 Anwendungsspezifischer Pumpenprototyp

In diesem Abschnitt wird ein Antriebssystem auf Basis Dielektrischer Elastomere zum Betreiben einer pneumatischen Pumpe zur Sitzeinstellung entworfen. Hierzu bilden die Leistungsdaten des konventionell verwendeten Kompressors die grundlegenden Anforderungen. Durch das mechanische und elektrische Charakterisieren der entworfenen SIP-DEAs wird der Antrieb ausgelegt, aufgebaut und validiert.

5.2.1 Aufgabe

Wie eingangs erwähnt, eröffnen DEA basierende Antriebssysteme die Möglichkeit neuer Bauformen herkömmlicher Systeme. In der vorliegenden Aufgabe wird eine pneumatische Sitzeinstellung betrachtet. Dafür sind im Lordosen- und Seitenbereich Luftblasen angeordnet (Abbildung 5.6 (a)), die über Ventile gefüllt und geleert werden können.

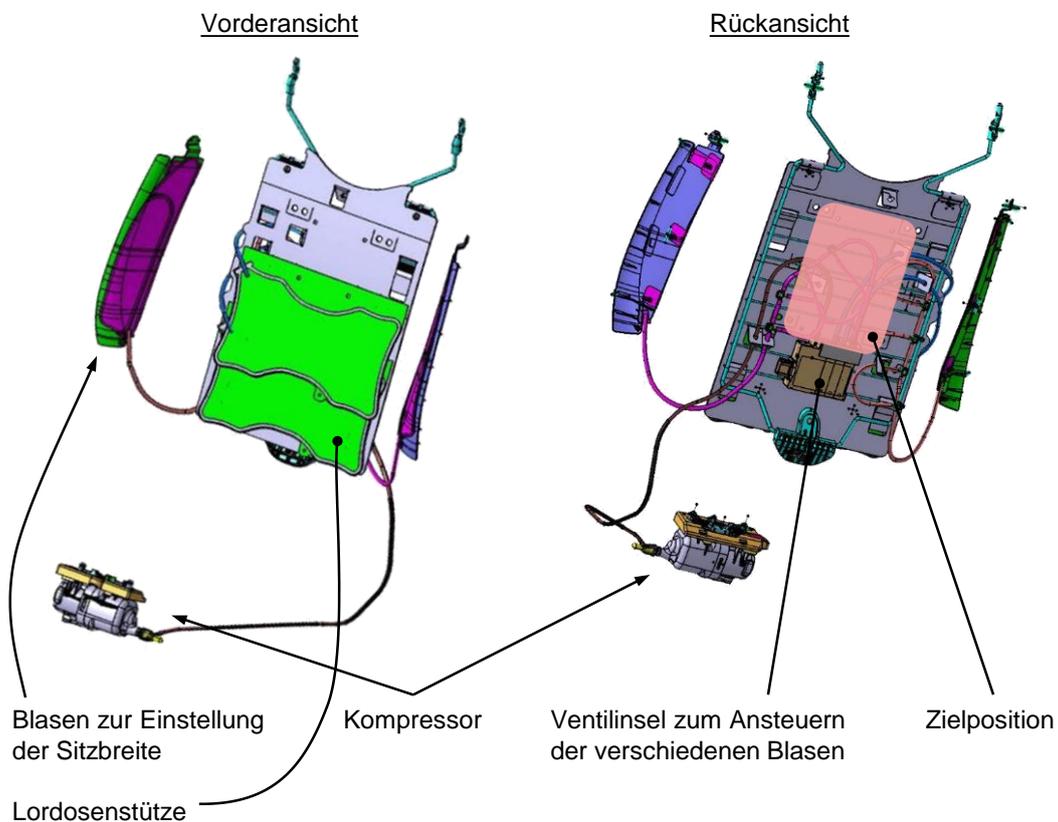


Abbildung 5.6: (a) Vorderansicht eines pneumatischen Systems zur Sitzeinstellung im Rückenbereich mittels Lordosenstütze und Seitenbereich. (b) Rückansicht des Systems mit Ventilinsel zum Ansteuern der Luftblasen, des notwendigen Kompressors und die Zielposition der neuen Pumpe.

Zum Betreiben dieses Systems ist eine Pumpe notwendig, die den benötigten pneumatischen Druck und Volumenstrom zur Verfügung stellt. In dem vorliegenden System muss die konventionell verwendete Minimembranpumpe (Abbildung 5.6) aufgrund der Baugröße in der Sitzfläche positioniert werden. Dadurch ist beim Montieren des Sitzes immer eine Verbindung zwischen Ventilinsel und Kompressor herzustellen. Eine weitere Schwierigkeit stellt der Kurvenverlauf der pneumatischen Leitung dar. Durch häufiges Verstellen der Rückenlehne wird der Schlauch an der Knickstelle unter Umständen stark belastet und kann schnell ermüden und undicht werden, was zum Ausfall des gesamten Systems führen würde.

Als Lösung wäre eine Pumpe vorteilhaft die, wie in Abbildung 5.6 (b) gezeigt, in der Rückenlehne eingebaut wird. Das pneumatische System kann somit komplett vormontiert werden und im Einsatz ist keine bewegliche Pneumatikleitung mehr notwendig. Die Leistungsdaten bezüglich des Druckes und Volumenstroms orientieren sich an der herkömmlich verwendeten Pumpe, wobei ein Bauraum von $150 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ nicht überschritten werden soll.

5.2.2 Charakterisierung des konventionell verwendeten Kompressors

Zur Auslegung des Antriebssystems wird die für Pumpen aussagekräftigste Kennlinie, der Volumenstrom als Funktion des Druckes, benötigt. Dazu wird der in Abbildung 5.7 (a) gezeigte Prüfstand aufgebaut. Dieser besteht aus der zu testenden Pumpe (1), dem Prüfvolumen crvzs-0.75 (2), dem Drucksensor SPTW-B2R-G14-VD-M12 (3), dem Volumenstromsensor SFET-F100-L-WQ6-B-K1 (4), der manuell einstellbaren Drossel GRO-QS-6 (5) und einem Schalldämpfer (6). Die Betriebsspannung der Pumpe wird über die Spannungsquelle Hameg HMP 2020 bereitgestellt, welche über eine RS232 Schnittstelle direkt mit dem Computer verbunden ist. Die oben genannten Messgeräte werden über das Modul NI 9205, welches über ein Rio 9149 an den Computer angeschlossen ist, analog ausgelesen. Programmiert und gesteuert wird der Prüfstand mittels Labview 2014. Die Auswertung der Messergebnisse wird mit Matlab 2016 durchgeführt.

Um die Streuung in der Fertigung und Montage der Pumpe herauszufiltern, werden sieben baugleiche Pumpen getestet. Die Ergebnisse dieser Messungen, der Mittelwert sowie die zulässigen Leistungsgrenzen sind in Abbildung 5.7 (b) dargestellt.

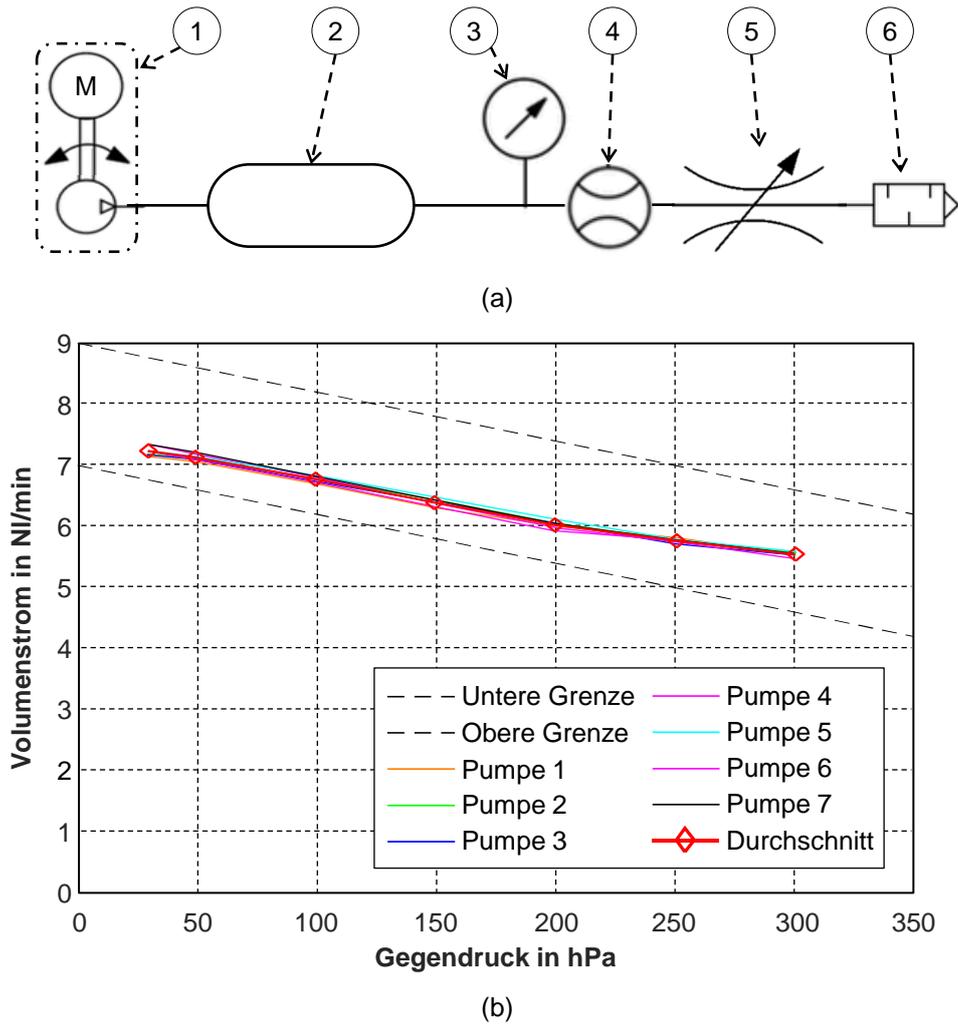


Abbildung 5.7: (a) Messaufbau zur Charakterisierung der herkömmlichen Pumpe und (b) der gemessene Volumenstrom als Funktion des Gegendruckes im Prüfvolumen von sieben Vergleichspumpen.

Das Mindestziel der zu entwerfenden Pumpe sind 7 l/min bei 0 hPa und 4,6 l/min bei 300 hPa. Diese Werte dienen zur Auslegung. Die gemessenen Leistungsdaten der Pumpen dienen als Vergleichswerte zur Validierung der Leistungsfähigkeit des neuen DEA basierenden Antriebssystems.

5.2.3 Lösungskonzept

Um die Anforderung einer flachen Pumpe erfüllen zu können, wird in dieser Anwendung ein SIP-DEA zum Betrieb der Pumpe genutzt (Abbildung 5.8 (a)). Dieser kann die Arbeit in der Ebene verrichten. In der schematisch dargestellten Seitenansicht in Abbildung 5.8 (b) ist die flache Bauweise einer solchen Pumpe sehr gut zu erkennen.

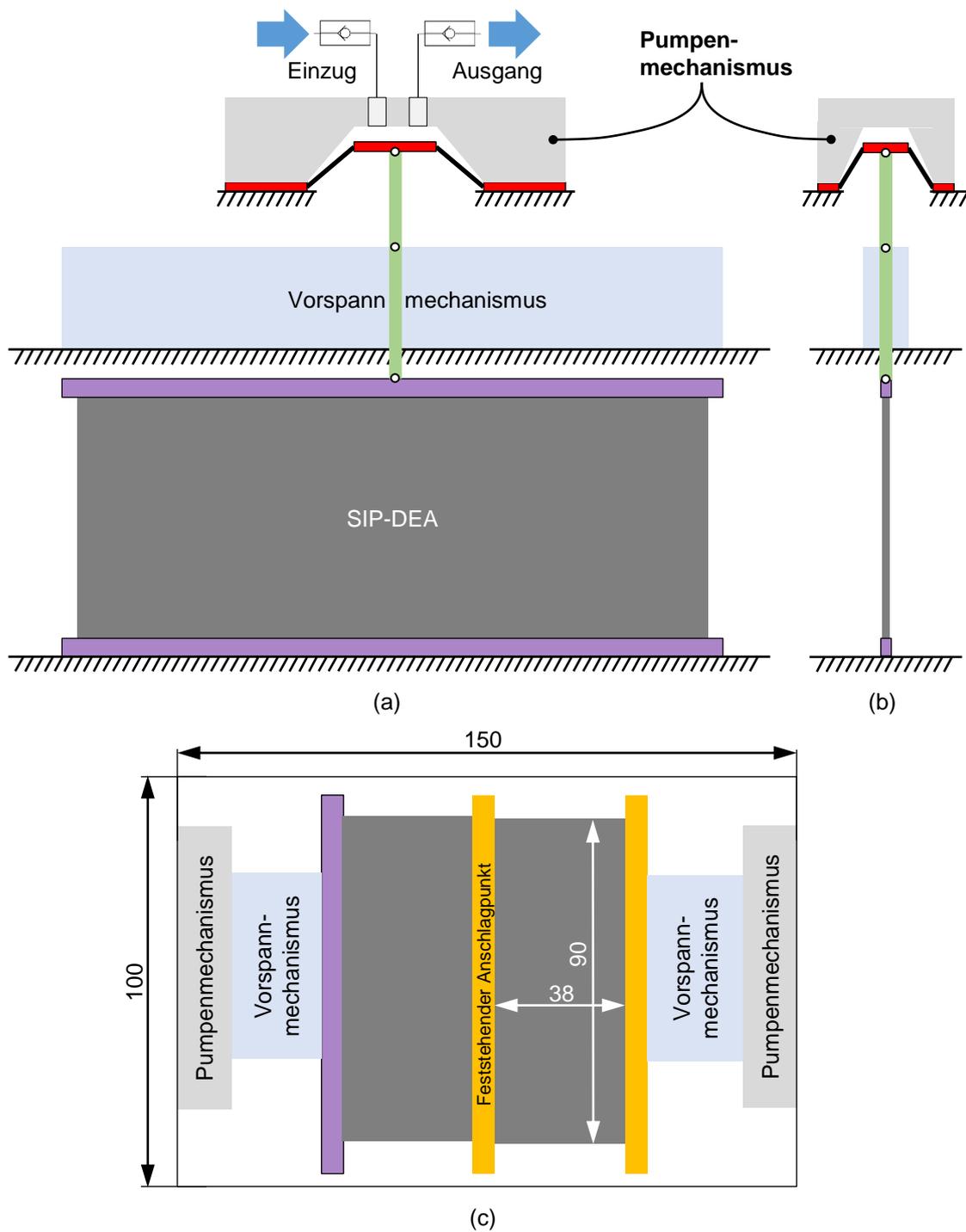


Abbildung 5.8: (a) Schematische Darstellung eines SIP-DEA betriebenen Pumpenmechanismus in der Draufsicht und (b) in der Seitenansicht. (c) Teilung der Gesamtpumpe in zwei gegenläufig SIP-DEA betriebene Teilpumpen.

Um von der Pumpe emittierte Vibrationen zu vermeiden, wird die Gesamtpumpe in zwei Teilpumpen unterteilt. Diese werden, wie in Abbildung 5.8 (c) gezeigt, am Festlager verbunden, wodurch die bewegten Massen sich gegeneinander ausgleichen. Durch die

grobe Aufteilung in nur zwei Teilpumpen ist eine starke Pulsation im Druckluftsystem wahrscheinlich. Eine weitere Spaltung in mehrere Teilpumpen zur Pulsationsreduzierung ist in einer späteren Optimierung ohne Probleme möglich. In einem ersten Schritt soll jedoch die Funktion als solches gezeigt werden.

Im weiteren Verlauf wird nur noch eine Teilpumpe betrachtet. Dazu werden die Anforderungen für jede Teilpumpe neu definiert. Diese muss mindestens 3,5 l/min bei 0 hPa und 2,3 l/min bei 300 hPa erreichen und beträgt im Volumenstrom genau 50% der zuvor in Kapitel 5.2.2 ermittelten Werte.

5.2.4 Herstellung des SIP-DEA Stapels

In dieser Pumpenanwendung muss zur Kraftskalierung ein Stapel aus SIP-DEAs hergestellt werden. Hierzu wird, im Gegensatz zu den Aktoren beim elektrischen Schaltschütz in Kapitel 3, ein Doppellagenaktor nicht durch Falten hergestellt, sondern durch einfaches Aufeinanderstapeln. Grund dafür ist die große aktive Fläche pro Lage, welche zuvor einzeln einem Qualitätstest unterzogen wird. Diese einzelnen Lagen werden nach dem Verfahren in Abschnitt 2.4 hergestellt und ist, wie in Abbildung 5.9 (a) skizziert, einseitig mit einem steifen Rahmen versehen.

Abbildung 5.9 (b) zeigt die elektrische Kontaktierung der einzelnen leitfähigen Beschichtungen. Mit Hilfe eines leitfähigen Klebers werden dünne Kupferfähnchen stoffschlüssig mit der Elektrode verbunden. Diese werden genau an den Aussparungen des Rahmenmaterials untergebracht, um beim Stapeln (Abbildung 5.9 (c)) keine Verdickungen an den Kontaktstellen zu erhalten. Ein Bild eines durch dieses Verfahren hergestellten und kontaktierten SIP-DEAs ist in Abbildung 5.9 (d) gezeigt.

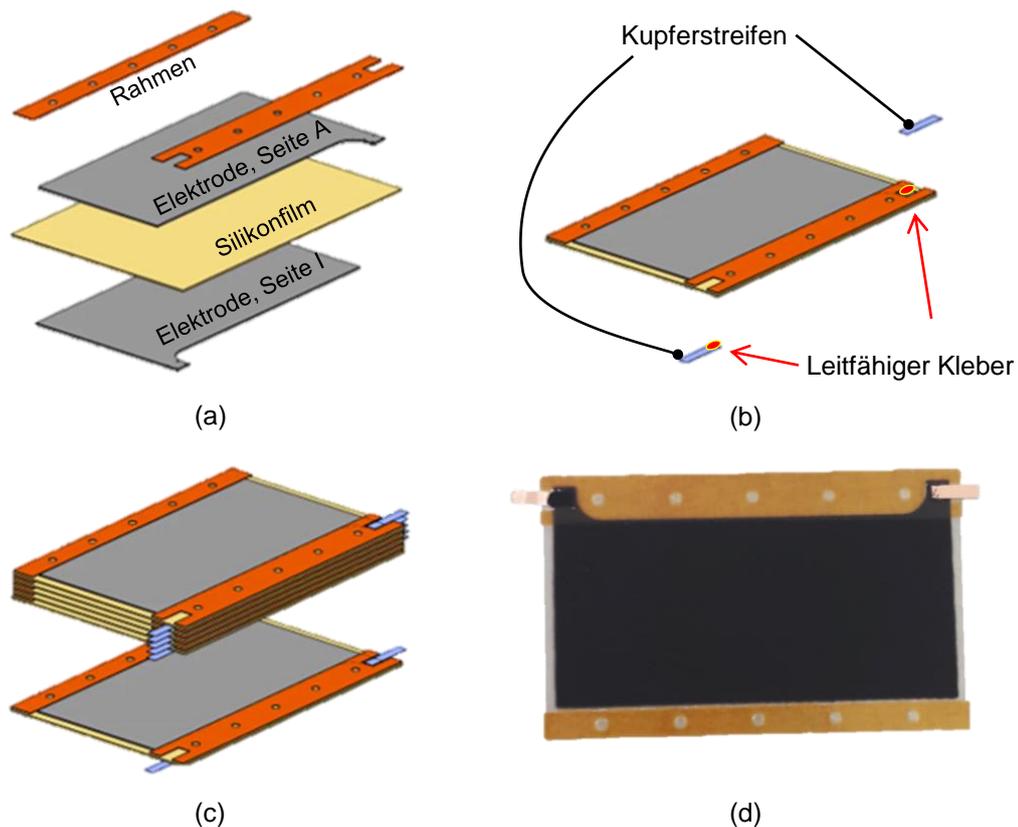


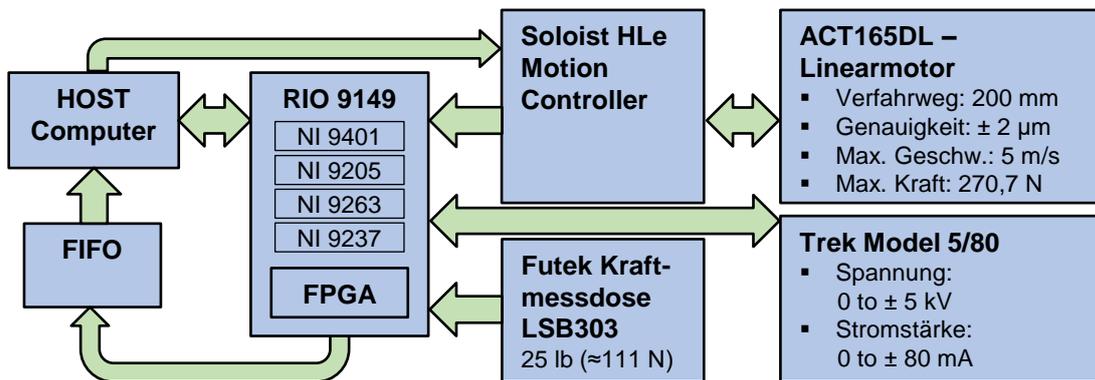
Abbildung 5.9: (a) Aufbau eines SIP-DEA, welcher eine Seite eines Doppellagenaktors darstellt. (b) Kontaktierung durch leitfähige, stoffschlüssige Verbindung von Kupferstreifen. (c) Mechanisches parallel belastete SIP-DEAs als Stapel zur Kräfteskalierung. (d) Bild des hergestellten SIP-DEAs mit Kontaktierungsfahnen.

5.2.5 Mechanische Charakterisierung der Aktoren

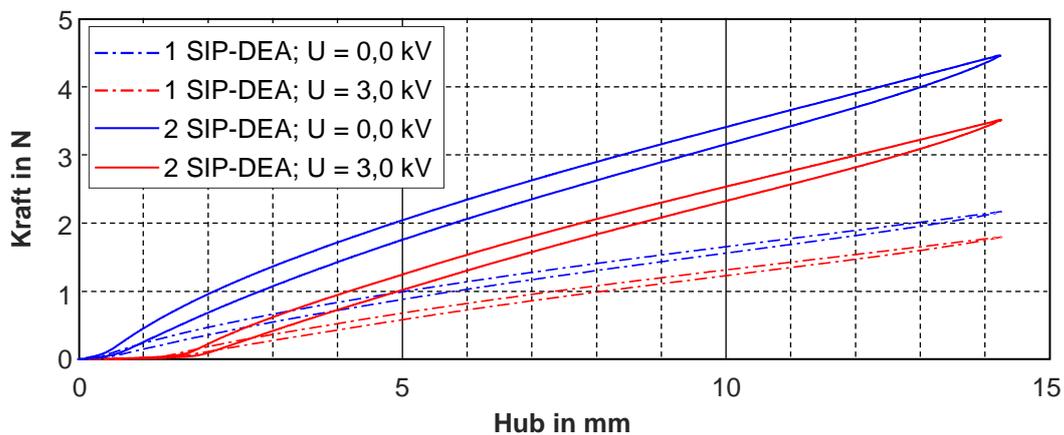
Zur mechanischen Charakterisierung der hergestellten SIP-DEAs wird ein Prüfstand nach dem in Abbildung 5.10 (a) gezeigten Schema aufgebaut. Das Herzstück bildet der RIO 9149, der über Ethernet mit dem Host Computer verbunden ist. Der Soloist HLe Motion Controller, der Fahrbefehle ebenfalls über Ethernet bekommt, steuert den Linearmotor ACT165DL der Firma Aerotech z.B. für die Zugversuche. Die, in verschiedenen Versuchen benötigte, Hochspannung wird durch den Trek 5/80 bereitgestellt. Dieser wird mit einem Digitalsignal aus dem NI 9401 angeschaltet und erhält die Analogsignale zur Einstellung der Spannungshöhe durch das Modul NI 9263. Die Kraftmessdose LSB303 des Herstellers Futek wird über das Brückenmodul NI 9573 betrieben und ausgelesen. Die Positionswerte, die real anliegende Hochspannung sowie die benötigte Stromstärke werden über Analogsignale mit dem NI 9205 ausgelesen. Die vier Module bilden mit dem Rio eine

Einheit. Der Rio enthält zur Messwertaufnahme in nahezu Echtzeit einen FPGA. Dieser schiebt die Messwerte in einen integrierten FIFO, der kontinuierlich vom Host Computer ausgelesen wird und somit die gemessenen Werte speichert. Die Steuerung des Prüfstandes geschieht in Labview 2017 bzw. Labview 2019 und die Auswertungen in Matlab 2017 bzw. Matlab 2019.

Die Ergebnisse des Zugversuchs sind in Abbildung 5.10 (a) zu sehen. Dabei ist die Kraft als Funktion des Hubs eines SIP-DEAs sowie eines Stapels, bestehend aus zwei SIP-DEAs, dargestellt. Der Verfahrweg bei diesem Versuch beträgt 14,21 mm, was einer Dehnung des SIP-DEAs bzw. des Stapels von 37,4% entspricht, welche über das maximal zulässige elektrische Feld des Dielektrikums berechnet wird.



(a)



(b)

Abbildung 5.10: (a) Einzelne Komponenten des verwendeten Prüfstandes mit Spezifikationen und der schematischen Darstellung der Gerätekommunikation am Versuchsstand. (b) Mechanische Charakterisierung eines einzelnen SIP-DEAs und eines Doppellagenaktors als Kraft-Weg-Diagramm.

5.2.6 Elektrische Charakterisierung der Aktoren

Das Wissen über die Grenzfrequenz, mit der das aufzubauende Antriebssystem maximal betrieben werden kann, ist essenziell für einen funktionstüchtigen Prototypen. Diese muss unbedingt über der geplanten Betriebsfrequenz des Antriebs liegen. Da die Berechnung, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, mit sehr viel Aufwand verbunden ist, wird auch hier eine experimentelle Charakterisierung vorgezogen. Hierfür wird ebenfalls der Prüfstand zum Ermitteln der mechanischen Eigenschaften verwendet.

Der SIP-DEA wird über eine Kraftmessdose fixiert und an dem anderen Ende mit dem Linearmotor verbunden. Dadurch kann der SIP-DEA mit definierter Vordehnung auf die elektrischen Eigenschaften untersucht werden. Als Anregungssignal wird ein Sinussignal mit einer Amplitude von 3000 V angelegt. Die Startfrequenz wird mit 40 Hz als untere Grenze gewählt. Mit einem Inkrement von 0,25 Hz wird die Frequenz linear alle zehn Perioden gesteigert bis die Endfrequenz von 80 Hz erreicht ist. Als Auswertegröße dient auch hier die Blockierkraft. Die Ergebnisse dieser Messungen bei verschiedenen Vorspannungen sind in Abbildung 5.11 (a) dargestellt.

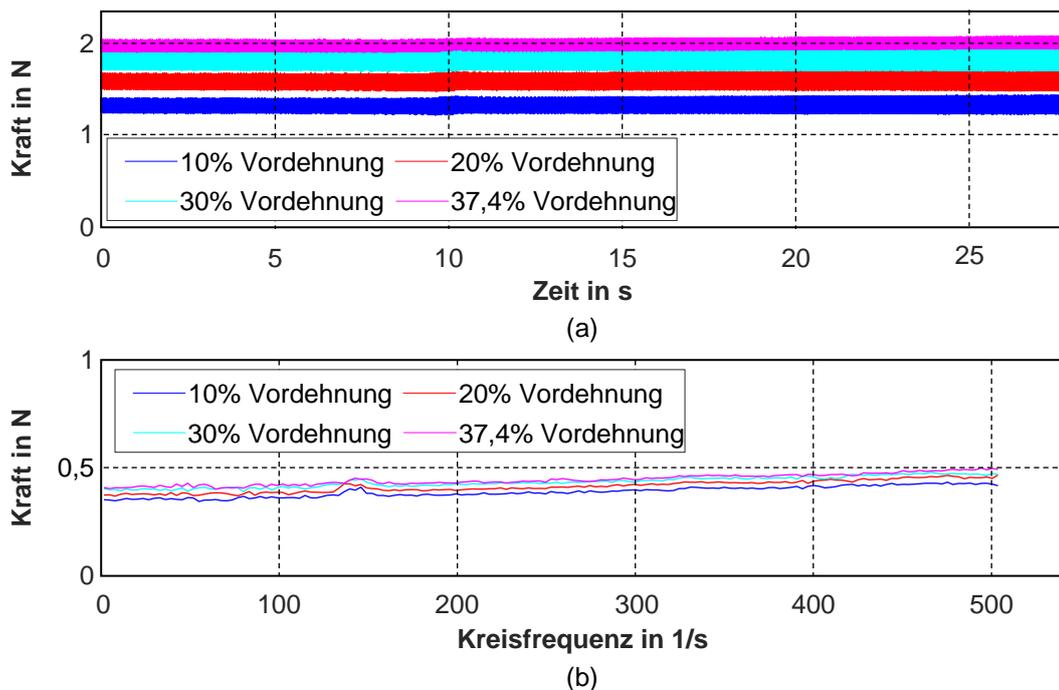


Abbildung 5.11: (a) Rohdaten der Blockierkraftmessung eines einzelnen SIP-DEAs bei verschiedenen Vordehnungen und ansteigender Ansteuerfrequenz über die Zeit. (b) Berechnetes Kraftdelta der Blockierkraft bei verschiedenen Vordehnungen als Funktion der Kreisfrequenz des Ansteuersignals.

Zur besseren Sichtbarkeit bzw. Auswertung, ist in Abbildung 5.11 (b) das Kraftdelta der verschiedenen Vordehnungen bei maximaler und minimaler elektrischer Spannung als Funktion der Anregungsfrequenz dargestellt. Zu beobachten ist ein leichter Anstieg der Kraftdifferenz. Bei Überschreiten der Grenzfrequenz ist jedoch ein Abfall des Kraftdeltas zu erwarten, was darauf schließen lässt, dass die getesteten Frequenzen unter der Grenzfrequenz des vorliegenden SIP-DEAs liegen. Somit kann das Antriebssystem zuverlässig bis 80 Hz betrieben werden.

5.2.7 Pumpenmechanismus

Der hier entworfene Pumpenmechanismus (Abbildung 5.12 (a)) besitzt die identische Funktionsweise wie der in Kapitel 5.1.1 beschriebene Mechanismus. Der Aufbau kann der Schnittansicht in Abbildung 5.12 (b) entnommen werden. Wird der SIP-DEA mit Spannung beaufschlagt, drückt die Pumpmembran die Luft durch ein Rückschlagventil ins Druckluftsystem. Bei Abschalten der Spannung vergrößert sich die Pumpenkammer wieder und über ein zweites Rückschlagventil wird Luft eingesaugt. Die, auf die flache Bauform angepasste, Pumpmembran ist in Abbildung 5.12 (c) gezeigt und die verwendeten Rückschlagventile DU 054.004-154.01 der Firma Minivalve International in Abbildung 5.12 (d).

Der selbst entworfene Pumpenmechanismus, sowie der bisher in dieser Anwendung zum Einsatz kommende Pumpenkopf (Abbildung 5.12 (e)) werden auf dem zuvor vorgestellten Prüfstand vermessen. Hierzu wird dieser um einen Volumenstromsensor Honeywell AWM5104VN und einen Drucksensor Festo SPTW-B2R-G14-VD-M12 erweitert. Die zur Bauform passende Pumpmembran wird mit einer 50 μm und einer 200 μm dicken Folie aufgebaut. Der konventionelle Pumpenkopf beinhaltet eine Rollmembran. Vermessen wird der Pumpenmechanismus einer Teilpumpe bis zu einer Betriebsfrequenz von 15 Hz. Die für die Gesamtpumpe, bis 50 Hz extrapolierten Messwerte sind in Abbildung 5.12 (f) dargestellt. Theoretisch müssten alle Werte ungefähr im selben Bereich liegen. Zu beobachten ist jedoch, dass der selbst entworfene Pumpenmechanismus nicht den benötigten Volumenstrom erreicht. Hauptgründe dafür sind eine nicht optimierte Geometrie der Pumpenkammer sowie die fehlende Dichtheit an den Übergangsstellen. Da der Fokus der Arbeit auf dem Antriebssystem liegt, wird im weiteren Verlauf der

herkömmliche Pumpenkopf verwendet. Dieser passt zwar nicht zum flachen Antrieb, kann jedoch bei späteren Optimierungen leicht in seiner Bauform angepasst werden.

Zur späteren Auslegung wird die benötigte Aktorkraft zum Betreiben des konventionellen Pumpenkopfes bei Minimaldruck, Maximaldruck und Zwischendrücken ermittelt (Abbildung 5.12 (g)). Zu beobachten ist, dass Minimal- und Maximaldruck die äußeren Kraftkurven ergeben und somit nur diese relevant für den weiteren Verlauf sind, da alle Drücke dazwischen infolgedessen auch realisiert werden können.

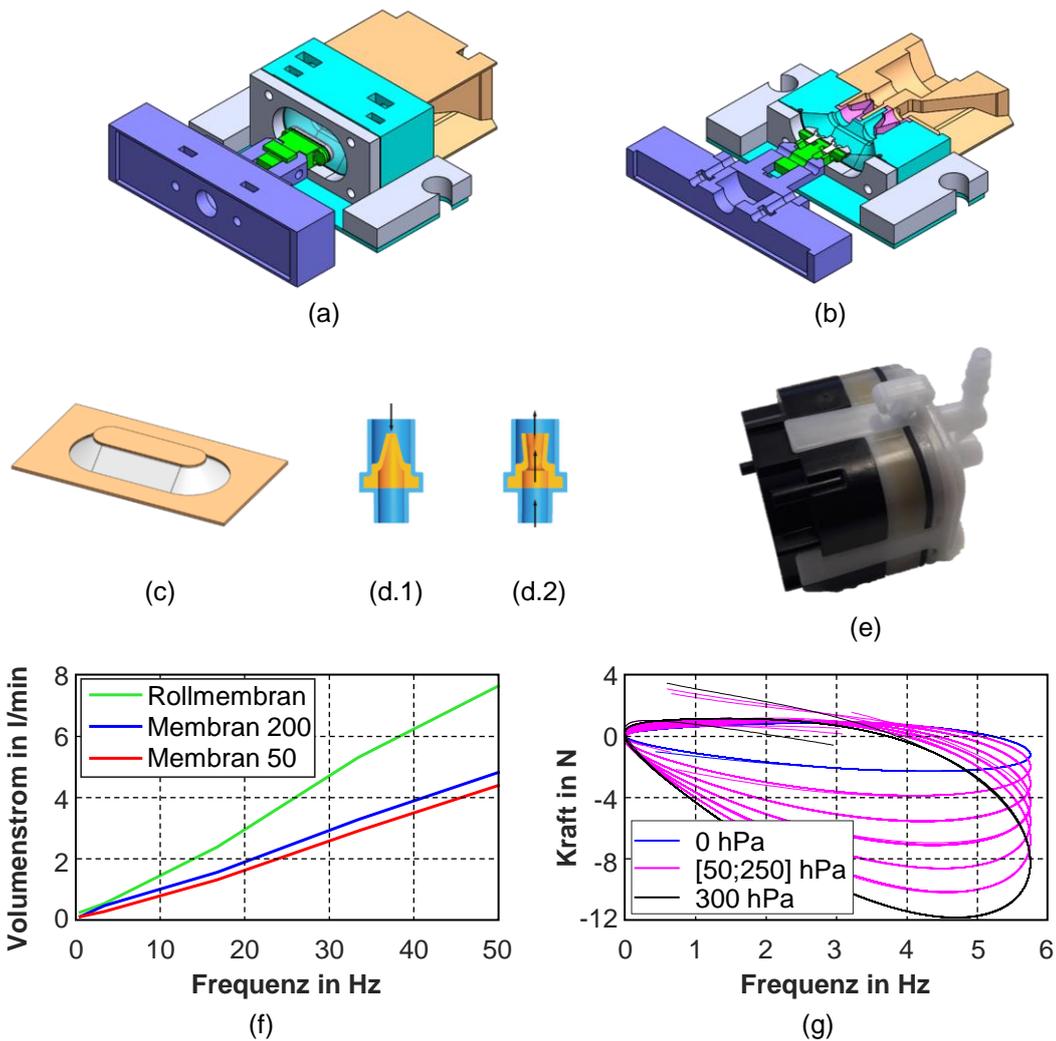


Abbildung 5.12: (a) CAD-Entwurf des Pumpenmechanismus mit Adapterteil. (b) Schnittansicht des selbst entworfenen Pumpenmechanismus. (c) An die flache Bauform angepasste Pumpenmembran. (d) Funktionsweise der eingesetzten Rückschlagventile [127]. (e) Kommerziell verfügbarer Pumpenkopf, der in der herkömmlichen Minimembranpumpe verwendet wird. (f) Volumenstrommessung als Funktion der Betriebsfrequenz von zwei selbst entworfenen Pumpenmechanismen und des kommerziell verfügbaren Pumpenkopfes. (g) Kraftmessungen als Funktion der Frequenz des kommerziell verfügbaren Pumpenkopfes bei Maximaldruck, Minimaldruck sowie Gegendrücke zwischen 0 und 300 hPa.

5.2.8 Vereinfachter Pumpendemonstrator

Zur ersten Funktionsprüfung des entworfenen Systems, wird eine Pumpe aufgebaut, die nur den benötigten Volumenstrom erzeugen soll. Dazu werden in dieser Auslegung nur die zuvor ermittelten Kraftkurven bei Minimaldruck verwendet. Hierzu wird die Gleichung (4.9) aus Kapitel 4.1 umgestellt zu

$$F_{DEA}(x, U) + F_L(x, p) - m\omega^2 x = k(x_{vor} - x). \quad (5.2)$$

Die kumulierte Kraft der linken Seite der Gleichung als Funktion des Weges ist für 1 Hz in Abbildung 5.13 (a), 40 Hz in Abbildung 5.13 (b), 67 Hz in Abbildung 5.13 (c) und für 80 Hz in Abbildung 5.13 (d) gezeigt. Durch Erhöhung der Frequenz ist ein Wechseln der Kraft von positiver in negative Steigung zu beobachten. Da die genutzten Kraftkurven des Aktors mathematisch im relevanten Bereich gefittet sind, kann hierbei nur der weiße Bereich betrachtet werden. Der ausgegraute Bereich stimmt aufgrund des Fittings nicht mit der Realität überein.

Das Ziel ist, die Kraft des Vorspannsystems, in diesem Fall eine Zylinderfeder, repräsentiert durch die rechte Seite der Gleichung, so gut wie möglich zwischen den beiden frequenzabhängigen Kraftkurven zu positionieren. Das Ergebnis, die Parameter der einzelnen Komponenten, ist in der folgenden Tabelle 5.2 zusammengefasst. Diese beruhen auf der Auslegung in Abbildung 5.13 (c).

Tabelle 5.2: Entwurfs- und Konstruktionsparameter der SIP-DEA betriebenen Pumpe zur Validierung ohne Druckerzeugung.

	Symbol	Benennung	Wert	Einheit
SIP-DEA	b	Breite	90	mm
	l	Länge	38	mm
		Anzahl	10	Stk.
LBS	k	Federsteifigkeit	0,83	N/mm
	x_{vor}	Vordehnung	19,7	mm
		Anzahl	2	Stk.
Dynamik	m	Bewegte Masse	15	g
	f	Betriebsfrequenz	67	Hz

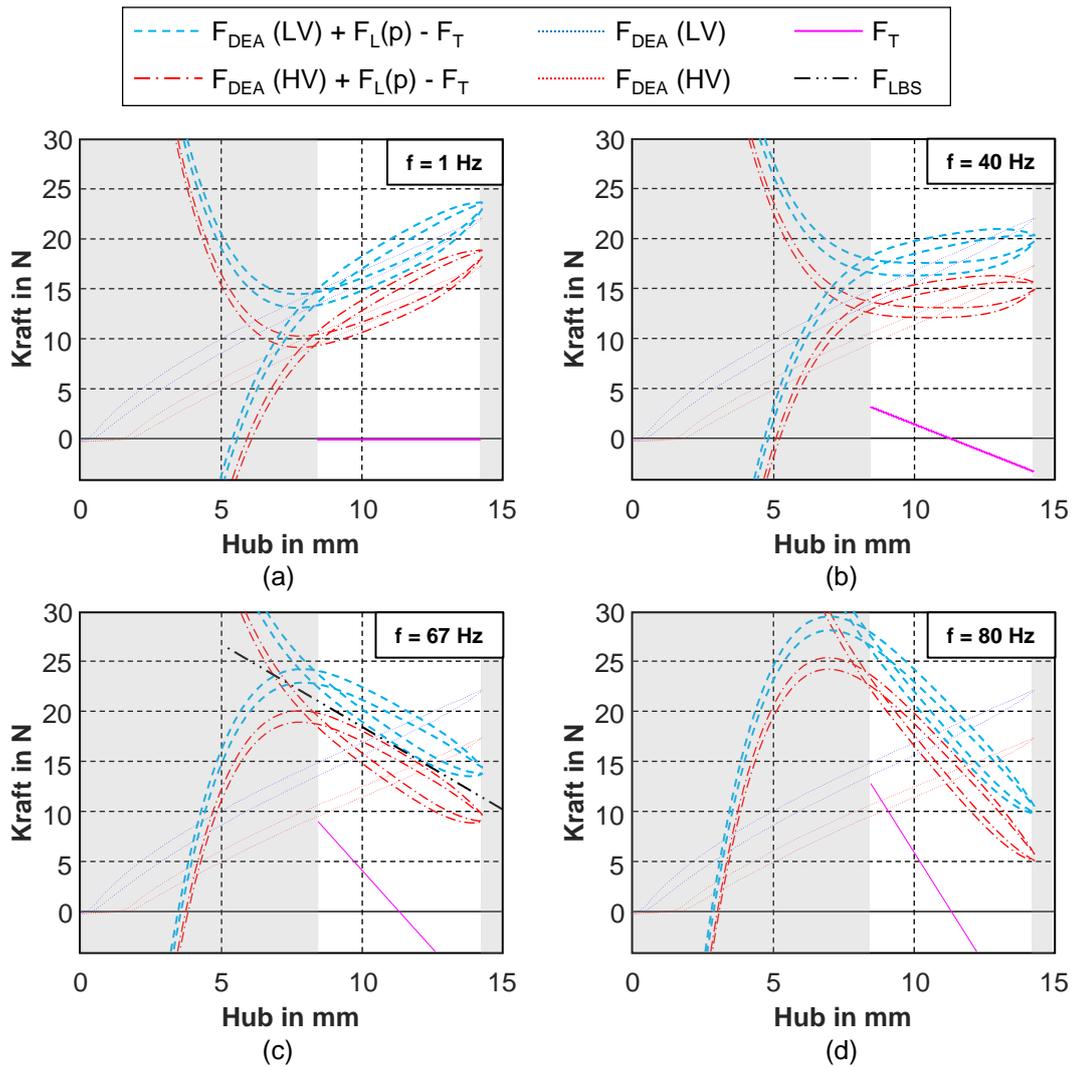


Abbildung 5.13: (a) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 1 Hz. (b) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 40 Hz. (c) Auslegung bei 67 Hz mit Darstellung der rechten und linken Seite der Auslegegleichung. (d) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 80 Hz.

Der auf diesen Parametern basierende Demonstrator ist in Abbildung 5.14 (a) zu sehen. Auf der linken Seite ist der Stapel aus SIP-DEAs angeordnet, der an zwei gegenüberliegenden Seiten über die Kupferbänder elektrisch kontaktiert wird. Auf der rechten Seite sind die beiden Zylinderfedern zu sehen, die das Vorspannsystem des Antriebs bilden. Dazwischen ist für den zentrischen Kraftabtrieb der Pumpenmechanismus über eine Koppelstange verbunden. Um die bewegte Masse anzupassen bzw. zu optimieren, sind im beweglichen Klemmbereich des Stapels Halterungen vorgesehen.

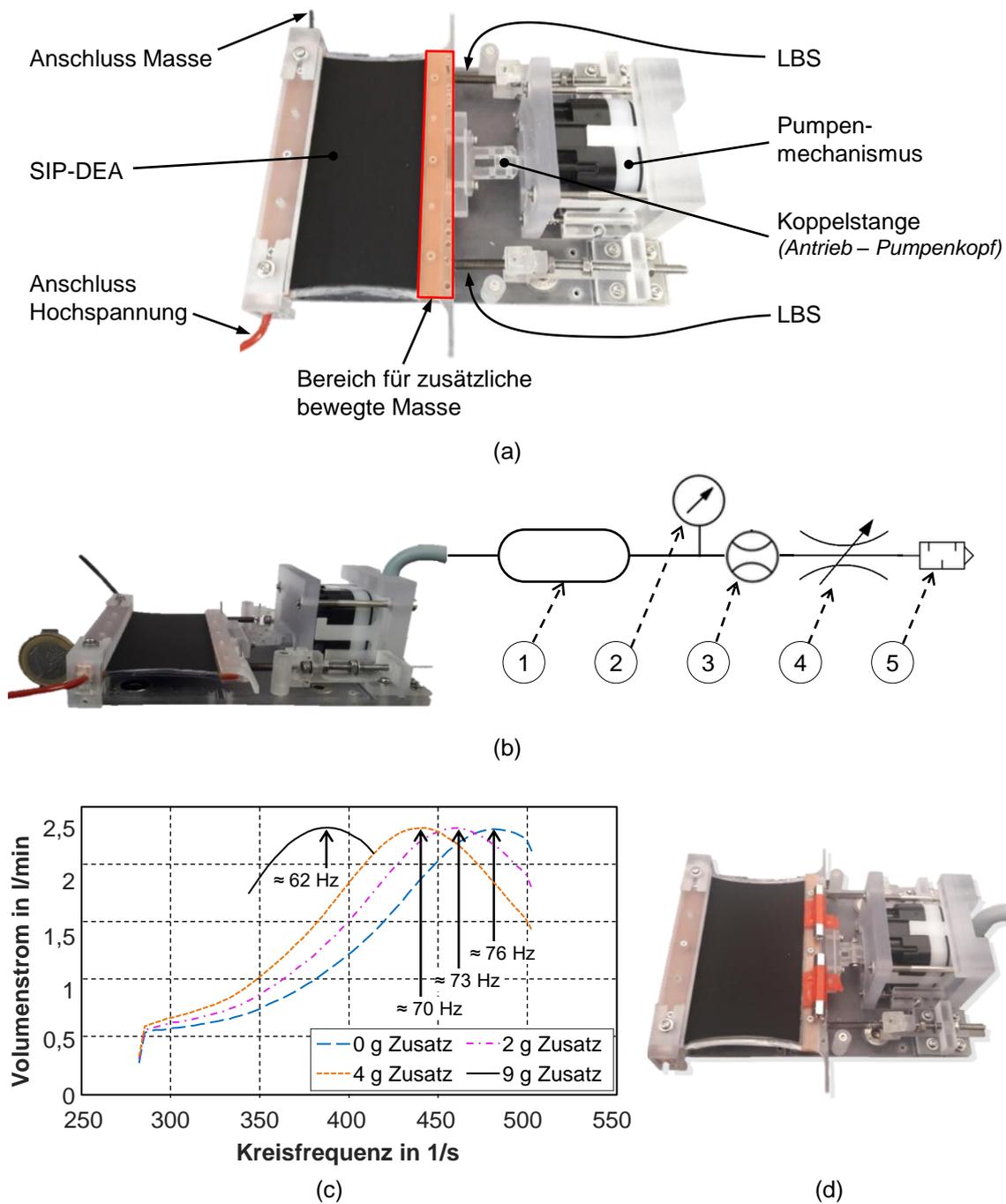


Abbildung 5.14: (a) Bild des aufgebauten Demonstrators. (b) Aufgebauter Demonstrator in der Seitenansicht mit den angeschlossenen Messgeräten als Skizze. (c) Messkurven der Optimierung durch Anpassen der bewegten Masse. (d) Massenoptimierter Demonstrator.

In Abbildung 5.14 (b) ist der flache Aufbau des Antriebssystems in der Seitenansicht zu sehen. Außerdem sind die, an den Demonstrator angeschlossenen, Messgeräte skizziert. Von der Pumpe aus wird die Luft über ein Prüfvolumen Festo crvzw-0.75 (1) zur Pulsationsreduzierung an einem Drucksensor Festo SPTW-B2R-G14-VD-M12 (2) vorbei

über einen Volumenstromsensor Honeywell AWM5104VN (3), eine komplett geöffnete Drossel Festo GRO-QS-6 (4) und über einen Schalldämpfer (5) abgeblasen. Die Dämpfung des Luftstroms durch das Prüfvolumen ist für die danach folgende Druck- und Volumenstrommessung zur Fehlerreduzierung wichtig.

Zur Aufnahme der in Abbildung 5.14 (c) gezeigten Messkurven wird der Demonstrator mit einem Ansteuersignal beaufschlagt, das bei 45 Hz startet und linear alle zehn Perioden bis zu einer Endfrequenz von 80 Hz mit einer Amplitude von 3 kV ansteigt. Dabei wird kontinuierlich der Volumenstrom aufgezeichnet, welcher als Funktion über die angelegte Kreisfrequenz dargestellt ist. Wie zu erwarten sinkt die Resonanzfrequenz des Systems mit steigender Masse. Die zuvor durchgeführte Auslegung beruht auf einer Frequenz von 67 Hz. Durch zusätzliche Massen (Abbildung 5.14 (d)) wird die Resonanzfrequenz auf 62 Hz gedrückt.

Laut Anforderungen muss pro Teilpumpe ein Volumenstrom von 3,5 l/min erreicht werden. Doch die dynamischen Eigenschaften von Rollmembran und SIP-DEA, sowie die nur schwer einschätzbaren pneumatischen Verluste im Pumpenkopf blasen die Auslegekurven auf. Dadurch entstehen Schnittpunkte zwischen den Kraftkurven der rechten und linken Seite der Gleichung. Folglich muss der Abstand zwischen der kumulierten Kraft bei Hochspannung und ohne angelegte Spannung vergrößert werden. Dies wird erreicht, indem die Anzahl der Lagen im verwendeten Stapel erhöht werden. Das Ergebnis dieser Optimierung ist in Abbildung 5.15 (a) gezeigt. Darin ist zu beobachten, dass mit sieben Doppellagenaktoren, respektive 14 SIP-DEAs, der erforderliche Volumenstrom erreicht wird. Zudem kann aus den aufgenommenen Messdaten entnommen werden, dass der Volumenstrom über die angelegte Spannungsamplitude bei konstanter Frequenz sehr gut regelbar ist (Abbildung 5.15 (b)).

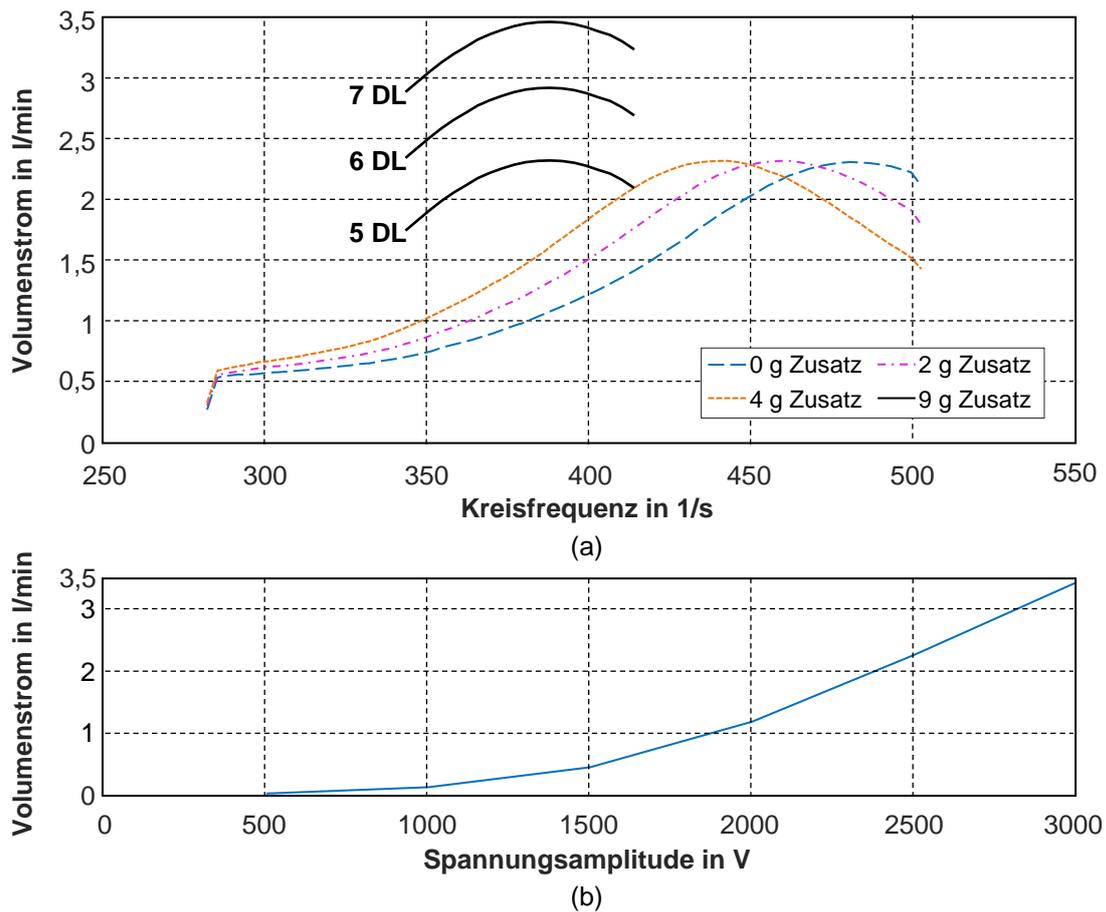


Abbildung 5.15: (a) Optimierung des Volumenstroms über die Anzahl der Lagen im Stapel. (b) Erzeugter Volumenstrom als Funktion der angelegten Spannungsamplitude.

5.2.9 Aufbau und Validierung der Pumpe

Die Teilpumpe, die auch den erforderlichen Druck erzeugen kann, wird nach dem selbigen, oben beschriebenen Verfahren ausgelegt und entworfen. Die dazugehörigen Parameter, auf deren Basis der Prototyp aufgebaut wird, sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Entwurfs- und Konstruktionsparameter des anwendungsspezifisch angepassten SIP-DEA betriebenen Pumpenprototyps.

	Symbol	Benennung	Wert	Einheit
SIP-DEA	b	Breite	90	mm
	l	Länge	38	mm
		Anzahl	46	Stk.
LBS	k	Federsteifigkeit	2,3	N/mm
	x_{vor}	Vordehnung	26	mm
		Anzahl	2	Stk.

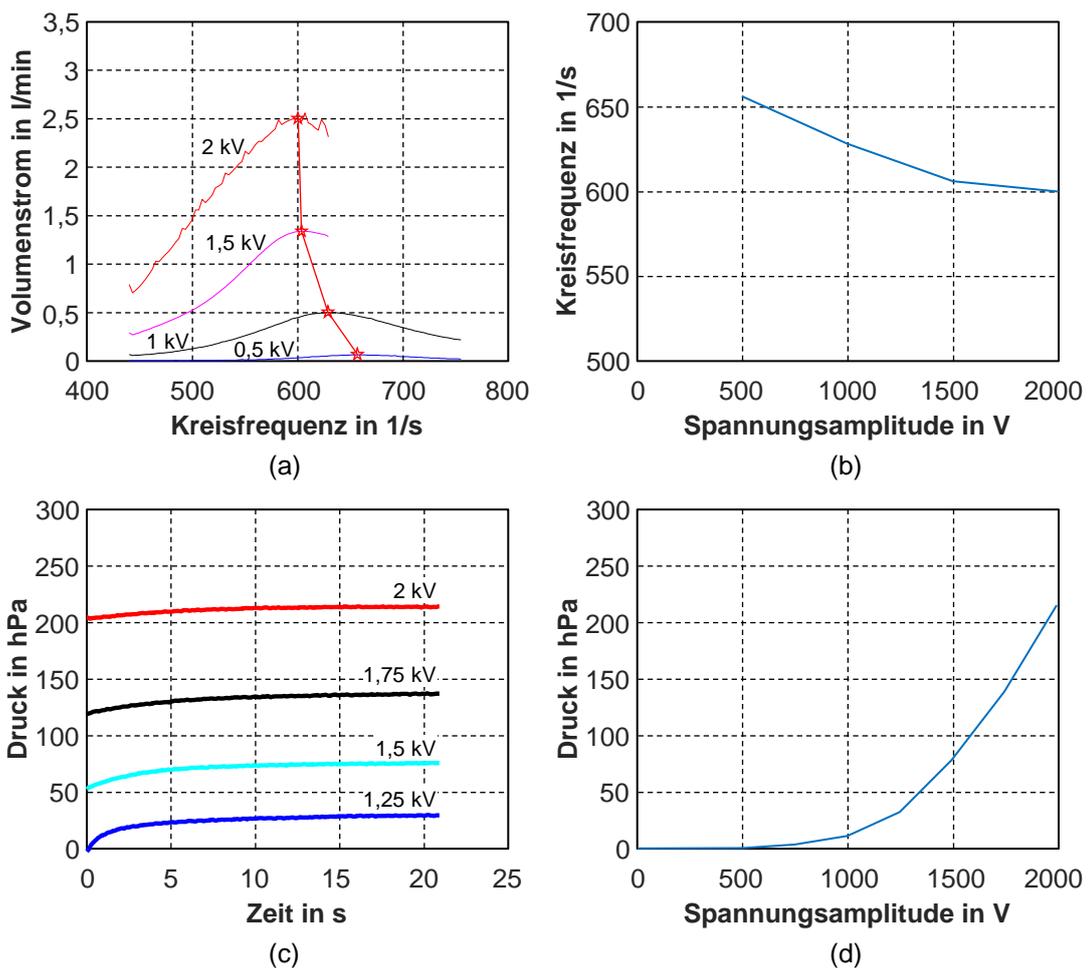


Abbildung 5.16: (a) Erzeugter maximaler Volumenstrom als Funktion der Anregungsfrequenz mit markierter Resonanzfrequenz bei verschiedenen Spannungsamplituden. (b) Resonanzfrequenz als Funktion der Spannungsamplitude. (c) Maximal erreichbarer Druck bei geschlossener Drossel bei fester Frequenz als Funktion der Zeit. (d) Maximaler Druck als Funktion der angelegten Spannungsamplitude.

Die aufgebaute Pumpe wird am selben Prüfstand validiert, wie der zuvor aufgebaute, vereinfachte Demonstrator. Die Ansteuerfrequenz mit einer Spannungsamplitude von 2 kV wird von 70 Hz linear auf 120 Hz erhöht. Die dazugehörigen, gemessenen Volumenströme sind in Abbildung 5.16 (a) dargestellt, wobei die Frequenz bei 1,5 kV und 2 kV lediglich nur bis 100 Hz erhöht wird, da ansonsten die Resonanzfrequenz schon überschritten wird. Bei diesen Versuchen ist die manuell verstellbare Drossel am Prüfstand komplett geöffnet, damit der maximal erzeugbare Volumenstrom gemessen werden kann.

Die aus diesen Messwerten extrahierte Resonanzfrequenz als Funktion der angelegten Spannungsamplitude ist in Abbildung 5.16 (b) dargestellt. Wie zu erwarten sinkt diese bei

steigender Spannungsamplitude. Da zur Geräuschminimierung eine feste Frequenz genutzt werden soll, wird die Betriebsfrequenz auf 95,5 Hz festgelegt.

In einem nächsten Versuch wird die zuvor geöffnete Drossel komplett geschlossen. Hierdurch kann der maximal erreichbare Druck experimentell ermittelt werden. Die Ergebnisse dieses Versuchs bei fester Betriebsfrequenz sind in Abbildung 5.16 (c) dargestellt. Aus dieser Grafik sowie aus Abbildung 5.16 (d) ist erkennbar, dass der Maximaldruck mit steigender Spannungsamplitude ebenfalls ansteigt.

Die Ergebnisse dieser beiden Versuchsreihen (Abbildung 5.17 (a), Abbildung 5.17 (b)) können zur Druck-Volumenstrom-Charakteristik (Abbildung 5.17 (c)), der konventionell verwendeten Leistungskurve einer Pumpe, des Pumpenprototyps zusammengefasst werden. Drei Zwischendrücke bei einer Spannungsamplitude von 2 kV werden zur Validierung der linearen Eigenschaft eingestellt und der zugehörige Volumenstrom aufgezeichnet. Hierfür wird die Drossel am Prüfstand manuell so eingeregelt, dass sich im Prüfvolumen der gewünschte Druck einstellt.

Durch das Wissen, dass maximaler Volumenstrom und maximal erreichbarer Druck quadratisch mit der angelegten Spannungsamplitude zusammenhängen, können die Werte für 3 kV extrapoliert werden und die Charakteristik in Abbildung 5.17 (c) ergänzt werden. Hier ist zu beobachten, dass die Leistung der entwickelten Teilpumpe über den Anforderungen liegt und diese somit erfüllt sind.

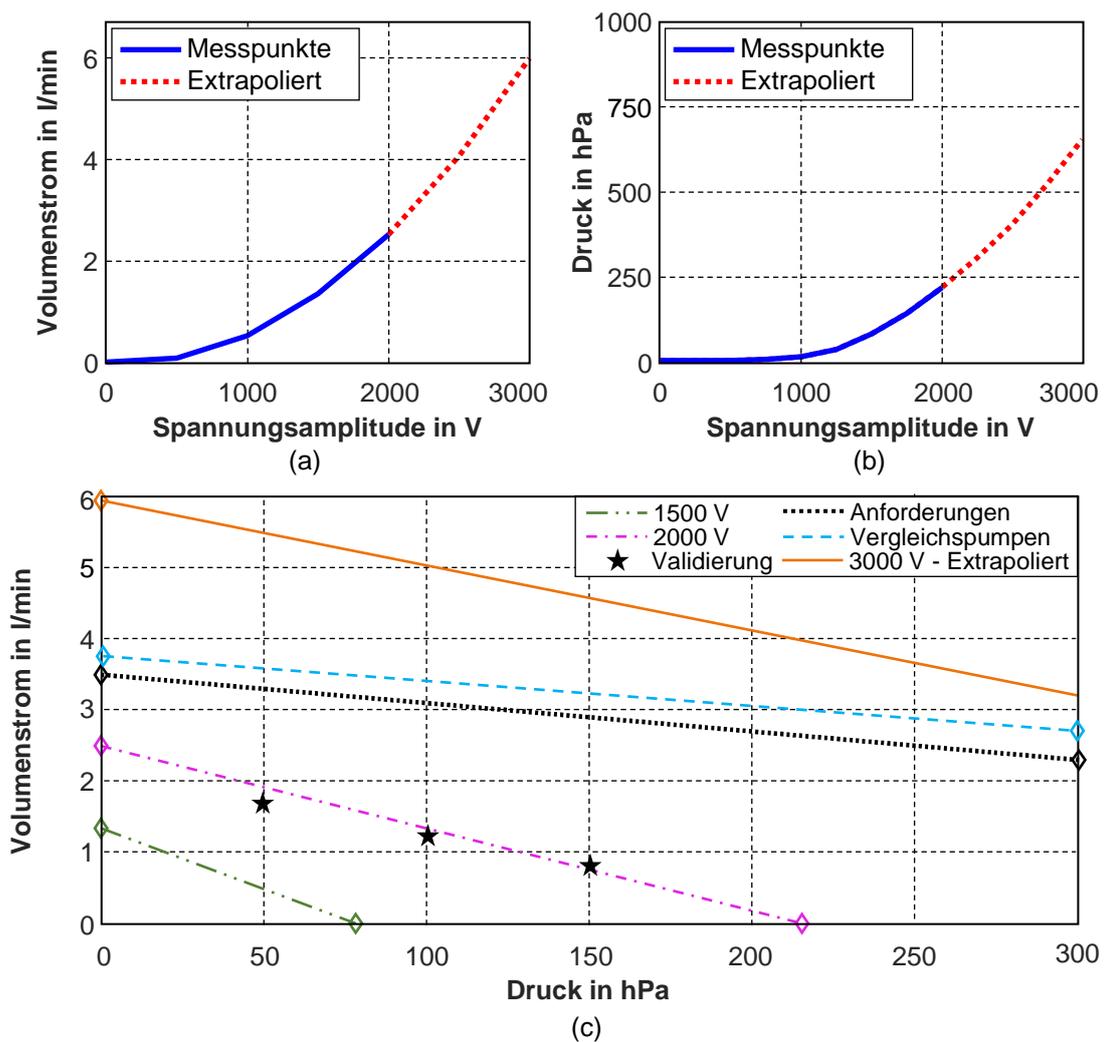


Abbildung 5.17: (a) Gemessene sowie extrapolierte Werte des maximal erreichbaren Volumenstroms als Funktion der Spannungsamplitude. (b) Gemessene sowie extrapolierte Werte des maximal erreichbaren Drucks als Funktion der Spannungsamplitude. (c) Volumenstrom-Druck-Charakteristik des entwickelten Pumpenprototyps sowie der Vergleich mit den Anforderungen.

5.3 Zusammenfassung und Fazit

Basierend auf dem validierten Modell wurde schließlich eine pneumatische Pumpe entworfen, montiert und validiert, bei dem auch die Auswirkungen der druckabhängigen Pumpenkraft berücksichtigt wurden. Die Systemleistung wurde hinsichtlich Betriebsfrequenz, maximaler Durchflussrate und maximalem Druck bewertet. Auch in diesem Fall spiegelt sich die Wirksamkeit des Entwurfs in den signifikant kleinen Abweichungen zwischen Prognose und Messung wider. Aus diesen Messungen wurde die

herkömmliche Pumpenkennlinie, d.h. die Druck-Volumenstrom-Kennlinie für das zuvor entworfene COP-DEA System bewertet.

Als zweites Beispiel wurde eine SIP-DEA basierende Pumpe anwendungsspezifisch ausgelegt, aufgebaut und validiert. Die Anforderungen wurden durch das entworfene Antriebssystem erreicht bzw. übertroffen. Sichtbar wurde bei diesem Beispiel jedoch auch, dass das verwendete Modell eine Vereinfachung des realen Systems darstellt, bei dem als dynamischer Effekt nur die Trägheit betrachtet wurde. Gerade in Bereichen mit hohen Durchflüssen werden die Einflüsse anderer dynamischer Effekte immer größer, was sich negativ auf die Genauigkeit des vereinfachten Modells auswirkt.

Mit dem in beiden Fällen entwickelten DEA-Pumpenkonzept kann der Systemdurchfluss mit einer festen Antriebsfrequenz geregelt werden. Ein optimiertes Design hat das Potenzial im Vergleich zu herkömmlichen Systemen kompakter und leiser zu sein. Folglich haben die entwickelten Prototypen das hohe Leistungsvermögen der DEA-Technologie in dieser Kategorie von Anwendungen gezeigt.

Um die Leistung der hier entworfenen Systeme mit derer in [113]–[115] zu vergleichen, sind die wichtigsten Parameter wie Betriebsspannung, Frequenz, Hub, Durchfluss und maximaler Druck in Tabelle 5.4 gegenübergestellt. Im Vergleich zu den in der Literatur erwähnten Pumpen erzeugt die in dieser Arbeit entwickelte Pumpe bei der geringsten benötigten Spannung den höchsten Druck und höchsten Volumenstrom.

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der wichtigsten Pumpenparameter des hier entworfenen und aufgebauten Pumpenprototyps sowie der drei DEA betriebene Pumpendemonstratoren aus der Literatur.

Benennung	Entwickelte Prototypen		[115]	[113]	[114]
	COP-DEA	SIP-DEA			
Spannung in kV	3	3	4,515	4,2	5
Frequenz in Hz	98,11	95,5	77	3	0,25
Hub in mm	4,34	-	~ 5	0,42	-
Maximaler Volumenstrom in l_N/min	1,48	~ 6	0,9	$2,52 \cdot 10^{-3}$	0,84
Maximaler Druck in mbar	192,95	~ 650	30,5	-	6,8

Ein wichtiger nächster Schritt der vorgestellten Forschung besteht darin, die Hochspannungselektronik, das Antriebssystem und den Pumpenmechanismus zu einem hochintegrierten, kompakten und marktreifen System zu kombinieren. Dabei kann das System auch mit Steuerungs- und Selbsterkennungsalgorithmen kombiniert werden, die einen geregelten, aber sensorfreien Betrieb ermöglichen. Kernpunkt dieser Weiterentwicklung ist ein robustes zuverlässiges Konzept zum Aufbau mehrerer Lagen. Wie beim elektrischen Schaltschütz in Kapitel 3 kommen auch bei den beiden DEA basierten Pumpen mehrere aktive Lagen zur Kräfteskalierung zum Einsatz. Aus diesem Grund wird im nächsten Kapitel auf ein optimiertes Mehrlagenkonzept eingegangen.

Kapitel 6 MEHRLAGENKONZEPT

In den Kapiteln 3, 4 und 5 wurden Anwendungen auf Basis von Membranaktoren vorgestellt. Bei allen müssen zur Kraftskalierung mehrere Lagen mechanisch parallelgeschaltet werden. Auch bei Sensoren müssen häufig mehrere Lagen zur Sensitivitätssteigerung gestapelt werden. Probleme liegen jedoch in der zuverlässigen und wirtschaftlichen elektrischen Kontaktierung der innenliegenden Elektrodenflächen. Ein weiteres Problem besteht am Übergang zwischen dem weichen Elastomer, dem mehrlagigen Antrieb oder Sensor und der steifen Strukturbauteile zur Kraftübertragung sowie bei den elektrischen Leitungen, wie z.B. Kupfer. Da das Mehrlagenkonzept sowohl für Antriebe als auch für Sensoren angewendet werden kann, werden beide im Folgenden als DE-Wandler bzw. Wandler zusammengefasst. Dabei ist auf wenigstens einer Seite einer jeden Lage eine elektrisch kontaktierbare und leitfähige Elektrodenlage aufgebracht. Das nachfolgend vorgestellte, optimierte und zuverlässig herstellbare Mehrlagenkonzept wurde 2019 mit der Nummer 10 2019 128 822 beim Deutschen Patentamt eingereicht und befindet sich zurzeit in der Prüfung [128].

6.1 Stand der Technik

Aus der Literatur sind DE-Wandler bekannt, bei denen mehrere dünne, circa 20 bis 100 μm dicke Folien, die vorzugsweise aus Silikon oder einem eine Acrylgruppe aufweisenden Kunststoff gebildet sind, auf wenigstens einer Seite mit einem elektrisch leitfähigen Material zur Bildung von Elektroden beschichtet und danach laminiert werden. Eine elektrische Kontaktierung erfolgt, indem einzelne Elektrodenlagen, die circa 2 μm dick sind, kontaktiert werden, dazu erforderliche Kontaktleitungen zusammengeführt und an einen Pol einer Spannungsquelle oder einem Messgerät angeschlossen werden. Die gängigsten Möglichkeiten die einzelnen Lagen nach außen hin zusammenzuführen sind das

Durchstechen, das stirnseitige Kontaktieren, das Kontaktieren mit Kupferföhnchen und das Kontaktieren durch Falten. Diese Vorgehensweisen werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

6.1.1 Kontaktieren durch Stechen

Eine oft genutzte Methode mehrlagige Wandler durchgängig zu kontaktieren ist in Abbildung 6.1 skizziert. Hierbei wird als erster Schritt die Folie beschichtet und zu einem Stapel laminiert (Abbildung 6.1 (a)). Anschließend wird eine durchgängige Öffnung eingebracht (Abbildung 6.1 (b)), die mit einer leitfähigen Füllmasse verschlossen wird (Abbildung 6.1 (c)). In diese Füllmasse wird als letzter Schritt, wie in Abbildung 6.1 (d) gezeigt, ein leitfähiger Stab eingebracht, der die Elektrodenflächen eines elektrischen Potentials an einem Punkt zusammenführt. Eine weitere Möglichkeit ist das direkte Durchstechen mit einem leitfähigen Stab ohne Öffnen und Auffüllen (Abbildung 6.1 (e)).

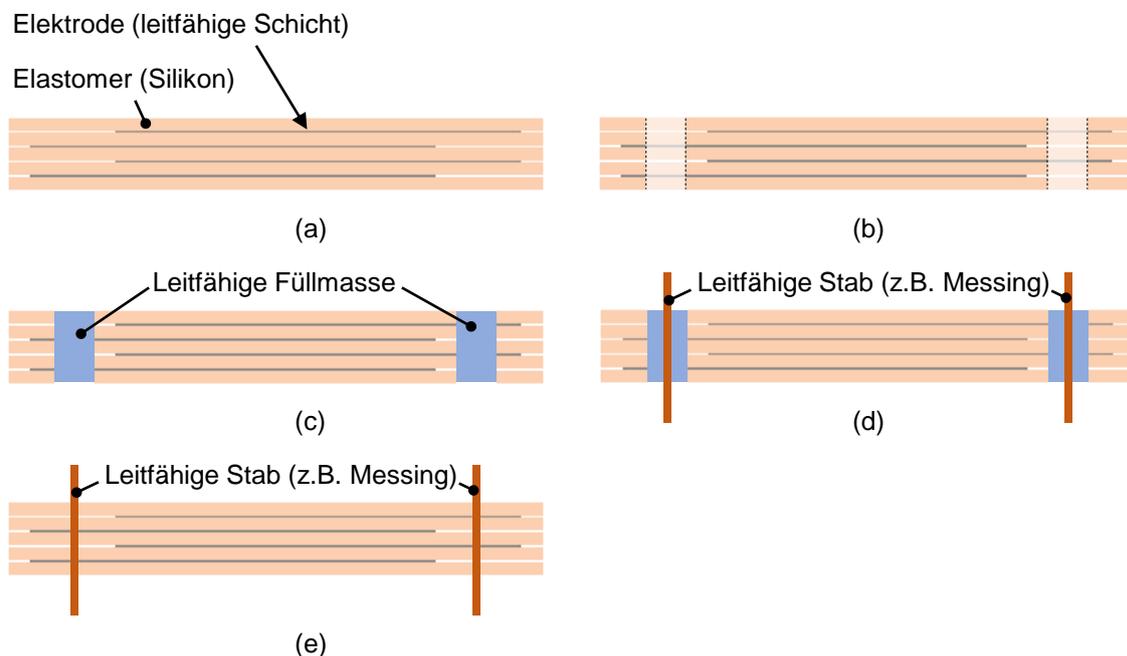


Abbildung 6.1: (a) Laminiertes DE-Wandler. (b) DE-Wandler mit eingebrachten Durchgangsöffnungen und (c) mit elektrisch leitfähig aufgefüllten Öffnungen. (d) Leitfähiger Stab als Kontaktierung in leitfähiger Füllmasse. (e) Leitfähiger Stab als Kontaktierung direkt in den, zum Stapel laminierten, DE-Wandler eingebracht.

Der kritische Punkt der gezeigten Möglichkeiten ist der Übergang von Elektrode zu Füllmasse, bzw. von Elektrode zu Stab. Wie eingangs erwähnt, ist die leitfähige Elektrode eine sehr dünne, wenige μm dicke Schicht. Im Zuge des Durchstechens bzw. Lochens und Verfüllens entsteht im Optimalfall ein Flächenkontakt rund um den leitfähigen Stab oder

die Füllmasse, wobei die Breite des Ringkontaktes der leitfähigen Schichtdicke entspricht. In der Realität entsteht jedoch eher ein Linienkontakt mit Unterbrechungen. Dies hat eine unzuverlässige Kontaktierung sowie einen hohen Kontaktwiderstand zur Folge. Neben dem Nachteil der unzuverlässigen Kontaktierung entsteht auch keine robuste Verbindung. Zwischen Stab und Elektrode, bzw. Stab und Füllmasse, entsteht eine reine kraftschlüssige Verbindung, die auf Dauer Ermüdungserscheinungen zeigen wird.

6.1.2 Stirnseitig kontaktieren

Diese Art der Kontaktierung wird oft im Bereich der Stapelaktoren verwendet, kann jedoch auch bei Membranaktoren, oder allgemein bei DE-Wandlern, zum Einsatz kommen [18], [56], [64], [66]. Hierbei wird der laminierte Stapel (Abbildung 6.2 (a)) stirnseitig so geschnitten, dass die Elektrode frei liegt (Abbildung 6.2 (b)). Diese freiliegenden Elektroden können abschließend, wie in Abbildung 6.2 (c) gezeigt, mit einem leitfähigen Material zusammengeführt werden.

Ähnlich dem Durchstechen entsteht auch hier, aufgrund der Beschichtungsdicke, nur eine sehr kleine Kontaktfläche. Diese weist wiederum Nachteile bei der Zuverlässigkeit und Robustheit auf und führt zu einem hohen Übergangswiderstand. Dieser ist besonders im Sensorbereich sehr nachteilig.

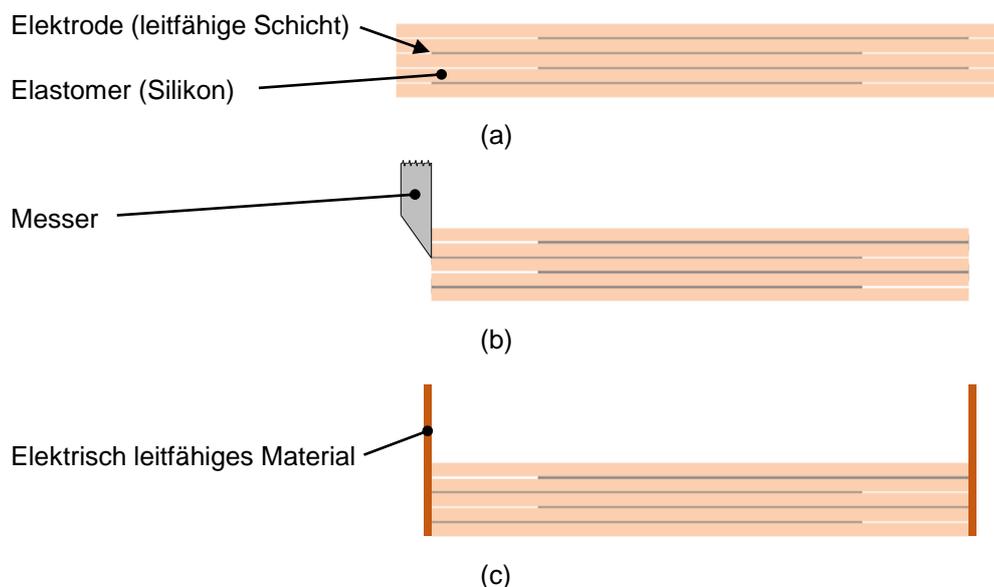


Abbildung 6.2: (a) Laminiertes DE-Wandler. (b) Stirnseitig durch Schneiden freigelegte Elektrode. (c) Stirnseitig kontaktierter DE-Wandler.

6.1.3 Kupferband als Kontaktierung

Vor dem Laminieren wird bei dieser Art der Stapelkontaktierung auf jede beschichtete Folie (Abbildung 6.3 (a)) ein Kupferband aufgebracht (Abbildung 6.3 (b)), welches vorzugsweise auf zwei gegenüberliegenden Seiten aufgetragen wird (Abbildung 6.3 (c)). Die so entstehenden Kupferfähnchen am Stapel (Abbildung 6.3 (d)) können nach dem Laminieren zum DE-Wandler extern verlötet oder geklemmt werden. Diese Art der Kontaktierung ist z.B. aus Kapitel 3 und [129] bekannt.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass jede Lage zuverlässig und flächig kontaktiert ist. Jedoch ist dieser Prozess nur im Labormaßstab zu realisieren, bzw. in einem später massenskalierbaren Herstellungsprozess nur sehr schwer wirtschaftlich zu implementieren. Durch das zusätzliche Einbringen von Kupferbändern im Lagenkonstrukt des DE-Wandlers nimmt an dieser Stelle die Gesamtdicke zu. Dies führt gerade bei einer hohen Lagenanzahl zu einer inhomogenen mechanischen Krafteinleitung, was sich in der Performance sowie der Dauerfestigkeit widerspiegelt.

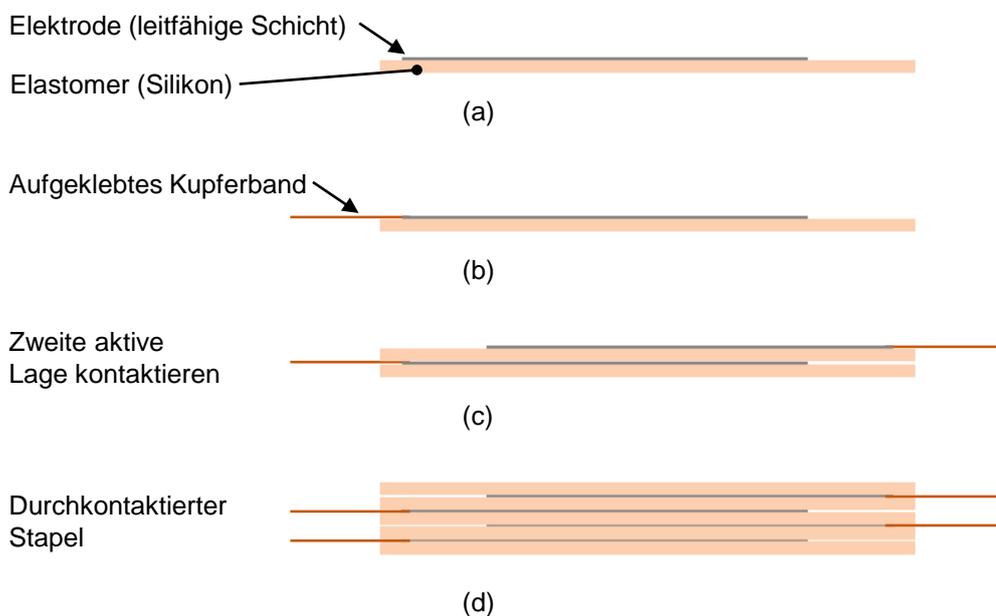


Abbildung 6.3: (a) Einzelne elektrisch leitfähig beschichtete Elektrode. (b) Einzelne aktive Lage mit aufgebrachtem Kupferband zur Kontaktierung. (c) Zweite aktive, zuvor auf der Gegenseite mit Kupferband kontaktierte, Lage aufgebracht. (d) Laminierter Stapel mit gegenseitig angebrachten, zur Kontaktierung benötigten, Kupferbändern.

6.1.4 Gefaltet kontaktieren

Diese Art der Kontaktierung wird beispielsweise in [69] verwendet. Hierbei wird der Silikonfilm (Abbildung 6.4 (a)) in einem langen Streifen beidseitig mit Elektroden versehen (Abbildung 6.4 (b)). Durch das anschließende Falten in Abbildung 6.4 (c) entsteht die Stapelstruktur. Diese kann, wie in Abbildung 6.4 (d) gezeigt, durch z.B. ein einzelnes Kupferband an jeder Elektrode oder durch stirnseitiges Aufbringen eines leitfähigen Materials kontaktiert werden (Abbildung 6.4 (e)).

Da die Strecke bis zur letzten Lage sehr lang sein kann, hat die, in Abbildung 6.4 (d) gezeigte, Methode einen hohen Gesamtwiderstand zur Folge. Bei der Variante in Abbildung 6.4 (e) entsteht, wie bei dem stirnseitigen Kontaktieren, jeweils nur ein dünner Linienkontakt. In der Verwendung als Membranwandler kann dieses Material zur Kontaktierung sehr steif sein. Bei Stapelaktoren hingegen muss dieses leitfähige Material die gesamte Dehnung aushalten, was Einbußen in der Dauerfestigkeit mit sich bringt. Vorteil beider Varianten ist die einmalige Kontaktierung von nahezu unbegrenzt vielen Lagen.

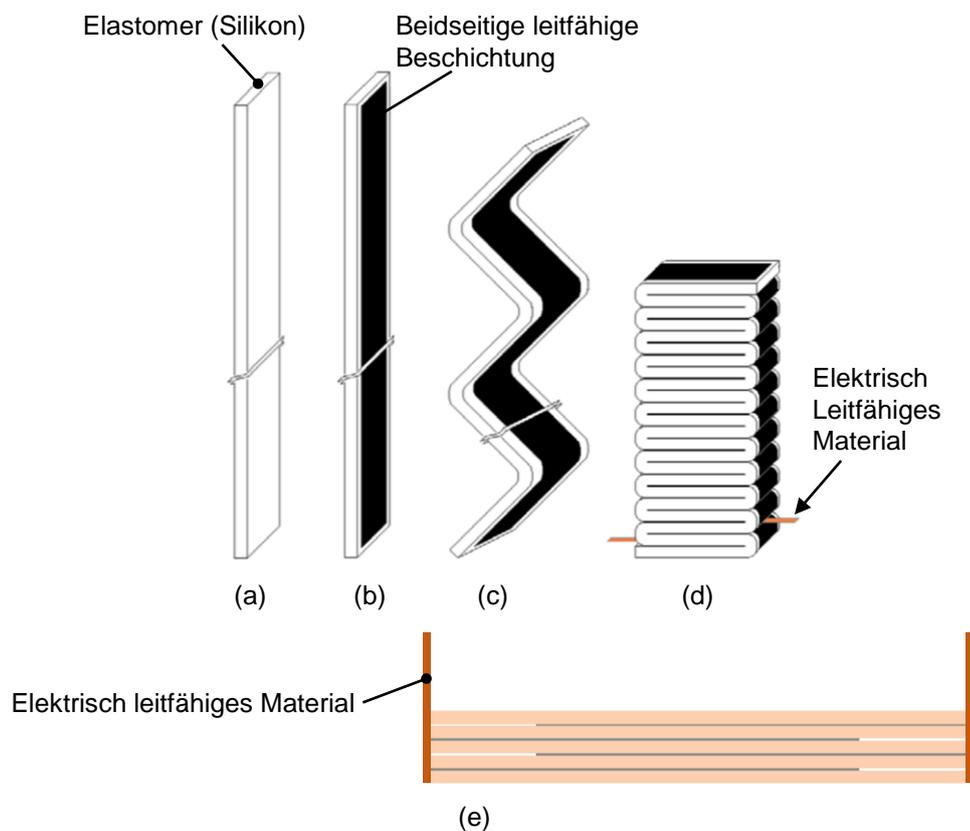


Abbildung 6.4: (a) Silikonfilm, (b) der beidseitig beschichtet und (c) gefaltet wird. (d), (e) Kontaktierter gefalteter DE-Wandler.

6.2 Optimierte Mehrlagenkonzept

Die beschriebenen Möglichkeiten zur Kontaktierung eines Stapels haben vor allem in der Verwendung als Membranwandler einige Nachteile. Der nachfolgenden Optimierung liegt somit die Aufgabe zugrunde, einen mehrlagigen dielektrischen Wandler zu entwerfen, der besonders einfach aufgebaut, dauerhaft zuverlässig und ausfallsicher benutzbar ist. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Membranwandler, die laut Kapitel 2.3.2 auch als Sensor eingesetzt werden können.

6.2.1 Aufbau

Die Optimierung besteht darin, dass in dem Stapel mindestens zwei Öffnungen vorhanden sind, in welchen sich Kontaktelemente befinden. Die Öffnung verläuft dabei senkrecht zur Lagenebene und kann als Durchgangskanal oder Sackloch ausgeführt sein. Benachbarte Elektrodenlagen sind dabei mit unterschiedlichen Kontaktelementen leitfähig verbunden. Diese Verbindung kann form-, stoff- oder kraftschlüssig, bzw. eine Kombination aus mehreren Verbindungsarten sein. Da nur jede zweite Lage mit demselben Kontaktelement leitend verbunden ist, entstehen somit die nutzbaren aktiven Lagen.

Das Kontaktelement ragt in die Öffnung hinein oder besteht aus einer Beschichtung der Innenseite des Loches. Die Öffnungen können dabei gleich oder unterschiedlich ausgeformt sein. Diese Ausformung kann rotationssymmetrisch sein, aber auch eine rechteckige, quadratische oder sternförmige Grundform aufweisen. Durch einen redundanten Aufbau, d.h. die Verwendung von mehreren Kontaktelementen mit demselben Potenzial, kann ein, in besonderer Weise, ausfallsicheres System hergestellt werden.

Neben der elektrischen Kontaktierung kann das Kontaktelement, je nach Ausführung, auch zur Stabilisierung des Stapels genutzt werden. In Einzelfällen reicht diese Stabilisierung aus, damit die Kraftübertragung des Stapels auf die äußere Rahmenstruktur eines Antriebs- bzw. Sensorsystems durch die Kontaktelemente übernommen wird.

Nach dieser Beschreibung des optimierten Mehrlagenkonzeptes sind mehrere Ausführungen möglich. Diese werden in Kapitel 6.2.3 beschrieben und näher erläutert.

6.2.2 Herstellungsprozess

Neben dem Konzept der Kontaktierung selbst, ist auch die Möglichkeit eines wirtschaftlichen und stabilen Prozesses zur Herstellung eines mehrlagigen DE-Wandlers

von essenzieller Bedeutung. Dabei können zuerst mehrere, mit einer leitfähigen Schicht versehene, Lagen zu einem Stapel laminiert werden, wobei im Nachhinein die Öffnungen zur Aufnahme der Kontaktelemente eingebracht werden oder die einzelnen leitfähig beschichteten Lagen sind schon vor dem Laminieren mit einer Öffnung versehen.

Der Vorteil des nachträglichen Einbringens der Öffnung für die Kontaktelemente ist, dass standardisierte Halbzeuge zur Laminierung genutzt werden können. Bei der anderen Variante werden hingegen unterschiedliche Halbzeuge benötigt. Diese können durch einfaches Stanzen hergestellt werden. Bei dem nachträglichen Eintragen der Öffnung muss jedoch auf abtragende Herstellungsverfahren, z.B. Laserablation, zurückgegriffen werden, womit nicht jedes, in Kapitel 6.2.3 aufgeführte, Ausführungsbeispiel herstellbar ist.

6.2.3 Ausführungsbeispiele

Das zuvor beschriebene, optimierte Mehrlagenkonzept kann in mehreren Ausgestaltungen ausgeführt werden. Im Folgenden wird unterschieden zwischen Decklagen, Elektrodenbedruckung, elektrischer Kontaktierung und mechanischer Kraftübertragung. Als Beispiel wird in den Skizzen auf einen Stapel aus SIP-DEAs Bezug genommen, wobei die Ausführungen aber auch auf COP-DEAs oder andere Bauformen von DEAs übertragen werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die schematischen Darstellungen aufgrund der besseren Erkennbarkeit nicht maßstabsgetreu skizziert sind.

6.2.3.1 Decklagen

Ein Stapel aus mehreren SIP-DEAs kann, wie in Abbildung 6.5 (a) dargestellt, in ebener Richtung in zwei äußere inaktive Bereiche, einen Kontaktbereich A, einen Kontaktbereich B und einen aktiven Bereich unterteilt werden. Die inaktiven Bereiche beinhalten keinerlei leitfähiges Material und dienen als Sicherheitsabstand für die Hochspannung bei Aktivierung bzw. schützen vor äußeren Einflüssen. Bei den Kontaktbereichen liegen nur Elektroden vor, die auf dasselbe Potenzial gebracht werden sollen, bzw. elektrisch zusammen angeschlossen werden. Im Normalfall ist somit abwechselnd eine Elektrode im Kontaktbereich A und die nächste im Kontaktbereich B zu finden. Im aktiven Bereich ist jede Stelle des Dielektrikums beidseitig mit leitfähiger Beschichtung in Berührung. Dieser wird, wie der Doppelpfeil in Abbildung 6.5 (a) anzeigt, bei Aktivierung bzw. durch Einwirkung einer äußeren Kraft gedehnt. In diesen, hier gezeigten, Ausführungsformen steht der Kontaktbereich A fest und der Kontaktbereich B bewegt sich. Dies ist aufgrund

der besseren Übersichtlichkeit so gewählt. Die beiden Kontaktbereiche können auch beide feststehen oder auf dem beweglichen Ende sitzen.

In Dickenrichtung können aktive Lagen (1) und Decklagen (2) unterschieden werden. Bei den aktiven Lagen ist beidseitig eine leitfähige Schicht aufgetragen, um die bestimmungsgemäße Funktion abbilden zu können. Decklagen hingegen bilden einen Schutz gegen äußere Einflüsse, bzw. schützen den Benutzer vor der angelegten Hochspannung an den aktiven Lagen.

Die Anordnung kann in drei verschiedenen Ausgestaltungen erfolgen. In einer Variante befindet sich beidseitig eine Decklage (Abbildung 6.5 (a)), bei einer zweiten nur einseitig (Abbildung 6.5 (b)) und in einer dritten ist keine Decklage vorhanden (Abbildung 6.5 (c)).

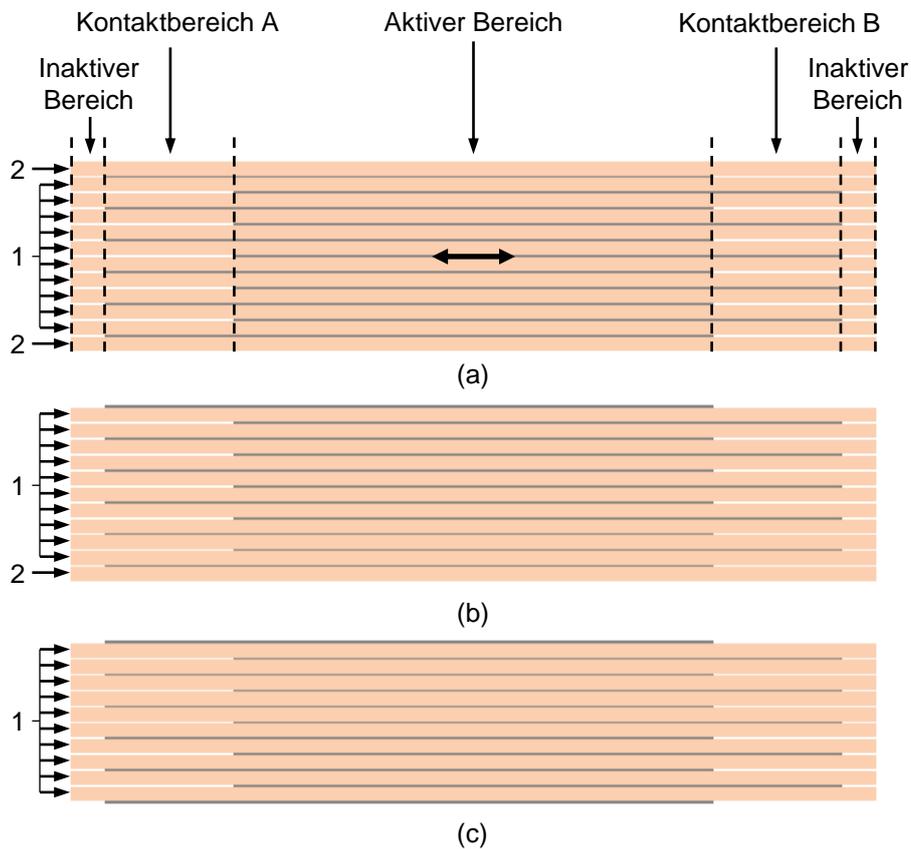


Abbildung 6.5: Ausgestaltungsformen mit (a) beidseitiger Decklage, (b) einseitiger Decklage und (c) ohne Decklage.

Im weiteren Verlauf wird nur noch die Variante mit einseitiger Decklage verwendet (Abbildung 6.5 (b)). Die verschiedenen Ausführungsbeispiele sind jedoch auch auf jede andere Variante anzuwenden.

6.2.3.2 Elektrode

Zur Erstellung einer aktiven Lage, muss das Dielektrikum beidseitig mit einer leitfähigen Schicht versehen sein. Als Detailansicht der Abbildung 6.6 (a) ist dies in Abbildung 6.6 (b) vergrößert zu sehen. Dabei ergeben sich durch das Stapeln der einzelnen Lagen zwischen zwei Silikonfolien immer zwei Elektroden. Dies hat zur Folge, dass jede Folie beidseitig beschichtet werden muss. Wie schon in [107] gezeigt, muss nicht jede Lage doppelt bearbeitet werden, denn eine innenliegende Elektrode kann für die beiden angrenzenden aktiven Lagen genutzt werden. Dadurch ergibt sich eine einzelne elektrisch leitfähige Schicht, die doppelt genutzt wird (Abbildung 6.6 (c)). Der Hauptvorteil der gemeinsam genutzten Elektrode ist, dass ein Prozessschritt bei der Herstellung wegfällt.

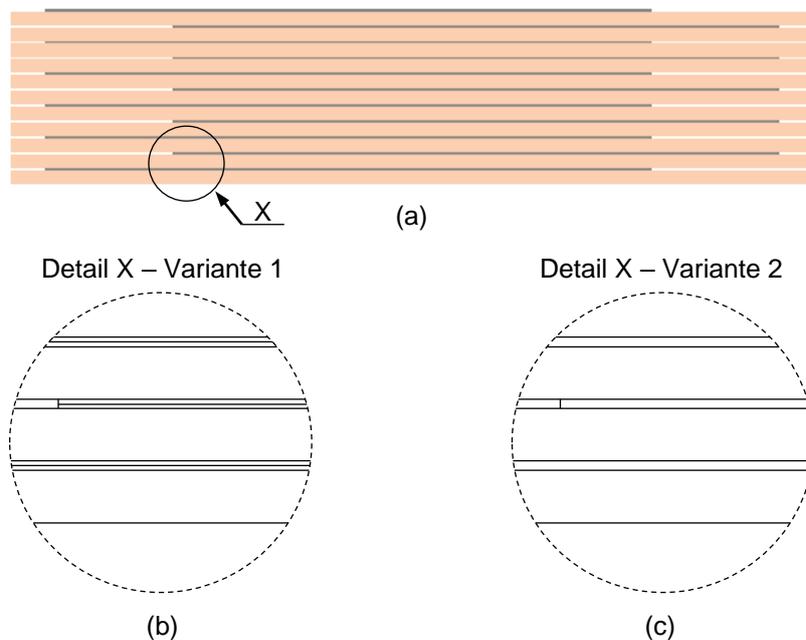


Abbildung 6.6: (a) Übersicht eines Stapels mit Detailmarkierung. (b) Detailansicht mit doppelt beschichteten Silikonfolien. (c) Detailansicht mit einfacher, doppelt genutzter Beschichtung.

Im weiteren Verlauf wird nur noch die Variante mit einfacher, doppelt genutzter Elektrode dargestellt (Abbildung 6.6 (c)). Die folgenden Ausgestaltungen sind jedoch auch auf die andere Variante, die doppelt gedruckte Elektrode, in Abbildung 6.6 (b) übertragbar.

6.2.3.3 Öffnung

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Senkung des Übergangswiderstandes wird die Kontaktfläche, im Vergleich zum Stand der Technik, vergrößert. In den nachfolgenden, fünf

schematischen Darstellungen einiger Ausführungsformen ist die Öffnung immer als Sackloch skizziert, kann jedoch auch als Durchgang gestaltet werden.

Die in Abbildung 6.7 (a) gezeigte Variante mit der Bezeichnung Doppeltreppe besteht aus einer in Dickenrichtung verjüngenden Öffnung. Im vorliegenden Fall ist diese rotationssymmetrisch dargestellt, kann jedoch auch andere Grundformen aufweisen. Durch die treppenförmige Öffnung der paarweisen Lagen werden die zu kontaktierenden Elektroden ringförmig freigelegt.

Abbildung 6.7 (b) zeigt eine Abwandlung der ersten Variante. Dabei werden die Löcher in Dickenrichtung kleiner, haben jedoch einseitig eine gemeinsame Kante. Dabei wird die Elektrode bei runden Öffnungen als Sichelform freigelegt. Diese Variante ist vor allem für eine große Anzahl von Lagen geeignet, da sie im Vergleich zur ersten Variante etwas platzsparender ist.

Bei der dritten möglichen Variante in Abbildung 6.7 (c) ist die gleiche Öffnung versetzt zu dem darüberliegenden Lagenpaar angeordnet. Dadurch entsteht bei kreisrunden Löchern ein schiefer Zylinder. Die Elektroden werden dadurch für die spätere Kontaktierung in Sichelform großflächig freigelegt. Diese Variante ist bei der Herstellung mit nachträglichem Abtrag nach dem Laminieren nicht umsetzbar.

Eine Abwandlung des schiefen Zylinders ist die Wellenform in Abbildung 6.7 (d). Die gleiche Öffnung wird dabei wellenförmig versetzt. Denkbar wäre z.B. auch eine spiralförmige Anordnung. Diese Methode begrenzt nicht die Anzahl der Lagen, da die Öffnung immer in einem bestimmten Bereich bleibt. Auch diese Art der Öffnung ist nachträglich nicht in einen laminierten Stapel durch Abtragen einzubringen.

Abbildung 6.7 (e) zeigt eine separate Öffnung zu jeder Elektrode. Diese können später zusammengefasst und gemeinsam kontaktiert werden. Denkbar wäre bei dieser Art der Öffnung jedoch auch, dass jede aktive Lage bei Bedarf separat angesteuert werden kann.

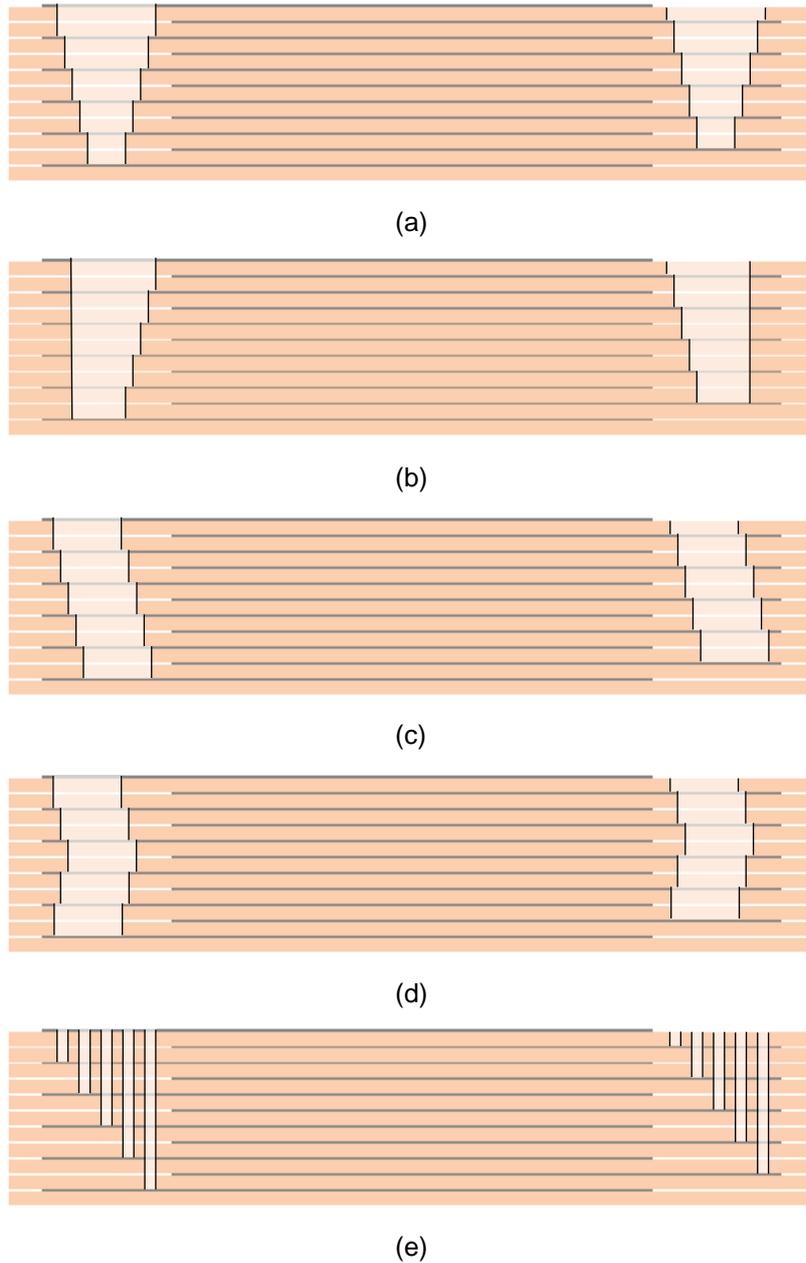


Abbildung 6.7: Verschiedene Ausführungsformen der Öffnungen. (a) Doppeltreppe. (b) Treppe. (c) Schiefer Zylinder. (d) Wellenöffnung. (e) Zahnöffnungen.

Die in Abbildung 6.7 gezeigten Ausgestaltungen des Aufbaus des optimierten Mehrlagenkonzeptes sind nur ein paar wenige Beispiele. Nachfolgend wird die, in Abbildung 6.7 (a) gezeigte, Doppeltreppe als Basis für die elektrische Kontaktierung und mechanische Kraftanbindung genommen. Die Beispiele sind jedoch meist auch auf die anderen Beispiele übertragbar.

6.2.3.4 Elektrische Kontaktierung

Für jede, der in diesem Kapitel beschriebenen, Möglichkeit den DEA Stapel elektrisch zu kontaktieren, ist nachfolgend in Abbildung 6.8 eine Ausgestaltungform dargestellt. Darunter fällt eine stoffschlüssige Verbindung, eine Kombination aus stoff- und formschlüssiger Kontaktierung und eine kraftschlüssige Kontaktierung.

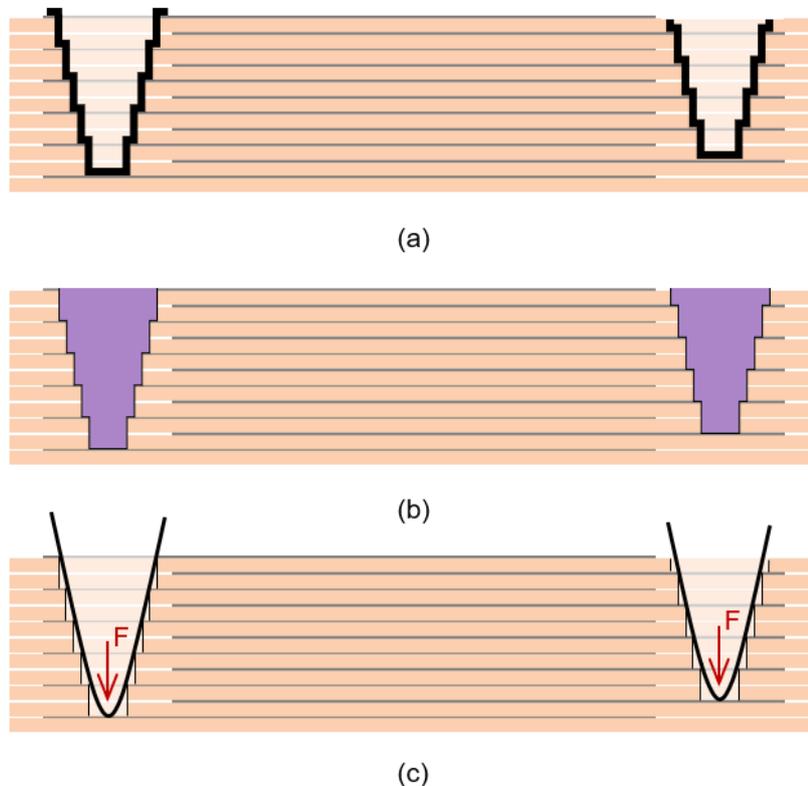


Abbildung 6.8: Auswahl an Ausgestaltungsbeispielen für die elektrische Kontaktierung bei der Doppeltreppenöffnung. (a) Beschichtete Innenflächen. (b) Elektrisch leitfähige Füllmasse. (c) Kraftschlüssig über ein zusätzliches Bauteil.

Bei der in Abbildung 6.8 (a) gezeigten stoffschlüssigen Verbindung wird die Innenseite der Öffnung mit einer leitfähigen Beschichtung versehen. Abbildung 6.8 (b) zeigt eine elektrisch leitfähige Füllmasse, mit der die Öffnung aufgefüllt werden kann. Abhängig von der verwendeten Füllmasse, kann eine stoffschlüssige Kontaktierung hergestellt werden. In jedem Fall werden hierbei die Elektroden formschlüssig kontaktiert. Die dritte Variante in Abbildung 6.8 (c) ist die kraftschlüssige Verbindung. Hierbei wird z.B. ein Metallband durch eine externe Kraft F in die Öffnung gedrückt. Somit werden die scharf gezeichneten Kanten etwas abgeflacht und die Elektrodenflächen werden elektrisch leitfähig kontaktiert.

6.2.3.5 Kraftübertragung

In einer besonderen Ausführungsform des beschriebenen, optimierten Mehrlagenkonzeptes ist eine Ansteuerplatine sowie eine optionale Trägerplatte vorgesehen, zwischen denen der Stapel angeordnet ist. Eine Verbindung zwischen der Ansteuerplatine, der Trägerplatte und einem Kontaktelement kann stoff-, kraft- und formschlüssig erstellt werden. Dabei wird eine Kombination aus elektrischer Kontaktierung und mechanischer Kraftübertragung auf die Strukturbauteile des Systems erreicht.

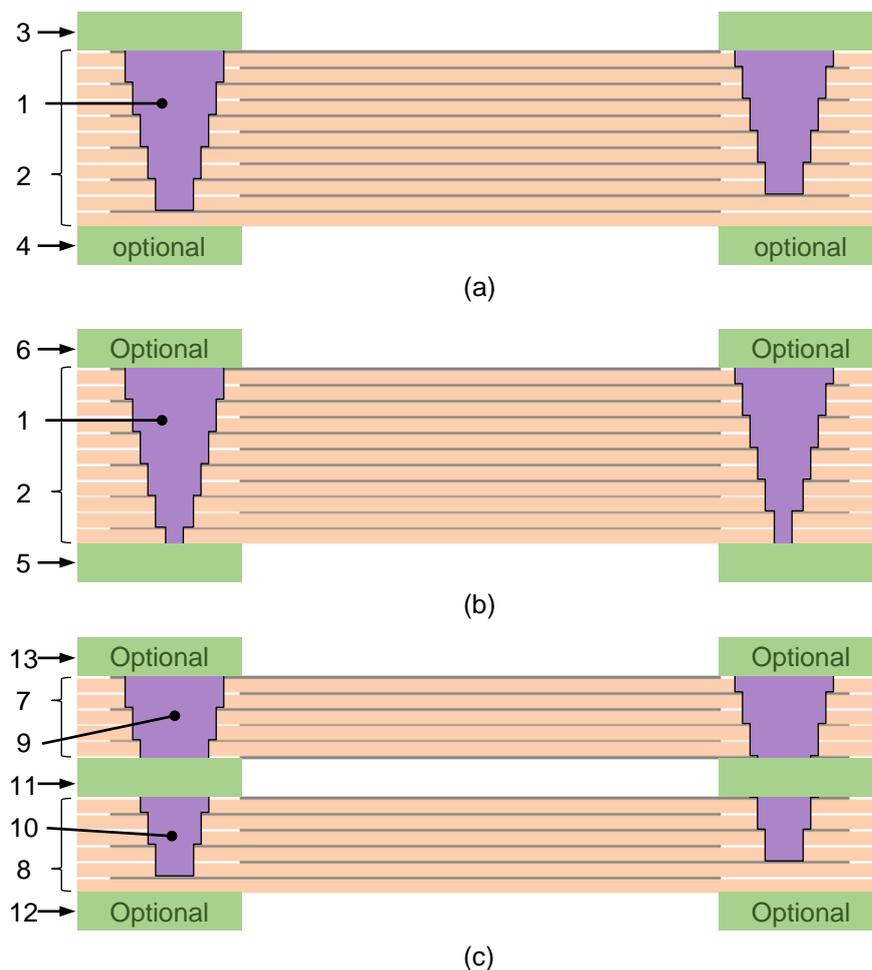


Abbildung 6.9: Stoffschlüssige Kraftübertragung (a) mit Sackloch, (b) mit Durchgangsloch und (c) mit mittiger Krafteinleitung zur Reduzierung von ungewollten Momenten.

In einer ersten Ausgestaltung in Abbildung 6.9 (a) wird die Verbindung stoffschlüssig mit dem Kontaktelement (1) des Stapels (2), in diesem Fall mit der Füllmasse, verbunden. Dabei ist die Öffnung als Sackloch ausgeführt und die Ansteuerplatine (3) wird auf das jeweilige Kontaktelement (1) geklebt. Auf der, in Dickenrichtung gegenüberliegenden, Seite kann optional eine Trägerplatte (4) befestigt werden.

Bei Verwendung einer Durchgangsbohrung in Abbildung 6.9 (b) kann die Ansteuerplatine (5) unter dem Stapel (1) und auf der Oberseite optional eine zusätzliche Trägerplatte (6) befestigt werden.

Bei einer in Abbildung 6.9 (c) ausgeführten Möglichkeit wird der Stapel (1) in einen oberen (7) und einen unteren (8) Teil getrennt. Dazwischen wird die Ansteuerplatine (11) beidseitig zur Kraftübertragung stoffschlüssig mit dem oberen (9) und unteren Kontaktelement (10) verbunden. Die beiden Trägerplatten oben (13) und unten (12) sind dabei optional anzusehen. In dem hier gezeigten Beispiel ist die Anzahl der oberen und unteren aktiven Lagen gleich. Diese können, je nach Anwendungsfall, auch unterschiedlich groß ausgeprägt sein. Gleichgroße Stapel haben jedoch den Vorteil, dass eine mittige Kraftübertragung erfolgt.

Zur kraftschlüssigen Verbindung von Ansteuerplatine und Stapel ist eine gegenüberliegende Trägerplatte nicht mehr optional, sondern dringend als Gegenlager notwendig. Hierzu klemmen die beiden Strukturbauteile, die Ansteuerplatine und die Trägerplatte, mit einer Kraft F_K parallel zur Dickenrichtung den Stapel ein und können somit die vom DEA aufgebrauchten Kräfte aufnehmen (Abbildung 6.10 (a)). Diese Kraft F_K kann, wie in Abbildung 6.10 (b) gezeigt, durch eine Schraube aufgebracht werden, die durch das Kontaktelement geführt ist. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang beispielsweise auch eine Nietverbindung.

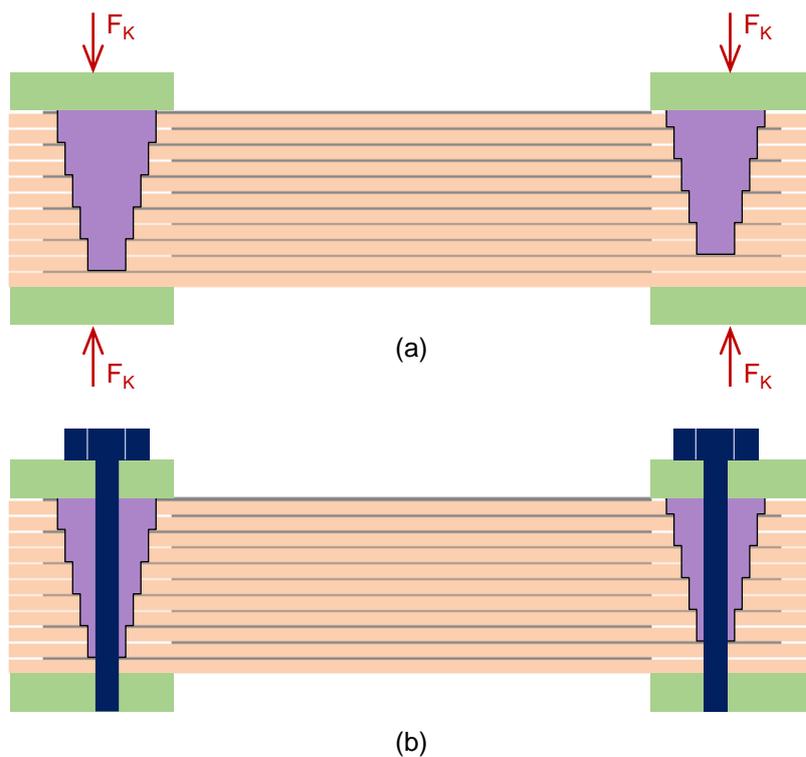


Abbildung 6.10: Kraftschlüssige Kraftübertragung von DEA-Stapel auf Rahmenteile (a) allgemein durch eine externe Klemmkraft und (b) in einer Ausführung eine Schraube als Krafteinleitung, die durch das Kontaktelement geführt wird.

Weitere Ausführungsformen einer kraftschlüssigen Verbindung mit einem Metallstreifen als Kontaktierung sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Zu beachten ist, dass alle kraftschlüssigen Verbindungen auch mit einer stoffschlüssigen Verbindung kombiniert werden können.

Bei der, in Abbildung 6.11 (a) gezeigten, Variante ist das Metallband federnd ausgestaltet und an der oberen Ansteuerplatine leitfähig verbunden. Durch eine externe Kraft wird diese auf den Stapel gedrückt. Die notwendige Haltekraft wird über die Flächen auf den Stapel übertragen und die Elektroden über das Federstück elektrisch kontaktiert.

In der zweiten Variante in Abbildung 6.11 (b) wird das Metallband durch eine Niete, eine Schraube oder durch Kleber am unteren Totpunkt in die Öffnung hineingezogen. Das Metallband kann so ausgestaltet sein, dass die Kraft zur Kontaktierung der Elektroden auch die von dem DEA aufgebrachtene Kräfte senkrecht zur Dickenrichtung aufnehmen kann. Optional kann eine Trägerplatte die Klemmkraft mit Hilfe externer Elemente erhöhen.

Im gezeigten Beispiel in Abbildung 6.11 (c) wird der Stapel durch externe Kräfte zwischen Ansteuerplatine und Trägerplatte geklemmt. Die elektrische Kontaktierung wird dadurch erreicht, dass das Metallband z.B. mit einer Schraube in die Vertiefung gedrückt wird.

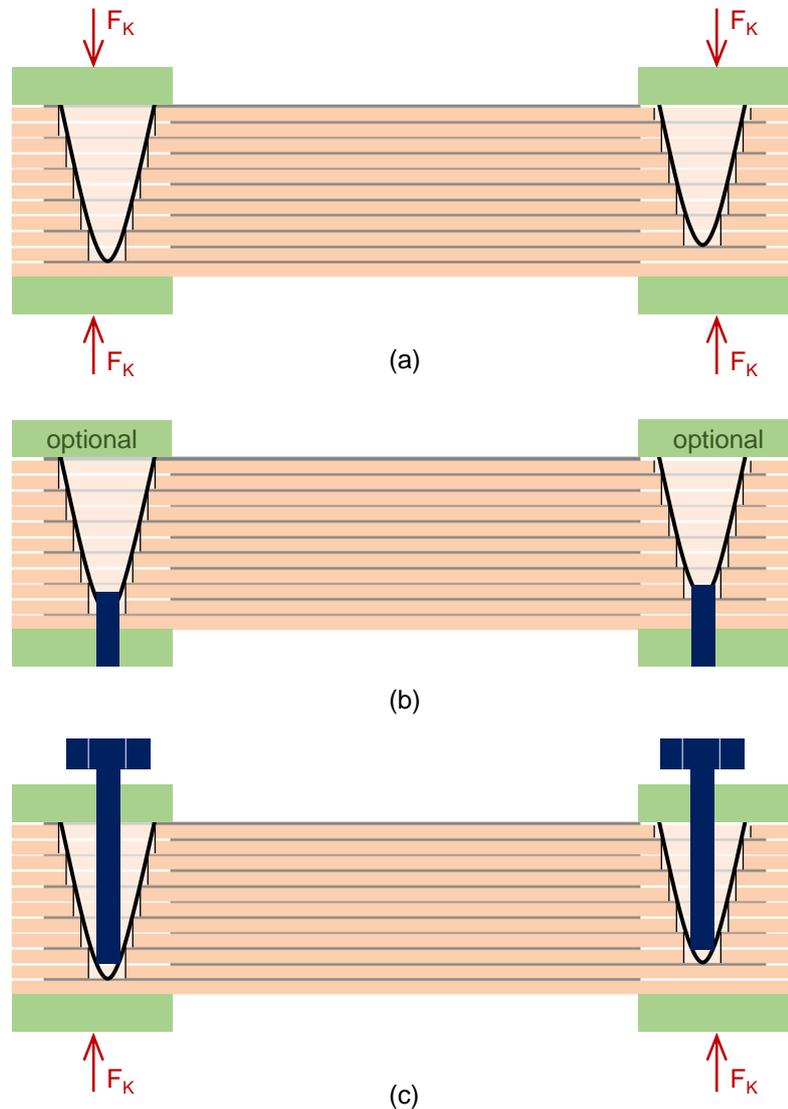


Abbildung 6.11: Ausführungsbeispiele mit z.B. einem Metallband als elektrische Kontaktierung. (a) Ausgeführt als federndes Druckstück. (b) Eine Niet-, Schraub- oder Klebeverbindung zur Herstellung des elektrischen Kontaktes mit dem Metallband. (c) Geklemmter Stapel mit einer zusätzlichen Schraube als Niederhalter für das Kontaktierungsband.

6.3 Zusammenfassung und Fazit

Antriebs- und Sensorsysteme müssen anwendungsbedingt oftmals aus mehreren aktiven Lagen bestehen. Bei Systemen, die die Flächenausdehnung ausnutzen, müssen oftmals zwei bis 100, insbesondere zwei bis 50, vorzugsweise jedoch nur zwei bis 20 aktive Lagen

gestapelt werden. Die Stapelkonzepte aus dem Stand der Technik wie das Durchstechen, das stirnseitige Kontaktieren, das Falten sowie das Kontaktieren mit Kupferbändern weisen verschiedenste Probleme auf. Die ersten drei Möglichkeiten werden oft für Stapelsysteme verwendet, die die Dickenänderung ausnutzen. Vorteil ist dabei, dass durch einen einfachen Prozess viele Lagen gleichzeitig kontaktiert werden können. Problematisch sind jedoch, aufgrund der sehr kleinen Kontaktflächen, die Zuverlässigkeit und der hohe Übergangswiderstand. Durch das Aufbringen einzelner Metallstreifen, kombiniert mit der externen elektrischen Kontaktierung, wird eine zuverlässige Verbindung mit verschwindend geringem Übergangswiderstand erreicht. Nachteilig ist jedoch die nur im Labormaßstab realisierende Umsetzung.

Das hier vorgestellte optimierte Mehrlagenkonzept ist in einer Serienproduktion wirtschaftlich umzusetzen und bringt viele Vorteile. Diese liegen vor allem in den Bereichen Zuverlässigkeit und Übergangswiderstand. In den vorangegangenen Kapiteln wurden viele mögliche Ausführungsbeispiele der verschiedenen Teilfunktionen aufgezeigt. Daraus ist eine Vielzahl von verschiedenen Ausgestaltungen durch Kombination der einzelnen Möglichkeiten denkbar. Somit ist für die Aufgabe der Entwicklung einer platzsparenden, wirtschaftlichen und zuverlässigen Elektrodenkontaktierung sowie Kraftübertragung eine Lösung gefunden und vorgestellt.

Kapitel 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Charakterisierung, experimentellen Untersuchung und Optimierung diverser Bauformen und -größen dielektrischer Elastomeraktoren hinsichtlich Schnelligkeit, Energieeffizienz, Dynamik und Kompaktheit für verschiedene Anwendungen. Hierzu wurden zu Beginn die Grundlagen für die verschiedenen Formen Dielektrischer Elastomere geschaffen und die Membranaktoren für die weitere Verwendung gewählt.

Anhand dieser Nutzungsart wurde der disruptive Einsatz der DE-Technologie in einem elektrischen Schaltschütz untersucht (Kapitel 3). Das entwickelte und aufgebaute Antriebssystem konnte vorrangig in den Bereichen Energieeffizienz und Performance überzeugen. Das hier entwickelte System benötigt lediglich 0,5% der Energie des herkömmlich verwendeten Antriebs. Dabei liegt die Geschwindigkeit beim Schließprozess mit 410,2 mm/s über dem Antriebssystem des konventionellen Schütz. Mit dem vorgestellten, optimierten Mehrlagenkonzept aus Kapitel 6 können 90% des benötigten Bauraums des hier entworfenen COP-DEA Stapels eingespart werden. Hintergrund dieser Reduzierung ist vor allem, dass das, hauptsächlich für die Dicke verantwortliche, inaktive Rahmenmaterial durch das neue Mehrlagenkonzept eingespart werden kann. Nach einer Neugestaltung der Konstruktion des Vorspannsystems, kann der DE-basierende Antrieb in das alte Gehäuse eingesetzt werden.

Das, in der Literatur für den Entwurf eines DE Antriebs, verwendete quasistatische Verfahren kann für eine Vielzahl von Anwendungen nicht verwendet werden. Folglich wurde ausgehend von dieser Methode in Kapitel 4 ein Auslegeschema für dynamische, periodische Anwendungen wie haptische Displays, Vibrationsförderer und Kompressoren

entworfen. Anhand zweier Bauformen von Membranaktoren wurde dieses entwickelte Verfahren umfassend experimentell validiert. Nach erfolgreicher Überprüfung wurde das Schema in die Pumpenanwendung überführt und auf Basis jeder zuvor validierten Aktorbauart ein Pumpenprototyp entworfen, aufgebaut und gesamtheitlich experimentell vermessen (Kapitel 5). Das Ergebnis sind zwei Pumpencharakteristiken, die einigen aus der Literatur bekannten DE basierenden Kompressoren gegenübergestellt wurden. Bei dem SIP-DEA betriebenen Pumpenprototyp wurde dabei nahezu der siebenfache Normvolumenstrom und der 21-fache Maximaldruck im Vergleich zu der bis dahin leistungsstärksten Pumpe auf DE-Basis aus der Literatur erreicht. Zusätzlich wurde dabei im Vergleich lediglich 66% der Hochspannungsamplitude benötigt.

Ein wichtiger, nächster Schritt der vorgestellten Forschung besteht darin, die Hochspannungselektronik und das Antriebssystem in den Anwendungen zu einem hochintegrierten, kompakten und marktreifen System zu kombinieren. Hierfür wurde innerhalb dieser Arbeit mit dem optimierten Mehrlagenkonzept aus Kapitel 6 der Grundstein gelegt.

Hinsichtlich der Auslegung solcher Antriebssysteme sollte eine weitere Verfeinerung der Methode angestrebt werden. Hierzu müssen die Auswirkungen der DE-Dämpfung explizit quantifiziert und berücksichtigt werden. Resultat einer Erweiterung der hier vorgestellten Methode wäre die Möglichkeit, ein noch weiter zu fassendes Anwendungsfeld abzudecken. Dabei sollte die schlichte, grafische Entwurfsmethode fokussiert werden. Sie eröffnet den Entwicklungsingenieuren die Möglichkeit, komplexe Problemstellungen auf ein Schaubild zu reduzieren. Folglich kann die Akzeptanz der Dielektrischen Elastomere in der Industrie gesteigert werden.

Durch Verwendung der Sensoreigenschaften kann ein Antriebssystem in einen sogenannten intelligenten Antrieb transferiert werden. Somit kann der Antrieb zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Position an eine übergeordnete Steuerung übermitteln, was gerade im Bereich der Industrie 4.0 eine wichtige Rolle spielt. Aufgrund der ständigen Positionsmessung ist somit auch ein geregelter Antrieb denkbar, der ohne jegliche externe, zusätzliche Sensorik auskommt. Durch den Einsatz intelligenter Steuerungs- und Selbsterkennungsalgorithmen können Alterungseffekte sichtbar gemacht werden. Diese Eigenschaft ist gerade im Bereich der prädiktiven Instandhaltung sehr von Bedeutung.

Somit haben intelligente DE-Antriebe ressourcenschonende Auswirkungen. In Kombination mit der hier gezeigten, gesteigerten Energieeffizienz als Ersatz für beispielsweise pneumatische oder elektromagnetische Systeme, unterstützt diese potenziell bahnbrechende Technologie die globalen Anstrengungen zur Reduktion des weltweiten CO₂ Ausstoßes.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] F. Möller, "Piezo Elements for a Multitude of Sensor Applications Flexible in Respect to Frequency and Design." https://www.piceramic.de/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/success_story/PI_SUCCESS_STORY_Ultrasonic_Piezo_Elements_pi1094.pdf (accessed Feb. 25, 2020).
- [2] T. D. Fansler, D. L. Reuss, V. Sick, and R. N. Dahms, "Combustion instability in spray-guided stratified-charge engines: A review," *Int. J. Engine Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 260–305, 2015, doi: 10.1177/1468087414565675.
- [3] Xeryon, "XLS-1 series Compact and precise linear piezo stage." .
- [4] S. Kuiper and G. Schitter, "Active damping of a piezoelectric tube scanner using self-sensing piezo actuation," *Mechatronics*, 2010, doi: 10.1016/j.mechatronics.2010.07.003.
- [5] A. S. GmbH, "Smallest, Strongest, Simplest - The SMA Actuator." <http://www.actuatorolutions.de/products/> (accessed Feb. 25, 2020).
- [6] P. Linnebach, H. Baer, C. Schaefer, F. Friebe, P. Gandner, and M. Gehring, "VALVE DEVICE FOR CONTROLLING A FLUID FLOW AND FLOW CONTROL VALVE," US 2018/0135771 A1, 2018.
- [7] F. Carpi, D. De Rossi, R. D. Kornbluh, R. Pelrine, and P. Sommer-Larsen, *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*. Elsevier Ltd, 2008.
- [8] F. Carpi and D. De Rossi, "Electroactive polymer artificial muscles: An overview," *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 138, pp. 353–364, 2010, doi: 10.2495/DN100311.
- [9] W. C. Röntgen, "Ueber die durch Electricität bewirkten Form- und Volumenänderungen von dielectrischen Körpern," *Ann. der Phys. Und Chemie*, vol. 247, no. 13, pp. 771–786, 1880, doi: 10.1002/andp.18802471304.
- [10] R. Kornbluh, J. Eckerle, and G. Andeen, "Artificial muscle: the next generation of robotic actuators," in *4th World Conference of Robotics Research*, 1991.
- [11] T. Niino, S. Egawa, H. Kumura, and T. Higuchi, "Electrostatic artificial muscle: compact, high-power linear actuators with multiple-layer structures," in *Proceedings of the IEEE Micro*

- Electro Mechanical Systems Workshop*, 1994, pp. 130–135.
- [12] R. Pelrine, J. Eckerle, and S. Chiba, “Review of artificial muscle approaches,” in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1992, pp. 1–19.
- [13] R. Kornbluh, R. Pelrine, and J. P. Joseph, “Elastomeric dielectric artificial muscle actuators for small robots,” in *Proceedings of the 3rd IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing*, 1995, pp. 1–6.
- [14] P. Sommer-Larsen, Ed., *ARTMUS - Artificial Muscles, a feasibility study of polymer based materials for actuator purposes*. Risø National Laboratory, 1996.
- [15] R. Pelrine *et al.*, “Applications of Dielectric Elastomer Actuators,” in *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 2001.
- [16] P. Brochu and Q. Pei, “Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles,” *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 10–36, Jan. 2010, doi: 10.1002/marc.200900425.
- [17] M. Hill, G. Rizzello, and S. Seelecke, “Development and Experimental Characterization of a Pneumatic Valve Actuated by a Dielectric Elastomer Membrane,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 8, 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa746d.
- [18] M. Giousouf and G. Kovacs, “Dielectric elastomer actuators used for pneumatic valve technology,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, pp. 104010–6, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/10/104010.
- [19] M. Shrestha, A. Asundi, and G. Lau, “Electrically tunable window based on microwrinkled ZnO/Ag thin film,” in *Proc. SPIE 10163, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Apr. 2017, p. 101631Y, doi: 10.1117/12.2259918.
- [20] R. D. Kornbluh *et al.*, “Electroelastomers: Applications of Dielectric Elastomer Transducers for Actuation, Generation and Smart Structures,” in *SPIE’s 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Jul. 2002, pp. 254–270, doi: 10.1117/12.475072.
- [21] F. Carpi, C. Menon, and D. De Rossi, “Electroactive elastomeric actuator for all-polymer linear peristaltic pumps,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 460–470, 2010, doi: 10.1109/TMECH.2009.2028884.
- [22] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh, R. Heydt, and J. R. Heim, “Electroactive polymer devices for moving fluid,” US 7,394,182 B2, 2008.
- [23] H. R. Choi *et al.*, “Tactile display as a braille display for the visually disabled,” in *Proceedings - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, 2004, vol. 2, pp. 1985–1990, doi: 10.1109/IROS.2004.1389689.

- [24] R. Heydt, R. D. Kornbluh, J. Eckerle, and R. Pelrine, "Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers," in *Proc. SPIE 6168, Smart Structures and Materials 2006: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2006, vol. 6168, p. 61681M.
- [25] F. Klug, C. Endl, S. Solano-Arana, and H. F. Schlaak, "Design, fabrication, and customized driving of dielectric loudspeaker arrays," in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI*, 2019, vol. 10966, pp. 321–330, doi: 10.1117/12.2515311.
- [26] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. R. Shea, "Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 231–238, Jan. 2016, doi: 10.1002/adma.201504264.
- [27] O. Araromi *et al.*, "Rollable Multisegment Dielectric Elastomer Minimum Energy Structures for a Deployable Microsatellite Gripper," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 438–446, Feb. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2014.2329367.
- [28] S. Hau, G. Rizzello, M. Hodgins, A. York, and S. Seelecke, "Design and Control of a High-Speed Positioning System Based on Dielectric Elastomer Membrane Actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1259–1267, 2017.
- [29] L. Maffli, S. Rosset, M. Ghilardi, F. Carpi, and H. Shea, "Ultrafast All-Polymer Electrically Tunable Silicone Lenses," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 1656–1665, 2015, doi: 10.1002/adfm.201403942.
- [30] A. York, J. Dunn, and S. Seelecke, "Systematic approach to development of pressure sensors using dielectric electro-active polymer membranes," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 9, p. 94015, Aug. 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/9/094015.
- [31] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh, P. Qibing, and J. Eckerle, "Electroactive polymer sensors," US 6,809,462 B2, Oct. 2004.
- [32] G. Rizzello, D. Naso, A. York, and S. Seelecke, "Closed loop control of dielectric elastomer actuators based on self-sensing displacement feedback," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 3, p. 35034, 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/3/035034.
- [33] P. Zanini, J. Rossiter, and M. Homer, "Self-stabilizing dielectric elastomer generators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 3, 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa59e6.
- [34] T. G. McKay, S. Rosset, I. A. Anderson, and H. Shea, "Dielectric elastomer generators that stack up," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 1, p. 15014, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/1/015014.
- [35] S. J. A. Koh, C. Keplinger, T. Li, S. Bauer, and Z. Suo, "Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted?," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 33–

- 41, Feb. 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2089635.
- [36] I. Anderson, T. A. Gisby, T. G. McKay, B. M. O'Brien, and E. P. Calius, "Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines," *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 4, p. 041101, Aug. 2012, doi: 10.1063/1.4740023.
- [37] S. Hau, "High-Performance Dielectric Elastomer Actuators," Universität des Saarlandes, 2018.
- [38] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh, and J. P. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 64, no. 1, pp. 77–85, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0924-4247(97)01657-9.
- [39] G. Kofod, P. Sommer-Larsen, R. D. Kornbluh, and R. Pelrine, "Actuation Response of Polyacrylate Dielectric Elastomers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 14, no. 12, pp. 787–793, 2003, doi: 10.1177/104538903039260.
- [40] C. Graf *et al.*, "Dielectric elastomer-based energy harvesting: Material, generator design, and optimization," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, no. 8, pp. 951–966, 2014, doi: 10.1177/1045389X13502857.
- [41] C. Chiang Foo, S. Jin Adrian Koh, C. Keplinger, R. Kaltseis, S. Bauer, and Z. Suo, "Performance of dissipative dielectric elastomer generators," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 9, 2012, doi: 10.1063/1.4714557.
- [42] R. Pelrine *et al.*, "Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications," in *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 2001, vol. 4329, doi: doi:10.1117/12.432640.
- [43] G. Moretti, M. Fontana, and R. Vertechy, "Model-based design and optimization of a dielectric elastomer power take-off for oscillating wave surge energy converters," *Meccanica*, vol. 50, no. 11, pp. 2797–2813, Nov. 2015, doi: 10.1007/s11012-015-0235-8.
- [44] F. B. Madsen, A. E. Daugaard, S. Hvilsted, and A. L. Skov, "The Current State of Silicone-Based Dielectric Elastomer Transducers," *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 37, no. 5, pp. 378–413, 2016, doi: 10.1002/marc.201500576.
- [45] WackerChemieAG, "ELASTOSIL[®] Film 2030." <https://www.wacker.com/h/de/de/medias/ELASTOSIL-Film-2030-de-2020.06.06.pdf> (accessed Jun. 22, 2020).
- [46] R. Pelrine, R. Kornbluh, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, and S. Chiba, "High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators," 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/msec.
- [47] R. Pelrine, R. Kornbluh, and J. Joseph, "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%," *Science (80-.)*, vol. 287, pp. 836–839, 200AD, doi:

- 10.1126/science.287.5454.836.
- [48] WackerChemieAG, "NEUE PERSPEKTIVEN UND INNOVATIVE ANWENDUNGEN MIT ELASTOSIL(R) FILM HAUCHDÜNNE SILICONFOLIE." http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/7091%7B_%7DDE.pdf (accessed Mar. 10, 2018).
- [49] R. K. Sahu and K. Patra, "Rate-dependent mechanical behavior of VHB 4910 elastomer," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 23, no. 2, pp. 170–179, Feb. 2016, doi: 10.1080/15376494.2014.949923.
- [50] A. O'Halloran, F. O'Malley, and P. McHugh, "A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges," *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 7, p. 071101, 2008, doi: 10.1063/1.2981642.
- [51] M. Wissler and E. Mazza, "Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuators," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 134, no. 2, pp. 494–504, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.05.024.
- [52] J. Biggs *et al.*, "Electroactive polymers: Developments of and perspectives for dielectric elastomers," *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 52, no. 36, pp. 9409–9421, Sep. 02, 2013, doi: 10.1002/anie.201301918.
- [53] Q. M. Zhang, J. Su, C. H. Kim, R. Ting, and R. Capps, "An experimental investigation of electromechanical responses in a polyurethane elastomer," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 6, pp. 2770–2776, Mar. 1997, doi: 10.1063/1.363981.
- [54] S. Michel, X. Q. Zhang, M. Wissler, C. Löwe, and G. Kovacs, "A comparison between silicone and acrylic elastomers as dielectric materials in electroactive polymer actuators," *Polym. Int.*, vol. 59, no. 3, pp. 391–399, Mar. 2010, doi: 10.1002/pi.2751.
- [55] S. Rosset and H. R. Shea, "Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators," *Appl. Phys. A*, vol. 110, no. 2, pp. 281–307, Feb. 2013, doi: 10.1007/s00339-012-7402-8.
- [56] J. Maas, D. Tepel, and T. Hoffstadt, "Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators," *Meccanica*, vol. 50, no. 11, pp. 2839–2854, Nov. 2015, doi: 10.1007/s11012-015-0273-2.
- [57] P. Lotz, M. Matysek, and H. F. Schlaak, "Fabrication and Application of Miniaturized Dielectric Elastomer Stack Actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 58–66, Feb. 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2090164.
- [58] A. Poulin, S. Rosset, and H. Shea, "Fully printed 3 microns thick dielectric elastomer actuator," in *Proc. SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016*,

- Apr. 2016, vol. 9798, doi: 10.1117/12.2218256.
- [59] S. Schlatter, S. Rosset, and H. Shea, "Inkjet printing of carbon black electrodes for dielectric elastomer actuators." [Online]. Available: <http://spiedigitallibrary.org/ss/term>.
- [60] B. Fasolt, M. Hodgins, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Effect of screen printing parameters on sensor and actuator performance of dielectric elastomer (DE) membranes," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 265, pp. 10–19, 2017.
- [61] J. Hubertus, G. Schultes, P. Linnebach, B. Fasolt, and S. Seelecke, "Electromechanical evaluation of sub-micron NiCr-Carbon thin films as highly conductive and compliant electrodes for dielectric elastomers," *Sensors Actuators A Phys.*, 2020.
- [62] C. Keplinger, M. Kaltenbrunner, N. Arnold, and S. Bauer, "Röntgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 107, no. 10, pp. 4505–4510, Mar. 2010, doi: 10.1073/pnas.0913461107.
- [63] M. Hodgins, A. York, and S. Seelecke, "Experimental comparison of bias elements for out-of-plane DEAP actuator system," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 94016, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/9/094016.
- [64] G. Kovacs, L. Düring, S. Michel, and G. Terrasi, "Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 155, no. 2, pp. 299–307, 2009, doi: 10.1016/j.sna.2009.08.027.
- [65] S. Reitelshöfer, M. Göttler, P. Schmidt, P. Treffer, M. Landgraf, and J. Franke, "Aerosol-Jet-Printing silicone layers and electrodes for stacked dielectric elastomer actuators in one processing device," in *Proc. SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016*, Apr. 2016, vol. 9798, p. 97981Y, doi: 10.1117/12.2219226.
- [66] H. Bochmann, B. von Heckel, T. Hoffstadt, and J. Maas, "Interface design for DE based stack-actuators considering various application cases," in *Proc. SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016*, Aug. 2016, vol. 9798, p. 97982I, doi: 10.1117/12.2218012.
- [67] CTsystems AG, "Polymer Actuator CT25.2," 2020. <https://www.ct-systems.ch/index.php/products/polymer-actuator-ct25-2> (accessed Jun. 23, 2020).
- [68] M. Matysek, P. Lotz, K. Flittner, and H. F. Schlaak, "High-precision characterization of dielectric elastomer stack actuators and their material parameters," in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*, Mar. 2008, vol. 6927, p. 692722, doi: 10.1117/12.776177.
- [69] F. Carpi, C. Salaris, and D. De Rossi, "Folded dielectric elastomer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 2, Apr. 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/2/S15.

- [70] G. Rizzello, M. Hodgins, D. Naso, A. York, and S. Seelecke, "Modeling of the effects of the electrical dynamics on the electromechanical response of a DEAP circular actuator with a mass-spring load," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 9, p. 94003, Sep. 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/9/094003.
- [71] G. Berselli, R. Vertechy, G. Vassura, and V. Parenti-Castelli, "Optimal Synthesis of Conically Shaped Dielectric Elastomer Linear Actuators: Design Methodology and Experimental Validation," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 67–79, Feb. 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2090664.
- [72] P. Loew, G. Rizzello, and S. Seelecke, "A novel biasing mechanism for circular out-of-plane dielectric actuators based on permanent magnets," *Mechatronics*, vol. 56, pp. 48–57, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.MECHATRONICS.2018.10.005.
- [73] T. Li, C. Keplinger, R. Baumgartner, S. Bauer, W. Yang, and Z. Suo, "Giant voltage-induced deformation in dielectric elastomers near the verge of snap-through instability," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 61, no. 2, pp. 611–628, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.jmps.2012.09.006.
- [74] H. Godaba, C. C. Foo, Z. Q. Zhang, B. C. Khoo, and J. Zhu, "Giant voltage-induced deformation of a dielectric elastomer under a constant pressure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 11, Sep. 2014, doi: 10.1063/1.4895815.
- [75] G. Berselli, R. Vertechy, M. Babič, and V. Parenti Castelli, "Dynamic modeling and experimental evaluation of a constant-force dielectric elastomer actuator," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 6, pp. 779–791, 2013, doi: 10.1177/1045389X12457251.
- [76] D. Mccoul, S. Rosset, N. Besse, and H. Shea, "Multifunctional shape memory electrodes for dielectric elastomer actuators enabling high holding force and low-voltage multisegment addressing," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, p. 025015, 2017.
- [77] S. Dastoor and M. Cutkosky, "Design of dielectric electroactive polymers for a compact and scalable variable stiffness device," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 3745–3750, doi: 10.1109/ICRA.2012.6224808.
- [78] S. Hau, A. York, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Performance prediction and scaling laws of circular dielectric elastomer membrane actuators," *J. Mech. Des.*, no. accepted manuscript, Jan. 2018, doi: 10.1115/1.4039104.
- [79] S. Hau, D. Bruch, G. Rizzello, P. Motzki, and S. Seelecke, "Silicone based dielectric elastomer strip actuators coupled with nonlinear biasing elements for large actuation strains," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 7, p. 074003, Jul. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aab7d8.
- [80] M. Wissler and E. Mazza, "Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 120, pp. 184–192, 2005, doi:

- 10.1016/j.sna.2004.11.015.
- [81] T. Kobayashi and S. K. Smoukov, "Pulsed actuation avoids failure in dielectric elastomer artificial muscles," *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 5, no. 4, pp. 217–226, 2015, doi: 10.1080/19475411.2014.987190.
- [82] F. Carpi *et al.*, "Standards for dielectric elastomer transducers," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 10, p. 105025, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/10/105025.
- [83] J.-S. Plante, "Dielectric Elastomer Actuators for Binary Robotics and Mechatronics," Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [84] S. Rosset and H. R. Shea, "Small, fast, and tough: Shrinking down integrated elastomer transducers," *Applied Physics Reviews*, vol. 3, no. 3. American Institute of Physics Inc., Sep. 01, 2016, doi: 10.1063/1.4963164.
- [85] C. Jordi, S. Michel, G. Kovacs, and P. Ermanni, "Scaling of planar dielectric elastomer actuators in an agonist-antagonist configuration," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 161, no. 1–2, pp. 182–190, 2010, doi: 10.1016/j.sna.2010.05.015.
- [86] J.-S. Plante, L. M. Devita, and S. Dubowsky, "A Road to Practical Dielectric Elastomer Actuators Based Robotics and Mechatronics: Discrete Actuation," in *Proc. SPIE 6524, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2007*, 2007, vol. 6524, p. 652406, doi: 10.1117/12.715236.
- [87] H. Wang, J. Zhu, and K. Ye, "Simulation, experimental evaluation and performance improvement of a cone dielectric elastomer actuator," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 10, no. 9, pp. 1296–1304, 2009, doi: 10.1631/jzus.A0820666.
- [88] A. T. Conn and J. Rossiter, "Towards holonomic electro-elastomer actuators with six degrees of freedom," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 3, Mar. 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/3/035012.
- [89] M. Hill, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Development and experimental characterization of a dielectric elastomer membrane strip actuator," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, p. 025019, 2018.
- [90] G. Kovacs, P. Lochmatter, and M. Wissler, "An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 2, pp. S306–S317, 2007.
- [91] G. Berselli, G. S. Mammano, and E. Dragoni, "Design of a Dielectric Elastomer Cylindrical Actuator With Quasi-Constant Available Thrust: Modeling Procedure and Experimental Validation," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 136, no. 12, Dec. 2014, doi: 10.1115/1.4028277.
- [92] Y. S. Teh and S. J. A. Koh, "Giant continuously-tunable actuation of a dielectric elastomer ring actuator," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 9, pp. 195–203, Dec. 2016, doi:

- 10.1016/j.eml.2016.07.002.
- [93] Q. Pei, M. Rosenthal, S. Stanford, H. Prahlaad, and R. Pelrine, "Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 5, Oct. 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/5/N03.
- [94] J. P. Szabo, "Fabrication of Polyurethane Dielectric Actuators."
- [95] R. Shankar, T. K. Ghosh, and R. J. Spontak, "Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators," *Soft Matter*, vol. 3, no. 9, pp. 1116–1129, Jul. 2007, doi: 10.1039/b705737g.
- [96] A. Rajamani, M. Grissom, C. Rahn, Y. Ma, and Q. Zhang, "Wound Roll Dielectric Elastomer Actuators: Fabrication, Analysis and Experiments."
- [97] F. Carpi, G. Frediani, and D. De Rossi, "Electroactive elastomeric haptic displays of organ motility and tissue compliance for medical training and surgical force feedback," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 56, no. 9, pp. 2327–30, 2009, doi: 10.1109/TBME.2009.2024691.
- [98] S. Zakaria, P. H. F. Morshuis, M. Y. Benslimane, L. Yu, and A. L. Skov, "The electrical breakdown strength of pre-stretched elastomers, with and without sample volume conservation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 5, p. 55009, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/5/055009.
- [99] A. York and S. Seelecke, "Towards Self-Sensing of DEAP Actuators: Capacitive Sensing Experimental Analysis," in *Proceedings - ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2010, pp. 307–314, doi: 10.1115/SMASIS2010-3847.
- [100] M. Hodgins, A. York, and S. Seelecke, "Modeling and experimental validation of a bi-stable out-of-plane DEAP actuator system," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, p. 94012, 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/9/094012.
- [101] P. Linnebach, F. Simone, and S. Seelecke, "Entwicklung eines durch einen dielektrischen Elastomer-Membran Aktor angetriebenen elektrischen Schützes," in *4Smarts*, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/317823275>.
- [102] P. Linnebach, F. Simone, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Development, manufacturing, and validation of a dielectric elastomer membrane actuator-driven contactor," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 636–648, Dec. 2018, doi: 10.1177/1045389X18818778.
- [103] A. York, J. Dunn, and S. Seelecke, "Experimental characterization of the hysteretic and rate-dependent electromechanical behavior of dielectric electro-active polymer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 9, p. 94014, Aug. 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/9/094014.

- [104] ABB, "Datasheet BC6." 2018, [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/GJL1213001R0101/bc6-30-10-01-mini-contactor-24vdc>.
- [105] B. A. Vedensky and B. M. Vul, *Encyclopedic Dictionary in Physics*, Vol. 4. Moscow: Soviet Encyclopedia Publishing House, 1965.
- [106] A. Wingert, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "On the design of large degree-of-freedom digital mechatronic devices based on bistable dielectric elastomer actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 11, no. 4, pp. 448–456, Aug. 2006, doi: 10.1109/TMECH.2006.878542.
- [107] S. Hau, G. Rizzello, and S. Seelecke, "A novel dielectric elastomer membrane actuator concept for high-force applications," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 23, pp. 24–28, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.EML.2018.07.002.
- [108] S. Hau, A. York, and S. Seelecke, "Performance prediction of circular dielectric electro-active polymers membrane actuators with various geometries," in *Proc. SPIE 9430, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2015*, Apr. 2015, p. 94300C, doi: 10.1117/12.2082871.
- [109] P. Linnebach, S. Hau, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Design of a dielectric elastomer actuator driven pneumatic pump," in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI*, 2019, vol. 10966, pp. 242–249, doi: 10.1117/12.2514034.
- [110] P. Linnebach, S. Hau, G. Rizzello, P. Motzki, and S. Seelecke, "Stroke Magnification in Dielectric Elastomer Actuators with Dynamic Excitation," in *Actuator 2018: 16th International Conference on New Actuators*, 2018, no. June, pp. 483–487.
- [111] P. Linnebach, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Design and validation of a dielectric elastomer membrane actuator driven pneumatic pump," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 7, p. 075021, Jul. 2020, doi: 10.1088/1361-665x/ab8a01.
- [112] G. Jordan, D. N. McCarthy, N. Schleppe, J. Krißler, H. Schröder, and G. Kofod, "Actuated Micro-optical Submount Using a Dielectric Elastomer Actuator," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 98–102, 2011.
- [113] F. A. Mohd Ghazali, C. K. Mah, A. AbuZaiter, P. S. Chee, and M. S. Mohamed Ali, "Soft dielectric elastomer actuator micropump," *Sensors Actuators, A Phys.*, pp. 276–284, 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.06.018.
- [114] Z. Li, Y. Wang, C. C. Foo, H. Godaba, J. Zhu, and C. H. Yap, "The mechanism for large-volume fluid pumping via reversible snap-through of dielectric elastomer," *J. Appl. Phys.*, vol. 122, no. 8, p. 84503, 2017, doi: 10.1063/1.4985827.
- [115] C. Cao, X. Gao, and A. T. Conn, "A Magnetically Coupled Dielectric Elastomer Pump for Soft

- Robotics,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 1900128, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1002/admt.201900128.
- [116] M. Hodgins, A. York, and S. Seelecke, “Experimental comparison of bias elements for out-of-plane DEAP actuator system,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 094016, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/9/094016.
- [117] C. B. W. Pedersen, N. A. Fleck, and G. K. Ananthasuresh, “Design of a Compliant Mechanism to Modify an Actuator Characteristic to Deliver a Constant Output Force,” *J. Mech. Des.*, vol. 128, no. 5, pp. 1101–1112, Dec. 2005, doi: 10.1115/1.2218883.
- [118] G. Berselli, G. Vassura, V. Parenti, and R. Vertechy, “On Designing Compliant Actuators Based On Dielectric Elastomers for Robotic Applications,” *Robot Manip. New Achiev.*, no. April 2010, pp. 523–550, 2010, doi: 10.5772/9311.
- [119] B.-X. Xu, R. Mueller, A. Theis, M. Klassen, and D. Gross, “Dynamic analysis of dielectric elastomer actuators,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 11, p. 112903, 2012, doi: 10.1063/1.3694267.
- [120] C. Cao, X. Gao, S. Burgess, and A. T. Conn, “Power optimization of a conical dielectric elastomer actuator for resonant robotic systems,” *Extrem. Mech. Lett.*, no. Inpress, 2019, doi: 10.1016/j.eml.2019.100619.
- [121] W. Kaal and S. Herold, “Electroactive Polymer Actuators in Dynamic Applications,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 24–32, Feb. 2011.
- [122] M. Hodgins, G. Rizzello, D. Naso, Y. A, and S. Seelecke, “An electro-mechanically coupled model for the dynamic behavior of a dielectric electro-active polymer actuator,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 10, p. 104006, Sep. 2014.
- [123] D. Xu, S. Michel, T. McKay, B. O’Brien, T. Gisby, and I. Anderson, “Sensing frequency design for capacitance feedback of dielectric elastomers,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 232, pp. 195–201, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.SNA.2015.05.010.
- [124] P. Linnebach, S. Hau, P. Motzki, and S. Seelecke, “Auslegung, Aufbau und Validierung einer mit dielektrischen Elastomeraktoren angetriebenen Pneumatikpumpe,” in *4Smarts*, 2019, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/333394673>.
- [125] H. Zhao, A. M. Hussain, M. Duduta, D. M. Vogt, R. J. Wood, and D. R. Clarke, “Compact Dielectric Elastomer Linear Actuators,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 42, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1002/adfm.201804328.
- [126] V. Cacucciolo, J. Shintake, Y. Kuwajima, S. Maeda, D. Floreano, and H. Shea, “Stretchable pumps for soft machines,” *Nature*, vol. 572, no. 7770, pp. 516–519, 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1479-6.

- [127] "Duckbill Valves, How they work!" <http://www.minivalve.com/newsite/index.php/en/by-type/duckbill-valves/how-they-work> (accessed Jul. 14, 2020).
- [128] Linnebach Philipp, Hau Steffen, Seelecke Stefan, Meier Dennis, and Lenz Stephan, "Dielektrischer Wandler, Verfahren zu dessen Herstellung sowie Aktor und Sensor," DE 10 2019 128 822, 2019.
- [129] S. Hau, A. York, and S. Seelecke, "High-Force Dielectric Electroactive Polymer (DEAP) membrane actuator," in *Proc. SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices*, Apr. 2016, p. 97980I, doi: 10.1117/12.2220775.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zum Erreichen der Ziele....	5
Abbildung 2.1: (a) Grundaufbau eines Dielektrischen Elastomers. (b) Durch externe Kraft verformter Grundaufbau mit Kapazitätsmessung. (c) Mit elektrischer Spannung beaufschlagter Grundaufbau, wodurch eine Verformung hervorgerufen wird.....	8
Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung der Dicke z und Fläche A des Dielektrischen Elastomers als Funktion der Kapazität C	9
Abbildung 2.3: (a) Zusammenhang zwischen Maxwelldruck und dem angelegten elektrischen Feld. (b) Zusammenhang zwischen Maxwelldruck und der relativen Permittivität des Dielektrikums.....	10
Abbildung 2.4: Exemplarische Darstellung einer Drei-Wege-Schaltung mit zwei Batterien für den Betrieb eines Generators im Modus „konstante Spannung“	11
Abbildung 2.5: Darstellung eines Zyklus im Generator-Kreisprozess bei der Verwendung eines DEs in Verbindung mit einer Drei-Wege-Schaltung nach dem Prinzip „konstante Spannung“.....	12
Abbildung 2.6: Exemplarischer Aufbau eines Stapelaktors (a) ohne Aktivierungsspannung und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.....	15
Abbildung 2.7: Beispiele von Stapelaktoren. (a) Ein im Aerosol-Jet-Druck hergestellter Stapel mit zwei Lagen [65]. (b) Ein durch Falten hergestellter Stapelaktor [69]. (c) Ein in einem automatisierten Prozess hergestellten Stapelaktor an der Universität Ostwestfalen-Lippe [56]. (d) Kommerziell verfügbarer Stapelaktor der Firma CTsystems AG [67]. (e) Ein mit einer Dichtung ausgestatteter Stapelaktor zur Verwendung in einem Ventil [18]. (f) Ein am EMPA, Schweiz, hergestellter Stapelaktor durch Falten, der ein Gewicht anhebt [64].	16
Abbildung 2.8: (a) Inaktiver SIP-DEA und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.	18
Abbildung 2.9: Beispiele an Ebenenaktoren. (a) Diamantaktor, eine spezielle Form des Ebenenaktors [83]. (b) Ein CIP-DEA zur Validierung einer Modellierung von DEs [80]. (c) SIP-DEA mit zugehöriger Elektronik für haptisches Feedback für den iPod Touch [84]. (d) Ein SIP-DEA mit zugehörigem optimierten Vorspannsystem, eingebaut in	

einem Prüfstand zur Charakterisierung [79]. (e) Protagonist-Antagonist-Ebenenaktor [85].	19
Abbildung 2.10: (a) Keilaktor im Ausgangszustand ohne elektrische Spannung und ohne Vorspannsystem. (b) Schnitt durch den inaktiven COP-DEA ohne Vorspannung. (b) nicht aktivierter vorgespannter COP-DEA. (b) An das Vorspannsystem gekoppelter COP-DEA mit angelegter elektrischer Spannung.	20
Abbildung 2.11: Beispiele für Keilaktoren. (a) Ein mit einem Magnet als Vorspannsystem aufgebauter Demonstrator mit Keilaktor [72]. (b) Antagonistisches bistabiles Modul mit Keilaktor [86]. (c) Keilaktor, vorgespannt mit einer Masse im aktivierten und nicht aktivierten Zustand [87]. (d) Prototyp eines Keilaktors mit innenliegendem Vorspannsystem im aktivierten und nicht aktivierten Zustand [71]. (e) Eine mit zwei gegeneinander arbeitenden Keilaktoren angetriebene Positionierbühne [28]. (f) Keilaktor mit fünf Freiheitsgraden durch Segmentierung der Elektrodenflächen in der Drauf- und Seitenansicht [88]. (g) Streifenförmiger Keilaktor [89].	21
Abbildung 2.12: An das Vorspannsystem angeschlossener Röhrenaktor (a) ohne und (b) mit angelegter elektrischer Spannung.	22
Abbildung 2.13: Beispiele für Roll- bzw. Röhrenaktoren. (a) Ein Röhrenaktor aus VHB im inaktiven und aktiven Zustand mit einer Dehnung von 218% [92]. (b) Rollenaktoren mit Polyurethan und Silikon als Dielektrikum [94], [95]. (c) Eine von Insekten inspirierter Roboter mit Rollenaktoren auf Basis von Acrylfolie [20]. (d) Eine durch mit mehreren Freiheitsgraden beweglichen Rollaktoren bewegende Plattform [93]. (e) Rollenaktor [96]. (f) Verschiedene Rollenaktoren für Roboterarme [90]. (g) Rollenaktor mit innenliegendem, nicht linearem Vorspannsystem [91].	23
Abbildung 2.14: Ballonaktoren. (a) Prototyp des Stanford Research Institute [24]. (b) Ballonaktor im inaktiven und aktiven Zustand mit fluidischer Vorspannung [74]. (c) Eine Ballonaktoren-Matrix als Lautsprecher [25]. (d) Ballonaktor im inaktiven und aktiven Zustand, der mit Druckluft vorgespannt ist [73].	24
Abbildung 2.15: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von Membranaktoren. (a) Vorbereitungen von Film, Sieb und Elektrodenfarbe. (b) Einseitige Beschichtung. (c) Wenden und Beschichtung der gegenüberliegenden Seite. (d) Rahmensieb und Rahmenmaterial sowie die Aufbringung des steifen Rahmens zum fertigen Membranaktor.	26
Abbildung 3.1: (a) Bilder des elektrischen Schaltschützes. (b) Schematische Darstellung mit komplett geöffneten Kontakten, (c) in einer quasistatischen Mittelposition und (d) komplett geschlossen.	29
Abbildung 3.2: (a) Kraft-Weg-Messungen als Sprungantwort für zwei verschiedene Ansteuerspannungen. (b) Geschwindigkeit beim Schließen an der Zwischenposition	

vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC} . (c) Geschwindigkeit beim Öffnen an der Zwischenposition vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC} . (d) Stromstärke vs. Ansteuerspannung in % der Nennspannung U_{CC}	31
Abbildung 3.3: (a) Draufsicht auf den Prüfstand. (b) Schematische Darstellung des Schließmechanismus mit Linearachse und Kraftmessdose. (c) Kraft-Weg-Charakteristik des Trägerschlittens.	32
Abbildung 3.4: Darstellung eines inaktiven und aktiven COP-DEA mit LBS als Vorspannsystem.	33
Abbildung 3.5: (a) Antriebskonzept des Gesamtsystems, bestehend aus Kernsystem des Schützes (links) und COP-DEA, NBS und LBS (rechts), ohne HV (oberer Teil) und mit HV (unterer Teil) unter Angabe der zu optimierenden Parameter. (b) Kräftefreischnitt des Antriebssystems.....	34
Abbildung 3.6: Grafische Auslegung mit Hilfe des Kräftegleichgewichts.....	36
Abbildung 3.7: COP-DEA design. (a) Aufbau des Doppellagenaktors. (b) Schematische Darstellung des Schichtaufbaus. (c) Elektrische Verbindung. (d) CAD Modell des fertigen COP Doppellagenmoduls. (e) Bild des fertigen COP Doppellagenmoduls.	37
Abbildung 3.8. (a) Schematische Darstellung des Versuchsstandes zur experimentellen Charakterisierung. (b) Versuchsstand mit COP-DEA Stapel (links) und NBS (rechts).	39
Abbildung 3.9: (a) Kraft-Weg-Charakteristik eines Doppelmoduls bei verschiedenen elektrischen Spannungen. (b) Maximale Kraft als Funktion der angelegten Spannung. (c) Charakteristik verschiedener DEA Stapel mit unterschiedlicher Anzahl an Doppelmodulen bei HV und LV. (d) Blockierkraft bei einer Auslenkung von 3,5 mm bei HV und LV als Funktion der Anzahl an Doppelmodulen im Stapel.....	40
Abbildung 3.10: (a) Lasergeschnittenes Federkreuz. (b) Eingebaut in 3D Druckrahmen. (c) Abbild des unteren und oberen Totpunktes. (d) Charakterisierung bei verschiedener Anzahl an Federkreuzen.	41
Abbildung 3.11: Finaler, messwertbasierender, grafischer Antriebsentwurf auf Basis des Kräftegleichgewichts.....	42
Abbildung 3.12: Konstruktion des Demonstrators in der (a) isometrischen Ansicht und (b) in einer Schnittansicht zur besseren Sichtbarkeit des Antriebsstrangs.	45
Abbildung 3.13: (b), (c) Prüfstand zur Aufnahme der Aktorcharakteristik. (c) Voraussage der Antriebsleistung beim Anschluss an das Schütz. (d) Voraussage der Antriebsleistung beim Arbeiten ohne externe Last.	46
Abbildung 3.14: Vermessung des Antriebssystems ohne externe Last. (a), (b) Bilder des Systems. (c) Ansteuerspannung. (d) Gemessene Stromstärke. (e) Gemessener Hub. (f) Berechnete Geschwindigkeit.	47

- Abbildung 3.15 Vermessung des an das Schütz adaptierten Antriebssystems. (a), (b) Bilder des Systems. (c) Ansteuerspannung. (d) Gemessene Stromstärke. (e) Gemessener Hub. (f) Berechnete Geschwindigkeit. (g) Berechnete Energieaufnahme. 50
- Abbildung 4.1: (a) Schnittansicht eines COP-DEA mit LBS im spannungslosen Zustand und (b) mit angelegter Hochspannung. (c) Kräftefreischnitt eines COP-DEA mit LBS. (d) SIP-DEA mit LBS ohne Spannung und (e) mit Hochspannung in der Schnittansicht. (f) Kräftefreischnitt des Systems, bestehend aus SIP-DEA und LBS..... 55
- Abbildung 4.2: Mechanische Charakterisierung eines COP-DEA Elementes (a) mit verschiedenen Bewegungsfrequenzen, (b) mit unterschiedlichem Hub und (c) mit verschiedenen angelegten Spannungen. 58
- Abbildung 4.3: Elektrische Charakterisierung. (a) Die ersten drei Sekunden des Spannungseingangssignals der dynamischen Messungen, (b) das dazugehörige Spektrogramm über die gesamte Versuchsdauer, (c) die Kraftmessungen der ersten drei Sekunden und (d) die frequenzabhängige normierte Kraft über die gesamte Versuchsdauer von 30 s bzw. bis 150 Hz..... 60
- Abbildung 4.4: Mechanische Charakterisierung eines SIP-DEA Elementes (a) mit zwei verschiedenen Spannungen und (b) die Hysteresenbreite als Funktion der Bewegungsfrequenz. 61
- Abbildung 4.5: Elektrische Charakterisierung. (a) Zeitausschnitt aus dem Spannungseingangssignal der dynamischen Messungen, (b) die dazugehörige Kraftmessung und (d) die frequenzabhängige normierte Kraft über die gesamte Versuchsdauer bis zu einer Kreisfrequenz von 1.000 1/s. 62
- Abbildung 4.6: Dynamischer grafischer Entwurf eines vereinfachten Demonstrators mit COP-DEA mit den Kräften des DEA ohne Hochspannung $F_{DEA(LV)}$ und mit angelegter Spannung $F_{DEA(HV)}$, die Kraft der linearen Zylinderfeder F_{LBS} , die Trägheitskräfte F_T und die Summe aus diesen $F_{LBS} - F_T$ bei Betriebsfrequenzen von (a) 25 Hz, (b) 75 Hz, (c) 102 Hz und (d) 125 Hz. 64
- Abbildung 4.7: Dynamischer grafischer Entwurf eines vereinfachten Demonstrators mit SIP-DEA mit den Kräften des DEA ohne Hochspannung $F_{DEA(LV)}$ und mit angelegter Spannung $F_{DEA(HV)}$, die Kraft der linearen Zylinderfeder F_{LBS} , die Trägheitskräfte F_T und die Summe aus diesen $F_{LBS} - F_T$ bei einer Frequenzen von 46,3 Hz. 65
- Abbildung 4.8: Ergebnisse der Validierung des vereinfachten Antriebssystems mit COP-DEA ohne externe Last. (a) Messungen der frequenzabhängigen Verschiebung und (b) der daraus berechnete frequenzabhängige Gesamthub des Systems. 67
- Abbildung 4.9: Ergebnisse der Validierung des vereinfachten Antriebssystems mit SIP-DEA ohne externe Last. (a) Messungen der frequenzabhängigen Verschiebung und (b) der daraus berechnete frequenzabhängige Gesamthub des Systems. 68

Abbildung 5.1: (a) Skizze einer DEA betriebenen Membranpumpe im unteren, inaktiven Zustand und (b) im oberen Zustand mit angelegter Hochspannung. (c) Rollmembran im unteren und (b) im oberen Totpunkt.	73
Abbildung 5.2: Wegabhängige Kraftcharakteristik bei Minimal- und Maximaldruck im System.....	74
Abbildung 5.3: Grafischer Entwurf der COP-DEA betriebenen Pneumatikpumpe.	76
Abbildung 5.4: Pumpendemonstrator mit mobiler Hochspannungselektronik und Wassersäule zur Visualisierung des erzeugten Volumenstroms.	77
Abbildung 5.5: (a) Frequenzabhängiger Volumenstrom für verschiedene Spannungsamplituden und ihre jeweilige Resonanzfrequenz. (b) Maximaler Volumenstrom als Funktion der Spannungsamplitude bei fester Frequenz. (c) Maximal erreichbarer Druck in Abhängigkeit der Spannungsamplitude bei fester Frequenz. (d) Pumpencharakteristik – druckabhängiger Volumenstrom bei verschiedenen Spannungsamplituden.	78
Abbildung 5.6: (a) Vorderansicht eines pneumatischen Systems zur Sitzeinstellung im Rückenbereich mittels Lordosenstützen und Seitenbereich. (b) Rückansicht des Systems mit Ventilinsel zum Ansteuern der Luftblasen, des notwendigen Kompressors und die Zielposition der neuen Pumpe.	80
Abbildung 5.7: (a) Messaufbau zur Charakterisierung der herkömmlichen Pumpe und (b) der gemessene Volumenstrom als Funktion des Gegendruckes im Prüfvolumen von sieben Vergleichspumpen.....	82
Abbildung 5.8: (a) Schematische Darstellung eines SIP-DEA betriebenen Pumpenmechanismus in der Draufsicht und (b) in der Seitenansicht. (c) Teilung der Gesamtpumpe in zwei gegenläufig SIP-DEA betriebene Teilpumpen.....	83
Abbildung 5.9: (a) Aufbau eines SIP-DEA, welcher eine Seite eines Doppellagenaktors darstellt. (b) Kontaktierung durch leitfähige, stoffschlüssige Verbindung von Kupferstreifen. (c) Mechanisches parallel belastete SIP-DEAs als Stapel zur Kräfteskalierung. (d) Bild des hergestellten SIP-DEAs mit Kontaktierungsfahnen..	85
Abbildung 5.10: (a) Einzelne Komponenten des verwendeten Prüfstandes mit Spezifikationen und der schematischen Darstellung der Gerätekommunikation am Versuchsstand. (b) Mechanische Charakterisierung eines einzelnen SIP-DEAs und eines Doppellagenaktors als Kraft-Weg-Diagramm.	86
Abbildung 5.11: (a) Rohdaten der Blockierkraftmessung eines einzelnen SIP-DEAs bei verschiedenen Vordehnungen und ansteigender Ansteuerfrequenz über die Zeit. (b) Berechnetes Kraftdelta der Blockierkraft bei verschiedenen Vordehnungen als Funktion der Kreisfrequenz des Ansteuersignals.	87

- Abbildung 5.12: (a) CAD-Entwurf des Pumpenmechanismus mit Adapterteil. (b) Schnittansicht des selbst entworfenen Pumpenmechanismus. (c) An die flache Bauform angepasste Pumpenmembran. (d) Funktionsweise der eingesetzten Rückschlagventile [127]. (e) Kommerziell verfügbarer Pumpenkopf, der in der herkömmlichen Minimembranpumpe verwendet wird. (f) Volumenstrommessung als Funktion der Betriebsfrequenz von zwei selbst entworfenen Pumpenmechanismen und des kommerziell verfügbaren Pumpenkopfes. (g) Kraftmessungen als Funktion der Frequenz des kommerziell verfügbaren Pumpenkopfes bei Maximaldruck, Minimaldruck sowie Gegendrücke zwischen 0 und 300 hPa..... 89
- Abbildung 5.13: (a) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 1 Hz. (b) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 40 Hz. (c) Auslegung bei 67 Hz mit Darstellung der rechten und linken Seite der Auslegegleichung. (d) Darstellung der rechten Seite der Auslegegleichung bei 80 Hz. 91
- Abbildung 5.14: (a) Bild des aufgebauten Demonstrators. (b) Aufgebauter Demonstrator in der Seitenansicht mit den angeschlossenen Messgeräten als Skizze. (c) Messkurven der Optimierung durch Anpassen der bewegten Masse. (d) Massenoptimierter Demonstrator. 92
- Abbildung 5.15: (a) Optimierung des Volumenstroms über die Anzahl der Lagen im Stapel. (b) Erzeugter Volumenstrom als Funktion der angelegten Spannungsamplitude. . 94
- Abbildung 5.16: (a) Erzeugter maximaler Volumenstrom als Funktion der Anregungsfrequenz mit markierter Resonanzfrequenz bei verschiedenen Spannungsamplituden. (b) Resonanzfrequenz als Funktion der Spannungsamplitude. (c) Maximal erreichbarer Druck bei geschlossener Drossel bei fester Frequenz als Funktion der Zeit. (d) Maximaler Druck als Funktion der angelegten Spannungsamplitude..... 95
- Abbildung 5.17: (a) Gemessene sowie extrapolierte Werte des maximal erreichbaren Volumenstroms als Funktion der Spannungsamplitude. (b) Gemessene sowie extrapolierte Werte des maximal erreichbaren Drucks als Funktion der Spannungsamplitude. (c) Volumenstrom-Druck-Charakteristik des entwickelten Pumpenprototyps sowie der Vergleich mit den Anforderungen..... 97
- Abbildung 6.1: (a) Laminiertes DE-Wandler. (b) DE-Wandler mit eingebrachten Durchgangsöffnungen und (c) mit elektrisch leitfähig aufgefüllten Öffnungen. (d) Leitfähiger Stab als Kontaktierung in leitfähiger Füllmasse. (e) Leitfähiger Stab als Kontaktierung direkt in den, zum Stapel laminierten, DE-Wandler eingebracht. 102
- Abbildung 6.2: (a) Laminiertes DE-Wandler. (b) Stirnseitig durch Schneiden freigelegte Elektrode. (c) Stirnseitig kontaktierter DE-Wandler. 103

Abbildung 6.3: (a) Einzelne elektrisch leitfähig beschichtete Elektrode. (b) Einzelne aktive Lage mit aufgebrachtem Kupferband zur Kontaktierung. (c) Zweite aktive, zuvor auf der Gegenseite mit Kupferband kontaktierte, Lage aufgebracht. (d) Laminiertes Stapel mit gegenseitig angebrachten, zur Kontaktierung benötigten, Kupferbändern.....	104
Abbildung 6.4: (a) Silikonfilm, (b) der beidseitig beschichtet und (c) gefaltet wird. (d), (e) Kontaktierter gefalteter DE-Wandler.	105
Abbildung 6.5: Ausgestaltungsformen mit (a) beidseitiger Decklage, (b) einseitiger Decklage und (c) ohne Decklage.	108
Abbildung 6.6: (a) Übersicht eines Stapels mit Detailmarkierung. (b) Detailansicht mit doppelt beschichteten Silikonfolien. (c) Detailansicht mit einfacher, doppelt genutzter Beschichtung.	109
Abbildung 6.7: Verschiedene Ausführungsformen der Öffnungen. (a) Doppeltreppe. (b) Treppe. (c) Schiefer Zylinder. (d) Wellenöffnung. (e) Zahnöffnungen.	111
Abbildung 6.8: Auswahl an Ausgestaltungsbeispielen für die elektrische Kontaktierung bei der Doppeltreppenöffnung. (a) Beschichtete Innenflächen. (b) Elektrisch leitfähige Füllmasse. (c) Kraftschlüssig über ein zusätzliches Bauteil.	112
Abbildung 6.9: Stoffschlüssige Kraftübertragung (a) mit Sackloch, (b) mit Durchgangsloch und (c) mit mittiger Krafteinleitung zur Reduzierung von ungewollten Momenten.	113
Abbildung 6.10: Kraftschlüssige Kraftübertragung von DEA-Stapel auf Rahmenteile (a) allgemein durch eine externe Klemmkraft und (b) in einer Ausführung eine Schraube als Krafteinleitung, die durch das Kontaktelement geführt wird.....	115
Abbildung 6.11: Ausführungsbeispiele mit z.B. einem Metallband als elektrische Kontaktierung. (a) Ausgeführt als federndes Druckstück. (b) Eine Niet-, Schraub- oder Klebeverbindung zur Herstellung des elektrischen Kontaktes mit dem Metallband. (c) Geklemmter Stapel mit einer zusätzlichen Schraube als Niederhalter für das Kontaktierungsband.	116

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften des elektromagnetischen Antriebsprinzips und den intelligenten Materialien in Anlehnung an [15].....	2
Tabelle 2.1: Vergleich verschiedener Dielektrika in den für die Aktorik ausschlaggebenden Daten.....	13
Tabelle 3.1: Konstruktionsparameter für das Antriebssystem des elektrischen Schaltschütz	43
Tabelle 3.2: Vergleich zwischen COP-DEA betriebenen und Magnetspule betriebenen Schaltschütz	49
Tabelle 4.1: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Werten des vereinfachten Antriebssystems ohne externe Last mit COP-DEA.....	66
Tabelle 4.2: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Werten des vereinfachten Antriebssystems ohne externe Last mit SIP-DEA.....	68
Tabelle 5.1: Vergleich zwischen prognostizierten und experimentell gemessenen Vergleichswerten des entwickelten Pumpenprototyps.	79
Tabelle 5.2: Entwurfs- und Konstruktionsparameter der SIP-DEA betriebenen Pumpe zur Validierung ohne Druckerzeugung.	90
Tabelle 5.3: Entwurfs- und Konstruktionsparameter des anwendungsspezifisch angepassten SIP-DEA betriebenen Pumpenprototyps.....	94
Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der wichtigsten Pumpenparameter des hier entworfenen und aufgebauten Pumpenprototyps sowie der drei DEA betriebene Pumpendemonstratoren aus der Literatur.	98

EIGENE PUBLIKATIONEN

Von Experten begutachtete Zeitschriftenpublikationen

F. Simone, **P. Linnebach**, G. Rizzello, S. Seelecke, 2018. A finite element model of rigid body structures actuated by dielectric elastomer actuators. In: *Smart Materials and Structures* **27**(6). Verfügbar unter: DOI: 10.1088/1361-665X/aabe08

P. Linnebach, F. Simone, G. Rizzello, S. Seelecke, 2018. Development, manufacturing, and validation of a dielectric elastomer membrane actuator-driven contactor. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **30**(4). Verfügbar unter: DOI: 10.1177/1045389X18818778

P. Linnebach, G. Rizzello, S. Seelecke, 2020. Design and Validation of a Dielectric Elastomer Membrane Actuator Driven Pneumatic Pump. In: *Smart Materials and Structures* **29**(7). Verfügbar unter: DOI 10.1088/1361-665X/ab8a01

J. Hubertus, B. Fasolt, **P. Linnebach**, S. Seelecke, G. Schultes, 2020. Electromechanical evaluation of sub-micron NiCr-Carbon thin films as highly conductive and compliant electrodes for dielectric elastomers. In: *Sensors and Actuators A:Physical* **315**. Verfügbar unter: DOI 10.1016/j.sna.2020.112243

Patente

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES. *Aktor*. Erfinder: S. Hau, **P. Linnebach**, S. Seelecke.
Anmeldung: 24.01.2019. DE, Patentschrift DE 10 2019 101 717 B3

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES. *Dielektrischer Wandler, Verfahren zu dessen Herstellung sowie Aktor und Sensor*. Erfinder: **P. Linnebach**, S. Hau, D. Meier, S. Lenz, S. Seelecke.
Anmeldung: 25.10.2019. DE, Patentschrift DE 10 2019 128 822 (in Prüfung)

Internationale Konferenzbeiträge

F. Simone, **P. Linnebach**, G. Rizzello, S. Seelecke. FE Simulation of a Dielectric Elastomer Actuator (DEA) driven Contactor in COMSOL. In: *VDI Fachtagung Mechatronik*. Dresden, Germany, März 2017. ISBN 978-3-00-055832-0

P. Linnebach, F. Simone, S. Seelecke. Entwicklung eines durch einen dielektrischen Elastomer Membran Aktor angetriebenen elektrischen Schützes. In: *4SMARTS Symposium für Smarte Strukturen und Systeme*. Braunschweig, Germany, Juni 2017. Aachen: Shaker Verlag, S. 257-267. ISBN 978-3-8440-5083-7

P. Linnebach, S. Hau, G. Rizzello, P. Motzki, S. Seelecke. Stroke Magnification in Dielectric Elastomer Actuators with Dynamic Excitation. In: *Actuator 2018 – 16th International Conference on New Actuators*. Bremen, Germany, Juni 2018. Berlin: VDE Verlag, S. 483-487. ISBN 978-3-8007-4675-0

P. Linnebach, S. Hau, G. Rizzello, S. Seelecke. Design of a Dielectric Elastomer Actuator Driven Pneumatic Pump. In: *SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation*. Denver, Colorado, United States, März 2019. Verfügbar unter: DOI 10.1117/12.2514034

S. Hau, **P. Linnebach**, G. Rizzello, S. Seelecke. A novel design concept to boost the force output of dielectric elastomer membrane actuators. In: *SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation*. Denver, Colorado, United States, März 2019. Verfügbar unter: DOI 10.1117/12.2514210

P. Linnebach, S. Hau, P. Motzki, S. Seelecke. Auslegung, Aufbau und Validierung einer mit dielektrischen Elastomeraktoren angetriebenen Pneumatikpumpe. In: *4SMARTS Symposium für Smarte Strukturen und Systeme*. Darmstadt, Germany, Mai 2019. Aachen: Shaker Verlag S. 139-148. ISBN 978-3-8440-6425-4

D. Scholtes, M. Schmidt, **P. Linnebach**, P. Motzki, S. Seelecke. Entwicklung und Aufbau einer Testplattform zur Charakterisierung von FGL-Aktordrähten. In: *4SMARTS Symposium für Smarte Strukturen und Systeme*. Darmstadt, Germany, Mai 2019. Aachen: Shaker Verlag S. 129-138. ISBN 978-3-8440-6425-4