

Entwicklung bauraumoptimierter dielektrischer  
Elastomer-Aktoren und eines Prüfstandes zur  
Charakterisierung ihres Ermüdungsverhaltens

Dissertation

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von  
Marc René Hill

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums: 16.08.2018

Dekan: Univ. Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

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

Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Vorsitz: Univ. Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Wolfgang Ripplinger

# Zusammenfassung

Dielektrische Elastomere (DE) bieten durch ihre vielen Vorteile wie hohe Energiedichte, geringes Gewicht und lautlose Bewegung umfangreiche Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Aktorik und Sensorik.

In der vorliegenden Arbeit steht unter anderem die Entwicklung einer neuen Klasse von dielektrischen Membran-Aktoren im Fokus. Dieser Aktor-Typ soll durch seine besondere Streifengeometrie primär als Ventilantrieb eingesetzt werden und ermöglicht, die Ventile platzsparend nebeneinander anordnen zu können. Speziell wird in dieser Arbeit die Entwicklung und Charakterisierung dieser Streifenaktoren in Abhängigkeit verschiedener Designparameter präsentiert.

Weiterhin wird die Verwendung dieser DE als Aktoren und Sensoren zur gleichen Zeit, das sogenannte ‚Self-Sensing‘, untersucht. Dieser Effekt basiert auf der Änderung der Kapazität und des Widerstandes der Aktoren sowohl bei elektrischer Aktuierung als auch als Reaktion auf äußere Kräfte. Insbesondere wird die Möglichkeit untersucht, die Änderung der elektrischen Kenngrößen bei der Aktuierung durch analoge Schaltungstechnik zu detektieren.

Des Weiteren wird die Entwicklung und Validierung eines Ermüdungsprüfstandes vorgestellt. Dieser Prüfstand dient zur Ermüdung der Streifenaktoren und soll die Untersuchung der Mechanismen dienen, die zum Versagen der Aktoren führen können. Der Prüfstand ist in der Lage, mehrere Aktoren zur gleichen Zeit bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchtigkeitsgraden in einer Klimakammer zu ermüden.



# Abstract

Dielectric elastomers (DE) have many applications in the area of actuation and sensing because of their advantages like high energy density, low weight and silent movement.

This work focuses primarily on the development of a new class of dielectric membrane-actuators. The geometry of these actuators is strip shaped and was specially developed to be applied as valve drives. This strip shape allows the valves to be stacked up, thus saving space. This work presents the development and characterization of the strip-shaped actuators dependent on several design parameters.

Furthermore this work investigates the application of these DE as actuators and sensors at the same time, the so called ‘self-sensing’ effect. This effect is based on the change in capacitance and resistance of the actuators at electrical actuation as well as on the actuators’ reaction to changing external forces. In particular this work examines the possibility of detecting the change of the electrical parameters while actuation with an analog circuit.

Moreover, this work presents the development and validation of a fatigue test bench. This test bench fatigues the strip-shaped actuators and allows the examination of the mechanisms that could cause the failure of the actuators. The fatigue tester is located in a climate chamber and is able to fatigue various actuators at different environmental conditions, such as temperature and humidity.



# Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	4
1.2 Zielsetzung .....	4
1.3 Vorgehensweise .....	5
Kapitel 2 Dielektrische Elastomere .....	7
2.1 Grundlagen Aktorik.....	7
2.2 Grundlagen Sensorik .....	8
2.3 Konfigurationen .....	10
2.3.1 Stapelaktoren .....	10
2.3.2 Planare Aktoren .....	11
2.3.3 Roll/Röhrenaktoren .....	12
2.3.4 Normalenaktoren .....	13
Kapitel 3 Entwicklung Ventilantrieb auf Basis dielektrischer Elastomere.....	15
3.1 Stand der Technik.....	15
3.2 Motivation .....	16
3.3 Charakterisierung Pneumatikventil Bürkert 6604.....	17
3.4 Dielektrischer Elastomer Membran Aktor .....	21
3.5 Auslegung DE-Ventilantrieb.....	22
3.6 Experimentelle Charakterisierung Ventil mit DE-Antrieb.....	25
3.6.1 Schaltverhalten .....	26
3.6.2 Energieverbrauch.....	27
3.6.3 Proportionalbetrieb .....	29
3.7 Fazit.....	30
Kapitel 4 Entwicklung bauraumoptimierter DE-Aktor .....	31
4.1 Konzeptentwicklung.....	31
4.2 Theorie .....	34
4.2.1 Aktorgeometrie .....	34
4.2.2 Vordehnungen .....	35
4.3 Herstellung .....	37
4.3.1 Siebdruck.....	37

4.3.2	Entwicklung Trennmethode Aktormembran .....	38
4.4	Entwicklung Aktorgeometrie .....	39
4.4.1	Erste Aktorgeneration .....	39
4.4.2	Zweite Aktorgeneration .....	42
4.5	Experimentelle Charakterisierung .....	43
4.5.1	Charakterisierung ohne elektrische Spannung .....	44
4.5.2	Charakterisierung mit Hochspannung .....	48
4.5.3	Vergleich Streifenaktoren mit konischen Aktoren .....	52
4.6	Fazit .....	55
<b>Kapitel 5 Self-Sensing .....</b>		<b>57</b>
5.1	Motivation .....	57
5.2	Grundlagen .....	58
5.2.1	Sensorische Charakterisierung DE-Wandler .....	58
5.2.2	Hochpassschaltung .....	59
5.3	Konzeptentwicklung .....	62
5.4	Messschaltungen .....	64
5.5	Charakterisierung DE-System .....	65
5.6	Charakterisierung Messschaltung .....	67
5.6.1	Funktionsüberprüfung .....	68
5.6.2	Filterung Aktuierungsspannung .....	72
5.6.3	Hysteresevermeidung .....	79
5.6.4	Verstärkung ‚Self-Sensing‘-Signale .....	84
5.6.5	Untersuchung Aktuierungsspannung .....	86
5.7	Validierung Gesamtsystem .....	90
5.7.1	Sinusförmige Aktuierung .....	91
5.7.2	Trapezförmige Aktuierung .....	93
5.8	Fazit .....	95
<b>Kapitel 6 Entwicklung Ermüdungsprüfstand .....</b>		<b>97</b>
6.1	Motivation .....	97
6.2	Konzeptfindung .....	98
6.3	Anforderungen .....	101
6.4	Entwicklung Prüfzenarien .....	102
6.4.1	Mechanische Ermüdungsprüfung .....	104

6.4.2	Elektrische Ermüdungsprüfung .....	106
6.5	Zeitmanagement .....	108
6.5.1	Konstante Temperatur .....	108
6.5.2	Variation Ermüdungstemperatur .....	110
6.5.3	Optimierung Gesamtlaufzeit.....	113
6.5.4	Fazit .....	114
6.6	Entwicklung Ermüdungsprüfstand.....	115
6.6.1	Anordnung DE-Aktoren .....	115
6.6.2	Huberzeugung mechanische Ermüdung .....	117
6.6.3	Messung Schlüsselparameter.....	121
6.6.4	Konstruktion .....	122
6.6.5	Benötigte Komponenten .....	133
6.7	Steuerung und Messdatenerfassung .....	136
6.7.1	Steuerungskonzept.....	136
6.7.2	Positionierung Messvorrichtung.....	138
6.7.3	Kontaktierung Kraftsensor .....	138
6.7.4	Ansteuerung Gesamtprüfstand .....	140
6.7.5	Messdatenmanagement.....	142
6.7.6	Konzeptentwicklung Datenverwaltung .....	144
6.8	Aufbau.....	146
6.8.1	Elektronik .....	146
6.8.2	Mechanik .....	151
6.9	Validierung.....	157
6.9.1	Hochspannungsgruppe.....	157
6.9.2	Mechanik .....	164
6.9.3	Ermüdungsprüfungen .....	176
6.10	Fazit.....	187
<b>Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>		<b>188</b>
7.1	Zusammenfassung.....	188
7.2	Ausblick .....	191
<b>Abkürzungen.....</b>		<b>192</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>		<b>192</b>

Abbildungsverzeichnis.....	196
Tabellenverzeichnis.....	207
Literaturverzeichnis.....	209
Anhang A Mechanik .....	221
Anhang B Implementierung .....	226
Eigene Veröffentlichungen .....	236
Danksagung.....	237
Eidesstattliche Versicherung.....	238

# Kapitel 1

## Einleitung

---

Das Funktionsprinzip dielektrischer Elastomere (DE) wurde schon 1880 durch Wilhelm Conrad Röntgen [1] entdeckt, aber erst durch Pelrine *et. al.* [2,3] Ende des zwanzigsten Jahrhunderts am Stanford Research Institute für die Anwendung als Aktoren erforscht und publiziert. Dieser Meilenstein eröffnete völlig neue Möglichkeiten im Bereich der Aktorik, Sensorik und elektrischer Generatoren. Diese Materialien werden auch als elektromechanische Wandler bezeichnet [4]. Sie haben die Fähigkeit elektrische in mechanische Energie umzuwandeln und durch Anlegen eines elektrischen Feldes und der damit verbundenen Maxwell-Spannung [3,5] eine große Formänderung zu erzeugen und dadurch als Aktor zu agieren. Umgekehrt ist es ihnen möglich, mechanische in elektrische Energie umzuwandeln und somit als Generatoren zu arbeiten [6–9].

Der grundlegende Aufbau dieser Wandler ist eine dielektrische Elastomer-Membrane auf deren Ober- und Unterseite jeweils eine Elektrode aufgebracht ist. Typische Membran-Materialien sind Acrylate (3M VHB 4910 [10]) und Silikone (Wacker Elastosil [11]), wobei Acrylate eine höhere Dehnbarkeit [12], aber auch eine größere Viskoelastizität [13] als Silikone aufweisen. Elektroden sind für DE essentiell und müssen flexibel und leitfähig sein. Dies wird häufig durch Mischung von zwei Komponenten Silikon (Wacker, DuPont, NuSil usw.) mit leitfähigen Partikeln wie Graphit oder ‚Carbon Black‘ hergestellt [14,15].

Verbreitete Methoden zum Aufbringen der Elektrode auf die DE-Membrane reichen vom Auftragen per Hand, Aufsprühen und Laserablation [16] bis hin zu ‚Inkjet‘-Druck [14], Tampondruck und Siebdruck [17], wobei die letzten drei am ehesten zur Massenfertigung geeignet sind.

DE-Aktoren können in unterschiedlichen Konfigurationen realisiert werden. Die beiden

Hauptgruppen sind Stapelaktoren und Membranaktoren. Stapelaktoren [18–20] werden durch Falten aufgestapelt und arbeiten autark in Kontraktionsrichtung, wohingegen Membranaktoren lateral wirken und Vorspannmechanismen [21–23] benötigen, um Kraft und Hub zu generieren. Allerdings ist auch eine Protagonist-Antagonist-Anordnung [24] möglich, bei der zwei Membran-DE gegeneinander arbeiten. Membranaktoren können in verschiedensten Geometrien wie Rauten, Röhren, Kegel, Helix, Sphären oder ‚Minimum-Energie-Strukturen‘ realisiert werden, und lassen sich dadurch auf unterschiedlichste Anwendungen anpassen.

In dieser Arbeit wird eine neue Art bauraumoptimierter streifenförmiger DE-Membran-Aktoren vorgestellt und experimentell charakterisiert, die primär zur Anwendung als Ventilantrieb konzipiert sind. Dabei werden die Aktoren in Bezug auf Vordehnungsrichtung und Elektrodenfläche analysiert und darauf basierend deren Leistungsfähigkeit bewertet. Diese Aktoren sind im Vergleich zu bisherigen Streifenaktoren [28–31] in der Lage auch aus der Ebene heraus zu arbeiten und dadurch ermöglichen die gleiche Leistung wie z.B. konische Aktoren [32] bei vorteilhafterem Bauraum zu generieren.

DE bieten neben der Anwendung als Aktor auch die Möglichkeit als Sensor verwendet werden zu können. Dabei wird ausgenutzt, dass DE als Kondensator mit variabler Kapazität aufgebaut sind. Wird das DE gedehnt, verringert sich die Dicke der Membran, die Elektrodenfläche nimmt zu und dies resultiert in einem Anstieg der Kapazität. Durch dieses Wirkprinzip lassen sich DE als Dehnungssensoren, Drucksensoren und taktile Sensoren anwenden.

In dieser Arbeit wird eine weitere Besonderheit der DE untersucht. Dabei handelt es sich um das sogenannte ‚Self-Sensing‘, einer Eigenschaft die erlaubt, DE als Aktor und Sensor zur gleichen Zeit zu verwenden. Es existieren verschiedene Ansätze zur Umsetzung des ‚Self-Sensing‘. Zum einen gibt es modelbasierte Methoden, die zunächst Widerstand und Kapazität der DE bestimmen und aus diesen Werten mittels eines elektromechanischen Modells des DE die Dehnung bzw. Auslenkung errechnen. Zum anderen gibt es Methoden, die die Änderung der Impedanz verwenden, um die Auslenkung bzw. die Aktuierungskraft des DE zu bestimmen.

In dieser Arbeit werden ‚Self-Sensing‘-Methode entwickelt und experimentell charakterisiert, die mittels analoger Schaltungstechnik die Auslenkung des DE-Systems während der Aktuierung bestimmen. Diese Methode beruht auf der Überlagerung der

---

Aktuierungsspannung mit einem alternierenden Kleinspannungssignals, dessen Amplitude mittels analoger Filter zu einem Positionssignal umgewandelt wird. Dabei werden Signalform und Frequenz des Kleinspannungssignals variiert und deren Einfluss auf das Positionssignal analysiert.

Die primäre Anwendung, der in dieser Arbeit entwickelten bauraumoptimierten Streifenaktoren, sind Ventilantriebe. Damit DE-Ventilantriebe in Zukunft mit etablierten Technologien konkurrieren können, ist es notwendig deren Lebensdauer in Bezug auf Ermüdung und Versagen zu untersuchen. Da DE elektromechanische Wandler sind, müssen die Einflüsse mechanischer und elektrischer Belastungen sowie die Kombination aus beiden analysiert werden. Bisherige Arbeiten über mechanische Ermüdung [33–38] entwickelten Strategien zur dynamischen Ermüdung unter Vorgabe von Dehnung, Frequenz und Zyklenzahl sowie statischer Ermüdung bei konstanter Dehnung respektive mechanischer Spannung. Diese Strategien wurden für kautschukbasierte Elastomere entwickelt, können aber auch auf DE adaptiert werden. Darauf aufbauend wurden Vorgehensweisen zur statischen [39] und dynamischen [40] elektromechanischen Ermüdung von DE-Membranen entwickelt, die die Auswirkungen auf Relaxation und Kriechen analysierten. Im Unterschied dazu lag der Fokus bei der Erforschung der elektrischen Versagensmechanismen auf der Durchschlagsfestigkeit von Membranen in Abhängigkeit elektrischer Feldstärken, Dicke, Vordehnungen und Material [41–56]. Wobei diese Arbeiten ausschließlich vorsätzlich herbeigeführtes Versagen von DE analysierten. Diese Arbeiten haben die Ermüdung bzw. Versagen einzelner DE getestet.

Im Hinblick auf die Serienproduktion ist es jedoch notwendig mehrere DE gleichzeitig ermüden zu können, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wird ein Prüfstand vorgestellt, der eigens zur Ermüdung von DE entworfen wurde. Der Ermüdungsprüfstand soll mehrere Streifenaktoren gleichzeitig mechanisch, elektrisch oder elektromechanisch unter verschiedenen Umgebungsbedingungen ermüden können und dabei die Veränderung der mechanischen und elektrischen Größen der DE in Abhängigkeit der Ermüdungszyklen detektieren. Dabei wurde der Prüfstand für verschiedene Ermüdungsszenarien konzipiert, auf die mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen ausgelegt, darauf aufbauend konstruiert, gefertigt und montiert. Anschließend wurde der Prüfstand programmiert und die einzelnen Funktionen validiert.

## 1.1 Motivation

Konventionelle Technologien wie pneumatische und elektromagnetische Aktoren werden zum Schalten von Ventilen verwendet, sind gut erforscht und am Markt etabliert. Allerdings haben diese Systeme gravierende Nachteile wie hoher Energieverbrauch, Wärmeentwicklung und Geräuschemission bei der Aktuierung. Zudem bestehen diese Systeme in der Regel aus vielen Einzelteilen und sind schwierig zu montieren. Aufgrund dieser Nachteile wächst das Interesse an alternativen Aktortechnologien, die eine höhere Kosten- und Energieeffizienz aufweisen. In letzter Zeit ist daher die Industrie auf intelligenten Aktorsystemen aufmerksam geworden. Diese Systeme bestehen aus intelligenten Materialien wie Piezokeramiken, Formgedächtnislegierungen oder dielektrischen Elastomeren.

Eine Klasse dieser intelligenten Materialien – dielektrische Elastomere weisen einige gewünschte Eigenschaften wie geringer Energieverbrauch, lautloser Betrieb, Skalierbarkeit und geringes Eigengewicht auf. Diese Merkmale sind mit den konventionellen Technologien in konkreten Anwendungen schwierig oder garnicht zu erreichen. Solche Anwendungen sind unter anderem Roboter [57–61], Greifersysteme [62–64], Lautsprecher [65–69], Geräuschunterdrücker [70], optische Fokussiersysteme [71–77], haptische Displays [78,79], Pumpen [80–86] und Ventile [87–90].

## 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht aus vier Teilzielen. Zum einen wird ein DE-Ventilantrieb für das Pneumatikventil 6604 von *Bürkert Fluid Control Systems* auf Basis existierender konischer DE-Aktoren von Typ ‚D25‘ von *Parker* entwickelt, um die Vorteile dielektrische Elastomere gegenüber Elektromagneten aufzuzeigen.

Darauf basierend soll ein bauraumoptimierter Streifenaktor entwickelt werden, der einen neuen geometrischen Ansatz im Bereich der Membranaktoren darstellt. Dieser Aktor soll vornehmlich in Ventilantrieben eingesetzt werden und ist speziell auf die Geometrie des Ventils 6604 angepasst. Bisherige Arbeiten in diesem Bereich haben sich darauf konzentriert die Realisierbarkeit von DE basierten Ventiltrieben ungeachtet ihrer Maße aufzuzeigen [87–90].

Als zweites soll die Möglichkeit untersucht werden diese Streifenaktoren als Aktor und

---

Sensor zur gleichen Zeit zu betreiben. Dieses sogenannte ‚Self-Sensing‘ soll ermöglichen die Position des Ventiltriebs zu bestimmen und somit erlauben Volumenströme regeln zu können. In dieser Arbeit wird eine Hardware basierte Lösung zur Bestimmung der Position entwickelt.

Abschließend soll eine Vorrichtung entwickelt und validiert werden, die in der Lage ist diese Aktoren sowohl mechanisch als auch elektrisch zu ermüden. Mit diesem Aufbau soll das Ermüdungsverhalten dielektrischer Polymere bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Luftfeuchtigkeitswerten untersucht werden. Diese Untersuchungen sollen einen Beitrag bei der Weiterentwicklung dielektrischer Elastomeraktoren leisten und diese Technologie näher an die Serienreife führen.

### **1.3 Vorgehensweise**

Zu Beginn wird in Kapitel 3 ein Ventilantrieb für das Ventil 6604 auf Basis konischer DE-Aktoren entwickelt. Dieser wird mit dem serienmäßig verwendeten Elektromagneten in verschiedenen Kategorien wie Energieeffizient verglichen und die Vorteile der Verwendung von DE-Technologie in der Ventiltechnik aufgezeigt.

In Kapitel 4 wird die Entwicklung eines DE-Aktors in Streifenform präsentiert. Diese Streifenform ist an die Geometrie des Pneumatikventils 6604 angepasst. Die Entwicklung führt von der Konzeptfindung über die Auslegung bis hin zur Designverbesserung für die Fertigung durch Siebdruck. Im Folgenden wird der Einfluss einer uni- respektive bidirektionalen Vordehnung der Membran vor dem Druck des Aktorgehäuses auf die Reaktionskraft der Streifenaktoren bei mechanischer Auslenkung untersucht. Darauf aufbauend werden Aktoren mit Elektroden in verschiedenen Größen gefertigt und deren Wirkung auf die Reaktionskraft im Vergleich zur bloßen Membrane und in einem weiteren Schritt der Einfluss der Elektrodengröße und Vordehnrichtung auf die Reaktionskraft mit angelegter Hochspannung betrachtet. Anschließend werden diese Ergebnisse verglichen und hinsichtlich ihres Leistungspotentials bewertet.

Anschließend wird in Kapitel 5 eine Methode vorgestellt, die die elektromechanischen Eigenschaften von DE verwendet, um DE gleichzeitig als Aktor und Sensor zu verwenden. Diese ‚Self-Sensing‘-Methode basiert auf Amplitudenmodulation eines hochfrequenten Niederspannungssignals während der Aktuierung eines DE mit niederfrequenter

Hochspannung. Diese Modulation wird mittels analoger Schaltungstechnik durchgeführt. Es werden hierbei die Signalformen und Frequenzen der Niederspannung variiert und auf ihre ‚Self-Sensing‘-Eigenschaften untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird die analoge Schaltung weiterentwickelt und schließlich an verschiedenen Aktuierungsszenarien validiert.

Abschließend wird in Kapitel 6 die Entwicklung und Realisierung eines Prüfstandes zur Ermüdung von DE-Streifenaktoren präsentiert. Als Grundlage dafür werden Szenarien erarbeitet aus denen die mechanischen, elektrischen und thermischen Rahmenbedingungen für die Ermüdungsprüfung abgeleitet werden und auf deren Basis der Prüfstand ausgelegt wird. Anschließend werden die mechanischen und elektrischen Komponenten konstruiert, gefertigt und aufgebaut. Weiterführend werden die Steuerung und Messdatenerfassung des Prüfstandes sowie die dazugehörige graphische LabVIEW-Benutzeroberfläche vorgestellt und anschließend die einzelnen Funktionen des Prüfstandes separat voneinander validiert. Abschließend werden erste Ermüdungsversuche durchgeführt und für die gewonnenen Daten ein Konzept zur Messdatenverwaltung entwickelt und in Matlab umgesetzt.

# Kapitel 2

## Dielektrische Elastomere

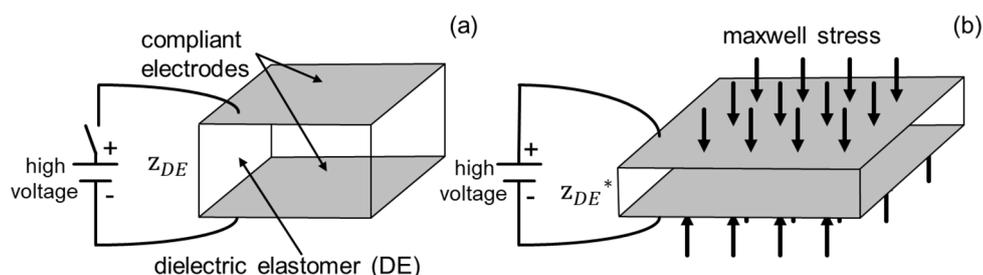
---

### 2.1 Grundlagen Aktorik

DE sind elektromechanische Wandler. Dies bedeutet, dass sie elektrische Energie in Mechanische umwandeln können. Das Funktionsprinzip von DE basiert auf elektrostatischem Druck dem sogenannten Maxwell-Druck, der aus dem externen elektrischen Feld entsteht, das eine anziehende elektrostatische Kraft zwischen den Elektroden generiert. Der Maxwell-Druck wird durch

$$\sigma_{Max} = \epsilon_0 \epsilon_R \left( \frac{U_{DE}}{z_{DE}} \right)^2 \quad (2.1)$$

beschrieben, wobei  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_R$  die Permittivität des Vakuums und der Membran,  $U_{DE}$  die angelegte Spannung und  $z_{DE}$  die Dicke der Membran beschreiben. Während die Elektroden sich gegenseitig anziehen, wird die Membran dazwischen zusammengedrückt. Aus dieser elektrostatischen Anziehung resultiert neben der Verringerung der Dicke eine laterale Ausdehnung der Membran, die zum Erzeugen von Bewegung genutzt werden kann. Abbildung 2.1 zeigt dieses Funktionsprinzip für den spannungsfreien Zustand und bei



**Abbildung 2.1:** Funktionsprinzip von dielektrischen Elastomeren; (a) spannungsfrei, (b) Hochspannung

angelegter Hochspannung. Das Ziel von DE-Aktoren ist die elektromechanische Formänderung in mechanische Arbeit umzuwandeln. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, sollte die DE-Membran eine

- geringe Dicke
- geringe Steifigkeit
- geringe Viskoelastizität
- hohe relative Permittivität
- hohe Isolationsfähigkeit

aufweisen. Die andere Komponente der DE-Aktoren ist die Elektrode. Diese sollte eine

- geringe Steifigkeit
- hohe Leitfähigkeit

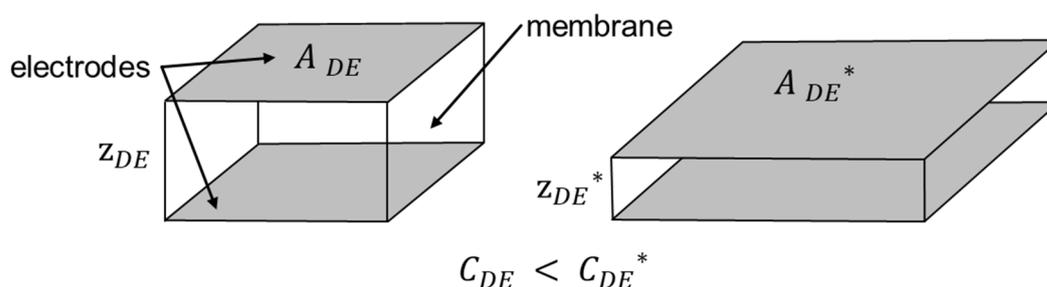
besitzen.

## 2.2 Grundlagen Sensorik

Die Funktionsweise von DE als Sensoren besteht darin, dass DE als Kondensatoren mit variabler Kapazität angesehen werden können und bei deren Auslenkung die Dicke der Membrane  $z_{DE}$  abnimmt und gleichzeitig die Elektrodenfläche  $A_{DE}$  zunimmt (siehe Abbildung 2.2). Dadurch nimmt die Kapazität des DE

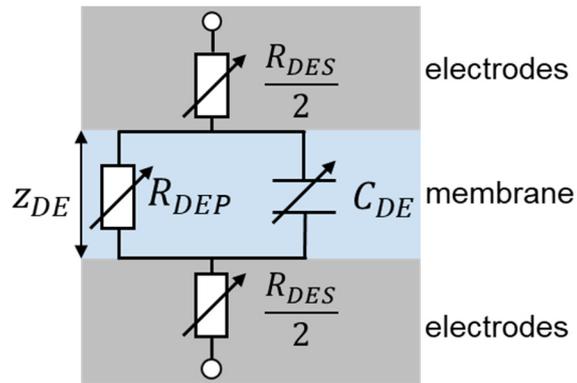
$$C_{DE} = \epsilon_0 \epsilon_R \frac{A_{DE}}{z_{DE}} \quad (2.2)$$

zu. Die natürliche und die relative Permittivität sind durch  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_R$  gegeben. Die relative Permittivität ist materialabhängig und beträgt bei Elastosil beispielsweise  $\epsilon_R = 2.8$ .



**Abbildung 2.2:** Kapazitätsänderung von DE durch Auslenkung

DE können durch ein vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 2.3) dargestellt werden, bei dem die Membran als Kondensator  $C_{DE}$  mit parallelem Widerstand  $R_{DEP}$  angesehen werden kann. Die Werte für  $R_{DEP}$  liegen im Bereich von mehreren  $G\Omega$ .

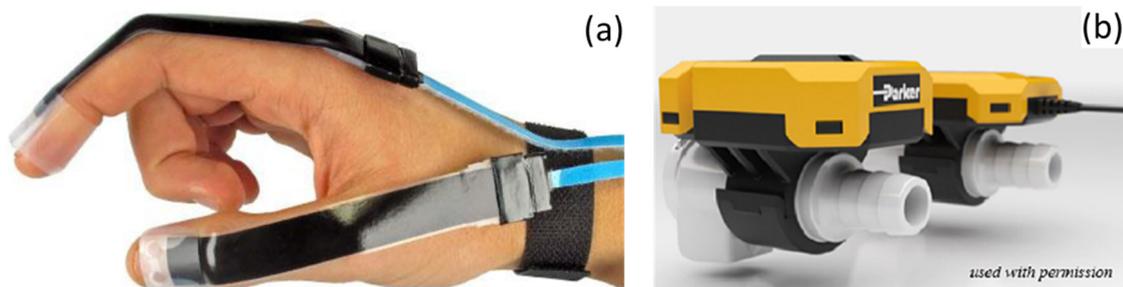


**Abbildung 2.3:** Elektrisches Ersatzschaltbild einer DE-Membran mit Elektroden

Die beiden Elektroden können als Widerstände  $R_{DES}$  angesehen werden und sind in Serie zu der Kapazität geschaltet. Basierend auf diesen elektrischen Eigenschaften werden DE verwendet, um Kompressionssensoren bzw. taktile Sensoren [91,92], Dehnungssensoren [93–99] und Drucksensoren [100,101] herzustellen.

Unter anderem wird die Bestimmung der Kapazität der DE zur Ermittlung der Dehnung des DE verwendet. Zur direkten Bestimmung der Kapazität werden überwiegend externe Messtechniken wie LCR-Meter [91,94] und Kapazitätsmesser [92], [95] eingesetzt. Xu et al. [96] haben hingegen durch Integration des Stromsignals die Ladung des DE berechnet und bei bekannter elektrischer Spannung die Kapazität des DE in Bezug zur Dehnung bestimmt. Es ist auch möglich, die DE in einer Hochpassschaltung zu verwenden und aus der Amplitudenänderung einer alternierenden hochfrequenten Eingangsspannung die Dehnung des DE zu ermitteln [98,100,101]. Diese Methode wird in Kapitel 5 näher betrachtet.

Eine zusätzliche Methode zur Verwendung von DE als Sensor ist die gleichzeitige Bestimmung der Kapazität und der Widerstände (siehe Abbildung 2.3). Darauf aufbauend wird ein Modell des DE-Systems verwendet aus dem dessen Dehnung berechnet wird [93,94]. Eine Auswahl von DE basierten Sensoren ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

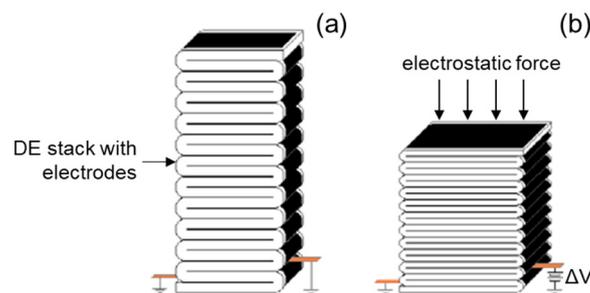


**Abbildung 2.4:** Auswahl von DE-Sensoren; (a) Bewegungssensor [96], (b) Drucksensor für Pneumatikanwendungen [101]

## 2.3 Konfigurationen

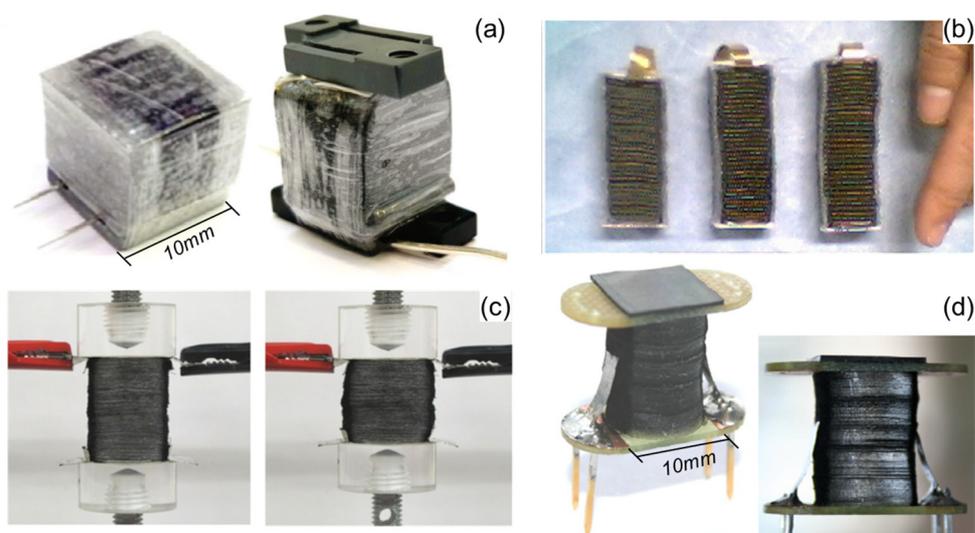
### 2.3.1 Stapelaktoren

Stapelaktoren erzeugen durch eine Dickenänderung beim Anlegen einer elektrischen Spannung eine lineare Bewegung. Diese Bewegung wird durch Kontraktion der Membran erzeugt und verläuft in Richtung der Dickenänderung. Die Dicke einer Lage beträgt zwischen  $1\ \mu\text{m}$  und  $100\ \mu\text{m}$  und die maximale Dickenkontraktion liegt normalerweise unter  $30\%$  [102]. Die daraus resultierende Kontraktion ist minimal. Deswegen werden mehrere Lagen der Membran gestapelt, um eine größere Gesamtkontraktion zu erzielen. Die einzelnen Lagen sind mechanisch in Serie geschaltet (siehe Abbildung 2.5).



**Abbildung 2.5:** Funktionsprinzip von Stapelaktoren [19]; (a) Spannungslos, (b) bei Hochspannung

Dies bedeutet, dass die Reaktionskraft der Aktoren durch Änderung der Elektrodenfläche beeinflusst werden kann. Das Stapeln der DE hat mehrere Vorteile. Diese Aktoren sind kompakt, bestehen aus einem Stück und sie sind in der Lage Kompressionskräfte

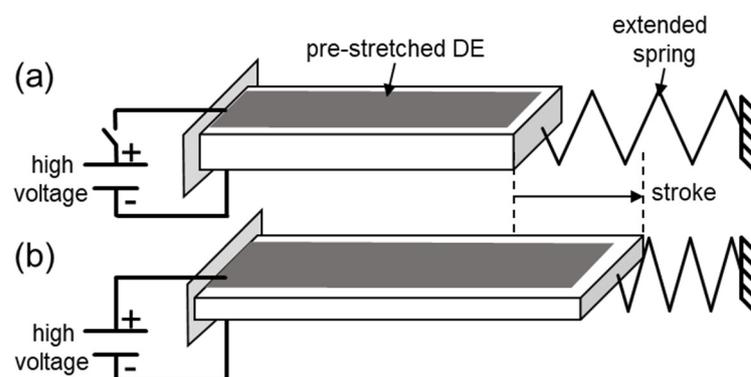


**Abbildung 2.6:** Stapelaktoren aus Literatur; (a) Maschinell gefertigter Stapelaktor [20], (b) Gefalteter Stapelaktor [19], (c) Stapelaktor zum Heben eines Gewichts [18], (d) Stapelaktor für Ventilanwendung [90]

auszuhalten. Durch ihre Fixierung an beiden Enden können diese Aktoren nur sehr kleine Hübe erzeugen. Zusätzlich können diese Stapel sich beim Anlegen einer Hochspannung durchbiegen [18,103], was zu Problemen wie beispielsweise Hubverlust oder dem Verrutschen der Aktoren führen kann. Diese Aktoren können als Ventile bzw. Pumpen [90,104] und in dynamischen Anwendungen [105,106] eingesetzt werden. Fertigungsmethoden werden in [19,20,104] untersucht. Eine Auswahl von Stapelaktoren ist in Abbildung 2.6 gegeben.

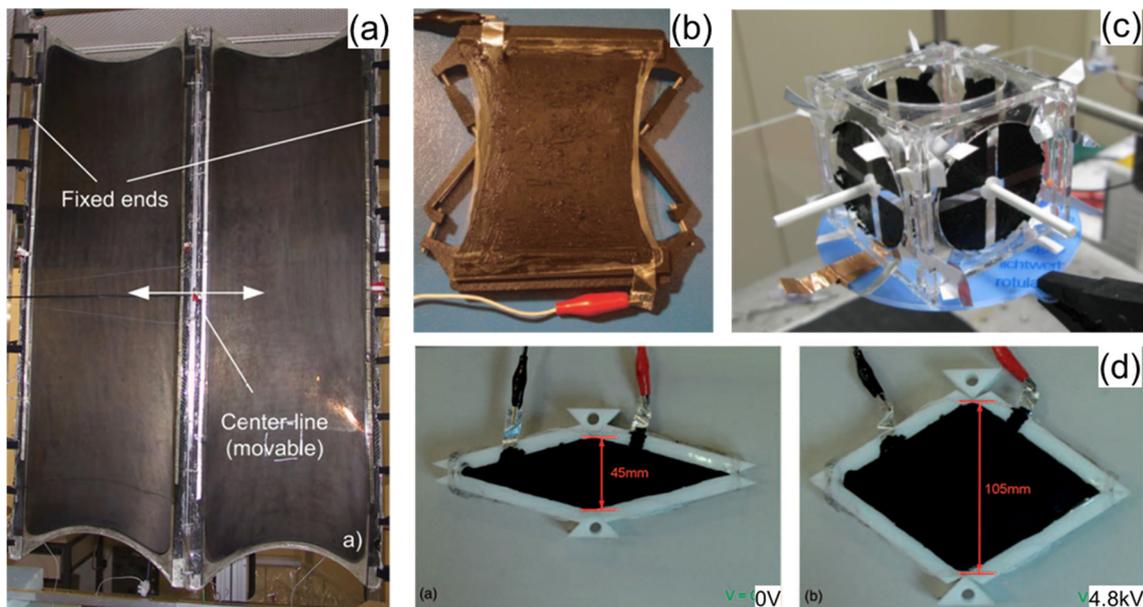
### 2.3.2 Planare Aktoren

Im Gegensatz zu Stapelaktoren verwenden Membranaktoren die transversale Ausdehnung der Fläche beim Anlegen einer Hochspannung. Diese Konfiguration bietet die Möglichkeit die Elektrodenfläche und das umgebende Gehäuse zu variieren. Dadurch wird eine hohe Flexibilität bei der Anwendung erreicht. Abbildung 2.7 zeigt das Funktionsprinzip der Membranaktoren. Hierbei wird der Aktor durch eine Feder vorgedehnt. In dieser Konfiguration stehen der dominante Hub und die Reaktionskraft senkrecht zur Dicke der Membran. Die Kraft dieser Aktoren kann durch Hinzufügen zusätzlicher Lagen erhöht werden. Einerseits kann das Gehäuse der Aktoren starr sein und die Membran teilweise [24,28,107] oder vollständig [25] umgeben. Andererseits sind auch Konfigurationen mit flexiblen Gehäusen möglich [108,48].



**Abbildung 2.7:** Funktionsprinzip eines Membran-Aktors; (a) vorgedehnt ohne elektrische Spannung, (b) bei Hochspannung

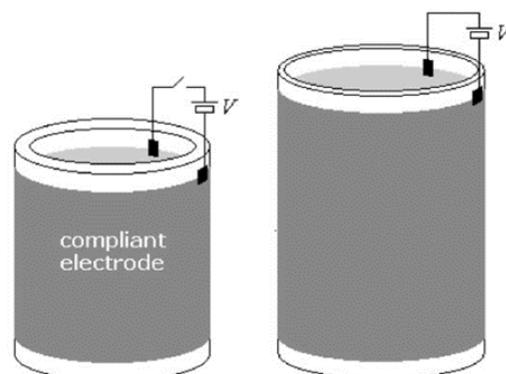
In diesen Fällen fungieren die Gehäuse als Vorspannungssystem und verformen sich mit der Membran. Abbildung 2.8 zeigt eine Auswahl verschiedene Membranaktoren. In dieser Aktorklasse lassen sich zwei Unterklassen identifizieren. Zum einen planare Aktoren in Streifenform, die sogenannten ‚strip-in-plane‘-DE (SIP, Abbildung 2.8 (a), (b)) und die ringförmigen ‚circular-in-plane‘-DE, (CIP, Abbildung 2.8 (c)).



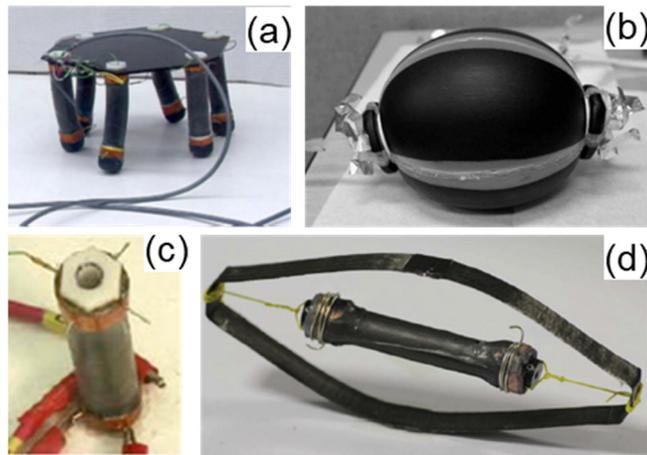
**Abbildung 2.8:** Fotos planarer Aktoren; (a) Protagonist-Antagonist-System [24], (b) Streifenaktor zur Erzeugung einer konstanten Kraft [107], (c) Kubischer Aktor mit sechs Freiheitsgraden [109], (d) rhombischer DE-Aktor [108]

### 2.3.3 Roll/Röhrenaktoren

Durch Aufrollen einer DE Membran um eine flexible Struktur wie eine Feder ist es möglich Röhrenaktoren zu erzeugen. Diese Aktoren erzeugen einen primären Hub in axialer Richtung [110–113], [89], [126]–[129]. Diese Konfiguration ist der planaren Membranaktoren ähnlich. Auch hierbei sind die Lagen der Membran parallel geschaltet und können die Reaktionskraft durch Hinzufügen von Lagen vergrößern. Abbildung 2.9 zeigt das Funktionsprinzip und Abbildung 2.10 eine Auswahl dieser Aktoren.



**Abbildung 2.9:** Funktionsprinzip von Roll- bzw. Röhrenaktoren [110]



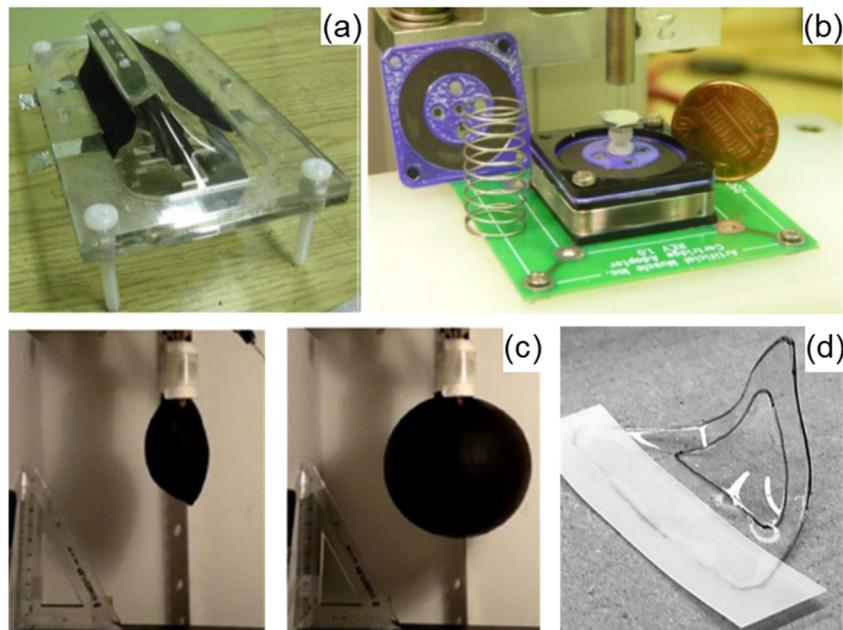
**Abbildung 2.10:** Fotos von Röhren/Rollaktoren aus der Literatur; (a) Rollaktoren in einer Laufplattform [112], (b) pneumatische Röhrenaktor-Pumpe [118], (c) Rollaktor mit multiplen Freiheitsgraden [113], (d) Rollaktor zur Verstellung eines flatternden Flügels [119]

### 2.3.4 Normalenaktoren

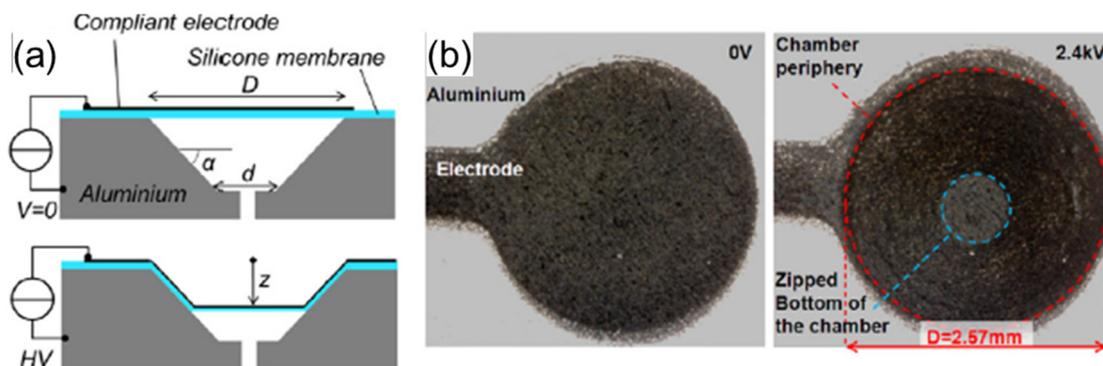
Wie planare Aktoren und Röhrenaktoren bestehen auch die Normalenaktoren aus Membranen. Auch bei dieser Aktorart existieren verschiedene Konfigurationen wie Sphären/Blasen [120–122], Spiralen [123] oder ‚Minimum-Energie-Strukturen‘ [124–127]. Diese Aktoren arbeiten, wie die Bezeichnung vermuten lässt, aus der Ebene heraus. Dazu muss die Membran in Normalenrichtung vorgespannt werden. Dies kann durch einen Vorspannmechanismus wie eine Masse, Feder oder ein unter Druck stehendes Fluid ausgeführt werden. Ein Vorteil dieser Aktorkonfiguration ist, dass das äußere Gehäuse in der Regel vollständig eingeklemmt ist. Dies reduziert die Anfälligkeit der Membran für Risse und andere Beschädigungen. Eine Auswahl dieser Aktoren ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

Eine spezielle Art dieser Normalenaktoren ist der sogenannte *ZIP*-Aktor (siehe Abbildung 2.12). Bei dieser Art ist der untere Teil des Gehäuses konisch geformt und aus leitfähigem Material gefertigt. Die Membran ist über dieses Gehäuse gespannt und zieht sich beim Anlegen einer Hochspannung in das untere Gehäuse hinein. Dadurch können sehr große Hübe erreicht werden.

Eine oft verwendete Geometrie dieser Aktorart sind die konischen DE-Aktoren [21,22,25–27,128–130]. Diese Aktoren bestehen aus einer ringförmigen Membran (Abbildung 2.13 (a)), die von einem steifen Gehäuse umgeben ist. Bei der Auslenkung respektive Aktuierung in Normalenrichtung wird die Membran zu einem Konus gedehnt (Abbildung 2.13 (b)).

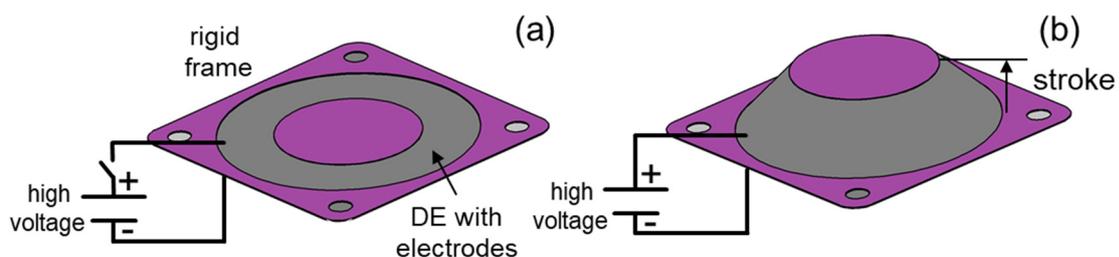


**Abbildung 2.11:** Fotos verschiedener Aktoren, die aus der Ebene arbeiten; (a) Flipflop-Aktor [131], (b) konischer Aktor [121], (c) Blasenförmiger Aktor [26], (d) Minimum-Energie-Struktur [124]



**Abbildung 2.12:** ZIP-Aktoren aus der Literatur [132]; (a) Funktionsprinzip, (b) Foto

Dadurch wird eine lineare Bewegung erzeugt. In dieser Arbeit werden in Kapitel 3 und Kapitel 5 Aktoren dieser Art zur Erzeugung von Hub verwendet. In dieser Aktorklasse lassen sich ebenfalls zwei Unterklassen identifizieren, die sogenannten ‚strip-out-of-plane‘-DE (SOP) und die ‚circular-out-of-plane‘-DE (COP, Abbildung 2.13).



**Abbildung 2.13:** Konischer DE-Aktor; (a) spannungsfrei; (b) mit angelegter Spannung

# Kapitel 3

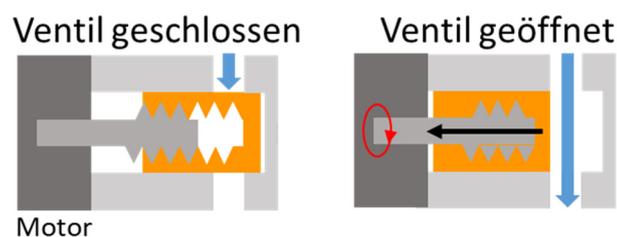
## Entwicklung Ventilantrieb auf Basis dielektrischer Elastomere

---

### 3.1 Stand der Technik

Ventile werden zur Steuerung beziehungsweise Regelung von Fluidströmen eingesetzt. Es existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Ventilvarianten für verschiedenste Drücke, Volumenströme und Medien [133–135]. Die Steuerung der Ventile übernehmen hierbei manuelle, elektromagnetische, elektrothermische, motorbasierte oder pneumatische Antriebe. Die am weitesten verbreiteten Antriebsarten in industriellen Anwendungen sind elektromagnetische, pneumatische sowie motorbasierte Ventilantriebe.

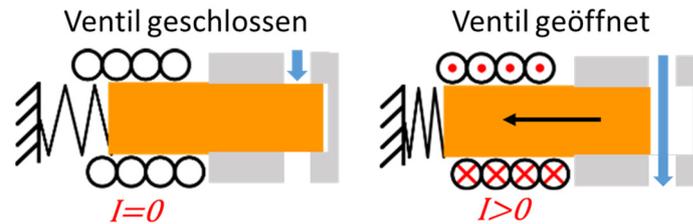
Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft den schematischen Aufbau eines Kolbenventils mit motorbasiertem Antrieb. In diesem Beispiel wird der Ventilkolben über ein Gewinde mittels eines Motors positioniert. Diese Ventilantriebe werden in Absperr- und Prozessventile verwendet. Diese Ventilantriebe können Kräfte bis über  $25\text{ kN}$  erzeugen, sind dafür aber relativ langsam.



*Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines Ventils mit Motorantrieb*

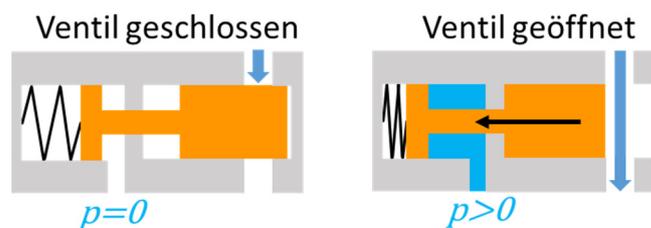
Der schematische Aufbau eines Kolbenventils mit elektromagnetischem Antrieb ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Dieser Antrieb arbeitet gegen eine Rückstellfeder und öffnet und schließt somit das Ventil. Eine Pulsweitenmodulation der Versorgungsspannung erlaubt

eine variable Stellung des Kolbens und somit die Regelung des Durchflusses. Diese Sorte von Ventilantrieben ist relativ schnell und kann Kräfte von wenigen Hundert  $N$  erzeugen. Dabei kommt es allerdings zu einer Wärmerwicklung durch die verwendete Spule und somit zur Erwärmung des gesamten Ventils.



**Abbildung 3.2:** Schematische Darstellung eines Ventils mit einem Elektromagneten als Antrieb

Abbildung 3.3 zeigt die schematische Darstellung eines pneumatisch betriebenen Ventils mit Rückstellfeder. Dieses Ventil wird durch einen Kolben in einer Druckkammer betätigt. In dieser Druckkammer wird das Ventil unter Druck gesetzt, drückt den Kolben gegen die Rückstellfeder und öffnet sich.



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung eines Ventils mit pneumatischem Antrieb

Neben diesem pneumatischen Ventilantrieb gibt es Varianten mit mehreren Druckkammern. Pneumatische Antriebe sind schnell, erreichen Stellkräfte bis zu  $40\text{ kN}$  und werden fast ausschließlich im industriellen Bereich sowie in Kraftwerken eingesetzt, da eine Druckluftversorgung benötigt wird und dabei zu einer erheblichen Geräuschentwicklung kommt.

## 3.2 Motivation

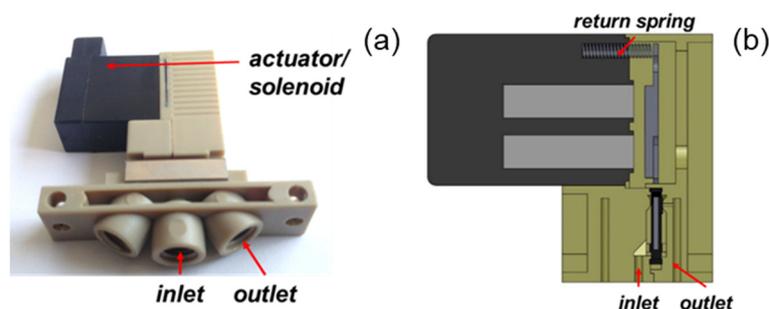
Im Vergleich zu etablierten Technologien wie pneumatische und elektromagnetische Ventilantriebe bieten DE-Systeme Vorteile wie geringe Wärmerwicklung und Gewicht, geräuschlose Aktuierung, hohe Energiedichte und Effizienz. Deswegen sind DE für die Anwendung als Ventilantriebe interessant.

Bisherige Arbeiten haben Mikroventile [87] und Ventilantriebe für pneumatische Ventile

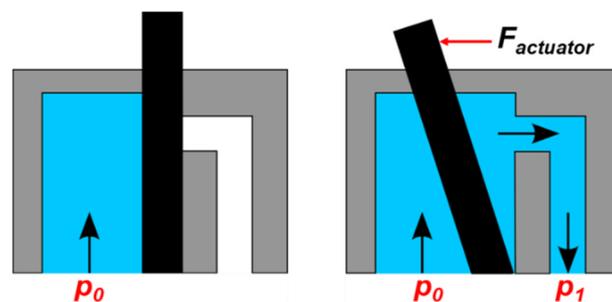
[88–90] auf DE-Basis entwickelt. Dabei wird unter anderem das Potential der Technologie in Bezug auf Energieeffizienz sowie der Umsetzung einer proportionalen Steuerung des Volumenstromes bei geringem Aufwand gezeigt.

### 3.3 Charakterisierung Pneumatikventil Bürkert 6604

In dieser Arbeit soll ein Magnetventil mit einem DE-Ventilantrieb ausgestattet werden. Bei dem Ventil handelt es sich um das Magnetventil 6604 von Bürkert Fluid Control Systems. Dieses Ventil ist multifunktional und kann Überdruck bis  $p_0 = 3 \text{ bar}$  als auch Vakuum schalten und ist durch Dichtungen aus Fluorkautschuck und einem Gehäuse aus PEEK für viele Gase geeignet. Das kommerziell erhältliche Ventil ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die in dieser Arbeit wird die 2/2-Wege Ausführung des Ventils untersucht. Bei dieser Ausführung drückt eine an einem Hebel angebrachte Dichtung auf den Auslass und hält das Ventil geschlossen. Beim Öffnen wird ein metallischer Hebel durch eine vom Elektromagneten erzeugte Kraft  $F_{actuator}$  angezogen. Dieser Vorgang spannt eine Rückstellfeder, die beim Deaktivieren des Elektromagneten den Hebel wieder in seine Ausgangsposition führt und das Ventil abdichtet. Die schematische Funktionsweise ist in Abbildung 3.5 dargestellt.



**Abbildung 3.4:** Magnetventil 6604 von Bürkert Fluid Control Systems; (a) reales Ventil, (b) CAD-Modell



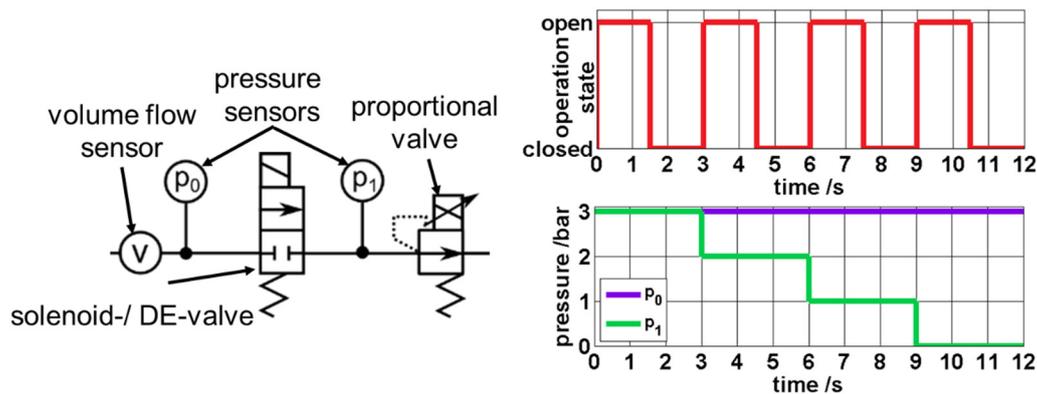
**Abbildung 3.5:** Funktionsweise des Magnetventils 6604

Diese Funktionsweise sollte sich auch durch ein DE-Aktor-System realisieren lassen.

Darum wird ein Versuchsaufbau konzipiert, der das Ventil mechanisch und pneumatisch charakterisiert und damit ermöglicht ein DE-Aktor-System auszulegen, das den Elektromagneten ersetzen kann.

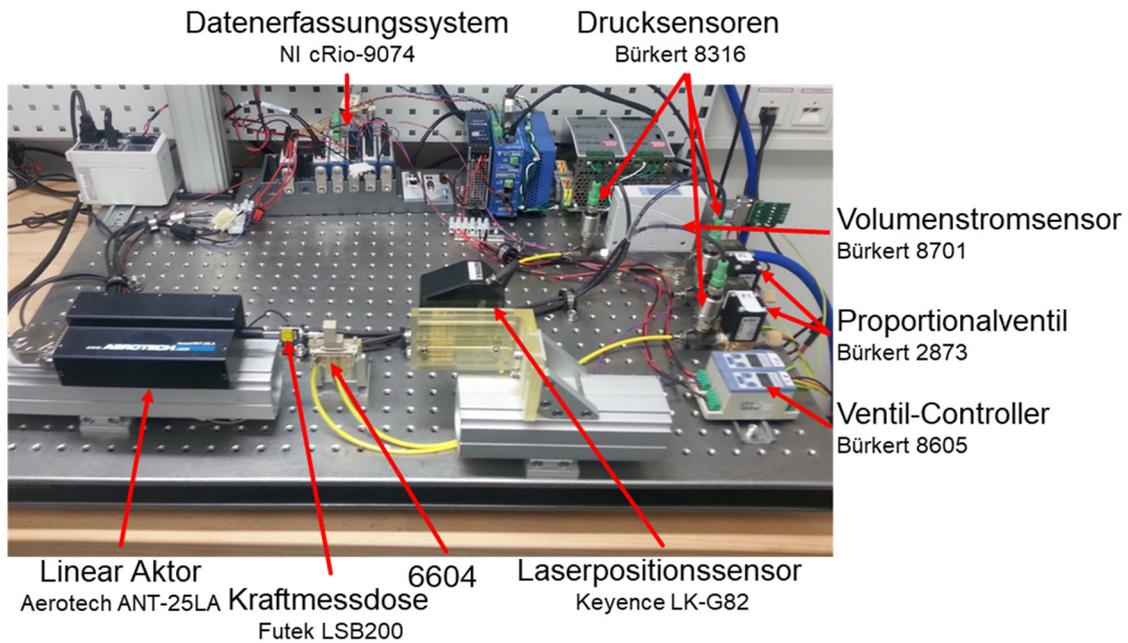
Der Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Magnetventils *Bürkert 6604* besteht aus einem Volumendurchflussmesser (*Bürkert 8701*, Nichtlinearität 0.3 %, Nichtwiederholbarkeit 0.1 %), zwei Drucksensoren (*Bürkert 8323*, Nichtlinearität 0.5 %, Hysterese 0.1 %, Nichtwiederholbarkeit 0.05 %), einem Proportionalventil (*Bürkert 2873*), einem Linearaktor (*Aerotech ANT 25LA*) und einem Kraftsensor (*Futek LSB200*, Nichtlinearität 0.1 %, Hysterese 0.1 %, Nichtwiederholbarkeit 0.05 %).

Die Drucksensoren messen den Eingangsdruck  $p_0$  und den Ausgangsdruck  $p_1$ . Der Eingangsdruck liegt bei  $p_0 = 3 \text{ bar}$  konstant und auf der Ausgangsseite werden Drücke von  $p_1 = 3 \text{ bar}$  bis  $0 \text{ bar}$  (Umgebungsdruck) in  $1 \text{ bar}$  Schritten mit einem separatem Proportionalventil mit einem PID-Algorithmus geregelt und für  $3 \text{ s}$  gehalten. Der Volumendurchflussmesser misst den durch die Druckdifferenz resultierenden Volumendurchfluss. Die resultierenden Druckverläufe sind in Abbildung 3.6 dargestellt.



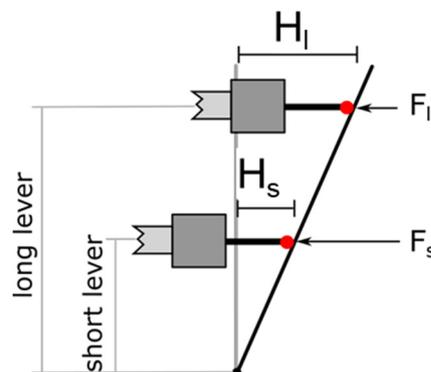
**Abbildung 3.6:** Versuchsszenario zur Charakterisierung des Magnetventils 6604 [32]

Vor der Versuchsdurchführung werden der Elektromagnet und die Rückstellfeder entfernt, um ausschließlich den Einfluss der Druckdifferenzen auf die resultierende Kraft zu untersuchen. Ein FPGA (*NI cRio 9076*) wird benutzt, um einen Linearaktor zu steuern der abwechselnd für jeweils  $1.5 \text{ s}$  den Ventilhebel öffnet und schließt. Währenddessen werden beide Drücke, der Volumendurchfluss und die auftretenden Kräfte gemessen. Außerdem wird gleichzeitig das Proportionalventil geregelt und die aufgenommenen Daten zu einem PC mit LabVIEW gesendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Verbindung des Kraftsensors zum Ventilhebel wird durch einen magnetischen Ball realisiert.



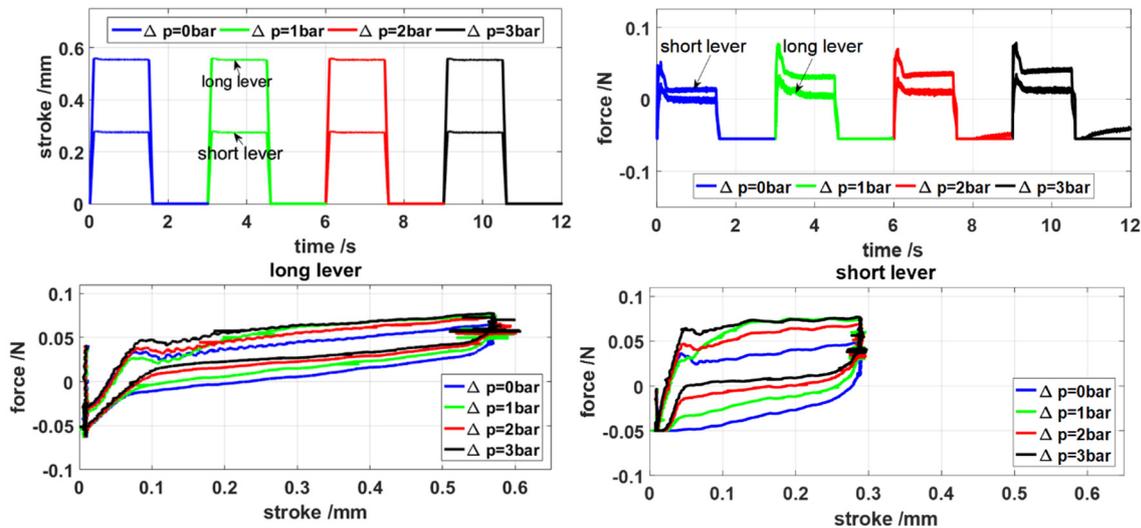
**Abbildung 3.7:** Versuchsaufbau für mechanische und pneumatische Charakterisierung

Der Verbindungspunkt zum Ventilhebel ist variabel wählbar wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Daraus lässt sich eine optimale Kombination aus Hub und Kraft zum Betätigen des Ventils bestimmen. Die Messungen werden an zwei verschiedenen Kontaktpositionen am Ventilhebel durchgeführt. Eine Messung mit einem kleinen Abstand zum Drehpunkt (kurzer Hebel) und einer mit einem großen Abstand (langer Hebel). Die Abstände zum Drehpunkt betragen  $12\text{ mm}$  für den kurzen Hebel und  $23\text{ mm}$  für den langen Hebel. Der Hub, der benötigt wird, um das Ventil vollständig zu öffnen, beträgt für den kurzen Hebel  $H_s = 0.3\text{ mm}$  und für den langen  $H_l = 0.575\text{ mm}$ . Diese Werte werden durch langsames Bewegen des Ventilhebels durch den Linearaktor und gleichzeitigem Messen der benötigten Kraft ermittelt. Der maximale Hub wird durch den Anstieg der Kraft beim Öffnen des Ventils detektiert. Wenn die Kraft einen exponentiellen Anstieg aufweist, dann



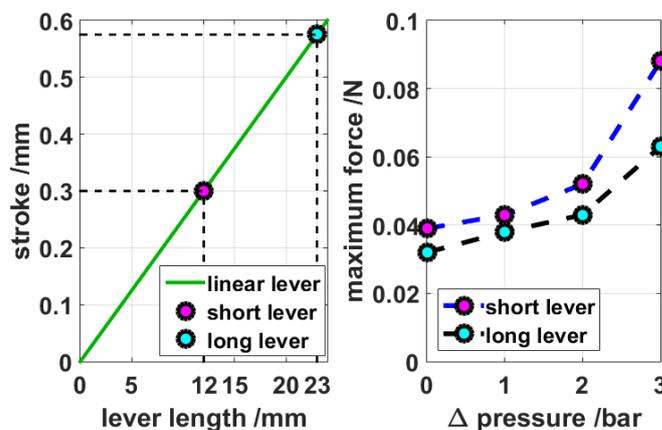
**Abbildung 3.8:** Kraft / Hub Charakterisierung an verschiedenen Kontaktpunkten des Ventilhebels [32]

ist der maximale Hub erreicht. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 3.9 dargestellt und zeigen, dass wie erwartet bei allen Druckdifferenzen der kurze Hebel einen kleineren Hub aber eine größere Kraft als der lange Hebel aufweist.



**Abbildung 3.9:** Kraft und Hub für verschiedene Kontaktpunkte und Drücke (oben) und Kraft über Hub für beide Hebelängen (unten) [32]

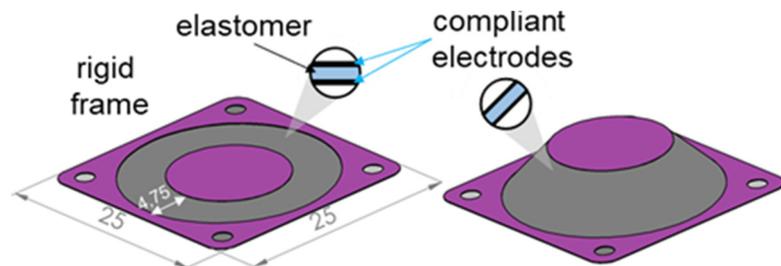
Der genaue Zusammenhang ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Im Speziellen: der kurze Hebel erreicht eine maximale Kraft von  $|F_{max}| = 0.1\text{ N}$  bei einem Hub von  $H_s = 0.3\text{ mm}$ , während der lange Hebel einem Hub von  $H_l = 0.575\text{ mm}$  und eine maximale Kraft von  $|F_{max}| = 0.065\text{ N}$  besitzt. Der DE-Aktor muss dafür ausgelegt werden beide Anforderungen an Kraft und Hub zu erfüllen. Dies ist erforderlich, damit das Ventil vollständig geöffnet werden kann. Ein Hub von  $0.3\text{ mm}$  erscheint am einfachsten durch ein DE-Aktor System umsetzbar zu sein, deswegen wird der kurze Hebel für das endgültige Design ausgewählt. Die Kraft kann durch Variation der Federsteifigkeit und/oder durch stapeln der DE-Aktoren erreicht werden.



**Abbildung 3.10:** Vergleich von gemessenen Hub und Kraft für beide Hebellängen [32]

### 3.4 Dielektrischer Elastomer Membran Aktor

Die grundlegende Konfiguration der verwendeten DE Aktoren ist ein Kondensator mit der Möglichkeit seine Form zu ändern. Dieser Aktor wird aus einem dielektrischen Elastomerfilm hergestellt, auf dessen Ober- und Unterseite Elektroden angebracht sind. Eine Skizze der verwendeten DE Aktoren ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

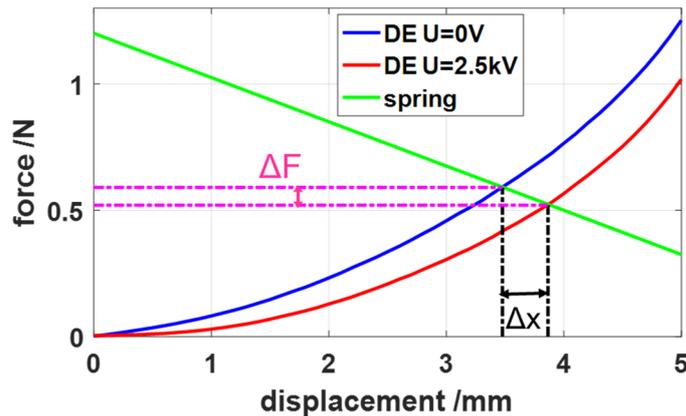


**Abbildung 3.11:** konischer Membran DE nicht ausgelenkt (links) und ausgelenkt (rechts)

Der in diesem Kapitel verwendete DE ist ein ‚D25‘ der Firma Parker. Die Kantenlänge beträgt 25,4 mm. Die Membran basiert auf Silikon und ist 40  $\mu\text{m}$  dick. Die runde Membran ist von einem steifen und passiven Epoxidgehäuse umgeben, welches die Bewegung des Aktors auf Bewegungen aus der Ebene beschränkt. Die Durchmesser des inneren und äußeren Gehäuses sind 12,5 mm beziehungsweise 22 mm. Die Membran wird vor der Fertigung mit 20 % bi-axial vorgedehnt. In diesem vorgedehnten Zustand kann die Membran eine zusätzliche Dehnung von 50 % aushalten.

Um einen Hub zu erzeugen, ist es notwendig auf die DE Membran eine mechanische Vorspannkraft aufzubringen, beispielsweise durch eine mechanische Feder. Durch die Kompression der Feder gegen den DE wird die Membran gedehnt und das innere Gehäuse bewegt sich zu einem Punkt an dem ein Kräftegleichgewicht herrscht. Das Anlegen einer elektrischen Spannung verursacht eine laterale Dehnung der Membran, welche zu einer Verringerung der Reaktionskraft der DE Membran aus der Ebene heraus führt. Die Feder dehnt sich dadurch aus und bewegt sich mit dem inneren Gehäuse in eine neue Gleichgewichtsposition. Die Distanz zwischen den beiden Gleichgewichtspositionen wird als Hub bezeichnet. An Beispiel für einen federbelasteten DE ist in Abbildung 3.12 gegeben.

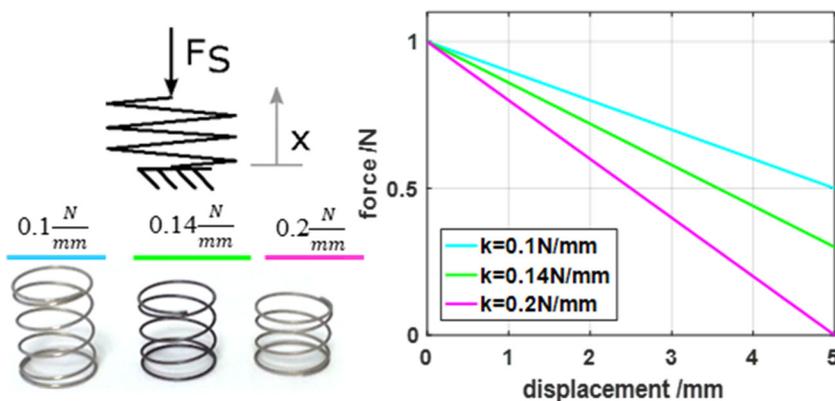
Die Schnittpunkte zwischen dem inaktiven (blau) und dem aktivierten DE (rot) und der Federkurve (grün) bestimmen den resultierenden Hub  $\Delta x$  und die Kraft  $\Delta F$ .



**Abbildung 3.12:** Charakteristische Kraft-Auslenkungs-Kurven eines konischen DE Aktors mit Gleichgewichtspunkten

### 3.5 Auslegung DE-Ventilantrieb

Eine Voruntersuchung wird durchgeführt, um das Aktor-System an die vorgegebenen Spezifikationen anzupassen. Bei dieser Analyse werden drei lineare Federn mit den Federsteifigkeiten  $k_1 = 0.1 \text{ N/mm}$ ,  $k_2 = 0.14 \text{ N/mm}$  und  $k_3 = 0.2 \text{ N/mm}$  verwendet (vgl. Abbildung 3.13).



**Abbildung 3.13:** Charakteristik der verwendeten Federn [32]

Die Reaktionskraft des konischen DE-Aktors  $F_{DE}$  wird bei konstanter Spannung gemessen und ist in Abbildung 3.14 (links) gezeigt. Dabei sind die verschiedenen Spannungen in unterschiedlichen Farben dargestellt,  $U_{DE} = 0 \text{ V}$  in blau und  $U_{DE} = 2.5 \text{ kV}$  in Rot. Dabei fällt auf, dass die angelegte Spannung die Reaktionskraft des Aktors verringert.

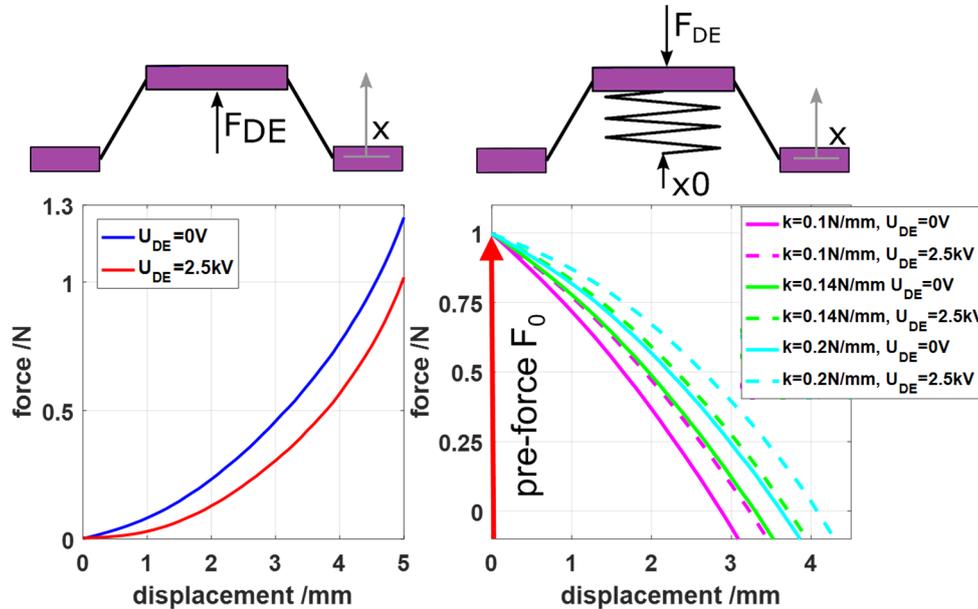
Die Kombination der Reaktionskraft des DE-Aktors  $F_{DE}$  mit der Federkraft  $F_s$  resultiert in eine DE-Aktor-System-Kraft  $F_{DES}$  die durch

$$F_{DES}(x, U_{DE}) = -F_s(x) - F_{DE}(x, U_{DE}) \quad (3.1)$$

gegeben ist, wobei  $x$  die Auslenkung des DE-Aktors aus der Ebene beschreibt, und

$$F_s(x) = k(x - x_0) \quad (3.2)$$

die Federkraft beschreibt. Dabei ist  $k$  die Federsteifigkeit und  $x_0$  die Vordehnung der linearen Feder. Dieser Zusammenhang ist für die verschiedenen Federsteifigkeiten in Abbildung 3.14 (rechts) dargestellt.



**Abbildung 3.14:** Kraft Charakteristik einer einlagen DE Membrane (links), und DE mit linearer Feder (rechts) [32]

Damit das DE-Aktor-System ordnungsgemäß arbeitet, muss folgende Bedingung

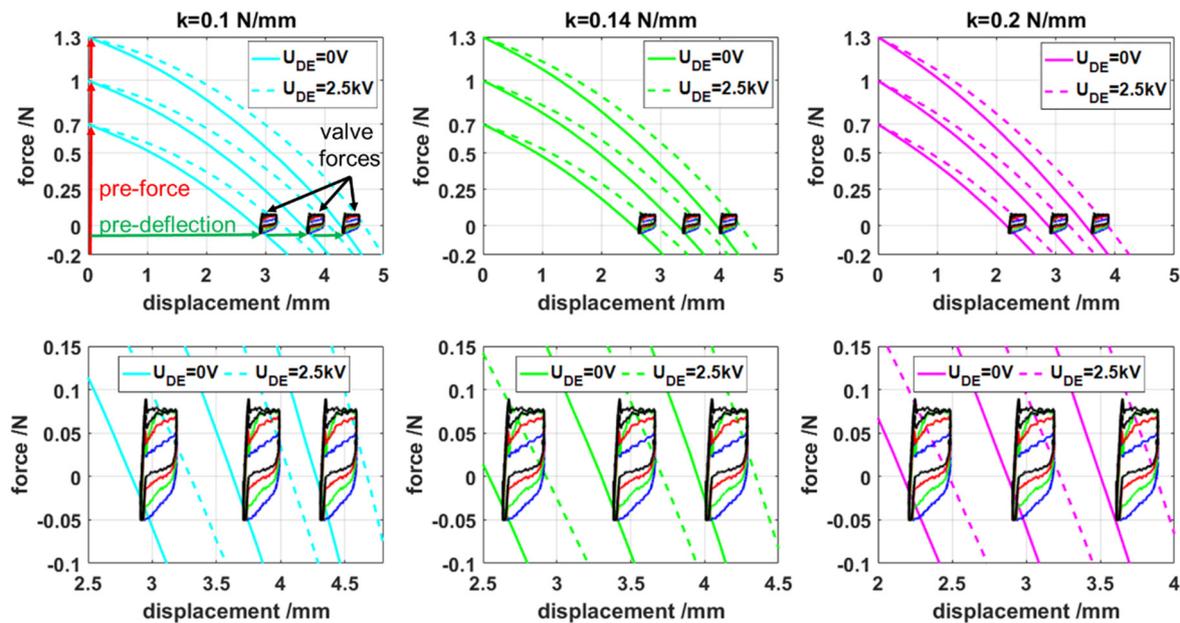
$$F_{DE}(x, U_{min}) < F_{valve}(x) < F_{DE}(x, U_{max}) \quad (3.3)$$

für jedes  $x$  im Arbeitsbereich erfüllt sein. Dabei sind  $U_{DE,min} = 0 V$  und  $U_{DE,max} = 2.5 kV$  das Minimum und das Maximum der anzulegenden Spannung. Die graphische Lösung dieser Gleichung bedeutet, dass die Kraft-Hub Charakteristik des Ventils in dem durch die Kraft-Hub Charakteristik des DE-Aktor-Systems in Abhängigkeit der minimalen und maximalen Spannungen aufgespannten Fläche liegen muss.

Für jede gewünschte Gleichgewichtsposition ist es möglich auf dieser Fläche einen Spannungswert zu finden dessen Schnittpunkt auf dem gewünschten Wert liegt. Das DE-Aktor-System und Ventilkräfte für die verwendeten DE-Aktoren, Federn und Ventile sind in Abbildung 3.15 dargestellt, dabei steht jede durchgezogene Linie für eine andere Vorspannkraft der Feder. Jede Kraft-Hub-Kennlinie steht für eine andere Vorauslenkung zwischen DE-Aktor-System und Ventil (siehe Abbildung 3.9).

Es kann beobachtet werden, dass es mit dieser Konfiguration nicht möglich ist die Ventilkräfte zwischen die DE-Aktor-System-Kurven ohne Überschneidung zu

positionieren. Daraus lässt sich folgern, dass ein einlagiges DE-Aktor-System nicht in der



**Abbildung 3.15:** Vergleich zwischen einlagigem DE-Aktor-System und Ventilkraft [32]

Lage ist das Ventil vollständig zu öffnen oder zu schließen. Um diese Beschränkung zu überwinden, ist es möglich mehrere Lagen der DE-Membranen übereinander zu stapeln. Deswegen wird eine zusätzliche DE-Membran parallel zur vorhandenen Lage hinzugefügt. Die Kräfte dieses doppelagigen DE-Aktor-Systems resultiert zu

$$F_{DES}(x, U) = -F_s(x) - 2 F_{DE}(x, U) \quad (3.4)$$

Aus Abbildung 3.16 wird ersichtlich, dass alle doppelagigen DE-Aktor-Systeme unabhängig von der Federsteifigkeit die Formel (3.3) erfüllen. Daraus ergibt sich, dass keine zusätzlichen DE-Membran-Lagen notwendig sind. Für den Ventilantrieb-Prototypen wird die weichste Feder ausgewählt, da diese den größten Hub verspricht.

Der Ventilantrieb in Abbildung 3.17 wird als Adapter für das Magnetflipperventil 6604 konzipiert, in Solidworks konstruiert und mit einem 3D-Drucker (*Objet500*) gefertigt. Der Ventilantrieb beherbergt die beiden DE-Aktoren, die mechanische Feder sowie den Adapter zum Ventilhebel. Die Vorspannung der Feder lässt sich durch einen Gewindemechanismus einstellen. Die elektrische Kontaktierung wird durch gewöhnliche Schrauben hergestellt.

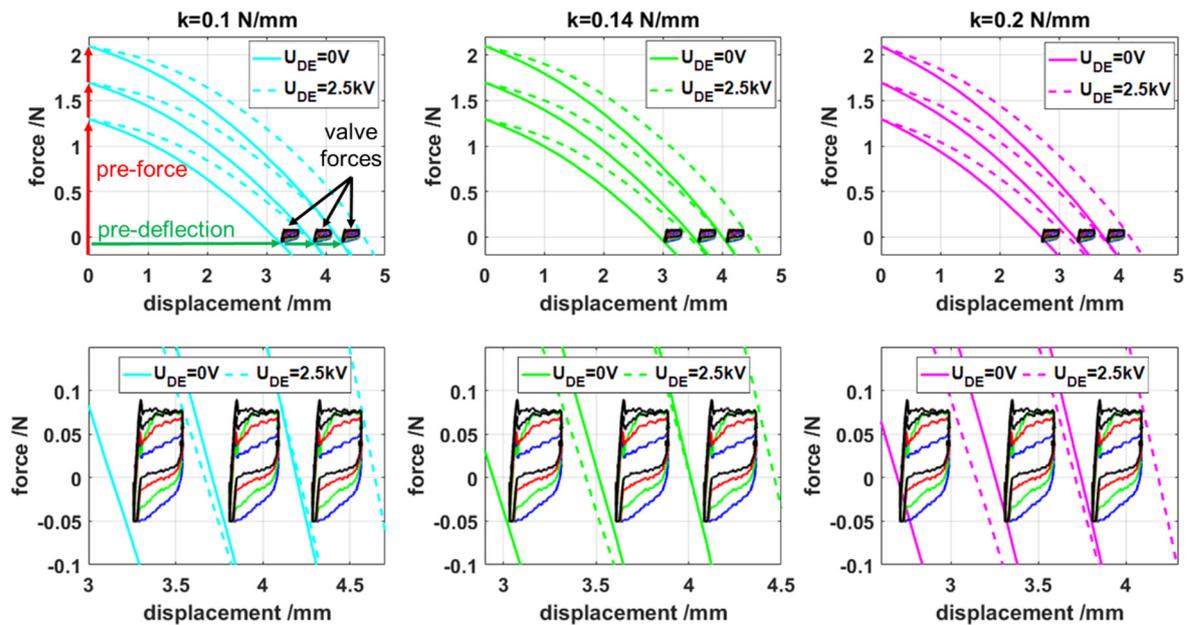


Abbildung 3.16: Vergleich zwischen doppellagigem DE-Aktor-System und Ventilkraft [32]

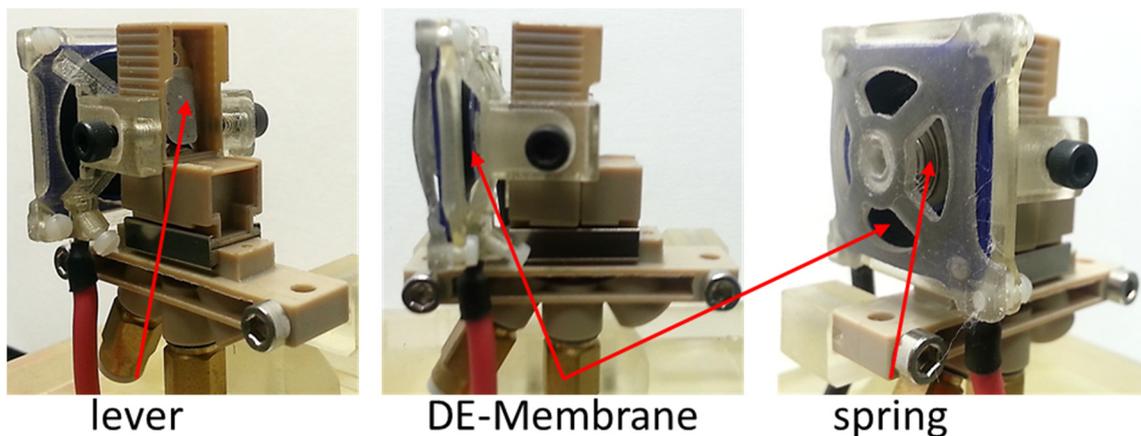
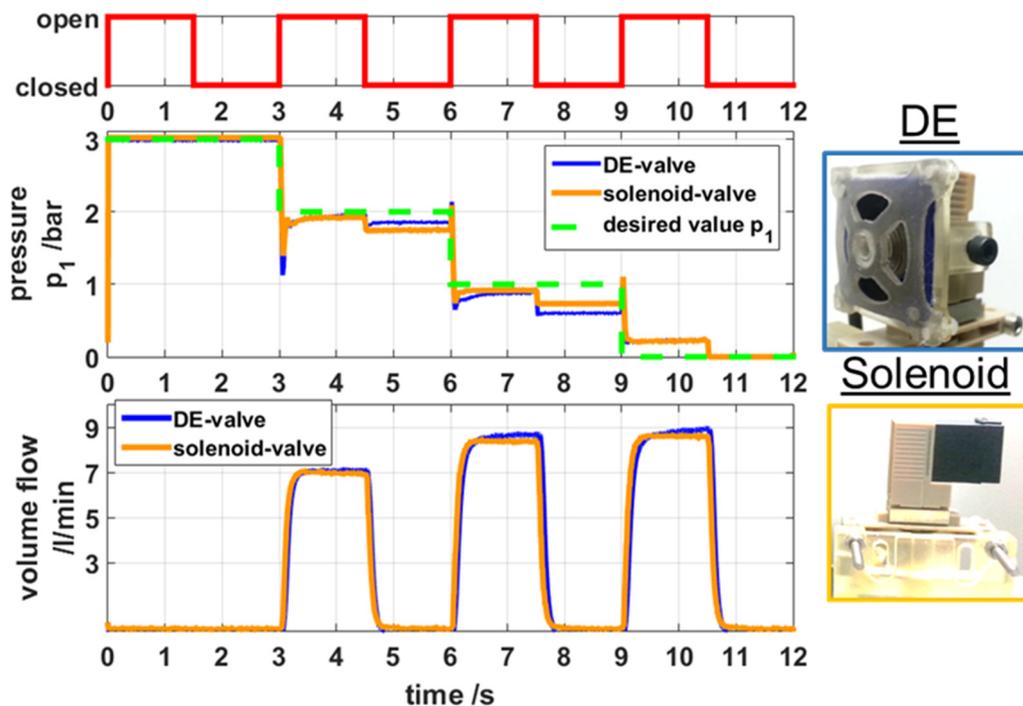


Abbildung 3.17: Ventilkörper mit DE-Antrieb

### 3.6 Experimentelle Charakterisierung Ventil mit DE-Antrieb

Die experimentelle Charakterisierung der Leistungsfähigkeit der Ventilantriebe wurde mittels eines FPGA (NI cRio 9076) durchgeführt. Der FPGA generiert dabei für den DE-Antrieb eine Rechteckspannung, die alle  $1.5\text{ s}$  von  $0\text{ V}$  auf  $6.25\text{ V}$  und zurück wechselt. Diese Spannung wird mit einem Hochspannungsverstärker (*ULTRAVOLT 4HVA24-P1*) auf maximal  $2.5\text{ kV}$  verstärkt und an die DE angelegt. Der Elektromagnet wird mit einer  $12\text{ V}$  Spannung betrieben. Die Spannungen werden für jeweils vier Zyklen an die Ventilantriebe angelegt. Gleichzeitig werden mit dem FPGA beide Drücke und den Volumendurchfluss gemessen, das Proportionalventil geregelt und die aufgenommenen Daten zu einem

Computer mit LabVIEW übermittelt. Die Ergebnisse sind in vgl. Abbildung 3.18 dargestellt und zeigen, dass beide Ventilantriebe ungefähr den gleichen Volumendurchfluss bei den verschiedenen Druckdifferenzen erzielen.



**Abbildung 3.18:** Pneumatische Leistungsfähigkeit des Ventils mit DE- und elektromagnetischem Antrieb [32]

### 3.6.1 Schaltverhalten

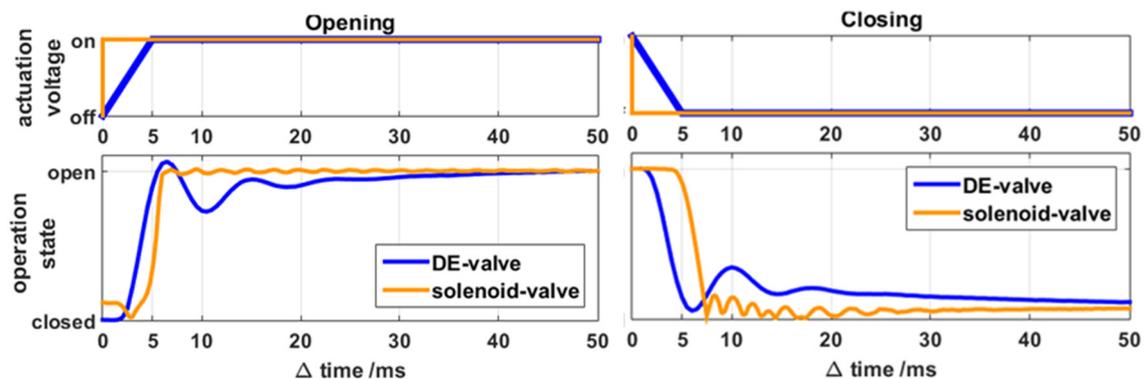
Das Schalten des Elektromagneten wird durch ein Relaismodul des FPGA realisiert. Der Schaltvorgang kann als unmittelbar angesehen werden. Im Gegensatz dazu wird Schalten des DE-Ventilantriebes durch eine kontinuierlich bis zum Endwert ansteigende Hochspannung umgesetzt. Dieses Hochspannungssignal hat eine Anstiegszeit von  $5\text{ ms}$  und wird auf diese Weise implementiert, um das DE-System vor Spannungsspitzen zu schützen, die die DE-Membran vor Beschädigung oder Zerstörung bewahren. Diese Spannungsspitzen resultieren aus dem Hochpass-Verhalten des DE-Systems, welche in erster Annäherung mit

$$I_{DE} = C_{DE} \frac{dU_{DE}}{dt} \quad (3.5)$$

angenommen werden können. Dabei sind  $U_{DE}$ ,  $I_{DE}$  und  $C_{DE}$  die Spannung der Strom und die Kapazität des DE-Systems. Die Kapazität ist in der Größenordnung von  $nF$ , der Strom ist proportional zur zeitlichen Änderung der Hochspannung. Diese schnellen Veränderungen in der Hochspannung führen zu Stromspitzen. Diese Stromspitzen können

zu lokalen Spannungsspitzen in der Elektrode führen, welche die Membrane zerstören können.

Wie in Abbildung 3.19 (oben) gezeigt, ist die Zeit zum Öffnen des Ventils mit dem Elektromagneten ungefähr  $6\text{ ms}$ . Dieser Wert ist vergleichbar mit der Zeit des DE-Ventilantriebs. Außerdem werden Schwingungen in den Verläufen beider Ventilantriebe beobachtet, wobei die Schwingungsamplitude des DE-Systems größer ist als die des Elektromagneten. Zusätzlich wird ein Kriechen im DE-Ventilantrieb beobachtet, welches auf die grundlegende Viskoelastizität des DE zurückzuführen ist und eine kontinuierliche Zunahme des Hubes bewirkt. Die Position an der das Ventil vollständig geöffnet ist, beträgt  $h = 0.3\text{ mm}$ . Die beobachtete Schließzeit beträgt für den Elektromagneten ungefähr  $7.5\text{ ms}$  wie in Abbildung 3.19 (unten) dargestellt. Diese Zeitspanne ist größer als die Schließzeit des DE-Systems, welche ungefähr  $6\text{ ms}$  beträgt, wobei die Hochspannung mit einer Rampe von  $5\text{ ms}$  von  $2.5\text{ kV}$  auf  $0\text{ V}$  abgesenkt wird. Diese Verzögerung beim Schließen durch den Elektromagneten kann durch die Vergrößerung der Induktivität beim Anziehen des Ventilhebels erklärt werden. Dadurch ergibt sich eine größere Zeitkonstante des RL-Schaltkreises.



**Abbildung 3.19:** Schaltverhalten des DE- und elektromagnetischen Ventilantriebs [32]

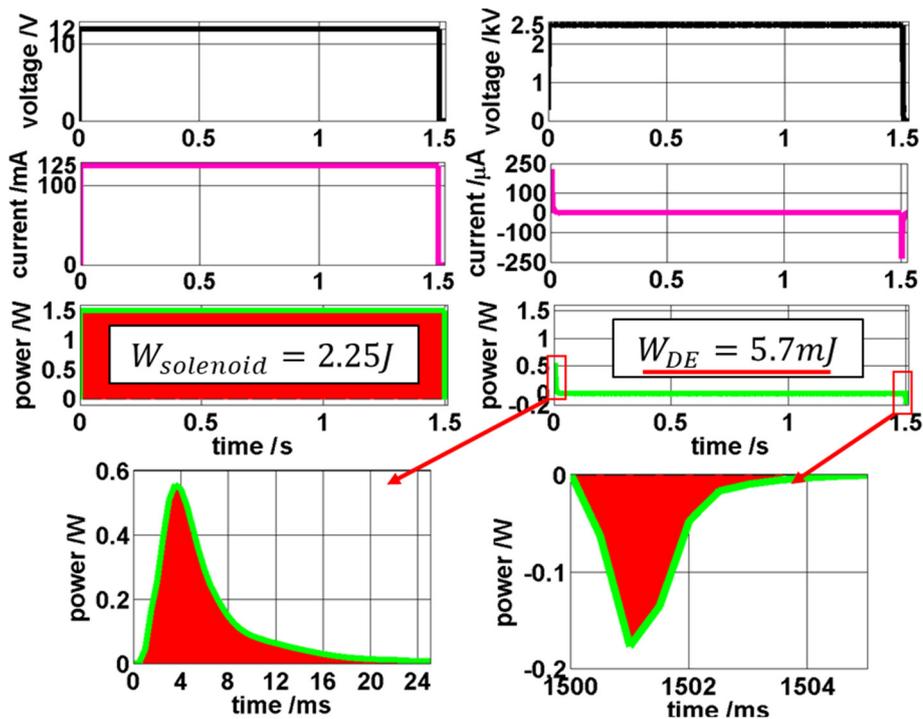
### 3.6.2 Energieverbrauch

Eine attraktive Eigenschaft des DE basierten Ventilantriebes ist der relativ geringe Energieverbrauch. Der Verbrauch der elektrischen Energie  $E$  wird durch

$$W = \int UI dt \tag{3.6}$$

beschrieben, wobei  $U$  die Spannung und  $I$  den Strom darstellen. Der Vergleich des Energieverbrauchs der beiden Ventilantriebe, dargestellt in Abbildung 3.20, zeigt, dass bei dem Elektromagneten kontinuierlich DC Strom fließt, um das Ventil offen zu halten. Dies

wird durch den Elektromagneten verursacht, der durch den Strom ein magnetisches Feld erzeugt, welches das Ventil offen hält. Im Gegensatz dazu verbraucht der DE nur Energie, wenn der Schaltzustand geändert wird, genauer beim Laden und Entladen des DE. Während des offen oder geschlossen halten des Ventils, wird hingegen keine Energie verbraucht. Dies kann auf das grundlegende Verhalten des DE als Kondensator zurückgeführt werden, wobei nur beim Laden oder Entladen des Kondensators ein Strom fließt während bei



**Abbildung 3.20:** Vergleich des Energieverbrauchs von DE- und elektromagnetischen Ventilantriebes [32]

konstanter Spannung kein Strom fließt. Im Gegensatz dazu verbraucht der Elektromagnet konstant  $125 \text{ mA}$  bei  $12 \text{ V}$ . Dies resultiert in einer Leistung von  $1.5 \text{ W}$  aus der sich ein Energieverbrauch von  $2.25 \text{ J}$  in diesem Testszenario ergibt. Der DE-Ventiltrieb zeigt eine Stromspitze von  $219 \mu\text{A}$  während des Anstieges der Hochspannungsrampe. Dies führt zu einer Leistungsspitze von  $570 \text{ mW}$  und einem Energieverbrauch von  $5.7 \text{ mJ}$ . Dies zeigt, dass der DE-Ventilantrieb ungefähr 400-mal weniger Energie verbraucht als der Elektromagnet. Zusätzlich existiert eine negative Leistungsspitze von  $170 \text{ mW}$ , wenn das Ventil geschlossen und der DE entladen wird. Diese negative Leistung repräsentiert die gespeicherte Energie im Kondensator, welche beim Entladen wiedergewonnen werden und dadurch die Energieeffizienz steigern könnte.

### 3.6.3 Proportionalbetrieb

Um einen Proportionalbetrieb bei einem Ventil mit Elektromagnet umzusetzen, wird eine PWM-Regelung benötigt, welche eine spezielle Elektronik erfordert. Zusätzlich zum verringerten Energieverbrauch ermöglicht der DE-Ventilantrieb eine proportionale Ansteuerung mit wenig Aufwand. Zur Demonstration dieser Eigenschaft wird an den DE-Ventilantrieb ein symmetrisches Dreieckssignal mit Maximum  $2.5\text{ kV}$  bei  $0.1\text{ Hz}$  angelegt. Das Resultat ist in Abbildung 3.21 dargestellt.

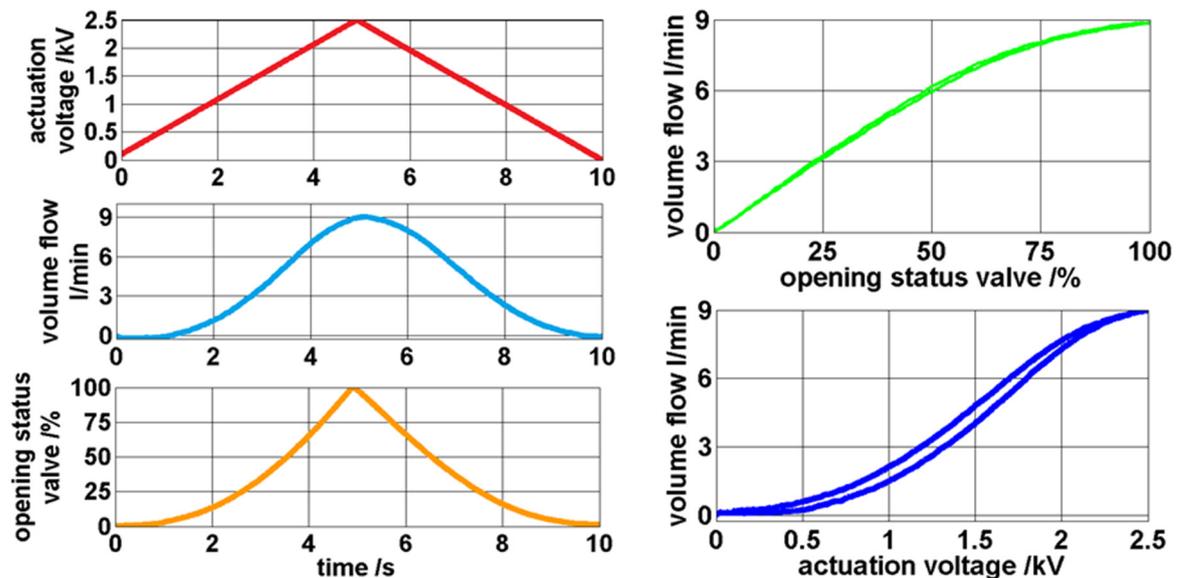


Abbildung 3.21: Proportionalbetrieb des Ventils mit DE-System [32]

Der Zusammenhang zwischen angelegter Hochspannung und Öffnungsstatus ist monoton, aber nichtlinear. Diese Nichtlinearität rührt hauptsächlich von der Maxwellspannung, welche einen quadratischen Zusammenhang zwischen Kompressionsdruck und angelegter Spannung besitzt. Andererseits wird der Zusammenhang zwischen Volumendurchfluss und Öffnungsstatus durch die Blendengleichung beschrieben. Diese beiden Phänomene scheinen sich gegenseitig kompensieren zu wollen, was zum Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Volumendurchfluss führt. Dieser Zusammenhang ist nichtlinear und zeigt eine Hysterese. Diese Hysterese ist allerdings keine Einschränkung bei der Anwendung, da sie durch geeignete Regelungen eliminiert werden kann. Eine Auflistung der wichtigsten Leistungsmerkmale ist in Tabelle 3.1 gegeben.

**Tabelle 3.1: Leistungsmerkmale des DE-Ventils im Vergleich zum Magnetventil**

	<b>DE-Ventil</b>	<b>Magnetventil</b>
<b>Versorgungsspannung</b>	2.5 kV	12 V
<b>Stromaufnahme</b>	220 $\mu$ A (peak), <1 $\mu$ A DC	125 mA DC
<b>Energieverbrauch</b>	5.7 mJ	2.25 J
<b>Max. Volumenstrom</b>	9 l/min	8.8 l/min
<b>Öffnungszeit</b>	6 ms	6 ms
<b>Schließzeit</b>	7.5 ms	10 ms
<b>Proportionalbetrieb</b>	Ja	Nein

### 3.7 Fazit

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass DE-Membran-Aktoren benutzt werden können, um pneumatische Ventile zu schalten. Es wurde auch gezeigt, dass den Merkmalen des Volumenstroms und der Zeit zum Öffnen des Ventils vergleichbare Ergebnisse liefern wie magnetische Ventilantriebe. Wichtiger daran ist, dass gezeigt wurde, dass der Energieverbrauch des Magnetantriebes im konkreten Fall 400-mal höher ist als der des DE Antriebes. Zusätzlich bietet der DE Antrieb die Möglichkeit mit wesentlich geringerem Aufwand den Volumenstrom proportional zu regeln, einfach durch einstellen der Aktuierungsspannung.

Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden unter dem Titel

*‘Development and experimental characterization of a pneumatic valve actuated by a dielectric elastomer membrane’*

in *Smart Materials and Structures* ( vol. 26, no. 8, p. 085023, Aug. 2017, [32]) veröffentlicht.

# Kapitel 4

## Entwicklung bauraumoptimierter DE-Aktor

---

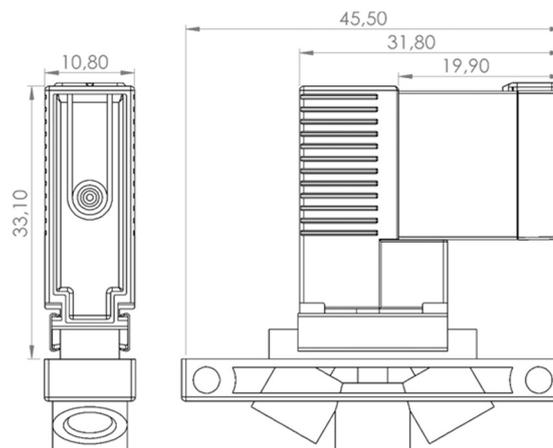
Die Verwendung dielektrischer Elastomere als Ventilantriebe hat wie in Kapitel 3 gezeigt grundlegende Vorteile im Vergleich zu elektromagnetischen Ventilantrieben. Dazu gehören die Tatsachen, dass DE nur Energie verbrauchen, wenn sie schalten und mit geringem Aufwand in der Lage sind den Volumendurchfluss zu regeln. Zudem wird dabei keine nennenswerte Wärme erzeugt.

Allerdings ist die bisherige Umsetzung des DE-Ventilantriebs durch konische Aktoren relativ raumaufwendig. Deshalb ist es notwendig Aktoren zu entwickeln, die die gleichen Vorteile mitbringen, die aber zusätzlich durch Weiterentwicklung der Geometrie besser an das Ventil angepasst sind. Dies soll ermöglichen die Ventile platzsparend aneinander zu Reihen und damit Ventilinseln zu bilden, die im Vergleich zu elektromagnetischen Ventilen im Dauerbetrieb arbeiten können.

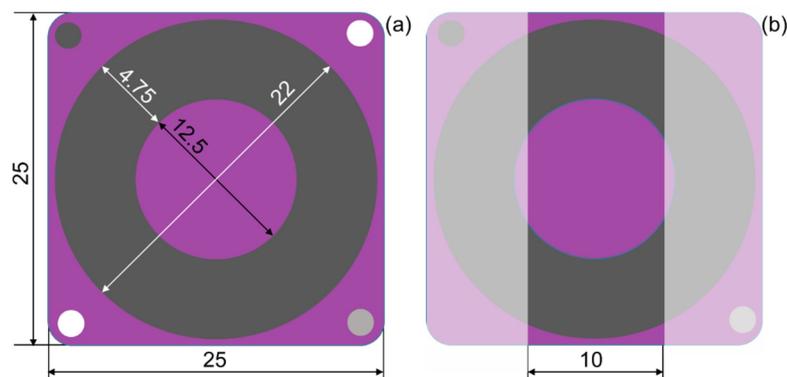
### 4.1 Konzeptentwicklung

Die Ergebnisse aus Kapitel 3 haben das Potential von DE-Aktoren als Ventilantriebe gezeigt. Allerdings sind die verwendeten konischen DE wegen ihrer Größe nicht geeignet, um die Ventile zu Ventilinseln zu stapeln. Aus diesem Grund ist es notwendig DE-Aktoren zu entwickeln deren Geometrie an das Ventil angepasst ist und die Möglichkeit bieten flexibel an unterschiedliche Ventile angepasst zu werden. Abbildung 4.1 zeigt eine Skizze des Ventils *Bürkert 6604*, dessen Geometrie die Rahmenbedingungen bilden.

Aus der Skizze lässt sich ableiten, dass ein angepasster Aktor eine maximale Breite von *10 mm* und eine Länge von *33 mm* nicht überschreiten darf. Projiziert man diese Maße auf den konischen DE (siehe Abbildung 4.2 (b)), fällt auf, dass eine streifenförmige Geometrie



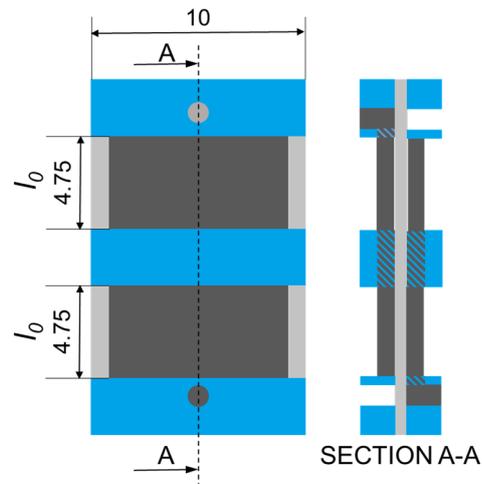
**Abbildung 4.1:** Skizze des Ventils Bürkert 6604



**Abbildung 4.2:** Konischer DE-Aktor; (a) Maße des Aktors, (b) verfügbare Breite für Streifengeometrie

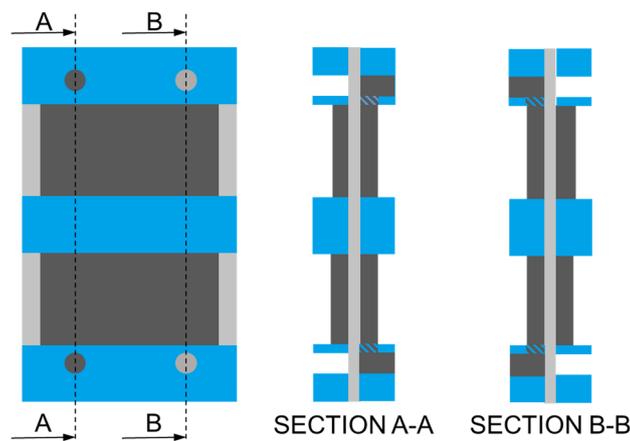
eine Lösung für einen Ventilantrieb ist. Aus diesem Grund wird auf Basis des konischen Aktors ein erster Streifenaktor konzipiert. Dieser Streifenaktor ist in Abbildung 4.3 abgebildet. Hierbei wird berücksichtigt, dass der Streifenaktor wie der konische Aktor mit Siebdruckverfahren gefertigt werden kann. Das Gehäuse des Streifenaktors wird aufgeteilt, in einen Steg in der Mitte und zwei Randstücke am oberen und unteren Ende des Aktors. Zwischen den Gehäuseelementen sitzen die beiden aktiven Elektrodenflächen. Die Basislänge der Membran beträgt  $l_0 = 4.75 \text{ mm}$  wie beim konischen Aktor. Es wird berücksichtigt, dass die Elektrodenflächen nicht bis zur Kante der Membran reichen dürfen. Dies ist notwendig, um einen elektrischen Überschlag bei der Aktuierung zu vermeiden. Die Kontaktierung der Elektroden wird vom konischen Aktor übernommen, das heißt, dass die Potentiale auf unterschiedlichen Seiten der Membran kontaktiert werden. Bei dieser Streifengeometrie würde diese Auslegung allerdings zu einem sehr hohen Elektrodenwiderstand führen, da das Epoxid des Mittelsteges das Elektrodenmaterial durchsetzt und dadurch den Widerstandskoeffizient erhöht. Dadurch würde die

Elektrodenfläche hinter dem Mittelsteg deutlich langsamer geladen werden können, was zu einem trägen Aktorverhalten führen.



**Abbildung 4.3:** Streifenaktor mit einseitiger Kontaktierung

Aus diesen Überlegungen wird das Konzept weiterentwickelt und eine Kontaktierung für Elektrodenfläche entworfen (siehe Abbildung 4.4). Dieser Entwurf bietet den Vorteil, dass der Elektrodenwiderstand gesenkt wird, wovon das Aktorverhalten profitiert.

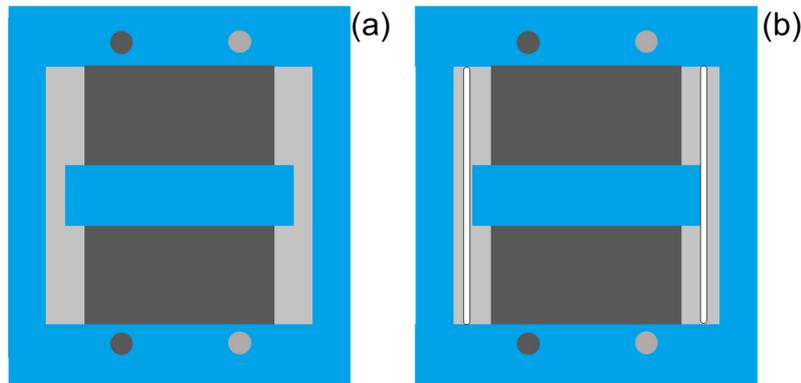


**Abbildung 4.4:** Streifenaktor mit beidseitiger Kontaktierung

Die Kontaktflächen sind an der oberen und unteren Seite des Gehäuses relative nahe beieinander und werden dadurch primär durch die Membran voneinander isoliert. Deswegen sollte zum Kontaktieren ein Durchstechen der Membran vermieden werden. Die Trennung des äußeren Gehäuses ist unvorteilhaft in Bezug zur Handhabung der Aktoren. Durch die getrennten Gehäuseelemente müssten die Aktoren in einem externen Gehäuse gelagert werden, um die Vordehnung zu erhalten. Aus diesem Grund werden die äußeren Rahmenelemente zu einem Rahmen verbunden (siehe Abbildung 4.5 (a)). Dieser Rahmen ermöglicht die einfache Handhabung und Lagerung der Aktoren, indem er die Vordehnung

der Membran aufrechterhält wie der äußere Rahmen des konischen Aktors.

Dieser äußere Rahmen beschränkt in seiner Ausführung die Auslenkung des Aktors aus der Ebene heraus. Deswegen ist es notwendig die Membran zwischen den Elektrodenflächen und dem äußeren Rahmen aufzutrennen, um die volle Funktionsfähigkeit des Aktors herzustellen (siehe Abbildung 4.5 (b)).



**Abbildung 4.5:** Konzept eines Streifenaktors mit selbsttragendem Rahmen; (a) ungeschnitten, (b) geschnitten

## 4.2 Theorie

Dieser Abschnitt beschreibt die Zusammenhänge zwischen Geometrie des Aktors, der Elektroden und der Dehnung der Aktor-Membran.

### 4.2.1 Aktorgeometrie

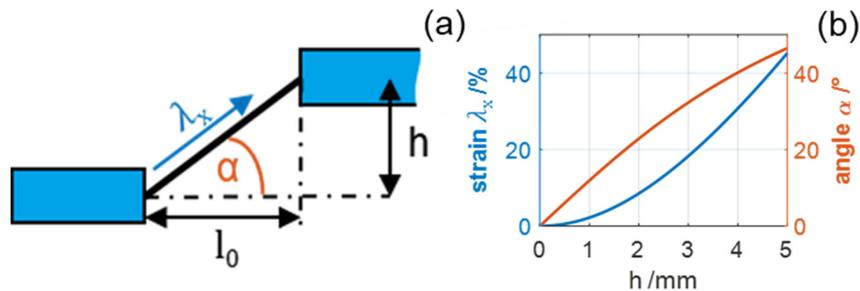
Die mechanischen Eigenschaften des Streifenaktors werden durch seine Geometrie und deren Zusammenhänge beschrieben. Insbesondere der Zusammenhang zwischen Auslenkung des Aktors aus der Ebene und der daraus resultierenden Dehnung der Aktormembran spielt hierbei eine wichtige Rolle. Die Ausgangslänge der Membran in Dehnungsrichtung beträgt  $l_0 = 4.75 \text{ mm}$ . Die Auslenkung  $h$  liegt im Bereich von  $0 \text{ mm}$  bis  $5 \text{ mm}$ . Daraus ergibt sich entsprechend die relative Dehnung  $\lambda_x$  zu

$$\lambda_x = \frac{\sqrt{l_0^2 + h^2} - l_0}{l_0} \quad (4.1)$$

Die maximale Dehnung  $\varepsilon_{max}$  der Membran von  $45.2 \%$  bei maximaler Auslenkung  $h_{max} = 5 \text{ mm}$ . Der Auslenkungswinkel  $\alpha$  ergibt sich zu

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{l_0}\right) \quad (4.2)$$

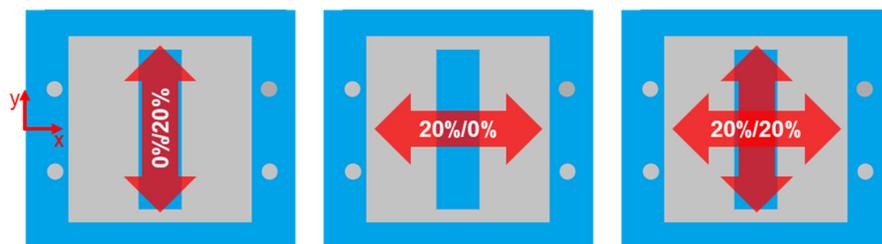
Abbildung 4.6 zeigt die geometrischen Zusammenhänge des Streifenaktors.



**Abbildung 4.6:** Geometrische Zusammenhänge des Streifenaktors; (a) schematische Darstellung, (b) konkrete Zahlenwerte

## 4.2.2 Vordehnungen

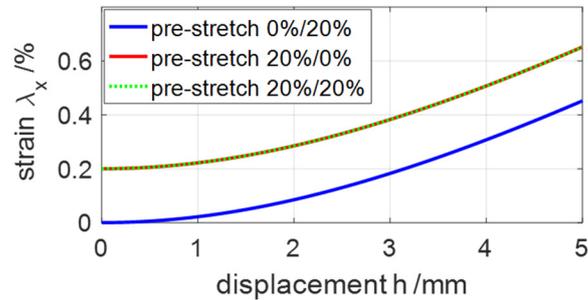
Kofod et al. [136] haben gezeigt, dass die elektromechanische Leistungsfähigkeit von DE Membranaktoren von deren mechanischen Vordehnung abhängt. Außerdem verbessert eine Vordehnung der Membran die Prozessführung bei der Fertigung durch Siebdruckverfahren. Aus diesem Grund werden bei diesen Streifenaktoren unterschiedliche Vordehnungsrichtungen getestet, um die Zusammenhänge zwischen Vordehnung und mechanischem Verhalten zu verstehen. Insbesondere werden die Vordehnungen in longitudinaler, transversaler und in beiden Richtungen gleichzeitig untersucht. Die Benennung der Vordehnungskonfigurationen wird in X/Y vorgenommen, wobei X die Vordehnung in longitudinaler und Y die Vordehnung in transversaler Richtung beschreibt. Die Vordehnung wird in 0 % und 20 % variiert. Daraus ergeben sich drei Konfigurationen für die Vordehnung 0%/20%, 20%/0% und 20%/20%. Diese Kombinationen sind in Abbildung 4.7 dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Vordehnungskonfigurationen der Streifenaktoren

Die verschiedenen Vordehnungskonfigurationen beeinflussen die relative Dehnung der Membran in Auslenkungsrichtung. Bei 20%/0% und 20%/20% Vordehnung ist die relative Dehnung  $\lambda$  in Auslenkungsrichtung um 20 % höher als bei 0%/20%. Dadurch ergibt sich

eine größere maximale Dehnung der Membran bei  $h = 5 \text{ mm}$  von  $\lambda_{max} = 65.2 \%$ . Dieser Zusammenhang zwischen Dehnung und Auslenkung für die drei Vordehnungskonfigurationen ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

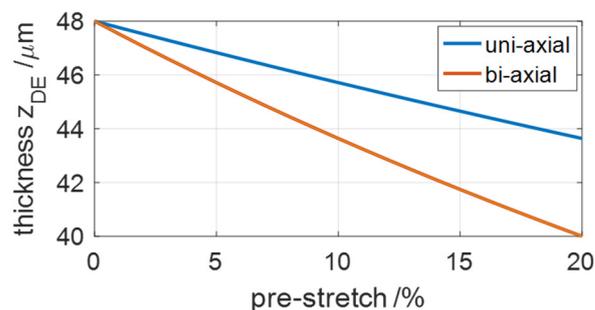


**Abbildung 4.8:** Verlauf der relativen Dehnung in Auslenkungsrichtung für verschiedene Vordehnungskonfigurationen (20%/0% und 20%/20% sind deckungsgleich)

Neben dem mechanischen Verhalten hat die Vordehnung einen Einfluss auf die Dicke  $z_{DE}$  der Membran und dadurch auch auf die elektrischen Parameter wie Feldstärke und Kapazität. Bei diesen Streifenaktoren wird eine Membran verwendet, die im nicht gedehnten Zustand eine Dicke  $z_0 = 48 \mu\text{m}$  aufweist. Der Einfluss der Vordehnung wird durch

$$z_{DE}(\lambda_x, \lambda_y) = \frac{z_0}{1 + \nu\lambda_x + \nu\lambda_y} \quad (4.3)$$

beschrieben, wobei  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  die Dehnungen in X- und Y-Richtung beschreiben und  $\nu$  die Poissonzahl. Das Membranmaterial wird als inkompressibel angenommen, somit ist  $\nu = 0.5$ . Die Dicke in Bezug zur Vordehnung im bi-axialen und uni-axialen Fall ist in Abbildung 4.9 dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Membrandicke in Bezug zur Vordehnung bei uni- und bi-axialer Vordehnung

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Membran der Streifenaktoren bei bi-axialer Vordehnung dünner ist. Somit wird bei der Aktuierung eine geringere elektrische Spannung benötigt, um dasselbe elektrische Feld wie bei uni-axialer Vordehnung zu erzeugen. Dies

---

ist bei der elektromechanischen Charakterisierung der Aktorkonfigurationen zu berücksichtigen.

## 4.3 Herstellung

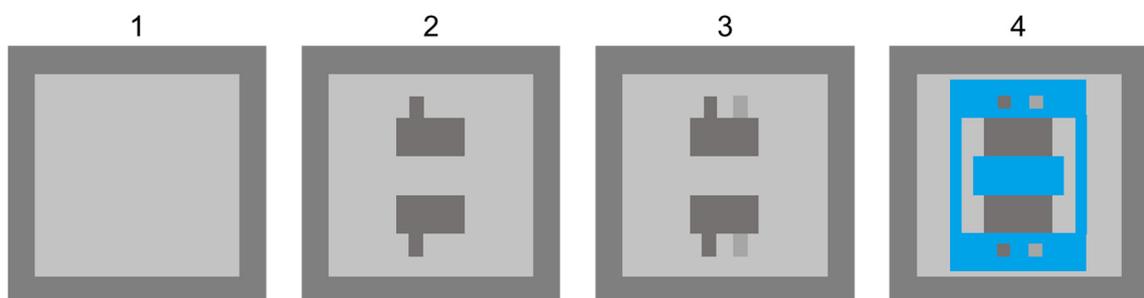
*Die Herstellung der Streifenaktoren ist unterteilt in Fertigung durch Siebdruck und in Nachbearbeitung durch das Schneiden der Membran zum Herstellen der Funktionsfähigkeit. Dieser Abschnitt beschreibt das Vorgehen in beiden Herstellungsschritten.*

### 4.3.1 Siebdruck

Die DE-Streifenaktoren werden durch ein Siebdruckverfahren hergestellt. Die Elektroden werden aus einem PDMS und ‚carbon black‘ Verbund hergestellt und werden beidseitig auf die Membrane aufgedruckt. Die Gehäuse sind bei diesen Aktoren einseitig aufgedruckt, um eine einfache Montage von doppellagen DE zu erlauben. Der Siebdruckprozess zur Herstellung von Streifenaktoren besteht aus vier Schritten

- 1. Schritt:** Vordehnen der Elastosil-Membrane und spannen auf einen Siebdruckrahmen.
- 2. Schritt:** Einseitiges Bedrucken der Membran mit mehreren Lagen Elektrodenmaterial, anschließend trocknen im Ofen.
- 3. Schritt:** Umdrehen des Siebdruckrahmens und bedrucken der Gegenseite mit mehreren Elektrodenmaterial, anschließend trocknen im Ofen.
- 4. Schritt:** Aufdrucken des Gehäuses aus mehreren Lagen Epoxid, abschließendes trocknen im Ofen.

Dieser Prozess ist in Abbildung 4.10 schematisch dargestellt.



**Abbildung 4.10:** Herstellung eines Streifenaktoren durch Siebdruck

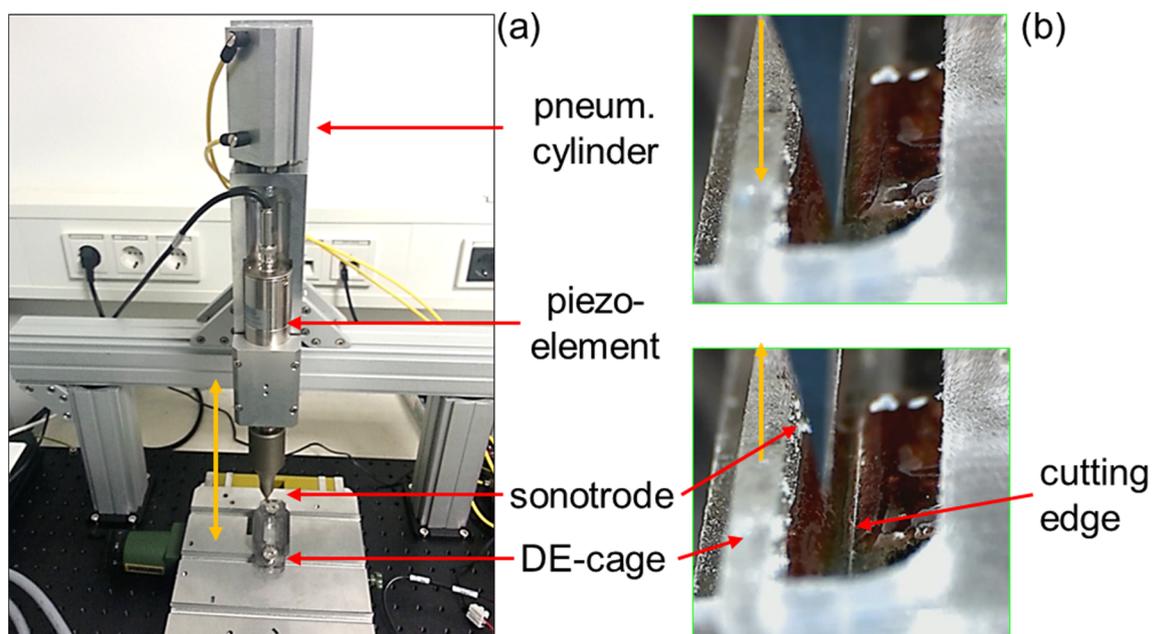
Die Streifenaktoren werden in vier Reihen gefertigt, basierend auf den drei Elektrodenkonfigurationen und den elektrodenfreien Aktoren. In jeder Reihe befinden sich

sechs Streifenaktoren. Dies ermöglicht die Untersuchung verschiedener Aktoren, die aus demselben Material zur selben Zeit gefertigt werden. Dadurch lassen sich statistisch relevante Messergebnisse erwarten.

### 4.3.2 Entwicklung Trennmethode Aktormembran

In der Konfiguration nach der Herstellung (siehe Abbildung 4.5 (a)) kann der Streifenaktor keine ausreichende Auslenkung aus der Ebene erzeugen. Deswegen wird die Membran oberhalb und unterhalb des inneren Gehäuses durchtrennt, um die Steifigkeit der Membran aus der Ebene zu reduzieren und eine größere Auslenkung zu ermöglichen.

Maas et al. [20] haben gezeigt, dass DE-Membrane mit einem Ultraschallschneider sehr gut zu schneiden ist. Deswegen werden diese Schnitte mit einem Ultraschallschneider *SONOTRONIC K235.010* durchgeführt. Dazu werden die Aktoren in einen Käfig eingespannt. Die Sonotrode wird mit einem Ultraschallgenerator *Sonotronic USG14M-35/400* betrieben. Zum Schneiden stehen flache und spitze Sonotroden zur Verfügung. Der Hubzylinder, der den Ultraschallschneider bewegt, wird mittels Ventilen betrieben. Diese Ventile werden durch einen Mikrocontroller (*Arduino UNO*) gesteuert. Auf Knopfdruck fährt die Sonotrode automatisch herab, durchtrennt die DE-Membran und fährt zur Ausgangsposition zurück. Der Ultraschallschneider und der Trennvorgang mit flacher Sonotrode sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

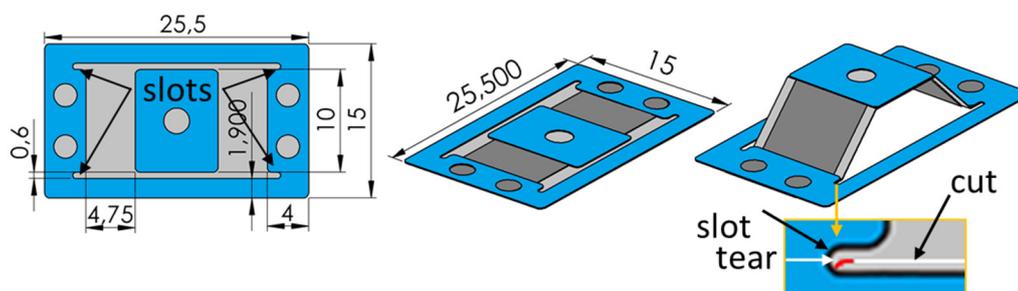


**Abbildung 4.11:** Ultraschallschneider zum Schneiden der DE-Membran; (a) Ultraschallschneider im Aufbau, (b) Schneidevorgang der Aktormembran

## 4.4 Entwicklung Aktorgeometrie

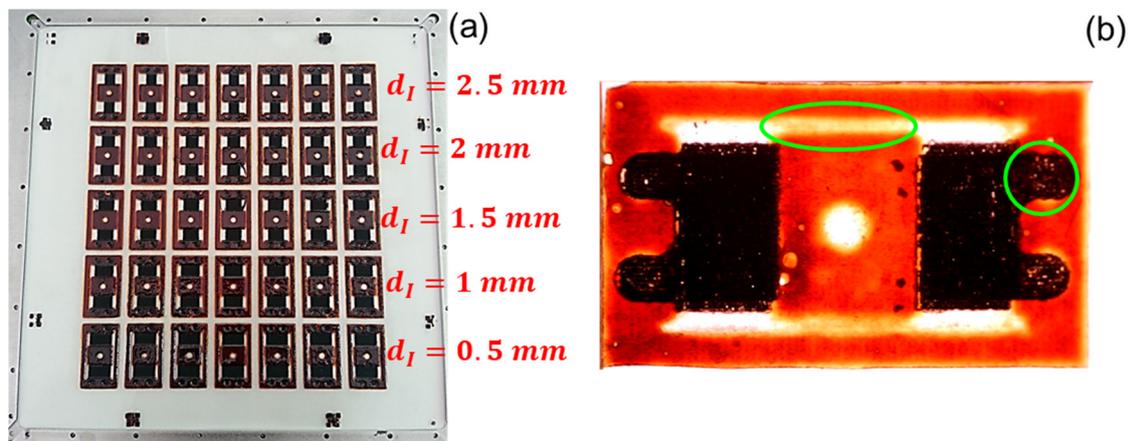
### 4.4.1 Erste Aktorgeneration

Aus den Vorgaben aus Abschnitt 4.1 ein erster Streifenaktor ausgearbeitet (siehe Abbildung 4.12). Dieser Aktor ist  $25.5\text{ mm}$  lang und  $15\text{ mm}$  breit. Er besteht aus zwei streifenförmigen Elastomer-Membranen, die von einem passiven starren Gehäuse aus Epoxid umschlossen sind. Dieses Gehäuse beschränkt die Bewegung aus der Ebene heraus. Zwischen innerem und äußerem Gehäuse sind zwei  $0.6\text{ mm}$  breite Spalten vorgesehen, um die Membrane durchtrennen zu können. Zudem sind auf beiden Seiten jeweils zwei Taschen eingebracht, die eine Ausbreitung von Rissen der Membran bei der Auslenkung aus der Ebene zu verhindern.



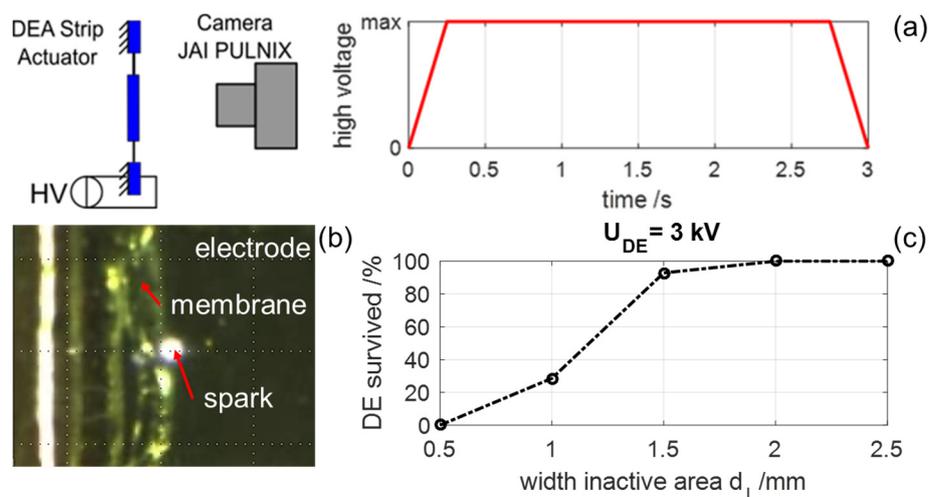
*Abbildung 4.12: Zeichnung des ersten ausgearbeiteten Streifenaktors*

Die DE Membrane ist Elastosil wie bei den konischen Aktoren. Das innere und das äußere Gehäuse haben eine rechteckige Form und werden durch Siebdruckverfahren hergestellt. Die Gehäuse sind bei diesen Aktoren einseitig aufgebracht, um eine einfache Montage von doppelagigen DE zu erlauben. Das äußere Gehäuse hat vier Öffnungen, zwei auf jeder Seite, um zu ermöglichen den DE mit der Spannungsversorgung zu verbinden. Auf Basis dieser Zeichnung werden Streifenaktoren mittel Siebdruckverfahren hergestellt. Für jede Vordehnungskonfiguration wird ein Satz Streifenaktoren hergestellt. Abbildung 4.13 zeigt die gefertigten Streifenaktoren mit Elektrodenkonfigurationen zur Untersuchung der Isolation zwischen Elektroden- und Schnittkante. Bei der Fertigung ist bei allen DE der Gehäuse aus vier Lagen Epoxid verlaufen. Dadurch ist das innere Gehäuse mit dem äußeren Verbunden (siehe Abbildung 4.13 (b)). Diese Verbindung kann mit dem Ultraschallschneider durchtrennt werden, aber die Sonotrode dadurch beschädigt werden. Außerdem ist das Gehäusematerial auch auf die Kontaktflächen der Elektroden gelaufen. Beides macht eine Weiterentwicklung der Aktorgeometrie notwendig. Trotz dieser



**Abbildung 4.13:** Streifenaktoren der ersten Generation; (a) vollständiger Siebdruckrahmen mit Elektrodenkonfigurationen zur Untersuchung der Funkenstrecke, (b) Nahaufnahme eines Aktors mit verlaufenem Gehäuse (grün)

Umstände konnten diese Streifenaktoren zur Untersuchung der isolierenden Mindestbreite der inaktiven Fläche verwendet werden. Hierzu wird die Membran mit der spitzen Sonotrode durchtrennt. Die Verbindung zwischen innerem und äußerem Rahmen blieb hierdurch bestehen. An die Aktoren wird eine konstante Hochspannung von  $U_{DE} = 3 \text{ kV}$  für  $2.5 \text{ s}$  angelegt und die Membran auf elektrisches Versagen durch Messung des Stromes untersucht. Zusätzlich werden die Aktoren mit einer Kamera *JAI PULNIX* beobachtet, um ein Versagen durch einen Funkenüberschlag an der Schnittkante oder einen Durchschlag auf der Elektrodenfläche zu unterscheiden (siehe Abbildung 4.14 (a), (b)). Bei diesen Messungen werden die Aktoren nicht aus der Ebene ausgelenkt. Dies wird durchgeführt, um sicherzustellen, dass ein Versagen der Streifenaktoren primär durch Funkenüberschlag über die inaktive Fläche stattfindet und nicht durch Durchschlag durch



**Abbildung 4.14:** Untersuchung des isolierenden Mindestabstandes zwischen Elektroden- und Schnittkante der Membrane bei  $3 \text{ kV}$ ; (a) schematischer Versuchsaufbau, (b) Funkenbildung bei  $d_I = 1 \text{ mm}$ , (c) Anteil der überlebenden DE

---

die Membran. Zur Analyse der Isolationsfähigkeit der inaktiven Fläche werden die DE, die durch Durchschlag durch die Membran versagt haben, nicht berücksichtigt. Ihr Anteil an den getesteten DE beträgt ungefähr 25 %. Insgesamt werden 105 Streifenaktoren, 35 von jeder Vordehnungskonfiguration getestet.

Bei der Untersuchung der Aktoren (siehe Abbildung 4.14 (c)) kann festgestellt werden, dass für  $d_I = 0.5 \text{ mm}$  alle getesteten DE versagen. Daraus lässt sich schließen, dass diese Distanz zwischen Elektrode und Schnittkante der Membran zu gering ist, um eine ausreichende elektrische Isolation zu erreichen. Bei  $d_I = 1 \text{ mm}$  steigt der Anteil der überlebenden DE auf 30 %. Die Durchschlagsfestigkeit von Luft beträgt  $E_{AIR} = 3 \text{ kV/mm}$ . Somit sollte dieser Abstand zur Isolation ausreichen. Allerdings ist es möglich, dass in diesen Bereich zwischen Elektrode und Schnittkante der Membran bei der Fertigung und Nachbearbeitung leitfähige Partikel gelangen. Dies würde den isolierenden Abstand verringern und einen Funkenüberschlag begünstigen. Deswegen ist der Anteil der überlebenden Streifenaktoren für  $d_I = 1 \text{ mm}$  gering. Erst bei einem Mindestabstand von  $d_I = 1.5 \text{ mm}$  zwischen Elektrode und Schnittkante überstehen 90 % der Aktoren eine Hochspannung bis  $U_{DE} = 3 \text{ kV}$ , ohne zu versagen. Bei  $d_I = 2 \text{ mm}$  und  $d_I = 2.5 \text{ mm}$  überstanden alle Aktoren die Hochspannung ohne Funkenüberschlag. Eine ähnliche Untersuchung für planare Aktor Streifen von Rosset et. al [30] hat ergeben, dass für jedes  $\text{kV}$  einen  $\text{mm}$  an inaktive Fläche benötigt wird, um eine ausreichende Isolation zu gewährleisten. Dieser Wert liegt deutlich über dem hier ermittelten Wert.

Zur Untersuchung der elektromechanischen Eigenschaften wird eine Mindestbreite der inaktiven Fläche von  $d_I = 1.5 \text{ mm}$  ausgewählt, um einen möglichst geringen Einfluss auf die elektrische Leistungsfähigkeit bei möglichst hoher Isolierwirkung zu erzielen.

### **Schlussfolgerung**

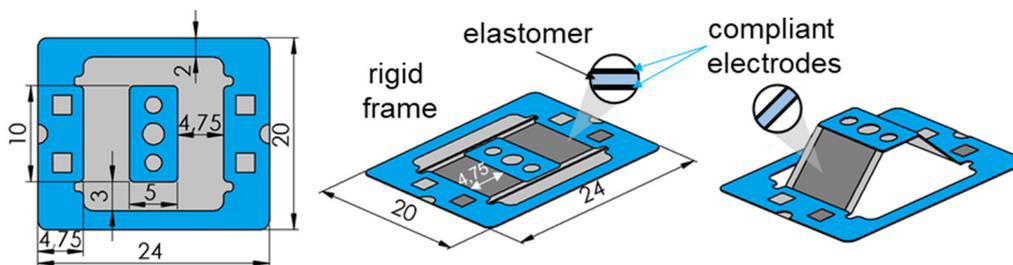
Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass der Abstand des äußeren Gehäuses zum inneren Gehäuse der Streifenaktoren zu gering ist und deswegen zu unerwünschten Verbindungen der Gehäuse bei der Fertigung führt. Aus diesem Grund muss die Geometrie der Streifenaktoren weiterentwickelt werden.

Zusätzlich wurde eine Mindestbreite der isolierenden Fläche zwischen Elektroden- und Schnittkante ermittelt, bei der die Streifenaktoren eine Hochspannung von  $3 \text{ kV}$  ohne Funkenüberschlag überstehen. Diese Mindestbreite beträgt  $d_I = 1.5 \text{ mm}$ .

#### 4.4.2 Zweite Aktorgeneration

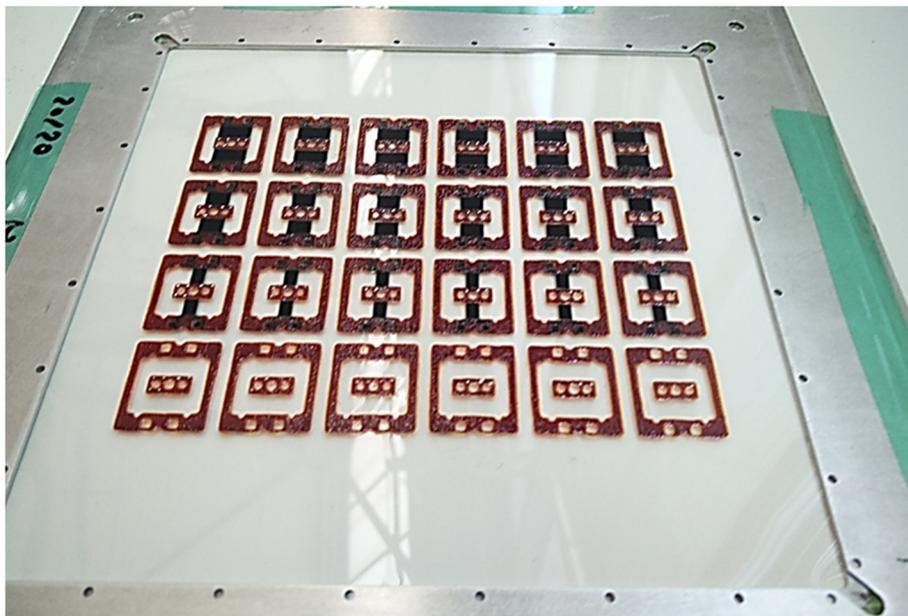
Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der ersten Aktorgeneration wird das Gehäuse des Streifenaktor modifiziert (siehe Abbildung 4.15). Der Spalt zwischen dem inneren und äußeren Gehäuse wird von  $0.6\text{ mm}$  auf  $3\text{ mm}$  vergrößert, um eine Verbindung der Gehäuseteile durch Verlaufen des Gehäusematerials zu verhindern. Aus dem gleichen Grund werden die Kontaktierungsöffnungen quadratisch ausgeführt.

Die Gehäuse sind bei dieser Aktorgeneration einseitig aufgebracht, um eine einfache Montage von doppellagen DE zu erlauben. Zwei halbkreisförmige Taschen befinden sich auf der linken und rechten Seite des äußeren Gehäuses, um eine einfache und stabile Arretierung der DE beim Stapeln zu ermöglichen. Zusätzlich wird die Breite des äußeren Gehäuses erhöht, um dessen Stabilität zu verbessern.



**Abbildung 4.15:** Zeichnung des Streifenaktors zweiter Generation mit modifiziertem Gehäuse [137]

Anhand dieser Zeichnungen wird diese Streifenaktoren gefertigt. Ein Rahmen mit Streifenaktoren ist in Abbildung 4.16 gezeigt. Durch die Änderungen an der Geometrie



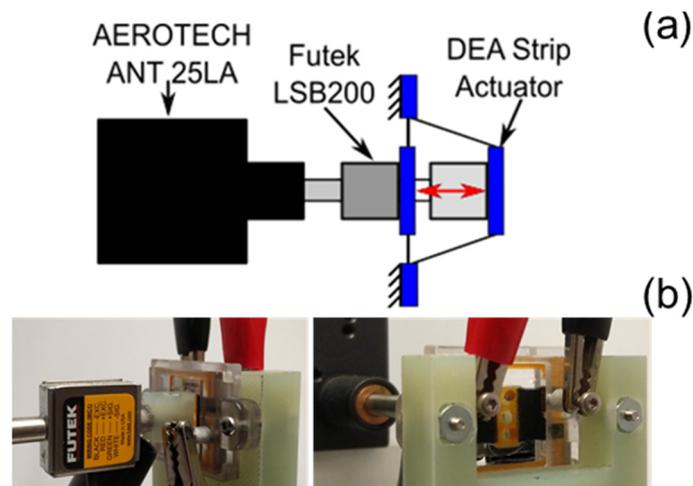
**Abbildung 4.16:** Streifenaktoren der zweiten Generation mit Elektrodenkonfiguration zur elektromechanischen Untersuchung [137]

können die Membranen der DE ohne Probleme mit dem Ultraschallschneider bearbeitet werden.

## 4.5 Experimentelle Charakterisierung

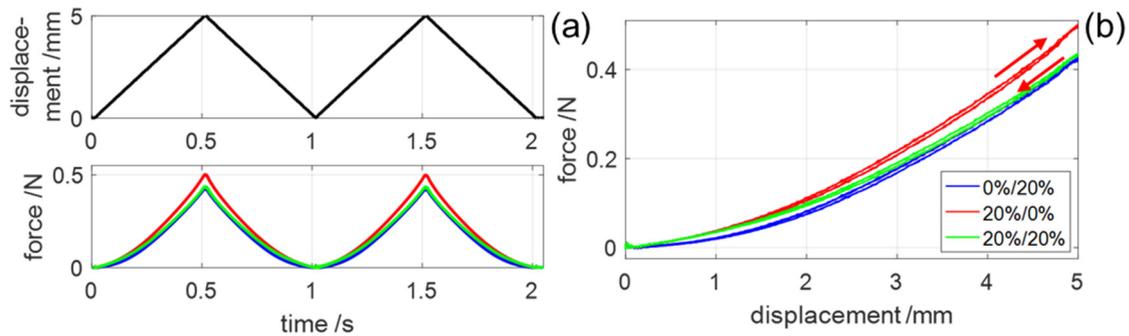
*Dieser Abschnitt beschreibt das Vorgehen zur Charakterisierung der Reaktionskraft der DE-Aktoren bei Auslenkung aus der Ebene. Hierbei werden die Aktoren bei verschiedenen Vordehnungskonfigurationen mit und ohne Elektroden und mit und ohne angelegte Hochspannung vermessen und die Ergebnisse miteinander verglichen.*

Die Messungen werden in einem Testaufbau durchgeführt, der aus einem *Aerotech ANT25-LA* Linearaktor und einem *Futek LSB200* Kraftsensor. Die Messdatenerfassung wird auf einem *NI cRIO 9074* FPGA mit *LabVIEW* implementiert. Die DE-Aktoren werden in einem Gehäuse platziert, das aus *FullCure720* in einem *Stratasys Objet500* 3D-Drucker gefertigt wird. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.17 dargestellt.



**Abbildung 4.17.** Experimenteller Testaufbau zur Charakterisierung der DE Membrane; (a) Skizze, (b) Foto [137]

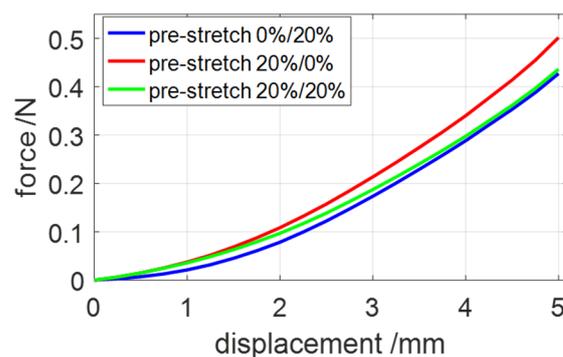
Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften werden die DE dreiecksförmig bei  $1\text{ Hz}$  ausgelenkt, wie in Abbildung 4.18 dargestellt. Die maximale Auslenkung ist  $5\text{ mm}$ , was ungefähr  $45\%$  Dehnung der Membrane entspricht. Während der Auslenkung wird simultan die Kraft über den Kraftsensor gemessen. Diese Kraftmessung wird zweimal durchgeführt, um den Mullinseffekt [138] zu eliminieren, der während der ersten Dehnung der Membrane auftritt.



**Abbildung 4.18:** Gemessene Kräfte und Auslenkungen für Streifenaktoren; (a) zeitabhängig, (b) Kräfte in Abhängigkeit der Auslenkung [137]

#### 4.5.1 Charakterisierung ohne elektrische Spannung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Kraftmessungen für den Fall gezeigt, in dem keine elektrische Spannung ( $0\text{ V}$ ) angelegt wird. Die Messungen werden für mindestens vier Aktoren in jeder Konfiguration durchgeführt. Aus diesen Kräften wird jeweils der Mittelwert gebildet um kleine Unterschiede der Aktoren bei der Fertigung auszugleichen. Abbildung 4.18 zeigt die Rohdaten der Messungen für Aktoren ohne aufgedruckte Elektrode bei  $0\%/20\%$ ,  $20\%/0\%$  und  $20\%/20\%$  Vordehnung. Diese Kräfte zeigen von der Auslenkungsgeschwindigkeit abhängige Hysteresen, die von der Viskoelastizität der Membrane. Hysteretische Messungen sind schwierig miteinander zu vergleichen, deswegen werden mit der Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Die gemittelten Daten sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

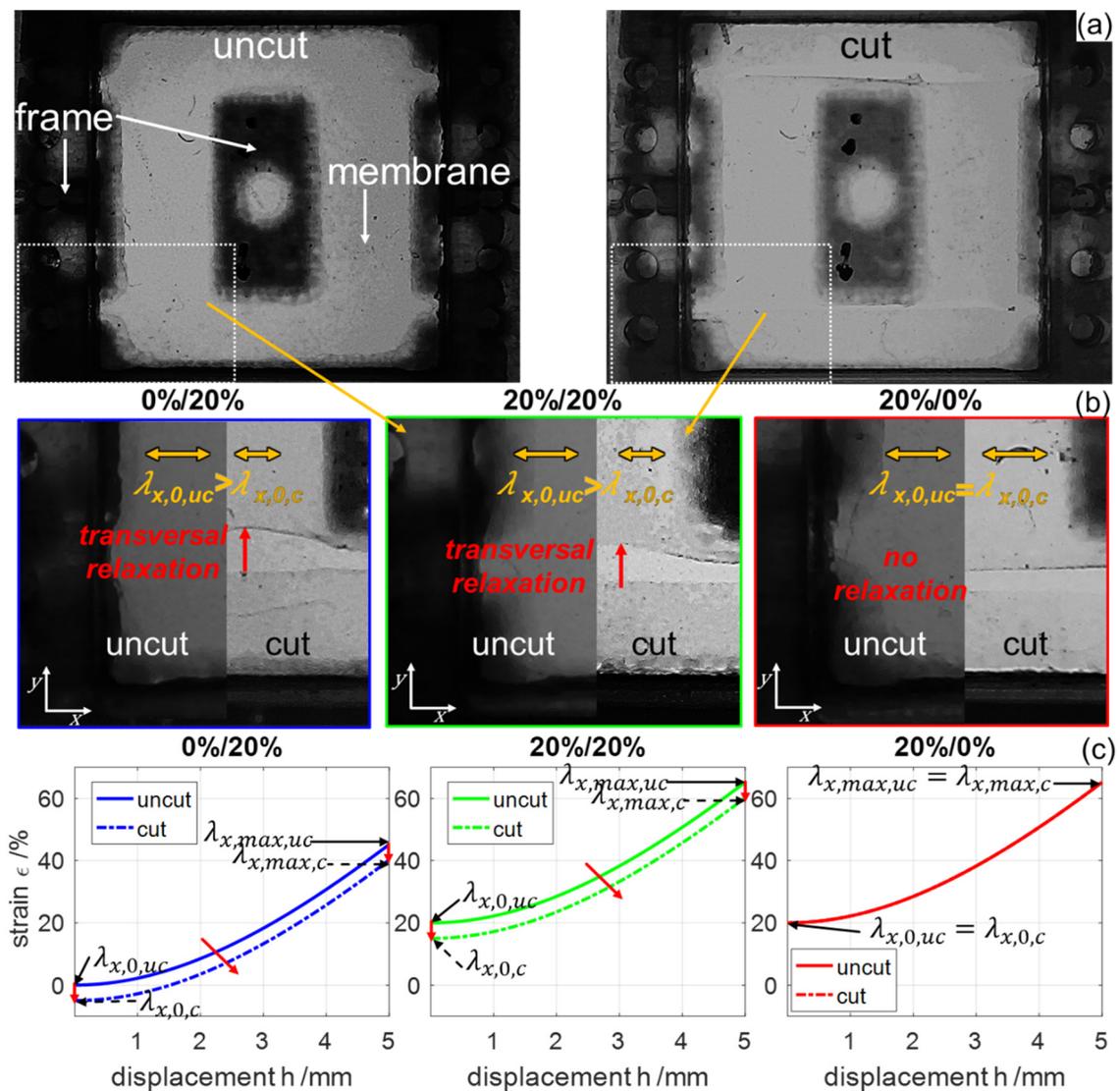


**Abbildung 4.19:** Gemittelte Kraft-Auslenkungs-Charakteristik der Streifenaktoren bei verschiedenen Vordehnungen [137]

Diese ersten Ergebnisse zeigen Unterschiede in der mechanischen Charakteristik, basierend auf den verschiedenen Vordehnungen. Zuerst ist offensichtlich, dass die Aktoren mit  $20\%/0\%$  Konfiguration das steifste Verhalten zeigen und als Konsequenz daraus die größte maximale Kraft aufweisen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die größere Vordehnung  $\lambda_{x,0}$  in Auslenkungsrichtung in eine höhere Gesamtdehnung  $\lambda_{x,max}$  und dadurch

zu einer größeren Kraft führt. Das weichste Verhalten zeigt die 0%/20% Konfiguration. Dies basiert darauf, dass keine Vordehnung in Bewegungsrichtung aufgebracht wird. Die Aktoren mit 20%/20% Dehnung zeigen eine dazwischenliegende Charakteristik.

Um das Verhalten der Reaktionskräfte in Bezug zur Vordehnungskonfiguration näher zu untersuchen, werden die Streifenaktoren mit einer *dnt DigiMicro Profi* Kamera bei grünem Gegenlicht fotografiert. Zur Verbesserung der Kantenerkennung werden die Bilder in Graustufen umgerechnet. Abbildung 4.20 (a) zeigt einen Streifenaktor vor und nach dem Schneiden der Membran. In Abbildung 4.20 (b) sind die Schnittbereiche dreier Streifenaktoren mit verschiedenen Vordehnungskonfigurationen vor und nach dem Schneiden der Membran gegenübergestellt. Die dazugehörigen Verläufe der Dehnung der

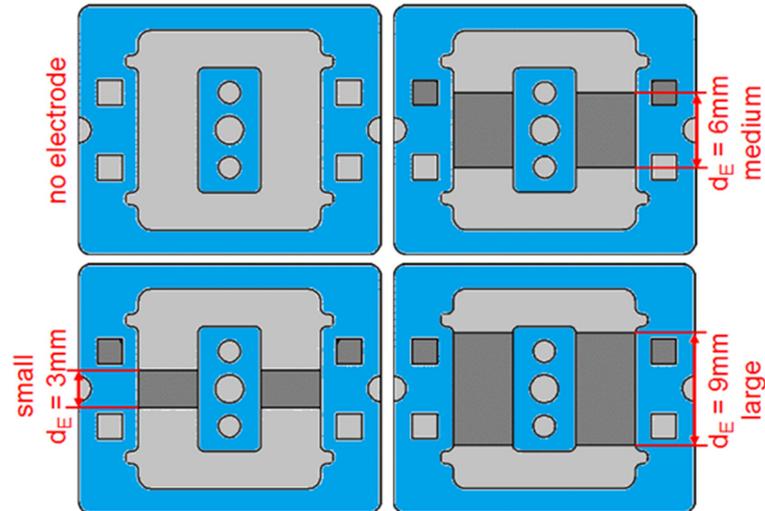


**Abbildung 4.20:** Visuelle Studie zum Verhalten der Membran und vor und nach dem Schneiden bei verschiedenen Vordehnungskonfigurationen; (a) gesamter Aktor, (b) Nahaufnahmen der Schnittkanten, (c) Auswirkungen auf Auslenkungs-Dehnungs-Kurven

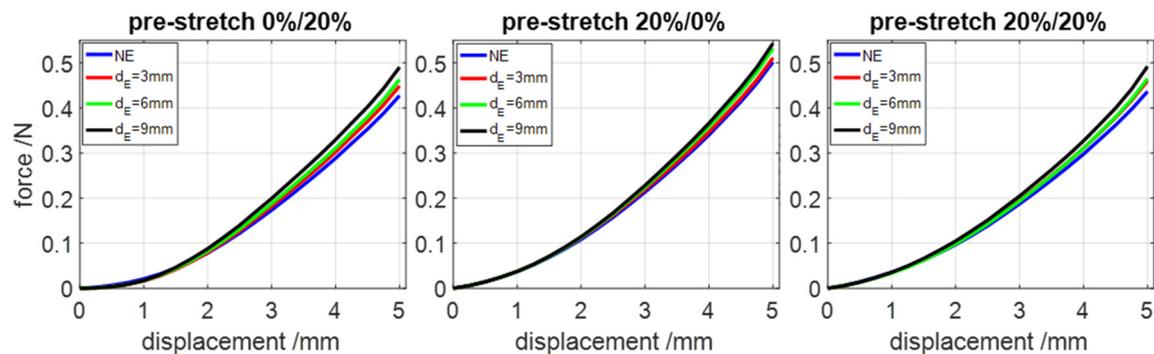
Membran in Bezug zur Auslenkung sind in Abbildung 4.20 (c) dargestellt. Hierbei sind die Dehnungen im Ausgangszustand mit ,uc‘ und nach dem Schneiden mit ,c‘ gekennzeichnet. Diese visuelle Studie zeigt, dass die Membranen bei 0%/20% und 20%/20% nach dem schneiden in Y-Richtung relaxieren (siehe Abbildung 4.20 (b), blau und grün). Dadurch verringert sich die Vordehnungen in X-Richtung von  $\lambda_{x,0,uc}$  zu  $\lambda_{x,0,c}$ . Dies verringert bei beiden Vordehnungskonfigurationen auch die maximale Dehnung von  $\lambda_{x,max,uc}$  zu  $\lambda_{x,max,c}$  in Auslenkungsrichtung, was die maximalen Reaktionskräfte verringert. Im Gegensatz dazu kommt es bei 20%/0% zu keiner transversalen Relaxation durch das Schneiden der Membran. Deswegen wird der Verlauf der Dehnung in Bezug zur Auslenkung nicht beeinflusst (siehe Abbildung 4.20, rot). In diesem Fall sind  $\lambda_{x,0,uc}$  und  $\lambda_{x,0,c}$  sowie  $\lambda_{x,max,uc}$  und  $\lambda_{x,max,c}$  identisch.

Zur elektromechanischen Charakterisierung der Aktoren werden Elektroden benötigt. Um deren Einfluss auf die Steifigkeit und die elektrische Leistungsfähigkeit der Aktoren zu untersuchen, werden Elektroden in verschiedenen Breiten verwendet. Es werden Elektroden in verschiedenen Größen auf die Membranen mit konstanten Ausmaßen von  $12\text{ mm} \times 4.75\text{ mm}$  aufgebracht. Die Länge jeder Elektrodenkonfiguration beträgt  $4.75\text{ mm}$ . Die Breiten der Elektroden  $d_E$  werden in  $d_E = 3\text{ mm}$  (klein),  $d_E = 6\text{ mm}$  (mittel) und  $d_E = 9\text{ mm}$  (groß). Diese Variation der Elektrodengrößen wird durchgeführt, um den Einfluss der Elektrodengröße auf die Steifigkeit der Aktoren und deren elektromechanische Leistungsfähigkeit auswirkt. Die Elektroden sind  $3\text{ }\mu\text{m}$  dick und deren Widerstand liegt bei ungefähr  $150\text{ k}\Omega$  bei  $d_E = 9\text{ mm}$ . Dieser Wert wird mit einem LCR-Meter bei  $1\text{ kHz}$  gemessen. Ein Mindestabstand von  $1.5\text{ mm}$  zwischen Elektrode und Schnittkante wird festgelegt, um einen elektrischen Überschlag durch eine Hochspannung bis  $U_{DE} = 3\text{ kV}$  zu vermeiden. Dieser Mindestabstand wird absichtlich größer als die Durchschlagsfestigkeit von Luft  $E_{AIR} = 3\text{ kV/mm}$  gewählt, da der Bereich der Membran zwischen Elektrode und Schnittkante mit leitfähigen Partikeln verunreinigt sein könnte. Die verschiedenen Elektrodengrößen sind in Abbildung 4.21 dargestellt.

Nach dieser anfänglichen Untersuchung werden der Einfluss der aufgedruckten Elektroden und deren Größen analysiert. Abbildung 4.22 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen, gruppiert nach Vordehnungen. Es ist konsistent eine Differenz der Kräfte der Aktoren ohne Elektrode und der größten Elektrode zu beobachten. Die Steifigkeit und die maximale Kraft steigen, wie erwartet, mit der Elektrodengröße bei allen Vordehnungskonfigurationen. Es kann auch festgestellt werden, dass Einfluss der Elektrodengröße bei jeder



**Abbildung 4.21:** Verschiedene Elektrodenkonfigurationen für kleine ( $d_E = 3\text{ mm}$ ), mittlere ( $d_E = 6\text{ mm}$ ) und große Elektroden ( $d_E = 9\text{ mm}$ ) [137]



**Abbildung 4.22:** Kraft-Auslenkungs-Verhalten der Streifenaktoren bei Niederspannung für verschiedene Vordehnungen [137]

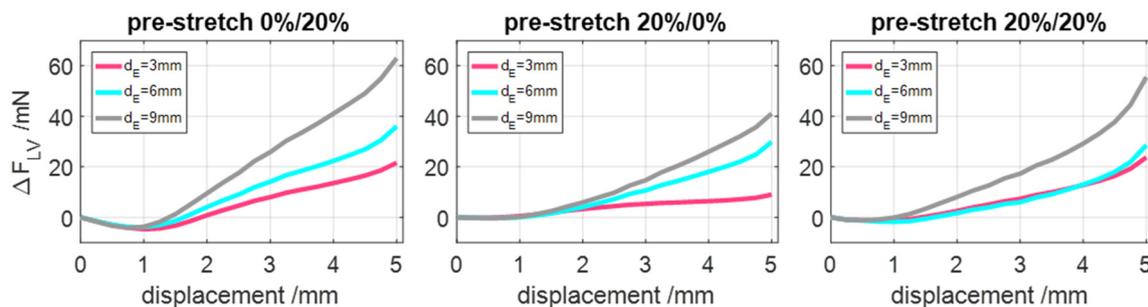
Vordehnungskonfiguration anders wirkt. Die Variation der Kräfte bei 20%/0% sind geringer, als die Variationen der beiden anderen Konfigurationen. Der größte Einfluss der Elektroden auf die mechanische Charakteristik wird bei der 0%/20% Konfiguration beobachtet.

Ähnlich wie bei den vorherigen Ergebnissen sind die maximalen Kräfte im 20%/0% Fall größer als die maximalen Kräfte größer als die der anderen beiden Vordehnungskonfigurationen. Um eine bessere Untersuchung der Einflüsse der Elektroden auf das Kraftverhalten zu ermöglichen, wird die Differenz zwischen Aktoren mit und ohne Elektroden wird durch

$$\Delta F_{LV} = F_{E,0V} - F_{NE} \quad (4.4)$$

berechnet, wobei  $F_{E,0V}$  die Kraft mit Elektrode bei 0 V und  $F_{NE}$  die Kraft ohne Elektrode beschreiben. Diese Kraftdifferenzen sind in Abbildung 4.23 dargestellt. Zuerst ist

festzustellen, dass die Differenz zwischen den Kräften bei der 0%/20% Konfiguration negativ ist, bei Auslenkungen bis zu 1.25 mm, 1.5 mm und 2 mm für  $d_E = 3$  mm,  $d_E = 6$  mm und  $d_E = 9$  mm. Dies wird durch das Schneiden der Membranen und der daraus resultierenden Kontraktion in Vordehnungsrichtung verursacht, was zu einer Relaxation in Auslenkungsrichtung führt. Da  $F_{E,0V}$  in diesem Bereich kleiner ist als  $F_{NE}$ , wird die Differenz in (4.4) negativ. Ein weniger ausgeprägtes Verhalten der Kraftdifferenz wird auch für die 20%/20% Konfiguration beobachtet. Die 20%/0% Konfiguration zeigt keine negative Kraftdifferenz, da keine Relaxation in Vordehnungsrichtung geschieht.



**Abbildung 4.23:** Kraftlücke verursacht durch verschiedene Elektrodengrößen bei Niederspannung [137]

Diese Berechnungen zeigen, dass der Einfluss der Elektroden auf die Steifigkeit mit ihrer Größe zunimmt. Außerdem ist das Verhalten der Kräfte nichtlinear. Die maximalen Kraftdifferenzen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

**Tabelle 4.1: Maximale Kraftdifferenzen ohne elektrische Spannung**

	$d_E = 3$ mm	$d_E = 6$ mm	$d_E = 9$ mm
0%/20%	21.6 mN	36.1 mN	63.1 mN
20%/0%	9 mN	29.9 mN	41.1 mN
20%/20%	23.8 mN	28.6 mN	55.6 mN

## 4.5.2 Charakterisierung mit Hochspannung

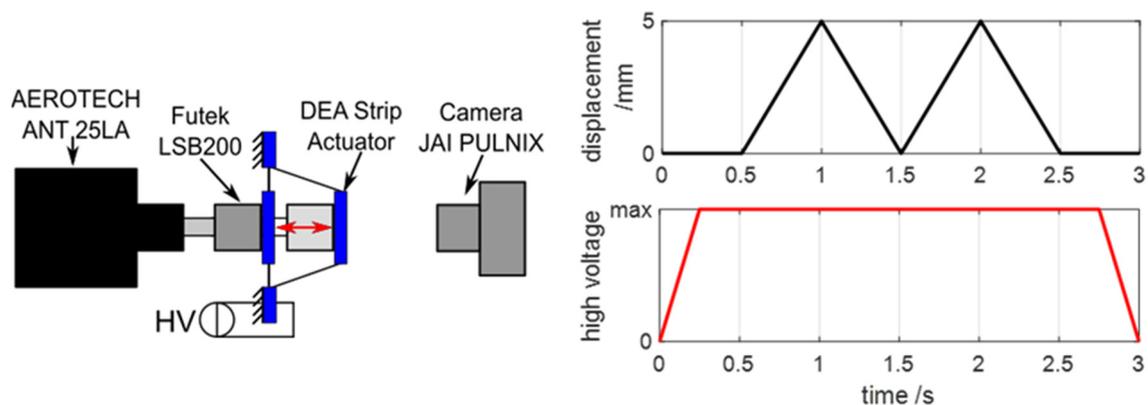
Nach der Analyse des Verhaltens bei 0 V wird das Verhalten der Membrane bei angelegter Hochspannung untersucht. Eine maximale elektrische Spannung von  $U_{DE,max} = 3$  kV wird an die Aktoren mit 20%/0% und 0%/20% während an die Aktoren mit 20%/20% Konfiguration eine Spannung von  $U_{DE,max} = 2.5$  kV angelegt wird. Dieser Unterschied wird dadurch verursacht, dass an allen Aktorkonfigurationen dasselbe maximale elektrische Feld von  $75$  V/ $\mu$ m anliegen soll. Diese Messungen sollen auch den Einfluss, der durch die Elektrode aktivierten Fläche  $A_{active}$  und der Fläche ohne Elektrode  $A_{inactive}$  auf der

Membrane untersuchen. Die Werte der Flächen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

**Tabelle 4.2: Aktive und inaktive Flächen der Aktoren**

	$d_E = 3 \text{ mm}$	$d_E = 6 \text{ mm}$	$d_E = 9 \text{ mm}$
$A_{\text{inactive}}$	$85.5 \text{ mm}$	$57 \text{ mm}$	$28.5 \text{ mm}$
$A_{\text{active}}$	$28.5 \text{ mm}^2$	$57 \text{ mm}^2$	$85.5 \text{ mm}^2$

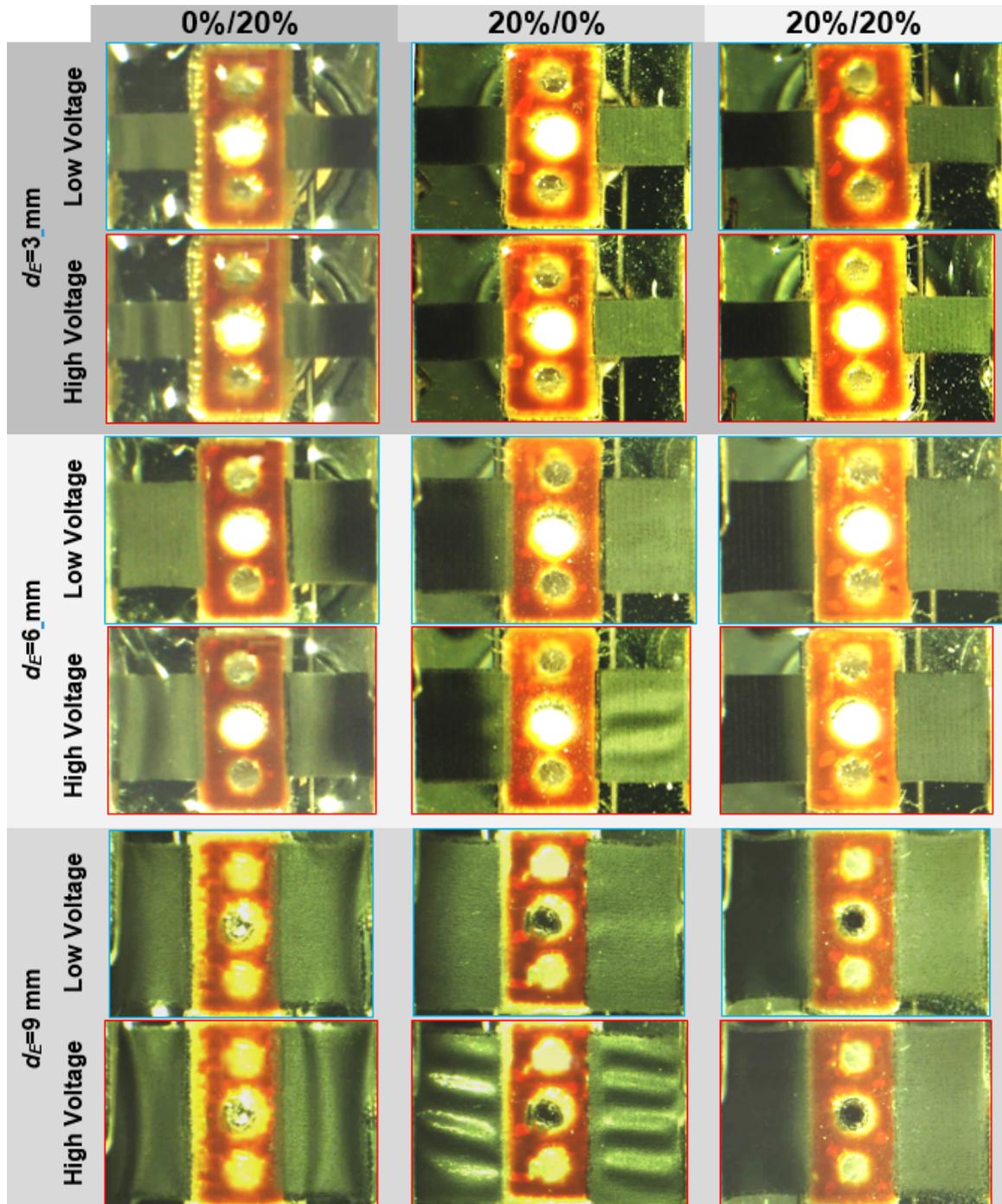
Die Messungen werden mit dem gleichen Vorgehen wie die vorangegangenen durchgeführt. Allerdings wird dieses Mal Hochspannungen angelegt. Bei allen Messungen wird die Hochspannung innerhalb von  $0.25 \text{ s}$  auf den Maximalwert erhöht. Danach wird dieser Maximalwert für  $2.5 \text{ s}$  konstant gehalten und schließlich in  $0.25 \text{ s}$  wieder auf  $0 \text{ V}$  abgesenkt. Während der Phase mit konstanter Hochspannung werden die Aktoren zweifach dreiecksförmig von  $0 \text{ mm}$  auf  $5 \text{ mm}$  ausgelenkt. Für jede Elektrodenkonfiguration werden die Messungen für vier verschiedene Aktoren durchgeführt. Eine Kamera *JAI PULNIX* und ein Hochspannungsverstärker *ULTRAVOLT 4HVA24-P1* werden zusätzlich in den Aufbau aus dem vorherigen Abschnitt eingebunden, um eine Hochspannung an die Aktoren anzulegen und deren Einfluss auf die Aktoren optisch aufzunehmen. Die Kamera wird angebracht, um eine Frontalansicht der Aktoren während der Tests zu ermöglichen. Eine Skizze dieses Aufbaus ist in Abbildung 4.24 gezeigt.



**Abbildung 4.24: Experimentelles Vorgehen für Hochspannungscharakterisierung von Streifenaktoren [137]**

Abbildung 4.25 zeigt Aufnahmen von Aktoren aller Konfigurationen. Jede Zeile beinhaltet die Aufnahmen für eine spezifische Vordehnungskonfiguration, während jede Spalte eine spezifische Elektrodenkonfiguration zeigt. Die Aufnahmen für Nieder- und Hochspannung werden in jeder Spalte gezeigt. Aus diesen optischen Studien lassen sich einige Schlüsse auf das elektromechanische Verhalten der Membranen ziehen. Es werden Faltenbildungen der Elektroden bei Hochspannung beobachtet. Dieses Phänomen basiert auf dem Fakt, dass bei kleinen Deformationen die Maxwellspannung die mechanische Spannung des Materials

dominiert. Die Faltenbildung bei 0%/20% Vordehnung betrifft die gesamte Elektrodenfläche und wirkt in Auslenkungsrichtung. Bei 20%/0% Vordehnung tritt die Faltenbildung nur bei  $d_E = 6 \text{ mm}$  und  $d_E = 9 \text{ mm}$  auf. Die Richtung der Falten ist orthogonal zur Auslenkungsrichtung. Dies dürfte sich nachteilig auf den erzeugbaren Hub der Aktoren auswirken.

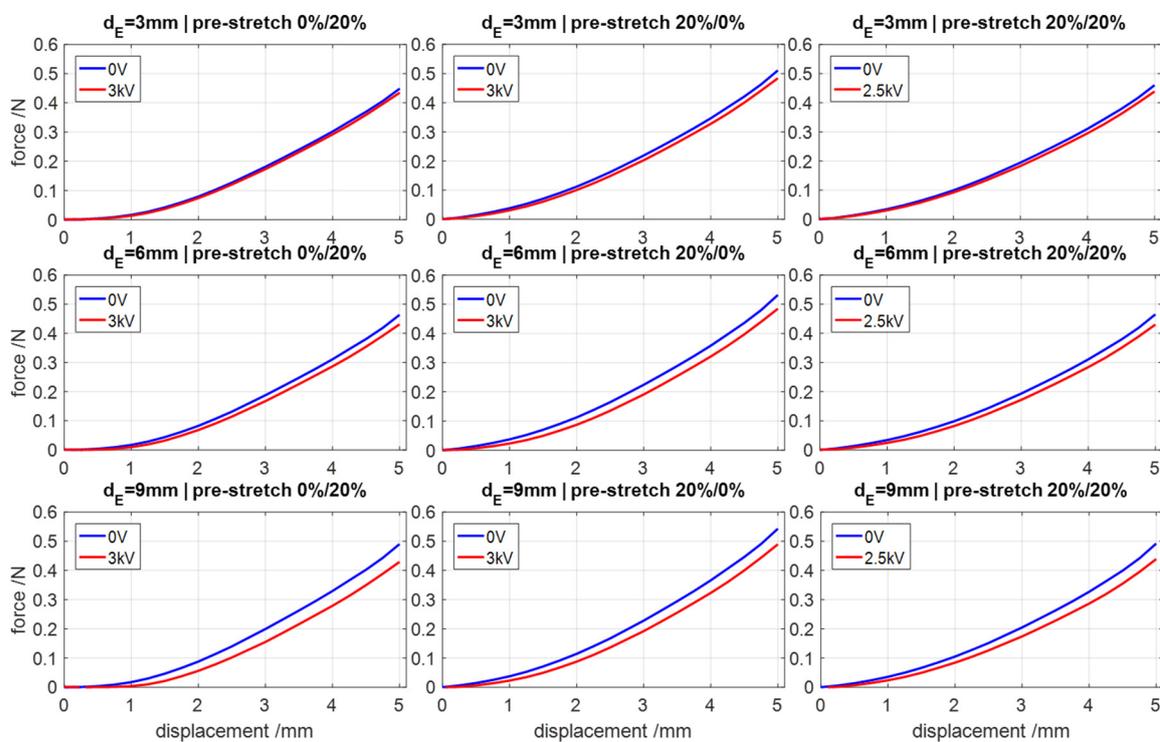


**Abbildung 4.25:** Visuelle Studie der Faltenbildung von verschiedenen Vordehnungen bei Hochspannung [137]

Die Aktoren mit 20%/20% Konfiguration zeigen keinerlei Faltenbildung. Dieses Verhalten

zeigt eindeutig, dass das Verhalten der Elektrodenflächen von der Richtung der Vordehnung abhängt. Eine unidirektionale Vordehnung resultiert in einer Faltenbildung transversal zu der Vordehnungsrichtung. Bei bidirektionaler Vordehnung verursacht die Ausdehnung der Elektroden eine Relaxation in beiden Richtungen, dies verhindert eine Bildung von Falten.

Der nächste Schritt besteht darin, dass Kraft-Auslenkungs-Verhalten der Aktorkonfigurationen zu evaluieren. Abbildung 4.26 zeigt einen Vergleich der Kraft-Auslenkungs-Verhalten bei Niederspannung (blau) und Hochspannung (rot) für alle Aktorkonfigurationen und Elektrodengrößen. Zunächst fällt auf, dass eine Lücke zwischen Nieder- und Hochspannungskurven auftritt. Diese Lücke kann auch als Kraftausbeute



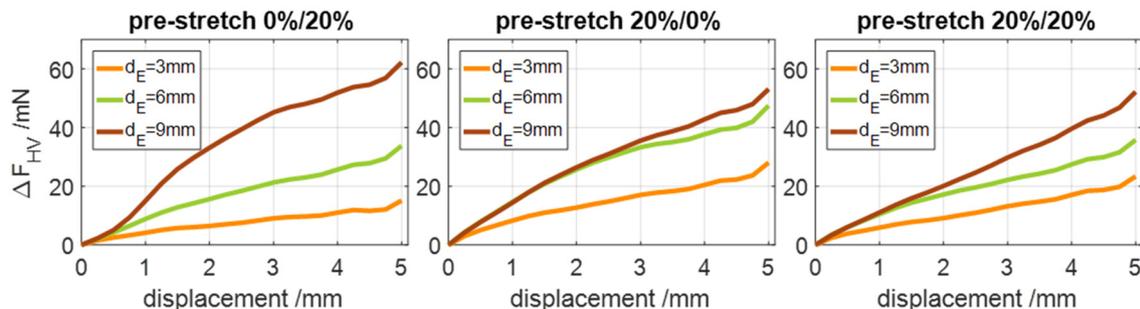
**Abbildung 4.26:** Kraft-Auslenkungs-Verhalten bei Nieder- (blau) und Hochspannung (rot) für kleine (oben), mittlere (mitte) und große Elektrodenflächen (unten) [137]

bezeichnet werden. Diese Ausbeute vergrößert sich mit zunehmender Elektrodengröße bei allen Vorspannungskonfigurationen. Dies wird durch die zunehmende aktive Fläche der Aktoren verursacht. Als Konsequenz daraus wird die Membrane auf einer größeren Fläche zusammengedrückt und die daraus resultierende laterale Ausdehnung der Membrane, zwischen den Elektroden, nimmt zu. Dies führt zu einer zunehmenden Erweichung und einer größeren Kraftausbeute. Um den Einfluss der Vordehnung auf die Kraftlücke zu untersuchen, werden die Differenzen der Kräfte bei Nieder- und Hochspannung durch

$$\Delta F_{HV} = F_{E,OV} - F_{E,HV} \quad (4.5)$$

wobei  $F_{E,HV}$  und  $F_{E,OV}$  die Kräfte mit und ohne angelegter Hochspannung beschreiben. Die Differenzen der Kräfte ist in Abbildung 4.27 gezeigt. Durch Vergleich von  $\Delta F_{HV}$  bei verschiedenen Elektrodengrößen bei 20%/20% Vordehnung kann festgestellt werden, dass die Kraftlücken fast linear mit den Elektrodengrößen zunehmen. Die beiden anderen Konfigurationen zeigen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Elektrodengröße und Verringerung der Kräfte. Die exakten Werte der Kraftausbeuten sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Die 0%/20% Vordehnung generiert eine größere Erweichung bei allen untersuchten Konfigurationen. Insbesondere die Aktoren mit einer Elektrodengröße von  $d_E = 9 \text{ mm}$  zeigen die größte Kraftausbeute aller getesteten Aktoren. Dies verspricht eine größere Leistungsfähigkeit bei der Aktuierung der DE Membranen.



**Abbildung 4.27:** Kraftlücken verursacht durch Hochspannung bei verschiedenen Vordehnungen und Elektrodengrößen [137]

**Tabelle 4.3:** Maximale Kraftlücken verursacht durch Hochspannung

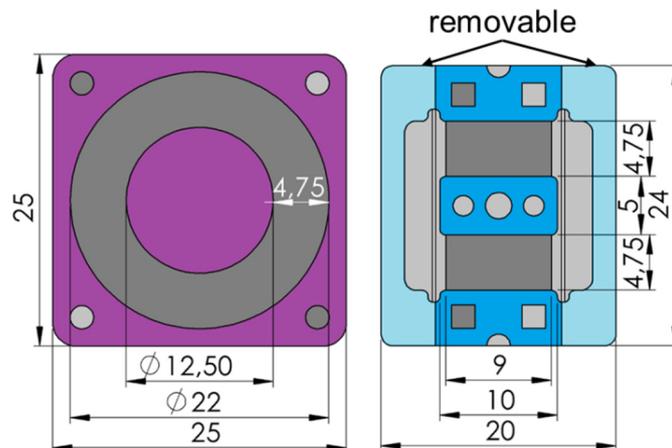
	$d_E = 3 \text{ mm}$	$d_E = 6 \text{ mm}$	$d_E = 9 \text{ mm}$
<b>0%/20%</b>	15.1 mN	33.8 mN	62.2 mN
<b>20%/0%</b>	28.1 mN	47.5 mN	53.1 mN
<b>20%/20%</b>	23.4 mN	35.8 mN	52.2 mN

### 4.5.3 Vergleich Streifenaktoren mit konischen Aktoren

Die Streifenaktoren, die in diesem Kapitel präsentiert werden, dienen als platzsparende Alternative zu konischen Aktoren (siehe Kapitel 2). In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit der beiden Aktortypen miteinander verglichen, um die Vorteile dieser neuartigen Konfiguration zu bereits existierenden herauszuarbeiten.

Ein direkter Vergleich der beiden Geometrien ist in Abbildung 4.28 gegeben. Die Kriterien des Vergleiches dieser beiden Membrankonfigurationen sind deren Volumen, die

Flexibilität im Design, das Kraft-Auslenkungs-Verhalten bei Niederspannung und die Kraftlücken zwischen Nieder- und Hochspannung. Ausschließlich die Streifenaktoren mit der größten Elektrodenfläche  $d_E = 9\text{ mm}$  werden wegen ihrer größten elektrischen Leistungsfähigkeit mit den konischen Aktoren verglichen. Das Volumen der konischen DE beträgt  $V_{cone} = 625\text{ mm}^3$  und für die Streifenaktoren  $V_{strip} = 480\text{ mm}^3$ . Das Volumen der Streifenaktoren kann auf  $V_{strip} = 240\text{ mm}^3$  verringert werden, indem die Seiten des Gehäuses entfernt werden, welche nur zum Aufbewahren der Aktoren notwendig sind (siehe Abbildung 4.28). Dieses Volumen ist fast dreimal kleiner als das der konischen DE. Auch das Verhältnis von Höhe zu Breite der Streifenaktoren kann variiert werden und stellt einen zusätzlichen Einstellungsparameter dar, der bei den konischen Aktoren nicht zur Verfügung steht. Zusätzlich ist die Kraft-Auslenkungs-Charakteristik einstellbar, indem die Vordehnung der Membrane in x und y Richtung separat eingestellt werden kann. Dies erlaubt die Aktoren speziell an verschiedene Anwendungen anzupassen. Auf der anderen Seite ist die Vordehnung der konischen DE wegen ihrer radialen Symmetrie normalerweise in beiden Richtungen identisch. Messungen für die konischen Aktoren werden mit den Testständen aus Abbildung 4.17 und Abbildung 4.24 für Nieder- und Hochspannung durchgeführt.

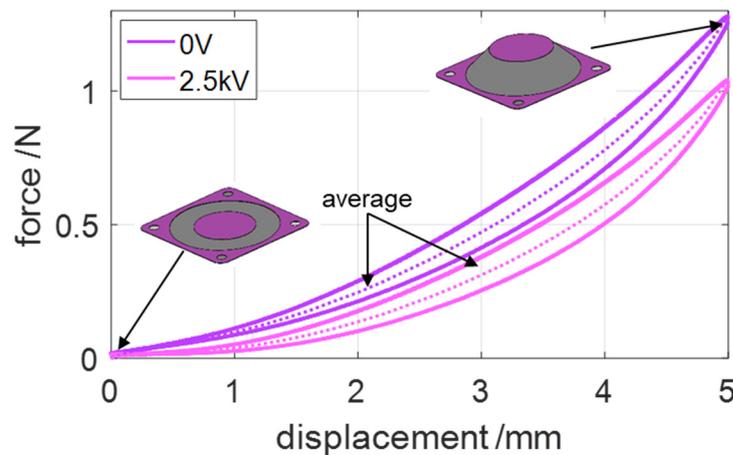


**Abbildung 4.28:** Vergleich der Größen der Aktoren [137]

Die Ergebnisse in Abbildung 4.29 zeigen eine höhere Kraft und eine viel größere Hysterese im Vergleich zu den Streifenaktoren. Die größere Kraft lässt sich auf die größere Elektrodenfläche der konischen DE zurückführen.

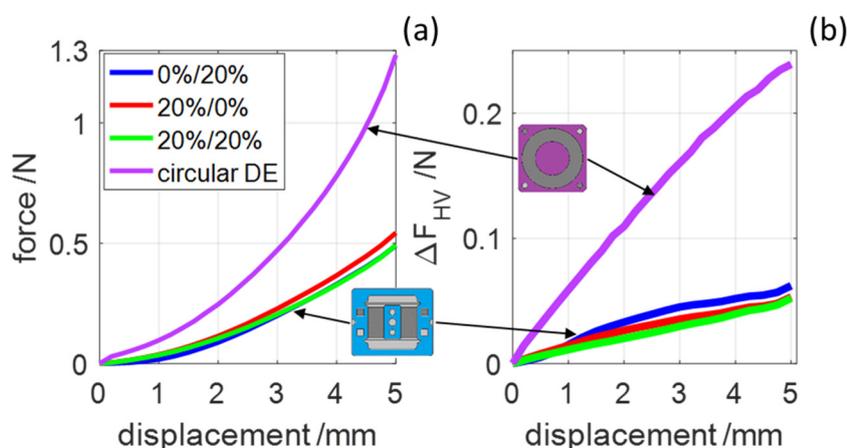
Ein Vergleich der gemessenen Kräfte bei Niederspannung ist in Abbildung 4.30 (a) gezeigt. Offensichtlich ist die Kraft des konischen DE zwei- bis dreimal größer als die der verschiedenen Streifenaktoren. Dies bedeutet, dass drei Streifenaktoren gestapelt werden müssen, um ein ähnliches Kraftverhalten zu erlangen. Da der Streifenaktor ungefähr ein

Drittel des Volumens eines konischen Aktors einnimmt, ist durch Stapeln von drei Streifenaktoren möglich eine größere Kraft bei gleichen Volumen zu erhalten.



**Abbildung 4.29:** Gemessene Kraft eines konischen DE in Bezug zur Auslenkung [137]

Die elektrische Leistungsfähigkeit wird durch die Kraftlücke zwischen den Kräften bei Nieder- und Hochspannung errechnet und mit Formel (4.5) bewertet. Die Kraftlücken sind in Abbildung 4.30 (b) dargestellt und zeigen, dass die Lücke beim konischen DE vier- bis fünfmal größer ist als bei den Streifenaktoren. Die Kraftlücke von vier Streifenaktoren mit 0%/20% Vordehnung ist äquivalent zu der eines konischen Aktors (siehe Tabelle 4.4). Die Leistungsfähigkeit eines konischen DE kann einfach durch Stapeln von vier Streifenaktoren erreicht werden (siehe Abbildung 4.31). Wenn man nur die elektro-mechanische Leistungsfähigkeit betrachtet, zeigt sich, dass der konische DE eine effektivere Lösung als der Streifenaktor in Betracht des Volumens darstellt. Der Streifenaktor bietet mehr Flexibilität in Betracht der Vordehnung und kann an anwendungsspezifische Geometrien angepasst werden.



**Abbildung 4.30:** Vergleich von Streifenaktoren und konischen Aktoren; (a) Kraft-Auslenkungsverhalten, (b) Kraftlücken verursacht durch Hochspannung [137]

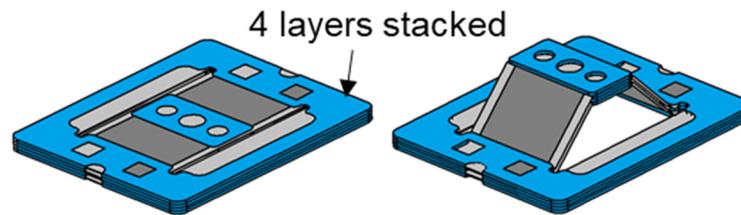


Abbildung 4.31: Stapel aus vier Aktoren zur Steigerung der Kraftausbeute [137]

Tabelle 4.4: Vergleich von konischen und Streifenaktoren

	Streifen-DE / $d_E = 9 \text{ mm}$		konischer DE	
<b>V</b>	$240 \text{ mm}^3$		$625 \text{ mm}^3$	
<b>A<sub>inactive</sub></b>	$28.5 \text{ mm}^2$		$0 \text{ mm}^2$	
<b>A<sub>active</sub></b>	$85.5 \text{ mm}^2$		$257.4 \text{ mm}^2$	
<b>X/Y</b>	0%/20%	20%/0%	20%/20%	
<b>F<sub>LV,max</sub></b>	0.5 N	0.55 N	0.435 N	1.28 N
<b>ΔF<sub>HV</sub></b>	62.2 mN	53.1 mN	52.2 mN	238.9 mN

## 4.6 Fazit

Dieses Kapitel hat das Design und die experimentelle Charakterisierung eines neuartigen DE Normalenaktors mit Streifengeometrie präsentiert. Der Einfluss, der bei der Fertigung der Aktoren eingestellten Vordehnung der Membran wurde durch verschiedene Experimente quantifiziert. Insbesondere wurde untersucht inwieweit die Vordehnung in Auslenkungsrichtung die Aktoren versteift. Zusätzlich wurde der Effekt der Größe der Elektroden auf das elektromechanische Verhalten mittels verschiedener Tests an zahlreichen Aktoren analysiert. Es wurde gezeigt, dass die maximale Kraft der Aktoren mit der Elektrodenfläche unabhängig von der Vordehnung zunimmt.

Es wurde außerdem der Einfluss von Hochspannung auf die Aktoren untersucht. Es wurde gezeigt, dass Hochspannung eine Faltenbildung auf der Elektrodenfläche verursacht. Bei uniaxialer Vordehnung tritt die Faltenbildung in orthogonaler Richtung zur Vordehnungsrichtung auf. Andererseits wurde bei bidirektionaler Vordehnung keine Faltenbildung beobachtet. Dieses Verhalten zeigt deutlich die Rolle der Vordehnung auf die Leistungsfähigkeit der Aktoren.

Außerdem wurden die Streifenaktoren mit den konischen Aktoren verglichen die als Ventilantrieb in Kapitel 3 verwendet werden. Es wurde gezeigt, dass Streifenaktoren die Leistungsfähigkeit von konischen Aktoren erreichen können, indem mehrere dieser Streifen gestapelt werden. Dies erlaubt eine bessere Ausnutzung des gegebenen Aktorvolumens. Streifenaktoren sind außerdem mit einer wesentlich geringeren

viskoelastischen Hysterese im Vergleich zu konischen DE behaftet. Zusätzlich bieten Streifenaktoren mehr Flexibilität beim Design durch die Möglichkeit Größen und Vordehnungen der beiden Achsen unabhängig voneinander auszuwählen.

Diese Merkmale der Streifenaktoren ermöglichen Ventilantriebe in gleicher oder geringerer Größe, als die bisher verwendeten Elektromagneten herzustellen, die zusätzlich alle Vorteile der DE Technologie aufweisen.

Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden unter dem Titel

*‘Development and experimental characterization of a dielectric elastomer membrane strip actuator’*

in *Smart Materials and Structures* (vol. 27, no. 2, p. 025019, Feb 2018, [137]) veröffentlicht. Die Geometrie des Streifenaktors wurde unter der Bezeichnung *‘Folienwandler’* mit dem Aktenzeichen *DE 102 016 11 4531 A1* patentiert.

# Kapitel 5

## Self-Sensing

---

### 5.1 Motivation

Dielektrische Elastomere bieten neben ihren aktorischen auch sensorische Eigenschaften. Insbesondere ist es möglich, beide Eigenschaften miteinander zu kombinieren. Diese sogenannte ‚Self-Sensing‘-Eigenschaft bietet die Möglichkeit die Position eines DE-Systems während der Aktuierung zu überwachen.

Ein zusätzlicher Nutzen dieses ‚Self-Sensing‘-Effekts bei dielektrischen Elastomeren besteht darin, dass bei der Aktuierung mit der Position auch Kapazität und Widerstände ändern. Aus diesen Änderungen lässt sich die Position des DE rekonstruieren. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass die Position des DE-Systems ohne separaten Positionssensor bestimmt werden kann. Im Hinblick auf Ventilanwendungen von DE-Systemen ergibt sich die Möglichkeit der Detektion der Stellposition des Ventils ohne zusätzliche Sensorik.

Verschiedene Ansätze zur Verwendung des ‚Self-Sensing‘-Effekts bei DE wurden bisher untersucht. O’Brien et al. [139] haben den Widerstand zwischen zwei Punkten der Elektrode auf der Erdseite des DE gemessen und daraus die Position des DE-Systems bestimmt. Daneben gibt es Methoden, die das niederfrequente Hochspannungssignal mit einem hochfrequenten, alternierenden Niederspannungssignal überlagern. Mittels der Amplitudenänderung des hochfrequenten Signals kann die Position [140,141] und die Reaktionskraft [142] des DE- Systems bestimmt werden. Modellbasierte ‚Self-Sensing‘-Methoden überlagern ebenfalls mit hochfrequenten alternierenden [143–146] oder PWM-Signalen [147] die Aktuierungsspannung. Dabei werden die aktuellen Werte von Kapazität

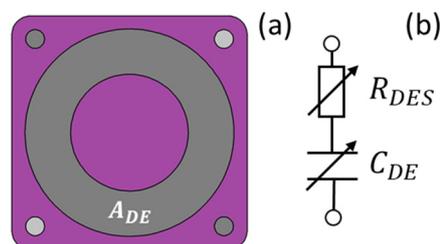
und Widerstand ermittelt. Mit diesen Werten wird anhand von elektromechanischen Modellen die Position des Systems bestimmt. Bei diesen Methoden wird das hochfrequente Niederspannungssignal mit dem niederfrequenten Hochspannungssignal gemischt und durch einen Hochspannungsverstärker ausgegeben. Dies limitiert den Frequenzbereich des Niederspannungssignals auf die Spezifikationen des verwendeten Hochspannungsverstärkers.

Eine weitere ‚Self-Sensing‘-Methode verwendet das Brummen des Hochspannungsverstärkers, um mittels eines Kalman-Filters die Position des DE-Systems zu bestimmen [148]. Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine zusätzliche Signalspannung benötigt wird.

## 5.2 Grundlagen

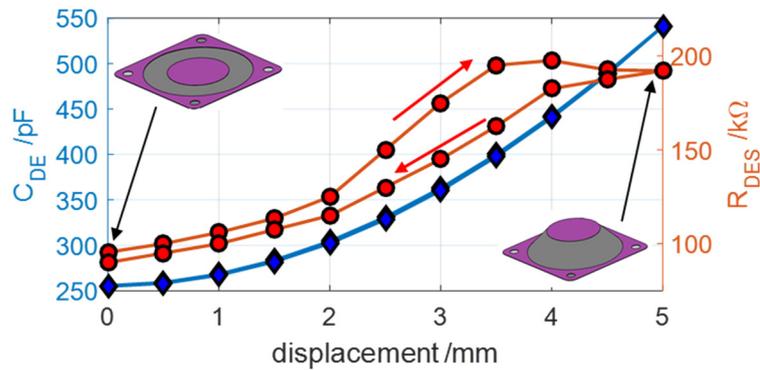
### 5.2.1 Sensorische Charakterisierung DE-Wandler

In diesem Kapitel wird ein DE-System aus konischen DE verwendet. Diese DE haben eine Kantenlänge von  $25\text{ mm}$  und einer Membrandicke  $z_{DE}$  von  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Zur Charakterisierung der verwendeten DE werden die Kapazität  $C_{DE}$  und der Elektrodenwiderstand  $R_{DES}$  in Bezug zur Auslenkung gemessen. Diese Werte werden mit einem LCR-Meter *Rhode & Schwarz HM8118* bestimmt. Dabei wird der DE in  $0.5\text{ mm}$  Schritten bis zu einem Maximalwert von  $5\text{ mm}$  ausgelenkt und an jeder Position  $R_{DES}$  und  $C_{DE}$  gemessen. Hierbei wird ein Wechselspannungsersatzschaltbild (siehe Abbildung 5.1 (b)) des DE als Basis verwendet bei dem der Widerstand der Membrane wegen dessen Größe vernachlässigt werden kann. Diese Messungen werden bei einer Frequenz von  $f_m = 1\text{ kHz}$  durchgeführt.



**Abbildung 5.1:** Konischer DE ,D25‘; (a) schematische Darstellung, (b) elektrisches AC-Ersatzschaltbild

Die ermittelten Werte sind in Abbildung 5.2 dargestellt und zeigen, dass der Elektrodenwiderstand einen nichtlinearen und hysteretischen Verlauf aufweist. Die Kapazität hingegen weist keine Hysterese in Bezug zur Auslenkung auf. Aus diesem Grund

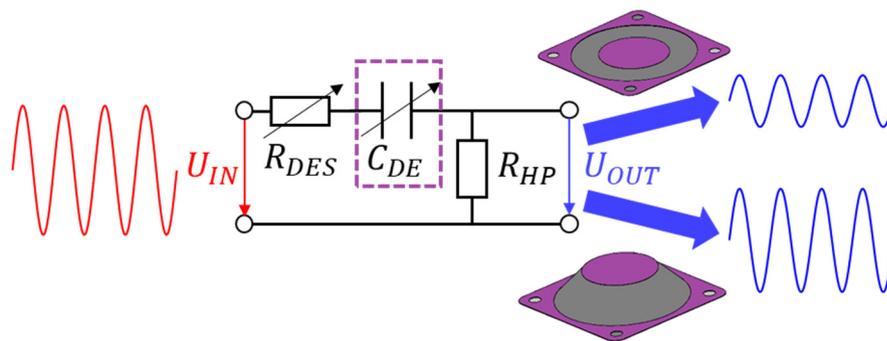


**Abbildung 5.2:** Kapazitäts- und Widerstandswerte eines DE gemessen mit LCR-Meter

wird der Zusammenhang zwischen Kapazität und Auslenkung des DE als Basis für weitere Entwicklungen genutzt.

### 5.2.2 Hochpassschaltung

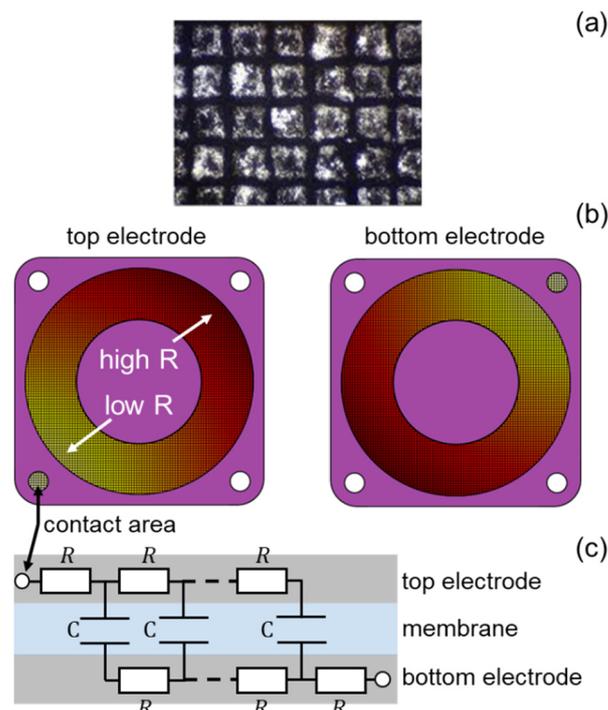
Diese ‚Self-Sensing‘-Methode basiert darauf, dass sich die Amplitude eines alternierenden Eingangssignals  $U_{IN}$  am Ausgang eines RC-Filters bei konstanter Frequenz  $f$  ändert, wenn sich die Werte der Komponenten ändern. Hierbei wird der DE in einer Hochpassschaltung mit einem konstantem Widerstand  $R_{HP}$  verwendet, über dem die Ausgangsspannung  $U_{OUT}$  gemessen wird. Der DE kann als Kondensator mit variabler Kapazität  $C_{DE}$  angesehen werden. Durch eine Auslenkung des DE wird die Kapazität erhöht und die Amplitude sowie der Phasenversatz der Ausgangsspannung des Hochpasses nehmen zu. Deswegen bestimmt diese Methode nur indirekt die Kapazität beziehungsweise Auslenkung des DE. Abbildung 5.3 zeigt schematisch die Funktionsweise des Hochpasses zur Bestimmung der Auslenkung eines DE.



**Abbildung 5.3:** Hochpassschaltung zur indirekten Ermittlung der Kapazität

Die Elektroden der realen DE umfasst eine große Fläche, die mittels Siebdruck aufgebracht (siehe Abbildung 5.4 (a)) werden. Die Elektrodenfläche ist deswegen aus einzelnen Quadraten aufgebaut. Jede dieser Quadrate hat eine eigene Kapazität  $C$  und Widerstand  $R$ .

Mit zunehmender Distanz der Quadrate zur Kontaktfläche nimmt auch deren Vorwiderstand zu, da die Widerstände der dazwischen liegenden Flächen aufsummiert werden müssen (siehe Abbildung 5.4 (b)). Die Struktur der Elektroden führt dazu, dass der DE als Aneinanderreihung mehrerer Tiefpässe angesehen werden kann (siehe Abbildung 5.4 (c)). Diese Tiefpassschaltung höherer Ordnung ist sehr aufwendig zu beschreiben. Deswegen wird untersucht, ob sich eine Tiefpasscharakteristik in einer Hochpassschaltung des realen DE bemerkbar macht. Dazu wird einem ersten Schritt das Verhalten der Hochpassschaltung überprüft.



**Abbildung 5.4:** RC-Betrachtung des DE; (a) vergrößerte Abbildung einer realen Elektrode aus [17], (b) schematischer Widerstandsverteilung, (c) Tiefpassmodell des DE

Der komplexwertige Frequenzgang eines idealen RC-Hochpass ist nach [149] durch

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{R_{HP}}{R_{HP} + \frac{1}{j2\pi f_m C_{DE}}} = \frac{j2\pi f_m C_{DE} R_{HP}}{1 + j2\pi f_m C_{DE} R_{HP}} \quad (5.1)$$

gegeben. Die Übertragungsfunktion dieses Hochpasses ohne ohmsche Dämpfung wird mit

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right| = \sqrt{\left[ \operatorname{Re}\left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}}\right) \right]^2 + \left[ \operatorname{Im}\left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}}\right) \right]^2} \quad (5.2)$$

berechnet und ergibt sich zu

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right| = \frac{2\pi f_m C_{DE} R_{HP}}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_{DE} R_{HP})^2}} \quad (5.3)$$

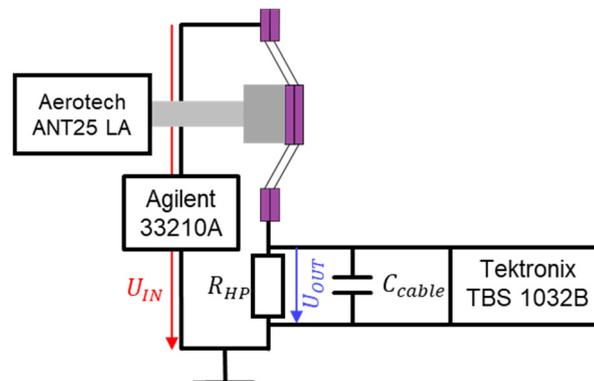
wobei  $f_m$  die Frequenz und  $C_{DE}$ ,  $R_{DE}$  die Kapazität und den Widerstand des DE beschreiben. Im Vergleich dazu ergibt sich der Frequenzgang eines Hochpasses mit ohmscher Dämpfung (siehe Abbildung 5.3) durch den Elektrodenwiderstand  $R_{DES}$  zu

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN \text{ damped}}} = \frac{R_{HP}}{R_{DES} + R_{HP} + \frac{1}{j2\pi f_m C_{DE}}} = \frac{j2\pi f_m C_{DE} R_{HP}}{1 + j2\pi f_m C_{DE} (R_{DES} + R_{HP})} \quad (5.4)$$

Die Übertragungsfunktion wird gemäß Formel (5.2) zu

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|_{\text{damped}} = \frac{\sqrt{(2\pi f_m C_{DE})^2 (R_{HP}^2 + R_{HP} R_{DES})^2 + (2\pi f_m C_{DE} R_{HP})^2}}{1 + (2\pi f_m C_{DE} (R_{HP} + R_{DES}))^2} \quad (5.5)$$

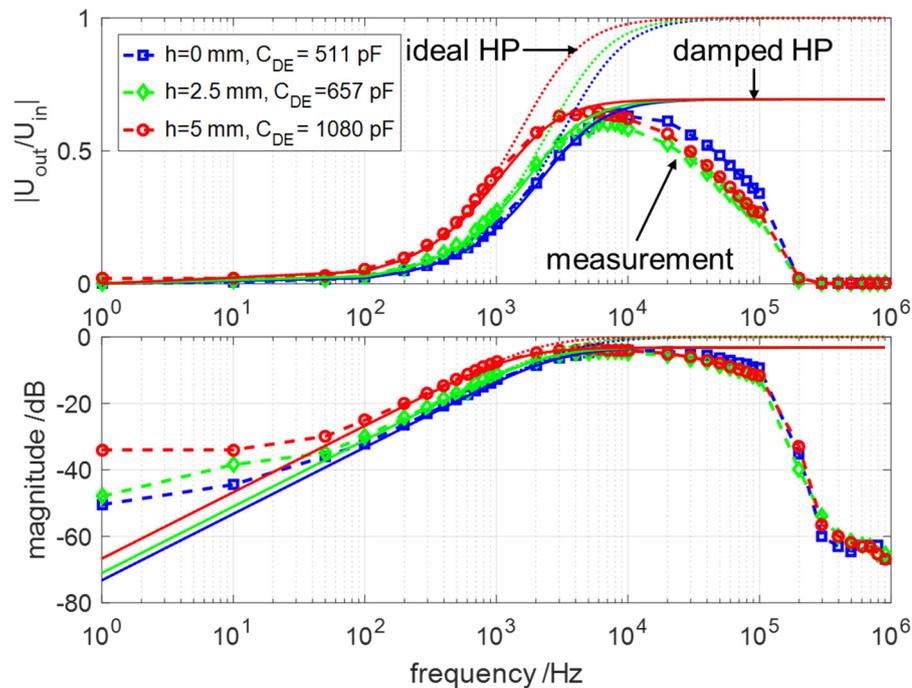
berechnet. Die reale Übertragungsfunktion wird mit einem Funktionsgenerator *Agilent 33210A* und einem Oszilloskop *Tektronix TBS 1032B* ermittelt. Die Amplitude der Sinusspannung beträgt  $U_{IN} = \pm 10 \text{ V}$ , und der Widerstand des Hochpasses  $R_{HP} = 68 \text{ k}\Omega$ . Es wird ein Stapel aus zwei DE (siehe Kapitel 3) verwendet, der mit einem Linearaktor *Aerotech ANT25-LA* ausgelenkt wird. Die Frequenz  $f_m$  wird von  $10 \text{ Hz}$  bis  $1 \text{ MHz}$  variiert. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.5 dargestellt.



**Abbildung 5.5:** Aufbau zur Ermittlung der Übertragungsfunktion mit Funktionsgenerator und Oszilloskop

In Abbildung 5.6 sind die Messergebnisse im Vergleich zu den theoretischen Verläufen eines Hochpasses mit und ohne Elektrodenwiderstand ( $R_{DES} = 30 \text{ k}\Omega$ ) dargestellt. Die Messergebnisse zeigen eine deutliche Abweichung von dem Verläufen eines idealen und eines gedämpften Hochpasses. Das reale System zeigt das Verhalten eines Bandpasses dessen Bandbreite sich zwischen  $2 \text{ kHz}$  und  $40 \text{ kHz}$  liegt. Dieses Verhalten wird durch die

Messleitung des Oszilloskops verursacht. Die Messleitung besteht aus einem Koaxialkabel mit einer Parasitärkapazität von  $C_{\text{cable}} = 128 \text{ pF}$ , deren Impedanz mit zunehmender Frequenz abnimmt und so das Messergebnis verfälscht. Unter Berücksichtigung dieser Parasitärkapazität kann der Verlauf der realen Hochpassschaltung in Bezug zur Frequenz entsprechend Formel (5.5) angenommen werden.



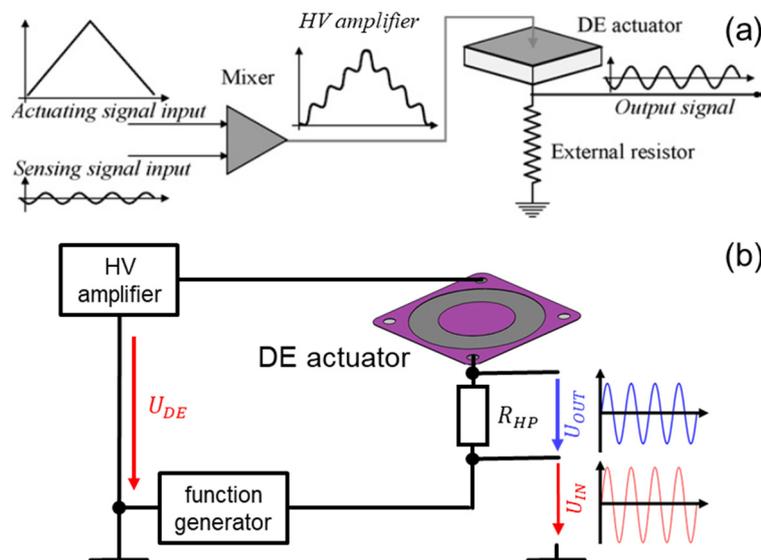
**Abbildung 5.6:** Verlauf der Übertragungsfunktion eines idealen Hochpasses mit und ohne ohmscher Dämpfung im Vergleich zum realen Hochpass

### 5.3 Konzeptentwicklung

Dieser Abschnitt beschreibt die Untersuchung der ‚Self-Sensing‘-Eigenschaften eines DE-Feder-Systems durch Amplitudenmodulation. Dies bedeutet die Verwendung von DE als Kondensator in einem RC-Glied, um mittels Amplitudenmodulation eines hochfrequenten Niederspannungssignals die Position des Systems zu bestimmen. Diese ‚Self-Sensing‘-Methode basiert primär auf analoger Schaltungstechnik. Die bisherigen Methoden benötigen hohe Samplerraten und Rechenleistungen bei der Messdatenerfassung, um die Positionsbestimmung durchführen zu können. Im Gegensatz dazu soll die hier vorgestellte Methode mit möglichst geringem Aufwand bei der Messdatenerfassung durchführbar sein.

Dieses ‚Self-Sensing‘-Konzept wird auf Basis vorangegangener Arbeiten [98,99] entwickelt. Die Überlagerung des Aktuierungssignals mit einem hochfrequenten

Messsignal ist eine gängige Methode zur Detektion der Position eines DE-Systems. Bisherige Arbeiten verwendeten dazu den Hochspannungsverstärker, um die Aktuierungsspannung mit dem alternierenden Messsignal zu mischen (siehe Abbildung 5.7 (a)). Hierbei lagen die Messsignale bei einer Frequenz von bis zu  $100\text{ Hz}$  in einem Spannungsbereich von  $100\text{ V}$  [140]. Diese Werte bewegen sich im Grenzbereich der



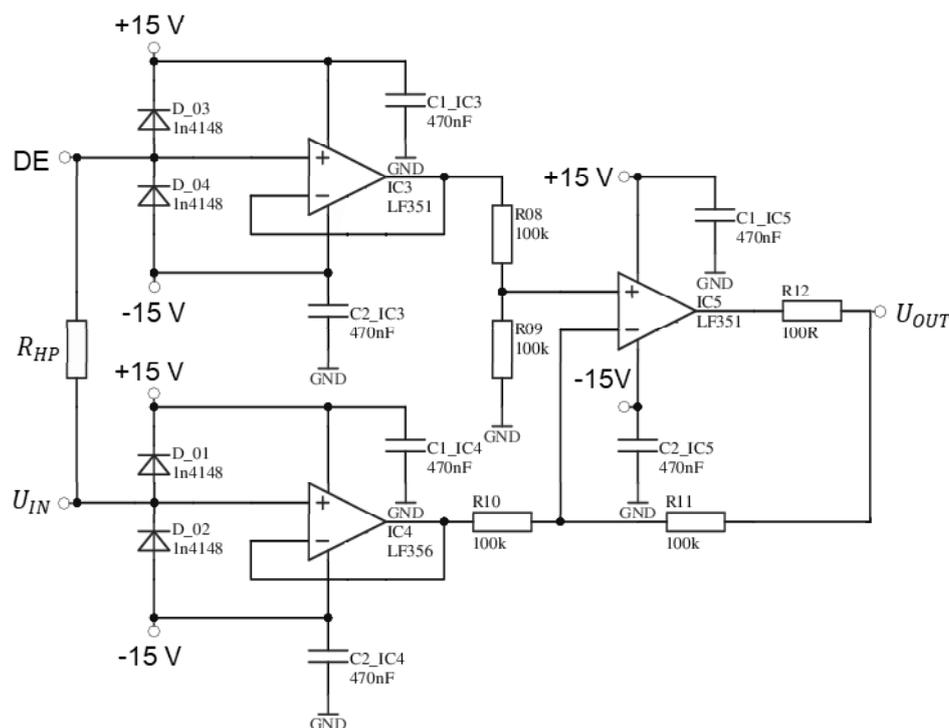
**Abbildung 5.7:** 'Self-Sensing'-Konzepte mittels Überlagerung der Aktuierungs- und Messsignale; (a) Überlagerung durch Hochspannungsverstärker [140], (b) Überlagerung der Signale durch separaten Funktionsgenerator über die Erdseite des DE

Spezifikationen der verwendeten Hochspannungsverstärker (*TREK 600-Serie*). In dieser Arbeit wird im Gegensatz zu vorangegangenen Arbeiten das Messsignal unabhängig vom Hochspannungsverstärker auf das DE-System gelegt. Das Messsignal wird dazu von einem Funktionsgenerator über die Erdseite des DE-Systems eingespeist (siehe Abbildung 5.7 (b)) und dessen Spannungsabfall über dem Messwiderstand  $R_{HP}$  gemessen. Dies erlaubt die Untersuchung eines größeren Frequenzbereichs ( $\leq 1\text{ MHz}$ ) und ermöglicht die Spannung des Messsignals deutlich zu verringern ( $\leq 10\text{ V}$ ). Außerdem ermöglicht dieses Konzept eine größere Auswahl an Formen des Messsignals.

Diese Veränderungen der Messmethode ermöglichen die Eigenschaften von DE-System in Zusammenhang mit 'Self-Sensing'-Anwendungen weitergehend zu untersuchen.

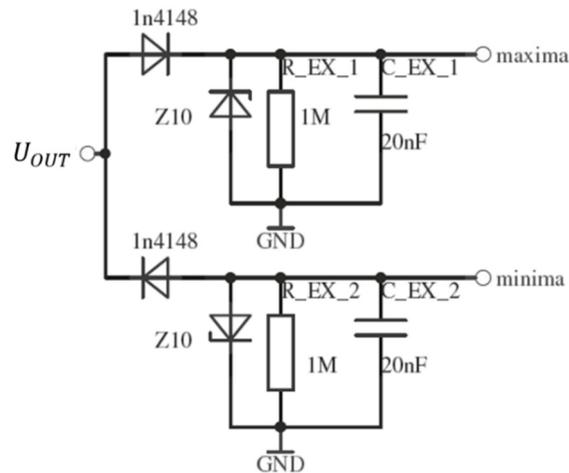
## 5.4 Messschaltungen

Diese ‚Self-Sensing‘-Methode benötigt zusätzliche Schaltungen zur Messung der abfallenden Spannung über  $R_{HP}$ . Die Messschaltung soll mittels analoger Elemente realisiert werden, da diese Elemente günstig und als SMD Technologie erhältlich sind und dadurch die Möglichkeit zur späteren Miniaturisierung bieten. Die primäre Messschaltung besteht aus einer Subtrahierer, die die Differenz der Spannungen vor und nach dem Messwiderstand  $R_{HP}$  ermittelt und deren Differenz ausgibt. Der Messwiderstand ist zwischen dem Signalgenerator ( $U_{IN}$ ) und der Erdseite des DE positioniert. Die Schaltung misst den Spannungsabfall und gibt diesen als Ausgangsspannung  $U_{OUT}$  aus. Die Messschaltung (siehe Abbildung 5.8) ist mit Dioden Schaltungen versehen, um das Messdatenerfassungssystem gegen Hochspannung zu schützen falls das DE-System versagt. Diese Schaltungen werden mit *Altium Designer* ausgelegt, manuell gefertigt und bestückt.



**Abbildung 5.8:** Grundlegende Amplitudenmodulations- ‚Self-Sensing‘-Messschaltung

Die Detektion der Extrema wird analog durch eine zusätzliche Schaltung (siehe Abbildung 5.9) durchgeführt, um die Erkennung unabhängig von  $f_m$  zu ermöglichen. Diese Schaltung ist eine passive RC-Entladestufe, die wegen einer maximalen Aktuierungsfrequenz von



**Abbildung 5.9:** Schaltung zur analogen Detektion der Extrema

$f_{HV} = 10 \text{ Hz}$  innerhalb von  $0.1 \text{ s}$  zu entladen sein soll. Der Entladewiderstand  $R_{EX}$  wird auf  $1 \text{ M}\Omega$  gewählt. Daraus lässt sich eine Kapazität von

$$C_{EX} = \frac{\tau_{EX}}{5R_{EX}} = 20 \text{ nF} \quad (5.6)$$

bestimmen. Dabei beschreibt  $\tau_{EX}$  die Zeitkonstante der Entladestufen. Zusätzlich schützt die Schaltung die Ausgänge durch Zener-Dioden gegen Hochspannung.

## 5.5 Charakterisierung DE-System

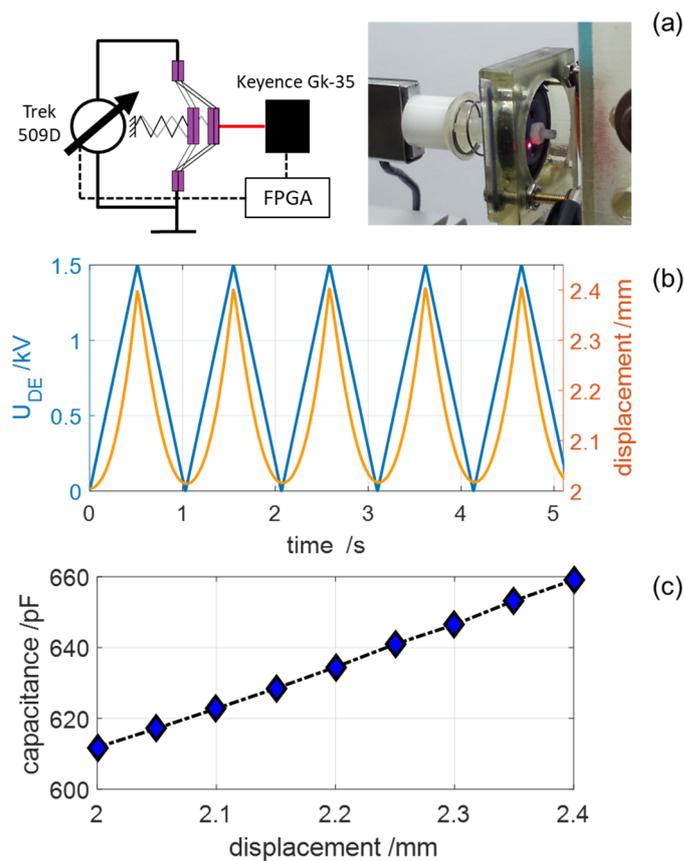
Dieser Abschnitt beschreibt die Charakterisierung des verwendeten DE-Systems bezüglich des erzeugten Hubes und der Bestimmung optimaler Messwiderstände abhängig von der Messfrequenz.

Zur Untersuchung der ‚Self-Sensing‘-Eigenschaften werden die beiden DE mit einer Feder mit der Federkonstanten von  $k = 0.02 \text{ N/mm}$  auf  $h_{min} = 2 \text{ mm}$  ausgelenkt und mit einer maximalen Dreiecksspannung von  $U_{DE} = 1.5 \text{ kV}$  bei einer Aktuierungsfrequenz von  $f_{HV} = 1 \text{ Hz}$  fünfmal aktuiert. Der erzeugte Hub des Systems wird mit einem *Keyence Gk 35* gemessen. Die Messdaten werden mit einem FPGA *NI cRIO 9068* aufgenommen. Abbildung 5.10 zeigt den Messaufbau sowie die Ergebnisse der Messung. Die Ergebnisse zeigen, dass das DE-System einen maximalen Hub von  $h_{max} = 0.4 \text{ mm}$  erzeugt. Basierend auf diesem Hub wird erneut die Kapazität des DE-Systems in diesem Auslenkungsbereich gemessen. Die Minimalkapazität beträgt  $C_{DE,min} = 612 \text{ pF}$  bei  $h_{min} = 2 \text{ mm}$  und die Maximalkapazität  $C_{DE,max} = 662 \text{ pF}$  bei  $h_{max} = 2.4 \text{ mm}$ . Auf Basis dieser Kapazitätswerte

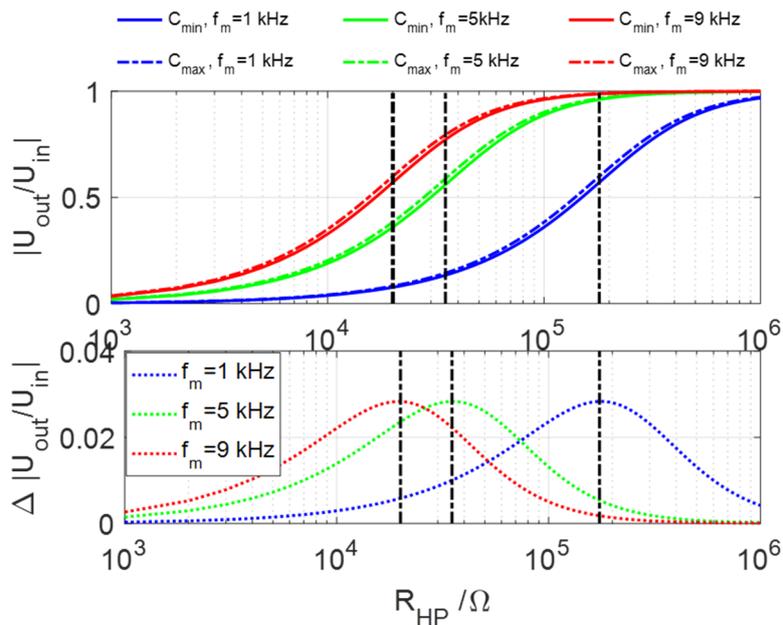
können für verschiedene Signalfrequenzen die Werte des Messwiderstandes  $R_{HP}$  bestimmt werden, bei dem die Messschaltung einen möglichst großen Signalanstieg aufweist. Der Elektrodenwiderstand ist aufgrund seines stark hysteretischen Verlaufes nicht eindeutig zu bestimmen. Deswegen wird zur Vereinfachung der Auslegung das DE-System als Hochpass ohne ohmsche Dämpfung angenommen. Daraus ergibt sich der Signalanstieg zu

$$\Delta \left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right| = \frac{2\pi f_m C_{DE,max} R_{HP}}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_{DE,max} R_{HP})^2}} - \frac{2\pi f_m C_{DE,min} R_{HP}}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_{DE,min} R_{HP})^2}} \quad (5.7)$$

Mit diesen Werten lassen sich die Widerstandswerte mit maximalem Signalanstieg im Messfrequenzbereich bestimmen (siehe Abbildung 5.11). Die Widerstandswerte sind in Tabelle 5.1 angegeben. Bei den Messungen werden Widerstandswerte aus der E12-Reihe verwendet, um den Aufwand bei der Bestückung der Schaltung zu verringern. Diese Werte unterscheiden sich ein wenig von den berechneten Widerstandswerten.



**Abbildung 5.10:** Charakterisierung des ‚Self-Sensing‘-Messaufbaus; (a) Messaufbau, (b) Messergebnisse, (c) Kapazitätsverlauf des DE-Systems



**Abbildung 5.11:** Übertragungsfunktion und Signalanstieg zur Bestimmung der Messwiderstände mit maximalen Signalanstiegen

**Tabelle 5.1:** Widerstandswerte  $R_{HP}$  der Messschaltung

Frequenz	Berechneter Widerstand	Verwendeter Widerstand $R_{HP}$ (E12-Reihe)
1 kHz	174 k $\Omega$	180 k $\Omega$
2 kHz	88 k $\Omega$	82 k $\Omega$
3 kHz	58 k $\Omega$	56 k $\Omega$
4 kHz	46 k $\Omega$	47 k $\Omega$
5 kHz	35 k $\Omega$	33 k $\Omega$
6 kHz	30 k $\Omega$	33 k $\Omega$
7 kHz	25 k $\Omega$	27 k $\Omega$
8 kHz	23 k $\Omega$	22 k $\Omega$
9 kHz	20 k $\Omega$	18 k $\Omega$

## 5.6 Charakterisierung Messschaltung

Bei der Charakterisierung der Messsystems sind vor allem die

- Freiheit von Hysterese
- möglichst großer Anstieg

der ‚Self-Sensing‘-Spannung die ausschlaggebenden Kriterien. Die Hysterese kann in der Beziehung zwischen den Extrema des Messsignals und dem gemessenen Hub des DE-Systems auftreten. Um diese Vorgaben zu erreichen, wird die Charakterisierung iterativ durchgeführt. Insgesamt wird die Charakterisierung der Messschaltung in fünf Schritten unterteilt. Bei jedem Schritt wird eine Modifikation der Messschaltung vorgenommen, um

die definierten Ziele zu erreichen.

### **Schritt I: Funktionsüberprüfung (5.6.1)**

*Variation der Messfrequenzen und Formen des Messsignals und Untersuchung der Messsignale auf deren Amplitudenanstieg und eventuelle Ausbildung von Hysteresen.*

### **Schritt II: Filterung Aktuierungsspannung (5.6.2)**

*Hinzufügen eines zusätzlichen Hochpasses zur Messschaltung und Wiederholung der Messungen aus Schritt I. Untersuchung der Ursachen des beobachteten hysteretischen Verhaltens.*

### **Schritt III: Hysteresevermeidung (5.6.3)**

*Anpassen der Messwiderstände  $R_{HP}$  zur Verringerung bzw. Vermeidung von Hysteresen. Eingrenzen des untersuchten Frequenzbereichs zur Behebung der Ursachen der Hysteresen.*

### **Schritt IV: Verstärkung ‚Self-Sensing‘-Signale (5.6.4)**

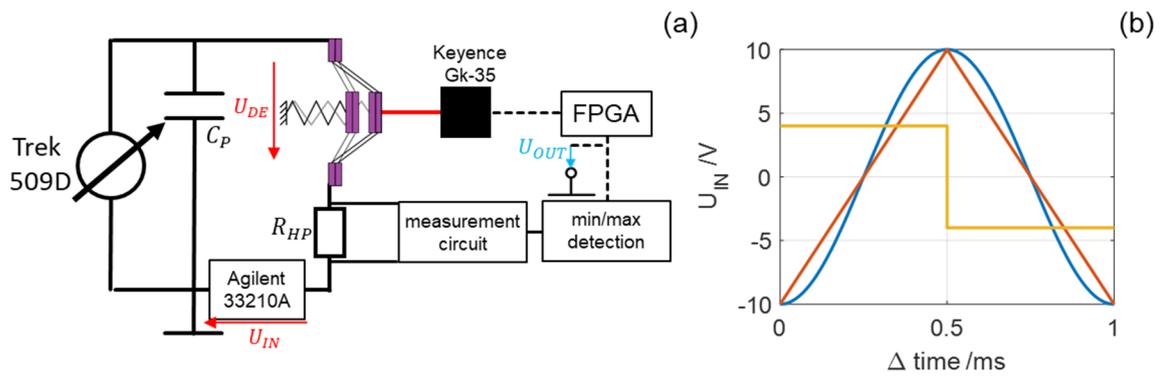
*Verstärkung der Messsignale am Ausgang der Messschaltung und bestimmen der optimalen Kombinationen von Messwiderstand und Frequenz für sinus- und dreiecksförmige Messsignale.*

### **Schritt V: Untersuchung Aktuierungsspannung (5.6.5)**

*Untersuchung der Einflüsse verschiedener Frequenzen und Formen (Sinus, Dreieck) der Aktuierungsspannung auf das Verhalten der Messsignale.*

## **5.6.1 Funktionsüberprüfung**

Zur Charakterisierung dieser ‚Self-Sensing‘-Methode wird der Messaufbau aus Abbildung 5.10 (a) durch die Messschaltung und einen Signalgenerator *Agilent 33210A* modifiziert (siehe Abbildung 5.12). Der Signalgenerator ist hierbei durch eine Diodenschaltung gegen Hochspannung geschützt. Zusätzlich wird ein Hochspannungskondensator  $C_P = 10 \text{ pF}$  parallel zum Hochspannungsverstärker geschaltet, da der Hochspannungsverstärker im Hinblick auf diesen Messaufbau nicht sensitiv genug auf Störgrößen am Ausgang reagiert und die durch die ‚Self-Sensing‘-Spannung erzeugten Ströme blockiert.

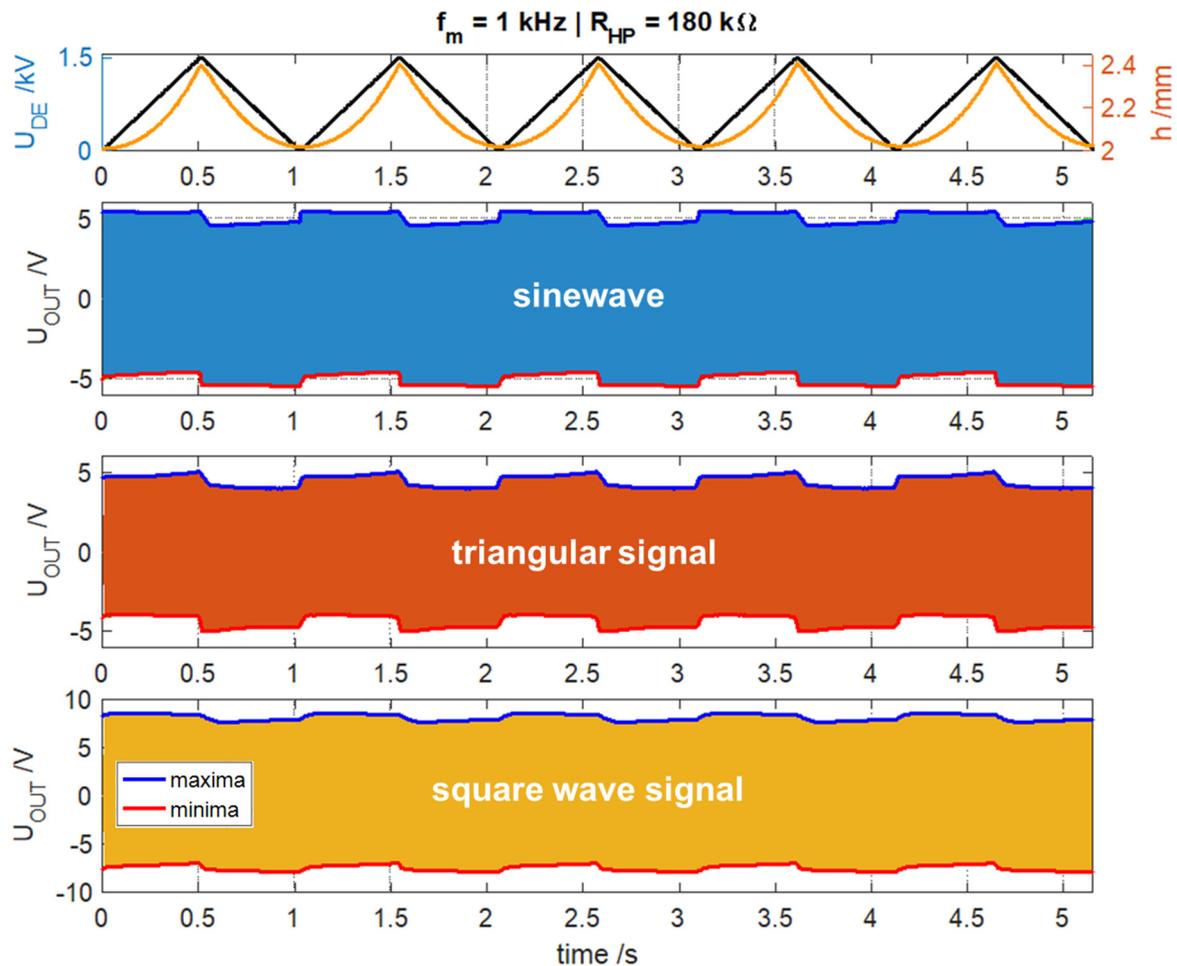


**Abbildung 5.12:** Validierung der ‚Self-Sensing‘-Methode; (a) Messaufbau, (b) Signalformen

Die Frequenzen der ‚Self-Sensing‘-Signale werden von  $f_m = 1 \text{ kHz}$  bis  $f_m = 9 \text{ kHz}$  in  $1 \text{ kHz}$  Schritten variiert. Als Signalformen werden Sinus, Dreieck und Rechteck gewählt. Die Amplituden der Eingangssignale für Sinus und Dreieck liegen bei  $U_{IN} = \pm 10 \text{ V}$ . Die Amplitude des Rechtecks liegt bei  $U_{IN} = \pm 4 \text{ V}$  und die Anstiegs- und Abfallzeit bei  $\Delta t_{\pm} = 1 \mu\text{s}$ .

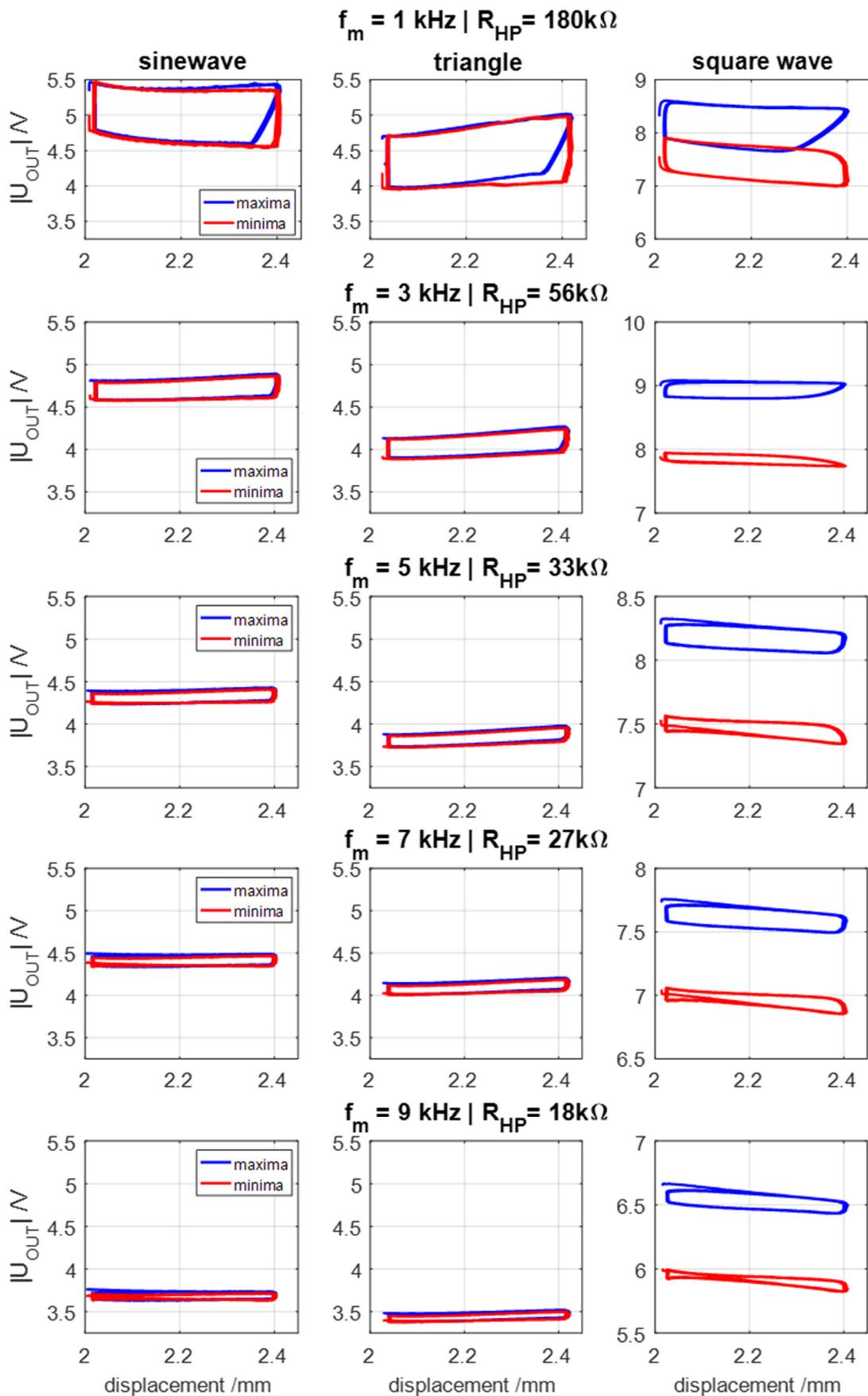
Abbildung 5.13 zeigt die zeitabhängigen Ergebnisse der Messung für alle drei Signalformen bei  $f_m = 1 \text{ kHz}$ . Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Ausgangsspannungen  $U_{OUT}$  bei allen Signalformen mit dem Hub  $h$  verändert.

Allerdings zeigt sich auch, dass die Aktuierungsspannung  $U_{DE}$  die Ausgangsspannungen durch einen Offset beeinflusst. Abbildung 5.14 zeigt eine Auswahl gemessener Extrema bei verschiedenen Frequenzen und Signalformen. Hierdurch wird ersichtlich, dass die Aktuierungsspannung eine Hysterese in  $U_{OUT}$  erzeugt, deren Größe aber mit zunehmender Frequenz abnimmt. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt darin, dass die Aktuierungsspannung  $U_{DE}$  um den Faktor tausend größer ist als die ‚Self-Sensing‘-Spannungen  $U_{OUT}$ .

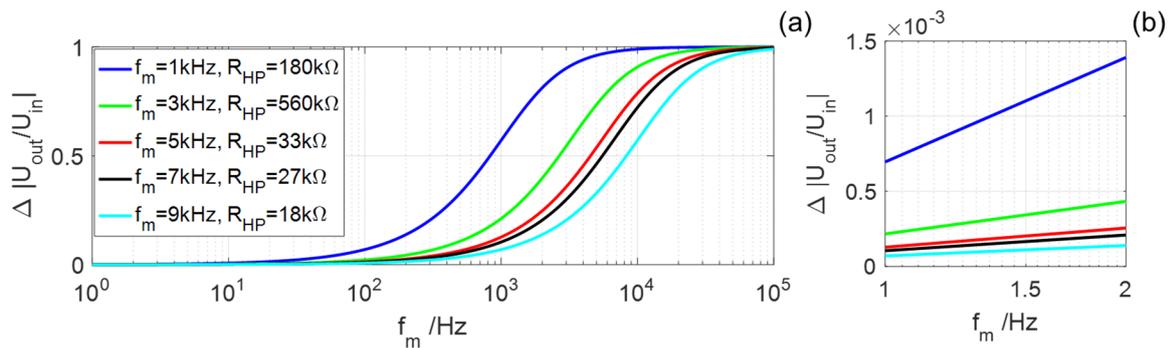


**Abbildung 5.13:** Zeitabhängige Messung der ‚Self-Sensing‘-Spannung bei  $f_m = 1 \text{ kHz}$  für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen

Betrachtet man die Übertragungsfunktionen der idealisierten Messhochpässe wird deutlich, dass ein Anteil von  $U_{DE}$  auf  $U_{OUT}$  aufsummiert wird und je nach Messfrequenz Spannungsoffsets bis zu  $1 \text{ V}$  verursachen. Mit zunehmender Messfrequenz wird die Übertragungsfunktion zu höheren Frequenzen verschoben. Dies dämpft  $U_{DE}$  stärker, was das Spannungsoffset verringert, aber nicht vollständig eliminiert (siehe Abbildung 5.15). Der Anstieg respektive Abfall der Signalspannung kann aufgrund der Hysterese in diesem Schritt nicht eindeutig bewertet werden.



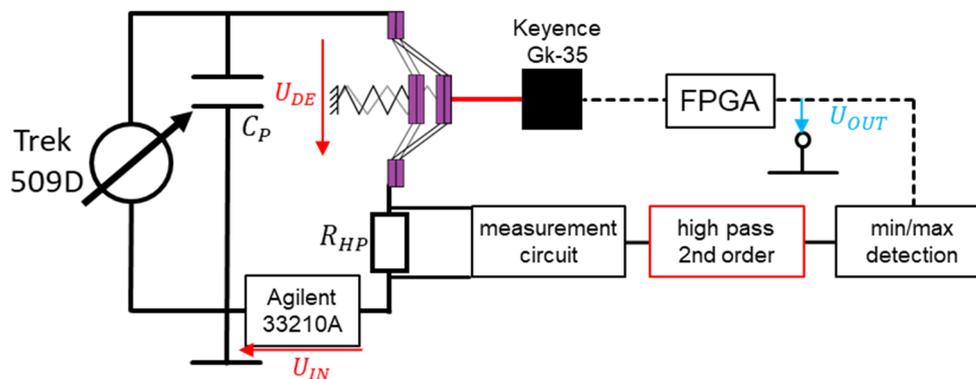
**Abbildung 5.14:** „Self-Sensing“-Extrema in Bezug zum generierten Hub für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen bei verschiedenen Frequenzen



**Abbildung 5.15:** Hochpassverhalten der Messschaltung; (a) gesamter Frequenzbereich, (b) Frequenzbereich der Aktuierungsspannung

## 5.6.2 Filterung Aktuierungsspannung

Die Ergebnisse aus Schritt I haben gezeigt, dass die Aktuierungsspannung  $U_{DE}$  die ‚Self-Sensing‘-Spannungen  $U_{OUT}$  beeinflusst. Aus diesem Grund wird in diesem Schritt eine zusätzliche Hochpassschaltung zwischen der Messschaltung und der Extrema Detektion eingefügt, um den Einfluss der Aktuierungsspannung und nach Möglichkeit die Hysterese zu eliminieren. Dazu wird ein passiver RC-Hochpass zweiter Ordnung ausgewählt (siehe Abbildung 5.16).



**Abbildung 5.16:** Modifikation des Messaufbaus durch Hinzufügen eines separaten Hochpass

Die Übertragungsfunktion eines RC-Hochpasses erster Ordnung ist durch

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|^I = \frac{2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP}}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^2}} \quad (5.8)$$

gegeben. Zur Bestimmung der Übertragungsfunktion eines Hochpasses zweiter Ordnung wird nach Abbildung 5.17 die Spannung  $U_I$  zwischen den beiden RC-Gliedern als Hilfsgröße zu

$$U_1 = U_{IN} \frac{\left[ \left( R_{SHP} + \frac{1}{j2\pi f_m C_{SHP}} \right) \parallel R_{SHP} \right]}{\left[ \left( R_{SHP} + \frac{1}{j2\pi f_m C_{SHP}} \right) \parallel R_{SHP} \right] + \frac{1}{j2\pi f_m C_{SHP}}} \quad (5.9)$$

bestimmt. Die Ausgangsspannung  $U_{OUT}$  ergibt sich in Abhängigkeit von  $U_1$  zu

$$U_{OUT} = U_1 \frac{j2\pi f_m C_{SHP}}{1 + j2\pi f_m C_{SHP}} \quad (5.10)$$

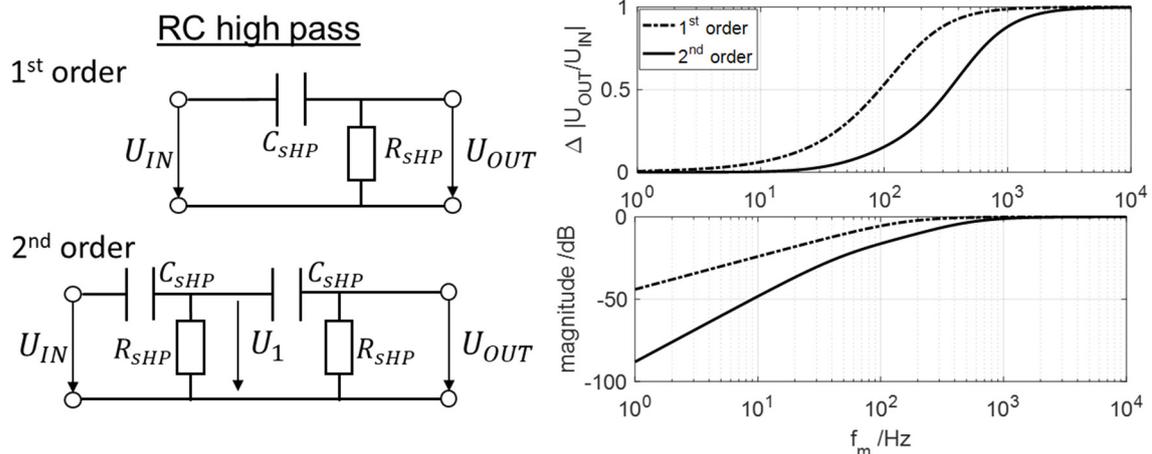
Der Frequenzgang des gesamten Hochpasses wird durch einsetzen von Formel (5.9) in (5.10) zu

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{(j2\pi f_m R_{SHP} C_{SHP})^2}{1 + 3j2\pi f_m R_{SHP} C_{SHP} + (j2\pi f_m R_{SHP} C_{SHP})^2} \quad (5.11)$$

berechnet. Daraus wird die Übertragungsfunktion mit Formel (5.2) berechnet und ergibt sich zu

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|^2 = \frac{\sqrt{((2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^2 ((2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^2 + 1))^2 + (2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^6}}{1 + 7(2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^2 + (2\pi f_m C_{SHP} R_{SHP})^4} \quad (5.12)$$

Die Kapazität des Hochpasses wird auf  $C_{SHP} = 1 \text{ nF}$  und der Widerstand auf  $R_{SHP} = 1 \text{ M}\Omega$  bestimmt, da diese Konfiguration eine hohe Dämpfung unterhalb  $10 \text{ Hz}$  und eine geringe Dämpfung oberhalb  $1 \text{ kHz}$  verspricht (siehe Abbildung 5.17). Für das weitere Vorgehen wird ein Hochpass zweiter Ordnung ausgewählt, da dieser ein einen geringen



**Abbildung 5.17:** Aufbau und Übertragungsfunktion von RC Hochpassen unterschiedlicher Ordnung

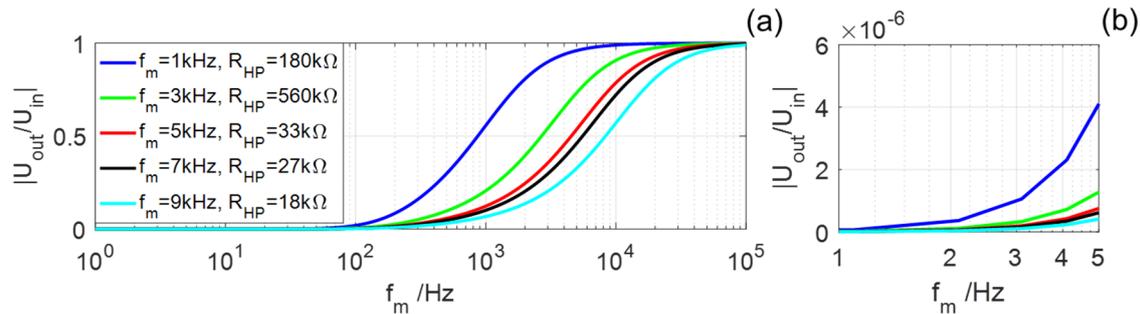
Fertigungsaufwand bei günstigem Verlauf der Übertragungsfunktion bietet.

Durch die Entkopplung des Messhochpass vom separaten Hochpass zweiter Ordnung durch

einen Operationsverstärker können die Übertragungsfunktionen einfach miteinander multipliziert werden [149]. Diese Kombination der Messschaltung mit dem separaten RC-Hochpass ergibt sich die modifizierte Übertragungsfunktion zu

$$\left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|_{MOD} = \left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|_{ideal} \left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|^2 = \frac{2\pi f_m C_{DE} R_{HP}}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_{DE} R_{HP})^2}} \left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right|^{II} \quad (5.13)$$

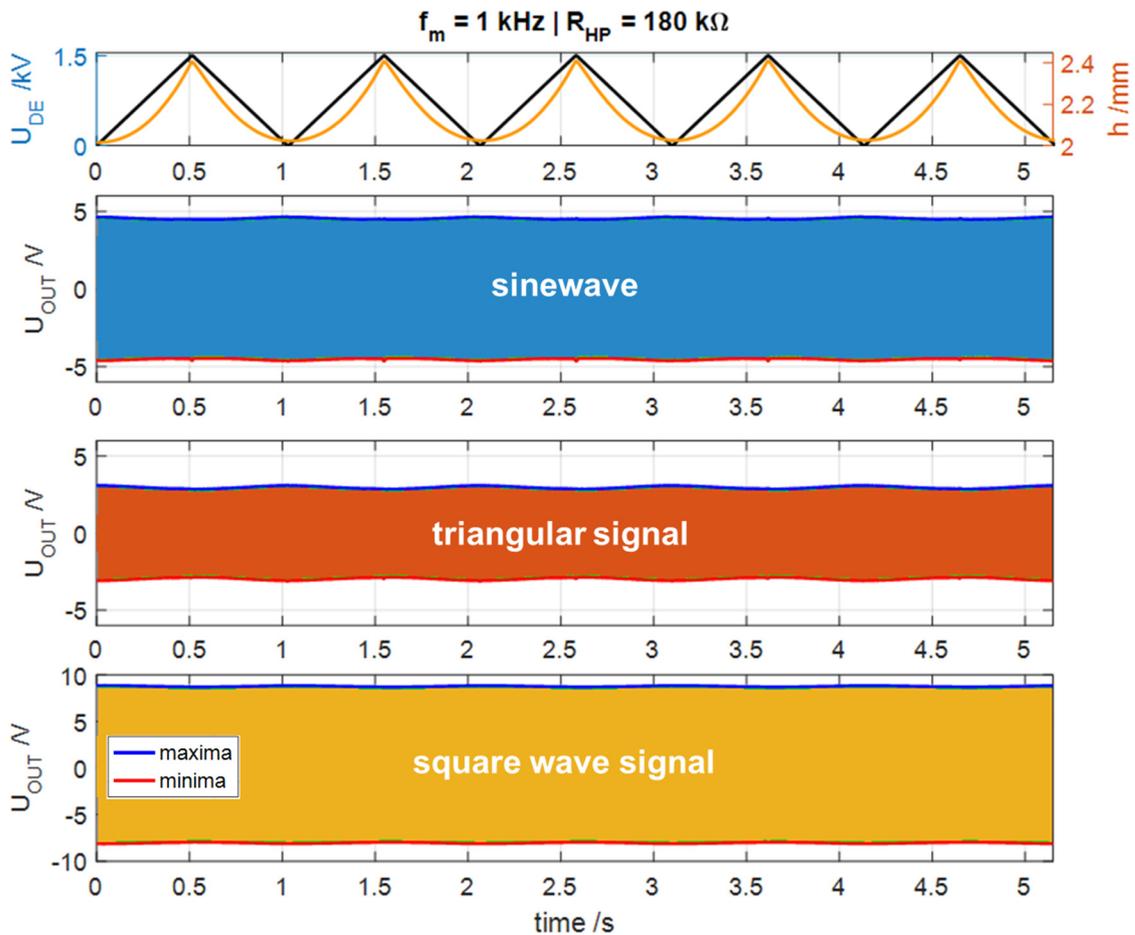
Die modifizierten Übertragungsfunktionen sind in Abbildung 5.18 dargestellt.



**Abbildung 5.18:** Hochpassverhalten der Messschaltung ergänzt durch separatem RC-Hochpass zweiter Ordnung; (a) gesamter Frequenzbereich, (b) Frequenzbereich der Aktuierungsspannung

Mit dieser Modifikation werden die Messungen aus Schritt I wiederholt. Abbildung 5.19 zeigt die zeitlichen Verläufe der gemessenen ‚Self-Sensing‘-Spannungen. Hierbei wird deutlich, dass der Einsatz eines separaten Hochpasses die Spannungsoffsets durch die Aktuierungsspannung eindeutig verringert.

Bei genauerer Betrachtung des Verhaltens der Ausgangsspannung in Bezug zur Auslenkung des DE-Systems zeigt sich, dass durch diese Modifikation das hysteretische Verhalten deutlich verringert wird (siehe Abbildung 5.20).



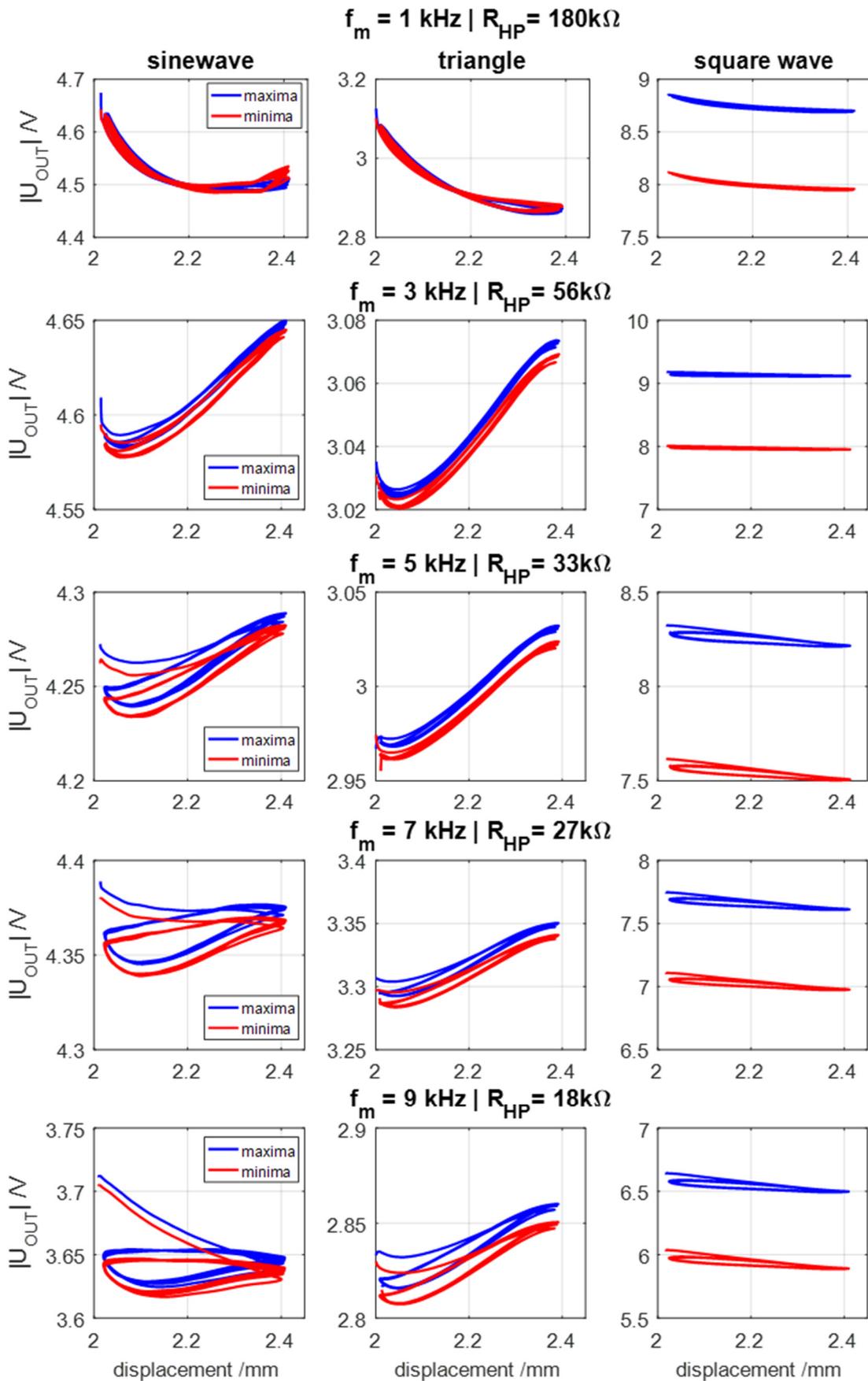
**Abbildung 5.19:** Zeitabhängige Messung der ‚Self-Sensing‘-Spannung bei  $f_m = 1 \text{ kHz}$  für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen mit separatem RC-Hochpass 2.Ordnung

Eine Übersicht über die Ausbildungsgrade von Hysterese der ‚Self-Sensing‘-Spannungen ist in Tabelle 5.2 aufgeführt. Diese Auflistung verdeutlicht, dass alle Ausgangsspannungen der rechteckigen Eingangssignale unabhängig von der Frequenz stark hysteretisch und somit zur Detektion der Auslenkung ungeeignet sind. Auch bei sinusförmigen Eingangssignalen ist die Ausgangsspannung in Bezug zur Auslenkung des DE-Systems durchgehend hysteretisch. Bei einer dreieckigen Signalform verschwindet im Frequenzbereich von und  $3 \text{ kHz}$  bis  $5 \text{ kHz}$  die Hysterese vollständig.

Die Änderung der Extrema der Ausgangsspannung der Messschaltung wird durch

$$\Delta|U_{OUT}| = |U_{OUT} - U_{OUT}(t = 0)| \quad (5.14)$$

errechnet, wobei  $U_{OUT}(t = 0)$  das Minimum bzw. Maximum am Ausgangspunkt bezeichnet.

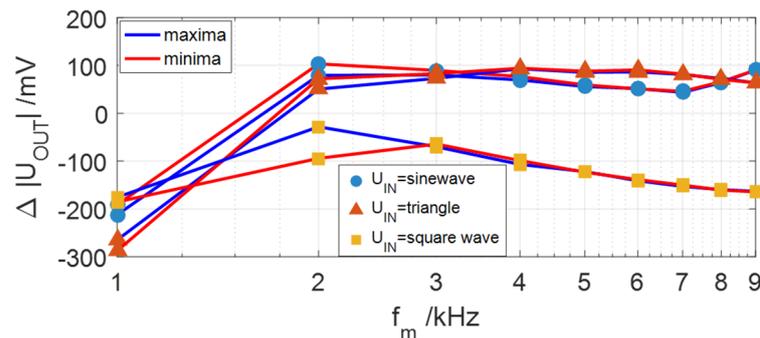


**Abbildung 5.20:** ‚Self-Sensing‘-Extrema in Bezug zum generierten Hub ergänzt durch separatem RC-Hochpass zweiter Ordnung

**Tabelle 5.2: Ausbildung von Hysteresen in der Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Auslenkung des DE-Systems**

$f_m$ /kHz	$U_{IN} =$ Sinus	$U_{IN} =$ Dreieck	$U_{IN} =$ Rechteck
	Ausbildung der Hysteresese		
1	gering	gering	stark
2	gering	gering	stark
3	gering	keine	stark
4	stark	keine	stark
5	stark	keine	stark
6	stark	gering	stark
7	stark	gering	stark
8	stark	stark	stark
9	stark	stark	stark

Die nähere Betrachtung dieser Änderungen (siehe Abbildung 5.21) zeigt, dass es bei rechteckiger Eingangsspannung beim Anstieg der Kapazität zu einer Verringerung der Ausgangsspannung kommt. Dies gilt für den ganzen Frequenzbereich und steht im Gegensatz zu dem Verhalten der Messschaltung bei sinus- und dreiecksförmiger



**Abbildung 5.21: Anstieg der Ausgangsspannungen der Messschaltung während der Aktuierung**

Eingangsspannung. Diese steigen ab einer Messfrequenz von  $f_m = 2 \text{ kHz}$  mit zunehmender Kapazität an. Der Abfall der Ausgangsspannung aller Eingangsspannungsformen bei einer Messfrequenz von  $1 \text{ kHz}$  ist auf den Hochspannungskondensator  $C_P$  zurückzuführen, dessen Impedanz bei dieser Frequenz so groß ist, dass der Verstärker die ‚Self-Sensing‘-Spannung als Störung ansieht und versucht diese zu kompensieren.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass es offensichtlich einen Frequenzbereich gibt in dem die Extrema der Ausgangsspannung der Messschaltung einen hysteresefreien Zusammenhang mit der Auslenkung aufweisen. Theoretisch kann ein RC-System innerhalb seiner Zeitkonstanten  $\tau$  vollständig auf die Maximalspannung geladen werden. Dies ist in der Realität nicht möglich, da der Ladestrom mit zunehmender Spannung abnimmt. Somit dauert ein vollständiger Ladevorgang  $5\tau$ . In diesem Fall wird jedoch das DE-System mit

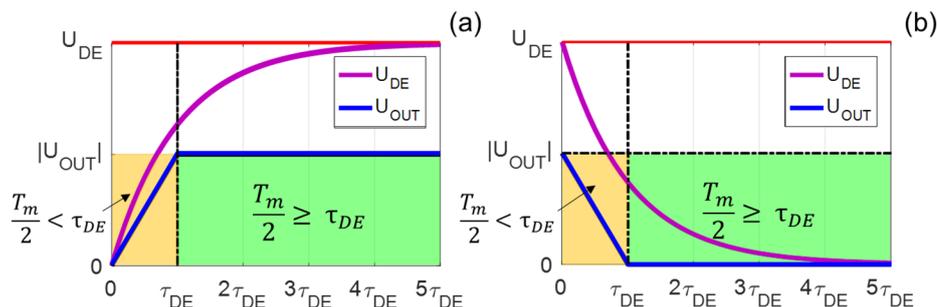
einer Hochspannung  $U_{DE}$  geladen, die wesentlich größer ist als die Spannung des ‚Self-Sensing‘-Signals. Die Zeitkonstante  $\tau_{DE}$  dieses DE-System wird durch

$$\tau_{DE} = (R_{HP} + R_{DES}) C_{DE} \quad (5.15)$$

bestimmt. Die Hochspannung wird mit dem hochfrequenten ‚Self-Sensing‘-Signal überlagert. Hierbei gibt die Periodendauer  $T_m$  des Signals die Zeitspanne an innerhalb der das DE-System mit der Signalspannung überlagert wird. Das Laden und Entladen dauert hierbei jeweils  $T_m/2$ . Um die Hochspannung vollständig zu überlagern, muss die halbe Periodendauer größer sein als die Zeitkonstante  $\tau_{DE}$

$$\frac{T_m}{2} \geq \tau_{DE} \quad (5.16)$$

Da die Hochspannung in diesem System viel größer ist als die ‚Self-Sensing‘-Spannung, kann davon ausgegangen werden, dass das hochfrequente Laden und Entladen des DE innerhalb der Zeitkonstanten  $\tau_{DE}$  abgeschlossen ist, da zu jedem Zeitpunkt ausreichend Strom fließt, um dies zu garantieren. Die Lade- und Entlade-Vorgänge in diesem DE-System sind in Abbildung 5.22 schematisch dargestellt.



**Abbildung 5.22:** Schematische Ladevorgänge; (a) Aufladen des DE-Systems, (b) Entladen des DE-Systems

In diesem Schritt werden verschiedene Messfrequenzen getestet. Ist deren halbe Periodendauer geringer als die Zeitkonstante, kann die Eingangsspannung das DE-System nicht vollständig überlagern und es bildet sich ein zeitlicher Versatz der Ausgangsspannung, was in einer Hysterese mündet.

Dies erklärt auch, dass alle Ausgangsspannungen des Rechtecksignals unabhängig von  $f_m$  eine Hysterese aufweisen. Die Übergänge zwischen minimaler und maximaler ‚Self-Sensing‘-Spannung werden in  $1 \mu s$  durchgeführt. Dies verhindert eine Vervollständigung des Ladevorgangs.

Durch die Bewegung des DE-Systems bei der Aktuierung bewegt sich die Kapazität  $C_{DE}$  zwischen  $610 pF$  und  $662 pF$ . Der Elektrodenwiderstand  $R_{DES}$  bewegt sich in einem

Bereich von  $125\text{ k}\Omega$  bis  $150\text{ k}\Omega$ , wobei die Messungen aus Abbildung 5.2 darauf hinweisen, dass auch in diesem Auslenkungsbereich mit einem hysteretischen Verhalten des Widerstandes zu erwarten ist. Dadurch ergibt sich ein Zeitbereich  $\Delta\tau_{DE}$  für das DE-System anstelle eines konstanten Wertes. Abbildung 5.23 stellt die Zeitbereiche des DE-Systems den Periodendauern der Messfrequenzen gegenüber. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Periodendauern erst oberhalb von  $f_m = 5\text{ kHz}$  den Zeitbereich unterschreiten. Dies deckt sich mit den Messergebnissen aus Abbildung 5.23, bei denen sich oberhalb von  $f_m = 5\text{ kHz}$  bei allen Signalformen Hysterese ausbilden.

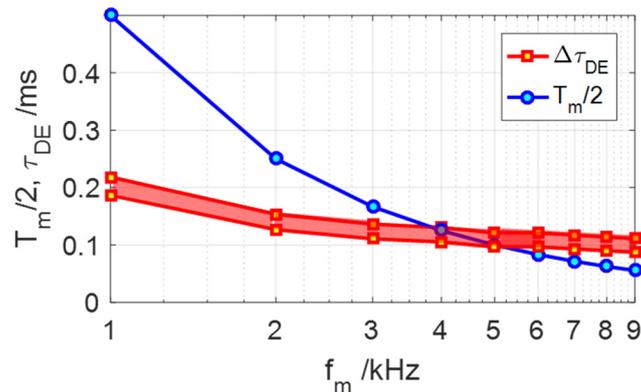


Abbildung 5.23: Verhältnis der Periodendauer der Messfrequenz zur Zeitkonstanten des DE-Systems

### 5.6.3 Hysteresevermeidung

Aus den Ergebnissen des vorangegangenen Schrittes wird deutlich, dass die Auswahl der Widerstände  $R_{HP}$  teilweise zur Bildung von Hysterese im Verhältnis von Ausgangsspannung zur Auslenkung des DE-Systems geführt hat. Deshalb wird die Messschaltung in diesem Schritt mit Messwiderständen  $R_{HPN}$  ausgerüstet (siehe Abbildung 5.24) die die Zeitkonstante  $\tau_{DEN}$  des DE-Systems verringern.

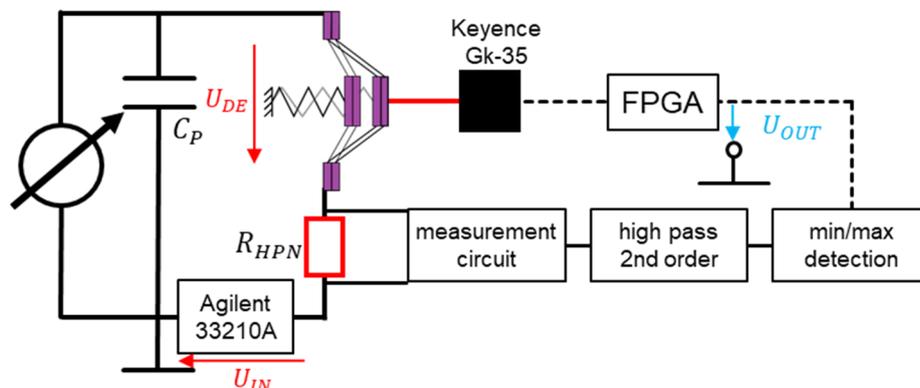


Abbildung 5.24: Modifikation des Messaufbaus durch Änderung der Messwiderstände  $R_{HPN}$

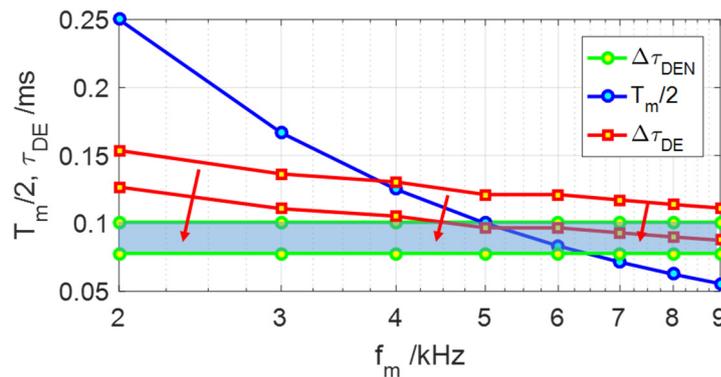
Diese Widerstände werden aus der E12-Reihe zu

$$R_{HPN} = [2.2 \ 4.7 \ 6.8 \ 8.2] \text{ k}\Omega \quad (5.17)$$

ausgewählt. Die Zeitkonstante lässt sich damit zu

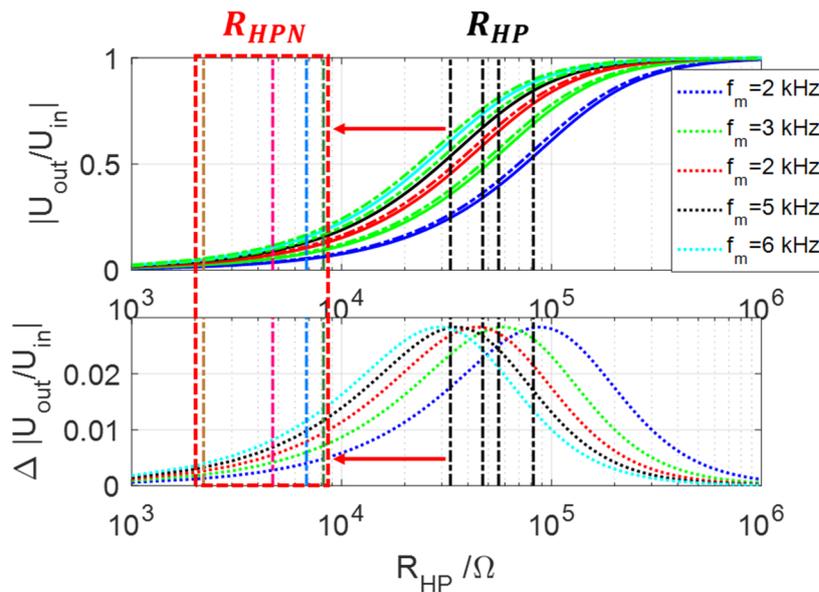
$$\tau_{DEN} = (R_{HPN} + R_{DES})C_{DE} \quad (5.18)$$

bestimmen. Ein direkter Vergleich der modifizierten Zeitbereiche  $\Delta\tau_{DEN}$  mit den ursprünglichen Zeitbereichen  $\Delta\tau_{DE}$  ist in Abbildung 5.25 dargestellt.

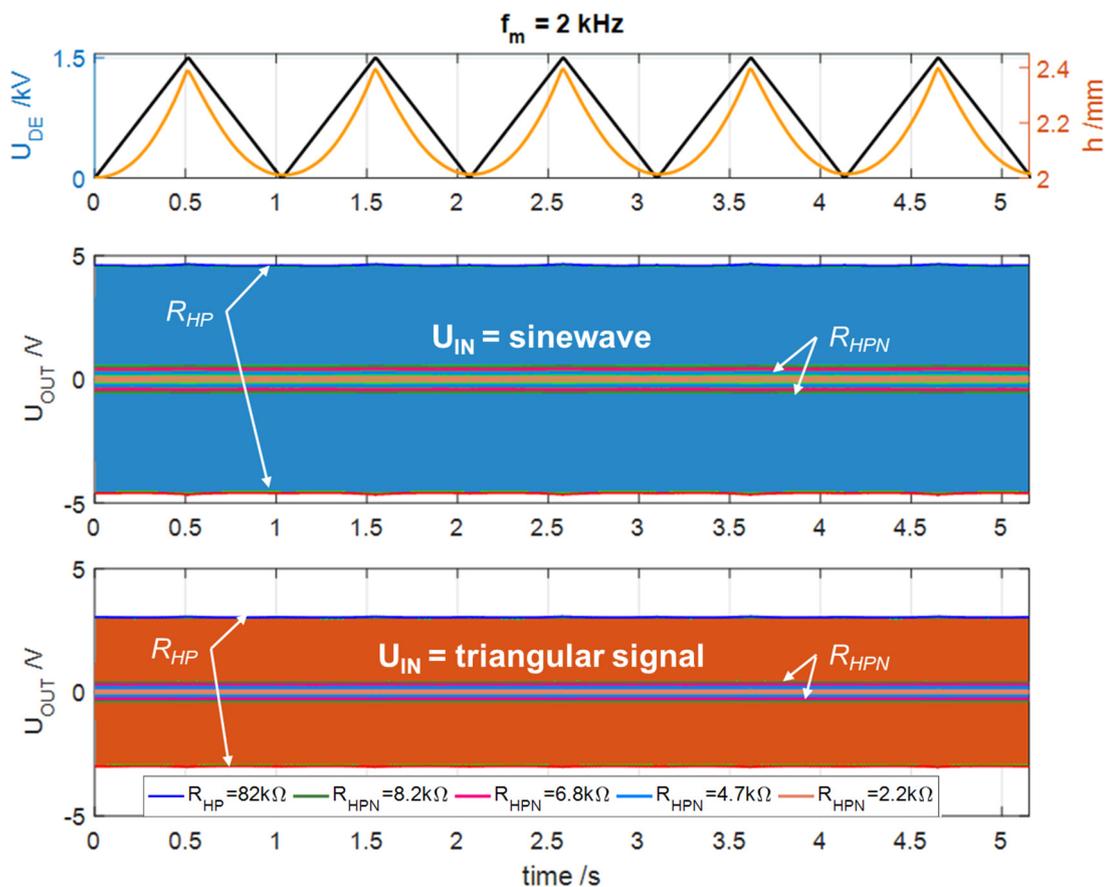


**Abbildung 5.25:** Verhältnis der Periodendauer der Messfrequenz zur Zeitkonstanten des DE-Systems mit angepassten Messwiderständen

Vergleicht man den modifizierten Zeitbereich mit den Periodendauern sollten sich in einem Frequenzbereich von  $f_m = 2 \text{ kHz}$  bis  $f_m = 6 \text{ kHz}$  keine Hysteresen in den Ausgangsspannungen bilden. Bei den bisherigen Schritten wird der Messhochpass immer an dem Punkt mit dem theoretisch höchsten Signalanstieg  $\Delta|U_{OUT}/U_{IN}|$  (siehe Formel (5.7)) von Grundzustand zum Punkt mit der höchsten Auslenkung des DE-Systems betrieben. Durch Betrachtung der Übertragungsfunktionen (siehe Abbildung 5.26) wird deutlich, dass die Änderung der Messwiderstände eine Verringerung der Ausgangsspannung und deren Signalanstiegs bewirkt. Die Auswirkungen der Modifikation der Messwiderstände von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$  werden mit derselben Messprozedur wie in den vorangegangenen Schritten untersucht (siehe Abbildung 5.27). Ab diesem Schritt wird aufgrund der Ergebnisse des vorangegangenen Schrittes auf eine Messung mit rechteckförmiger Eingangsspannung verzichtet.



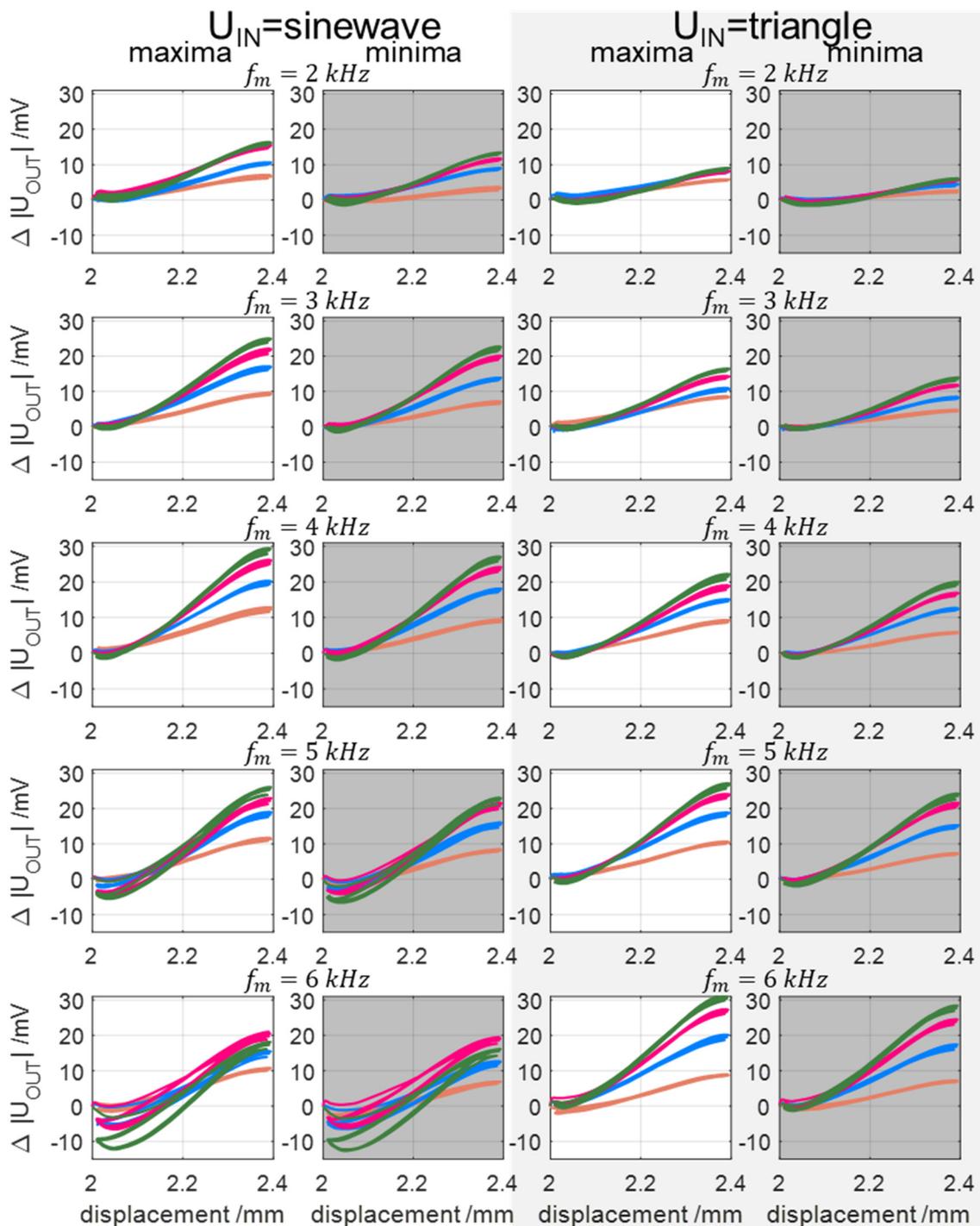
**Abbildung 5.26:** Übertragungsfunktion der Messschaltung in Bezug zu den Modifizierten Widerstandswerten  $R_{HPN}$



**Abbildung 5.27:** Vergleich der ‚Self-Sensing‘-Spannung von  $R_{HP}$  und  $R_{HPN}$  bei  $f_m = 2$  kHz

Die Messungen zeigen, dass die Veränderung von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$  den Signalpegel der Ausgangsspannung, wie erwartet deutlich, verringert. Die Extrema der Ausgangsspannungen in Bezug zur Auslenkung des DE-Systems sind in Abbildung 5.28

dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass vor allem bei sinusförmiger Eingangsspannung eine deutliche Verringerung der Hysterese der Ausgangsspannung zu beobachten ist. Bei den Messfrequenzen von  $3\text{ kHz}$  und  $4\text{ kHz}$  ist keine Hysterese festzustellen. Bei der dreiecksförmigen Eingangsspannung sind bezüglich der Hysterese keine offensichtlichen Änderungen zu bemerken. Eine Bewertung der Ausbildung der Hysterese der Ausgangsspannungen ist in Tabelle 5.3 gegeben.

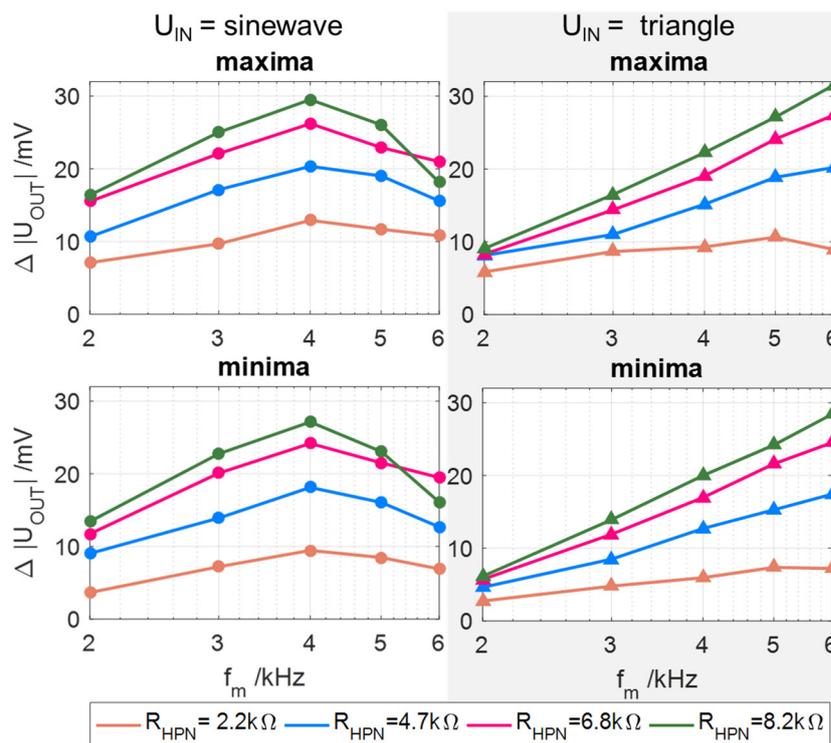


**Abbildung 5.28:** Extrema der ‚Self-Sensing‘-Spannung in Bezug zum generierten Hub nach Modifikation von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$

**Tabelle 5.3: Ausbildung von Hysteresen in der Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Auslenkung des DE-Systems nach Modifikation von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$**

$f_m$ /kHz	$U_{IN} = \text{Sinus}$				$U_{IN} = \text{Dreieck}$			
	$R_{HPN}/k\Omega$							
	2.2	4.7	6.8	8.2	2.2	4.7	6.8	8.2
2	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering
3	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
4	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
5	gering	gering	gering	gering	keine	keine	keine	keine
6	stark	stark	stark	stark	gering	gering	gering	gering

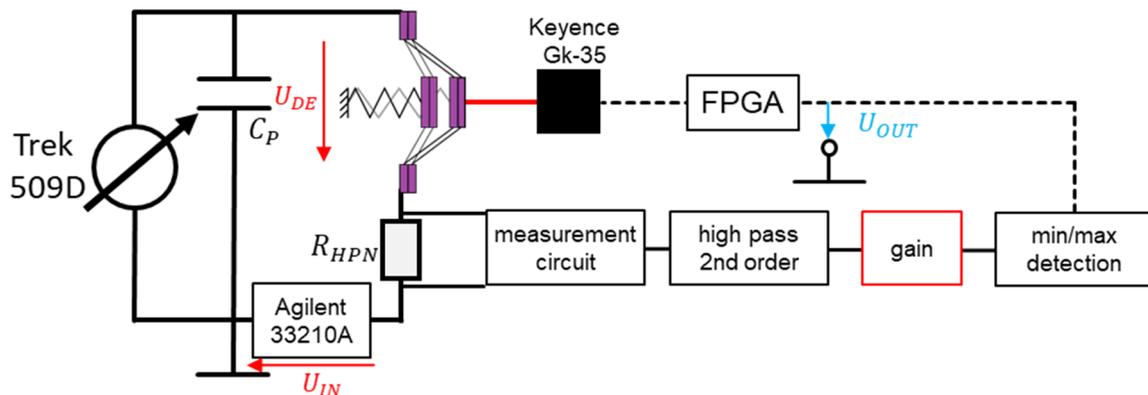
Es ist durch die Verringerung der Werte des Messwiderstandes von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$  gelungen bei sinusförmiger Eingangsspannung und bestimmten Messfrequenzen hysteresefreie Beziehungen zwischen Ausgangsspannungen und der erzeugten Auslenkung des DE-Systems zu erzeugen. Allerdings ist dadurch der Anstieg der Ausgangsspannungen  $\Delta|U_{OUT}|$  in Bezug zur Auslenkung deutlich verringert worden (siehe Abbildung 5.29). Im Vergleich zum vorangegangenen Schritt (siehe Abbildung 5.21) sind  $\Delta|U_{OUT}|$  abhängig von  $R_{HPN}$  und  $f_m$  nur noch ein Drittel bis ein Zehntel so groß.



**Abbildung 5.29: Anstieg der Ausgangsspannungen während der Aktuierung nach Modifikation von  $R_{HP}$  zu  $R_{HPN}$**

### 5.6.4 Verstärkung ‚Self-Sensing‘-Signale

Die Ergebnisse des vorangegangenen Schrittes haben gezeigt, dass die Änderung der Messwiderstände eine Verringerung des Signalanstiegs  $\Delta|U_{OUT}|$  bewirken. Dieser geringere Signalanstieg kann durch eine Verstärkerschaltung kompensiert werden. Deswegen werden in diesem Schritt die der Messaufbau mit einer Verstärkerschaltung versehen (siehe Abbildung 5.32) und die Messungen aus den vorherigen Schritten wiederholt.

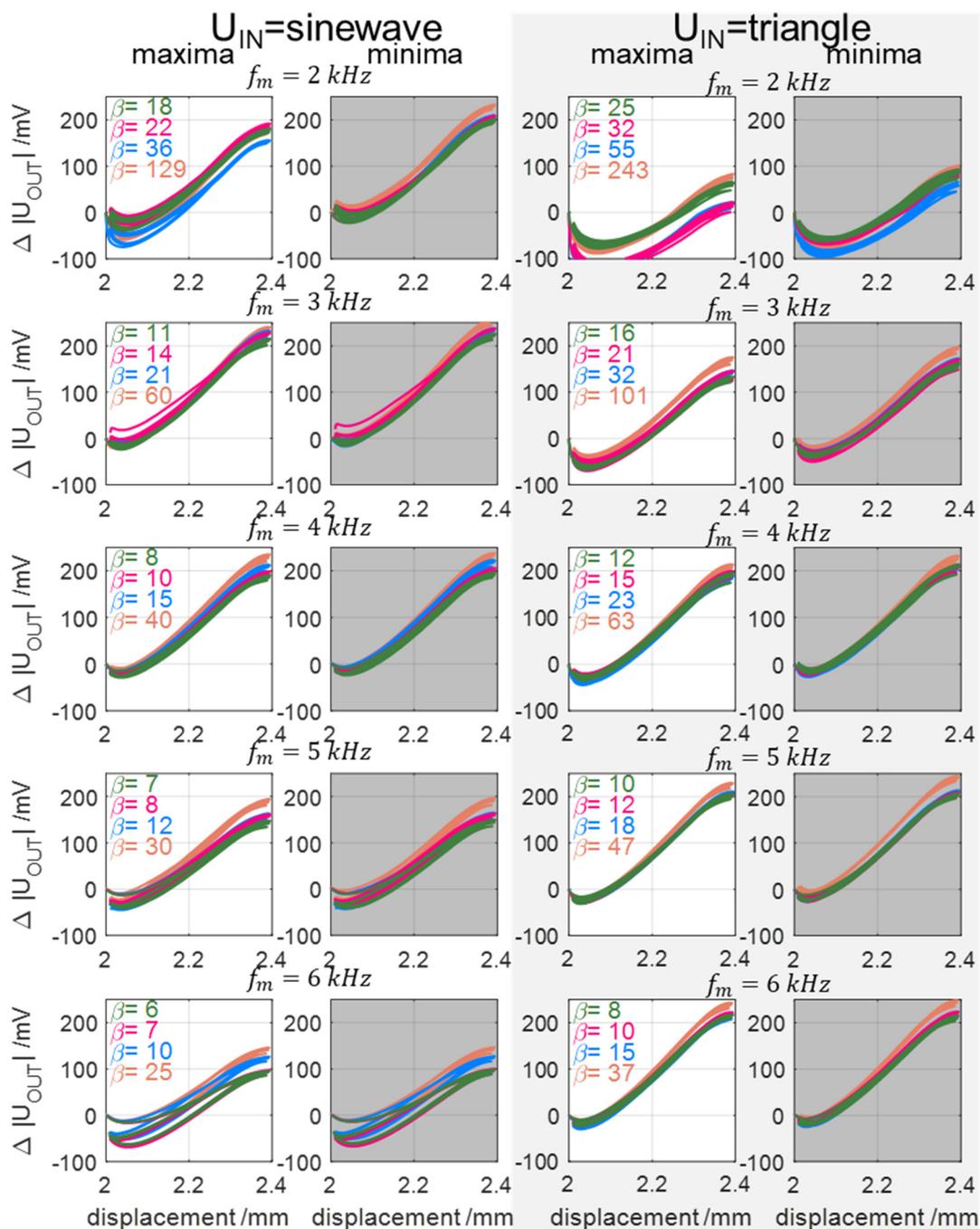


**Abbildung 5.30:** Modifikation des Messaufbaus durch Änderung der Messwiderstände  $R_{HPN}$  und hinzufügen einer Verstärkerschaltung

Die Extrema der Ausgangsspannung werden vor der Messung durch Einstellen eines Potentiometers auf  $U_{OUT} = \pm 9 V$  verstärkt. Daraus ergeben sich für jede Konfiguration des Widerstandes und der Messfrequenz einen eigenen Verstärkungsfaktor  $\beta$ . Der Verstärkungsfaktor ergibt sich somit zu

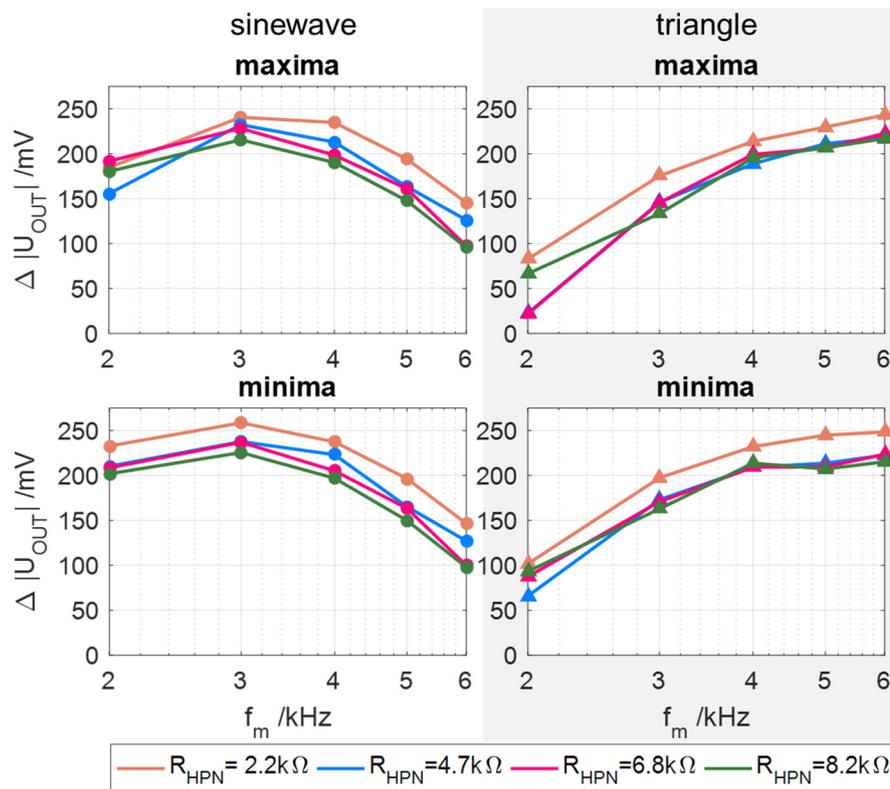
$$\beta = \frac{9V}{|U_{OUT}(t = 0)|} \quad (5.19)$$

Abbildung 5.31 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Hierbei nehmen die Anstiege der Ausgangssignale, wie erwartet, zu. Vor der Verstärkung waren bei  $R_{HPN} = 8.2 k\Omega$  die höchsten Spannungsanstiege zu verzeichnen. Nach der Verstärkung sind die Anstiege bei  $R_{HPN} = 2.2 k\Omega$  wegen des größeren Verstärkungsfaktors am größten (siehe Abbildung 5.32). Im Vergleich zu Abbildung 5.21 haben sich die Anstiege der Ausgangsspannungen erhöht. Bei dreiecksförmiger Eingangsspannung haben sie sich im Frequenzbereich von  $4 kHz$  bis  $6 kHz$  verdoppelt. Die Spannungsanstiege bei sinusförmiger Eingangsspannung sind im selben Frequenzbereich wegen der Bildung von Hysteresen geringer. Bei der Ausbildung der Hysteresen sind keine wesentlichen Veränderungen zu erkennen.



**Abbildung 5.31:** Extrema der Ausgangsspannung in Bezug zum generierten Hub nach Verstärkung um  $\beta$

Aus diesen Messergebnissen ergibt sich in Hinsicht auf Signalanstieg und Hysteresefreiheit zwei Kombinationen aus Signalform der Eingangsspannung, Messfrequenz, Messwiderstand und Verstärkungsfaktor die näher auf ihre ‚Self-Sensing‘-Eigenschaften untersucht werden sollten. Diese Kombinationen sind in Tabelle 5.4 aufgelistet.



**Abbildung 5.32:** Anstieg der Ausgangsspannungen während der Aktuierung mit Verstärkung

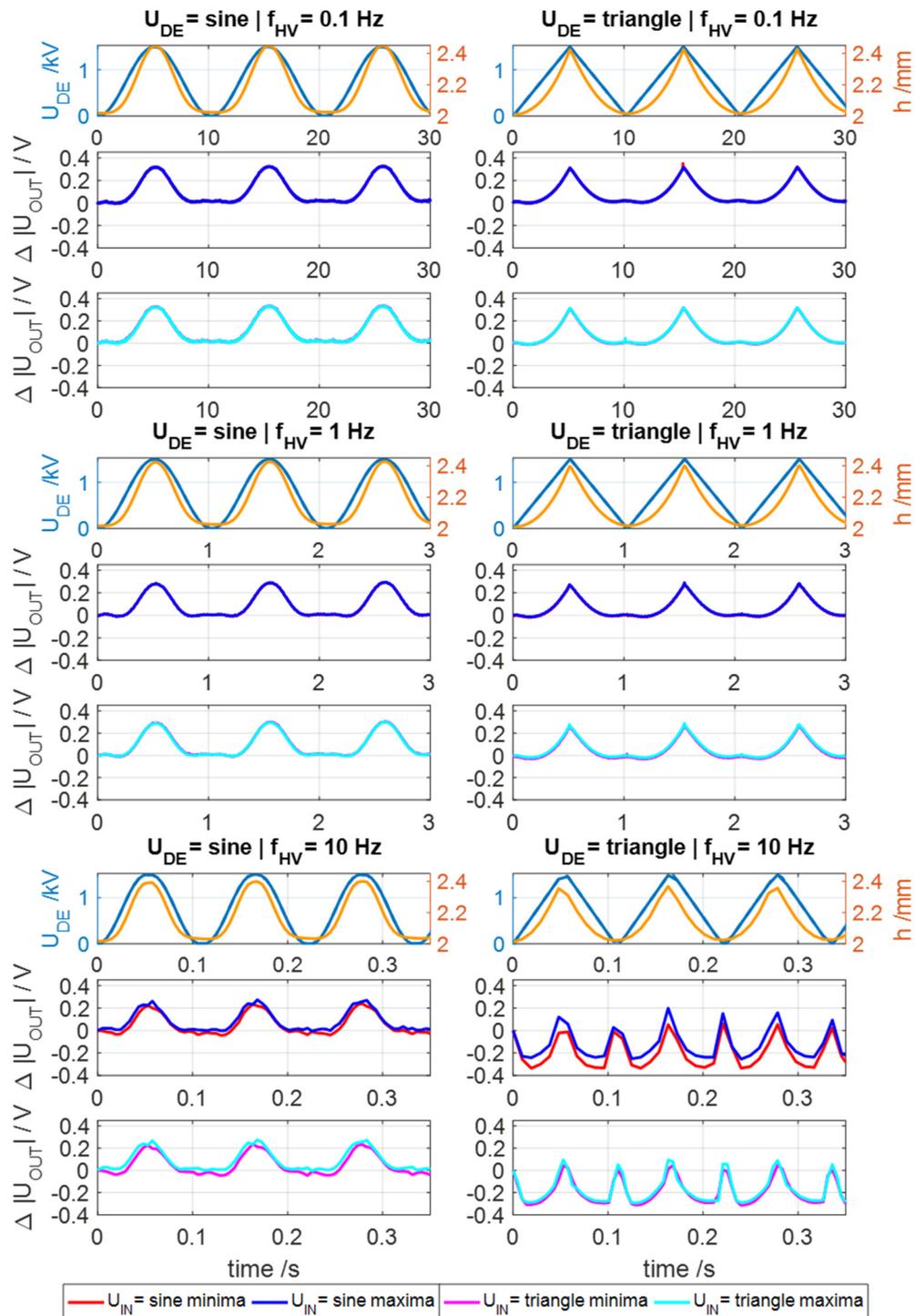
**Tabelle 5.4:** Kombinationen der geeignetsten Eingangssignale

	Sinus	Dreieck
$U_{IN}$	$\pm 10 \text{ V}$	$\pm 10 \text{ V}$
$f_m$	4 kHz	5 kHz
$R_{HPN}$	2.2 kΩ	2.2 kΩ
$\beta$	40	47

### 5.6.5 Untersuchung Aktuierungsspannung

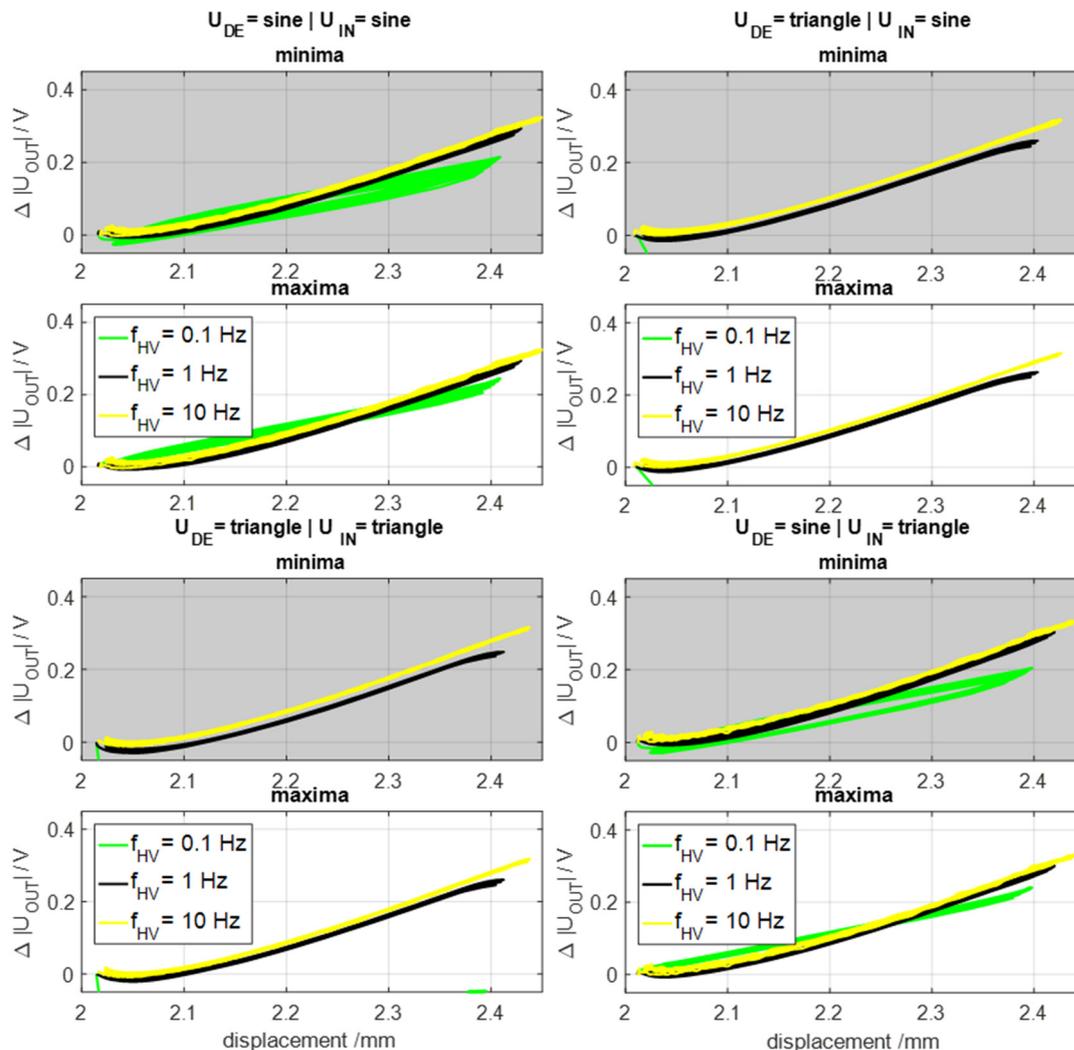
Während der Untersuchung der Funktionsweise der Messschaltung wird bisher nur eine Aktuierungsfrequenz  $f_{HV} = 1 \text{ Hz}$  für eine dreieckige Aktuierungsspannung des DE-Systems untersucht. Um das System genauer zu untersuchen, werden in diesem Schritt die ‚Self-Sensing‘-Konfigurationen aus Tabelle 5.4 bei Aktuierungsfrequenzen von 0.1 Hz, 1 Hz und 10 Hz getestet. Zusätzlich werden die Messungen für eine dreiecksförmige und eine sinusförmige Aktuierungsspannung  $U_{DE}$  durchgeführt, um deren Einfluss speziell bei höheren Aktuierungsfrequenzen zu beobachten. Abbildung 5.33 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen. Bei den Aktuierungsfrequenzen von 0.1 Hz und 1 Hz folgen die Extrema beider ‚Self-Sensing‘-Spannungen dem erzeugten Hub wie es nach den vorangegangenen

Schritten zu erwarten war. Bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  sind bei der dreiecksförmigen Aktuierungsspannung eine Absenkung der ‚Self-Sensing‘-Spannungen zu beobachten. Zusätzlich treten Spannungssprünge an den Umkehrpunkten der dreieckigen Aktuierungsspannung auf.



**Abbildung 5.33:** Abhängigkeit der ‚Self-Sensing‘-Spannungen von der Aktuierungsfrequenz und Form der Aktuierungsspannung

Um dieses Phänomen näher zu analysieren, werden die Extrema der ‚Self-Sensing‘-Spannungen in Anhängigkeit der Auslenkung betrachtet (siehe Abbildung 5.34). Diese Ergebnisse zeigen, dass das Verhalten der ‚Self-Sensing‘-Spannungen bei dreieckiger Aktuierungsspannung bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  einen negativen Offset dominiert wird. Daraus lässt sich bei dieser Aktuierungsfrequenz keinen eindeutigen Zusammenhang bilden, da mehrere Auslenkungspunkte den gleichen ‚Self-Sensing‘-Spannungswert aufweisen.

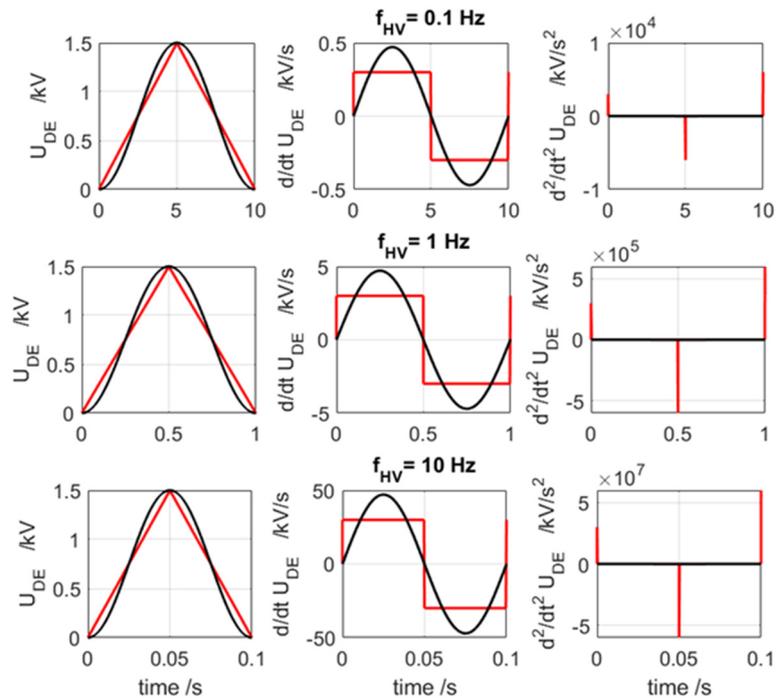


**Abbildung 5.34:** Extrema der ‚Self-Sensing‘-Spannungen in Bezug zur Auslenkung bei verschiedenen Auslenkungsfrequenzen und Formen

Die Ursache dieses Verhaltens liegt in der Hochpasscharakteristik des Systems. Zur Erklärung wird die Differentialgleichung des separaten Hochpasses zweiter Ordnung aus Formel (5.11) zu

$$U_{OUT} = (R_{SHP}C_{SHP})^2 \left( \frac{d^2}{dt^2} U_{DE} - \frac{d^2}{dt^2} U_{OUT} \right) - 3R_{SHP}C_{SHP} \frac{d}{dt} U_{OUT} \quad (5.20)$$

bestimmt und näher betrachtet. Aus dieser Gleichung wird ersichtlich, dass die zweite zeitliche Ableitung einer dreiecksförmigen Aktuierungsspannung  $\frac{d^2}{dt^2}U_{DE}$  Spitzen an den Umkehrpunkten erzeugt (siehe Abbildung 5.35), deren Werte bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  groß genug sind, um die separaten Hochpässe zu überwinden und das ‚Self-Sensing‘ Signal zu beeinflussen. Bei den beiden anderen Aktuierungsfrequenzen passieren diese Spitzen die Hochpässe nicht.



**Abbildung 5.35:** Schematische Darstellung der Formen der Aktuierungsspannung und deren zeitliche Ableitungen

Betrachtet man die Beziehungen zwischen  $U_{OUT}$  und der Auslenkung bei sinusförmiger Aktuierung, wird deutlich, dass bei  $10\text{ Hz}$  eine Hysterese auftritt. Dies lässt darauf schließen, dass Anteile der Aktuierungsspannung bei dieser Aktuierungsfrequenz den separaten Hochpass überwinden und das ‚Self-Sensing‘-Signal beeinflussen.

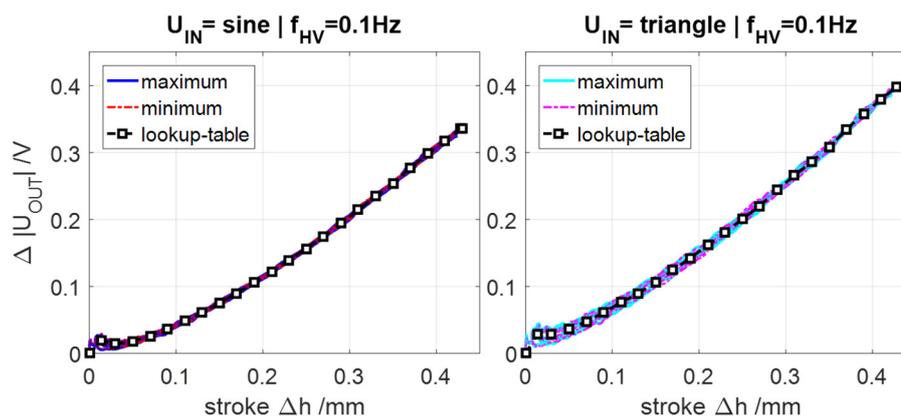
Tabelle 5.5 gibt einen Überblick über die Ausbildung von Hysterese in Bezug zur Aktuierungsfrequenz und Form.

**Tabelle 5.5:** Bildung von Hysterese in Bezug zu Aktuierungsformen und Frequenzen

$f_{HV}$ /Hz	$U_{DE} = \text{Sinus}$				$U_{DE} = \text{Sinus}$			
	$U_{IN} = \text{Sinus}$		$U_{IN} = \text{Dreieck}$		$U_{IN} = \text{Sinus}$		$U_{IN} = \text{Dreieck}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
<b>0.1</b>	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
<b>1</b>	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine
<b>10</b>	stark	stark	stark	stark	stark	stark	stark	stark

## 5.7 Validierung Gesamtsystem

Aus dem vorangegangenen Abschnitt ist hervorgegangen, dass eine dreiecksförmige Aktuierungsspannung durch deren Einfluss auf das ‚Self-Sensing‘-Signal zur Rekonstruktion der Position des DE-Systems ungeeignet ist. Deswegen werden zur Validierung der ‚Self-Sensing‘-Fähigkeiten dieser Methode ausschließlich sinusförmige Aktuierungsspannung bei verschiedenen Aktuierungsfrequenzen verwendet. Die beiden Konfigurationen der Messschaltung sowie der Eingangsspannungen aus Tabelle 5.4 werden weiterhin verwendet. Zur Rekonstruktion der Auslenkung werden aufgrund des nichtlinearen Verhaltens Lookup-Tabellen verwendet. Es wird für jede Form der Eingangsspannung eine Lookup-Tabelle aus dem Zusammenhang von Auslenkung und ‚Self-Sensing‘-Spannung bei  $f_{HV} = 0.1 \text{ Hz}$  erstellt. Hierbei wird der Messbereich in jeweils 22 Abschnitte mit konstanten Auslenkungsbereichen unterteilt (siehe Abbildung 5.36). Zwischen den Stützpunkten wird linear interpoliert.



**Abbildung 5.36:** Lookup-Tabellen zur Rekonstruktion der Auslenkung des Systems

Zur Validierung des ‚Self-Sensing‘-Verhaltens wird das System auf zwei unterschiedliche Arten aktuieret. Bei einer sinusförmigen Aktuierung wird das DE-System wie in den vorangegangenen Abschnitten getestet. Dies dient der Untersuchung der ‚Self-Sensing‘-Fähigkeiten des DE-Systems für den Einsatz als Pumpe.

Zusätzlich wird in diesem Abschnitt das Verhalten des DE-Systems bei trapezförmiger Aktuierung untersucht. Trapezförmig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die maximale und minimale Spannung  $U_{DE}$  am Aktor für eine bestimmte Zeit konstant gehalten wird. Dies dient der Untersuchung ‚Self-Sensing‘-Fähigkeiten des DE-System während einer Verwendung als Ventiltrieb. Der Anstieg der Aktuierungsspannung wird variiert. Bei beiden Aktuierungsarten werden Messungen mit Anstiegsfrequenzen  $f_{HV}$  von  $0.1 \text{ Hz}$ ,  $1 \text{ Hz}$  und  $10 \text{ Hz}$  durchgeführt und deren Ergebnisse analysiert. Die Messungen werden mit

der gleichen Konfiguration des Teststandes wie in Abbildung 5.30 durchgeführt.

Neben der Rekonstruktion der Auslenkung des DE-Systems aus den ‚Self-Sensing‘-Spannungen  $U_{IN}$  werden zusätzlich die Abweichungen  $s$  von der gemessenen Referenzauslenkung  $h_0$  durch

$$s = \frac{h_0 - h(U_{IN})}{\max(h_0)} \quad (5.21)$$

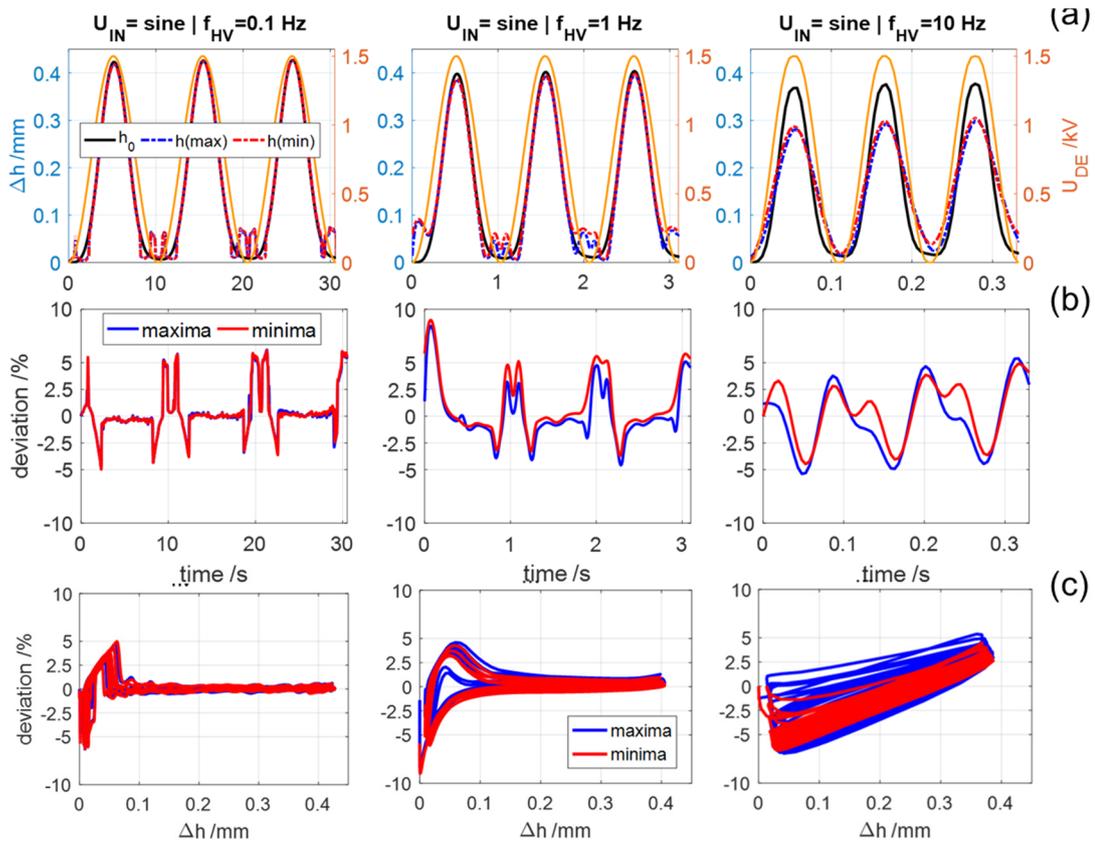
bestimmt, wobei  $h(U_{IN})$  die rekonstruierten Auslenkungswerte beschreibt.

## 5.7.1 Sinusförmige Aktuierung

Für diese Art der Aktuierung werden die Messungen für sinusförmige und dreieckige Eingangsspannungen, wie in Kapitel 5.5 beschrieben, durchgeführt.

### 5.7.1.1 Sinusförmige Eingangsspannung

Abbildung 5.37 zeigt die aus den Maxima und Minima der ‚Self-Sensing‘-Spannung rekonstruierten Auslenkungswerte  $h(\max)$  und  $h(\min)$  bei den verschiedenen



**Abbildung 5.37:** Rekonstruktion der Auslenkung aus der sinusförmigen Eingangsspannung und Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung

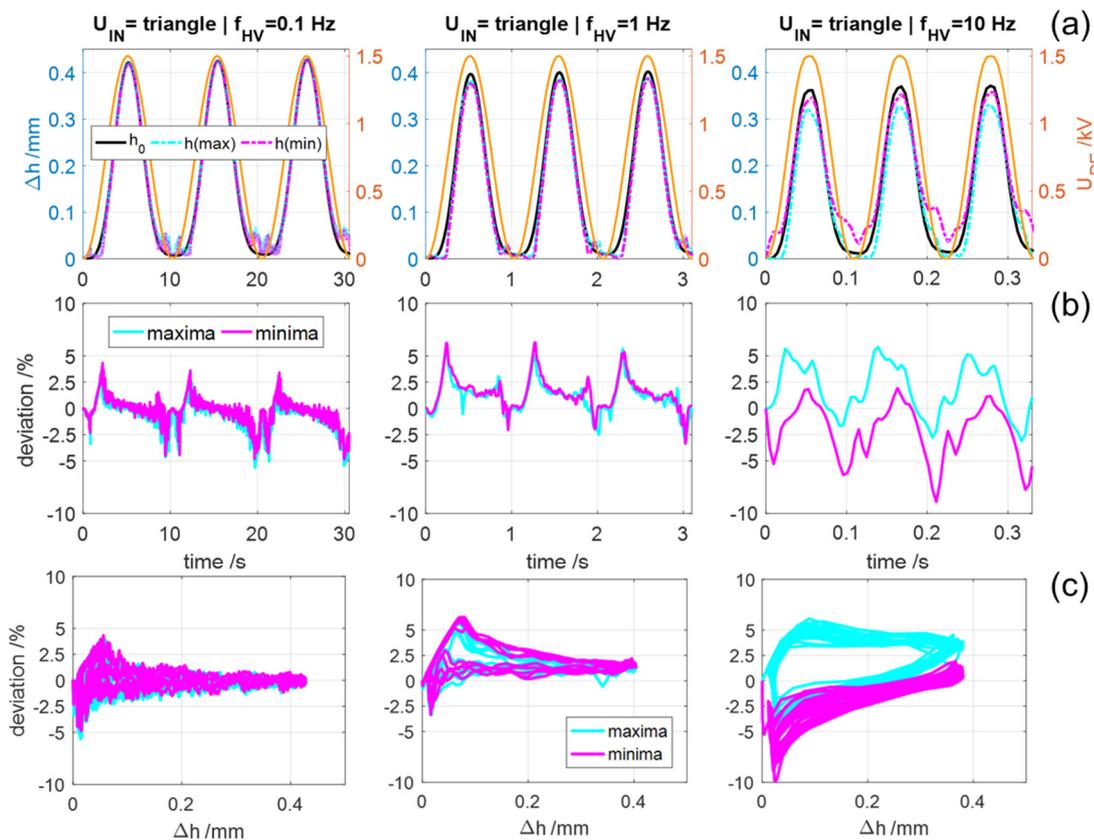
Aktuierungsfrequenzen. Hierbei wird ersichtlich, dass die rekonstruierten Werte der Auslenkung  $h(max)$  und  $h(min)$  bei  $f_{HV}$  von  $0.1\text{ Hz}$  und  $1\text{ Hz}$  bei höheren Auslenkungen eine höhere Übereinstimmung mit der Referenzauslenkung  $h_0$  aufweisen.

Bei Auslenkungen im Bereich zwischen  $0\text{ mm}$  und  $0.05\text{ mm}$  sind Abweichungen von  $-9\%$  zu  $5\%$  von dem Referenzwert zu erkennen. Dies lässt sich durch den flachen Verlauf des ‚Self-Sensing‘-Signals in diesem Bereich (siehe Abbildung 5.36) erklären. Im Bereich oberhalb von  $0.05\text{ mm}$  sind die Abweichungen im Bereich von  $\pm 1\%$ . Bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  die Abweichungen im gesamten Auslenkungsbereich wesentlich größer ausfallen. Diese Abweichungen liegen im Bereich von  $-7\%$  bis  $4.5\%$  bei Minima und bei Maxima bis  $-8\%$  bis  $5\%$  zu verzeichnen.

Dies ist auf das hysteretische Verhältnis zwischen ‚Self-Sensing‘-Signal und Auslenkung bei dieser Auslenkungsfrequenz zurückzuführen.

### 5.7.1.2 Dreiecksförmige Eingangsspannung

Abbildung 5.38 zeigt die Ergebnisse der Messungen bei dreiecksförmiger Eingangsspannung. Bei  $f_{HV}$  von  $0.1\text{ Hz}$  und  $1\text{ Hz}$  sind die Verläufe der rekonstruierten



**Abbildung 5.38:** Rekonstruktion der Auslenkung aus der dreiecksförmigen Eingangsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung

---

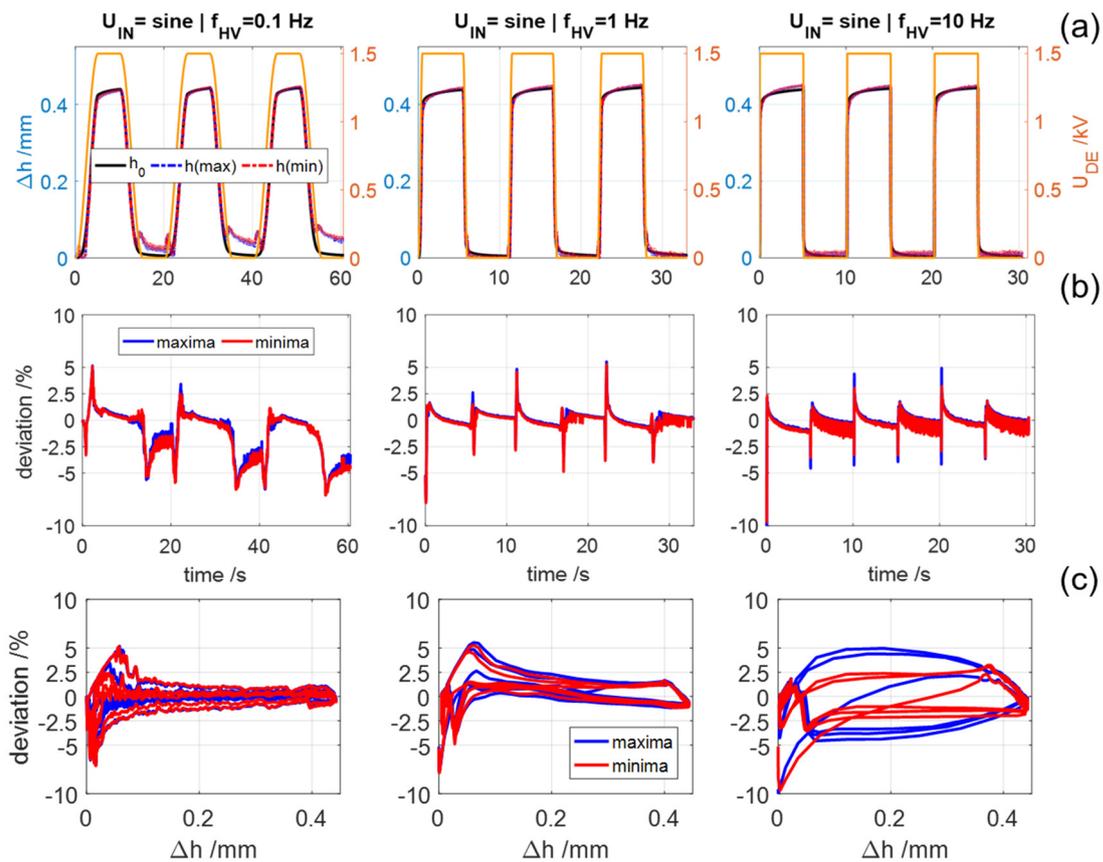
Position sehr ähnlich zu den Verläufen bei sinusförmiger Eingangsspannung. Hierbei sind die Abweichungen von der Referenz im Bereich von  $0\text{ mm}$  bis  $0.05\text{ mm}$  geringer. Bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  ist zu beobachten, dass Minima und Maxima unterschiedliche Verläufe der Auslenkungen ergeben. Maxima erreichen geringere Abweichungen von der Referenz im Bereich von  $0\text{ mm}$  bis  $0.05\text{ mm}$ . Minima erreichen oberhalb von  $0.2\text{ mm}$  eine höhere Übereinstimmung. Im Bereich zwischen  $0\text{ mm}$  und  $0.05\text{ mm}$  sind Abweichungen bei Minima bis zu  $-10\%$  und bei Maxima bis  $6\%$  zu verzeichnen.

## 5.7.2 Trapezförmige Aktuierung

Nach der Analyse einer sinusförmigen Aktuierung wird in diesem Abschnitt eine trapezförmige Aktuierung untersucht. Hierbei wird die Aktuierungsspannung angehoben und für  $5\text{ s}$  konstant gehalten, danach wird  $U_{DE}$  zurück auf  $0\text{ V}$  gesenkt und für  $5\text{ s}$  gehalten. Der Anstieg und Absenkung der Aktuierungsspannung wird sinusförmig und bei Aktuierungsfrequenzen von  $0.1\text{ Hz}$ ,  $1\text{ Hz}$  und  $10\text{ Hz}$  ausgeführt.

### 5.7.2.1 Sinusförmige Eingangsspannung

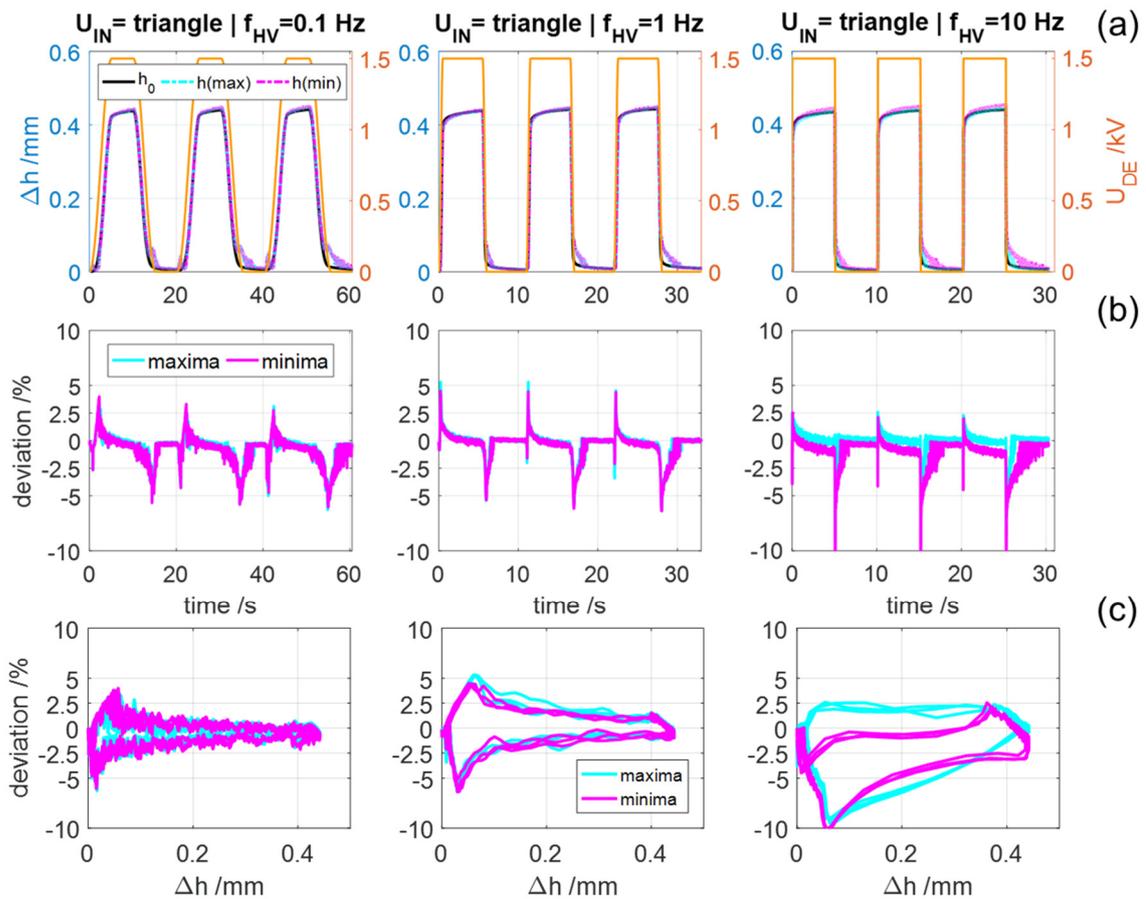
Abbildung 5.39 zeigt die Rekonstruktion der Auslenkungssignale bei sinusförmiger Eingangsspannung. Unabhängig von den Aktuierungsfrequenzen fällt auf, dass die Abweichungen der Änderung der Aktuierungsspannung mit zunehmender Frequenz ansteigen. Dieses Verhalten ist das gleiche wie bei sinusförmiger Aktuierung. Es ist allerdings auch zu beobachten, dass in Phasen konstanter Aktuierungsspannung die Übereinstimmungen mit der Referenzposition für beide Extrema deutlich größer sind und mit der Dauer die Abweichungen von der Referenz abnehmen.



**Abbildung 5.39:** Rekonstruktion der Auslenkung aus der sinusförmigen Eingangsspannung und trapezförmiger Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung

### 5.7.2.2 Dreiecksförmige Eingangsspannung

Abbildung 5.40 zeigt die rekonstruierten Positionssignale bei dreiecksförmiger Eingangsspannung. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse eine ähnliche Übereinstimmung der Positionen haben wie bei sinusförmiger Eingangsspannung. Es ist allerdings eine höhere Abweichung bei der Rückkehr auf die Ausgangsposition um  $0$  mm zu verzeichnen. Auch bei dieser Form der Eingangsspannung ist die Übereinstimmung der Positionssignale mit den Referenzen am größten.



**Abbildung 5.40:** Rekonstruktion der Auslenkung aus der dreiecksförmigen Eingangsspannung und trapezförmiger Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung

## 5.8 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Möglichkeit untersucht, die Auslenkung des DE-Systems durch eine indirekte Kapazitätsbestimmung des DE zu detektieren. Hierbei wurde die Amplitudenänderung einer hochfrequenten alternierenden Niederspannung bei einer Kapazitätsänderung durch Positionsänderung des DE-Systems verwendet. Diese Niederspannung überlagert die Aktuierungsspannung und wurde durch einen Hochpass separiert. Hierbei wurden die Formen und Frequenzen der Niederspannung variiert und deren Amplitude durch eine analoge Hochpassschaltung detektiert. Zur Untersuchung dieser Methode wurde ein doppelagiges DE-Feder-System aktuiert und die Änderungen der Ausgangsspannung der Messschaltung beobachtet. Dabei wurde festgestellt, dass diesen Messhochpass Anteile der Aktuierungsspannung überwinden und zu einem Offset in der Ausgangsspannung führen. Aus diesem Grund wurde der Messschaltung ein RC-

Hochpass zweiter Ordnung nachgeschaltet, um den Einfluss der Aktuierungsspannung zu eliminieren. Durch diese Maßnahme wurde der Einfluss der Aktuierungsspannung eliminiert. Es wurde dabei auch festgestellt, dass bei den meisten Kombinationen aus Messfrequenz und Signalform zur Bildung von Hysteresen kommt. Bei einem Vergleich der Zeitkonstanten des DE-Systems mit der Periodendauer der Messfrequenzen wurde festgestellt, dass oberhalb von  $5\text{ kHz}$  kein vollständiger Ladevorgang der DE möglich ist und es deswegen zur Bildung von Hysteresen kommt. Darauf aufbauend wurde die Messschaltung modifiziert, um die Zeitkonstante des DE-Systems zu verringern. Durch diese Modifikation konnte die Bildung einer Hysterese in bei den meisten Frequenzen unterbunden werden. Daraus sind zwei Kombinationen der Eingangsspannung aus Messfrequenz und Form identifiziert worden, die einen hohen Signalanstieg und hysteresefrei sind. Hierbei wurde festgestellt, dass eine dreiecksförmige Aktuierungsspannung bei einer Aktuierungsfrequenz von  $10\text{ Hz}$  die Ausgangsspannung stark beeinflusst und dadurch zur Bestimmung der Position ungeeignet ist. Deswegen wurde zur Validierung Aktuierungsspannungen mit sinusförmigen Anstieg und Abnahme verwendet. Zunächst wurden Lookup-Tabellen erstellt, mit denen die Position aus den gemessenen ‚Self-Sensing‘-Spannungen generiert wurden. Damit wurden die Positionen des DE-Systems rekonstruiert und mit der Referenzmessung verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass Minima im oberen und Maxima im unteren Auslenkungsbereich die größeren Übereinstimmungen mit der Referenz aufweisen. Daraus ergibt sich, dass eine separate Betrachtung der Minima und Maxima der Ausgangsspannungen bei einer schwellenden Aktuierungsspannung und hohen Frequenzen sinnvoll ist.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass diese ‚Self-Sensing‘-Methode bei geringen Aktuierungsfrequenzen bei schwellender Aktuierung und bei Szenarien mit Phasen konstanter Aktuierungsspannung die größten Übereinstimmungen mit der Referenzposition aufweisen. Daraus wird deutlich, dass diese Methode zur Detektion der Stellung eines DE-Ventilantriebes und zur Überwachung von DE-Pumpensystemen unter diesen Bedingungen geeignet ist.

# Kapitel 6

## Entwicklung Ermüdungsprüfstand

---

### 6.1 Motivation

Dank ihrer vielen Vorteile wie Energieeffizienz, geringes Gewicht und der Möglichkeit als Aktor und Sensor eingesetzt zu werden, sind DE interessant für industrielle Anwendungen. Im Speziellen wurde in Kapitel 2 gezeigt, dass DE sich als Ventilantriebe eignen und dabei zusätzliche Vorteile im Vergleich zu etablierten Technologien wie z. B. ‚Self-Sensing‘ (Kapitel 5) aufweisen. Allerdings wurde bisher die Lebensdauer dieser DE-Systeme als Aktoren und Sensoren nicht weiter betrachtet. Um in Konkurrenz zu etablierten Technologien treten zu können, ist es notwendig, dass DE-Systeme im Betrieb eine vergleichbare Lebensdauer aufweisen. Darum muss das Verhalten von DE-Systemen während der Lebensspanne, in der Regel Millionen Zyklen untersucht werden, um daraus Erkenntnisse über Ermüdung und deren Ursachen zu gewinnen. Mit diesen Erkenntnissen ist es möglich DE-Systeme weiterzuentwickeln, ihre Lebensdauer zu verlängern und letztendlich konkurrenzfähige DE-Systeme zu erhalten.

Zu diesem Zeitpunkt ist nur eine Arbeit zur Ermüdung bzw. Lebensdauer von DE als Aktoren veröffentlicht worden. Matysek et al. [150] haben die Ermüdung von Acryl-Stapelaktoren unter elektrischer Last untersucht. Dafür wurde ein Testaufbau entwickelt, der parallel sechzehn DE dauerhaft mit einer maximalen elektrischen Feldstärke von  $E_{DE} = 20 \text{ V}/\mu\text{m}$  bei einer Aktuierungsfrequenz von  $f_{HV} = 200 \text{ Hz}$  betreiben kann und dabei den Hub und die Stromaufnahme der Aktoren vermisst. Die Lebensdaueruntersuchungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt und anfangs erzeugten die Aktoren

durchschnittlich einen Hub von  $\Delta h = 10 \mu\text{m}$  bei einer Stromaufnahme von  $i = 3 \text{ mA}$ . Es wurde festgestellt, dass der Hub und die Stromaufnahme langsam abnehmen und nach 144 Millionen Zyklen einbrechen. Dies ist auf die Kontaktierung der einzelnen Lagen der Stapelaktoren zurückzuführen, deren Widerstand mit zunehmender Zyklenzahl bis zum Verlust des elektrischen Kontaktes ansteigt.

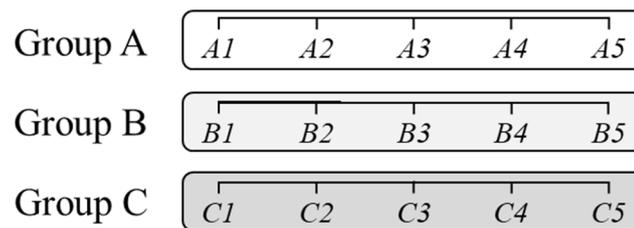
Forscher des EPFL haben einen Ermüdungsprüfstand (NERD) [151,152] entwickelt, der verschiedene DE-Membranaktoren (planare, Normalenaktoren) elektrisch ermüden kann. Dieser Prüfstand ist in der Lage die DE bei Frequenzen von 10 Hz bis 200 Hz und einer Spannung bis 2 kV zu aktivieren. Hierbei wird die Ausdehnung der Elektrodenflächen durch eine Kamera überwacht und deren Widerstand mit einer Vierpunktmessung durch ein Multimeter gemessen. Dieser Prüfstand kann verschiedene Aktorgeometrien in unterschiedlichen Prüfscenarien ermüden und die Veränderungen in deren Charakteristik detektieren. Es wurden damit Ermüdungsprüfungen durchgeführt und festgestellt, dass bei mehreren Millionen Ermüdungszyklen abhängig von den Elektrodenmaterialien ein Anstieg des Widerstandes von bis zu 340 % zu verzeichnen sind. Die Veränderung der Dehnung bei 0 V um bis zu 5.5 % zunimmt. Bei diesen Tests wurden elektrische Feldstärken bis  $100 \text{ V}/\mu\text{m}$  und Ausdehnungen bis 12 % bei angelegter Hochspannung erzielt.

## 6.2 Konzeptfindung

*Dieser Abschnitt beschreibt die Entwicklung eines Konzeptes zu Ermüdungsprüfung. Insbesondere werden hierbei die Gedankengänge zur sinnvollen Unterteilung der einzelnen Schritte und Komponenten der Ermüdungsprüfung dargestellt.*

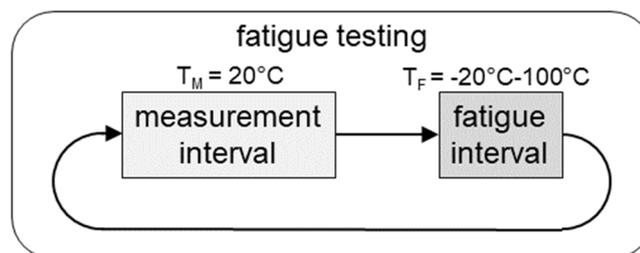
Um aussagekräftige Lebensdaueruntersuchungen von DE-Membran-Aktoren durchzuführen, werden reproduzierbare, mechanische, elektrische und thermische Ermüdungsbedingungen benötigt. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein Prüfstand entwickelt, der wiederholbar und systematisch DE unter mechanischer, elektrischer oder elektromechanischer Anregung bzw. Last ermüdet. Dieser Prüfstand soll zusätzlich in der Lage sein verschiedene Umgebungsbedingungen zu simulieren und Ermüdungstests bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeitsgraden durchzuführen. Der Temperaturbereich der Ermüdung soll  $\Delta T_F = -20^\circ\text{C} - +100^\circ\text{C}$  und der Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit  $\Delta\varphi = 0-98 \%$  betragen.

Statistisch belastbare Aussagen über das Ermüdungsverhalten von DE können nur dann getroffen werden, wenn mehrere DE zur gleichen Zeit unter identischen Bedingungen ermüdet werden. Aus diesem Grund werden die zu testenden DE in Gruppen von je fünf zusammengefasst. Um die Ermüdungstests möglichst effektiv zu gestalten, werden während eines Tests mehrere Gruppen gleichzeitig bei unterschiedlichen Ermüdungsbedingungen getestet. Für diesen Ermüdungsprüfstand wird wie in Abbildung 6.1 dargestellt eine Anzahl von drei Gruppen ausgewählt. Dies ermöglicht eine Variation der Ermüdungsbedingungen und begrenzt den Aufwand bei der Umsetzung.



**Abbildung 6.1:** Gruppierung der DE zur Variation der Ermüdungsparameter

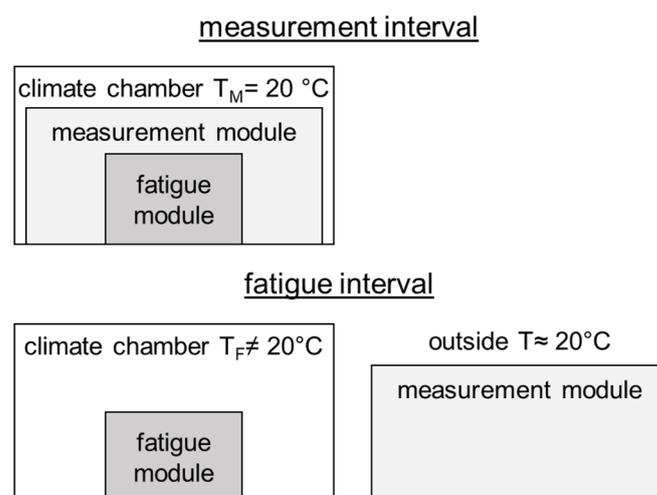
Die Anzahl der parallel zu testenden DE erschwert eine permanente Messdatenerfassung aller relevanten Messgrößen. Hierbei würden insbesondere die Messung von Reaktionskraft und Hub durch die benötigten Sensoren einen erheblichen technischen und finanziellen Mehraufwand bei der Planung und Umsetzung des Ermüdungsprüfstandes bedeuten. Deshalb ist es sinnvoll die Ermüdungsprüfung in Intervalle zur Vermessung und zur Ermüdung der DE zu unterteilen. Hierbei werden Messintervalle und Ermüdungsintervalle unterschieden, die sich im Verlauf des Ermüdungstests ständig abwechseln (vgl. Abbildung 6.2) und die Messintervalle das Fortschreiten der Ermüdung abhängig von der Länge und Anzahl der Ermüdungsintervalle detektieren. Im Messintervall werden die DE nacheinander für wenige Zyklen angeregt. Dabei werden alle zur Ermüdungserkennung benötigten Größen gemessen und zur späteren Auswertung dauerhaft gespeichert.



**Abbildung 6.2:** Unterteilung der Ermüdungsprüfung in Mess- und Ermüdungsintervall

Das Ermüdungsintervall dient der gleichzeitigen Ermüdung aller DE, indem sie für eine

größere Anzahl von Zyklen, in der Regel mehrere Tausend wiederholt angeregt werden. Währenddessen werden ausgesuchte Größen zur Versagenserkennung der DE überwacht, aber nur temporär gespeichert. Diese Aufteilung ermöglicht Vermessung und Ermüdung bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen. Die Messtemperatur  $T_M$  wird dabei auf  $20\text{ °C}$  und die relative Luftfeuchtigkeit auf  $\varphi_M = 30\%$  festgelegt. Dies erlaubt die Verwendung von Sensoren, die keine speziellen Temperatureigenschaften aufweisen. Die Ermüdungstemperatur  $T_F$  und die Luftfeuchtigkeit  $\varphi_F$  sind dabei innerhalb des Temperaturbereichs bzw. Luftfeuchtigkeitsbereich wählbar und sollen während der Ermüdungsintervalle konstant sein. Grundsätzlich ist es allerdings möglich auch Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofile abzufahren. Die Temperaturunterschiede zwischen Mess- und Ermüdungsintervall machen es notwendig den Ermüdungsprüfstand modular aufzubauen, damit die Sensoren zum Messen von Kraft und Hub keinen zu hohen oder zu niedrigen Temperaturen ausgesetzt werden. Aus diesem Grund wird der Ermüdungsprüfstand in ein Ermüdungsmodul und ein Messmodul aufgeteilt. Das Ermüdungsmodul ermüdet während des Ermüdungsintervall die DE und befindet sich während des gesamten Ermüdungstests in der Klimakammer. Deswegen muss das Ermüdungsmodul dem gesamten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich widerstehen können. Das Messmodul hingegen beinhaltet die zur Vermessung der DE benötigten Sensoren und soll sich nur während der Vermessung der DE in dem Klimaprüfschrank befinden. Vor dem Messintervall wird das Messmodul in die Klimakammer eingeführt und mit dem Ermüdungsmodul verbunden, um die DE zu vermessen. Nach dem Messintervall soll das Messmodul aus der Klimakammer herausgenommen und bis zur nächsten Messung



**Abbildung 6.3:** Aufteilung des Ermüdungsprüfstandes in Messmodul und Ermüdungsmodul

außerhalb gelagert werden. Die Unterteilung des Ermüdungsprüfstandes ist in Abbildung 6.3 schematisch dargestellt.

## 6.3 Anforderungen

Auf Basis des Anlagenkonzeptes und der Anforderungen zur Untersuchung der Einflussfaktoren lassen sich die in Tabelle 6.1, Tabelle 6.2 und dargestellten Anforderungslisten für Ermüdungs- und Messmodul ableiten, anhand derer die Detailplanung des Ermüdungsprüfstandes erfolgt.

*Tabelle 6.1: Allgemeine Anforderungsliste*

<b>Anforderungsliste Module</b>		
<b>Anforderung</b>	<b>Werte; Daten; Erklärungen</b>	
<b>allgemeine Anforderungen</b>		
Teilung des Ermüdungsprüfstandes in Ermüdungsmodul und Messmodul, beide Module miteinander koppelbar		
Dimensionen	Höhe	Maximum 750 mm
	Breite	Maximum 650 mm
	Tiefe	Maximum 720 mm
<b>klimatische Anforderungen Ermüdungsmodul</b>		
Temperaturbereich	-20°C..100°C	
Luftfeuchtigkeit	0%..98%	
<b>klimatische Anforderungen Messmodul</b>		
Temperaturbereich	10°C..30°C	
Luftfeuchtigkeit	0%..90%	

*Tabelle 6.2: Anforderungsliste des Messmoduls*

<b>Anforderungsliste Module</b>	
<b>Anforderung</b>	<b>Werte; Daten; Erklärungen</b>
<b>Messtechnik / Messmodul</b>	
Serielle Messung	Positionierung der Sensoren nacheinander an jedem DE
Kraftmessung	Serielle Messung der Reaktionskraft für jeden DE separat
Hubmessung	Serielle Messung des erzeugten Hubes für jeden DE separat
Hochspannungsmessung	Überwachung der Hochspannung durch Spannungsmonitor
Strommessung	Überwachung der Stromes durch separaten Strommonitor für jeden DE
Messung Kapazität und Widerstand DE	Messung des Widerstandes und der Kapazität während des Messintervalls

Tabelle 6.3: Anforderungsliste des Ermüdungsmoduls

Anforderungsliste Ermüdungsmodul	
Anforderung	Werte; Daten; Erklärungen
<b>mechanische Anforderungen</b>	
Anzahl DE / DE Gruppen	15 / 3
Mechanische Auslenkung/Hub	Maximum 5 mm
Vorauslenkung	Maximum 4 mm
Kraft DE / DE Gruppe	Minimum 5 N / 25 N
Kraft aller DE maximal	Minimum 60 N
Auslenkungsfrequenz	Maximum 10 Hz
Anzahl Antriebe	Möglichst geringe Anzahl von Antrieben zur mechanischen Ermüdung
<b>elektrische Anforderungen</b>	
Hochspannung	Maximum +3000 V / keine negativen Spannungen
El. Strom DE / Gruppe	Minimum 1 mA / 5 mA
Anregungsfrequenz	Maximum 1 Hz
Versuchskontinuität im Fehlerfall	Jeder DE separat bei Versagen von Spannungsquelle trennbar
Sicherheit	Jede Gruppe wechselnd gegen Hochspannung und Erde schaltbar
Elektrische Isolation	Durchschlagsfestigkeit Leiterbahnen zueinander Minimum 10 kV / Nach außen isoliert

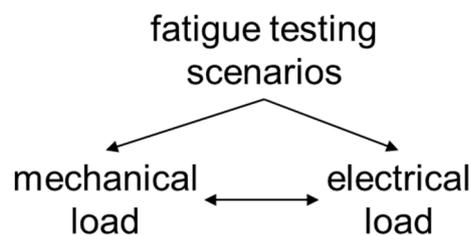
## 6.4 Entwicklung Prüfscenarien

*In diesem Abschnitt wird die Entwicklung von elektrischen und mechanischen Prüfscenarien zur Ermüdung von DE-Aktoren beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die Prozessparameter und deren Zusammenhänge eingegangen.*

Durch ihre multifunktionalen Eigenschaften ergeben sich für DE vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Aktorik, Sensorik oder als Generator. Dementsprechend existieren für jedes dieser Anwendungsgebiete unterschiedliche Beanspruchungen, die zur Ermüdung der DE führen. Diese Beanspruchungen beinhalten sowohl mechanische und elektrische Anregung der DE als auch Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Diese Anregungen und Umgebungsbedingungen lassen sich grundsätzlich beliebig miteinander kombinieren. Darum ist es notwendig sinnvolle Kombinationen aus mechanischer und elektrischer Anregung mit geeigneten Umgebungsbedingungen in Prüfscenarien zusammenzufassen.

Die in diesem Abschnitt entwickelten Prüfscenarien sind vorrangig für DE-Membran-

Aktoren, die aus der Ebene heraus arbeiten (vgl. Kapitel 2) konzipiert. Diese können aber durch geringfügige Anpassungen bei anderen Membran-Aktoren angewendet werden. Diese Prüfzenarien lassen sich entsprechend ihrer vorgegebenen primären Last grundlegend in zwei Hauptarten unterteilen (vgl. Abbildung 6.4). Diese Arten sind Ermüdungsprüfungen unter primär mechanischer und primär elektrischer Last. Die Ermüdung von DE-Membran-Aktoren beinhaltet einen Sonderfall bei dem ausschließlich eine Belastung vorgegeben wird. Dieser Sonderfall ist die mechanische Dehnung der Membran ohne angelegte elektrische Spannung. In allen anderen Fällen werden DE sowohl mechanisch als auch elektrisch belastet und dadurch ermüdet. Hierbei beeinflussen sich die Belastungsarten gegenseitig und wirken sich zusätzlich auf das Ermüdungsverhalten aus.



**Abbildung 6.4:** Unterteilung der Prüfzenarien

Jede Belastung wird durch Ermüdungsparameter definiert, welche bei mechanischer Last der Dehnung, der Dehnungsfrequenz und der angelegten elektrischen Spannung entsprechen. Bei elektrischer Last sind die Ermüdungsparameter die elektrische Spannung, deren Frequenz, sowie verwendete Vorspannmechanismen und dessen Vorauslenkung/Vorspannung.

Ermüdungstests bei DE werden durch eine Überwachung von Messgrößen durchgeführt, die sich während der Lebensdauer verändern. Diese sogenannten Schlüsselparameter geben Aufschluss über den Grad der Ermüdung und die Leistungsfähigkeit der DE. Zudem ist es denkbar durch die Schlüsselparameter ein Versagen vorherzusagen. Die grundlegenden Schlüsselparameter sind die Stromaufnahme, Widerstand und Kapazität der DE. Diese sind bei beiden Arten der Ermüdungsprüfung involviert. Für jede Art von Belastung gibt es eine Schlüsselgröße, die nur bei dieser Belastung auftritt. Bei der mechanischen Belastung ist dies die Reaktionskraft und bei der elektrischen, der erzeugte Hub. Der Zusammenhang zwischen Ermüdungs- und Schlüsselparameter ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

Eine Aufstellung der relevanten Ermüdungs- und Schlüsselparameter ist in Tabelle 6.4 gegeben.

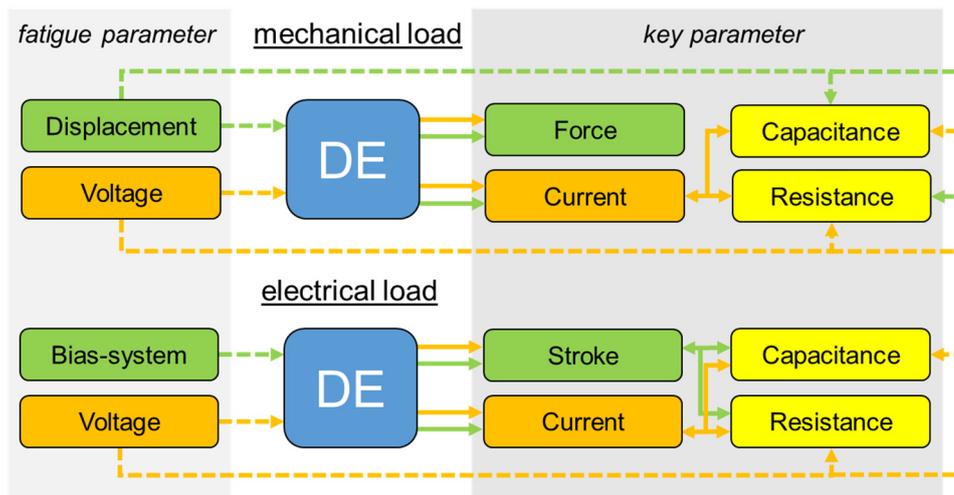


Abbildung 6.5: Funktionsmodell der Ermüdung von DE. Unterteilung in Ermüdungsarten; Ermüdungsparameter schraffierte Linien; Schlüsselparameter: durchgezogene Linien

Tabelle 6.4: Aufstellung der Ermüdungs- und Schlüsselparameter

		Ermüdung	
		mechanisch	elektrisch
vorgegeben	Ermüdungsparameter	Auslenkung/Dehnung	el. Spannung
		Auslenkungsfrequenz	Aktuierungsfrequenz
		el. Spannung	Vorspannmechanismus
			Vorauslenkung
	Rahmenbedingungen	Temperatur, Luftfeuchtigkeit	
gemessen	Schlüsselparameter	Reaktionskraft	Hub
		Strom	
		Widerstand	
		Kapazität	

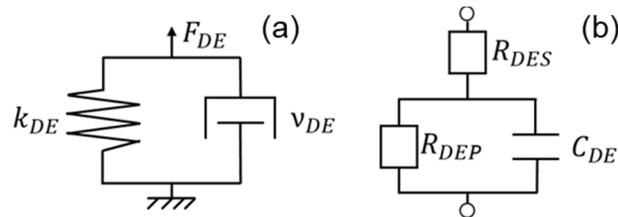
### 6.4.1 Mechanische Ermüdungsprüfung

Ermüdungsprüfung unter mechanischer Last bedeutet in diesem Zusammenhang eine wiederholte Auslenkung respektive Dehnung der DE-Membran inklusive der Elektroden. Diese Dehnung wird durch eine externe Auslenkung erzeugt, die eine mechanische Spannung in der Membran bewirkt (siehe Abbildung 6.6).



Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der mechanischen Belastung eines DE-Membran-Aktors

Dies bewirkt mit zunehmender Anzahl von Wiederholungen eine mechanische Ermüdung der Membran und Elektroden, welche sich in einer Veränderung der Steifigkeit  $k_{DE}$ , der Viskosität  $v_{DE}$  sowie der Kapazität  $C_{DE}$  und den Widerständen  $R_{DES}$ ,  $R_{DEP}$  des DE auswirken (siehe Abbildung 6.7).



**Abbildung 6.7:** Ersatzschaltbilder eines DE-Membran-Aktors; (a) mechanisches Ersatzschaltbild, (b) elektrisches Ersatzschaltbild

Zusätzlich kann die Membran bei der Dehnung mit einer elektrischen Spannung beaufschlagt werden, die einen zusätzlichen elektrischen Einfluss auf die mechanische Ermüdung des DE bewirkt. Diese Spannung wird während der mechanischen Ermüdungsprüfung konstant gehalten, könnte aber im Betrieb variiert werden.

Die mechanischen Prüfscenarien (MPS) basieren auf einer Kombination aus fünf vorgegebenen Ermüdungsparametern. Bei diesen Ermüdungsparametern handelt es sich um die maximale Auslenkung der DE, die Auslenkungsform (Sinus, Dreieck, usw.), die Auslenkungsfrequenz, die Vorauslenkung und die elektrische Spannung. Diese lassen sich zu fünf primär mechanischen Prüfscenarien kombinieren, bei denen vier Ermüdungsparameter für alle DE gleich sind und eine, deren Größe bei jeder DE-Gruppe variiert wird. Die fünf mechanischen Prüfscenarien sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

Im Messintervall wird die Messung der Reaktionskräfte bei diesen Prüfscenarien für jeden DE zweimal durchgeführt: einmal ohne und einmal mit angelegter Hochspannung. Dies erzeugt Reaktionskräfte mit unterschiedlichen Maximalwerten, durch die sich Rückschlüsse über das Aktorverhalten der DE ziehen lassen. Zusätzlich lassen sich durch den Verlauf der Reaktionskräfte in Bezug zur Auslenkung weitere Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit der DE während der Ermüdungsprüfung gewinnen. (siehe Kapitel 2). Diese Art der Ermüdungsprüfung soll vorrangig die Anwendung von DE als Sensoren abbilden. Eine Ermüdungsprüfung von DE als Generator wäre durch eine passende Elektronik möglich, wird aber in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Tabelle 6.5: Prüfzenarien bei mechanischer Last

		Ermüdungsparameter	
		konstant	variiert
MPS I	max. Auslenkung	el. Spannung	
	Auslenkungsform		
	Auslenkungsfrequenz		
	Vorauslenkung		
MPS II	Auslenkungsform	max. Auslenkung	
	Auslenkungsfrequenz		
	Vorauslenkung		
	el. Spannung		
MPS III	max. Auslenkung	Auslenkungsform	
	Auslenkungsfrequenz		
	Vorauslenkung		
	el. Spannung		
MPS IV	max. Auslenkung	Vorauslenkung	
	Auslenkungsform		
	Auslenkungsfrequenz		
	el. Spannung		
MPS V	max. Auslenkung	Auslenkungsfrequenz	
	Auslenkungsform		
	Vorauslenkung		
	el. Spannung		

### 6.4.2 Elektrische Ermüdungsprüfung

Ermüdungsprüfung unter elektrischer Last wird durch das zyklische Anlegen einer elektrischen Hochspannung (DC) an dem DE erzeugt. Damit verbunden ist die Erzeugung eines Hubes in Abhängigkeit des Maximalwertes, der Form und der Frequenz der angelegten Spannung sowie dem verwendeten Vorspannmechanismus und dessen Vorspannung (siehe Abbildung 6.8). Typische Vorspannmechanismen in diesem Zusammenhang sind lineare und bistabile Federn. Bei einer Ermüdung der DE-Aktoren würde in diesem Fall in einer Änderung des Hubes und/oder der Vorauslenkung bzw. Vordehnung sowie der Stromaufnahme aufgrund von Veränderungen der Widerstände  $R_{DES}$ ,  $R_{DEP}$  und der Kapazität  $C_{DE}$  erwartet.

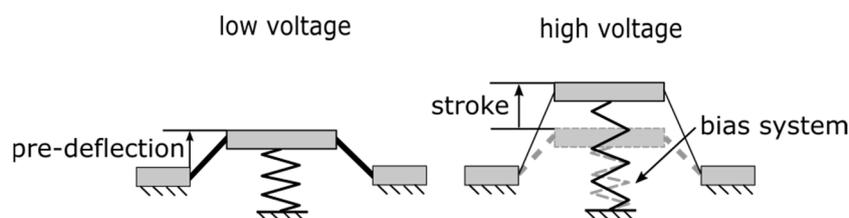


Abbildung 6.8: Schematische Darstellung eines Ermüdungstests mit elektrischer Last

Die elektrischen Prüf Szenarien (*EPS*) basieren ebenfalls auf einer Kombination mehrerer Ermüdungsparameter. Diese Ermüdungsparameter sind in diesem Fall der Maximalwert, die Form (Sinus, Dreieck usw.) und die Frequenz der elektrischen Spannung (Aktuierungsfrequenz) sowie die Art des Vorspannmechanismus sowie dessen Vorspannung. Aus diesen Ermüdungsparametern ergeben sich fünf elektrische Prüf Szenarien, die in Tabelle 6.6 dargestellt sind.

Im Messintervall werden die Vorauslenkungen und erzeugten Hübe der DE bei verschiedenen Aktuierungsfrequenzen und elektrischen Spannungen gemessen. Deren Änderung in Abhängigkeit der durchlaufenen Zyklen aufgezeichnet wird. Diese Hauptart der Ermüdungsprüfung dient der direkten Untersuchung der Ermüdung von DE als Aktoren.

**Tabelle 6.6: Prüf Szenarien bei elektrischer Last**

	Ermüdungsparameter	
	konstant	variiert
<b>EPS I</b>	el. Spannungsform	max. el. Spannung
	Aktuierungsfrequenz	
	Vorauslenkung	
	Vorspannmechanismus	
<b>EPS II</b>	max. el. Spannung	el. Spannungsform
	Aktuierungsfrequenz	
	Vorauslenkung	
	Vorspannmechanismus	
<b>EPS III</b>	max. el. Spannung	Vorauslenkung
	el. Spannungsform	
	Aktuierungsfrequenz	
	Vorspannmechanismus	
<b>EPS IV</b>	max. el. Spannung	Vorspannmechanismus
	el. Spannungsform	
	Aktuierungsfrequenz	
	Vorauslenkung	
<b>EPS V</b>	el. Spannungsform	Aktuierungsfrequenz
	max. el. Spannung	
	Vorauslenkung	
	Vorspannmechanismus	

Die genauen Werte der Ermüdungsparameter bei der Ermüdung und der Vermessung sind für beide Hauptlastarten abhängig von der DE-Geometrie und den zu prüfenden Schlüsselparametern zu wählen, um sinnvolle und aussagekräftige Ermüdungsprüfungen durchzuführen.

## 6.5 Zeitmanagement

*In diesem Abschnitt wird die Dauer einer Ermüdungsprüfung in Abhängigkeit der Anzahl der Ermüdungsintervalle und Messintervalle betrachtet. Insbesondere werden hierbei die Länge der Ermüdungsintervalle und die Zeitspannen zur Änderung der Temperatur im Klimaschrank und deren Einfluss auf die Gesamtdauer untersucht.*

### 6.5.1 Konstante Temperatur

Ermüdungsprüfungen sind in der Regel zeitintensiv. Deswegen wird eine Abschätzung des Zeitaufwandes einer Ermüdungsprüfung vorgenommen. Die Ermüdungsprüfung ist in Mess- und Ermüdungsintervall unterteilt (vgl. Kapitel 6.2). Die Dauer des Messintervalls ist stark von der Art des Prüfzenarios abhängig. Die Messung von Reaktionskräften bei Ermüdung unter mechanischer Last ist wesentlich zeitaufwendiger als die Hubmessung bei Ermüdung unter elektrischer Last. Zudem ist die Länge der Messintervalle, von der der Belastungsfrequenz während der Messung  $f_M$  und der Anzahl der Vermessenen DE abhängig. Diese Anzahl variiert, da DE die versagt haben, nicht mehr vermessen werden. Zusätzlich ist der Anteil der ausgefallenen DE von den durchlaufenen Ermüdungszyklen, der Last und den Umgebungsbedingungen abhängig. Für die weitere Kalkulation wird von einer durchschnittlichen Messintervalldauer  $t_m$  von 15 Minuten und einer für Ermüdungsprüfungen typischen Gesamtzahl von Ermüdungszyklen  $N_F$  von einer Million ausgegangen. Die Anzahl der Ermüdungsintervalle  $N_{FI}$  errechnet sich zu

$$N_{FI} = \frac{N_F}{n_{FC}} \quad (6.1)$$

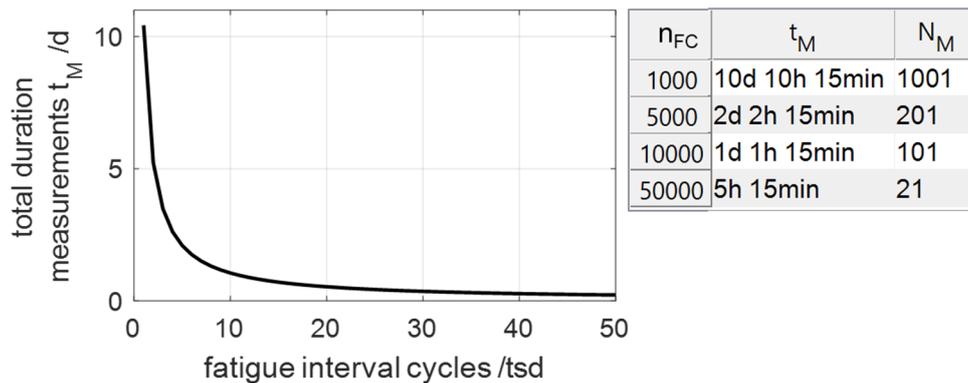
wobei die Anzahl der Ermüdungszyklen  $n_{FC}$  pro Ermüdungsintervall beschreibt. Aus vorangegangenen Arbeiten [98] ist bekannt, dass eine Mindestanzahl von Ermüdungszyklen pro Ermüdungsintervall von eintausend eine hohe Überwachungsichte während der Ermüdungs- bzw. Versagensprüfung bei DE-Membranaktoren erzielt. Dies ist sinnvoll bei hoher Belastung und großer Veränderung der Schlüsselwerte der DE. Das Verhältnis der Anzahl von Ermüdungsintervallen zu Messintervallen  $N_M$  ergibt sich zu

$$N_M = N_{FI} + 1 \quad (6.2)$$

da vor und nach jedem Ermüdungsintervall eine Vermessung der DE vorgenommen wird. Daraus ergibt sich die Gesamtmesszeit  $t_M$  zu

$$t_M = N_M t_m \quad (6.3)$$

Die Ermüdungsintervalle werden in diesem Fall nicht berücksichtigt. Abbildung 6.9 zeigt die Abhängigkeit der Gesamtmesszeit von der Anzahl der Messintervalle und Anzahl der Ermüdungszyklen pro Ermüdungsintervall. Hierbei wird eine maximale Ermüdungsintervalllänge von bis zu fünfzigtausend Zyklen angenommen. Diese Intervalllänge wird für geringe Lasten und der vermuteten geringen Veränderung der Schlüsselwerte angenommen. Die Gesamtmesszeit nimmt mit zunehmender Anzahl der



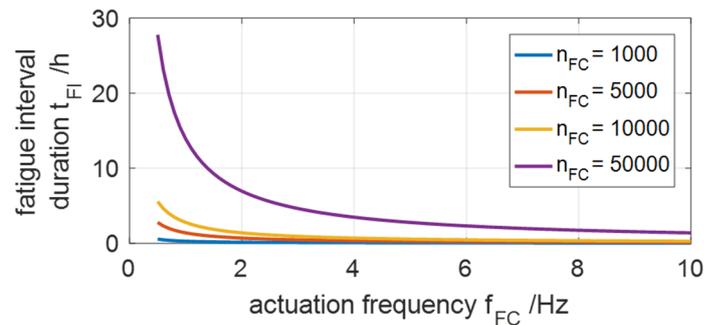
**Abbildung 6.9:** Gesamtmesszeit in Abhängigkeit der Länge der Ermüdungsintervalle bei einer Million Ermüdungszyklen

Ermüdungszyklen pro Ermüdungsintervall ab, da damit auch die Anzahl der durchgeführten Messintervalle abnimmt.

Im Gegensatz zu den Messintervallen sind die Ermüdungsintervalle unabhängig von der Anzahl ausgefallener DE. Die Dauer der Ermüdungsintervalle ist ausschließlich von der Anzahl der Ermüdungszyklen und der Frequenz, bei der diese durchgeführt werden abhängig. Die Dauer der Ermüdungsintervalle  $t_{FI}$  lässt sich zu

$$t_{FI} = \frac{n_{FC}}{f_{FC}} \quad (6.4)$$

berechnen und  $f_{FC}$  beschreibt die Ermüdungsfrequenz. Um einen Überblick über die Zeitspannen zu gewinnen werden diese in Abhängigkeit der Ermüdungsfrequenz für ein-, fünf-, zehn- und fünfzigtausend Ermüdungszyklen in einem Ermüdungsintervall in Abbildung 6.10 dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die Dauer der Ermüdungsintervalle mit zunehmender Ermüdungsfrequenz exponentiell abfällt und zur Anzahl der Ermüdungszyklen proportional zunimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die Ermüdungsintervalle bei möglichst hohen Frequenzen durchgeführt werden sollten.



n <sub>FC</sub> \ f <sub>FC</sub>	0.5 HZ	1 HZ	5 HZ	10 HZ
1000	33min 20s	16min 40s	3min 20s	1min 40s
5000	2h 46min 40s	1h 23min 20s	16min 40s	8min 20s
10000	5h 33min 20s	2h 46min 40s	33min 20s	16min 40s
50000	27h 46min 40s	13h 53min 20s	2h 46min 40s	1h 23min 20s

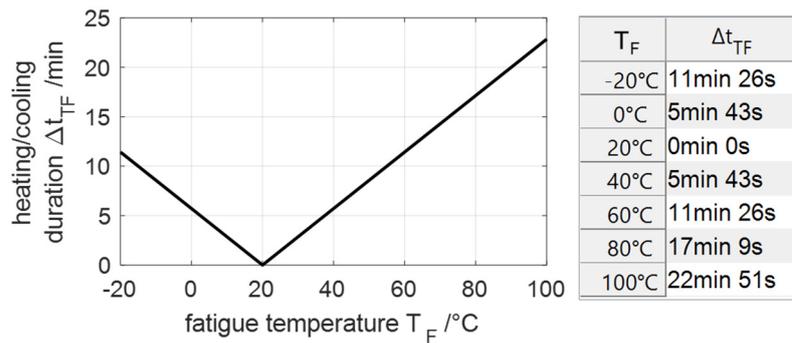
**Abbildung 6.10:** Zeitspanne eines Ermüdungsintervalls in Abhängigkeit von Aktuierungsfrequenz und Anzahl der Ermüdungszyklen

### 6.5.2 Variation Ermüdungstemperatur

Zusätzlich muss bei der Ermüdungsprüfung der Temperaturbereich, in dem die Ermüdung durchgeführt wird, berücksichtigt werden. Dieser Bereich liegt bei  $\Delta T_F = -20^\circ - 100^\circ \text{C}$ . Bei Ermüdungstemperaturen  $T_F$  oberhalb und unterhalb der Messtemperatur  $T_0 = 20^\circ \text{C}$  muss die Zeit zum Aufheizen bzw. Abkühlen der Klimakammer berücksichtigt werden. Der Klimakammer ist ein Klima-Prüfschrank vom Typ *CTS C70-350*. Zur Berechnung der Dauer der Aufheizung bzw. Abkühlung der Klimakammer werden die Abkühl- bzw. Aufheizgeschwindigkeit benötigt. Diese werden dem Datenblatt [153] entnommen. Die Abkühlgeschwindigkeit und die Aufheizgeschwindigkeit nach *IEC 60068-3-6* sind bei dieser Klimakammer gleich groß und betragen  $\Delta T = 3.5 \text{ K/min}$ . Daraus ergeben sich die Zeitspanne  $\Delta t_{TF}$  zur Temperatureinstellung

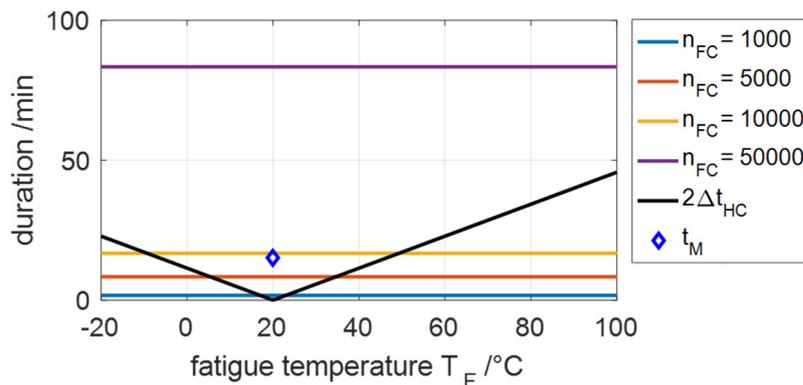
$$\Delta t_{TF} = \frac{T_F - T_0}{\Delta T} \quad (6.5)$$

Dieser Zusammenhang zwischen Dauer der Temperaturänderung und der Ermüdungstemperatur ist in Abbildung 6.11 dargestellt und zeigt, dass die Dauer der Temperaturänderung bei großen Abweichungen der Ermüdungstemperatur von der Messtemperatur deutlich länger als die Dauer des Messintervalls und des Ermüdungsintervalls sein kann.



**Abbildung 6.11:** Dauer des Aufheizens bzw. Abkühlens in Bezug zur Ermüdungstemperatur

Der Vergleich der einzelnen Zeitspannen ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Hierbei wird berücksichtigt, dass vor und nach dem Ermüdungsintervall die Temperatur verändert wird. Es wird ersichtlich, dass vor allem bei einer geringen Anzahl von Ermüdungszyklen, die Dauer der Temperatureinstellung wesentlich länger ist als ein Ermüdungsintervall oder Messintervall. Nach der Betrachtung der Länge der einzelnen Bestandteile ist eine Betrachtung des gesamten Ermüdungstests zur Zusammenstellung sinnvoller Kombinationen aus Länge der Ermüdungsintervalle und der Ermüdungstemperatur



**Abbildung 6.12:** Vergleich der Zeitspannen zum Absolvieren der Ermüdungsintervalle sowie zur Temperaturänderung

notwendig. Zunächst wird aufgelistet, wie oft die jeweiligen Bestandteile in einem Ermüdungstest in Abhängigkeit der Länge des Ermüdungsintervalls durchlaufen werden. Diese Bestandteile sind die Ermüdungs- und Messintervalle sowie die Temperaturänderungen. Die Anzahl von Temperatureinstellungen  $N_{HC}$  ergibt sich zu

$$N_{HC} = 2 N_{FI} \tag{6.6}$$

Hierbei wird berücksichtigt, dass vor und nach einem Ermüdungsintervall die Temperatur in der Klimakammer geändert wird. Eine Übersicht über die Anzahl der Ermüdungsintervalle und Temperatureinstellungen bei Ermüdungstests ist in berechneter Tabelle 6.7 gegeben. Hierfür wird eine Gesamtzahl von Ermüdungszyklen von einer

Million zu Grunde gelegt. Daraus ist ersichtlich, dass mit zunehmender Ermüdungsintervalllänge die Gesamtzahl der Ermüdungsintervalle und die Anzahl der Temperatureinstellungen abnehmen. Bei der Berechnung der Gesamtdauer eines Ermüdungstests  $t_{FT}$  wird zur Vereinfachung von einer Ermüdungsfrequenz von  $f_{FC} = 10 \text{ Hz}$  ausgegangen. Die Gesamtdauer wird mit

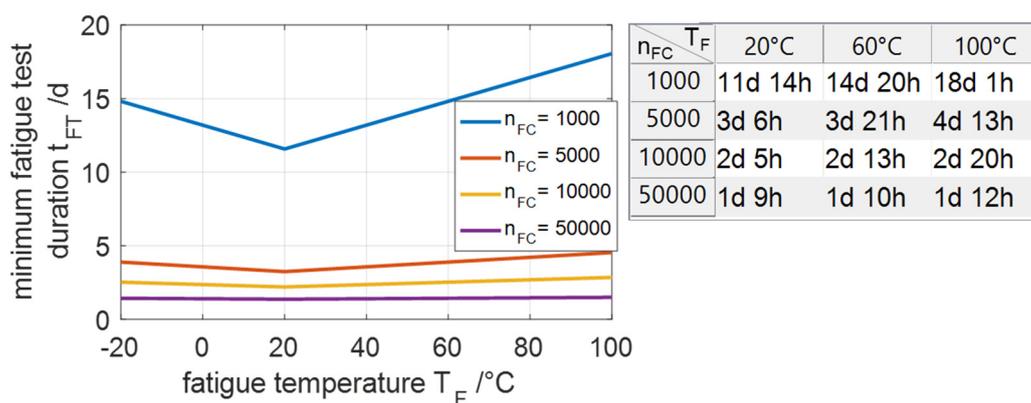
$$t_{FT} = N_{FI}(t_{FI} + 2 \Delta t_{TF}) + N_M \Delta t_M \quad (6.7)$$

berechnet.

**Tabelle 6.7: Anzahl der Ermüdungsintervalle und Temperatureinstellungen in Abhängigkeit der Intervalllänge**

N	1 000 0000			
	$n_{FC}$	1000	5 000	10 000
$N_{FI}$	1000	200	100	20
$N_M$	1001	201	101	21
$N_{HC}$	2000	400	200	40

Abbildung 6.13 gibt einen Überblick über die Gesamtlaufzeit eines Ermüdungstests bei verschiedenen Ermüdungsintervalllängen und Ermüdungstemperaturen. Dabei ist ein überproportionaler Anstieg der Gesamtlaufzeit bei kurzen Intervalllängen und zunehmender Abweichung der Ermüdungstemperatur von der Messtemperatur zu beobachten. Dies wird dadurch verursacht, dass die Anzahl Temperaturänderung und deren Zeitspanne im Vergleich zur Intervalllänge bei kurzen Ermüdungsintervallen dominiert. Stimmt die Ermüdungstemperatur mit der Messtemperatur überein, ist die Gesamtlaufzeit bei allen Ermüdungsintervalllängen am geringsten, da Temperaturänderungen entfallen.



**Abbildung 6.13: Mindestdauer eines Ermüdungstest bei konstanter Länge der Ermüdungsintervalle**

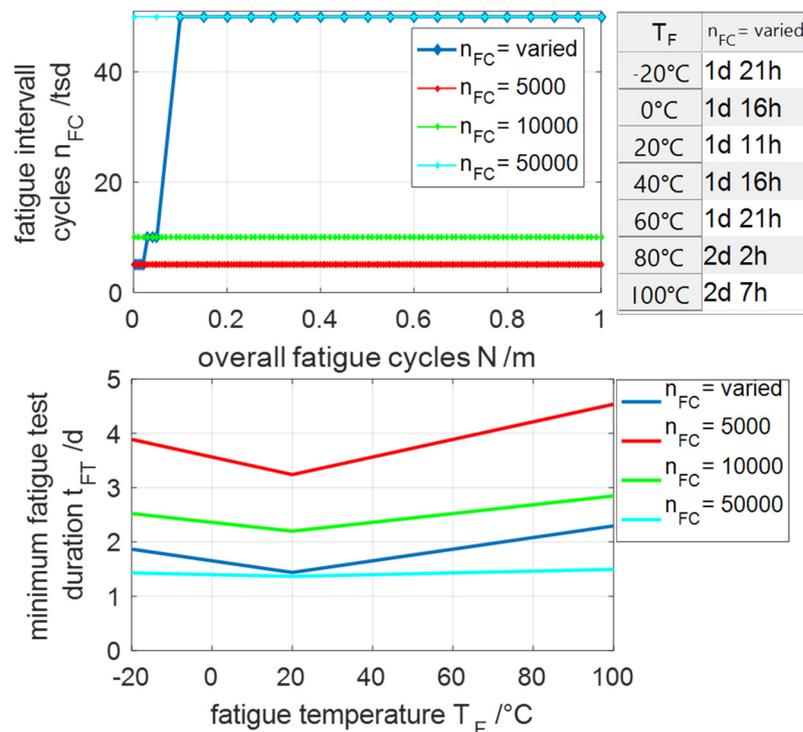
Durch dieses zeitliche Verhältnis von Ermüdungsintervall zur Ermüdungstemperatur sind bei Temperaturen, die stark von der Messtemperatur abweichen, längere

Ermüdungsintervalle sinnvoll. Aufgrund dieses Zusammenhanges zwischen Ermüdungstemperatur und Intervalllängen ist eine Kombination verschiedener Ermüdungsintervalllängen in einem Ermüdungstest zur Verringerung der Gesamtlaufzeit angebracht.

### 6.5.3 Optimierung Gesamtlaufzeit

Eine Verringerung der Gesamtlaufzeit bei gleichzeitigem Erhalt der Aussagekraft der Messdaten ist durch eine Variation der Längen der Ermüdungsintervalle im Verlauf des Ermüdungstests zu erreichen. Dieses Vorgehen gewährleistet, dass an den Stellen mit großer Änderung bestimmter Schlüsselparameter eine möglichst hohe Vermessungsdichte erzielt wird, während bei geringen Änderungen der Schlüsselparameter die Vermessungsdichte verringert und so Zeit eingespart wird.

Es wäre zum Beispiel möglich zu Anfang des Ermüdungstests die Ermüdungsintervalle kürzer zu gestalten, um eine höhere Vermessungsdichte zu erzielen. Im weiteren Verlauf des Ermüdungstests wäre wegen der Zeitersparnis eine Verlängerung der Ermüdungsintervalle möglich. Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft einen Ermüdungstest mit variiertes Länge der Ermüdungsintervalle. Hierbei werden die ersten vier Ermüdungsintervalle mit fünftausend, die nächsten drei mit zehntausend und die restlichen



**Abbildung 6.14:** Beispiel zur Zeiteinsparung durch Variation der Länge der Ermüdungsintervalle

mit fünfzigtausend durchgeführt bis das Maximum von einer Million Ermüdungszyklen erreicht ist. Daraus wird ersichtlich, dass durch eine Kombination aus unterschiedlich langen Ermüdungsintervallen sich die Gesamtlaufzeit eines Ermüdungstests im Vergleich zu Ermüdungsintervallen mit wenigen Zyklen deutlich verringern lässt.

Sinnvolle Kombinationen unterschiedlicher Intervalllängen hängen im konkreten Fall vom Prüfzenario, den zu testenden DE und der Umgebungstemperatur ab und müssen jeweils darauf angepasst werden. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der Aufbau als Wärmespeicher fungiert und so den Zeitaufwand zum Aufheizen beziehungsweise Abkühlen beeinflusst.

#### **6.5.4 Fazit**

Dieser Abschnitt hat gezeigt, wie der Zeitaufwand zur Durchführung eines Ermüdungstest von der Anzahl der Mess- und Ermüdungsintervalle und deren Dauer für eine Gesamtzahl von einer Million Ermüdungszyklen abhängt. Die Dauer der Messintervalle wird als konstant angenommen. Dadurch ergibt sich eine Zunahme der Gesamtdauer mit zunehmender Anzahl der Messintervalle. Die Anzahl der Messintervalle hängt direkt von der Anzahl der Ermüdungsintervalle ab. Je länger die Ermüdungsintervalle sind desto weniger Messintervalle und Temperaturänderungen müssen durchgeführt werden. Dies führt zur Verringerung der Gesamtdauer, aber auch zur Verringerung der Überwachungsichte der Aktoren. Um eine ausreichende Überwachungsichte bei kurzer Gesamttermüdungsdauer zu erreichen, wurde eine Variation der Längen der Ermüdungsintervalle eingeführt.

---

## 6.6 Entwicklung Ermüdungsprüfstand

*In diesem Abschnitt wird die Entwicklung des Ermüdungsprüfstandes beschrieben. Hierbei werden Konzepte zur die Anordnung, der mechanischen Ermüdung und der Vermessung der DE miteinander verglichen und jeweils eine Lösung ausgewählt. Zudem wird die Konstruktion der einzelnen Baugruppen unter Berücksichtigung des speziellen Anforderungsprofils präsentiert.*

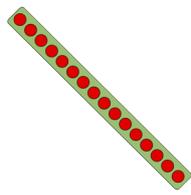
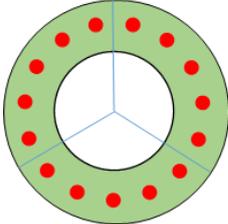
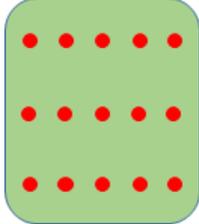
### 6.6.1 Anordnung DE-Aktoren

*Dieser Abschnitt diskutiert die Auswahl einer optimalen Anordnung der DE auf dem Ermüdungsmodul zur Ermüdung und Vermessung unter Berücksichtigung der Randbedingungen.*

Der Ermüdungsprüfstand wird in zwei Module unterteilt, das Messmodul und das Ermüdungsmodul. Das Ermüdungsmodul beherbergt die DE. Hierbei ist die Anordnung der DE wichtig für die Machbarkeit der Ermüdung und Vermessung der Schlüsselparameter. In Abschnitt 6.2 wurde festgelegt, dass DE in drei Gruppen mit jeweils fünf Aktoren ermüdet werden. Daraus ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Anordnung der DE. Diese sind eine einreihige bzw. lineare, eine kreisförmige und eine quadratische Anordnung. Zur Auswahl der am besten geeigneten Anordnung werden diese in den Kriterien Raumbedarf, Möglichkeiten zur mechanischen und elektrischen Ermüdung sowie dem Aufwand zur Positionierung der Sensoren bewertet. Die einzelnen Kriterien werden gleich gewichtet und mit Punkten von null bis maximal drei Punkten bewertet. Die genaue Bewertung der Kriterien ist in Tabelle 6.8 dargestellt.

Die Größe des Ermüdungsprüfstandes wird durch den Klimaprüfschrank *CTS C70-350* begrenzt. Der Prüfraum ist *650 mm* breit, *720 mm* tief und *750 mm* hoch. Durch diese Begrenzung ist eine einreihige Anordnung der DE durch die daraus resultierende Länge des Aufbaus für den vorhandenen Prüfraum äußerst ungünstig. Die Kreisanordnung dahingegen ist besser geeignet, da die Länge und Breite identisch sind und durch den Durchmesser vorgegeben werden können. Die Anordnung in matrixform ist wegen der voneinander unabhängigen Einstellbarkeit der Länge und Breite am besten geeignet.

Tabelle 6.8: Bewertung der Anordnungsmöglichkeiten von DE

Anordnung	Linear	Kreis	Matrix
			
<b>Raumbedarf</b>	○○○	○○○	○○○
<b>mech. Ermüdung</b>	●●●	●○○	●●●
<b>el. Ermüdung</b>	●●●	●●●	●●●
<b>Positionierung Sensoren</b>	●●●	●●●	●○○
<b>Gesamt</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>11</b>

Die mechanische Ermüdung soll durch Auslenkung der DE in Gruppen durchgeführt werden. Hierbei kann die Auslenkung durch einen separaten Antrieb für jeden DE, für jede Reihe oder einen einzigen Antrieb für alle DE ausgeführt werden. Die Kreisanordnung bietet in diesem Zusammenhang keine einfache Möglichkeit durch einen einzigen Antrieb die DE in Gruppen auszulenken. Demgegenüber besitzen die lineare und die quadratische Anordnung alle drei Möglichkeiten.

Die elektrische Ermüdung der DE wird durch Anlegen einer elektrischen Spannung durchgeführt. Dafür muss ein elektrischer Kontakt zu jedem hergestellt sein. Die elektrische Kontaktierung kann dabei einfach durch entsprechend ausgelegte Leiterplatten ermöglicht werden.

Die Positionierung der Sensoren ist bei der einreihigen und der kreisförmigen Anordnung durch ein lineares respektive rotatorisches Positioniersystem einfach umzusetzen. Die Anordnung in Zeilen und Spalten erfordert eine Positionierung der Sensoren in zwei Richtungen und deswegen müsste ein zweiachsiges Positioniersystem verwendet werden, was einen Mehraufwand bedeuten würde. Nach der Bewertung der Kriterien hat sich gezeigt, dass die quadratische Anordnung die beste Beurteilung aufweist. Deshalb wird für das weitere Vorgehen eine quadratische Anordnung der DE in Reihen und Spalten ausgewählt.

### Schlussfolgerung

Durch die Auswertung der Bewertungskriterien ist festzustellen, dass eine Anordnung der DE in Reihen und Spalte eine optimale Lösung darstellt. Dies beruht insbesondere auf dem geringen Raumbedarf dieser Anordnung und den umfangreichen Möglichkeiten zur elektrischen und mechanischen Ermüdung der DE.

## 6.6.2 Huberzeugung mechanische Ermüdung

*Dieser Abschnitt diskutiert die Möglichkeiten zur Erzeugung mechanischen Hubes und trifft eine Auswahl anhand spezieller Kriterien.*

Nachdem die Anordnung der DE vorgenommen wird, besteht der nächste Schritt darin eine Auswahl der Antriebsart zur mechanischen Ermüdung der DE zu treffen. Dazu stehen pneumatische, hydraulische und elektrische Zylinder und einen Kurvenantrieb zur Auswahl. Die Zylinder generieren eine lineare Bewegung während die Kombination aus Kurvenantrieb und Elektromotor eine rotatorische erzeugt, die in eine lineare Bewegung umgesetzt werden muss. Die Bewertungskriterien sind die Energieversorgung und Frequenz, der Temperaturbereich, der Aufwand zur Steuerung bzw. Regelung und der Wartungsaufwand des jeweiligen Antriebs. Die einzelnen Kriterien werden gleich gewichtet und mit Punkten von null bis maximal drei Punkten bewertet.

Die erzielbare Kraft und Hübe sowie die Betriebstemperatur der Antriebe werden nicht als Bewertungskriterium aufgeführt, da es von allen vier Antriebsarten kommerziell verfügbare Produkte gibt, die diese Anforderungen erfüllen. Die genaue Bewertung der Kriterien ist in Tabelle 6.9 dargestellt.

***Tabelle 6.9: Bewertung der Antriebsmöglichkeiten zur mechanischen Ermüdung***

Antriebsart	Pneumatik Zylinder	Hydraulik Zylinder	Elektrozylinder	Kurvenantrieb mit Motor
Energieversorgung	Druckluft ●○○	Hydrauliköl ○○○	Elektrizität ●●●	Elektrizität ●●●
Frequenz	●●○	●○○	●○○	●●○
Wartungsaufwand	●●○	●○○	●●○	●●○
Steuer-/ Regelaufwand	●○○	●○○	●○○	●○○
Geräusentwicklung	○○○	●○○	●●○	●●○
Gesamt	6	4	12	15

Bei der Auswahl der Antriebsart ist es notwendig auf die Art der Energieversorgung zu achten. Pneumatische und hydraulische Zylinder benötigen zum Betrieb Luft und Hydrauliköl, welche jeweils eine separate Versorgung benötigen. Dies erzeugt einen zusätzlichen Wartungsaufwand und zudem besteht bei hydraulischen Zylindern die Möglichkeit bei Leckage die Klimakammer zu beschädigen. Der Elektrozyylinder und der Motor des Kurvenantriebes hingegen benötigen zum Betrieb nur Elektrizität.

Bei den erzielbaren Auslenkungsfrequenzen ist der Kurvenantrieb am besten geeignet, da die Rotationsgeschwindigkeit des Motors in eine Hubbewegung umgesetzt wird. Bei den

Zylinderantrieben muss zusätzlich zwischen Anheben und Absenken des Zylinders unterschieden werden, was die erreichbaren Frequenzen beschränkt und zusätzlich den Aufwand zu Steuerung bzw. Regelung vergrößert.

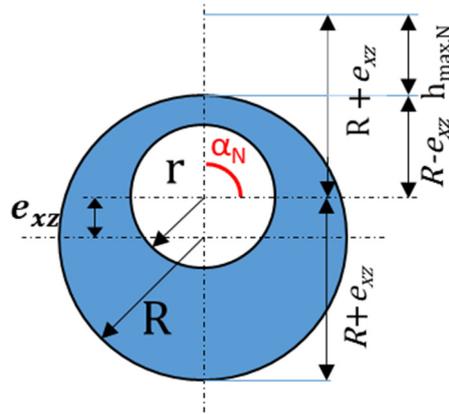
Auch die Geräusentwicklung ist bei pneumatischen und hydraulischen Antrieben wesentlich größer als bei den elektrischen Antrieben, was im Dauerbetrieb störend sein kann.

### **Schlussfolgerung**

Nach Auswertung der Bewertungskriterien ist festzustellen, dass der Kurvenantrieb am besten zum Betrieb des Ermüdungsprüfstandes geeignet ist. Die Kombination aus Kurvenwelle und Motor hat zusätzlich den Vorteil, dass ein einziger Antrieb alle drei Gruppen gleichzeitig antreiben kann, was den Aufwand zur Steuerung respektive Regelung und Überwachung des Antriebes minimiert. Allerdings ist dadurch bei jeder Gruppe die Auslenkungsfrequenz gleich.

#### **6.6.2.1 Kurvenscheiben**

Die Auslenkung der DE wird durch eine Kurvenantrieb realisiert. Die Kurvenscheiben sollen dabei die Auslenkung erzeugen und austauschbar sein, um die maximale Auslenkung auf das Ermüdungsszenario einstellen zu können. Die Kurvenscheiben sollen möglichst einfach zu fertigen sein und der Austausch der Kurvenscheiben soll zudem mit geringem Aufwand ausgeführt werden können. Der Radius der Antriebswelle wird auf  $r = 6$  mm gewählt. Dieser Durchmesser hat den Vorteil dass Flanschlagellager mit eben diesem Durchmesser existieren, was die Fertigung des Ermüdungsprüfstandes und die Montage der Antriebswelle vereinfachen. Nach diesen Anforderungen bietet sich an, die Kurvenscheiben aus Rundscheiben zu fertigen, die mit einer exzentrischen Bohrung versehen werden. Dies hat den Vorteil, dass der Aufwand der Fertigung sehr gering ist. Abbildung 6.15 zeigt den schematischen Aufbau einer Kurvenscheibe.



**Abbildung 6.15:** Schematische Darstellung einer Kurvenscheibe

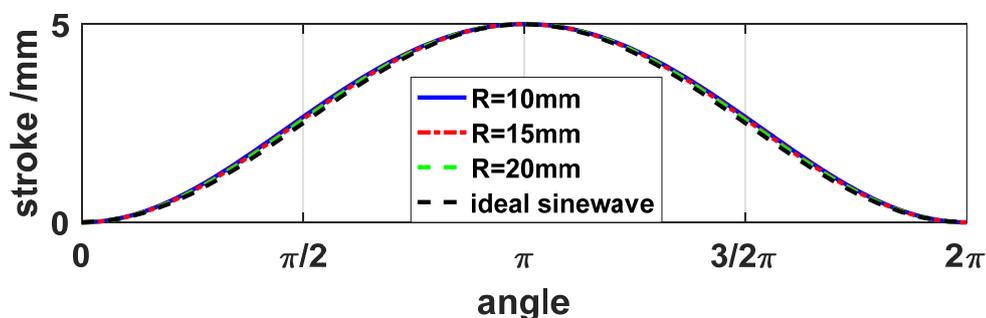
Die Exzentrizität ist der Abstand des Bohrungsmittelpunkts zum Gesamtmittelpunkt der Scheibe  $e_{xz}$  und beträgt die Hälfte der gewünschten Auslenkung. Daraus wird die maximale Auslenkung  $h_{N,max}$  zu

$$h_{N,max} = (R + e_{xz}) - (R - e_{xz}) = 2 e_{xz} \quad (6.8)$$

berechnet, wobei  $R$  den Außenradius der Kurvenscheibe,  $r$  den Radius der Bohrung beschreiben und  $e_{xz}$  deren Exzentrizität. Der Verlauf des Hubes  $h_N$  in Abhängigkeit des Drehwinkels  $\alpha_N$  ist durch

$$h_N(\alpha_N) = \sqrt{(R \cos(\alpha_N) - e_{xz})^2 + (R \sin(\alpha_N))^2} - (R - e_{xz}) \quad (6.9)$$

gegeben. Der Verlauf, der durch die Kurvenscheiben generierten Auslenkung, ist auch abhängig vom Außendurchmesser der Kurvenscheiben. Abbildung 6.16 zeigt den Verlauf der Hübe bei einem Maximalwert von  $h_{N,max} = 5 \text{ mm}$  für drei Radien von  $10 \text{ mm}$ ,  $15 \text{ mm}$  und  $20 \text{ mm}$ . Im Vergleich zu einem idealen Sinusverlauf des Hubes zeigt sich kein gravierender Unterschied.



**Abbildung 6.16:** Einfluss der Außenradien der Kurvenscheiben auf die Hubverläufe

Aus dieser Erkenntnis wird der Radius der Kurvenscheiben bei einem Wert von  $R = 15 \text{ mm}$  festgelegt. Dieser Wert garantiert, dass genug Material an der dünneren Seite der

Kurvenscheiben für eine Bohrung existiert und bei jeder der drei gewünschten Exzentrizitäten durchgeführt werden kann. Basierend auf dem gewählten Kurvenscheibendurchmesser wird der Hub einer idealen sinusförmigen Auslenkung mit dem Hub der exzentrisch gebohrten Kurvenscheibe für Hübe von  $h_{N,max} = 1\text{ mm}$ ,  $3\text{ mm}$  und  $5\text{ mm}$  verglichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 6.17 dargestellt und zeigt, dass die Abweichungen der Hübe der Kurvenscheiben im Vergleich zum idealen Sinus sehr gering und dadurch akzeptabel sind.

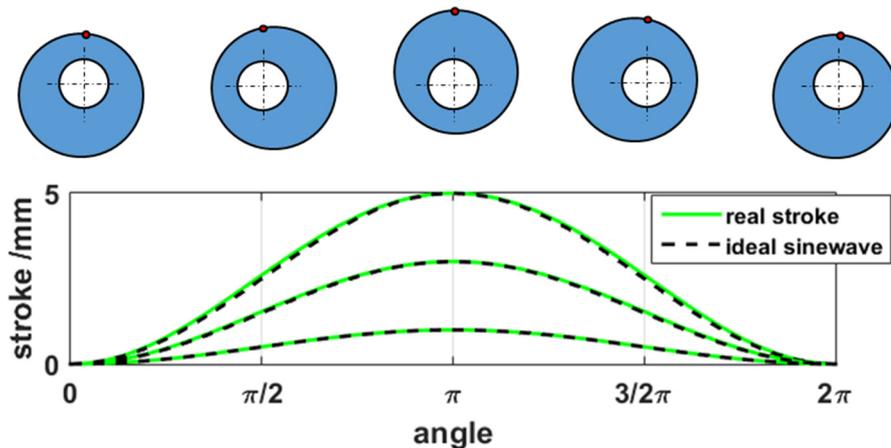


Abbildung 6.17: Vergleich idealer Sinus mit exzentrischer Bewegung

### 6.6.2.2 Ermüdungsmodul

Das Ermüdungsmodul beherbergt sowohl die DE als auch den Antrieb zur mechanischen Ermüdung. Der Kurvenantrieb sitzt unterhalb der Basisplatte und wird von einem Schrittmotor angetrieben. Die Umsetzung der Drehbewegung der Kurvenscheiben in eine lineare Bewegung wird durch einen Auslenkungsmechanismus realisiert. Jede Reihe besitzt einen dieser Mechanismen, der alle DE in der Reihe gleichermaßen auslenkt. Die DE werden in separaten Gehäusen auf der Basisplatte montiert. Dieses Konzept bietet den Vorteil das DE mit unterschiedlichen Geometrien auf der Basisplatte montiert, ermüdet und vermessen werden können.

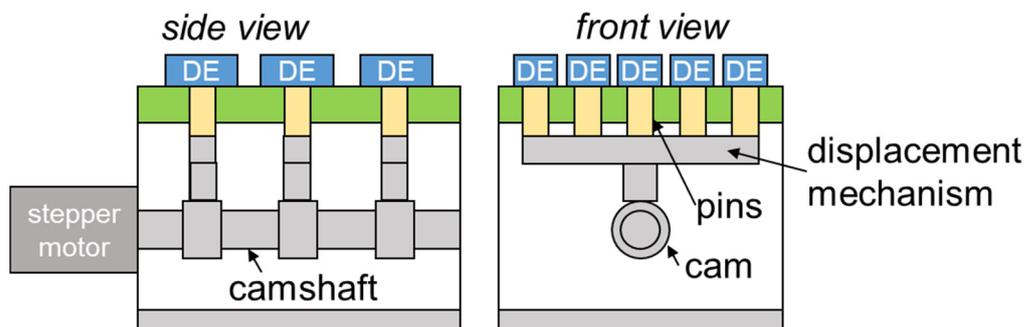


Abbildung 6.18: Schematische Darstellung des Ermüdungsmoduls mit Positionierung der DE

### 6.6.3 Messung Schlüsselparameter

Dieser Abschnitt beschreibt schematisch die Messmethoden der Schlüsselparameter Kraft und Hub während der Ermüdungsprüfung.

#### 6.6.3.1 Kraftmessung

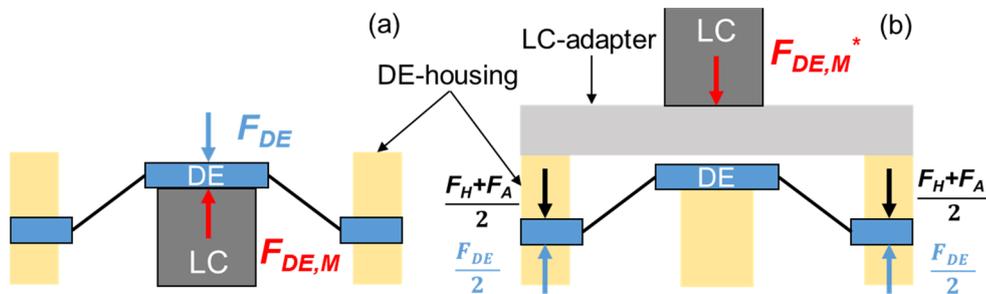
Zur Messung der Reaktionskraft der DE stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen lässt sich die Reaktionskraft direkt am DE messen (Abbildung 6.19 (a)) oder indirekt über das Gehäuse des DE (Abbildung 6.19 (b)). Bei direkter Kraftmessung entspricht die Reaktionskraft  $F_{DE}$  der gemessenen Kraft  $F_{DE,M}$

$$F_{DE,M} = F_{DE} \quad (6.10)$$

Die indirekte Messmethode misst die Reaktionskraft des DE über das Gehäuse des DE. Hierbei wird dessen Deckel durch die Reaktionskraft des DE gegen den Kraftsensor („LC“) gedrückt. Die gemessene Kraft  $F_{DE,M}^*$  wird durch

$$F_{DE,M}^* = F_{DE} - F_H - F_A \quad (6.11)$$

definiert, wobei  $F_H$  die Gewichtskraft des Gehäusedeckels und  $F_A$  die Gewichtskraft Adapters des Kraftsensors beschreiben. Bei dieser Messung wird angenommen, dass keine Reibung vorliegt.



**Abbildung 6.19:** Kraftmessung; (a) direkte Kraftmessung am DE, (b) indirekte Kraftmessung über DE-Gehäuse

Die Messung der Reaktionskraft der DE wird in diesem Aufbau indirekt über die Haltekraft des Gehäusedeckels durchgeführt. Dies ist notwendig, da eine direkte Messung durch den Auslenkungsmechanismus blockiert wird. Eine direkte Messung der Reaktionskraft wäre deshalb nur durch zusätzliche Aktoren, die die Basisplatte anheben zu realisieren. Dies würde allerdings den Aufwand bei Planung, Konstruktion und Fertigung erheblich vergrößern.

### 6.6.3.2 Hubmessung

Der durch den DE erzeugte Hub wird in diesem Aufbau wie in Abbildung 6.20 direkt durch einen Laserdistanzsensord (LS) gemessen. Die Vorspannung des Federsystems wird mit dem Auslenkmechanismus eingestellt und die daraus resultierende Basisauslenkung des DE-Feder-Systems gemessen.

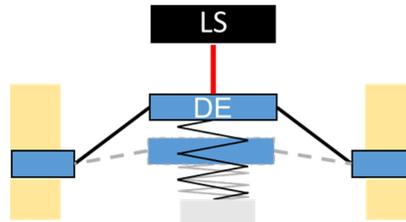


Abbildung 6.20: Schematische Darstellung der Hubmessung

## 6.6.4 Konstruktion

Dieser Abschnitt beschreibt die Konstruktion der mechanischen Komponenten des Ermüdungsprüfstandes. Die Konstruktion wurde in Solidworks 2015 durchgeführt.

### 6.6.4.1 Ermüdungsmodul

#### 6.6.4.1.1 Streifenaktorgehäuse

Die Streifenaktoren sollen einfach auf dem Ermüdungsmodul montiert werden können und dabei vor äußeren Beschädigungen geschützt sein. Aus diesem Grund besitzt jeder DE ein eigenes Gehäuse. Die Gehäuse werden in Gehäuseboden und Gehäusedeckel unterteilt (vgl. Abbildung 6.21).

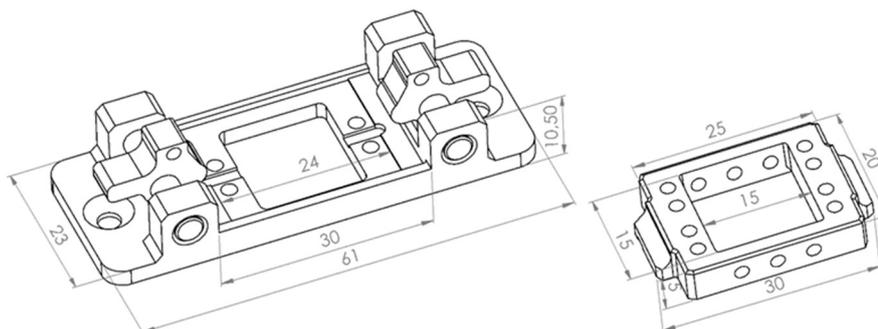
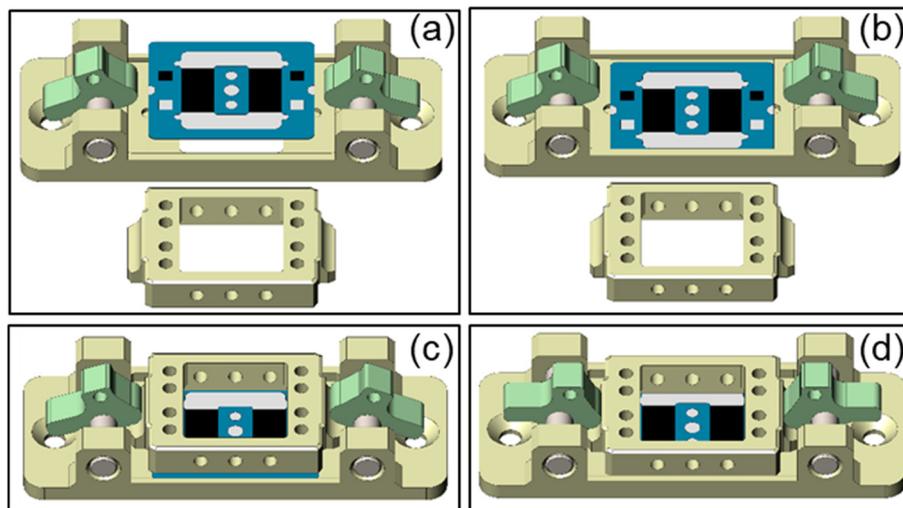


Abbildung 6.21: Skizze des Gehäusebodens & Gehäusedeckels

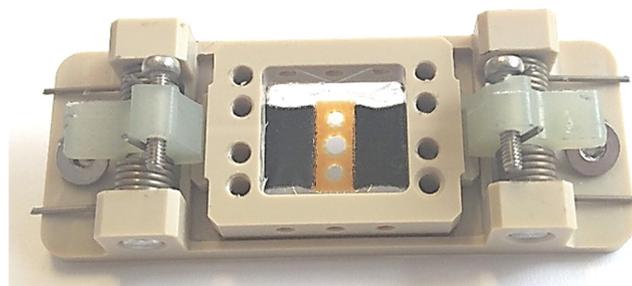
Die Streifenaktoren sollen ohne Einsatz von Werkzeug im Gehäuse befestigt werden können. Deswegen werden zur Befestigung zwei Niederhalter konstruiert, die durch Schenkelfedern den Gehäusedeckel und den Streifenaktor auf den Gehäuseboden drücken. Zur Entnahme des Streifenaktors können die Niederhalter entriegelt werden. Diese

Gehäuse müssen mechanisch stabil und elektrisch isolierend sein. Zusätzlich müssen sie wechselnde Temperaturen aushalten können. Deswegen wurden die Gehäuse aus PEEK gefertigt. Der Vorgang des Einlegens eines Streifenaktors in das Gehäuse ist in Abbildung 6.22 dargestellt. Dabei wird zuerst der Streifenaktor in die dafür vorgesehene Tasche eingelegt (a), danach werden die Niederhalter an ihrer Außenseite nach unten gedrückt (b). Dadurch werden die Niederhalter entriegelt und der Gehäusedeckel kann von der Seite eingeschoben werden (c). Zum Schluss werden die Niederhalter entriegelt und der Gehäusedeckel ist fest mit dem Streifenaktor und dem Gehäuseboden verbunden (d).



**Abbildung 6.22:** Vorgehen zum Einlegen eines DE-Streifenaktors in das Gehäuse; (a) Positionierung des DE am Gehäuse; (b) Einlegen des Aktors in das Gehäuse; (c) Einführen des Gehäusedeckels; (d) Verriegeln des Gehäusedeckels

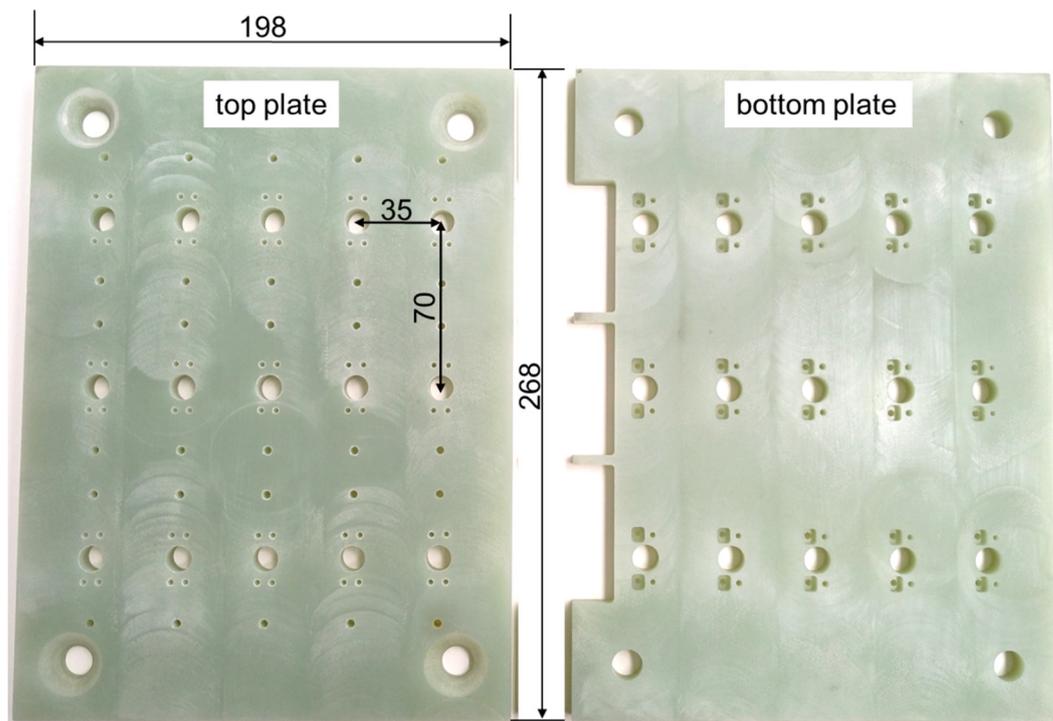
In den realen Streifenhaltergehäusen (siehe Abbildung 6.23) sind die Niederhalter mit Schenkelfedern *Knörzer M07R11* und *M07L11* vorgespannt, die den Gehäusedeckel mit einer Anpresskraft von jeweils  $5\text{ N}$  herunterdrücken.



**Abbildung 6.23:** Streifenaktor in einem Streifenaktorgehäuse

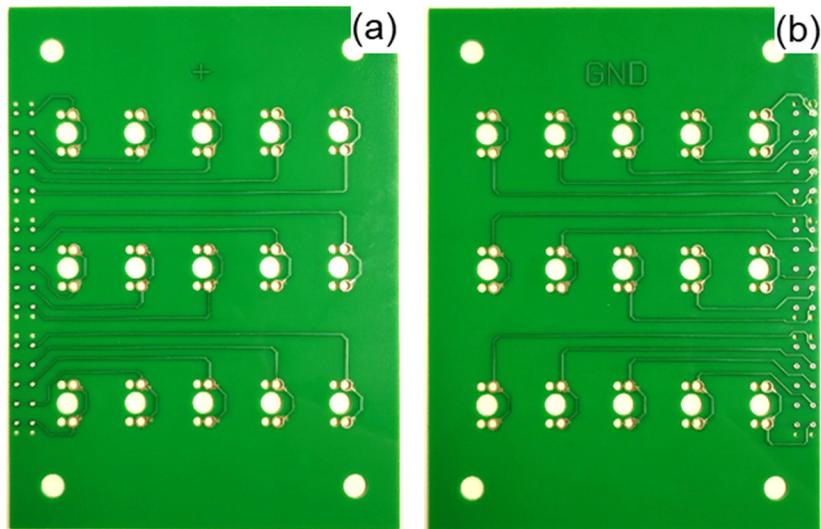
#### 6.6.4.1.2 Basisplatte

Die Basisplatte wird aus drei Teilen aufgebaut. Dabei dienen der obere und untere Teil der Platte zur mechanischen Stabilisierung, elektrischen Isolation und der Befestigung der DE-Gehäuse. Der mittlere Teil der Basisplatte dient zur elektrischen Kontaktierung der DEs. Die Ober- und Unterseite werden aus  $10\text{ mm}$  dickem FR4 gefertigt. Die Basisplatte ist in Abbildung 6.24 dargestellt.



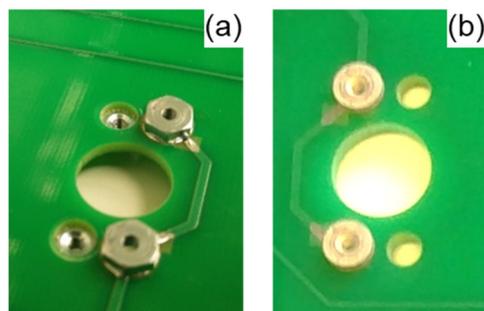
*Abbildung 6.24: Ober- und Unterseite der Basisplatte*

Die Kontaktierungsplatine ist in Abbildung 6.25 dargestellt und wird aus  $2\text{ mm}$  dicken FR4 gefertigt. Die Leiterbahnen bestehen aus Kupfer mit  $35\text{ }\mu\text{m}$  Dicke und  $1\text{ mm}$  Breite und sind beidseitig auf der Platine angebracht. Dabei sind die Hochspannung und das Nullpotential durch den Platinenkörper voneinander getrennt. Die Leiterbahnen sind mit Lötstopplack überzogen und werden mit einem Mindestabstand von  $3\text{ mm}$  zueinander so aufgebracht, um Überschlage der Hochspannung zu verhindern.



**Abbildung 6.25:** Leiterplatte zur Kontaktierung der DE: (a) Hochspannungsseite. (b) Nullpotentialseite

Die Kontaktierung der DE mit der Platine wird durch Setzmutter und Schrauben realisiert. Zuerst werden Sechskant-Setzmutter *Ettinger 02.14.111* verwendet (Abbildung 6.26 (a)). Hierbei werden die Setzmutter auf die Kontakte der Platine gepresst und dort angelötet. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Aufwand bei ihrer Installation relativ hoch ist und der elektrische Kontakt trotz Verlöten bei der Verbindung der Leiterplatte mit der oberen und unteren Basisplatte an einigen Stellen verloren gehen kann. Deswegen werden diese Setzmutter durch *Ettinger 02.17.111* Setzmutter ersetzt (Abbildung 6.26 (b)). Diese Setzmutter werden ausschließlich mit der Platine verpresst, um Kontakt herzustellen. Nach dem Austausch der Setzmutter ist die Kontaktierung der Leiterbahnen mit den Setzmutter gewährleistet.



**Abbildung 6.26:** Elektrische Kontaktierung der Leiterplatte mit Sechskant-Setzmutter (a) und Rund-Setzmutter (b)

Die Basisplatte wird durch Stapeln der einzelnen Plattenelemente aufeinander montiert (vgl. Abbildung 6.27). Die Verbindung der Leiterbahnen zur Hochspannungsversorgung wird durch Kabelterminals *Phoenix Contact MSTB 2,5/9* realisiert.



**Abbildung 6.27:** Reale Basisplatte des Ermüdungsmoduls

#### 6.6.4.1.3 Antriebswelle

Das grundlegende Element des Ermüdungsmoduls ist der Mechanismus zum mechanischen Ermüden der DE. Die Auslenkung zur Ermüdung der DE wird, wie in Kapitel 6.6 festgelegt, von einer Antriebswelle mit Kurvenscheiben erzeugt. Die Kurvenscheiben werden mit Gewindestiften auf der Welle befestigt. Die Kurvenscheiben werden paarweise angebracht, wobei die Kurvenscheiben um  $180^\circ$  zueinander verdreht sind, um Vibrationen des Aufbaus zu verhindern. Die Berechnung der für Vibrationen verantwortlichen Unwuchtkräfte befindet sich in Anhang A.I. Auf der Welle werden Bohrlöcher angebracht in die Gewindestifte greifen und die Kurvenscheiben damit exakt positionieren. Diese Bohrlöcher ermöglichen eine Ausrichtung der Kurvenscheibenpaare in Reihe oder einen Versatz von  $120^\circ$  von Paar zu Paar (siehe Abbildung 6.28). Diese Möglichkeit der Verdrehung der Kurvenscheibenpaare zueinander wird vorgesehen, um Drehmomentprofile variieren zu können.

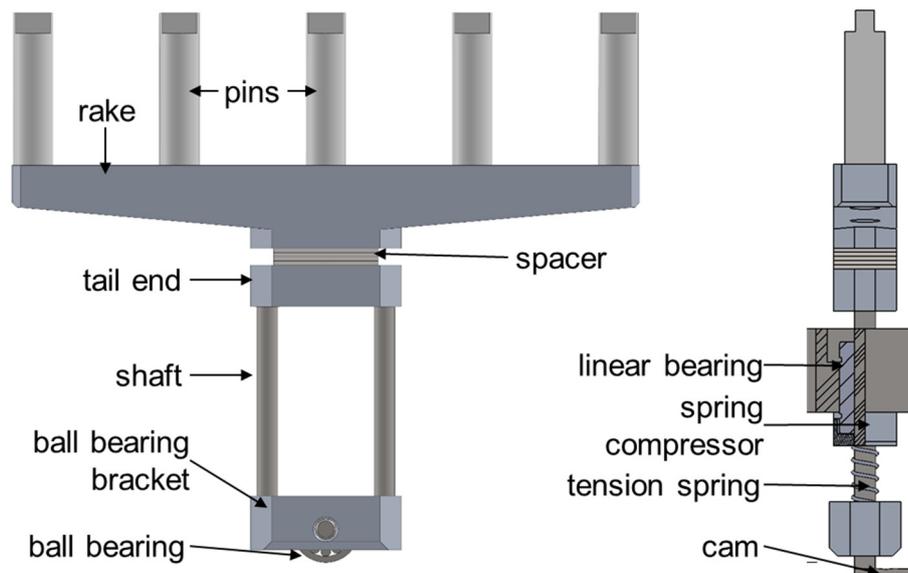


**Abbildung 6.28:** CAD-Modell Antriebswelle; (a) Welle mit Bohrlöchern (b) Kurvenscheibenpaaren mit  $120^\circ$  Verdrehung; (c) Kurvenscheiben in Reihe

#### 6.6.4.1.4 Auslenkungsmechanismus

Der Auslenkungsmechanismus (siehe Abbildung 6.29) dient dazu, die Drehbewegung des Kurvenantriebs in eine Linearbewegung umzuwandeln. Geführt wird der

Auslenkmechanismus durch Linearlager und liegt mit einem Kugellager auf den Kurvenscheiben auf. Der Auslenkmechanismus ist mit linearen Federn vorgespannt, die garantieren, dass das Kugellager während der Bewegung durchgehend auf der Kurvenscheibe abrollt. Auf der Oberseite ist eine sogenannte Harke angebracht, die die Auslenkung mit Stiften auf die DE überträgt. Diese Stifte werden wegen der elektrischen Isolation aus PEEK gefertigt. Die Ausgangshöhen der Kurvenscheiben sind durch ihre exzentrischen Bohrungen bei verschiedenen

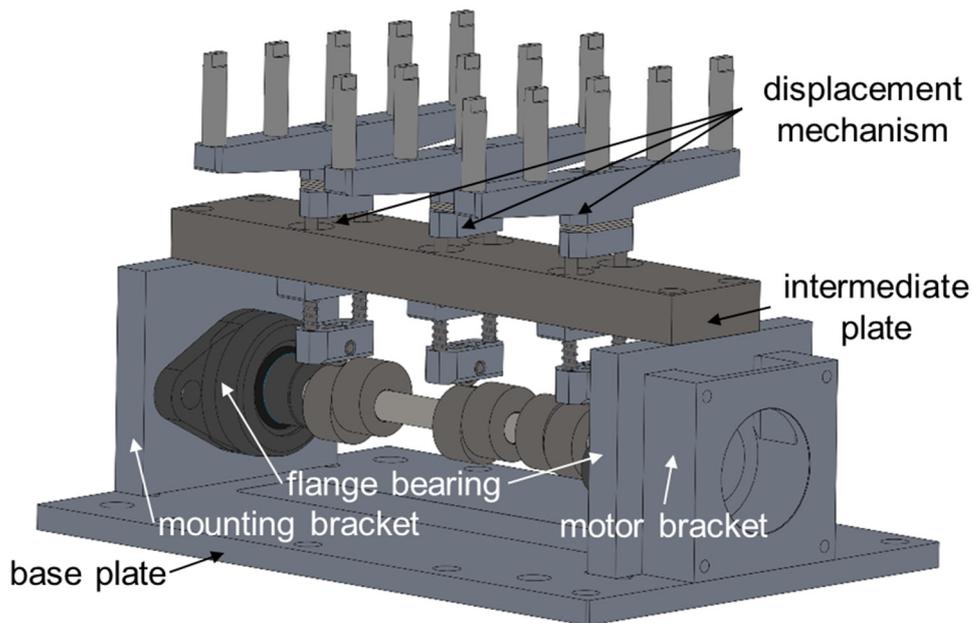


**Abbildung 6.29:** CAD-Modell des Mechanismus zur Erzeugung Auslenkung der DE

maximalen Auslenkungshöhen unterschiedlich. Dies wird durch Distanzplatten unterhalb der Harke kompensiert. Außerdem lässt sich dadurch auch die Vorauslenkung der jeweiligen Reihe einstellen.

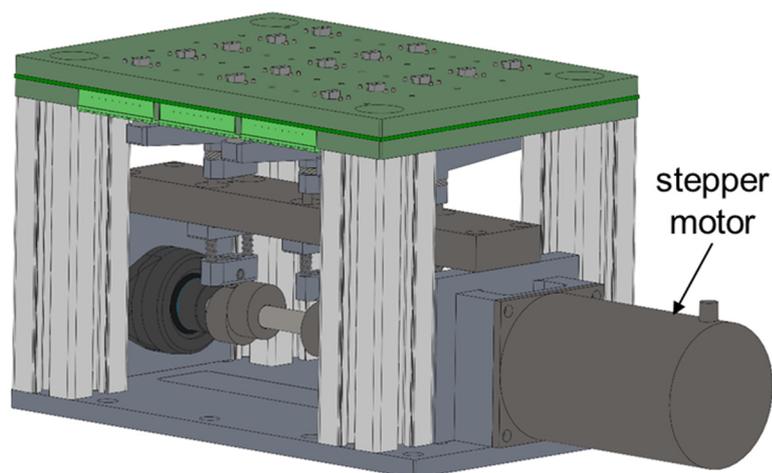
#### 6.6.4.1.5 Zusammensetzung des Ermüdungsmoduls

Das Ermüdungsmodul beherbergt die Lagerung der Antriebswelle und die Halterung der Auslenkmechanismen. Die Welle wird mit Flanschlagern (*INA PCJT12XL*) zur einfachen Montage gelagert. Die Lagerung ist beidseitig an Halterungen befestigt, die mit der Bodenplatte verbunden sind. Die Linearlager (*SDE-05*) der Auslenkungsmechanismen werden in einer Zwischenplatte befestigt und garantieren somit eine korrekte Positionierung. Das Grundgerüst des Ermüdungsmoduls ist in Abbildung 6.30 dargestellt.



**Abbildung 6.30:** CAD-Modell des Grundgerüsts des Ermüdungsmoduls

Die Basisplatte wird auf vier Säulen über den Auslenkungsmechanismen befestigt. Diese Säulen sind Aluminiumprofile (*Rexroth 45mm*) und reduzieren den Fertigungsaufwand. Der Schrittmotor (*Phytron ESS80*) wird an die Motorhalterung angeflanscht und mit einer starren Kupplung mit der Antriebswelle verbunden. Die Stifte, die die DE auslenken, haben einen geringeren Durchmesser als die Durchgangslöcher in der Basisplatte, um Reibung zwischen beiden zu vermeiden. Das ausgearbeitete CAD-Modell des Ermüdungsmoduls ist in Abbildung 6.31 gezeigt.

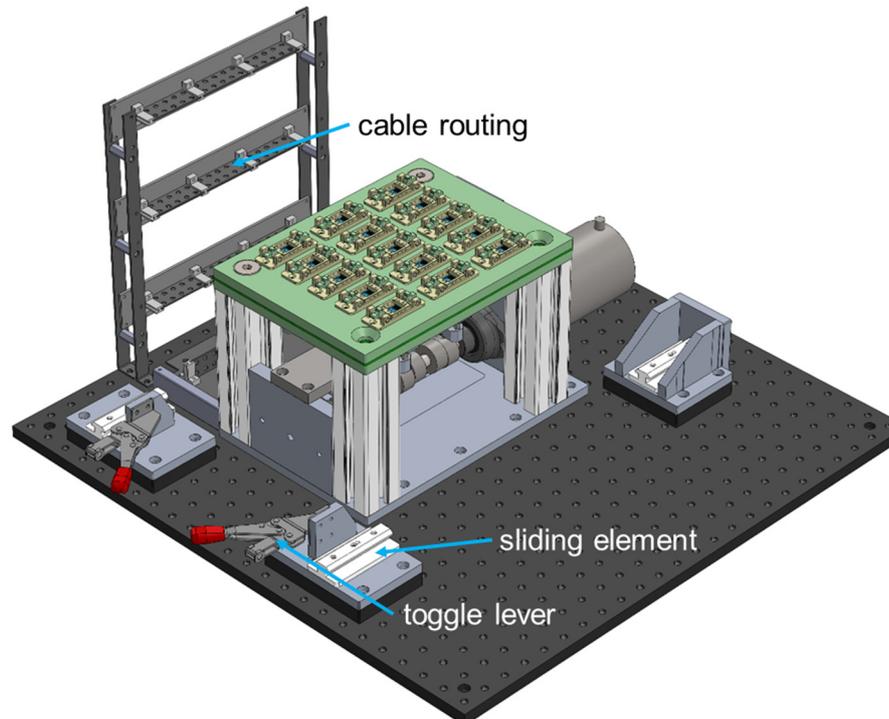


**Abbildung 6.31:** CAD-Modell vollständiges Ermüdungsmodul

Abbildung 6.32 zeigt das Ermüdungsmodul mit Kabelführung und Gleitelementen (*Rexroth Gleitelement MGE*) auf einem Breadboard von Thorlabs. Die Gleitelemente dienen zur Verbindung des Messmoduls mit dem Ermüdungsmodul. Das Messmodul wird

---

durch Kniehebel (*Ganther GN 820.2*) auf Position fixiert. Die Kabel werden in drei Kabelstränge unterteilt, die in eine Kabelführung eingeschoben werden und damit die Kontaktierung der Hochspannungsgruppen mit dem Ermüdungsmodul gewährleisten. Die Gleitelemente zur Lagerung des Messmoduls werden erhöht eingebaut, um eine Durchführung der Kabel unter dem Messmodul zu gewährleisten.

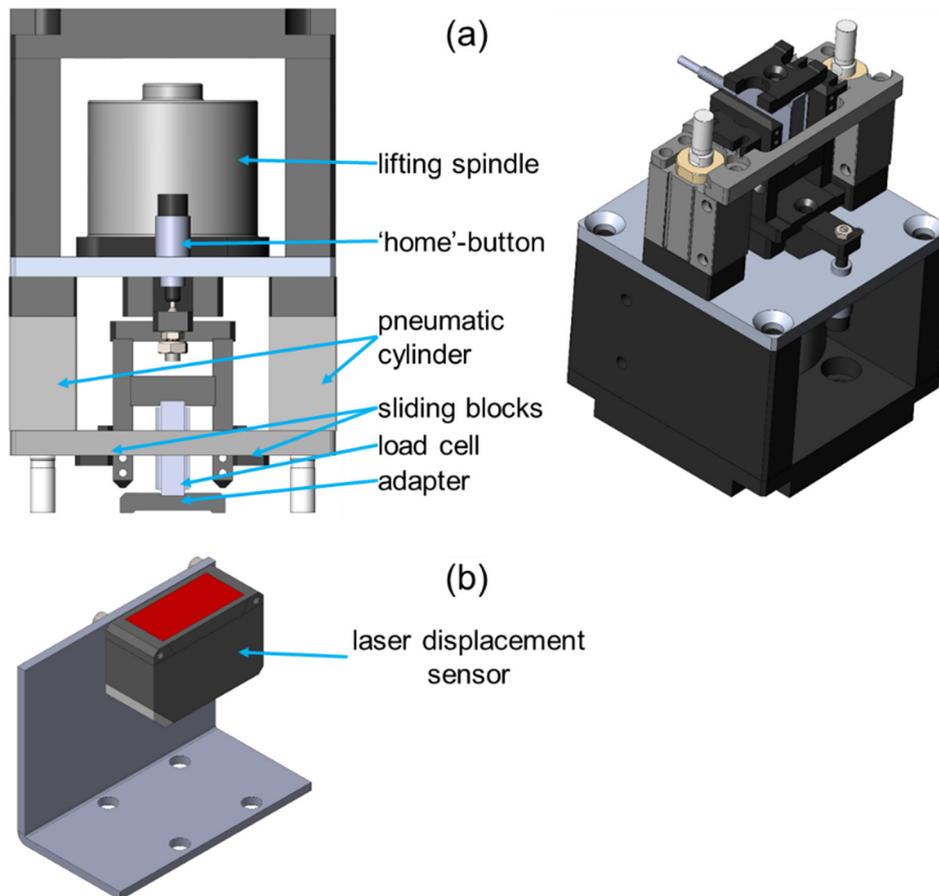


**Abbildung 6.32:** CAD- Modell des Ermüdungsmoduls, Kabelführung und Befestigung für Messmodul

## 6.6.4.2 Messmodul

### 6.6.4.2.1 Messvorrichtungen

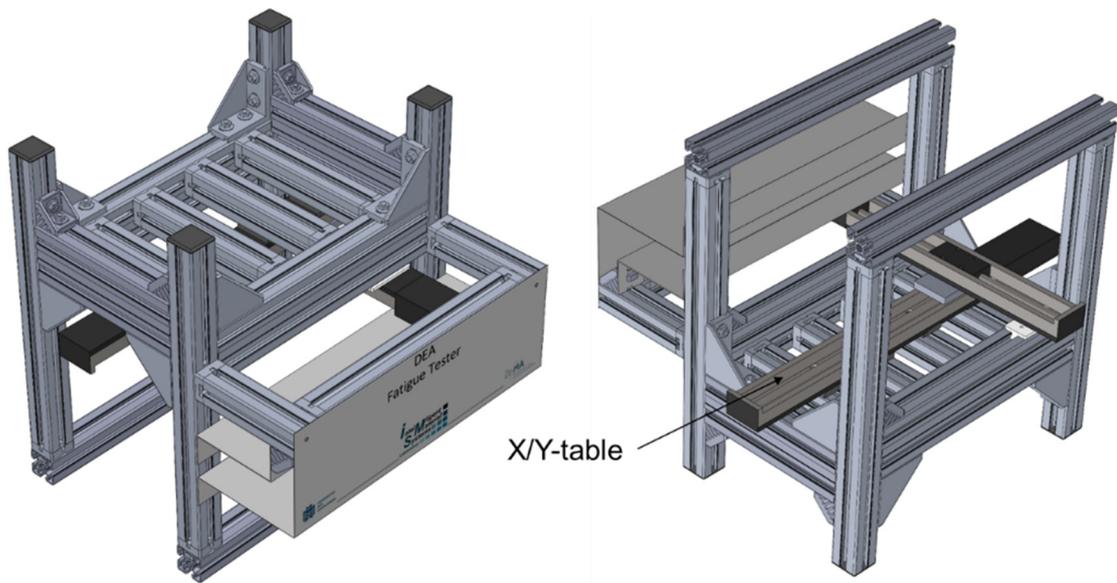
Für jede Ermüdungsart wird eine eigene Messvorrichtung konstruiert. Die Kraftmessung wird durch einen Kraftsensor durchgeführt, der durch einen elektrischen Hubzylinder positioniert wird. Das Entriegeln des DE-Gehäuses wird durch zwei pneumatische Zylinder durchgeführt. Zur Detektion der Grundposition des Kraftsensors sind zwei Taster angebracht. Der Kraftsensor wird durch einen Hubzylinder abgesenkt. Der Käfig des Kraftsensors wird dabei durch Gleitbacken geführt. Diese Vorrichtung ist in Abbildung 6.33 (a) dargestellt. Die Messvorrichtung zur Hubmessung (Abbildung 6.33 (b)) besteht aus einem Laserdistanzsensor, der kontaktlos den Hub der DE misst und einem Adapter zur Verbindung des Sensors mit dem X/Y-Tisch.



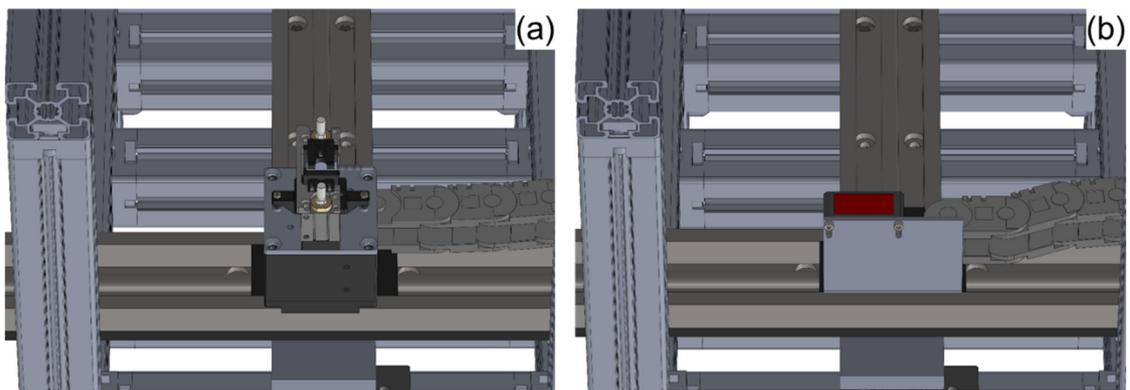
**Abbildung 6.33:** CAD-Modell der Messvorrichtungen: (a) Kraftmessung. (b) Hubmessung

#### 6.6.4.2.2 Zusammensetzung des Messmoduls

Das Messmodul (siehe Abbildung 6.34) beherbergt den X/Y-Tisch (*Jenaer Antriebstechnik XY-400x300-200*) zur Positionierung der Messvorrichtungen über den DE. Das Gerüst des Messmoduls besteht aus Aluminiumprofilen und die Position des X/Y-Tisches ist höhenverstellbar. Die Y-Achse des X/Y-Tisches wird durch passende Gleitelemente (*Rexroth Gleitelement MGE*) mit dem Gerüst beweglich verbunden. Abbildung 6.35 zeigt die Messvorrichtungen auf dem X/Y-Tisch montiert. Die Verbindungskabel der Messvorrichtungen werden durch eine Kabelkette geführt, die zwischen dem Messmodul und der Messvorrichtung montiert ist.



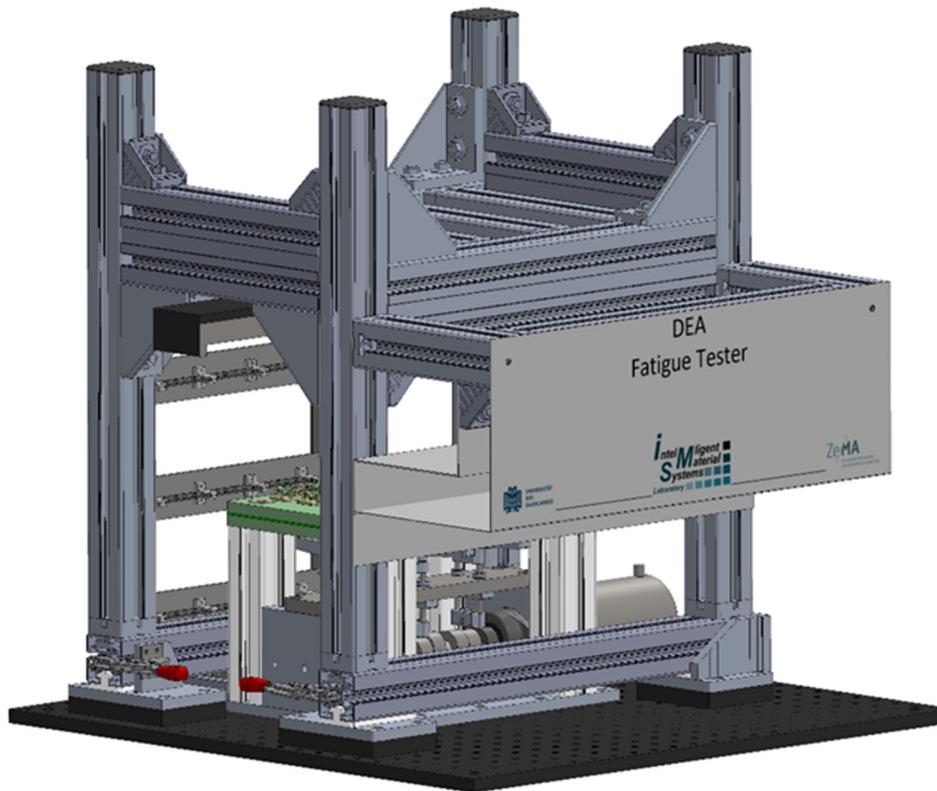
**Abbildung 6.34:** CAD-Modell des Messmoduls



**Abbildung 6.35:** CAD-Modell des Messvorrichtungen montiert im Messmodul:  
 (a) Kraftmessung, (b) Hubmessung

### 6.6.4.3 Ermüdungsprüfstand

Der Teil des Ermüdungsprüfstandes, der sich in dem Klimaprüfschrank befindet, ist in Abbildung 6.36 dargestellt. Zur Vervollständigung der Mechanik des Prüfstandes wird das Messmodul über das Ermüdungsmodul geschoben. Dabei greifen die Gleitelemente in die Nuten der Aluminiumprofile und führen das Messmodul auf seine Position. Schlussendlich wird das Messmodul mit den Kniehebeln auf der Position fixiert.



*Abbildung 6.36: Vollständiges CAD-Modell des Ermüdungsprüfstandes*

## 6.6.5 Benötigte Komponenten

Die benötigten Komponenten zur Realisierung des Ermüdungsprüfstandes werden in diesem Abschnitt angegeben. Die Systemkomponenten der Aktorik des Ermüdungsprüfstandes sind in Tabelle 6.10, die Systemkomponenten zur mechanischen Lagerung in Tabelle 6.11, die verwendeten Sensoren Tabelle 6.12 und die Systemkomponenten der Elektronik sind in Tabelle 6.13 angegeben.

**Tabelle 6.10 Systemkomponenten Aktorik**

<b>Komponente</b>	<b>Spezifikationen</b>			
<b>pneumatischer Zylinder SMC CDUJB10-10DM</b>	Hub	max.	<i>mm</i>	10
	Betriebsdruck	min.	<i>bar</i>	1.5
		max.	<i>bar</i>	7
	Kraft (7 bar)	Einfahren	<i>N</i>	21.44
		Ausfahren	<i>N</i>	35.18
Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-10..60	
<b>Proportionalventil Bürkert 2873</b>	Druckbereich		<i>bar</i>	0..16
	Druckdifferenz	max.	<i>bar</i>	5
	Nennweite		<i>mm</i>	1.5
	Medien		<i>neutrale Gase</i>	
	Betriebstemperatur	max.	<i>°C</i>	55
<b>Jenaer Antriebstechnik XY-400x300-200</b>	Verfahrweg	X-Achse	<i>mm</i>	400
		Y-Achse	<i>mm</i>	300
	Geschwindigkeit	max.	<i>m/s</i>	0.5
	Beschleunigung	max.	<i>m/s<sup>2</sup></i>	6
	Auflösung Messsystem		<i>µm</i>	1
	Wiederholgenauigkeit		<i>µm</i>	2
	Absolutgenauigkeit		<i>µm</i>	±20
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	10..40
<b>PHYTRON ESS 80-2.200.7,5</b>	Haltemoment		<i>Nm</i>	2.45
	Selbthaltemoment		<i>Nm</i>	0.12
	Bemessungsspannung	min.	<i>VAC</i>	200
	Strom pro Phase		<i>A</i>	7.5
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-40..150
	Luftfeuchtigkeit		<i>% rel.</i>	0..98
<b>Hubzylinder Crouzet el. Linearantrieb</b>	Kraft	max.	<i>N</i>	58
	Hub	max.	<i>mm</i>	10
	Geschwindigkeit	max.	<i>mm/s</i>	3.33
	Nennspannung		<i>VDC</i>	5.6
	Schrittauflösung	Vollschritt	<i>mm</i>	0.0167
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-5..75

Tabelle 6.11: Systemkomponenten Mechanik

<b>Komponente</b>	<b>Spezifikationen</b>			
<b>Flanschlager INA PCJT12-XL</b>	Tragzahl	dyn.	<i>N</i>	10100
		stat.	<i>N</i>	4750
	Ermüdungsgrenzbelastung		<i>N</i>	241
	Außendurchmesser		<i>mm</i>	40
	Innendurchmesser		<i>mm</i>	12
	Schmierstoff	GA01	<i>Polyharnstoff Esteröl</i>	
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-40..180
<b>Linearkugellager SDE-05</b>	Tragzahl	dyn.	<i>N</i>	168
		stat.	<i>N</i>	308
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-20..120
	Mantel	<i>Vollstahl</i>		
<b>Kugellager SKF Explorer 625</b>	Tragzahl	dyn.	<i>N</i>	1100
		stat.	<i>N</i>	380
	Ermüdungsgrenzbelastung		<i>N</i>	16
	Grenzdrehzahl		<i>U/min</i>	48000
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-40..120
<b>Kniehebel Ganther GN 820.2</b>	Haltekraft		<i>N</i>	900
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-40..120
<b>Ausgleichskupplung Maedler KA, kurz, Edelstahl</b>	Betriebsdrehmoment	max.	<i>Nm</i>	10
	Winkelversatz	max.	<i>°</i>	5
	Parallelversatz	max.	<i>mm</i>	0.127
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	-40..120

Tabelle 6.12: Systemkomponenten Sensorik

<b>Komponente</b>	<b>Spezifikationen</b>			
<b>Kraftsensor Futek LSB200 FSH0091</b>	Messbereich		<i>N</i>	±4.5
	Nichtlinearität		<i>% d.M.</i>	±0.1
	Hysterese		<i>% d.M.</i>	±0.1
	Nichtwiederholbarkeit		<i>% d.M.</i>	±0.05
	Versorgungsspannung		<i>VDC</i>	0..10
	Brückenwiderstand		<i>Ω</i>	350
	Eigenfrequenz		<i>Hz</i>	930
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	15..72
	<b>Laser-Wegsensor optoNCDT 1320</b>	Messbereich		<i>mm</i>
Linearität			<i>% d.M.</i>	±0.12
	Reproduzierbarkeit <sup>1)</sup>		<i>μm</i>	5
	Versorgungsspannung		<i>VDC</i>	11...30
	Messraten		<i>kHz</i>	0.25/0.5 /1/2
	Betriebstemperatur		<i>°C</i>	0...50
	Messwertausgang	analog	<i>mA</i>	4..20
		<sup>1)</sup> Messrate 1 kHz; d.M. = des Messbereichs		

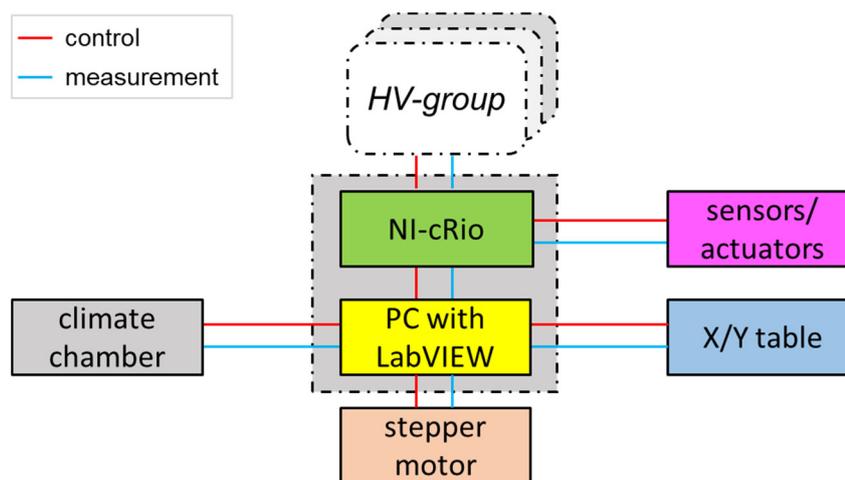
**Tabelle 6.13: Systemkomponenten Elektronik**

<b>Komponente</b>	<b>Spezifikationen</b>		
<b>Sicherheitsrelais pilz PNOZ X3</b>	Schaltspannung		<i>VAC</i> 230
	Versorgungsspannung		<i>VDC</i> 24
	Strom	max.	<i>A</i> 6
	Sicherheitskontakte unverzögert:		3
	Betriebstemperatur		°C -20..55
	Betriebsart		<i>manueller Start</i>
<b>Schrittmotor Treiber TB6560 3A</b>	Versorgungsspannung	min.	<i>VDC</i> 10
		max.	<i>VDC</i> 35
	Nennausgangsstrom	min.	<i>A</i> 0.3
		max.	<i>A</i> 3
	Schrittauflösung	min.	<i>Vollschritt</i>
		max.	<i>1/16-Schritt</i>
<b>Reed-Relais GÜNTHER 3391.1290.246</b>	Schaltspannung	max.	<i>VAC<sub>peak</sub>/VDC</i> 7 500
	Spannungsfestigkeit	min.	<i>VDC</i> 10 000
	Schaltleistung	max.	<i>W</i> 50
	Schaltstrom	max.	<i>A</i> 3
	Durchgangswiderstand	max.	<i>mΩ</i> 250
	Spannungsfestigkeit	Spule/Kontakt	<i>VDC</i> 20 000
	Betriebstemperatur		°C -20..70
	Ansprechzeit inkl. Prellzeit	max.	<i>ms</i> 3.5
	Rückfallzeit		<i>ms</i> 1.5
<b>Hochspannungskabel HiVOLT HSL-20-0.38-B-9</b>	Spannungsfestigkeit	max.	<i>VDC</i> 20000
	Betriebstemperatur		°C -50..150
<b>Schaltrelais Takamisawa NY5W-K</b>	Schaltspannung	max.	<i>VDC</i> 125
			<i>VAC</i> 270
	Spannungsfestigkeit	max.	<i>VAC</i> 750
	Schaltstrom	max.	<i>A</i> 5
	Durchgangswiderstand	max.	<i>mΩ</i> 30
	Spannungsfestigkeit	Spule/Kontakt	<i>VAC</i> 3 000
	Betriebstemperatur		°C -40..+90
	Ansprechzeit inkl. Prellzeit	max.	<i>ms</i> 10
	Rückfallzeit	max.	<i>ms</i> 5
<b>Umschaltrelais Takamisawa FTR-H1</b>	Schaltspannung	max.	<i>VDC</i> 300
			<i>VAC</i> 380
	Spannungsfestigkeit	max.	<i>VAC</i> 750
	Schaltstrom	max.	<i>A</i> 10
	Durchgangswiderstand	max.	<i>mΩ</i> 100
	Spannungsfestigkeit	Spule/Kontakt	<i>VDC</i> 5 000
	Betriebstemperatur		°C -40..+75
	Ansprechzeit inkl. Prellzeit	max.	<i>ms</i> 10
	Rückfallzeit	max.	<i>ms</i> 5

## 6.7 Steuerung und Messdatenerfassung

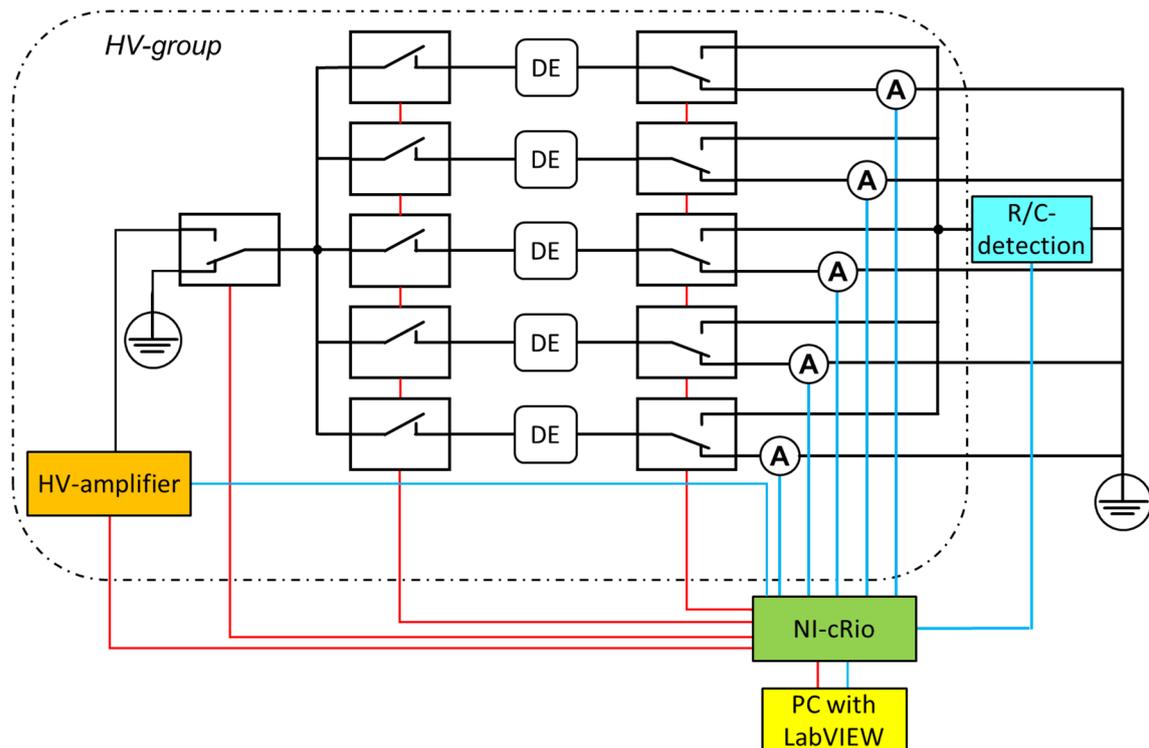
### 6.7.1 Steuerungskonzept

Das Steuerungskonzept des Ermüdungsprüfstandes basiert auf einem echtzeitfähigen System. Hauptbestandteil der zentralen Steuerung des Ermüdungsprüfstandes ist ein Computer mit LabVIEW Interface, der direkt über einen seriellen Bus mit den Controllern des Schrittmotors des X/Y-Tisches und des Klimaprüfschranks kommuniziert (siehe Abbildung 6.37).



**Abbildung 6.37:** Steuerungskonzept des Ermüdungsprüfstandes

Die Steuerung ermöglicht die Ermüdung und Untersuchung der DE nach den in Kapitel 6.3 beschriebenen Prüfzenarien. Zur synchronisierten Messdatenerfassung wird zusätzlich ein FPGA-System in die Steuerung eingebunden. Dieses FPGA-System ist ein *cRio 9074* von National Instruments und wird auch zur Regelung der Aktoren im Messmodul genutzt. Außerdem steuert dieses System die Relais und Hochspannungsverstärker der Hochspannungsgruppen (siehe Abbildung 6.38). Jede der DE-Gruppen verfügt über eine eigene Hochspannungsgruppe, die eine Versorgung der DE mit Hochspannung ermöglicht. Im Falle des Versagens eines DE wird die Hochspannung durch ein Reed-Relais separat abgeschaltet. Zwischen diesen Relais und dem Hochspannungsverstärker befindet sich bei jeder Gruppe ein zusätzlicher Umschalter, der entweder gegen Erde (Standard) oder zum Verstärker schaltet. Bei dem FPGA-System handelt es sich um ein *cRio 9074* mit acht Slots. Die Sensordaten werden von Messmodulen (C-Serie) ausgelesen und synchronisiert erfasst. Die Steuerung der Relais und Hochspannungsverstärker wird von Steuermodulen (ebenfalls C-Serie) übernommen.



**Abbildung 6.38:** Steuerungskonzept der Hochspannungsgruppe für eine DE-Gruppe

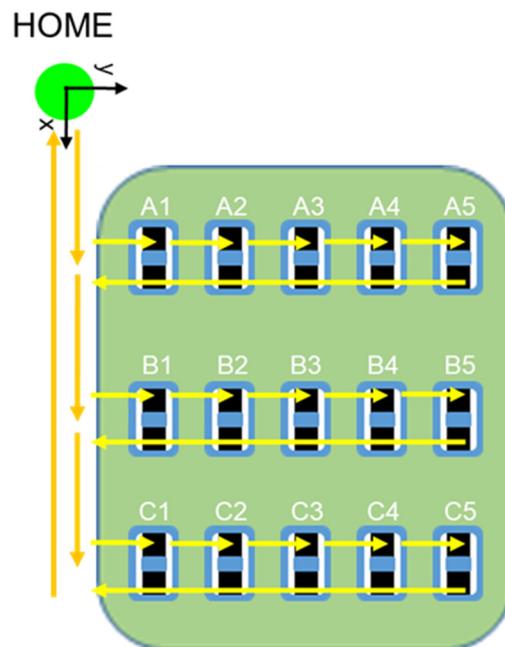
Die Auswahl der einzelnen Module wird durch die Anzahl der benötigten Ein- und Ausgänge sowie deren Samplerate bestimmt. Zum Betrieb des gesamten Ermüdungsprüfstandes werden insgesamt 44 digitale (+5 V) und drei analoge ( $\pm 10 V$ ) Ausgänge sowie 17 analoge Eingänge ( $\pm 10 V$ ) und eine Messbrücke benötigt. Zwei Analogeingänge ( $\pm 10 V$ ) sind zur Erkennung der Kapazität und des Widerstandes der DE vorgesehen. Sie müssen deswegen eine Samplerate von  $100 \text{ kS/s}$  erreichen. Die maximale Anzahl von digitalen Eingängen liegt bei den cRio Modulen bei 32, deshalb müssen zwei Digitalmodule eingesetzt werden. Eine Aufstellung der verwendeten Module ist in Tabelle 6.14 angegeben.

**Tabelle 6.14:** Verwendete Module zum Messen und Steuern

Name	Modulart	Anzahl	Bereich	Genauigkeit	Kanäle	Samplerate	Strom
NI9403	DIO	2	+5V	-	32	$140 \text{ kS/s}$ pro Kanal	64mA
NI9205	AI	1	$\pm 10V$	6.22 mV	32	$250 \text{ kS/s}$ gesamt	-
NI9215	AI	1	$\pm 10V$	3.456 mV	4	$100 \text{ kS/s}$ pro Kanal	-
NI9237	Brücke	1	+10V	$0.0375 \text{ mV/V}$	4	$50 \text{ kS/s}$ pro Kanal	15mA
NI9263	AO	1	$\pm 10V$	10 mV	4	$100 \text{ kS/s}$ pro Kanal	20mA

### 6.7.2 Positionierung Messvorrichtung

Die Positionierung der Messvorrichtung wird durch den X/Y-Tisch durchgeführt. Hierbei werden durch die Y-Achse die Reihen (A, B, C) angefahren. Befindet sich die Y-Achse in Position, werden nacheinander die Positionen 1 bis 5 durch die X-Achse die DE angefahren und vermessen. Ist die gesamte Reihe vermessen fährt die X-Achse die Messvorrichtung auf die Ausgangsposition zurück. Dieser Vorgang wird für jede Reihe wiederholt. Dieser Bewegungspfad ist bei der Messung der Kraft und des Hubes identisch (siehe Abbildung 6.39).



*Abbildung 6.39: Bewegungspfad zur Positionierung der Messvorrichtung über dem Ermüdungsmodul*

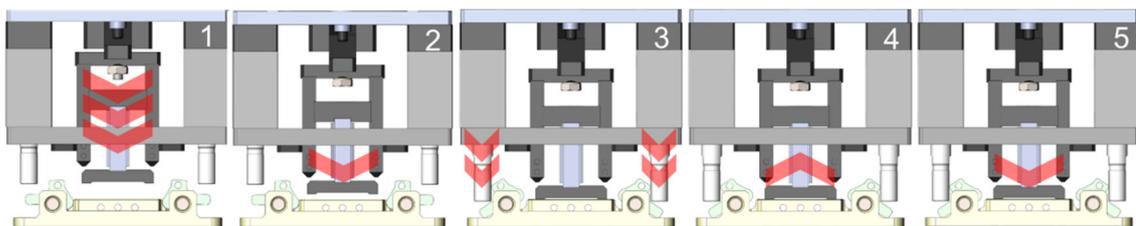
### 6.7.3 Kontaktierung Kraftsensor

Die Kontaktierung des Kraftsensors mit dem DE-Gehäuse wird durch ein FPGA-Programm realisiert. Die Reaktionskraft der Aktoren, die beim Auslenken der DE auftritt, wird durch einen Kraftsensor gemessen. Der Kraftsensor benötigt dafür Kontakt zu dem Aktor. Dieser Kontakt wird durch das Absenken des Kraftsensors durch den elektrischen Hubzylinder auf das Gehäuse des DE realisiert. Dieser Hubzylinder wird durch einen Schrittmotor angetrieben. Die Kontaktierung wird durch einen einfachen Regler realisiert. Hierbei wird zuerst die Kraft am Kraftsensor gemessen und mit einer vorgegebenen Kraft verglichen. Diese vorgegebenen Kräfte sind die Kontaktkraft  $F_C$ , die während des Entriegelns das Gehäuse festhält und die Anpresskraft  $F_0$ , mit der der Kraftsensor während der Messung

---

auf die DE gepresst wird. Die Kontaktierung des Kraftsensors mit dem Gehäuse ist in fünf Schritten unterteilt und in Abbildung 6.40 abgebildet.

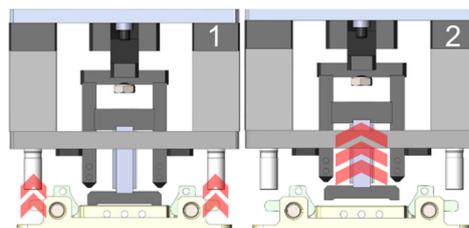
1. Zuerst wird der Kraftsensor im Schnellgang abgesenkt. Damit wird der Großteil der Distanz zwischen Kraftsensor und Aktorgehäuse überbrückt.
2. Der Kraftsensor wird auf das Aktorgehäuse abgesenkt. Dieser wird solange abgesenkt bis die Kontaktkraft unterschritten wird.
3. Die pneumatischen Zylinder werden abgesenkt und dadurch der Gehäusedeckel entriegelt.
4. Durch die Entriegelung ändert sich die gemessene Kraft. Der Kraftsensor wird an die vorgegebene Anpresskraft justiert, indem der Elektrozyylinder solange angehoben wird bis die gemessene Kraft größer oder gleich der Anpresskraft ist.
5. Der Elektrozyylinder wird solange gegen das Aktorgehäuse gefahren bis die gemessene Kraft kleiner oder gleich der vorgegebenen Anpresskraft ist.



**Abbildung 6.40:** Absenken des Kraftsensors auf das DE-Gehäuse zur Messung der DE-Reaktionskräfte

Nach der Kraftmessung muss das DE-Gehäuse verriegelt und der Kraftsensor in die Ausgangsposition zurückgefahren werden. Das Zurückfahren des Kraftsensors in die Ausgangsstellung (siehe Abbildung 6.41) wird durch ein eigenes FPGA-Programm ausgeführt und ist in zwei Teile gegliedert

1. Die pneumatischen Zylinder werden eingefahren und damit das DE-Gehäuse verriegelt.
2. Danach wird der Kraftsensor durch den Hubzylinder im Schnellgang hochgefahren bis er sich in Ausgangsposition befindet.



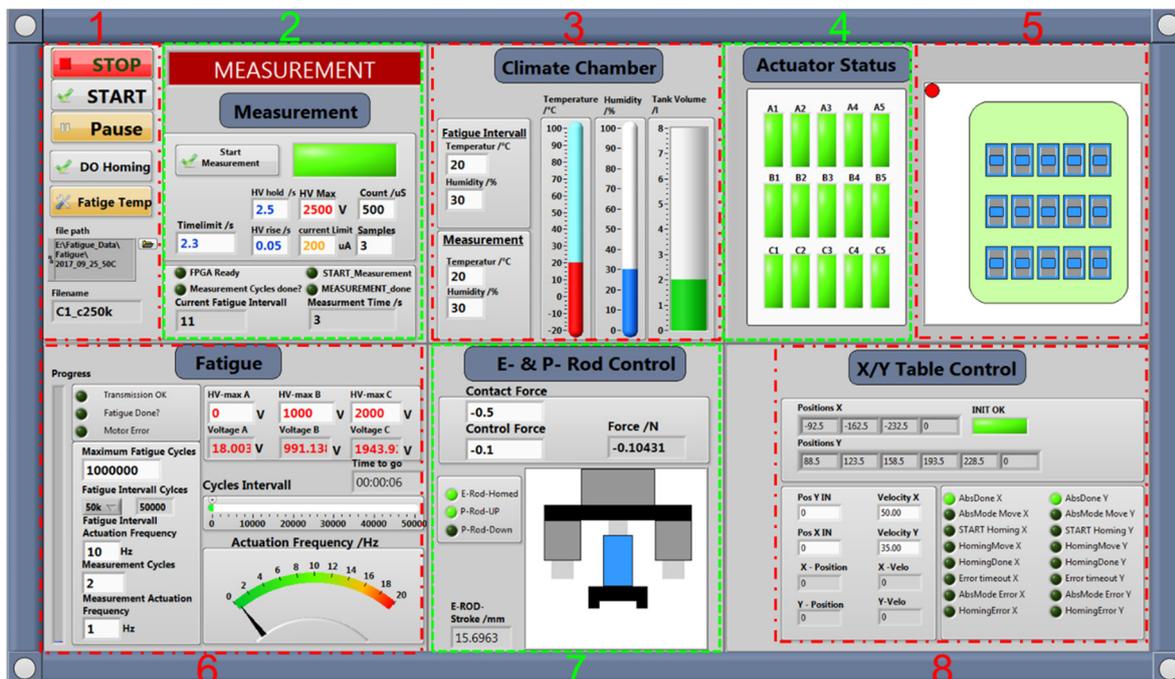
**Abbildung 6.41:** Verriegeln des DE-Gehäuses und Zurückfahren des Kraftsensors

Die Implementierung dieser Positionierungsvorgänge in LabVIEW ist in Anhang B ausführlich dargestellt.

### 6.7.4 Ansteuerung Gesamtprüfstand

Dieser Abschnitt beschreibt die Verwendung der LabVIEW-Benutzeroberfläche des Ermüdungsprüfstandes. Zusätzlich werden die Funktionen der einzelnen Bereiche beschrieben.

Die LabVIEW-Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 6.42) ist so gestaltet, dass alle zur Prozessführung erforderlichen Variablen direkt vorgegeben beziehungsweise aktuelle Werte abgelesen werden können. Die Steuerung der Hardwarekomponenten und die Messdatenerfassung übernehmen Unterprogramme (SubVI's). Diese werden in Anhang B beschrieben.



**Abbildung 6.42:** Benutzeroberfläche des Steuerungsprogramms des Ermüdungsprüfstandes unterteilt in Steuerung und Überwachung der einzelnen Funktionen

Eine Beschreibung der einzelnen Bereiche und deren Funktion aus Abbildung 6.42 wird im Folgenden nach ihrer Nummerierung gegeben.

1. **Hauptsteuerung:** Dieser Bereich dient der übergeordneten Steuerung der Ermüdungsprüfung. Durch die Schaltknöpfe kann die Ermüdungsprüfung gestartet, gestoppt oder pausiert werden. Außerdem kann durch die ‚Fatigue Temp‘-Schaltfläche vorgegeben werden, ob sich die Temperatur der Mess- und

---

Ermüdungsintervalle unterscheidet. Zudem kann hier manuell eine Referenzierung des X/Y-Tisches („DO Homing“) gestartet werden. Zusätzlich wird hier der Speicherort der Messdaten eingestellt.

2. **Messintervalle:** Die Werte der Messintervalle werden in diesem Bereich vorgegeben. Hierzu gehören die Samplezeit sowie die Anzahl der gemessenen Samples in dieser Zeit wie auch die Vorgabe der Hochspannungswerte während der Messungen. Außerdem wird der FPGA auf eventuelle Störungen überwacht.
3. **Steuerung Klimaschrank:** Dieser Bereich bietet die Einstellungsmöglichkeiten der Temperatur und Luftfeuchtigkeit für Mess- und Ermüdungsintervalle. Zusätzlich ist eine Überwachung der Bedingungen im Klimaprüfschrank gegeben.
4. **DE-Status:** Der Status eines jeden DE (grün: nicht versagt, rot: elektrisch versagt) ist hier für jede Position auf dem Ermüdungsmodul dargestellt.
5. **Stellposition Messvorrichtung:** In diesem Bereich wird die Stellposition des X/Y-Tisches grafisch dargestellt. Der Kreis bewegt sich entsprechend der Position der Messvorrichtung über dem Ermüdungsmodul in der Grafik.
6. **Ermüdungsintervalle:** Die maximale Anzahl der Ermüdungszyklen sowie die Längen der Ermüdungsintervalle werden in diesem Bereich vorgegeben. Außerdem werden die Hochspannungen der einzelnen Reihen während der Ermüdungsintervalle eingestellt und deren Werte überwacht. Zusätzlich werden durch Fortschrittsbalken der Stand des gegenwärtigen Ermüdungsintervall sowie der gesamten Ermüdungsprüfung dargestellt.
7. **Steuerung Kraftmessung:** Dieser Bereich dient der Steuerung und Überwachung der Messvorrichtungen. Hier ist insbesondere die Vorrichtung zur Kraftmessung dargestellt. Es werden die Stellungen des elektrischen sowie der pneumatischen Hubzylindern sowohl graphisch als auch als Zahlenwert dargestellt. Die Werte der Anpresskräfte werden eingestellt und der gemessene Kraftwert wird zur Kontrolle dargestellt.
8. **Steuerung X/Y-Tisch:** In diesem Sektor werden die Positionen der Aktoren in X- und Y-Richtung eingestellt. Zusätzlich werden die Fahrgeschwindigkeiten in jeder Richtung vorgeben. Außerdem werden die gegenwärtigen Werte für Position und Geschwindigkeit dargestellt und eventuelle Störungen des X/Y-Tisches angezeigt.

### 6.7.5 Messdatenmanagement

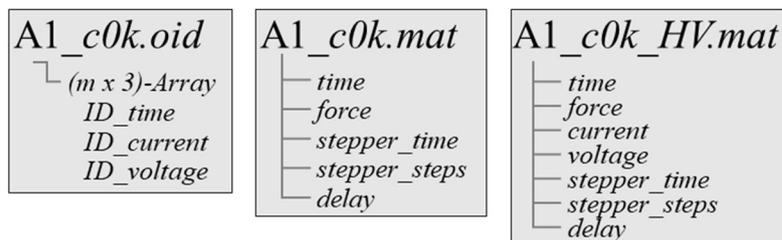
Eine Ermüdungsprüfung erzeugt generell große Mengen an Messdaten. Darum ist es notwendig, die Messdaten möglichst effizient zu speichern. Die Messdatenerfassung wird durch LabVIEW umgesetzt. Diese Entwicklungsumgebung hat mehrere Möglichkeiten die generierten Messdaten dauerhaft abzuspeichern. Die gängigsten Methoden sind die Übertragung der Messdaten in eine externe Datenbank und das Abspeichern der Messdaten in Dateien auf der Festplatte. Für diesen Ermüdungsprüfstand wird eine Speicherung der Messdaten in Dateien verwendet, da eine Datenbank zusätzliche Belegung des Arbeitsspeichers bedeutet und die Kommunikation zwischen LabVIEW und Datenbank sehr rechenintensiv ist. Bei der Speicherung der Messdaten in Dateien ist es wichtig ein Dateiformat auszuwählen, das eine geringe Dateigröße und eine eindeutige Bezeichnung der Messgrößen ermöglicht. Dafür sind drei Dateiformate besonders geeignet.

- **ASCII** ist die standardmäßige 7-Bit Zeichenkodierung [154] und wird in Textdateien gespeichert. Die Daten werden hierbei nicht komprimiert und in Form eines einzigen Datenarrays gespeichert. Jede Spalte dieses Arrays repräsentiert eine Messgröße. Die Identifikation der Spalten lässt sich über Kopfzeilen in der Datei handhaben, lässt aber noch Spielraum für Verwechslungen.
- **HDF5** wurde für die Speicherung großer Datenmengen in wissenschaftlichen Anwendungen entwickelt [155]. Hierbei werden die Daten hierarchisch in Gruppen und Untergruppen gespeichert, was eine eindeutige Benennung der einzelnen Datenarrays ermöglicht. Die Dateien können komprimiert werden, wobei die Komprimierungsart wählbar ist. Bei der Komprimierung werden aber temporäre Dateien angelegt, die die Festplattennutzung erhöhen.
- **MAT** ist das Matlab eigene Dateiformat [156] und benutzt standardmäßig ‚*buffered in-memory gzip*‘-Kompression, die die Daten vor dem Speichern auf der Festplatte komprimiert und somit keine temporären Dateien erzeugt. Bei diesem Dateiformat können die Daten ebenfalls hierarchisch in einer Struktur gespeichert werden. Dies ermöglicht die eindeutige Identifizierung einzelner Datenarrays. Zusätzlich werden Datenarrays mit gleichem Inhalt nicht mehrfach abgespeichert, sondern nur Referenzen (‚*shallow-copy*‘) auf ein einziges Datenarray angelegt, was zusätzlich den Speicherplatz verringert.

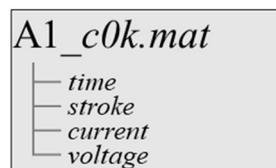
Zur Speicherung der Messdaten wird das MAT-Format ausgewählt. Dies hat den Vorteil, dass die Datenarrays eine eindeutige Bezeichnung entsprechend der gemessenen

Messgröße erhalten und dadurch die weitere Verarbeitung in Matlab erleichtern. Abbildung 6.43 zeigt beispielhaft die erzeugten Dateien zur Speicherung der Messdaten. Hierbei ist zu beachten, dass bei mechanischer Ermüdung und Messung der Reaktionskraft zwei Messungen durchgeführt werden. Bei der Messung der Reaktionskraft bei Niederspannung werden zwei Dateien erzeugt. Die Konvertierung der Messdaten zur R/C-Identifikation in MAT-Format in LabVIEW ist aufgrund der Datenmenge sehr zeitaufwendig. Deswegen werden diese Daten separat als ASCII-Textdatei abgespeichert. Dabei entspricht die erste Spalte der Zeit, die zweite Spalte dem Stromsignal und die dritte Spalte dem Spannungssignal.

### mechanical fatigue

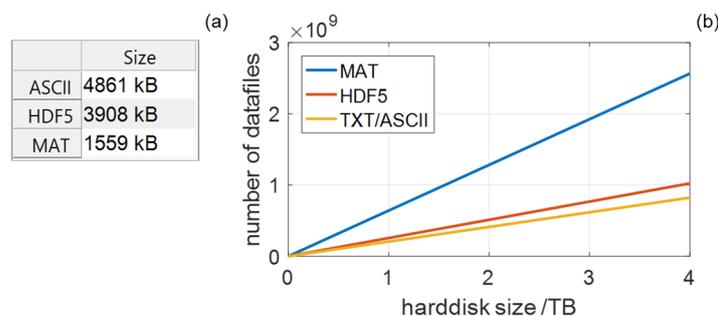


### electrical fatigue



**Abbildung 6.43:** Erzeugte Messdateien für mechanische und elektrische Ermüdung

Zur Aufbewahrung der Messdaten werden zwei separate Festplatten in einem RAID1 zur Erzeugung doppelter Redundanz verwendet. Die Größe der Festplatten wird nach der Anzahl der speicherbaren Dateien ausgewählt. Hierbei wird ein Zufalls-Array von 100000x5 mit LabVIEW und dem FPGA aufgenommen und in verschiedenen Dateiformaten gespeichert. Abbildung 6.44 zeigt die Dateigröße in Abhängigkeit des



**Abbildung 6.44:** Messdatenaufkommen; (a) Dateigrößen des Messdaten-Array, (b) Anzahl der speicherbaren Dateien in Abhängigkeit der Festplattengröße

Dateiformates und die maximale Anzahl von solchen Dateien, die bei verschiedenen Festplattengrößen gespeichert werden können. Aus dieser Aufstellung geht zum einen hervor, dass das Abspeichern der Daten im MAT-Format eine hohe Komprimierung erzielt und zum anderen, dass eine Festplattengröße von 3TB ausreichend ist.

### 6.7.6 Konzeptentwicklung Datenverwaltung

*Dieser Abschnitt beschreibt die Entwicklung eines Konzeptes zur Datenverwaltung der erzeugten Messdaten unter bestimmten Anforderungen in einer Messdatenstruktur.*

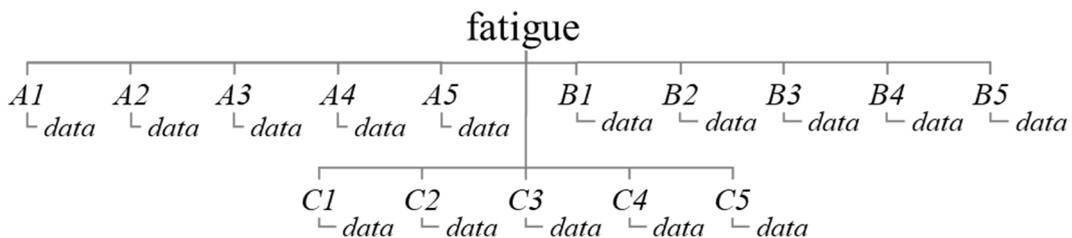
Ermüdungsprüfungen generieren eine große Menge an Messdaten, aus denen Erkenntnisse über Ermüdungs- und Versagensmechanismen gewonnen werden sollen. Aus diesem Grund ist es notwendig die Messdaten zweckmäßig zu organisieren, um diese effizient verwalten zu können. Die Messdaten sollen pro Ermüdungstest in nur einer einzigen Datei organisiert und gespeichert werden. Zusätzlich sollen folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- eindeutige Identifizierung der gemessenen Parameter,
- speichern der Messdaten in separaten Arrays,
- separates Auslesen von Datenarrays,
- geringe Dateigröße/ Komprimierung und
- einfacher Zugriff auf Daten.

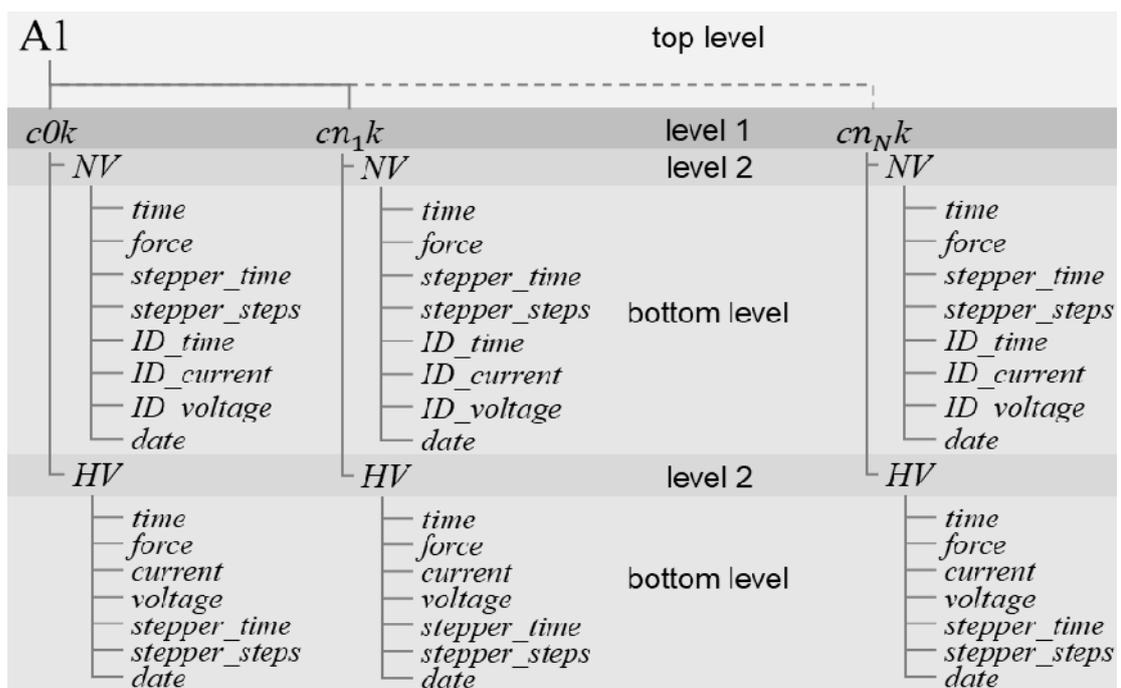
Eine zweckmäßige Organisation der Messdaten sollte übersichtlich sein. Deshalb ist eine hierarchische Strukturierung nach Ebenen sinnvoll. Hierbei werden in der obersten Ebene zunächst Hauptgruppen definiert, die sich mit absteigender Ebene zu Untergruppen aufteilen. Auf der untersten Ebene befinden sich schließlich die zeitabhängigen Messdaten in Arrays.

Die Hauptgruppen können nach Aktorname, Ermüdungsintervall oder bei der Reaktionskraftmessung angelegten Hochspannung ( $NV$ ,  $HV$ ) eingeteilt werden. Wobei eine Hauptgruppeneinteilung nach Messspannung eine Doppelstruktur erzeugen würde und deshalb verworfen wird. Sinnvoll erscheint eine Einteilung nach Aktorname oder Ermüdungsintervall. Eine Sortierung nach Aktorname bietet den Vorteil, dass in der Untergruppe sofort ersichtlich ist nach welchem Ermüdungsintervall der Akteur versagt hat und die Messdaten der jeweiligen Akteure gemeinsam vorliegen und nicht zusammengesucht werden müssen. Die Messdaten für jeden Ermüdungstest werden in

einer hierarchischen Struktur mit der Benennung ‚fatigue‘ angeordnet. Hierbei werden die Daten auf oder obersten Hierarchieebene in Hauptgruppen sortiert. Die Hauptgruppen werden nach den Aktoren (A1-C5) benannt, wie in Abbildung 6.45 dargestellt. Dies hat den Vorteil, dass alle Daten eines Aktors gebündelt vorliegen, separat ausgelesen und verarbeitet werden können. Die Struktur der Untergruppen und Ebenen wird anhand eines Beispiels eines Aktors in Abbildung 6.46 dargestellt. Die erste Untergruppe (Ebene 1) beinhaltet die Messdaten in Bezug zu den durchlaufenen Ermüdungsintervallen.



**Abbildung 6.45:** Aufbau der Hauptmessdatenstruktur und Gruppierung nach Aktornamen



**Abbildung 6.46:** Schematischer Aufbau einer Messdaten-Hauptgruppe mit Untergruppierung der Daten in Ebenen (level 1, 2) und den Messdatenarrays in der untersten Ebene (bottom level)

Die Benennung wird nach den durchgeführten Ermüdungszyklen vorgenommen und von den einzelnen Messdateien übernommen. Dementsprechend ergibt sich die Nomenklatur zu ‚ $cn_ik$ ‘, wobei  $c$  und  $k$  zur Benennung dienen und  $n_i = [0, n_1, \dots, n_N]$  die Anzahl der durchgeführten Ermüdungszyklen darstellen, unterdessen gilt  $n_0 \stackrel{\text{def}}{=} 0$  und  $i$  die Anzahl der vollzogenen

Ermüdungsintervalle ist. Diese Art der Benennung wird gewählt, da sie erlaubt Ermüdungsintervalle mit verschiedener Länge im selben Ermüdungstest durchzuführen. Auf Ebene 2 sind die Untergruppen nach der bei der Reaktionskraftmessung angelegten Messspannung unterteilt. Dabei gruppiert ‚NV‘ die Messdaten ohne und ‚HV‘ die Daten mit angelegter Hochspannung. Darunter befinden sich auf der untersten Ebene die nach den gemessenen Größen benannten Arrays (Zeit, Kraft, Hub usw.) mit den aufgezeichneten Messdaten. Die meisten Messdateien werden bereits bei der Messung als *MAT*-Datei gespeichert und liegen somit bereits als Matlab-Strukturen vor. Darum bietet sich an die Datenbank ebenfalls als Matlab-Struktur zu speichern. Dadurch sind auch die Anforderungen an das Datenverwaltungskonzept erfüllt. Der Code zur Generierung dieser Messdatenstruktur ist in Anhang B.VII aufgeführt.

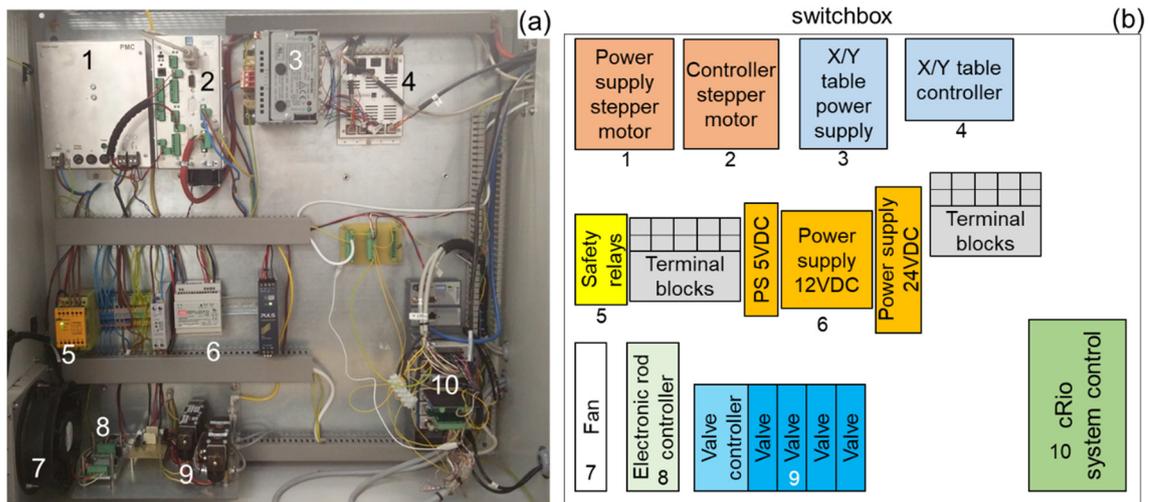
## 6.8 Aufbau

*Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau der elektronischen und mechanischen Gruppen des Ermüdungsprüfstandes. Der Aufbau wird aufgeteilt. Zunächst wird die Elektronik zur Steuerung und Messung aufgebaut und anschließend die Mechanik mit dem Ermüdungs- und Messmodul.*

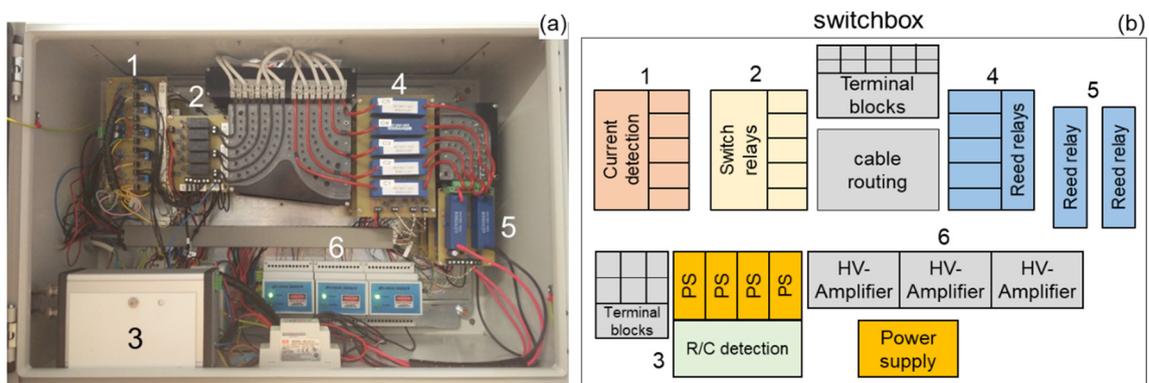
### 6.8.1 Elektronik

Die Elektronik zur Messdatenerfassung und Steuerung des Prüfstandes ist in zwei getrennten Schaltschränken untergebracht. Ein Schaltschrank beinhaltet die Spannungsversorgung, Messdatenerfassung, Steuerung und die Controller der Aktorik (siehe Abbildung 6.47).

Die Hochspannungsgruppe ist davon getrennt in einem eigenen Schaltschrank untergebracht, um möglich Schäden an den restlichen Komponenten des Ermüdungsprüfstandes zu verhindern. Die Hochspannungsgruppe besteht aus einem Set aus Hochspannungsverstärker, Strommessschaltung und Relaisschaltungen für jede DE-Reihe sowie einer R/C-Identifikationsschaltung für alle DE und ist in Abbildung 6.48 dargestellt.



**Abbildung 6.47:** Schaltschrank, Spannungsversorgungen und Controller; NI cRio Controller zur Anlagensteuerung und Messdatenerfassung. (a) Foto; (b) Skizze

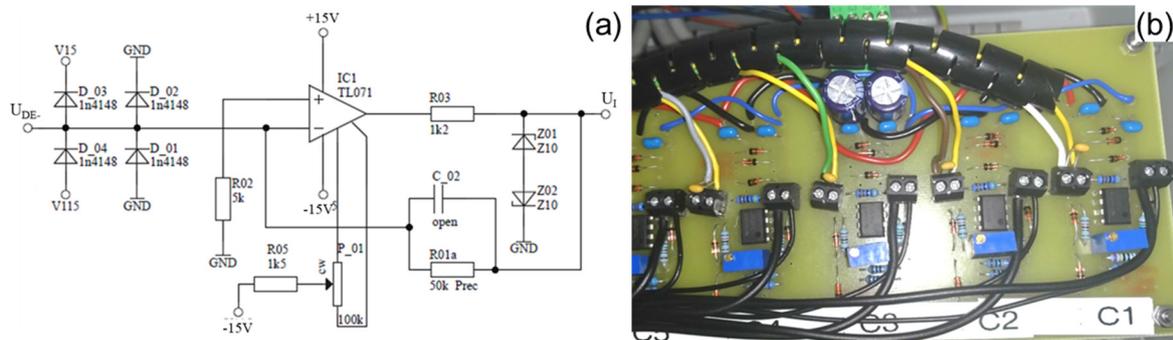


**Abbildung 6.48:** Hochspannungsgruppe und Schaltung zur R/C-Detektion; (a) Foto, (b) Skizze, Erläuterung siehe Text

Eine Detailbeschreibung der einzelnen elektronischen Bauteile der Hochspannungsgruppe ist im Folgenden gegeben.

### 6.8.1.1 Strommessschaltung

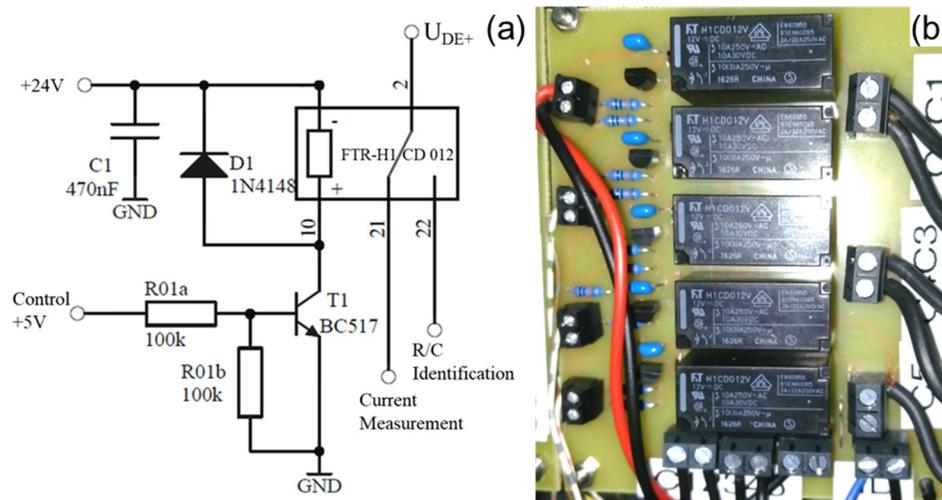
Die Messung der auftretenden Ströme wird durch einen Strom-Spannungswandler realisiert. Diese Schaltung befindet sich auf der GND-Seite des DE und wandelt den fließenden Strom über einen Widerstand in einen Spannungswert um. Dabei kompensiert ein Operationsverstärker (TL071) die Spannungsverluste. Die Schaltung setzt einen Strom von  $I_{max} = \pm 200 \mu A$  in eine Spannung von  $U_I = \pm 10 V$  um. Mit diesem Signal wird ein Versagen des DE auf dem FPGA durch Überschreiten eines Grenzwertes detektiert. Die Schaltung ist durch Dioden (IN4148) gegen Hochspannung gesichert. Für den Fall, dass diese Dioden versagen sollten, sind Zener-Dioden (Z10) zum Schutz des FPGA-Systems parallel zum Signalausgang geschaltet. Die Schaltung ist in Abbildung 6.49 dargestellt.



**Abbildung 6.49:** Schaltung Strommessung; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung für eine Reihe

### 6.8.1.2 Umschalter R/C-Identifikation

Die Schaltung zur Identifikation von Widerstand und Kapazität der DE wird nur zur Vermessung des jeweiligen DE bei Niederspannung zugeschaltet. Darum befinden sich Umschaltrelais (*Takamisawa FTR-HI*) zwischen den DE und den Messschaltungen für Strom und zur R/C-Identifikation. Im Grundzustand und bei anliegender Hochspannung am DE ist das Relais zu der Strommessschaltung geschaltet. Bei einer R/C-Identifikation wird das Umschaltrelais geschaltet und verbindet die R/C-Identifikationsschaltung mit dem DE. Die Schaltung ist in Abbildung 6.50 dargestellt.

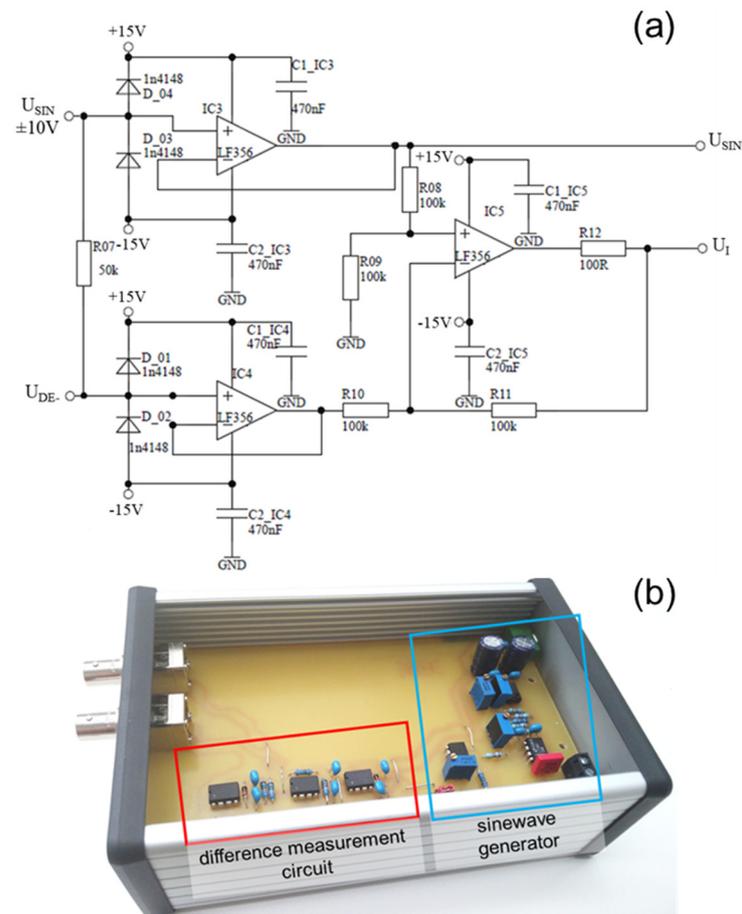


**Abbildung 6.50:** Schaltung zum Umschalten zwischen Strommessung und R/C-Identifikation; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung

### 6.8.1.3 R/C-Identifikationsschaltung

Die Schaltung zur Identifikation von Widerstand und Kapazität (siehe Abbildung 6.51) besteht aus einem Sinusgenerator und einer Differenzmessschaltung. Der Generator erzeugt eine sinusförmige Spannung  $U_{RC} = \pm 10\text{ V}$  mit  $f_m = 1\text{ kHz}$ , die den DE kontinuierlich be- und entlädt. Diese Ladevorgänge erzeugen ein zu der Spannung phasenverschobenes

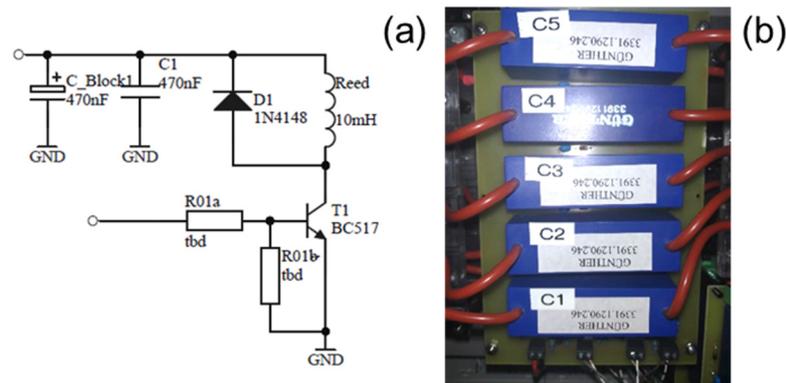
Stromsignal. Die Differenzmessschaltung befindet sich zwischen dem Sinusgenerator und dem DE und misst dieses Stromsignal über einen Messwiderstand. Aus Phasenversatz und den Amplituden der Spannung und des Stromes wird durch den Identifikationsalgorithmus von Rizzello et al [143] der Widerstands- und Kapazitätswert des DE berechnet. Diese Berechnung wird nach Beendigung der Ermüdungsprüfung durch ein Matlab-Skript durchgeführt.



**Abbildung 6.51:** Identifikationsschaltung für Widerstand und Kapazität; Schaltplan (a) Differenzmessschaltung, (b) reale Schaltung

### 6.8.1.4 Hochspannungsschalter

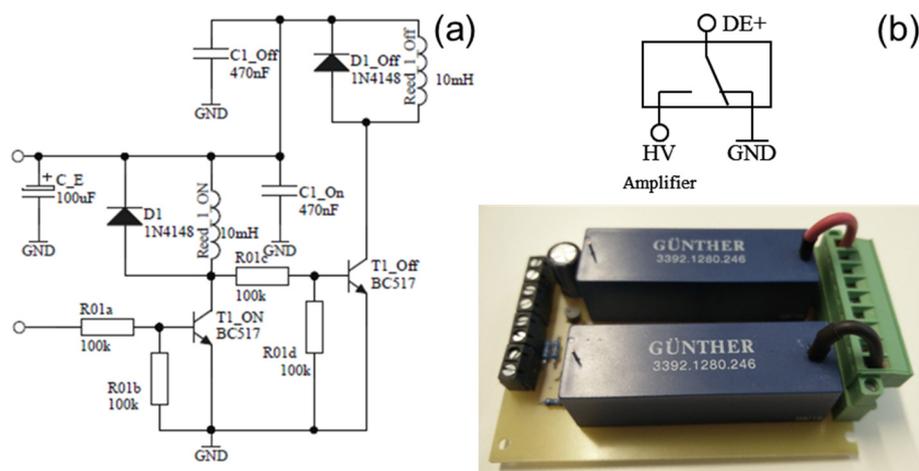
Zwischen dem Hochspannungsumschalter und den DE befinden sich für jeden DE ein eigenes Reed-Relais (GÜNTHER 3391.1290.246). Dieses Relais wird bei Versagen des zugehörigen DE abgeschaltet und trennt den DE von der Hochspannung. Dies garantiert eine Fortsetzung der Ermüdungsprüfung mit den verbleibenden DE. Die Relaisschaltung ist in Abbildung 6.52 dargestellt.



**Abbildung 6.52:** Schaltung zum Zu- und Abschalten der Hochspannung an jedem DE; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung

### 6.8.1.5 Hochspannungsumschalter

Zwischen dem Hochspannungsverstärker und der zugehörigen DE-Gruppe ist ein Umschalter (siehe Abbildung 6.53) eingebaut, der die DE entweder gegen Erde oder Hochspannung schaltet. Dieser Umschalter ist aus zwei Reed-Relais (GÜNTHER 3391.1290.246) aufgebaut, da in der Spannungsklasse kein Umschalter erhältlich ist. Die Schaltung ist als ‚exklusives oder‘ (XOR) ausgeführt, damit sichergestellt ist, dass jeweils nur ein Relais geschlossen ist. Im Grundzustand ist das Relais gegen Erde eingeschaltet. Die Relais werden mit 24 V betrieben, die von Darlington-Transistoren (BC517) geschaltet werden. Diese Transistoren werden verwendet, um den Stromverbrauch am Steuerungsmodul (NI9403) gering zu halten.



**Abbildung 6.53:** Umschalter der Hochspannungsverstärker; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung

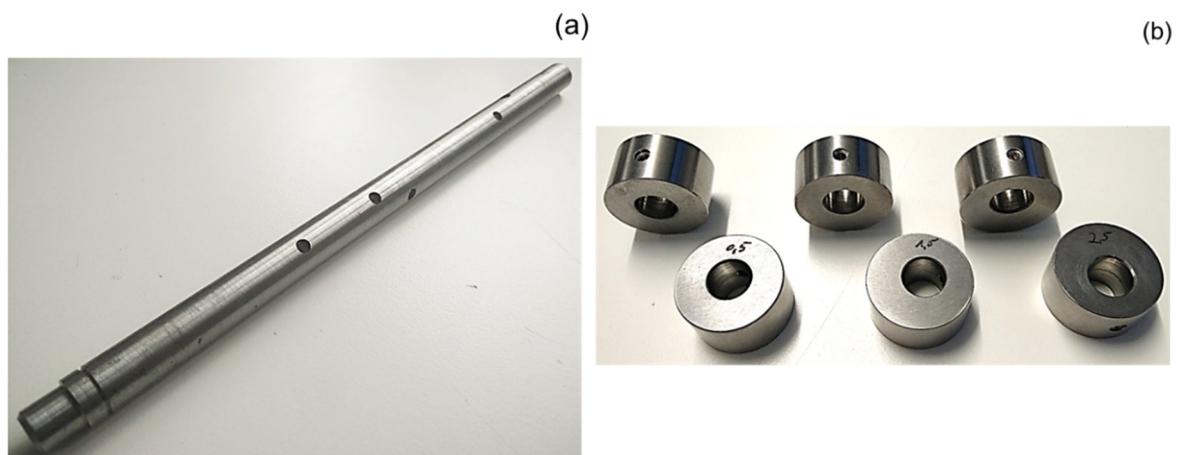
---

## 6.8.2 Mechanik

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der mechanischen Komponenten des Ermüdungsprüfstandes dargestellt. Der Aufbau der Mechanik besteht aus der Montage des Ermüdungs- und des Messmoduls sowie deren Zusammenführung.

### 6.8.2.1 Ermüdungsmodul

Die grundlegenden Elemente des Ermüdungsmoduls sind die Antriebswelle und der Auslenkungsmechanismus. Die Welle wird aus Stahl *C45E* und die Kurvenscheiben werden aus Edelstahl *X90CrMoV18* mit gehärteter Laufläche gefertigt. Welle und Kurvenscheiben sind in Abbildung 6.54 dargestellt.



**Abbildung 6.54:** Komponenten der Antriebswelle; (a) Welle, (b) Kurvenscheiben mit 1 mm, 3 mm und 5 mm maximaler Auslenkung

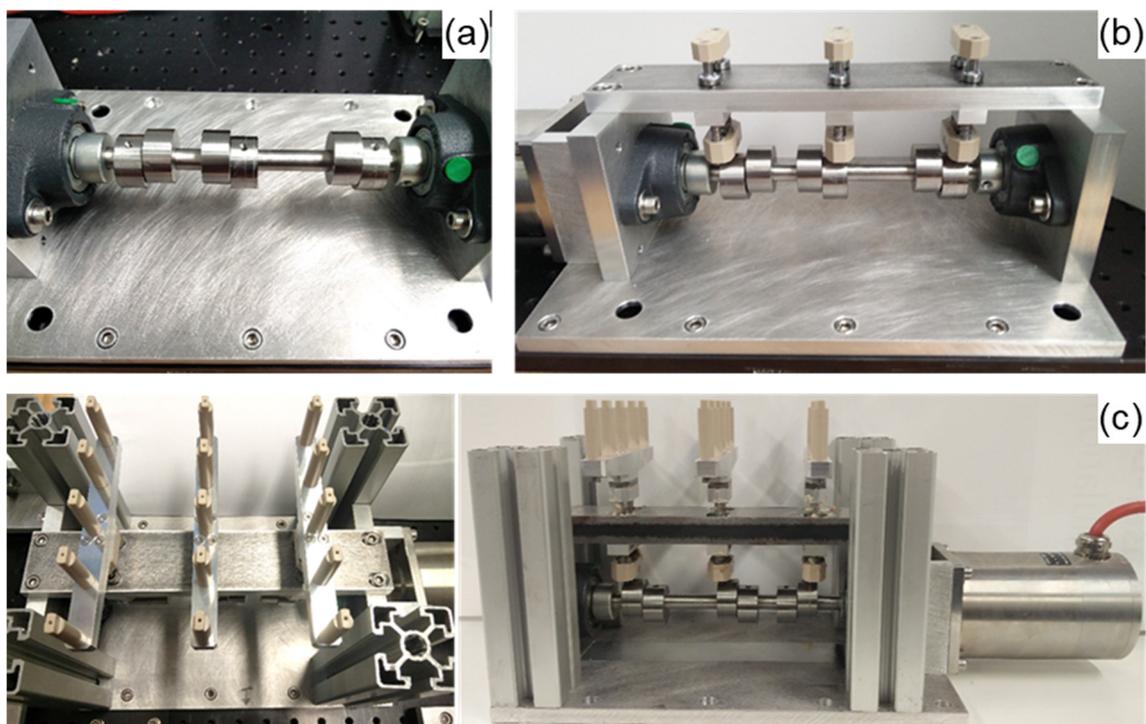
Der schrittweise Aufbau des Ermüdungsmoduls ist in Abbildung 6.55 dargestellt. Die Bodenplatte und die Motorhalterung sowie die gegenüberliegende Halterung werden aus Aluminium *2017A* gefertigt. Die Halterungen sind in Taschen in der Bodenplatte verschraubt, die die korrekte Ausrichtung des Motors, der Flanschlager und der Welle garantieren. Die Linearlager der Auslenkungsmechanismen sind in der Zwischenplatte mit Sicherungsringen befestigt. Die Zwischenplatte wird wegen der höheren Steifigkeit aus Stahl (*C45E*) gefertigt.

Der Auslenkungsmechanismus ist größtenteils aus Aluminium *2017A* gefertigt. Ausnahmen sind die Stifte der Haken (*PEEK*) und die beiden Führungen des Mechanismus bestehend aus Wellenstahl *X90CrMoV18* mit gehärteter Oberfläche. Die vier Säulen auf denen die Basisplatte (Kapitel 6.6.4) liegt, werden aus 45 mm *Rexroth*-Aluminiumprofilen gefertigt und mit Senkkopfschrauben positioniert.

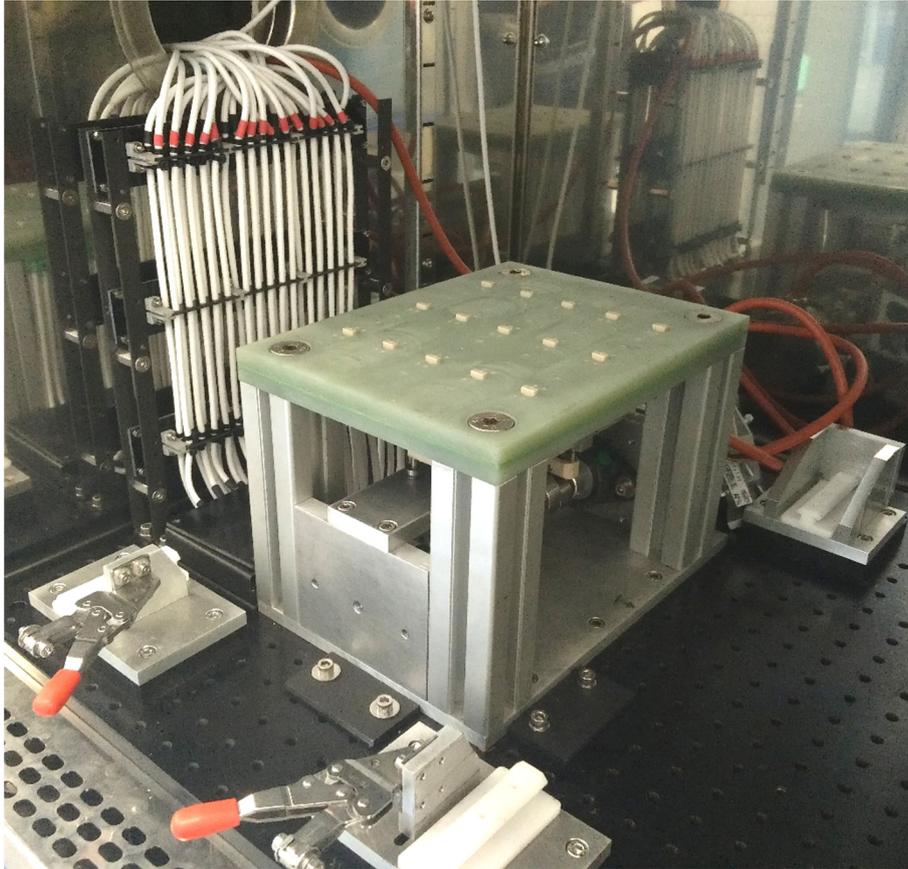
Die elektrische Verbindung der Hochspannungsgruppe mit den DE wird durch

Hochspannungskabel realisiert (siehe Abbildung 6.56). Die Hochspannungskabel *HiVOLT HSL-20-0.38-B-9* sind für einen großen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich geeignet und werden durch speziell angefertigte Kabelführungen aus FR4 von der Hochspannungsgruppe zum Ermüdungsmodul verlegt. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Kabel eine parasitäre Kapazität zueinander aufweisen, sie deswegen einen möglichst großen Abstand zueinander und zu allen leitfähigen Oberflächen einhalten. Die Kabel einer jeden DE-Gruppe werden zu einem separaten Kabelstrang gebündelt.

Das Ermüdungsmodul muss zum Wechsel der Kurvenscheiben vom Breadboard gelöst werden. Um eine reproduzierbare Positionierung des Ermüdungsmoduls auf dem Breadboard zu gewährleisten, werden zwei Anschläge angebracht.



**Abbildung 6.55:** Aufbau des Ermüdungsmoduls; (a) Antriebswelle mit Lagerung; (b) Antriebswelle mit Schrittmotor und Auslenkmechanismus; (c) mit Kontaktstiften und Distanzhalter



*Abbildung 6.56: Vollständiges Ermüdungsmodul mit Kabelführung und Führung des Messmoduls im Klimaprüfschrank*

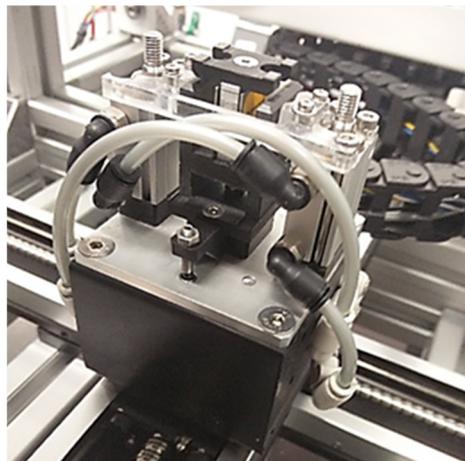
### **6.8.2.2 Messmodul**

Das Gerüst des Messmoduls wird nach Vorlage aus Aluminiumprofilen von Rexroth montiert. Das Gerüst ist höhenverstellbar und die Höhe wird auf das Messmodul eingestellt. Darin werden der X/Y-Tisch und die Kraftmessvorrichtung installiert. Das Verbindungsterminal dient zur Verbindung der Kabel und Schläuche der Messeinrichtung mit der Steuerung des Ermüdungsprüfstandes. Das vollständige Messmodul ausgerüstet zur Kraftmessung, ist in Abbildung 6.57 dargestellt.



*Abbildung 6.57: Messmodul mit Kraftmessvorrichtung*

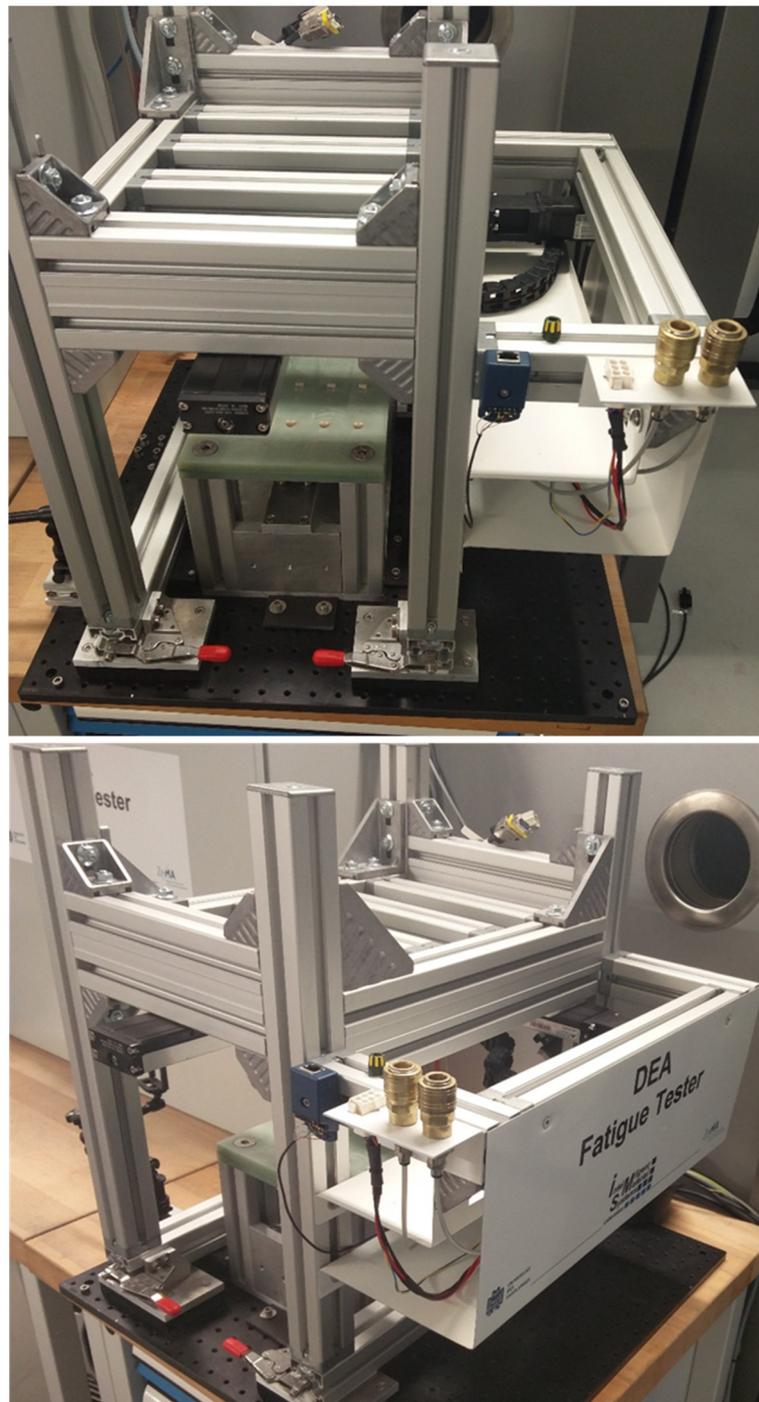
Die Kabel und Schläuche zum Betreiben der Messvorrichtung werden durch eine Kabelkette beweglich mit dem Messmodul und dem Verbindungsterminal verbunden. Abbildung 6.58 zeigt die Messvorrichtung zur Kraftmessung mit Kabelkette.



*Abbildung 6.58: Messvorrichtung zur Kraftmessung mit beweglicher Kabelführung*

### 6.8.2.3 Zusammenführung

Das Messmodul ist mit dem Ermüdungsmodul verbunden, indem die Gleitelemente, die um das Ermüdungsmodul herum positioniert sind, in die Nuten der unteren Aluminiumprofile des Messmodul geschoben werden. Ist das Messmodul in Position, werden die Kniehebel geschlossen und beide Module sind verbunden. Abbildung 6.59 zeigt die verbundenen Module.



*Abbildung 6.59: Zusammenführung von Messmodul und Ermüdungsmodul*

#### 6.8.2.4 Vollständiger Klimaprüfstand

Der vollständig aufgebaute Klimaprüfstand inklusive des Klimaprüfschranks *CTS C70-350* ist in Abbildung 6.60 dargestellt. Die Schaltschränke zur Steuerung der Anlage sowie zur Hochspannungserzeugung sind auf einer eigens dafür angefertigten Tischkonstruktion angebracht. Der PC zur Überwachung der Anlage ist auf der Rückseite des Klimaprüfschranks befestigt.



**Abbildung 6.60:** Vollständiger Ermüdungsprüfstand (Ermüdungs- und Messmodul im Klimaprüfschrank)

---

## 6.9 Validierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Validierung des Ermüdungsprüfstandes. Diese Validierung wird für die Hochspannungsgruppe bestehend aus Hochspannungserzeugung, Strommessung und R/C-Identifikation durchgeführt. Außerdem werden die mechanischen Komponenten und deren Funktionsweise validiert und optimiert.

### 6.9.1 Hochspannungsgruppe

#### 6.9.1.1 Hochspannung

Die Ausgangsspannung der Hochspannungsverstärker wird mit den Spannungsmonitoren gemessen und mit einem Hochspannungstastkopf *Fluke 80k-40* auf Übereinstimmung kontrolliert. Die Eingangsspannung wird hierbei mit einer linearen Rampe innerhalb von  $0.05\text{ s}$  auf  $3\text{ V}$  angehoben, dies entspricht einer Ausgangsspannung von  $3\text{ kV}$ . Dieser Wert wird  $2\text{ s}$  gehalten und danach innerhalb von  $0.05\text{ s}$  auf  $0\text{ V}$  abgesenkt. Der Spannungsmonitor wird dabei mit einer Samplerate von  $2\text{ kS/s}$  vermessen. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abbildung 6.61 dargestellt und zeigen, dass die Verstärker zeitverzögert auf die vorgegebenen Signale bei Spannungsanstieg und Spannungsabfall reagieren. Diese Trägheit der Ausgangsspannung stellt zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Problem dar, da zu Anfang der Ermüdungsprüfungen nur konstante Spannungswerte benötigt werden. Zukünftige Weiterentwicklungen der Hochspannungsverstärker können das Zeitverhalten verbessern.

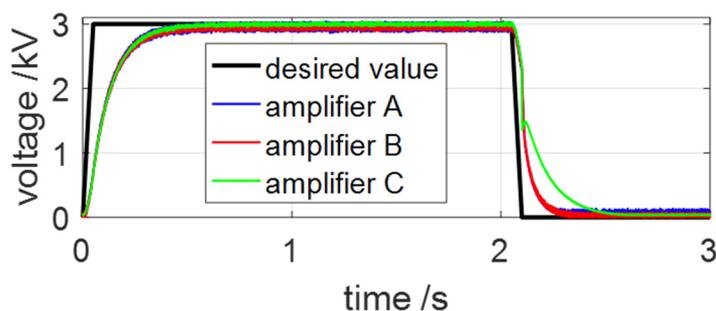
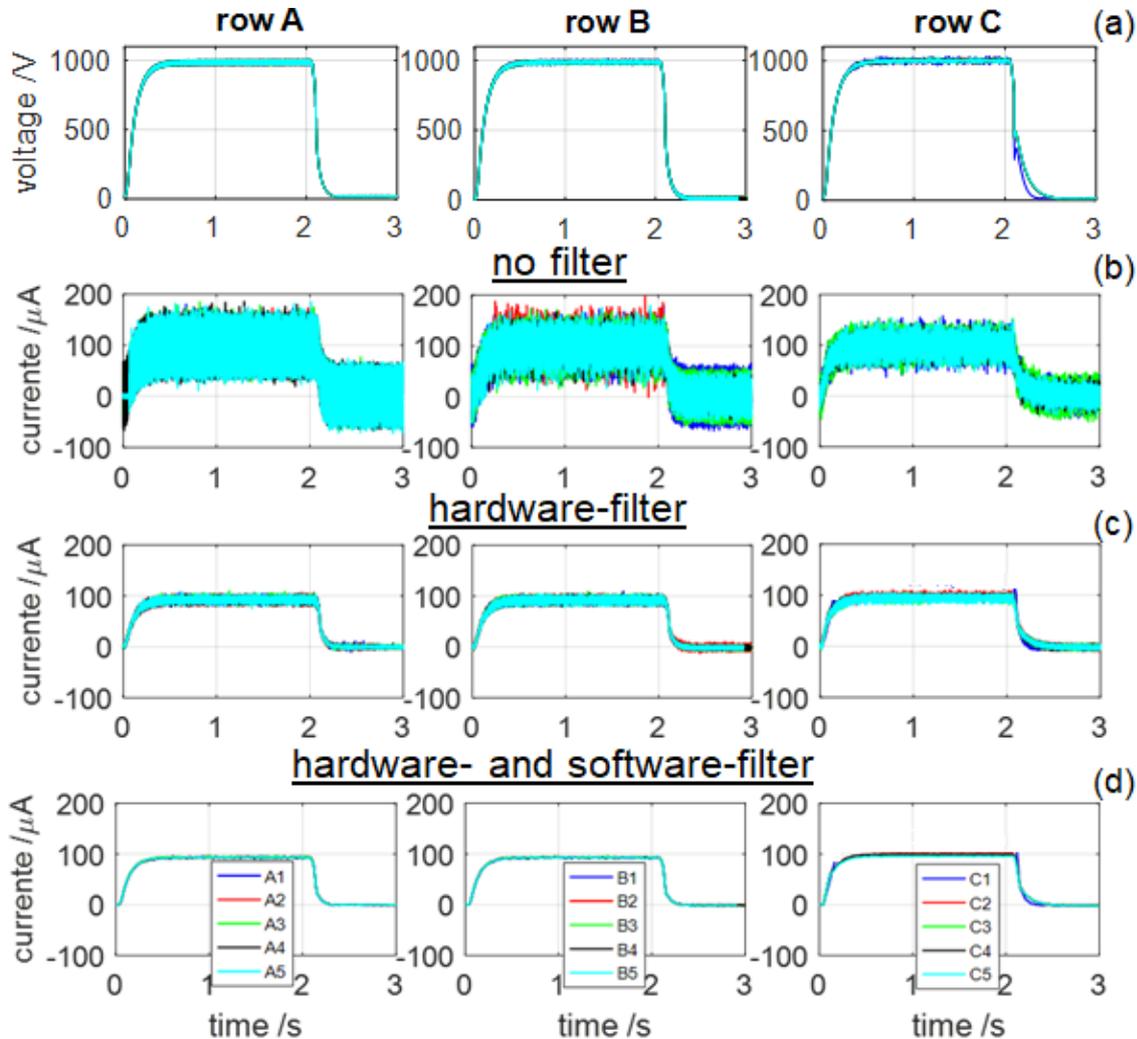


Abbildung 6.61: Validierung der Hochspannungserzeugung

#### 6.9.1.2 Strommessschaltungen

Zur Validierung der Strommessschaltungen (Kapitel 6.8.1) werden an jeder DE-Position ein Hochspannungs-Metallglasur-Schichtwiderstand von  $100\text{ k}\Omega$  eingesetzt, eine Spannung von  $1\text{ kV}$  angelegt und den Strom mit der zugehörigen Strommessschaltung

gemessen. Dieses Vorgehen überprüft gleichzeitig, ob die Relais passend zur DE-Position geschaltet werden. Abbildung 6.62 zeigt, dass alle Strommessschaltungen funktionieren, aber auch, dass die ungefilterten Stromsignale stark verrauscht sind. Deswegen werden Hardware-Tiefpassfilter zu den Messschaltungen hinzugefügt.



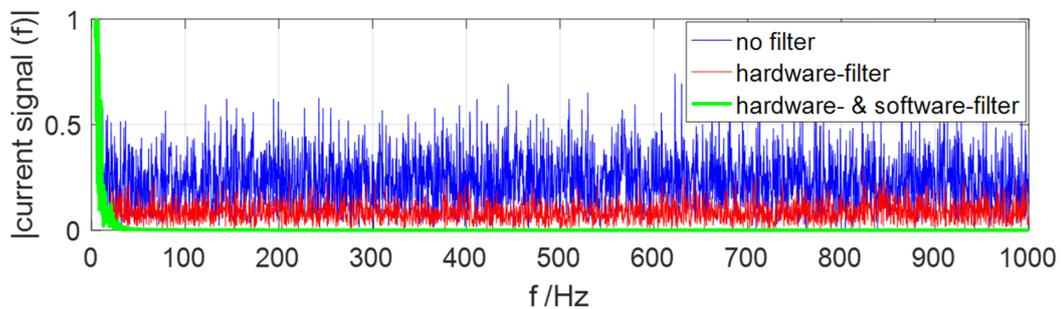
**Abbildung 6.62:** Validierung der Strommessschaltungen; (a) Spannungsverläufe, (b) ungefilterte Stromsignale, (c) Stromsignale gefiltert durch Hardware-Tiefpass, (d) Stromsignale gefiltert durch Hardware- und Software-Tiefpass

Dies wird durch einen Kondensator am Schaltungsausgang realisiert. Die Kapazität wird zu  $C_f = 47 \text{ nF}$  gewählt. Mit dem Messwiderstand  $R_i = 50 \text{ k}\Omega$  wird die Grenzfrequenz des Hardware-Tiefpass  $f_{cH}$  zu

$$f_{cH} = \frac{1}{2\pi R_i C_f} = 67.7 \text{ Hz} \quad (6.12)$$

bestimmt. Das Hinzufügen des Hardware-Tiefpasses zeigt eine deutliche Verbesserung des Stromsignals bezüglich des Rauschniveaus. Schließlich wird das Stromsignal softwareseitig mit einem Butterworth-Tiefpass fünfter Ordnung mit Grenzfrequenz von

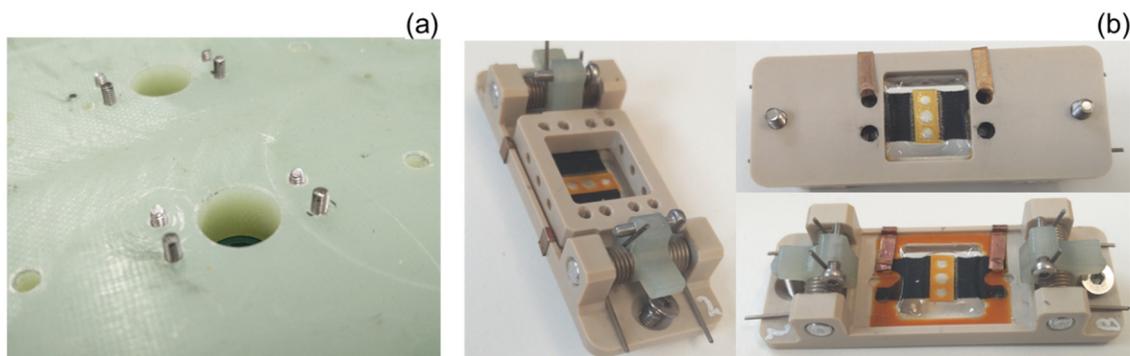
20 Hz auf dem FPGA gefiltert. Dies führt zu einer weiteren Verbesserung der Signalqualität, was auch in Abbildung 6.63 durch eine Fourier-Analyse der Stromsignale vor und nach der Filterung belegt.



**Abbildung 6.63:** *Fourier-analyse der Stromsignale bei unterschiedlichen Filterkonfigurationen*

### 6.9.1.3 Kontaktierung der DE

Die DE werden mit der Leiterplatte durch Schrauben und Kupferlitzen kontaktiert. Auf der Unterseite der DE drücken die Schrauben direkt auf deren Kontaktflächen (siehe Abbildung 6.64 (a)). Diese Seite ist die Hochspannungsseite. Die Oberseite der DE ist die Erdseite und wird durch Kupferlitzen mit den Schrauben auf der Unterseite verbunden, diese Schrauben sind zur eindeutigen Identifizierung kürzer ausgeführt. Die Kupferlitze wird, um die Unterseite des DE Gehäuses geführt und an dessen Kanten fixiert. Die Kupferlitzen werden in die Bohrungen des DE Gehäuses gebogen, wirken dort als Federelement und drücken auf die Schrauben.

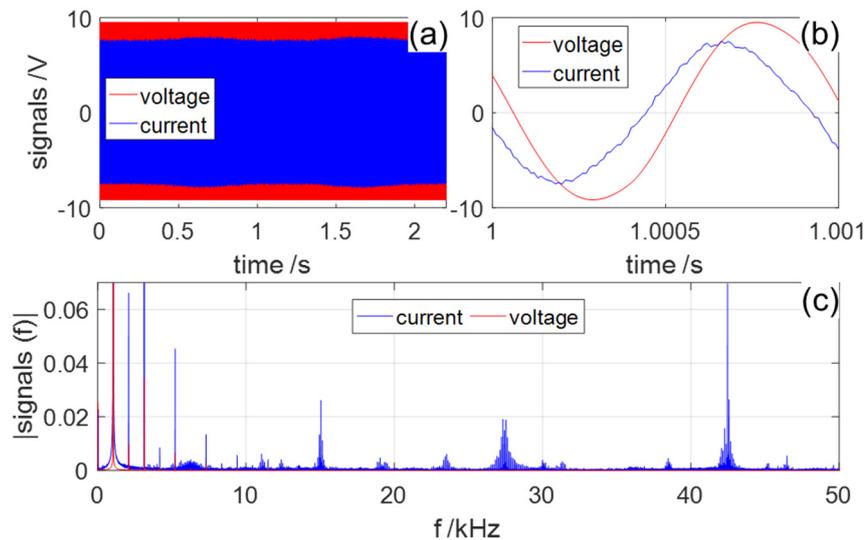


**Abbildung 6.64:** *Kontaktierung der DE; (a) Kontaktstifte der Basisplatte, (b) Kupferlitzen an DE Gehäuse,*

### 6.9.1.4 Identifikationsschaltung

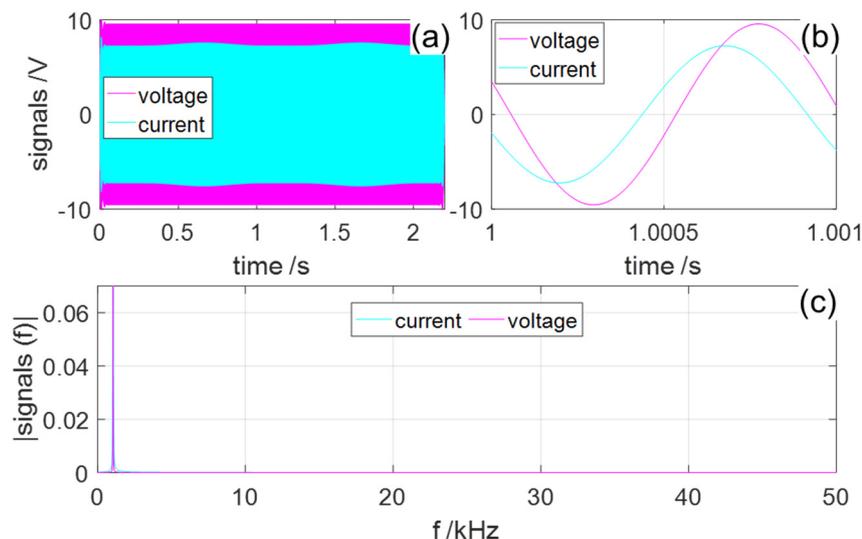
Die Identifikation des seriellen Widerstandes  $R_{DES}$  und der Kapazität  $C_{DE}$  eines DE wird auf Basis der Identifikationsschaltung aus Kapitel 6.8.1 durchgeführt. Die Funktionalität der Schaltung wird zunächst an einer DE-Position des Ermüdungsprüfstandes geprüft.

Dafür wird eine Sinusspannung ( $U_{IN} = \pm 10 \text{ V}$ ,  $f_m = 1 \text{ kHz}$ ) an einen DE angelegt und der dabei erzeugte Strom gemessen. Das Spannungs- als auch das Stromsignal werden mit einer Samplerate von  $100 \text{ kS/s}$  abgetastet und gespeichert. Abbildung 6.65 zeigt die Rohdaten einer Messung eines DE-Streifenaktors bei einer Auslenkung von  $5 \text{ mm}$ . Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass das Stromsignal stark verrauscht ist.



**Abbildung 6.65:** Rohdaten der R/C-Identifikation; (a) Messdaten, (b) Vergrößerung, (c) Fourier-Analyse der Messsignale

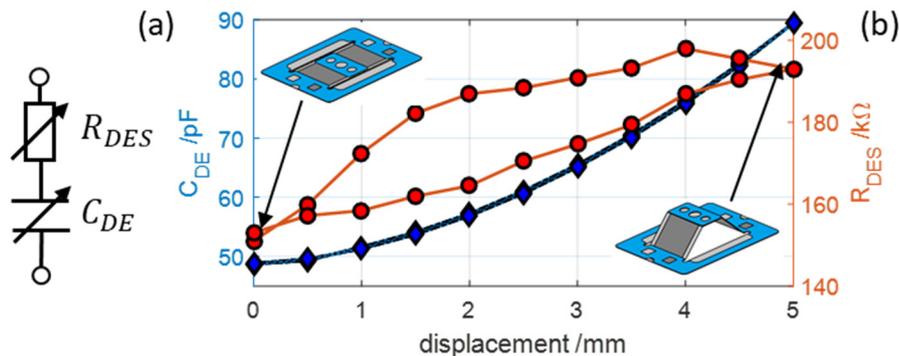
Mit diesen Signalen ist eine Identifikation des Widerstandes und der Kapazität schwierig. Aus diesem Grund werden die Daten nach der Aufnahme mit einem ‚Infinite-Impulse-Response‘-Bandpass-Filter zehnter Ordnung mit einer Bandbreite von  $950 \text{ Hz}$  bis  $1050 \text{ Hz}$  gefiltert. Die gefilterten Spannungs- und Stromsignale sind in Abbildung 6.66 dargestellt und zeigen eine deutliche Verringerung des Rauschanteils an den Signalen.



**Abbildung 6.66:** Gefilterte-Daten der R/C-Identifikation; (a) Messdaten, (b) Vergrößerung, (c) Fourier-Analyse der Messsignale

### 6.9.1.5 R/C-Identifikation

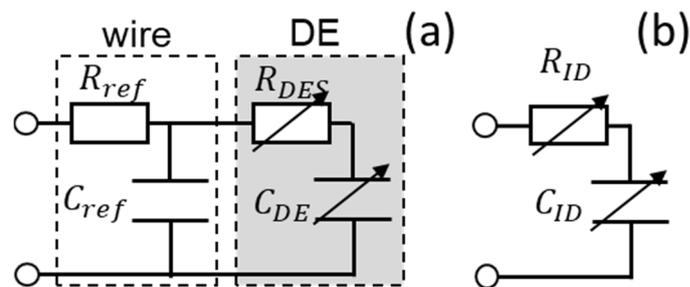
Zur Bewertung der R/C-Identifikationsfunktion des Ermüdungsprüfstandes werden zunächst als Referenz die Kapazität  $C_{DE}$  und der Elektrodenwiderstand  $R_{DES}$  im Verhältnis zur Auslenkung des Streifenaktors gemessen. Dabei werden drei Streifenaktoren in der 0%/20%-Konfiguration von  $0\text{ mm}$  auf  $5\text{ mm}$  in  $0.5\text{ mm}$  Schritten ausgelenkt und  $R_{DES}$ , sowie  $C_{DE}$  mit einem LCR-Meter aufgenommen und gemittelt. Die Messungen werden mit einem LCR-Meter *Rhode & Schwarz HM8118* bei einer Messfrequenz von  $f_m = 1\text{ kHz}$  und einer Signalspannung von  $U_{IN} = 1\text{ V}$  vorgenommen. Bei dieser Messung werden die DE als Serienschaltung aus  $R_{DES}$  und der  $C_{DE}$  angenommen (siehe Abbildung 6.67 (a)). Die Ergebnisse der Vermessung sind in Abbildung 6.67 (b) dargestellt und zeigen, dass die Kapazität des Streifenaktors im Bereich von  $C_{DE,min} = 48\text{ pF}$  bis  $C_{DE,max} = 89\text{ pF}$  liegt. Der Verlauf ist nicht linear, aber auch nicht hysteretisch. Der Elektrodenwiderstand erstreckt sich von  $R_{DES,min} = 151\text{ k}\Omega$  bis  $R_{DES,max} = 198\text{ k}\Omega$  und verläuft stark hysteretisch. Die Kapazität und der Elektrodenwiderstand des Streifenaktors weisen ähnliche Verläufe wie bei den konischen DE aus Kapitel 5 auf.



**Abbildung 6.67:** gemittelte Kapazitäts- und Elektrodenwiderstandswerte von Streifenaktoren in 0%/20%-Konfiguration; (a) Ersatzschaltbild, (b) gemessen mit LCR-Meter

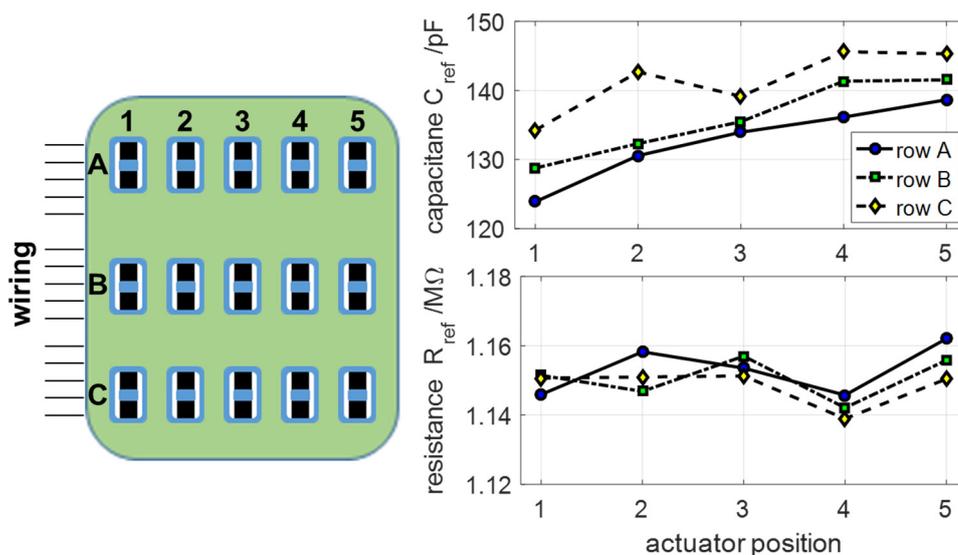
Die Widerstands- und Kapazitätswerte der DE werden auf den Ermüdungsprüfstand aus den Spannungs- und Stromsignalen (siehe Abbildung 6.66) errechnet. Dies wird in der Nachbearbeitung mit dem Identifikationsalgorithmus von Rizzello et al. [143] durchgeführt. Bei der Berechnung dieser Werte muss berücksichtigt werden, dass die Komponenten des Ermüdungsprüfstandes, insbesondere die Verkabelung und die Leiterbahnen in der Basisplatte parasitäre Kapazitäten  $C_{ref}$  und Widerstände  $R_{ref}$  aufweisen. Abbildung 6.68 zeigt das Ersatzschaltbilder des Ermüdungsmoduls mit der Verkabelung und DE (Abbildung 6.68 (a)) sowie die Interpretation dieser Kombination durch den Identifikationsalgorithmus (Abbildung 6.68 (b)). Aus dem Ersatzschaltbild wird deutlich,

dass die Kapazität des DE  $C_{DE}$  parallel zur Kapazität der Kabel  $C_{ref}$  geschaltet ist. Der Elektrodenwiderstand des DE  $R_{DES}$  und der Referenzwiderstand des Kabels  $R_{ref}$  bilden eine Serienschaltung. Allerdings muss bemerkt werden, dass durch die Anordnung der Kapazitäten und Widerstände des Ermüdungsmoduls und DE nicht möglich ist diese in der Nachbearbeitung eindeutig voneinander zu trennen. Deswegen werden im folgenden die gemessenen Gesamtkapazitäten  $C_{ID}$  und Gesamtwiderstände  $R_{ID}$  betrachtet.



**Abbildung 6.68:** Ersatzschaltbilder; (a) des DE und der parasitären Größen der Verkabelung, (b) der Interpretation dieses Systems durch den RC-Identifikationsalgorithmus

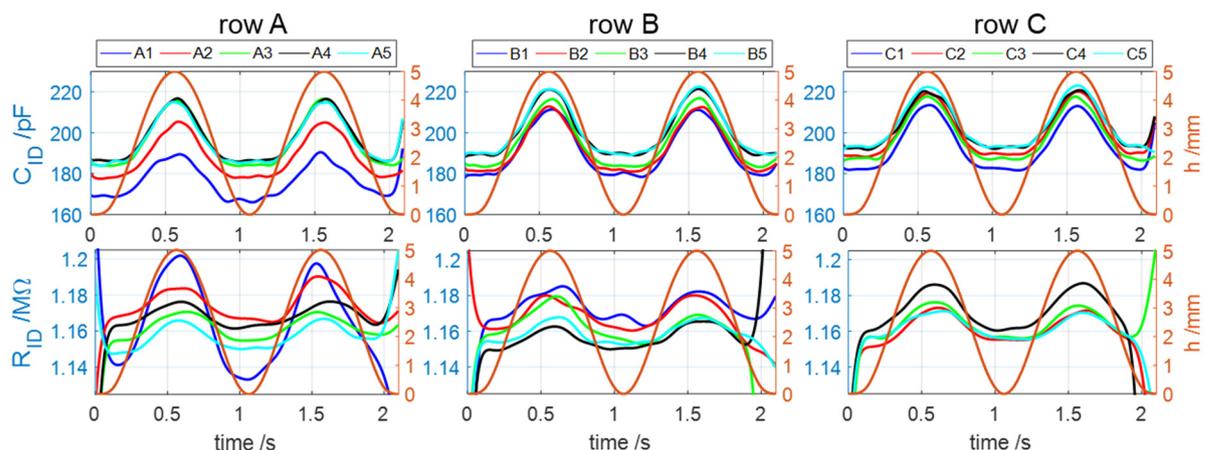
Die Referenzwerte für Kapazität und Widerstand werden zunächst für jede DE-Position ohne DE ermittelt. Die Referenzwerte sind in Abbildung 6.69 dargestellt. Die Kapazitätswerte sind in jeder Reihe an Position 1 an niedrigsten und an Position 5 am höchsten. Dies ist durch die zunehmende Länge der Leiterbahnen zu erklären, die an Position 5 am längsten sind. Die Referenzwerte des Widerstandes werden dagegen von der Position wenig beeinflusst und liegen in etwa bei  $1.15 \text{ M}\Omega$ .



**Abbildung 6.69:** Referenzwerte der Kapazitäten und Widerstände des Ermüdungsprüfstandes

Zur Validation des Identifikationsalgorithmus wird derselbe DE an jeder Position auf der Basisplatte befestigt und zweimal bei  $1\text{ Hz}$  auf  $5\text{ mm}$  ausgelenkt. Dabei werden die Werte der Kapazität und des Elektrodenwiderstandes bestimmt. Abbildung 6.70 zeigt die Ergebnisse der Vermessung des DE an allen Positionen der Basisplatte. Die Verläufe der Kapazitäten und Widerständen zeigen, dass die Identifikation funktioniert, da die Kapazitätswerte im Bereich von  $170\text{ pF}$  bis  $220\text{ pF}$  liegen. Diese Werte sind im Vergleich zur Referenzmessung in Abbildung 6.67 unter Berücksichtigung der parasitären Werte des Ermüdungsmoduls plausibel.

Die Werte des Elektrodenwiderstandes liegen im Bereich von  $1.14\text{ M}\Omega$  bis  $1.18\text{ M}\Omega$ . Es muss angemerkt werden, dass die Abweichungen der Messwerte an Position A1 und A2 durch Abnutzung der Elektroden an den Kontaktstellen der DE und Erhöhung des Kontaktwiderstandes durch häufige Positionswechsel zurückzuführen sind. Dies erklärt die geringeren Kapazitäten und die höheren Widerstände.



**Abbildung 6.70:** Validierung der R/C-Identifikation mit DE an allen DE-Positionen, Verlauf der Kapazitäten und Widerstände

### 6.9.1.6 Fazit

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass die Hochspannungsversorgung in Verbindung mit den Strommonitoren funktioniert und nachvollziehbare Messwerte an jeder DE-Position liefert. Zudem wurde die R/C-Identifikationsfunktion des Ermüdungsprüfstandes untersucht und festgestellt, dass sowohl die Kapazität als auch der Elektrodenwiderstand während der Auslenkung der Streifenaktoren an allen DE-Positionen bestimmt werden können. Die gemessenen Werte für Kapazität und Elektrodenwiderstand sind höher als ihre mit einem LCR-Meter ermittelten Referenzwerte. Allerdings bedeutet dieser Unterschied keine Beeinträchtigung der Funktionalität des Prüfstandes, da bei der Ermüdungsprüfung die Veränderung der gemessenen Werte im Verlauf der Prüfung im Fokus steht. Zudem ist

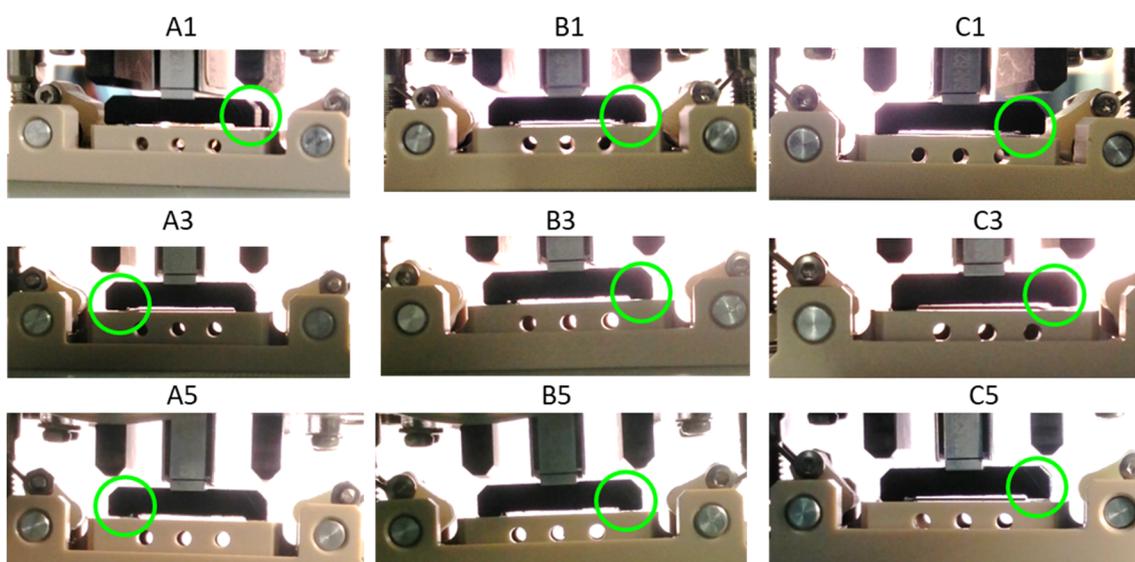
es möglich den verwendeten Algorithmus auf diese Anwendung anzupassen und somit die Messungen zu verbessern.

## 6.9.2 Mechanik

*In diesem Abschnitt wird die optische und messtechnische Validierung des Prozesses zur Kraftmessung vorgestellt. Hierbei werden die Kontaktierungen des Kraftsensors mit dem DE Gehäuse und die Messung der Kraft der DE bei verschiedenen Anpresskräften wie auch deren Einfluss näher untersucht. Die folgenden Messungen zur Validierung der Mechanik werden außerhalb des Klimaprüfchranke, aber in einem klimatisierten Raum durchgeführt.*

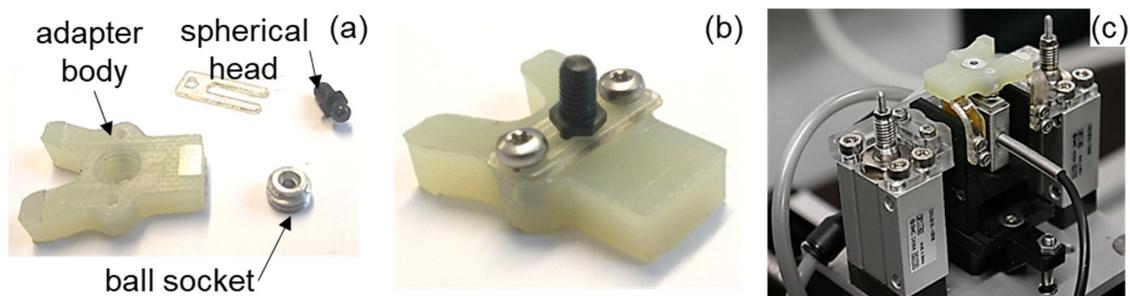
### 6.9.2.1 Mechanischer Kontakt

Bevor die Kraftmessung validiert wird, wird zuerst der mechanische Kontakt zwischen dem Adapter des Kraftsensors und den DE-Gehäusen überprüft. Dies wird optisch kontrolliert, indem die Messvorrichtung auf verschiedene DE-Positionen bewegt wird, der Kraftsensor absenkt und der Kontaktbereich betrachtet wird. Abbildung 6.71 zeigt den Kontaktbereich an verschiedenen Positionen auf der Basisplatte. Bei der Betrachtung der Kontaktbereiche wird ersichtlich, dass nicht alle Kontaktflächen des Adapters des Kraftsensors auf dem DE-Gehäuse aufliegen. Außerdem variieren auch die Seiten, auf denen die Kontaktflächen aufliegen, von Position zu Position. Dies beeinflusst die Kraftmessung, da durch den fehlenden Kontakt das DE-Gehäuse zusätzliche Freiheitsgrade besitzt, die die Messung



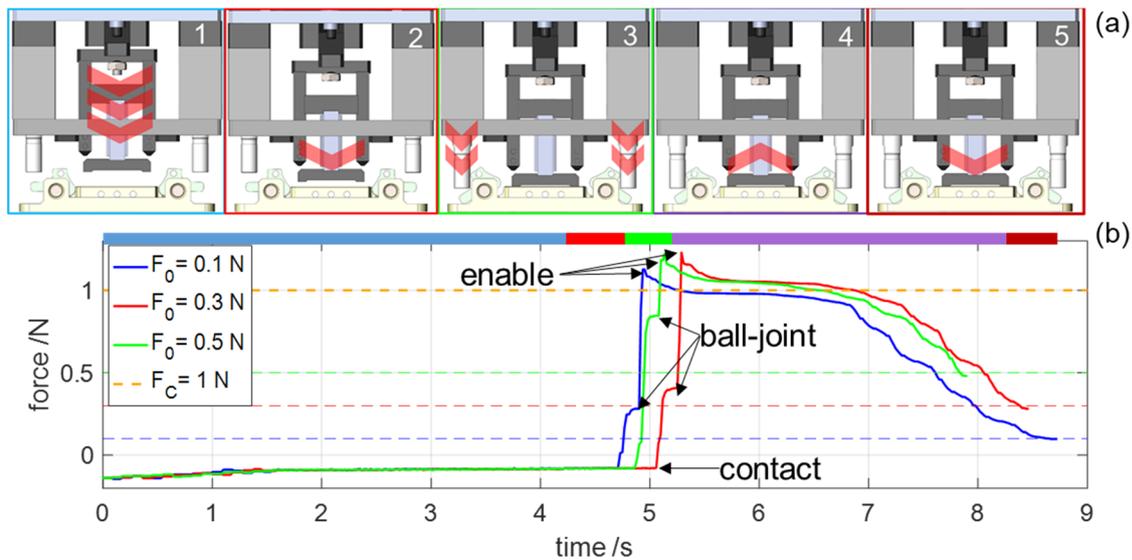
**Abbildung 6.71:** Kontakt des Kraftsensors am DE-Gehäuse an verschiedenen DE-Positionen auf der Basisplatte

verfälschen können. Die Abstände zwischen Adapter und DE-Gehäuse werden mit Fühlerlehren bestimmt und betragen maximal  $0.1\text{ mm}$ . Diese Verkippung des Kraftsensors zum DE-Gehäuse resultiert aus Ungenauigkeiten bei der Montage des Messmoduls, ist aber in dieser Größenordnung nicht einfach korrigierbar. Aus diesem Grund wird ein Adapter entworfen und gefertigt, der durch ein Kugelgelenk diese Verkippungen ausgleicht. Dieser Adapter wird aus FR4 und Aluminium gefertigt und ist in Abbildung 6.72 zu sehen. Hierbei wird darauf geachtet, dass der Schwerpunkt des Adapters mittig unter dem Kugelgelenk sitzt. Zusätzlich werden Positionshalter an der Messvorrichtung angebracht, um ein Verdrehen des Adapters zu verhindern. Um die Reaktionskraft der DE zuverlässig messen zu können, muss die



**Abbildung 6.72:** Adapter mit Kugelgelenk zur Kraftmessung; (a) Einzelteile, (b) Adapter zusammengesetzt, (c) Adapter an Messvorrichtung montiert

Kraftmessdose auf das DE-Gehäuse gedrückt werden. Hierbei muss der Einfluss der Anpresskraft des Kraftsensors auf das Gehäuse untersucht werden. Im Idealfall sollte diese Anpresskraft keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Um das zu verifizieren werden Kraftmessungen mit Anpresskräften von  $F_0 = 0.1\text{ N}$ ,  $0.3\text{ N}$  und  $0.5\text{ N}$  durchgeführt. Hierbei wird ein DE-Streifenaktor mit  $0\%/20\%$  Konfiguration verwendet. Vor der eigentlichen Messung der Reaktionskraft muss zunächst der Kraftsensor auf das DE-Gehäuse abgesenkt werden. Während des Absenkens des Kraftsensors wird permanent die Kraft überwacht bis der Kontakt zwischen Kraftsensor und DE-Gehäuse hergestellt ist (siehe Anhang B.IV). Abbildung 6.73 zeigt die Kraftwerte während dieses Vorganges für verschiedene Anpresskräfte. Die Kraftverläufe zeigen, dass nach dem ersten Kontakt die Kraft abfällt bis die Kontaktkraft  $F_c$  erreicht ist. Allerdings ist hierbei auch eine kurze Abflachung des Kraftverlaufs zu erkennen, was auf eine Bewegung des Kugelkopfes in der Kugelpfanne des Kraftsensoradapters zurückzuführen ist. Nach dem Entriegeln des Gehäuses wird der Kraftsensor angehoben bis die Anpresskraft erreicht ist. Die Unterschiede in den Kontaktierungszeitpunkten sind auf Verkippungen des Kraftsensoradapters zurückzuführen, die durch das Anpressen des Adapters auf das Gehäuse eliminiert werden.



**Abbildung 6.73:** Kontaktierung des Kraftsensors mit DE-Gehäuse; (a) schematischer Ablauf, (b) Kraftverläufe während der Kontaktierungsphase

Zusätzlich lässt sich aus den Kraftverläufen die Gewichtskraft des Kraftsensoradapters zu  $F_{Adapter} = 0.1387\text{ N}$  ermitteln. Die Kraftmessung wird bei jeder der vorgegebenen Anpresskräfte fünfmal mit demselben DE wiederholt, um eine Aussage über die Wiederholgenauigkeit der Kraftmessungen treffen zu können. Die Messwerte werden hierbei mit einem Mittelwert-Nullphasen-Filter mit Fensterbreite 5 gefiltert. Dabei wird die Anpresskraft aus dem Messsignal  $F_{DE,M}$  die reale Anpresskraft

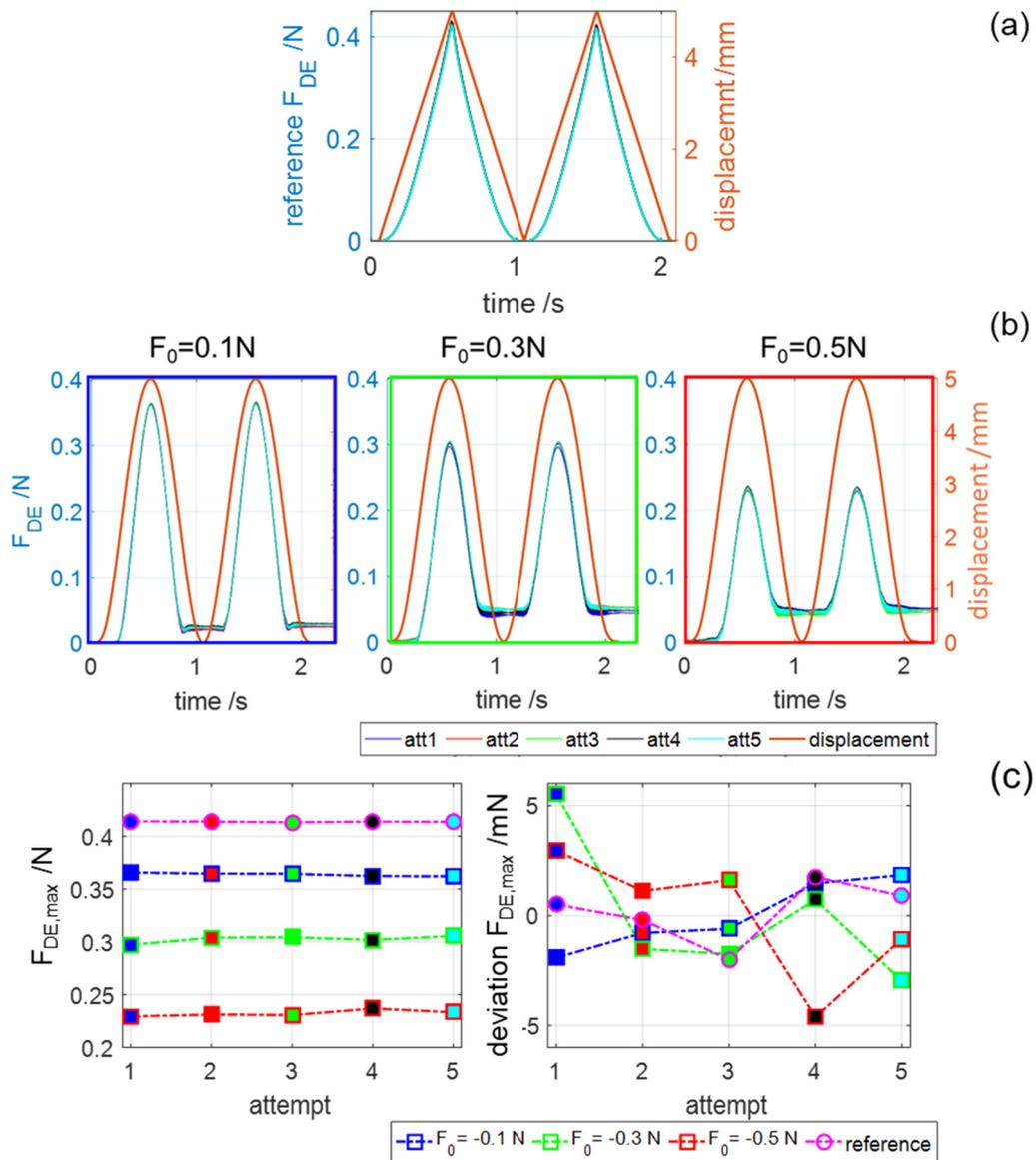
$$F_0 = F_{DE,M}(t = 0\text{ s}) \quad (6.13)$$

gewonnen und mit diesem aus den Messsignalen die Reaktionskraft des DE  $F_{DE}$

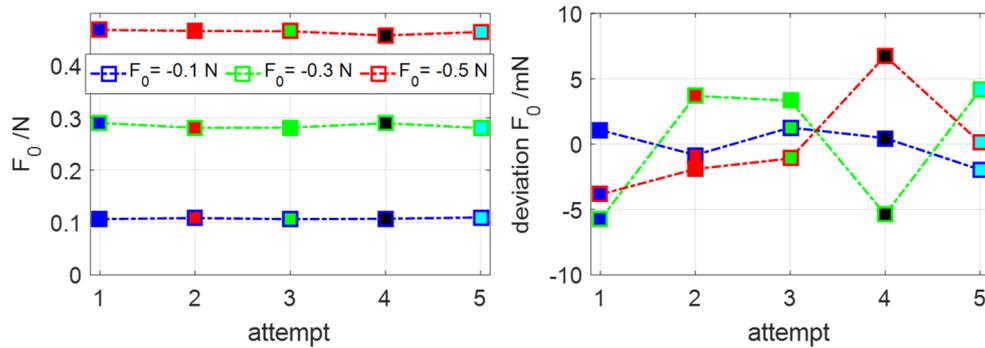
$$F_{DE} = F_{DE,M} - F_0 \quad (6.14)$$

berechnet, um diese bei unterschiedlichen Anpresskräften untereinander zu vergleichen. Die Verläufe der Reaktionskräfte bei einer Auslenkung vom  $5\text{ mm}$  sind in Abbildung 6.74 dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Messung der Reaktionskraft des selben Streifenaktors auf dem Prüfstand aus Kapitel 4.4 aufgeführt. Aus diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich die gemessenen Maximalwerte  $F_{DE,max}$  der beiden Prüfstände unterscheiden. Dieser Unterschied liegt in den verschiedenen Kraftmessverfahren. Im Ermüdungsprüfstand wird die Messung zusätzlich von der Gewichtskraft des Kraftsensoradapters und des DE-Gehäusedeckels beeinflusst, was bei dem anderen Prüfstand nicht der Fall ist. Außerdem fällt auf, dass die Anpresskraft einen erheblichen Einfluss auf die gemessenen Reaktionskräfte des Ermüdungsprüfstand hat. Mit zunehmender Anpresskraft sinkt die maximale gemessene Reaktionskraft. Auch die Abweichungen der

einzelnen Versuche vom Mittelwert innerhalb der Messungen nehmen mit steigender Anpresskraft zu. Wobei sich die gemessenen Reaktionskräfte beider Prüfstände im selben Bereich befinden. Abbildung 6.75 zeigt die Werte der Anpresskräfte und deren Abweichung von ihrem Mittelwert. Hierbei wird ersichtlich, dass auch die Abweichungen der Anpresskräfte vom Mittelwert mit zunehmender Anpresskraft zunehmen.



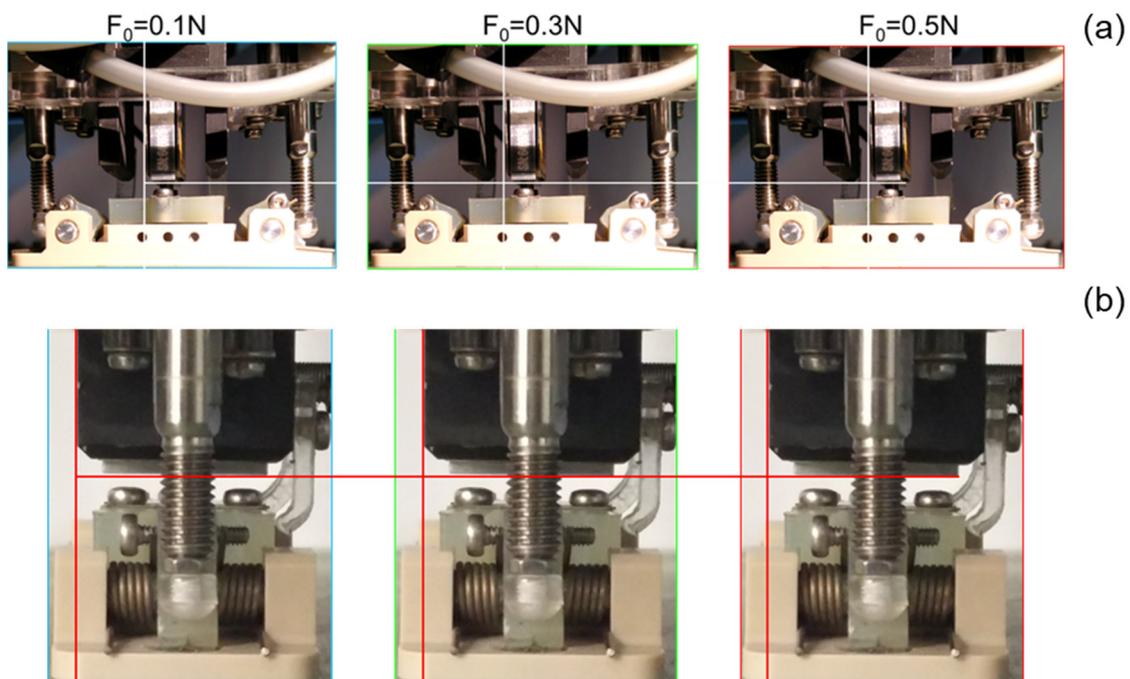
**Abbildung 6.74:** Kraftmessung; (a) auf Referenzprüfstand, (b) auf Ermüdungsprüfstand bei verschiedenen Anpresskräften, (c) Vergleich der Kraftmessungen



**Abbildung 6.75:** Gemessene Anpresskräfte und maximale Reaktionskräfte sowie deren Abweichung vom Mittelwert

### 6.9.2.2 Untersuchung möglicher Ursachen

Die Abweichungen der Maximalwerte der Reaktionskräfte können auf eine Durchbiegung oder Verkippung der Messvorrichtung der Kraftmessung hindeuten. Zur Untersuchung werden von der Messvorrichtung bei jeder Anpresskraft zwei Fotos aufgenommen (siehe Abbildung 6.76). In diesen Fotos sind keine Verkippungen oder Durchbiegungen der Messvorrichtung oder des Kraftsensoradapters zu erkennen. Damit kann dies als Ursache der Messabweichungen ausgeschlossen werden.

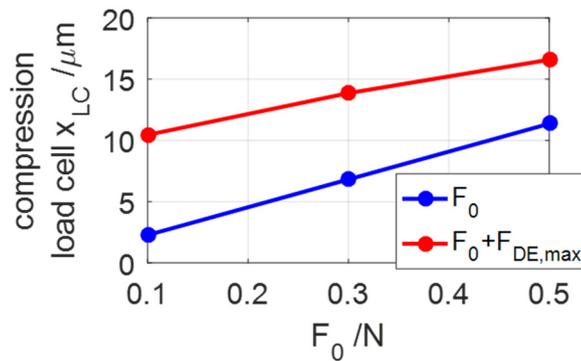


**Abbildung 6.76:** Verkippung der Kraftmessdose bei verschiedenen Anpresskräften; (a) Frontalansicht, (b) Seitenansicht

### 6.9.2.3 Erklärungsansätze

Bei der Kraftmessung wird der Kraftsensor gestaut und ändert seinen Widerstandswert proportional zur Formänderung. Der Kraftmesssensor ist ein *FUTEK LSB 200* bei der eine

Stauchung von  $0.1 \text{ mm}$  einer Kraft von  $4.4 \text{ N}$  entspricht. Dies gilt für senkrecht wirkende Kräfte. Die Maximalwerte der gemessenen Reaktionskräfte  $F_{DE,max}$  aus Abbildung 6.74 nehmen von  $0.36 \text{ N}$  bei  $F_0 = 0.1 \text{ N}$  auf  $0.23 \text{ N}$  bei  $F_0 = 0.5 \text{ N}$  ab. Abbildung 6.77 zeigt den Zusammenhang zwischen der Anpresskraft  $F_0$ , der maximalen Reaktionskräfte  $F_{DE,max}$  und der Stauchung des Kraftsensors  $\lambda_{LC}$ . Die gemessene Verringerung der Maximalkraft um  $0.14 \text{ N}$  entspricht einer um  $6.15 \text{ }\mu\text{m}$  geringeren Stauchung des Kraftsensors durch die



**Abbildung 6.77:** Stauchung des Kraftsensors durch Anpresskraft und Maximalkraft

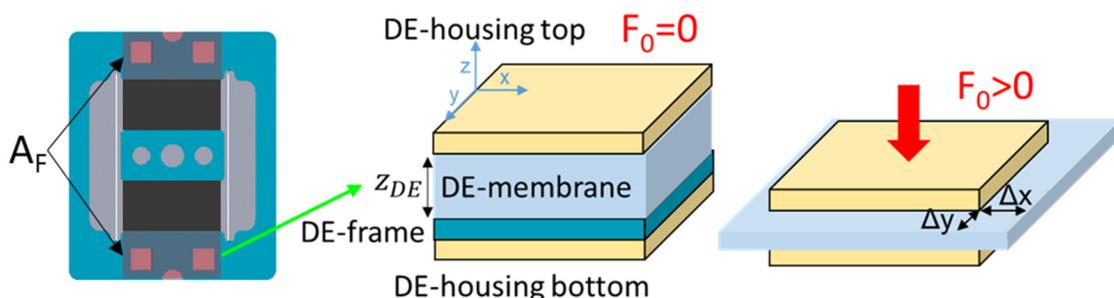
Reaktionskraft. Diese Veränderung der gemessenen maximalen Reaktionskräfte und damit geringere Stauchung des Kraftsensors könnte durch

- laterale Ausdehnung der Membran durch Anpresskraft,
- kraftabhängige Adhäsion zwischen DE-Rahmen/PEEK-Gehäuse und Verkippung des Kraftsensoradapters

oder einer Kombination aus beidem verursacht werden.

### 6.9.2.3.1 Membrandehnung

Bei dem Anpressen des Kraftsensors auf den DE wird wie beim Anlegen einer Maxwellspannung die DE-Membrane zusammengedrückt. Hierbei wird die Dicke  $z_{DE}$  der Membran verringert und gleichzeitig die Membran in der Ebene ausgedehnt (siehe Abbildung 6.78).



**Abbildung 6.78:** Schematische Darstellung der Kompression der DE-Membran durch die Anpresskraft

Das Verhältnis der Dehnungen in Dickenrichtung  $\Delta\lambda_z$  und in Auslenkungsrichtung  $\Delta\lambda_x$  zueinander ist durch

$$\Delta\lambda_x = \Delta\lambda_y = \nu\Delta\lambda_z \quad (6.15)$$

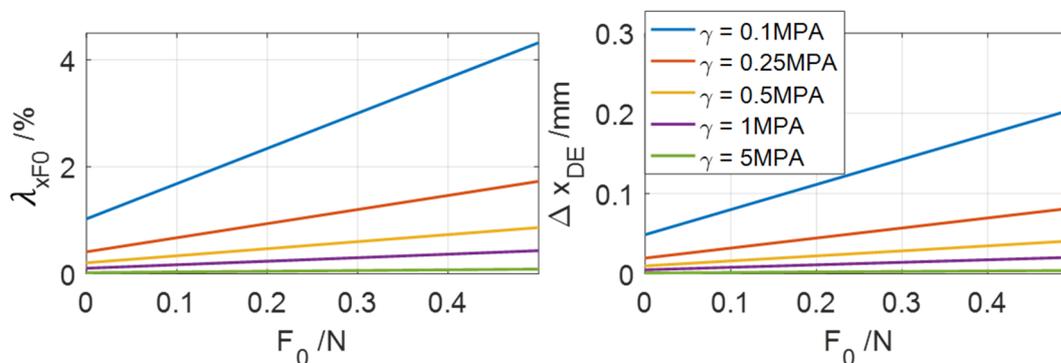
gegeben. Die DE-Membran wird als inkompressibel angenommen, woraus sich die Poissonzahl zu  $\nu = 0.5$  ergibt. Damit lässt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Anpresskraft und Material zu

$$F_0 + F_A + F_H = F_{Membran} = \frac{\Delta\lambda_{x,F0}\gamma A_F}{\nu} \quad (6.16)$$

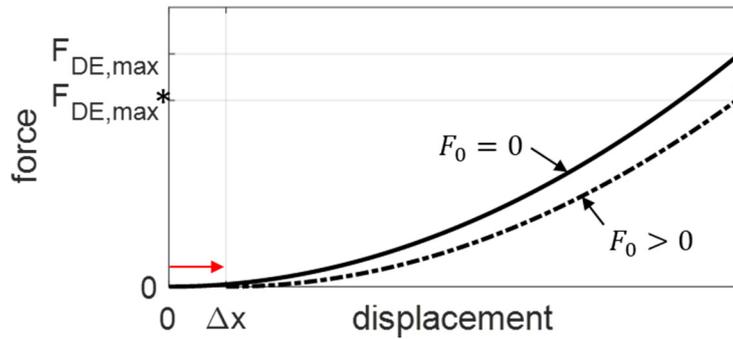
ermitteln, wobei  $\gamma$  das Kompressionsmodul und  $A_F$  die Fläche ist, auf die die Kräfte wirken. Außerdem müssen die Gewichtskräfte des Kraftsensoradapters  $F_A = 0.1387 \text{ N}$  und des DE-Gehäusedeckels  $F_H = 0.017 \text{ N}$  ( $\approx 1.7 \text{ g}$ ) berücksichtigt werden. Hieraus lässt sich die durch die Anpresskraft verursachte Gesamtdehnung  $\Delta\lambda_{x,F0}$  zu

$$\Delta\lambda_{x,F0} = \Delta\lambda_{y,F0} = \nu \frac{F_0 + F_A + F_H}{\gamma A_F} \quad (6.17)$$

bestimmen, wobei die Hälfte dieser Dehnung in Auslenkungsrichtung wirkt. Im Elastosil-Datenblatt wird in Dickenrichtung eine Shore-A-Härte nach DIN53505 von  $Sh_A = 30$  angegeben. Dieser Wert ist nicht eindeutig in einen Wert für  $\gamma$  umzurechnen. Aus diesem Grund werden Berechnungen für mehrere Werte von  $\gamma$  durchgeführt. Der Wertebereich wird aus vorangegangenen Arbeiten [157] abgeleitet. Abbildung 6.79 zeigt diese Berechnungen und verdeutlicht, dass dieser Erklärungsansatz des Einflusses der DE-Reaktionskraft durch die Anpresskraft zutreffen kann. Eine Ausdehnung der Membran führt dementsprechend zu einer Verschiebung der Kraft-Auslenkungskurve nach rechts (siehe Abbildung 6.80). Dadurch verringert sich die maximale gemessene Kraft  $F_{DE,max}$  zu  $F_{DE,max}^*$ .



**Abbildung 6.79:** Einfluss verschiedener Elastizitätsmodule auf die Ausdehnung eines DE in Auslenkungsrichtung in Bezug auf die Höhe der Anpresskraft



**Abbildung 6.80:** Schematische Darstellung der Verschiebung der Reaktionskraft durch die Anpresskraft und Verringerung der maximalen Kraft

### 6.9.2.3.2 Adhäsion

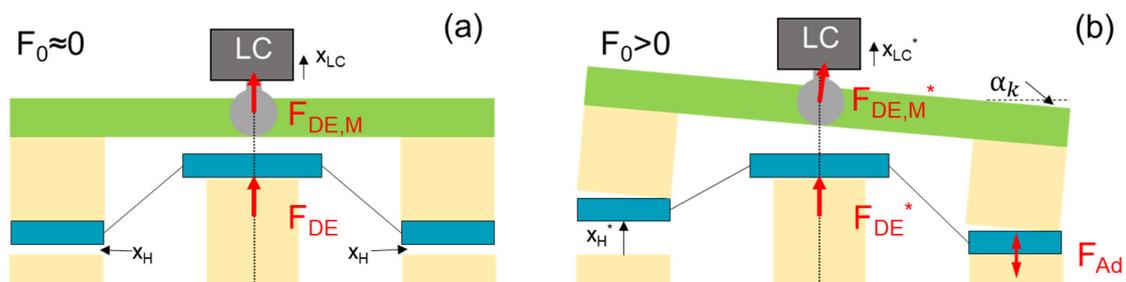
Durch das Anpressen des Kraftsensors auf den DE kommt es zu einer Adhäsion zwischen den Oberflächen des Epoxidrahmens des DE und des PEEK-Gehäusebodens. Dadurch wird eine Adhäsionskraft  $F_{Ad}$  zwischen dem Rahmen und dem Gehäuse erzeugt. Dabei beeinflusst die Anpresskraft  $F_0$  die Adhäsionskraft. Ist die Adhäsionskraft vernachlässigbar gering, hebt sich der DE und löst sich vom Gehäuseboden (siehe Abbildung 6.81 (a)). Dabei wirkt die Reaktionskraft senkrecht zum Kraftsensor und die gemessene Kraft  $F_{DE,M}$  entspricht der Differenz der Reaktionskraft des DE  $F_{DE}$  und den Gewichtskräften des Gehäusedeckels  $F_H$  sowie des Kraftsensoradapters  $F_A$

$$F_{DE,M} = F_{DE} - F_A - F_H \quad (6.18)$$

und der Stauchung des Kraftsensors  $x_{LC}$  der Anhebung des DE-Gehäusedeckels  $x_H$

$$x_{LC} = x_H \quad (6.19)$$

Durch Vergrößerung der Adhäsionskraft durch größere Anpresskräfte haftet der DE-Rahmen auf dem Gehäuseboden und führt bei der Vermessung des DE dazu, dass Teilbereiche des DE-Rahmens am Gehäuseboden anhaften (siehe Abbildung 6.81 (b)). Dadurch verkippt der DE wie auch der Kraftsensoradapter und beeinflusst durch den



**Abbildung 6.81:** Schematische Darstellung der Messung der Reaktionskraft eines DE bei maximaler Auslenkung; (a) ideale Messung, (b) Verkipfung des Adapters des Kraftsensors (LC) durch Anhaften des DE am Gehäuseboden

Kippwinkel die gemessenen Werte der Kraft. Außerdem werden dabei die Membrane auf den beiden Seiten des DE unterschiedlich gedehnt, was zu einer unterschiedlichen Reaktionskraft des DE  $F_{DE}^*$  führt. Daraus wird die gemessene Kraft  $F_{DE,M}^*$  zu

$$F_{DE,M}^* = F_{DE}^* \cos \alpha_k - F_{Ad} - F_A - F_H \quad (6.20)$$

berechnet. Die Stauchung des Kraftsensors liegt im  $\mu\text{m}$  Bereich, dadurch ist der Kippwinkel  $\alpha_k$  und dessen Einfluss auf Dehnung der Membranseiten wie auch die Kraftmessung vernachlässigbar gering. Daraus ist zu schließen, dass die Änderung in der maximalen Reaktionskraft weitestgehend auf Adhäsionseffekte zurückzuführen ist. Durch das partielle Anhaften des DE-Rahmens am Gehäuseboden entspricht die Stauchung des Kraftsensors  $x_{LC}^*$  nach dem Hebelgesetz der Hälfte der Anhebung des Gehäusedeckels  $x_H^*$

$$x_{LC}^* = \frac{x_H^*}{2} \quad (6.21)$$

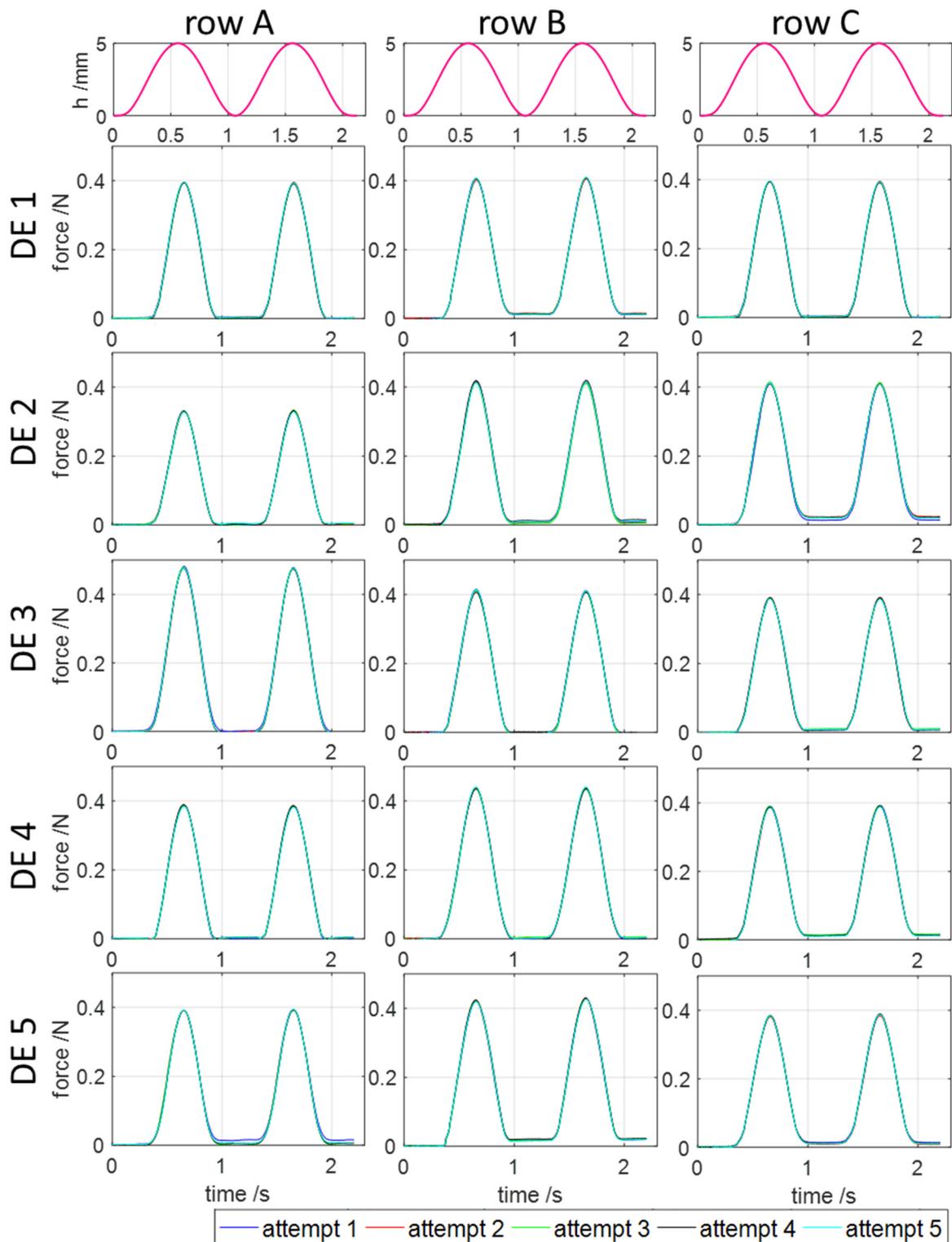
Deswegen ist die gemessene Reaktionskraft bei größerer Anpresskraft geringer.

#### 6.9.2.3.3 Fazit

Beide Erklärungsansätze können die Veränderung der gemessenen Reaktionskraft erklären, allerdings ist eine Kombination aus lateraler Ausdehnung der Membran und anhaften des DE-Rahmens an das Gehäuse die wahrscheinlichste Ursache. Die Ergebnisse dieser Kraftmessungen haben gezeigt, dass die Kraftmessungen mit einer geringen Anpresskraft durchgeführt werden sollten, da die Abweichungen der Reaktionskräften hierbei am geringsten sind und die maximalen Werte am nächsten an den Vergleichswerten des Streifenaktors liegen. Konkreter bedeutet dies, dass für spätere Kraftmessungen eine Anpresskraft von  $F_0 = 0.1 \text{ N}$  verwendet wird.

#### 6.9.2.4 Validierung Kraftmessung aller DE-Positionen

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Kraftmessung wird diese auf jeder einzelnen Position auf der Basisplatte mit demselben DE wiederholt. Dabei wird die Anpresskraft auf  $F_0 = 0.1 \text{ N}$  und die Kontaktierungskraft auf  $F_C = 1 \text{ N}$  eingestellt. An jeder Position wird die Kraftmessung fünfmal wiederholt. Es wird ein DE-Streifenaktor mit 0%/20% Konfiguration verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.82 dargestellt. Zwischen den einzelnen Messungen wird die Messvorrichtung durch den X/Y-Tisch von dem DE weg bewegt und anschließend wieder darüber positioniert. Dies dient der Simulation der



**Abbildung 6.82:** Validierung der Kraftmessung an allen DE-Positionen bei Niederspannung mit demselben Aktor

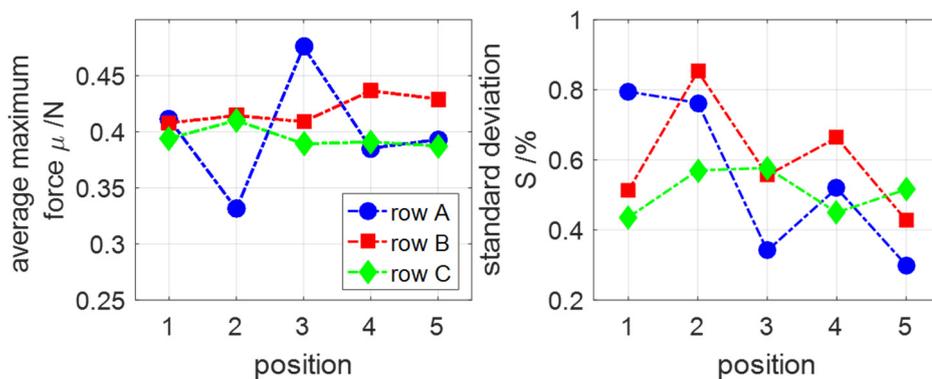
Bewegung der Messvorrichtung in späteren Langzeitmessungen und der Überprüfung, ob die Messungen durch die Bewegung beeinflusst werden. Zum Vergleich der einzelnen Positionen wird jeweils der Mittelwert  $\mu_F$  der maximalen Kräfte  $F_{DE,max,i}$

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{DE,max,i} \quad (6.22)$$

ermittelt, wobei  $N$  die Gesamtzahl und  $i$  die Nummerierung der Messungen ist. Die Standardabweichung  $S$  wird durch

$$S = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |F_{DE,max,i} - \mu_F|^2}}{\mu_F} \quad (6.23)$$

bestimmt. Abbildung 6.83 zeigt die maximalen Kräfte sowie die Standardabweichungen der Messungen an jeder Position. Die Standardabweichungen der maximalen Kräfte liegt bei allen Messungen an allen Positionen unter 1 %. Diese Werte der Standardabweichung zeigen eindeutig, dass die Prozedur und die Kraftmessungen selbst reproduzierbare Ergebnisse liefern.

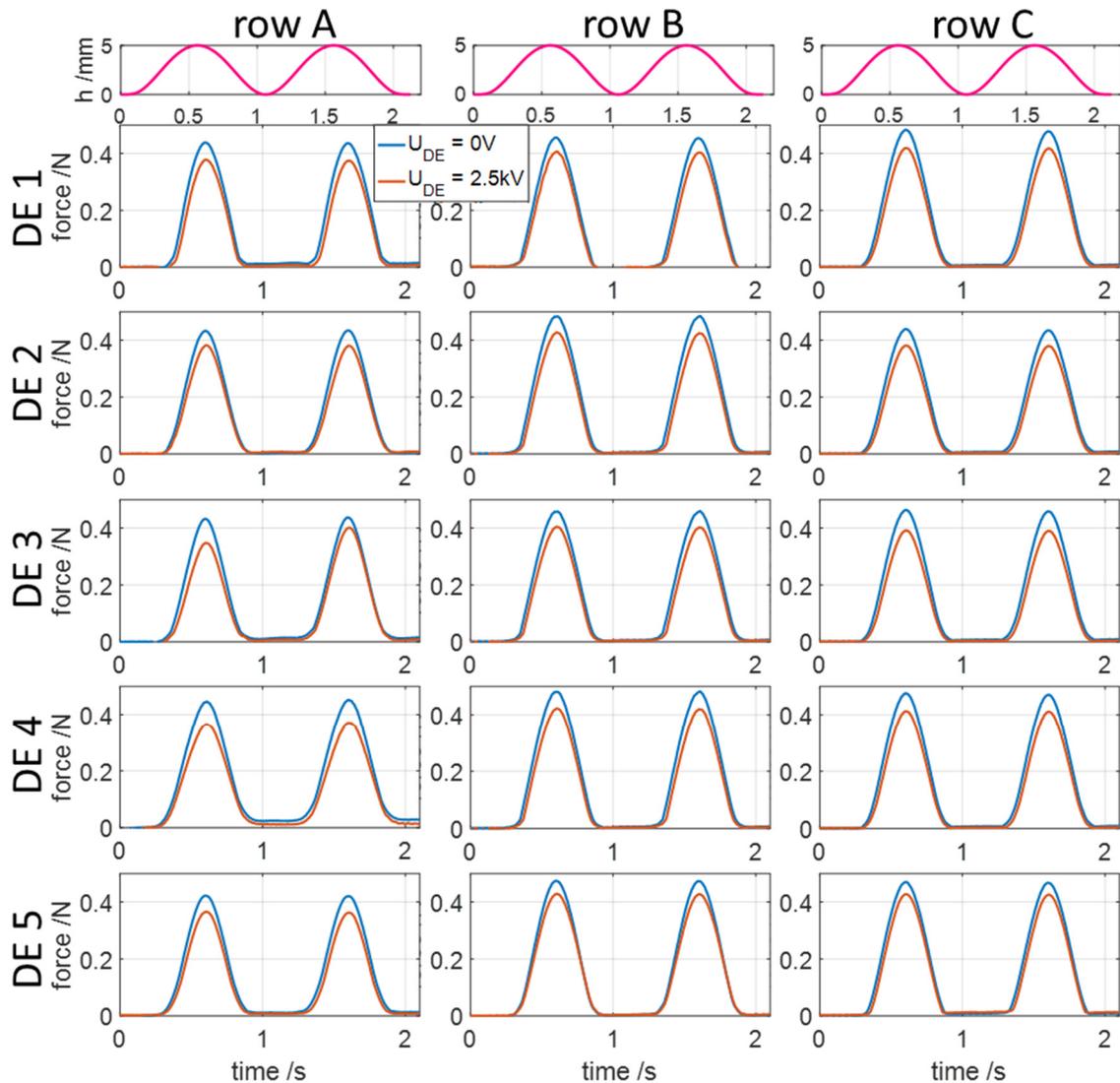


**Abbildung 6.83:** Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Kräfte an den Positionen des Ermüdungsprüfstandes

### 6.9.2.5 Kraftmessung bei Hochspannung

Zur Validierung der Kraftmessung bei Hochspannung werden bei Niederspannung  $U_{DE} = 0 V$  und Hochspannung von  $U_{DE} = 2.5 kV$  die Reaktionskräfte von Aktoren gemessen. Die Messungen werden mit demselben Aktor für jede Reihe durchgeführt. Dies bedeutet, dass insgesamt drei Aktoren zur Validierung verwendet werden. Die Verwendung mehrerer Aktoren ist notwendig, da diese Aktoren nach mehreren Positionswechseln auf der Basisplatte elektrisch versagen und somit keine Validierung mit einem einzigen Aktor möglich ist. Hierbei werden DE-Streifenaktoren mit 0%/20% Konfiguration verwendet und die Messungen bei Nieder- und Hochspannung werden an jeder Position direkt nacheinander durchgeführt. Die Ergebnisse der Validierungsmessungen sind in Abbildung 6.84 dargestellt und zeigen, dass die Reaktionskräfte bei Hochspannung geringer sind als bei Niederspannung. Dies zeigt, dass die Aktoren während der Messungen durchgehend

elektrisch kontaktiert sind. Es bedeutet gleichzeitig, dass DE-Aktoren während der Ermüdungsintervalle elektrisch belastet werden können und Messungen der Reaktionskräfte bei verschiedenen Aktorspannungen  $U_{DE}$  während der Messintervalle durchgeführt werden können.



**Abbildung 6.84:** Validierung der Kraftmessung an allen DE-Positionen bei Hochspannung

### 6.9.2.6 Fazit

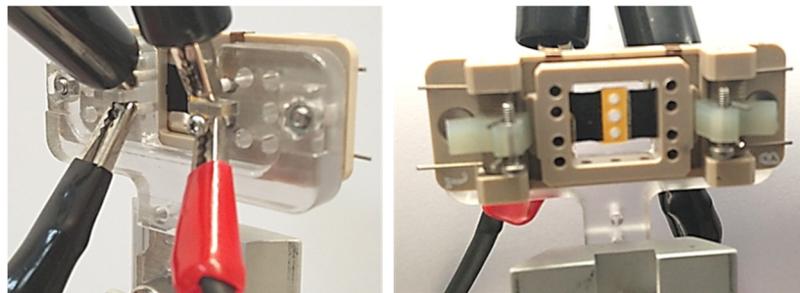
Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass mit diesem Ermüdungsprüfstand reproduzierbare Messungen der Reaktionskräfte durchzuführen sind. Dies beinhaltet Kraftmessungen bei Nieder- und Hochspannung. Die Werte der Reaktionskräfte liegen dabei im Bereich der Referenzmessung, sind aber aufgrund der unterschiedlichen Messmethoden geringer.

### 6.9.3 Ermüdungsprüfungen

*In diesem Abschnitt wird zur Validierung der Ermüdungsprüfungen jeweils eine Ermüdungsprüfung bei Raumtemperatur und bei 50 °C durchgeführt. Dies wird zur Überprüfung der Funktionsweise des Prüfstandes unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Während der Ermüdungsprüfung war der Klimaprüfschrank durchgehend in Betrieb. Die Messungen werden bei 20 °C durchgeführt.*

#### 6.9.3.1 Vorbereitung

Vor der Ermüdungsprüfung werden alle DE auf deren Spannungsfestigkeit getestet. Die Ermüdungsprüfung wird mit Streifenaktoren mit 0%/20%-Konfiguration (siehe Kapitel 4.2.2) durchgeführt. Dabei werden die DE nacheinander mit ihrer Halterung in den Hochspannungsteststand (siehe Abbildung 6.85) eingespannt und mit einer konstanten Hochspannung von  $U_{DE} = 3 \text{ kV}$  für 5 s belastet. Übersteht der DE diese Hochspannung ohne zu versagen, wird er mit der Halterung in den Ermüdungsprüfstand eingebaut. Versagt der DE wird er gegen einen neuen ausgetauscht und dieser getestet.



**Abbildung 6.85:** Teststand zur Prüfung der DE auf Hochspannungsfestigkeit sowie optische Betrachtung vor und nach der Ermüdungsprüfung

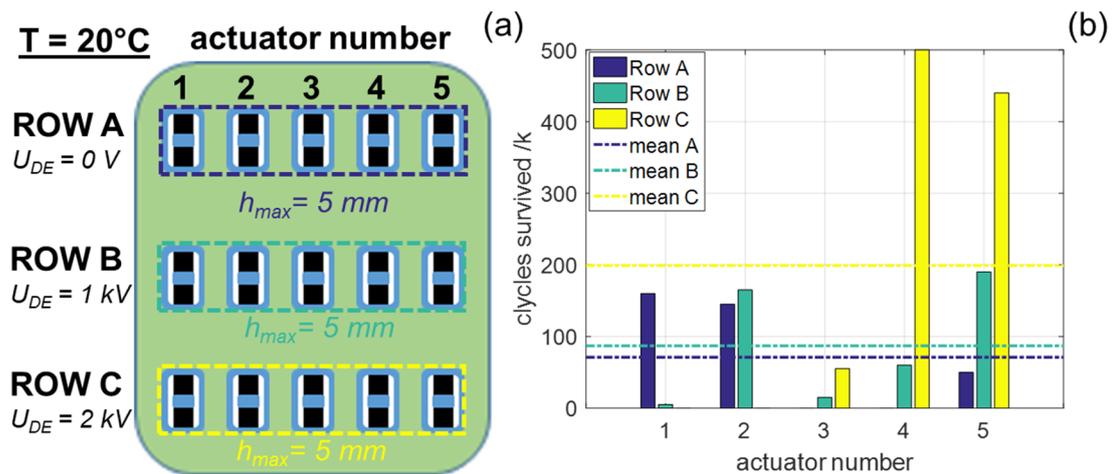
#### 6.9.3.2 Ermüdung bei Raumtemperatur

Die Validierung der Ermüdungsprüfungen bei Raumtemperatur wird bei 20 °C durchgeführt. Hierbei werden die DE durch Auslenkung mechanisch ermüdet. Der Hub wird bei allen DE auf 5 mm eingestellt. Die Hochspannungen werden für jede Reihe variiert. Es wird eine konstante elektrische Spannung von 0 V, 1000 V und 2000 V für Reihe A, B und C eingestellt (siehe Abbildung 6.86 (a)). Die Länge eines Ermüdungsintervalls sind 5000 Zyklen bei einer Auslenkungsfrequenz von 10 Hz. Die maximale Anzahl der Zyklen sind 500 000. Das Messmodul ist während der gesamten Ermüdungsprüfung mit dem Ermüdungsmodul in dem Klimaprüfschrank.

Die Messintervalle sind in drei Messungen für jeden DE unterteilt. Zuerst werden Kapazität

und Widerstand des DE in Bezug zur Auslenkung ermittelt. Als Zweites wird die Kraft  $F_{DE,0V}$  bei Niederspannung ( $0 V$ ) gemessen. Schließlich wird die Kraft bei einer konstanten Hochspannung von  $U_{DE} = 2500 V$  gemessen.

Das Versagen der DE wird durch Messung des Stromes detektiert. Steigt der Betrag des Stromes eines DE über  $200 \mu A$  wird dieser als versagt eingestuft und bei späteren Messungen nicht mehr vermessen. Abbildung 6.86 (b) zeigt die vollzogenen Ermüdungszyklen nach denen die DE versagt haben. Die Aktoren  $A3$ ,  $A4$ ,  $C1$  und  $C2$  haben während des ersten Messintervalls bei Hochspannung versagt, obwohl sie die Durchschlagsprüfung vorher bestanden hatten. Demensprechend liegen keine Daten über ihr Ermüdungsverhalten vor. Es ist zu beobachten, dass die DE mit zunehmender Hochspannung während der Ermüdung mehr Ermüdungszyklen überstehen bis sie versagen. Dies ist auf die höhere Maxwellspannung zurückzuführen, die die DE-Membran lateral ausdehnt und somit die maximale mechanische Dehnung in Auslenkungsrichtung verringert.

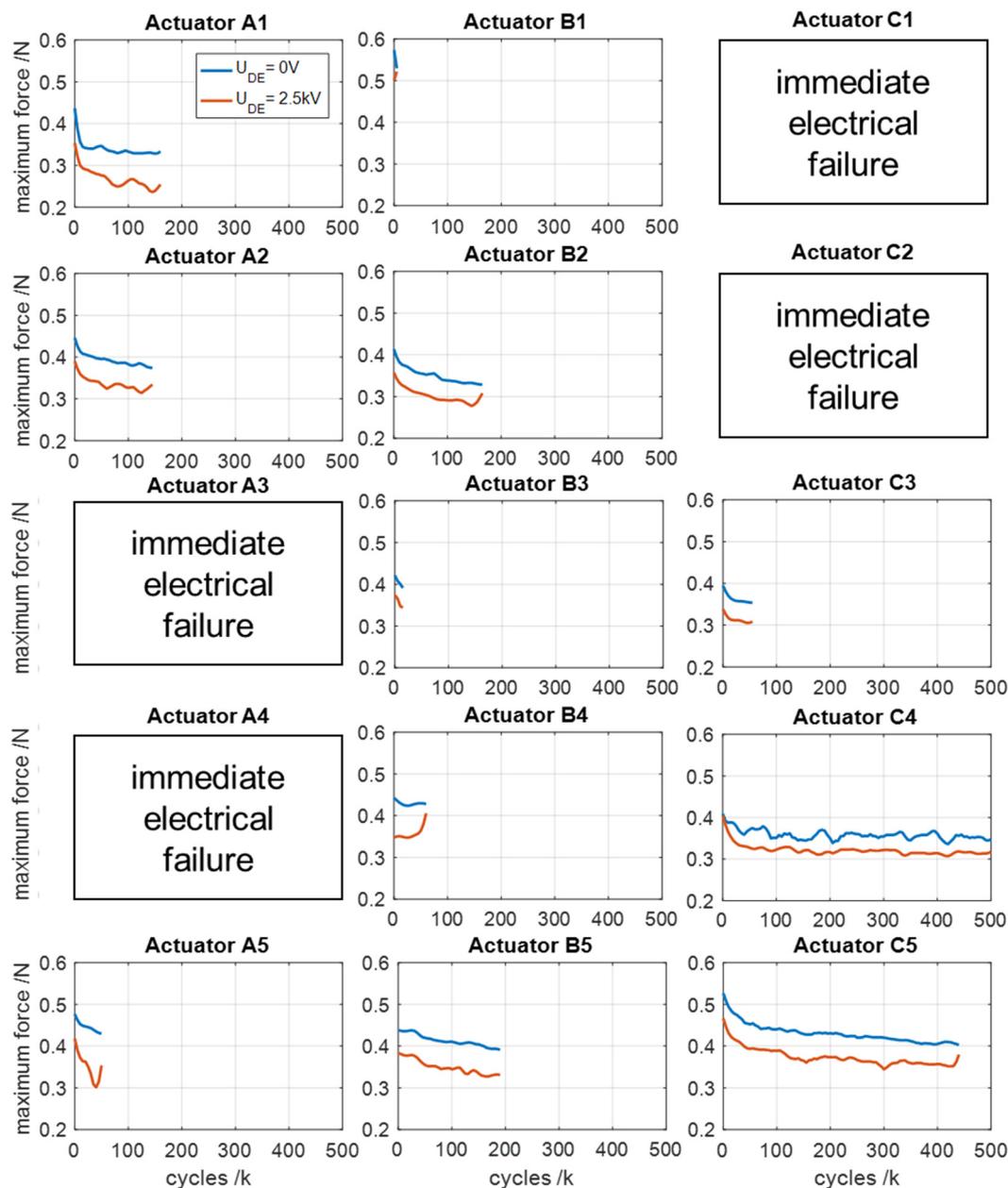


**Abbildung 6.86:** Ermüdungsprüfung bei Raumtemperatur; (a) Ermüdungsgrößen, (b) Ermüdungszyklen nach denen DE versagt haben

### 6.9.3.2.1 Kraftmessungen

Die Werte der maximalen Kräfte aller DE bei Nieder- und Hochspannung  $F_{DE,0V}$ ,  $F_{DE,HV}$  sind in Abbildung 6.87 dargestellt. Hierbei werden die Maximalwerte der Kräfte während der Ermüdungsintervalle detektiert und den durchlaufenen Ermüdungszyklen gegenübergestellt. Dadurch wird offensichtlich, dass der Ermüdungsprüfstand in der Lage ist, Ermüdungstests erfolgreich durchzuführen und dabei nachvollziehbare Ergebnisse liefert. Dies kann daran erkannt werden, dass sowohl die maximalen Kräfte bei Niederspannung als auch bei Hochspannung mit zunehmender Anzahl von durchlaufenen

Ermüdungszyklen abnehmen. Es fällt auf, dass bei machen Aktoren die maximale Kraft unter Hochspannung im Messintervall des Versagens ansteigt. Dies ist beispielsweise bei Aktor *B4* zu beobachten und kann dadurch erklärt werden, dass die Hochspannung an diesem Aktor im Moment des elektrischen Versagens abgeschaltet wird, die Messung der Kraft aber weiterläuft. Dadurch nimmt der Wert der maximalen gemessenen Kraft des Aktors zu.



**Abbildung 6.87:** Kraftverläufe der einzelnen DE bei Niederspannung (blau) und Hochspannung (rot) in Abhängigkeit der durchlaufenen Ermüdungszyklen

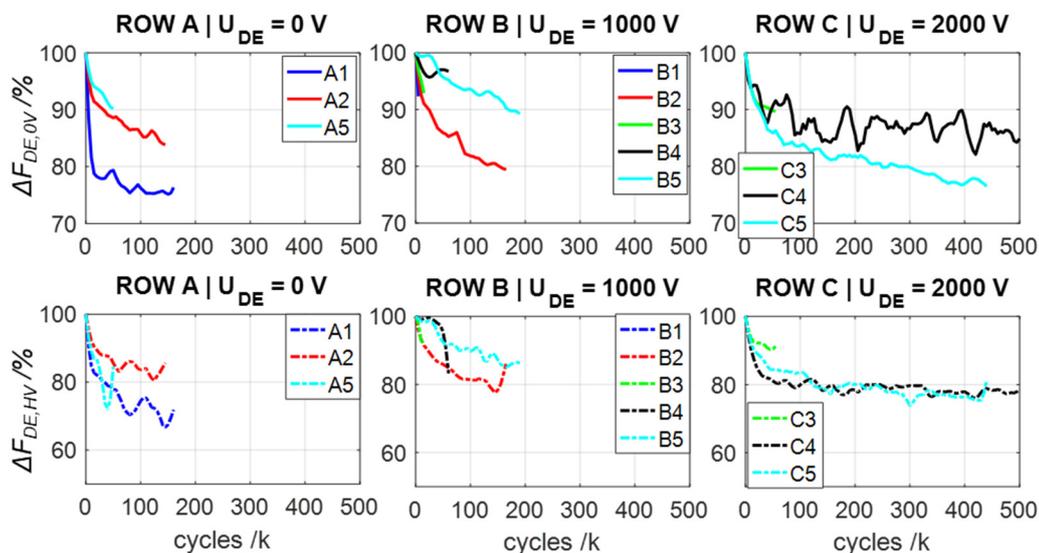
Um eine genauere Betrachtung der Kraftverläufe geben zu können, wird die prozentuale Abnahme  $\Delta F_{DE,0V}$  der maximalen Kräfte bei Niederspannung durch

$$\Delta F_{DE,0V} = \frac{F_{DE,0V,NEW} - F_{DE,0V,CYC}}{F_{DE,0V,NEW}} \quad (6.24)$$

berechnet. Hierbei beschreiben  $F_{DE,0V,NEW}$  die maximale Kraft im ersten Messintervall und  $F_{0V,CYC}$  die Kraft nach den durchlaufenen Ermüdungszyklen. Außerdem wird die prozentuale Abnahme  $\Delta F_{DE,HV}$  bei Hochspannung durch

$$\Delta F_{DE,HV} = \frac{F_{DE,HV,NEW} - F_{DE,HV,CYC}}{F_{DE,HV,NEW}} \quad (6.25)$$

ermittelt, wobei  $F_{DE,HV,NEW}$  die maximale Kraft bei Hochspannung im ersten Messintervall und  $F_{DE,HV,CYC}$  den durchlaufenen Ermüdungszyklen beschreiben. Abbildung 6.88 zeigt die prozentualen Änderungen der maximalen Kräfte bei Nieder- und Hochspannung. Durch diese Kalkulation wird deutlich, dass die größte Abnahme der Kräfte nach dem ersten Ermüdungsintervall zu verzeichnen ist. In den darauffolgenden Ermüdungsintervallen fällt die Abnahme deutlich geringer aus. Die Unterschiede in den einzelnen Kraftverläufen sind darauf zurückzuführen, dass jede Reihe mit verschiedenen Hochspannungen angesteuert wird und die Streifenaktoren nach der Fertigung nicht vollkommen identisch sind.

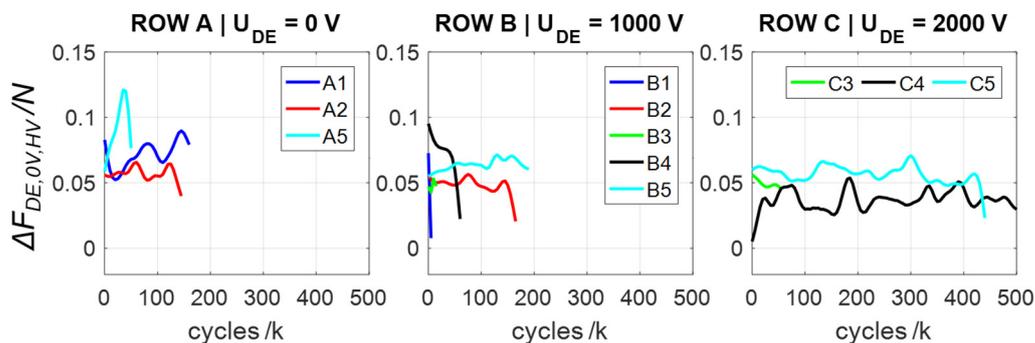


**Abbildung 6.88:** Prozentuale Abnahme der maximalen Kräfte in Bezug zu Ermüdungszyklen für Niederspannung und Hochspannung bei Raumtemperatur

Um eine Aussage über die Änderung der Eigenschaften der Aktoren in Bezug zu den durchlaufenen Ermüdungszyklen geben zu können, wird die Differenz aus den maximalen Kräften bei Nieder- und Hochspannung  $\Delta F_{DE,0V,HV}$  zu

$$\Delta F_{DE,0V,HV} = F_{DE,0V,CYC} - F_{DE,HV,CYC} \quad (6.26)$$

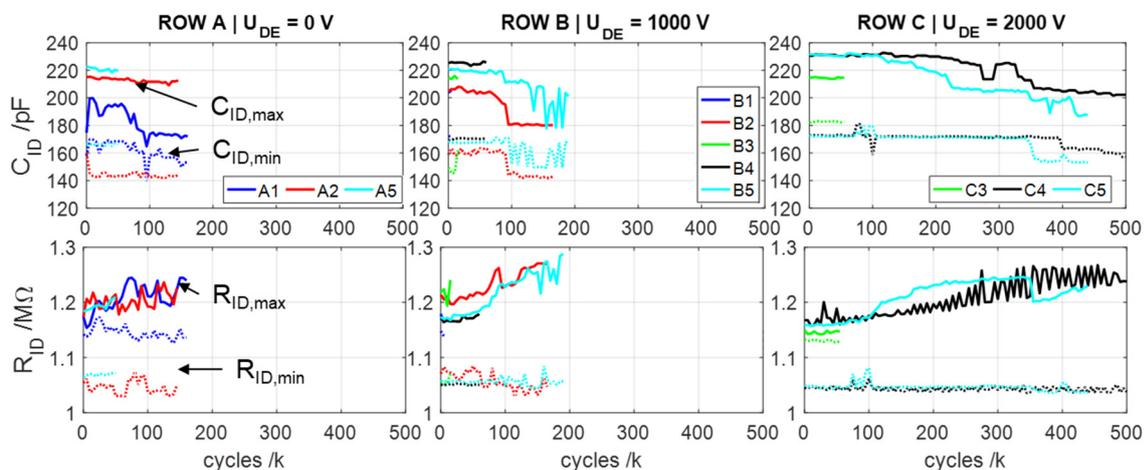
berechnet.  $F_{0V,CYC}$  und  $F_{HV,CYC}$  beschreiben hierbei die maximalen Kräfte bei Nieder- und Hochspannung in Abhängigkeit der durchlaufenen Ermüdungszyklen. Abbildung 6.89 zeigt die Verläufe der Kraftdifferenzen. Diese Verläufe zeigen, dass die Differenzen der Kräfte im Verlauf der Ermüdungsprüfung bei allen Aktoren weitgehend konstant sind. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich im Verlauf der Ermüdung das Verhalten der Aktoren in Bezug auf Hub und Kraft nicht wesentlich verändert. Einzig der Arbeitspunkt sollte sich durch die abnehmenden Kräfte  $F_{DE,0V}$  verschieben.



**Abbildung 6.89:** Differenzen der maximalen Kräfte von Nieder- und Hochspannung in Bezug zu den durchlaufenen Ermüdungszyklen bei Raumtemperatur

### 6.9.3.2.2 Kapazität und Elektrodenwiderstand

Während der Messintervalle werden neben der Messung der Kräfte auch der Widerstand der Elektroden sowie die Kapazität der Streifenaktoren wie in Abschnitt 6.9.1 beschrieben, ermittelt. Abbildung 6.90 zeigt die minimalen und maximalen Werte der Kapazität  $C_{ID,min}$  und  $C_{ID,max}$  sowie des Elektrodenwiderstandes  $R_{ID,min}$  und  $R_{ID,max}$  im Verlauf der Ermüdungsprüfung.

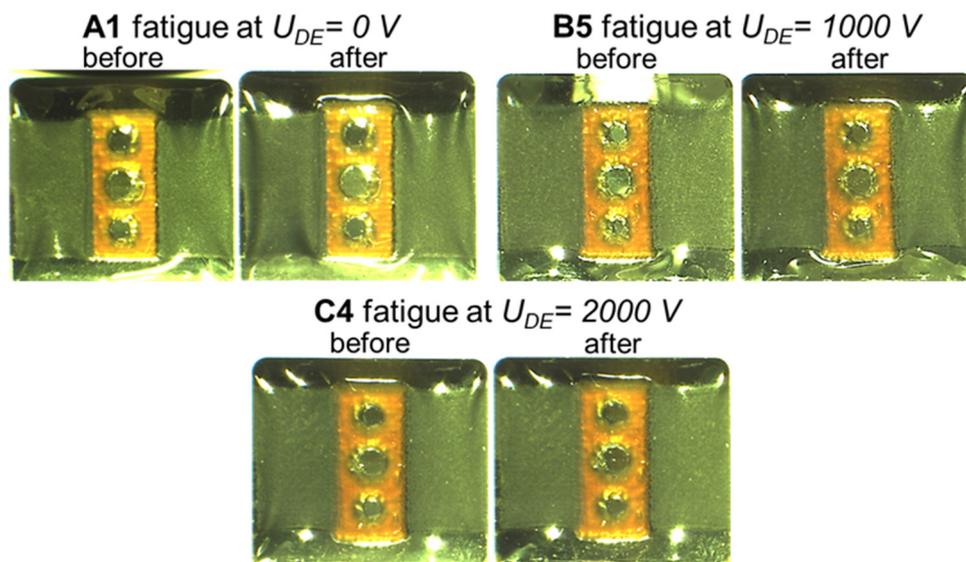


**Abbildung 6.90:** Widerstands- und Kapazitätswerte während der Ermüdungsprüfung bei 20°

Zunächst ist daran zu erkennen, dass die Erkennung der Kapazität und der Widerstände plausible Werte erzeugt und somit funktioniert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Kapazitäten mit zunehmenden Ermüdungszyklen abnehmen und die Elektrodenwiderstände zunehmen.

### 6.9.3.2.3 Visuelle Betrachtung der DE

Zur Überprüfung auf Veränderungen der Streifenaktoren werden diese vor und nach den Ermüdungstests auf dem Teststand aus Kapitel 6.9.3.1 fotografiert. Hierbei werden keine Spannungen angelegt ( $U_{DE} = 0\text{ V}$ ). Abbildung 6.91 zeigt diese Fotos für die Aktoren A1, B5 und C4. Hierbei ist zu erkennen, dass bei der Membran des Aktor A1 nach dem Ermüdungstest eine Faltenbildung entstanden ist. Beim Aktor B5 ist ebenfalls eine Faltenbildung zu erkennen. Diese ist allerdings weniger ausgeprägt. Beim Aktor C4 ist im Gegensatz dazu keine Faltenbildung zu erkennen. Diese Faltenbildung ist auf eine Verlängerung der Membran im Vergleich zum Ursprungszustand durch wiederholte

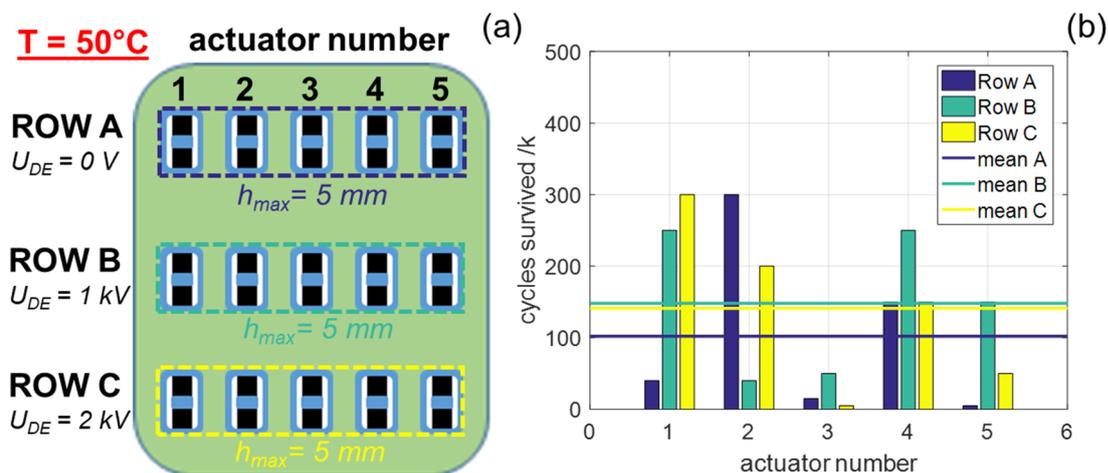


**Abbildung 6.91:** Optische Überprüfung von DE vor und nach der Ermüdungsprüfung bei 20°C

Ausdehnung zurückzuführen. Diese Verlängerung der Membran ist außerdem der Grund für die abnehmenden Kräfte der Aktoren. Außerdem wirkt sich die Änderung der Membran auf die Elektroden aus. Dies begründet Zunahme des Elektrodenwiderstandes. Die unterschiedliche Ausbildung der Faltenbildung lässt darauf schließen, dass das Angelegen einer Hochspannung die DE im Bereich bis 500 000 Ermüdungszyklen vor einer irreversiblen Ausdehnung der Membran bewahrt.

### 6.9.3.3 Hochtemperaturermüdung

Ein Ermüdungstest wird durchgeführt, bei dem die Temperatur während des Ermüdungsintervalls auf  $50\text{ °C}$  eingestellt wird. Das Messmodul wird während der Ermüdungsintervalle außerhalb des Klimaschranks aufbewahrt und nur zu den Messintervallen eingeführt. Wie in Abschnitt 6.5 gezeigt, wird die Länge der Ermüdungsintervalle variiert, um die Dauer der Ermüdungsprüfung zu verringern. Hierbei werden die Ermüdungsintervalle in vier mit  $5000$ , drei mit  $10\ 000$  und die übrigen Intervalle mit  $50\ 000$  Ermüdungszyklen eingeteilt bis das Maximum von  $500\ 000$  Ermüdungszyklen erreicht wird oder alle DE versagt haben. Konkret wird die Ermüdungsprüfung nach  $300\ 000$  Zyklen beendet, da alle DE elektrisch versagt haben. Die übrigen Ermüdungsparameter werden zur Ermüdungsprüfung bei Raumtemperatur nicht verändert (siehe Abbildung 6.92 (a)).



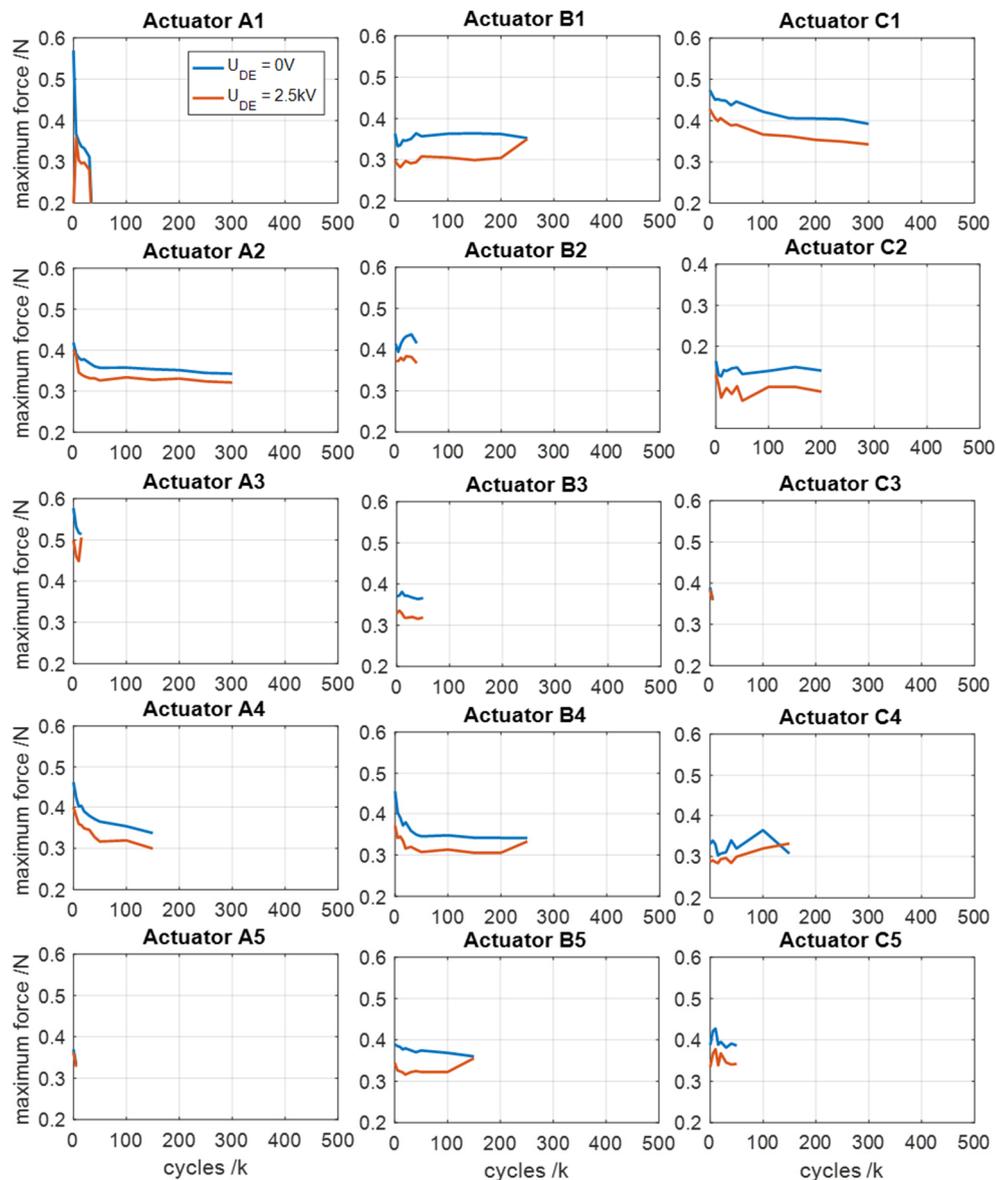
**Abbildung 6.92:** Ermüdungsprüfung bei höherer Temperatur; (a) Ermüdungsgrößen, (b) Ermüdungszyklen nach denen DE versagt haben

Bei der Betrachtung der durchlaufenen Ermüdungszyklen bis zum Versagen der DE ist festzustellen, dass alle Aktoren das erste Messintervall überstanden haben (siehe Abbildung 6.92 (b)). Im vorangegangenen Test haben vier Aktoren direkt versagt. Außerdem haben mehr Aktoren  $200\ 000$  Zyklen überlebt als bei Raumtemperatur. Insgesamt sind dies acht DE im Vergleich zu zwei bei Raumtemperatur. Die durchschnittlich überstandenen Ermüdungszyklen haben sich für Reihe A von  $70\ 000$  auf  $100\ 000$  und für Reihe B von  $90\ 000$  auf  $150\ 000$  erhöht. Bei Reihe C ist dieser Wert von  $200\ 000$  auf  $140\ 000$  gefallen. Daraus lässt sich schließen, dass die höhere Temperatur von  $50\text{ °C}$  die Anzahl der Ermüdungszyklen bis zum elektrischen Versagen bei Spannungen bis  $1000\text{ V}$  erhöht. Allerdings scheint die erhöhte Temperatur bei einer Hochspannung die

Lebensdauer zu verkürzen. Außerdem fällt auf, dass kein DE die maximale Anzahl von Ermüdungszyklen erreicht hat.

### 6.9.3.3.1 Kraftmessungen

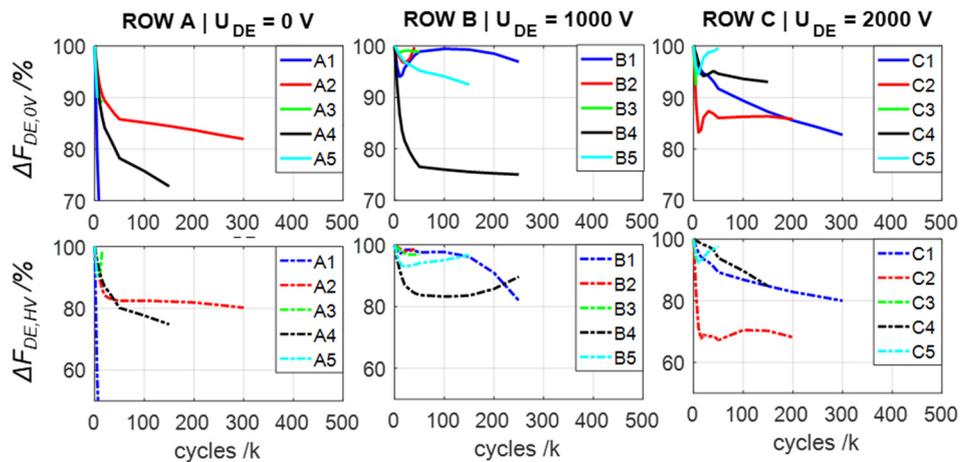
Die Ergebnisse der Kraftmessungen für Hoch- und Niederspannungen sind in Abbildung 6.93 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Prüfstand auch bei höherer Ermüdungstemperatur funktioniert und plausible Ergebnisse liefert. Es fällt auf, dass die Kraftverläufe ähnlich wie bei Raumtemperatur mit der Anzahl der durchlaufenen Ermüdungszyklen abnehmen. Allerdings zeigt sich, dass die Verringerung der maximalen Kräfte flacher verläuft, als bei Raumtemperatur. Bei den Aktoren B1, C2



**Abbildung 6.93:** Kraftverläufe der einzelnen DE bei Niederspannung (blau) und Hochspannung (rot) während der Ermüdungsprüfung bei 50°C

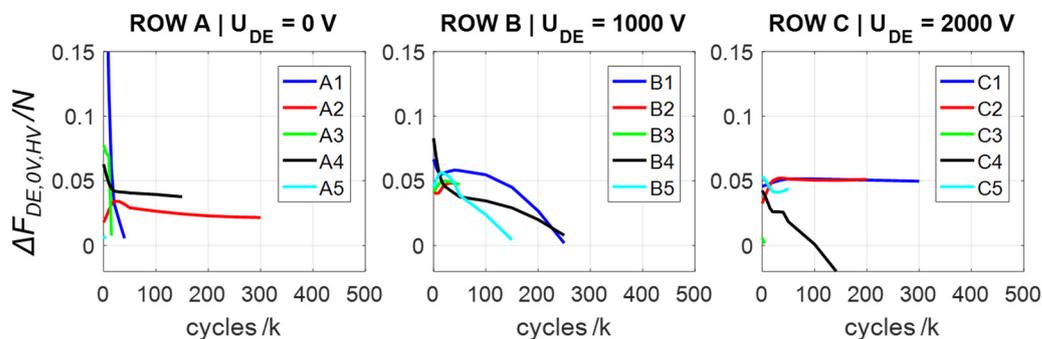
und *C4* bleiben die Kräfte in etwa gleich. Der Kraftverlauf von Aktor *A1* ist darauf zurückzuführen, dass der Aktor erst mechanisch, dann elektrisch versagt hat.

Genauere Betrachtungen der Änderungen der Kräfte während der Ermüdungsprüfung werden durch die Berechnung der prozentualen Kraftdifferenzen bei Niederspannung  $\Delta F_{DE,OV}$  und Hochspannung  $\Delta F_{DE,HV}$  nach Formel (6.24) und (6.25) durchgeführt und sind in Abbildung 6.94 dargestellt. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die Abnahmen der Kräfte deutlich flacher als bei Raumtemperatur sind.



**Abbildung 6.94:** Prozentuale Abnahme der maximalen Kräfte im Verlauf der Ermüdungsprüfung für Niederspannung und Hochspannung bei 50°C

Betrachtet man den Verlauf der Lücke zwischen den Kräften der verschiedenen elektrischen Spannungen  $\Delta F_{DE,OV,HV}$  (siehe Abbildung 6.95) zeigt sich, dass die Lücken bei den Aktoren *A2*, *A4*, *C1* und *C2* konstant sind. Bei den anderen Aktoren nimmt die Lücke im Verlauf der Ermüdungsprüfung ab. Dies ist ein deutlicher Unterschied zur Ermüdungsprüfung bei Raumtemperatur, bei der fast alle Lücken als konstant angesehen werden können.



**Abbildung 6.95:** Differenzen der maximalen Kräfte von Nieder- und Hochspannung während der Ermüdungsprüfung bei 50°C

### 6.9.3.3.2 Kapazität und Elektrodenwiderstand

Auch bei dieser Ermüdungsprüfung werden die Elektrodenwiderstände und Kapazitäten der Aktoren ermittelt (siehe Abbildung 6.96). Diese Ergebnisse zeigen deutlich größere Unterschiede beim Verlauf der Kapazitätswerte der Aktoren. Die Verringerung der Kapazitäten ist deutlich kontinuierlicher und stärker ausgeprägt als bei Raumtemperatur. Außerdem lässt sich keine abrupte Änderung der Kapazitäten erkennen. Die Verläufe der Elektrodenwiderstände hingegen verhalten sich ähnlich wie bei Raumtemperatur.

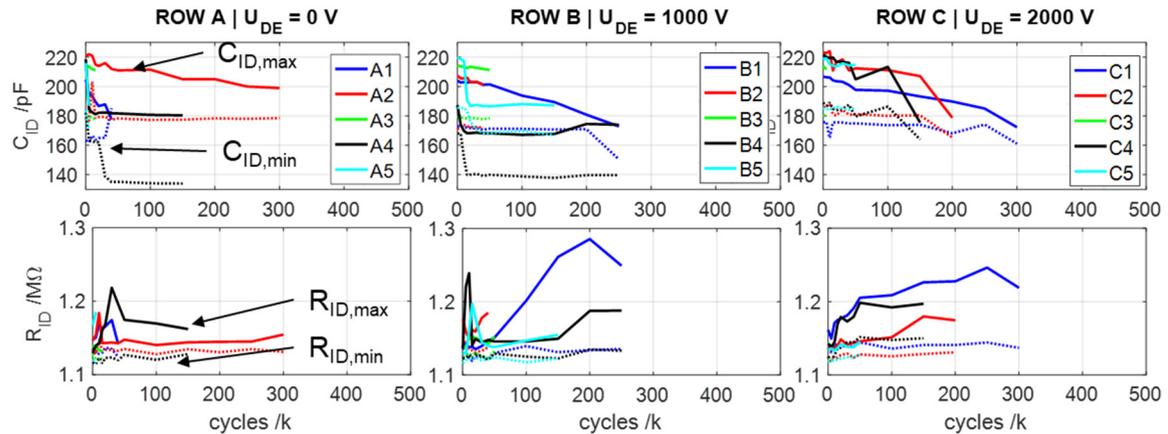


Abbildung 6.96: Widerstands- und Kapazitätswerte während der Ermüdungsprüfung bei 50°

### 6.9.3.3.3 Visuelle Betrachtung der DE

Bei der Betrachtung der DE vor und nach der Ermüdungsprüfung bei den Aktoren A2, B5 und C1 zeigt sich eine ähnliche Faltenbildung wie bei Raumtemperatur (siehe Abbildung 6.97). Die Ausprägung der Ausdehnung erscheint geringer als bei Raumtemperatur. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass vor dem Versagen keiner der Aktoren

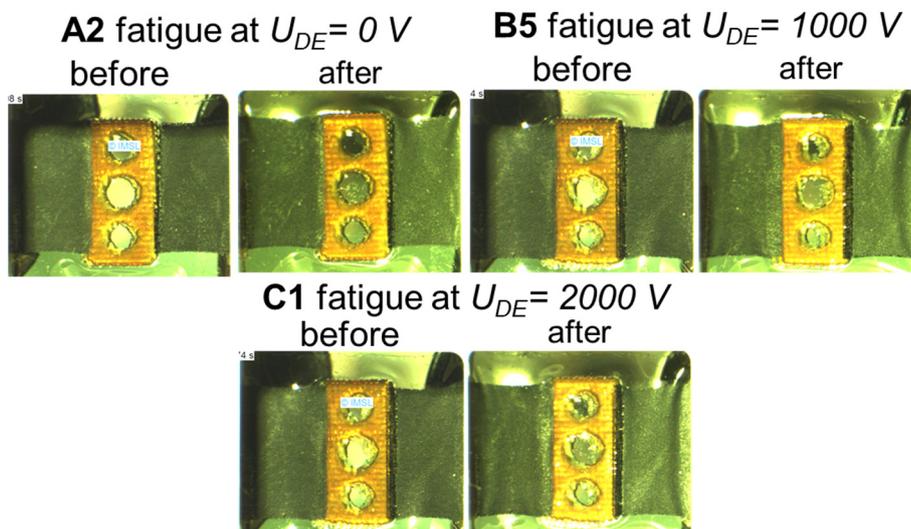


Abbildung 6.97: Optische Überprüfung von DE nach Ermüdungsprüfung bei 50°C

mehr als 300 000 Ermüdungszyklen absolviert hat.

#### **6.9.3.4 Fazit**

Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass der Ermüdungsprüfstand in der Lage ist Ermüdungstests mit mehreren hunderttausend Belastungszyklen bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu absolvieren. Hierbei wurden zwischen den Ermüdungsintervallen die Reaktionskräfte der DE sowie deren Kapazitäts- und Widerstandswerte ermittelt. Bei beiden Temperaturen wurde eine Abnahme der Reaktionskraft und Kapazität der DE mit zunehmender Anzahl der Ermüdungszyklen beobachtet. Die Elektrodenwiderstände stiegen in beiden Fällen während der Ermüdungsprüfungen an.

---

## 6.10 Fazit

In diesem Kapitel wurde die systematische Entwicklung eines Ermüdungsprüfstandes gezeigt, der in der Lage ist, mehrere DE elektrisch, mechanisch oder elektromechanisch bei unterschiedlichen Temperaturen zu ermüden. Dies wurde erreicht, indem die Prüfung in Mess- und Ermüdungsintervall unterteilt wurde. Darauf basierend wurde der Prüfstand ebenfalls in Module unterteilt. Das Ermüdungsmodul verbleibt während der gesamten Ermüdungsprüfung bei jeder Ermüdungstemperatur im Klimaprüfschrank. Die mechanische Ermüdung wird durch wiederholte Auslenkung der DE aus der Ebene erreicht. Die Auslenkung wird durch einen Kurvenantrieb realisiert. Das andere Modul ist das Messmodul, das nur für die Vermessung der DE in den Klimaschrank eingefügt wird. Das Messmodul führt die Vermessungen nacheinander an allen DE durch und misst dabei die Reaktionskräfte oder die Hübe der DE. Zusätzlich kann mit diesem Prüfstand die Elektrodenwiderstände sowie die Kapazitäten der DE ermittelt und im Verlauf der Prüfung beobachtet werden. Es wurde zudem eine Methode entwickelt, die Messdaten in einer einzigen Datei zu organisieren und zu speichern.

Insgesamt befinden sich 15 DE auf dem Ermüdungsmodul, gegliedert in drei Reihen mit jeweils fünf DE. Für jede Reihe lassen sich unterschiedliche, mechanische und elektrische Ermüdungsparameter vorgeben. Die Steuerung des Prüfstandes wurde mit einer *LabVIEW*-Oberfläche realisiert, mit der alle Aktoren, Relais, Ventile sowie die Messdatenerfassung gesteuert werden. Die Steuerung des Prüfstandes und die Hochspannungsversorgung der DE befinden sich in zwei Schaltschränken neben dem Klimaschrank. Die Hochspannungsversorgung ist in der Lage jeden DE separat von der Hochspannung zu trennen.

Es wurde außerdem gezeigt, dass der Ermüdungsprüfstand in der Lage ist, reproduzierbare Messungen der Reaktionskräfte bei verschiedenen Aktorspannungen sowie die Bestimmung der Kapazitäten und Elektrodenwiderständen mit plausiblen Ergebnissen durchzuführen. Zudem wurden zwei Ermüdungsprüfungen durchgeführt, eine bei Raumtemperatur und eine bei 50 °C. Dadurch wurde gezeigt, dass der Prüfstand in der Lage ist, DE durch schwellende mechanische Belastung bei unterschiedlichen elektrischen Spannungen sowie Temperaturen zu ermüden und die Veränderung der Schlüsselparameter zu dokumentieren.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

---

### 7.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war eine umfassende theoretische und experimentelle Untersuchung des Potentials dielektrischer Elastomeraktoren bei der Anwendung als Antriebe von Ventilen. Dies beinhaltet neben der Entwicklung eines Ventilantriebs mit verfügbaren DE und die Entwicklung einer DE-Geometrie, die flexibel an verschiedene Ventilgeometrien angepasst werden kann. Weitergehend wurde eine ‚Self-Sensing‘-Methode entwickelt, die zur Überwachung der Stellposition des DE-Antrieb ohne separate Sensoren dienen soll. Zur Vervollständigung dieser Arbeit wurde ein Ermüdungsprüfstand entwickelt, der DE unter verschiedenen elektromechanischen und klimatische Bedingungen ermüden soll, um so eine Weiterentwicklung der Aktorkomponenten in Richtung Serienreife zu ermöglichen.

Die Basis dieser Arbeit ist die Entwicklung eines DE-Antriebs für das pneumatische Ventil *Bürkert 6604* [32]. Hierbei wurden konische Aktoren vom Typ ‚D25‘ von *Parker* [26,27] verwendet. Im direkten Vergleich zu einem konventionellen, elektromagnetischen Antrieb verbraucht der DE-Antrieb unter Vernachlässigung des Wirkungsgrades des Hochspannungsverstärkers *400-mal* weniger Energie. Dies ist möglich, da das DE-System nur zum Schalten des Ventils Energie benötigt, wohingegen der Elektromagnet kontinuierlich Energie verbraucht. Die erreichbaren maximalen Volumenströme sowie Zeitspannen zum Öffnen und Schließen des Ventils sind in etwa gleich. Zusätzlich ist dieser DE-Antrieb in der Lage den Volumenstrom bei geringem Aufwand proportional zu regeln. Bei DE ist dies durch die Höhe der Aktuierungsspannung möglich, wohingegen

---

Elektromagneten PWM-Schaltungen benötigen. Das einzige Manko dieses DE-Antriebs ist dessen großes Volumen im Verhältnis zum Ventil.

Aus diesem Grund wurde ein DE-Aktor entwickelt [137], dessen Streifengeometrie flexibel auf die Geometrien verschiedener Ventile angepasst werden kann. Zur Überprüfung dieses Konzepts wurde die Geometrie des Streifenaktors an das Ventil 6604 angepasst. Bei der Charakterisierung des Streifenaktors wurde die Vordehnung der Membran bei der Fertigung variiert. Dabei wurde die Membran longitudinal, transversal und biaxial zur Auslenkungsrichtung vorgedehnt und die Einflüsse auf die Reaktionskraft der Aktoren untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die transversale Vordehnung zur geringsten und die longitudinale Vordehnung zur höchsten Steifigkeit der DE führt.

Zur Untersuchung des Einflusses von der Elektrodenfläche auf die Reaktionskraft wurden Elektroden verschiedener Breite auf die Aktorflächen gedruckt. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Elektrodengröße die Steifigkeit, aber auch die Differenz zwischen den Reaktionskräften bei Hoch- und Niederspannung der Streifenaktoren zunimmt. Diese Kraftausbeute ist bei der größten Elektrode und einer transversalen Vordehnung der Membran zur Auslenkungsrichtung am größten. Dadurch ist diese Konfiguration optimal für Aktoranwendungen. Im Vergleich zu den ‚D25‘-Aktoren ist die Kraftausbeute zwar geringer, dies ist aber durch Stapeln mehrerer Streifenaktoren auszugleichen und dabei können die geometrischen Anforderungen erfüllt werden. Die Geometrie dieses DE-Streifenaktors wurde patentiert [158].

Ein weiterer Vorteil der DE ist, dass sie gleichzeitig als Aktor und Sensor verwendet werden können. Dies bietet in Bezug zur Ventiltechnik die Möglichkeit die Stellposition der Ventile ohne separate Sensorik zu detektieren. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit systematisch eine ‚Self-Sensing‘-Methode entwickelt und charakterisiert, die die Aktuierungsspannung eines DE-Feder-Systems mit einer hochfrequenten Niederspannung überlagert. Diese Niederspannung wird mittels einer analogen Hochpassschaltung separiert und durch Detektion ihrer Extrema die Position eines DE-Systems rekonstruieren zu können. Hierbei wurden zur Charakterisierung der Methode Signalspannungen unterschiedlicher Formen (Sinus, Dreieck, Rechteck) und Frequenzen (1 kHz-9 kHz) verwendet und die Änderung ihrer Extrema in Bezug zur Position des Systems gebracht. Dabei wurde festgestellt, dass sinus- und dreiecksförmige Signale bei 4 kHz bzw. 5 kHz einen zwar nichtlinearen, aber hysteresefreien Verlauf aufweisen. Mit diesen

Kombinationen wurden verschiedene Formen (Sinus, Dreieck) und Frequenzen ( $0.1\text{ Hz}$ - $10\text{ Hz}$ ) der Aktuierungsspannung auf Übereinstimmung mit der gemessenen Referenzposition geprüft. An dieser Stelle wurde festgestellt, dass diese Methode die größte Übereinstimmung der gemessenen Positionen bei Aktuierungsfrequenzen  $\leq 1\text{ Hz}$  und bei konstanten Positionen des DE-Systems aufweist. Dadurch wurde gezeigt, dass diese ‚Self-Sensing‘-Methode zur Überwachung der Stellposition eines DE-Ventilantriebs geeignet ist.

Abschließend wurde ein Ermüdungsprüfstand [159] entwickelt, der primär zur Untersuchung von Streifenaktoren aus Kapitel 4 entwickelt wurde, aber aufgrund seines modularen Aufbaus auf andere DE mit geringem Aufwand angepasst werden kann. Mit diesem Ermüdungsprüfstand können mechanische, elektrische und elektromechanische Ermüdungsuntersuchungen dielektrischer Elastomere durchgeführt werden. Dabei ist es möglich, sowohl die mechanischen als auch elektrische Kennwerte wie Reaktionskraft, Hub, Kapazität und Widerstand der DE zu ermitteln. Die Anlage ist das erste System dieser Art, welches eine systematische Untersuchung der Auswirkungen mechanischer und elektrischer Ermüdung bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen auf DE ermöglicht. Insgesamt können in der vorgestellten Konfiguration 15 DE in drei Reihen mit jeweils fünf DE gleichzeitig ermüdet werden. Wegen unterschiedlicher Ermüdungstemperaturen wurde die Ermüdungsprüfung in Messintervalle und Ermüdungsintervalle unterteilt. Hierbei wird die Vermessung der DE immer bei Raumtemperatur vorgenommen. Daraus folgend wurde der Ermüdungsprüfstand modular aufgebaut und besteht aus einem Ermüdungsmodul und einem Messmodul. Das Ermüdungsmodul verbleibt bei allen Prüftemperaturen im Klimaprüfschrank. Das Messmodul wird nur zur Vermessung der Aktoren im Messintervall bei  $20\text{ °C}$  mit dem Ermüdungsmodul verbunden. Dieser Prüfstand ist in der vorgestellten Konfiguration in der Lage mechanische Auslenkungen bis  $5\text{ mm}$  bei maximal  $10\text{ Hz}$  zu erzeugen. Gleichzeitig ist es möglich die DE mit Hochspannungen bis  $3\text{ kV}$  zu belasten. Der Temperaturbereich der Ermüdungsintervalle liegt zwischen  $-20\text{ °C}$  und  $+100\text{ °C}$  und der Bereich der Luftfeuchtigkeit zwischen  $0\%$  und  $98\%$ . Es wurde bei der Validierung der Messung der Reaktionskräfte festgestellt, dass es von Position zu Position leichte Abweichungen der Maximalwerte auftreten. Werden die Messungen an einer Position mehrfach wiederholt, sind die Standardabweichungen der Reaktionskräfte allerdings bei allen Positionen unter  $1\%$ . Daran lässt sich erkennen, dass der Ermüdungsprüfstand reproduzierbare Ergebnisse liefert.

---

Zum Abschluss wurden zwei primär mechanische Ermüdungsprüfungen vorgenommen: eine bei Raumtemperatur und eine bei  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die DE wurden dabei bei einer Auslenkung von  $5\text{ mm}$  und  $10\text{ Hz}$  für  $500\ 000$  Zyklen ermüdet. Es wurden unterschiedliche konstante elektrische Spannungen an die drei DE-Reihen ( $0\text{ V}$ ,  $1\text{ kV}$  und  $2\text{ kV}$ ) angelegt und die Reaktionskräfte bei  $0\text{ V}$  und  $2.5\text{ kV}$  sowie die Widerstände und Kapazitäten gemessen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Maximalwerte der Reaktionskräfte bei Nieder- und Hochspannung mit zunehmenden Ermüdungszyklen verringern, aber die Lücke zwischen den beiden annähernd konstant und dadurch auch die Kraftausbeute erhalten bleibt. Diese Verringerung der Reaktionskräfte ist bei  $0\text{ V}$  am höchsten und bei  $2\text{ kV}$  am geringsten. Die Kapazitäten verhalten sich ähnlich wie die Reaktionskräfte und nehmen im Verlauf der Ermüdungsprüfung ab. Die Elektrodenwiderstände nehmen hingegen zu.

Dieser Ermüdungsprüfstand ist in der Lage unter verschiedenen mechanischen, elektrischen und thermischen Bedingungen DE zu ermüden und reproduzierbare Messungen der Reaktionskraft, der Kapazität und des Widerstandes durchzuführen.

## 7.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurden in Kapitel 4 DE-Streifenaktoren zur Anwendung in einem Ventilantrieb entwickelt und charakterisiert. Der nächste Schritt in diesem Zusammenhang besteht darin, einen Ventilantrieb für das Pneumatikventil *6604* mit diesen Streifenaktoren aufzubauen, zu charakterisieren und weiter zu optimieren. Zusätzlich werden die Geometrie der Streifenaktoren, der Elektroden sowie deren Materialzusammensetzung weiter untersucht und optimiert.

Zudem wird eine Anpassung der ‚Self-Sensing‘-Methode aus Kapitel 5 an diese Streifenaktoren bzw. Ventilantriebe vorgenommen und bezüglich Messfrequenzen und Signalformen weiter optimiert.

Außerdem werden weitere Ermüdungsprüfungen dieser Streifenaktoren durchgeführt. Parallel dazu wird der Ermüdungsprüfstand immer weiter optimiert. Die Lebensdauer der Aktoren wird bei verschiedenen elektromechanischen und thermischen Bedingungen untersucht. Auf Basis dieser Messungen werden die Aktoren weiterentwickelt, um deren Lebenszeit zu verlängern und DE-Ventilantriebe zur Serienreife zu führen.

---

## Abkürzungen

EAP	Elektroaktives Polymer ( <i>electroactive polymer</i> )
DE	Dielektrisches Elastomer ( <i>dielectric elastomer</i> )
CIP	circular-in-plane
COP	circular-out-of-plane
SIP	strip-in-plane
SOP	Strip-out-of-plane
FPGA	Field Programmable Gate Array
PEEK	Polyetheretherketon
SMD	Surface-mounted-device

## Symbolverzeichnis

### Variablen – Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A_{active}$	$m^2$	aktive Aktorfläche/Elektrodenfläche
$A_{DE}$	$m^2$	Aktorfläche
$A_F$	$m^2$	Angriffsfläche mechanische Kraft
$A_{inactive}$	$m^2$	inaktive Aktorfläche / Aktorfläche ohne Elektroden
$C_{cable}$	$F$	Parasitärkapazität der Messkabel
$C_{DE}$	$F$	Kapazität eines DE
$C_{DE,min}$	$F$	Mindestkapazität eines DE-Feder-Systems
$C_{DE,max}$	$F$	Maximalkapazität eines DE-Feder-Systems
$C_{EX}$	$F$	Kapazität der analogen Extrema-Detektionsschaltung
$C_{ID}$	$F$	Gemessene Kapazität des Ermüdungsprüfstandes
$C_f$	$F$	Filterkapazität am Ausgang der Strommessschaltung im Ermüdungsprüfstand
$C_P$	$F$	Parallelkapazität zum DE-Feder-Systems
$C_{ref}$	$F$	Parasitärkapazität des Ermüdungsprüfstandes
$C_{SHP}$	$F$	Kapazität separater Hochpass
$d_E$	$m$	Breite der Elektroden
$d_I$	$m$	Breite der Isolationsfläche
$e_{xy}$	$m$	Exzentrizität der Bohrung in Kurvenscheibe
$f_{cH}$	$Hz$	Grenzfrequenz der Strommessschaltungen im Ermüdungsprüfstand
$f_{HV}$	$Hz$	Frequenz der Hochspannung
$f_{FC}$	$Hz$	Ermüdungsfrequenz
$f_m$	$Hz$	Signalfrequenz zur Bestimmung elektrischer Parameter
$F_0$	$N$	Anpresskraft Kraftsensor auf DE-Gehäuse
$F_{actuator}$	$N$	Kraft der Aktoren beim Öffnen eines Ventils

---

$F_A$	$N$	Gewichtskraft Adapter des Kraftsensors
$F_{Ad}$	$N$	Adhäsionskraft zwischen Oberflächen unterschiedlicher Materialien
$F_C$	$N$	Kontaktierungskraft Kraftsensor auf DE-Gehäuse
$F_{DE}$	$N$	Reaktionskraft eines DE-Aktor
$F_{DES}$	$N$	Systemkraft Feder-DE-Aktor-System
$F_{DE,M}$	$N$	gemessener Kraftwert
$F_{DE,OV,NEW}$	$N$	Reaktionskraft eines frischen Aktors bei Niederspannung
$F_{DE,OV,CYC}$	$N$	Reaktionskraft eines ermüdeten Aktors bei Niederspannung
$F_{DE,HV,NEW}$	$N$	Reaktionskraft eines frischen Aktors bei Hochspannung
$F_{DE,HV,CYC}$	$N$	Reaktionskraft eines ermüdeten Aktors bei Hochspannung
$F_{DE,OV}$	$N$	Reaktionskraft Aktor mit Elektroden bei Niederspannung
$F_{DE,HV}$	$N$	Reaktionskraft Aktor mit Elektroden bei Hochspannung
$F_{DE,max}$	$N$	Maximalwert Reaktionskraft DE
$F_H$	$N$	Gewichtskraft DE-Gehäuse
$F_{max}$	$N$	Maximalwert einer Kraft
$F_{NE}$	$N$	Reaktionskraft Aktoren ohne Elektrode
$F_s$	$N$	Federkraft
$F_{valve}$	$N$	Kraftcharakteristik Pneumatikventil
$h$	$m$	Auslenkung der Aktoren aus der Ebene
$h_N$	$m$	Hub Kurvenscheibe
$h_{N,max}$	$m$	maximaler Hub Kurvenscheibe
$h_{min}$	$m$	Vorauslenkung
$h_{max}$	$m$	maximale durch Hochspannung erzeugte Auslenkung DE-Feder-System
$H$	$m$	Länge Ventilhebel
$I$	$A$	elektrischer Strom
$I_{DE}$	$A$	elektrischer Strom der DE-Aktoren
$k$	$N/mm$	Federsteifigkeit lineare Feder
$l_0$	$m$	Basislänge Aktormembran
$N_F$	-	Gesamtzahl Ermüdungszyklen in einer Ermüdungsprüfung
$n_{FC}$	-	Anzahl Ermüdungszyklen in einem Ermüdungsintervall
$N_{FI}$	-	Anzahl Ermüdungsintervalle in einer Ermüdungsprüfung
$N_M$	-	Anzahl Messintervalle in einer Ermüdungsprüfung
$N_{HC}$	-	Anzahl Temperaturänderungen in einer Ermüdungsprüfung
$p_0$	$bar$	Druck am Eingang eines Ventils
$p_1$	$bar$	Druck am Ausgang eines Ventils
$r$	$m$	Radius Kurvenscheibenbohrung
$R$	$m$	Außenradius Kurvenscheibe
$R_{DES}$	$\Omega$	Elektrodenwiderstand DE
$R_{DEP}$	$\Omega$	Widerstand der Aktormembran

---

$R_{EX}$	$\Omega$	Entladewiderstand der analogen Extrema-Detektionsschaltung
$R_i$	$\Omega$	Messwiderstand zur Messung des Stromes im Ermüdungsprüfstand
$R_{HP}$	$\Omega$	Messwiderstand der ‚Self-Sensing‘-Schaltung
$R_{HPN}$	$\Omega$	modifizierter Messwiderstand der ‚Self-Sensing‘-Schaltung
$R_{SHP}$	$\Omega$	Widerstand separater Hochpass
$s$	-	Abweichung der rekonstruierten ‚Self-Sensing‘-Position von der Referenzposition
$S$	-	Standardabweichung der gemessenen Kräfte aus verschiedenen Versuchen
$t_{FI}$	$s$	Dauer Ermüdungsintervall
$t_{FT}$	$s$	Gesamtdauer einer Ermüdungsprüfung
$t_m$	$s$	Dauer Messintervall
$t_M$	$s$	Gesamtdauer Messungen
$T_0$	$^{\circ}C$	Umgebungstemperatur
$T_F$	$^{\circ}C$	Temperatur während der Ermüdung der Aktoren
$T_M$	$^{\circ}C$	Temperatur während der Vermessung der Aktoren
$U_{DE}$	$V$	elektrische Aktuierungsspannung am DE
$U_{IN}$	$V$	Eingangsspannung ‚Self-Sensing‘-Schaltung
$U_{OUT}$	$V$	Ausgangsspannung ‚Self-Sensing‘-Schaltung
$V_{cone}$	$m^3$	Volumen konischer Aktor
$V_{strip}$	$m^3$	Volumen Streifenaktor
$W_{DE}$	$J$	Energieverbrauch DE-Feder-System
$W_{solenoid}$	$J$	Energieverbrauch Elektromagnet
$x_{LC}$	$m$	Stauchung Kraftsensor
$x_H$	$m$	Anhebung des DE-Gehäuses bei der Kraftmessung im Ermüdungsprüfstand
$z_0$	$m$	Basisdicke der Membran
$z_{DE}$	$m$	Dicke der Aktormembran

## Variablen – Griechische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	$^{\circ}$	Auslenkungswinkel der Aktormembran zur Ebene
$\beta$	-	Verstärkungsfaktor der ‚Self-Sensing‘-Schaltung
$\gamma$	$Pa$	Elastizitätsmodul
$\lambda$	-	Dehnung der Aktormembran
$\lambda_x$	-	Dehnung der Aktormembran in x-Richtung
$\lambda_{x,0,c}$	-	Vordehnung Aktormembran durchtrennt in Aktuierungsrichtung
$\lambda_{x,0,uc}$	-	Vordehnung Aktormembran ungetrennt in Aktuierungsrichtung
$\lambda_{x,max,c}$	-	Maximale Dehnung Aktormembran getrennt in Aktuierungsrichtung
$\lambda_{x,max,uc}$	-	Maximale Dehnung Aktormembran ungetrennt in Aktuierungsrichtung
$\lambda_y$	-	Dehnung der Aktormembran in y-Richtung

---

$\lambda_z$	-	Dehnung der Aktormembran in z-Richtung
$\mu_F$	$N$	Mittelwert der gemessenen Kräfte aus verschiedenen Versuchen
$\nu$	-	Poissonzahl
$\sigma_{Max}$	$Pa$	Maxwellspannung
$\tau_{DE}$	$s$	Zeitkonstante des DE-,Self-Sensing'-Systems
$\tau_{DEN}$	$s$	modifizierte Zeitkonstante des DE-,Self-Sensing'-Systems
$\tau_{EX}$	$s$	Zeitkonstante der analogen Extrema-Detektionsschaltung
$\varphi_F$	%	Relative Luftfeuchtigkeit während der Ermüdung der Aktoren
$\varphi_M$	%	Relative Luftfeuchtigkeit während der Vermessung der Aktoren

### Konstanten

Symbol	Wert	Einheit	Bedeutung
$\epsilon_0$	$8.854 \cdot 10^{-12}$	$F/m$	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_R$	2.8	-	relative Dielektrizitätskonstante Elastosil
$E_{AIR}$	3	$kV/mm$	Durchschlagsfestigkeit Luft

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Funktionsprinzip von dielektrischen Elastomeren; (a) spannungsfrei, (b) Hochspannung.....	7
Abbildung 2.2: Kapazitätsänderung von DE durch Auslenkung.....	8
Abbildung 2.3: Elektrisches Ersatzschaltbild einer DE-Membran mit Elektroden .....	9
Abbildung 2.4: Auswahl von DE-Sensoren; (a) Bewegungssensor [96], (b) Drucksensor für Pneumatikanwendungen [101].....	9
Abbildung 2.5: Funktionsprinzip von Stapelaktoren [19]; (a) Spannungslos, (b) bei Hochspannung.....	10
Abbildung 2.6: Stapelaktoren aus Literatur; (a) Maschinell gefertigter Stapelaktor [20], (b) Gefalteter Stapelaktor [19], (c) Stapelaktor zum Heben eines Gewichts [18], (d) Stapelaktor für Ventilanwendung [90].....	10
Abbildung 2.7: Funktionsprinzip eines Membran-Aktors; (a) vorgedehnt ohne elektrische Spannung, (b) bei Hochspannung .....	11
Abbildung 2.8: Fotos planarer Aktoren; (a) Protagonist-Antagonist-System [24], (b) Streifenaktor zur Erzeugung einer konstanten Kraft [107], (c) Kubischer Aktor mit sechs Freiheitsgraden [109], (d) rhombischer DE-Aktor [108].....	12
Abbildung 2.9: Funktionsprinzip von Roll- bzw. Röhrenaktoren [110].....	12
Abbildung 2.10: Fotos von Röhren/Rollaktoren aus der Literatur; (a) Rollaktoren in einer Laufplattform [112], (b) pneumatische Röhrenaktor-Pumpe [118], (c) Rollaktor mit multiplen Freiheitsgraden [113], (d) Rollaktor zur Verstellung eines flatternden Flügels [119].....	13
Abbildung 2.11: Fotos verschiedener Aktoren, die aus der Ebene arbeiten; (a) Flipflop-Aktor [131], (b) konischer Aktor [121], (c) Blasenförmiger Aktor [26], (d) Minimum-Energie-Struktur [124].....	14
Abbildung 2.12: ZIP-Aktoren aus der Literatur [132]; (a) Funktionsprinzip, (b) Foto.....	14
Abbildung 2.13: Konischer DE-Aktor; (a) spannungsfrei; (b) mit angelegter Spannung .	14
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines Ventils mit Motorantrieb .....	15
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines Ventils mit einem Elektromagneten als Antrieb .....	16
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Ventils mit pneumatischem Antrieb .....	16
Abbildung 3.4: Magnetventil 6604 von Bürkert Fluid Control Systems; (a) reales Ventil, (b) CAD-Modell.....	17

---

Abbildung 3.5: Funktionsweise des Magnetventils 6604 .....	17
Abbildung 3.6: Versuchsszenario zur Charakterisierung des Magnetventils 6604 [32] ...	18
Abbildung 3.7: Versuchsaufbau für mechanische und pneumatische Charakterisierung..	19
Abbildung 3.8: Kraft / Hub Charakterisierung an verschiedenen Kontaktpunkten des Ventilhebels [32].....	19
Abbildung 3.9: Kraft und Hub für verschiedene Kontaktpunkte und Drücke (oben) und Kraft über Hub für beide Hebelängen (unten) [32] .....	20
Abbildung 3.10: Vergleich von gemessenen Hub und Kraft für beide Hebellängen [32].	20
Abbildung 3.11: konischer Membran DE nicht ausgelenkt (links) und ausgelenkt (rechts) .....	21
Abbildung 3.12: Charakteristische Kraft-Auslenkungs-Kurven eines konischen DE Aktors mit Gleichgewichtspunkten .....	22
Abbildung 3.13: Charakteristik der verwendeten Federn [32] .....	22
Abbildung 3.14: Kraft Charakteristik einer einlagigen DE Membrane (links), und DE mit linearer Feder (rechts) [32] .....	23
Abbildung 3.15: Vergleich zwischen einlagigem DE-Aktor-System und Ventilkraft [32] .....	24
Abbildung 3.16: Vergleich zwischen doppellagigem DE-Aktor-System und Ventilkraft [32].....	25
Abbildung 3.17: Ventilkörper mit DE-Antrieb .....	25
Abbildung 3.18: Pneumatische Leistungsfähigkeit des Ventils mit DE- und elektromagnetischem Antrieb [32] .....	26
Abbildung 3.19: Schaltverhalten des DE- und elektromagnetischen Ventilantriebs [32].	27
Abbildung 3.20: Vergleich des Energieverbrauchs von DE- und elektromagnetischen Ventilantriebes [32] .....	28
Abbildung 3.21: Proportionalbetrieb des Ventils mit DE-System [32].....	29
Abbildung 4.1: Skizze des Ventils Bürkert 6604 .....	32
Abbildung 4.2: Konischer DE-Aktor; (a) Maße des Aktors, (b) verfügbare Breite für Streifengeometrie.....	32
Abbildung 4.3: Streifenaktor mit einseitiger Kontaktierung .....	33
Abbildung 4.4: Streifenaktor mit beidseitiger Kontaktierung .....	33
Abbildung 4.5: Konzept eines Streifenaktors mit selbsttragendem Rahmen; (a) ungeschnitten, (b) geschnitten .....	34
Abbildung 4.6: Geometrische Zusammenhänge des Streifenaktors; (a) schematische	

---

Darstellung, (b) konkrete Zahlenwerte .....	35
Abbildung 4.7: Vordehnungskonfigurationen der Streifenaktoren .....	35
Abbildung 4.8: Verlauf der relativen Dehnung in Auslenkungsrichtung für verschiedene Vordehnungskonfigurationen (20%/0% und 20%/20% sind deckungsgleich).....	36
Abbildung 4.9: Membrandicke in Bezug zur Vordehnung bei uni- und bi-axialer Vordehnung.....	36
Abbildung 4.10: Herstellung eines Streifenaktoren durch Siebdruck .....	37
Abbildung 4.11: Ultraschallschneider zum Schneiden der DE-Membran; (a) Ultraschallschneider im Aufbau, (b) Schneidevorgang der Aktormembran .....	38
Abbildung 4.12: Zeichnung des ersten ausgearbeiteten Streifenaktors .....	39
Abbildung 4.13: Streifenaktoren der ersten Generation; (a) vollständiger Siebdruckrahmen mit Elektrodenkonfigurationen zur Untersuchung der Funkenstrecke, (b) Nahaufnahme eines Aktors mit verlaufenem Gehäuse (grün) .....	40
Abbildung 4.14: Untersuchung des isolierenden Mindestabstandes zwischen Elektroden- und Schnittkante der Membrane bei 3 kV; (a) schematischer Versuchsaufbau, (b) Funkenbildung bei $d_i = 1$ mm, (c) Anteil der überlebenden DE .....	40
Abbildung 4.15: Zeichnung des Streifenaktors zweiter Generation mit modifiziertem Gehäuse [137] .....	42
Abbildung 4.16: Streifenaktoren der zweiten Generation mit Elektrodenkonfiguration zur elektromechanischen Untersuchung [137].....	42
Abbildung 4.17. Experimenteller Testaufbau zur Charakterisierung der DE Membrane; (a) Skizze, (b) Foto [137].....	43
Abbildung 4.18: Gemessene Kräfte und Auslenkungen für Streifenaktoren; (a) zeitabhängig, (b) Kräfte in Abhängigkeit der Auslenkung [137].....	44
Abbildung 4.19: Gemittelte Kraft-Auslenkungs-Charakteristik der Streifenaktoren bei verschiedenen Vordehnungen [137] .....	44
Abbildung 4.20: Visuelle Studie zum Verhalten der Membran und vor und nach dem Schneiden bei verschiedenen Vordehnungskonfigurationen; (a) gesamter Aktor, (b) Nahaufnahmen der Schnittkanten, (c) Auswirkungen auf Auslenkungs-Dehnungs-Kurven.....	45
Abbildung 4.21: Verschiedene Elektrodenkonfigurationen für kleine ( $d_E = 3$ mm), mittlere ( $d_E = 6$ mm) und große Elektroden ( $d_E = 9$ mm) [137].....	47
Abbildung 4.22: Kraft-Auslenkungs-Verhalten der Streifenaktoren bei Niederspannung für verschiedene Vordehnungen [137] .....	47

---

Abbildung 4.23: Kraftlücke verursacht durch verschiedene Elektrodengrößen bei Niederspannung [137].....	48
Abbildung 4.24: Experimentelles Vorgehen für Hochspannungscharakterisierung von Streifenaktoren [137] .....	49
Abbildung 4.25: Visuelle Studie der Faltenbildung von verschiedenen Vordehnungen bei Hochspannung [137].....	50
Abbildung 4.26: Kraft-Auslenkungs-Verhalten bei Nieder- (blau) und Hochspannung (rot) für kleine (oben), mittlere (mitte) und große Elektrodenflächen (unten) [137].....	51
Abbildung 4.27: Kraftlücken verursacht durch Hochspannung bei verschiedenen Vordehnungen und Elektrodengrößen [137] .....	52
Abbildung 4.28: Vergleich der Größen der Aktoren [137].....	53
Abbildung 4.29: Gemessene Kraft eines konischen DE in Bezug zur Auslenkung [137]	54
Abbildung 4.30: Vergleich von Streifenaktoren und konischen Aktoren; (a) Kraft-Auslenkungsverhalten, (b) Kraftlücken verursacht durch Hochspannung [137].....	54
Abbildung 4.31: Stapel aus vier Aktoren zur Steigerung der Kraftausbeute [137].....	55
Abbildung 5.1: Konischer DE ‚D25‘; (a) schematische Darstellung, (b) elektrisches AC-Ersatzschaltbild.....	58
Abbildung 5.2: Kapazitäts- und Widerstandswerte eines DE gemessen mit LCR-Meter	59
Abbildung 5.3: Hochpassschaltung zur indirekten Ermittlung der Kapazität .....	59
Abbildung 5.4: RC-Betrachtung des DE; (a) vergrößerte Abbildung einer realen Elektrode aus [17], (b) schematischer Widerstandsverteilung, (c) Tiefpassmodell des DE .....	60
Abbildung 5.5: Aufbau zur Ermittlung der Übertragungsfunktion mit Funktionsgenerator und Oszilloskop .....	61
Abbildung 5.6: Verlauf der Übertragungsfunktion eines idealen Hochpasses mit und ohne ohmscher Dämpfung im Vergleich zum realen Hochpass.....	62
Abbildung 5.7: ‘Self-Sensing‘-Konzepte mittels Überlagerung der Aktuierungs- und Messsignale; (a) Überlagerung durch Hochspannungsverstärker [140], (b) Überlagerung der Signale durch separaten Funktionsgenerator über die Erdseite des DE .....	63
Abbildung 5.8: Grundlegende Amplitudenmodulations-‘Self-Sensing‘-Messschaltung ..	64
Abbildung 5.9: Schaltung zur analogen Detektion der Extrema .....	65
Abbildung 5.10: Charakterisierung des ‚Self-Sensing‘-Messaufbaus; (a) Messaufbau, (b) Messergebnisse, (c) Kapazitätsverlauf des DE-Systems.....	66
Abbildung 5.11: Übertragungsfunktion und Signalanstieg zur Bestimmung der Messwiderstände mit maximalen Signalanstiegen .....	67

---

Abbildung 5.12: Validierung der ‚Self-Sensing‘-Methode; (a) Messaufbau, (b) Signalformen .....	69
Abbildung 5.13: Zeitabhängige Messung der ‚Self-Sensing‘-Spannung bei $f_m = 1$ kHz für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen .....	70
Abbildung 5.14: ‚Self-Sensing‘-Extrema in Bezug zum generierten Hub für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen bei verschiedenen Frequenzen .....	71
Abbildung 5.15: Hochpassverhalten der Messschaltung; (a) gesamter Frequenzbereich, (b) Frequenzbereich der Aktuierungsspannung.....	72
Abbildung 5.16: Modifikation des Messaufbaus durch Hinzufügen eines separaten Hochpass.....	72
Abbildung 5.17: Aufbau und Übertragungsfunktion von RC Hochpässen unterschiedlicher Ordnung .....	73
Abbildung 5.18: Hochpassverhalten der Messschaltung ergänzt durch separatem RC-Hochpass zweiter Ordnung; (a) gesamter Frequenzbereich, (b) Frequenzbereich der Aktuierungsspannung .....	74
Abbildung 5.19: Zeitabhängige Messung der ‚Self-Sensing‘-Spannung bei $f_m = 1$ kHz für sinus-, dreiecks- und rechteckförmige Eingangsspannungen mit separatem RC-Hochpass 2.Ordnung .....	75
Abbildung 5.20: ‚Self-Sensing‘-Extrema in Bezug zum generierten Hub ergänzt durch separatem RC-Hochpass zweiter Ordnung.....	76
Abbildung 5.21: Anstieg der Ausgangsspannungen der Messschaltung während der Aktuierung .....	77
Abbildung 5.22: Schematische Ladevorgänge; (a) Aufladen des DE-Systems, (b) Entladen des DE-Systems .....	78
Abbildung 5.23: Verhältnis der Periodendauer der Messfrequenz zur Zeitkonstanten des DE-Systems.....	79
Abbildung 5.24: Modifikation des Messaufbaus durch Änderung der Messwiderstände $R_{HPN}$ .....	79
Abbildung 5.25: Verhältnis der Periodendauer der Messfrequenz zur Zeitkonstanten des DE-Systems mit angepassten Messwiderständen .....	80
Abbildung 5.26: Übertragungsfunktion der Messschaltung in Bezug zu den Modifizierten Widerstandswerten $R_{HPN}$ .....	81
Abbildung 5.27: Vergleich der ‚Self-Sensing‘-Spannung von $R_{HP}$ und $R_{HPN}$ bei $f_m = 2$ kHz .....	81

---

Abbildung 5.28: Extrema der ‚Self-Sensing‘-Spannung in Bezug zum generierten Hub nach Modifikation von $R_{HP}$ zu $R_{HPN}$ .....	82
Abbildung 5.29: Anstieg der Ausgangsspannungen während der Aktuierung nach Modifikation von $R_{HP}$ zu $R_{HPN}$ .....	83
Abbildung 5.30: Modifikation des Messaufbaus durch Änderung der Messwiderstände $R_{HPN}$ und hinzufügen einer Verstärkerschaltung .....	84
Abbildung 5.31: Extrema der Ausgangsspannung in Bezug zum generierten Hub nach Verstärkung um $\beta$ .....	85
Abbildung 5.32: Anstieg der Ausgangsspannungen während der Aktuierung mit Verstärkung.....	86
Abbildung 5.33: Abhängigkeit der ‚Self-Sensing‘-Spannungen von der Aktuierungsfrequenz und Form der Aktuierungsspannung.....	87
Abbildung 5.34: Extrema der ‚Self-Sensing‘-Spannungen in Bezug zur Auslenkung bei verschiedenen Auslenkungsfrequenzen und Formen.....	88
Abbildung 5.35: Schematische Darstellung der Formen der Aktuierungsspannung und deren zeitliche Ableitungen .....	89
Abbildung 5.36: Lookup-Tabellen zur Rekonstruktion der Auslenkung des Systems.....	90
Abbildung 5.37: Rekonstruktion der Auslenkung aus der sinusförmigen Eingangsspannung und Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung.....	91
Abbildung 5.38: Rekonstruktion der Auslenkung aus der dreiecksförmigen Eingangsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung.....	92
Abbildung 5.39: Rekonstruktion der Auslenkung aus der sinusförmigen Eingangsspannung und trapezförmiger Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung .....	94
Abbildung 5.40: Rekonstruktion der Auslenkung aus der dreiecksförmigen Eingangsspannung und trapezförmiger Aktuierungsspannung; (a) rekonstruierte Auslenkungswerte, (b) zeitabhängige Abweichungen, (c) Abweichungen in Bezug zur gemessenen Auslenkung.....	95
Abbildung 6.1: Gruppierung der DE zur Variation der Ermüdungsparameter.....	99
Abbildung 6.2: Unterteilung der Ermüdungsprüfung in Mess- und Ermüdungsintervall .	99
Abbildung 6.3: Aufteilung des Ermüdungsprüfstandes in Messmodul und	

---

Ermüdungsmodul.....	100
Abbildung 6.4: Unterteilung der Prüfzenarien .....	103
Abbildung 6.5: Funktionsmodell der Ermüdung von DE. Unterteilung in Ermüdungsarten; Ermüdungsparameter schraffierte Linien; Schlüsselparameter: durchgezogene Linien .	104
Abbildung 6.6:Schematische Darstellung der mechanischen Belastung eines DE- Membran-Aktors.....	104
Abbildung 6.7: Ersatzschaltbilder eines DE-Membran-Aktors; (a) mechanisches Ersatzschaltbild, (b) elektrisches Ersatzschaltbild.....	105
Abbildung 6.8: Schematische Darstellung eines Ermüdungstests mit elektrischer Last.	106
Abbildung 6.9: Gesamtmesszeit in Abhängigkeit der Länge der Ermüdungsintervalle bei einer Million Ermüdungszyklen .....	109
Abbildung 6.10: Zeitspanne eines Ermüdungsintervalls in Abhängigkeit von Aktuierungsfrequenz und Anzahl der Ermüdungszyklen.....	110
Abbildung 6.11: Dauer des Aufheizens bzw. Abkühlens in Bezug zur Ermüdungstemperatur.....	111
Abbildung 6.12: Vergleich der Zeitspannen zum Absolvieren der Ermüdungsintervalle sowie zur Temperaturänderung.....	111
Abbildung 6.13: Mindestdauer eines Ermüdungstest bei konstanter Länge der Ermüdungsintervalle.....	112
Abbildung 6.14: Beispiel zur Zeiteinsparung durch Variation der Länge der Ermüdungsintervalle.....	113
Abbildung 6.15: Schematische Darstellung einer Kurvenscheibe.....	119
Abbildung 6.16: Einfluss der Außenradien der Kurvenscheiben auf die Hubverläufe ...	119
Abbildung 6.17: Vergleich idealer Sinus mit exzentrischer Bewegung.....	120
Abbildung 6.18: Schematische Darstellung des Ermüdungsmoduls mit Positionierung der DE .....	120
Abbildung 6.19: Kraftmessung; (a) direkte Kraftmessung am DE, (b) indirekte Kraftmessung über DE-Gehäuse.....	121
Abbildung 6.20: Schematische Darstellung der Hubmessung.....	122
Abbildung 6.21: Skizze des Gehäusebodens & Gehäusedeckels .....	122
Abbildung 6.22: Vorgehen zum Einlegen eines DE-Streifenaktors in das Gehäuse; (a) Positionierung des DE am Gehäuse; (b) Einlegen des Aktors in das Gehäuse; (c) Einführen des Gehäusedeckles; (d) Verriegeln des Gehäusedeckels.....	123
Abbildung 6.23: Streifenaktor in einem Streifenaktorgehäuse.....	123

---

Abbildung 6.24: Ober- und Unterseite der Basisplatte .....	124
Abbildung 6.25: Leiterplatte zur Kontaktierung der DE: (a) Hochspannungsseite. (b) Nullpotentialseite .....	125
Abbildung 6.26: Elektrische Kontaktierung der Leiterplatte mit Sechskant-Setzmutter (a) und Rund-Setzmutter (b) .....	125
Abbildung 6.27: Reale Basisplatte des Ermüdungsmoduls .....	126
Abbildung 6.28: CAD-Modell Antriebswelle; (a) Welle mit Bohrlöchern (b) Kurvenscheibenpaaren mit 120° Verdrehung; (c) Kurvenscheiben in Reihe .....	126
Abbildung 6.29: CAD-Modell des Mechanismus zur Erzeugung Auslenkung der DE ..	127
Abbildung 6.30: CAD-Modell des Grundgerüsts des Ermüdungsmoduls .....	128
Abbildung 6.31: CAD-Modell vollständiges Ermüdungsmodul .....	128
Abbildung 6.32: CAD- Modell des Ermüdungsmoduls, Kabelführung und Befestigung für Messmodul.....	129
Abbildung 6.33: CAD-Modell der Messvorrichtungen: (a) Kraftmessung. (b) Hubmessung .....	130
Abbildung 6.34: CAD-Modell des Messmoduls .....	131
Abbildung 6.35: CAD-Modell des Messvorrichtungen montiert im Messmodul: (a) Kraftmessung, (b) Hubmessung .....	131
Abbildung 6.36: Vollständiges CAD-Modell des Ermüdungsprüfstandes.....	132
Abbildung 6.37: Steuerungskonzept des Ermüdungsprüfstandes.....	136
Abbildung 6.38: Steuerungskonzept der Hochspannungsgruppe für eine DE-Gruppe ...	137
Abbildung 6.39: Bewegungspfad zur Positionierung der Messvorrichtung über dem Ermüdungsmodul.....	138
Abbildung 6.40: Absenken des Kraftsensors auf das DE-Gehäuse zur Messung der DE-Reaktionskräfte .....	139
Abbildung 6.41: Verriegeln des DE-Gehäuses und Zurückfahren des Kraftsensors.....	139
Abbildung 6.42: Benutzeroberfläche des Steuerungsprogramms des Ermüdungsprüfstandes unterteilt in Steuerung und Überwachung der einzelnen Funktionen .....	140
Abbildung 6.43: Erzeugte Messdateien für mechanische und elektrische Ermüdung.....	143
Abbildung 6.44: Messdatenaufkommen; (a) Dateigrößen des Messdaten-Array, (b) Anzahl der speicherbaren Dateien in Abhängigkeit der Festplattengröße .....	143
Abbildung 6.45: Aufbau der Hauptmessdatenstruktur und Gruppierung nach Aktornamen .....	145

---

Abbildung 6.46: Schematischer Aufbau einer Messdaten-Hauptgruppe mit Untergruppierung der Daten in Ebenen (level 1, 2) und den Messdatenarrays in der untersten Ebene (bottom level) .....	145
Abbildung 6.47: Schaltschrank, Spannungsversorgungen und Controller; NI cRio Controller zur Anlagensteuerung und Messdatenerfassung. (a) Foto; (b) Skizze .....	147
Abbildung 6.48: Hochspannungsgruppe und Schaltung zur R/C-Detektion; (a) Foto, (b) Skizze, Erläuterung siehe Text.....	147
Abbildung 6.49: Schaltung Strommessung; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung für eine Reihe .....	148
Abbildung 6.50: Schaltung zum Umschalten zwischen Strommessung und R/C-Identifikation; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung.....	148
Abbildung 6.51: Identifikationsschaltung für Widerstand und Kapazität; Schaltplan (a) Differenzmessschaltung, (b) reale Schaltung.....	149
Abbildung 6.52: Schaltung zum Zu- und Abschalten der Hochspannung an jedem DE; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung.....	150
Abbildung 6.53: Umschalter der Hochspannungsverstärker; (a) Schaltplan, (b) reale Schaltung.....	150
Abbildung 6.54: Komponenten der Antreibswelle; (a) Welle, (b) Kurvenscheiben mit 1 mm, 3 mm und 5 mm maximaler Auslenkung .....	151
Abbildung 6.55: Aufbau des Ermüdungsmoduls; (a) Antriebswelle mit Lagerung; (b) Antriebswelle mit Schrittmotor und Auslenkmechanismus; (c) mit Kontaktstiften und Distanzhalter .....	152
Abbildung 6.56: Vollständiges Ermüdungsmodul mit Kabelführung und Führung des Messmoduls im Klimaprüfschrank.....	153
Abbildung 6.57: Messmodul mit Kraftmessvorrichtung .....	154
Abbildung 6.58: Messvorrichtung zur Kraftmessung mit beweglicher Kabelführung....	154
Abbildung 6.59: Zusammenführung von Messmodul und Ermüdungsmodul .....	155
Abbildung 6.60: Vollständiger Ermüdungsprüfstand (Ermüdungs- und Messmodul im Klimaprüfschrank).....	156
Abbildung 6.61: Validierung der Hochspannungserzeugung.....	157
Abbildung 6.62: Validierung der Strommessschaltungen; (a) Spannungsverläufe, (b) ungefilterte Stromsingale, (c) Stromsingale gefiltert durch Hardware-Tiefpass, (d) Stromsingale gefiltert durch Hardware- und Software-Tiefpass.....	158
Abbildung 6.63: Fourier-analyse der Stromsignale bei unterschiedlichen	

---

Filterkonfigurationen .....	159
Abbildung 6.64: Kontaktierung der DE; (a) Kontaktstifte der Basisplatte, (b) Kupferlitzen an DE Gehäuse,.....	159
Abbildung 6.65: Rohdaten der R/C-Identifikation; (a) Messdaten, (b) Vergrößerung, (c) Fourier-Analyse der Messsignale .....	160
Abbildung 6.66: Gefilterte-Daten der R/C-Identifikation; (a) Messdaten, (b) Vergrößerung, (c) Fourier-Analyse der Messsignale .....	160
Abbildung 6.67: gemittelte Kapazitäts- und Elektrodenwiderstandswerte von Streifenaktoren in 0%/20%-Konfiguration; (a) Ersatzschaltbild, (b) gemessen mit LCR-Meter .....	161
Abbildung 6.68: Ersatzschaltbild der parasitären Größen der Verkabelung .....	162
Abbildung 6.69: Referenzwerte der Kapazitäten und Widerstände des Ermüdungsprüfstandes.....	162
Abbildung 6.70: Validierung der R/C-Identifikation mit DE an allen DE-Positionen, Verlauf der Kapazitäten und Widerstände .....	163
Abbildung 6.71: Kontakt des Kraftsensors am DE-Gehäuse an verschiedenen DE-Positionen auf der Basisplatte .....	164
Abbildung 6.72: Adapter mit Kugelgelenk zur Kraftmessung; (a) Einzelteile, (b) Adapter zusammengesetzt, (c) Adapter an Messvorrichtung montiert.....	165
Abbildung 6.73: Kontaktierung des Kraftsensors mit DE-Gehäuse; (a) schematischer Ablauf, (b) Kraftverläufe während der Kontaktierungsphase.....	166
Abbildung 6.74: Kraftmessung; (a) auf Referenzprüfstand, (b) auf Ermüdungsprüfstand bei verschiedenen Anpresskräften, (c) Vergleich der Kraftmessungen.....	167
Abbildung 6.75: Gemessene Anpresskräfte und maximale Reaktionskräfte sowie deren Abweichung vom Mittelwert .....	168
Abbildung 6.76: Verkippung der Kraftmessdose bei verschiedenen Anpresskräften; (a) Frontalansicht, (b) Seitenansicht .....	168
Abbildung 6.77: Stauchung des Kraftsensors durch Anpresskraft und Maximalkraft ...	169
Abbildung 6.78: Schematische Darstellung der Kompression der DE-Membran durch die Anpresskraft.....	169
Abbildung 6.79: Einfluss verschiedener Elastizitätsmodule auf die Ausdehnung eines DE in Auslenkungsrichtung in Bezug auf die Höhe der Anpresskraft .....	170
Abbildung 6.80: Schematische Darstellung der Verschiebung der Reaktionskraft durch die Anpresskraft und Verringerung der maximalen Kraft .....	171

---

Abbildung 6.81: Schematische Darstellung der Messung der Reaktionskraft eines DE bei maximaler Auslenkung; (a) ideale Messung, (b) Verkippung des Adapters des Kraftsensors (LC) durch Anhaften des DE am Gehäuseboden.....	171
Abbildung 6.82: Validierung der Kraftmessung an allen DE-Positionen bei Niederspannung mit demselben Aktor.....	173
Abbildung 6.83: Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Kräfte an den Positionen des Ermüdungsprüfstandes .....	174
Abbildung 6.84: Validierung der Kraftmessung an allen DE-Positionen bei Hochspannung .....	175
Abbildung 6.85: Teststand zur Prüfung der DE auf Hochspannungsfestigkeit sowie optische Betrachtung vor und nach der Ermüdungsprüfung.....	176
Abbildung 6.86: Ermüdungsprüfung bei Raumtemperatur; (a) Ermüdungsgrößen, (b) Ermüdungszyklen nach denen DE versagt haben .....	177
Abbildung 6.87: Kraftverläufe der einzelnen DE bei Niederspannung (blau) und Hochspannung (rot) in Abhängigkeit der durchlaufenen Ermüdungszyklen .....	178
Abbildung 6.88: Prozentuale Abnahme der maximalen Kräfte in Bezug zu Ermüdungszyklen für Niederspannung und Hochspannung bei Raumtemperatur.....	179
Abbildung 6.89: Differenzen der maximalen Kräfte von Nieder- und Hochspannung in Bezug zu den durchlaufenen Ermüdungszyklen bei Raumtemperatur .....	180
Abbildung 6.90: Widerstands- und Kapazitätswerte während der Ermüdungsprüfung bei 20° .....	180
Abbildung 6.91: Optische Überprüfung von DE vor und nach der Ermüdungsprüfung bei 20°C .....	181
Abbildung 6.92: Ermüdungsprüfung bei höherer Temperatur; (a) Ermüdungsgrößen, (b) Ermüdungszyklen nach denen DE versagt haben .....	182
Abbildung 6.93: Kraftverläufe der einzelnen DE bei Niederspannung (blau) und Hochspannung (rot) während der Ermüdungsprüfung bei 50°C .....	183
Abbildung 6.94: Prozentuale Abnahme der maximalen Kräfte im Verlauf der Ermüdungsprüfung für Niederspannung und Hochspannung bei 50°C .....	184
Abbildung 6.95: Differenzen der maximalen Kräfte von Nieder- und Hochspannung während der Ermüdungsprüfung bei 50°C .....	184
Abbildung 6.96: Widerstands- und Kapazitätswerte während der Ermüdungsprüfung bei 50° .....	185
Abbildung 6.97: Optische Überprüfung von DE nach Ermüdungsprüfung bei 50°C .....	185

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Leistungsmerkmale des DE-Ventils im Vergleich zum Magnetventil .....	30
Tabelle 4.1: Maximale Kraftdifferenzen ohne elektrische Spannung .....	48
Tabelle 4.2: Aktive und inaktive Flächen der Aktoren.....	49
Tabelle 4.3: Maximale Kraftlücken verursacht durch Hochspannung .....	52
Tabelle 4.4: Vergleich von konischen und Streifenaktoren.....	55
Tabelle 5.1: Widerstandswerte $R_{HP}$ der Messschaltung.....	67
Tabelle 5.2: Ausbildung von Hysteresen in der Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Auslenkung des DE-Systems.....	77
Tabelle 5.3: Ausbildung von Hysteresen in der Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Auslenkung des DE-Systems nach Modifikation von $R_{HP}$ zu $R_{HPN}$ .....	83
Tabelle 5.4: Kombinationen der geeignetsten Eingangssignale .....	86
Tabelle 5.5: Bildung von Hysteresen in Bezug zu Aktuierungsformen und Frequenzen..	89
Tabelle 6.1: Allgemeine Anforderungsliste .....	101
Tabelle 6.2: Anforderungsliste des Messmoduls .....	101
Tabelle 6.3: Anforderungsliste des Ermüdungsmoduls .....	102
Tabelle 6.4: Aufstellung der Ermüdungs- und Schlüsselparameter.....	104
Tabelle 6.5: Prüfscenarien bei mechanischer Last.....	106
Tabelle 6.6: Prüfscenarien bei elektrischer Last .....	107
Tabelle 6.7: Anzahl der Ermüdungsintervalle und Temperatureinstellungen in Abhängigkeit der Intervalllänge .....	112
Tabelle 6.8: Bewertung der Anordnungsmöglichkeiten von DE.....	116
Tabelle 6.9: Bewertung der Antriebsmöglichkeiten zur mechanischen Ermüdung .....	117
Tabelle 6.10 Systemkomponenten Aktorik.....	133
Tabelle 6.11: Systemkomponenten Mechanik .....	134
Tabelle 6.12: Systemkomponenten Sensorik.....	134
Tabelle 6.13: Systemkomponenten Elektronik .....	135
Tabelle 6.14: Verwendete Module zum Messen und Steuern .....	137
Tabelle 7.1: Basislängen der Materialien bei 20°C .....	224
Tabelle 7.2: Ausdehnungskoeffizient der verwendeten Materialien .....	224

---

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Röntgen W C 1880 Ueber die durch Electricität bewirkten Form-und Volumenänderungen von dielectrischen Körpern *Annalen der Physik* **247** 771–786
- [2] Pelrine R, Kornbluh R, Joseph J and Chiba S 1997 Electrostriction of polymer films for microactuators *MEMS'97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems* (Nagoya, Japan: IEEE) pp 238–243
- [3] Pelrine R E, Kornbluh R D and Joseph J P 1998 Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation *Sensors and Actuators A: Physical* **64** 77–85
- [4] Carpi F, De Rossi D, Kornbluh R, Pelrine R and Sommer-Larse P *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology* (Amsterdam: Elsevir Science)
- [5] Wissler M and Mazza E 2007 Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators *Sensors and Actuators A: Physical* **138** 384–93
- [6] McKay T G, Rosset S, Anderson I A and Shea H 2015 Dielectric elastomer generators that stack up *Smart Materials and Structures* **24** 015014
- [7] Koh S J A, Keplinger C, Li T, Bauer S and Suo Z 2011 Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **16** 33–41
- [8] Maas J and Graf C 2012 Dielectric elastomers for hydro power harvesting *Smart Materials and Structures* **21** 064006
- [9] Kornbluh R D, Pelrine R, Prahlad H, Wong-Foy A, McCoy B, Kim S, Eckerle J and Low T 2012 Dielectric elastomers: Stretching the capabilities of energy harvesting *MRS Bulletin* **37** 246–53
- [10] 3M corp. *VHB datasheet*
- [11] Wacker Chemie AG *Elastosil datasheet*
- [12] Kofod G, Sommer-Larsen P, Kornbluh R and Pelrine R 2003 Actuation Response of Polyacrylate Dielectric Elastomers *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **14** 787–93
- [13] Michel S, Zhang X Q, Wissler M, Löwe C and Kovacs G 2009 A comparison between silicone and acrylic elastomers as dielectric materials in electroactive polymer actuators *Polymer International* **59** 391–9
- [14] Rosset S and Shea H R 2013 Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators *Applied Physics A* **110** 281–307

- 
- [15] Kujawski M, Pearse J D and Smela E 2010 Elastomers filled with exfoliated graphite as compliant electrodes *Carbon* **48** 2409–17
- [16] Araromi O A, Rosset S and Shea H R 2015 High-Resolution, Large-Area Fabrication of Compliant Electrodes via Laser Ablation for Robust, Stretchable Dielectric Elastomer Actuators and Sensors *ACS Applied Materials & Interfaces* **7** 18046–53
- [17] Fasolt B, Hodgins M and Seelecke S 2016 Characterization of screen-printed electrodes for Dielectric Elastomer (DE) membranes: influence of screen dimensions and electrode thickness on actuator performance *Proc. of SPIE SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* vol 9798 (Las Vegas, Nevada: International Society for Optics and Photonics) p 97983E
- [18] Kovacs G, Düring L, Michel S and Terrasi G 2009 Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission *Sensors and Actuators A: Physical* **155** 299–307
- [19] Carpi F, Salaris C and Rossi D D 2007 Folded dielectric elastomer actuators *Smart Materials and Structures* **16** S300–5
- [20] Maas J, Tepel D and Hoffstadt T 2015 Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators *Meccanica* **50** 2839–54
- [21] Hodgins M, York A and Seelecke S 2013 Experimental comparison of bias elements for out-of-plane DEAP actuator system *Smart Materials and Structures* **22** 094016
- [22] Hodgins M, York A and Seelecke S 2011 Modeling and experimental validation of a bi-stable out-of-plane DEAP actuator system *Smart Materials and Structures* **20** 094012
- [23] Rosenthal M, Weaber C, Polyakov I, Zarrabi A and Gise P 2008 Designing components using smartMOVE electroactive polymer technology *Proc. of SPIE* vol 6927 (San Diego, California) pp 692704–1
- [24] Jordi C, Michel S, Kovacs G and Ermanni P 2010 Scaling of planar dielectric elastomer actuators in an agonist-antagonist configuration *Sensors and Actuators A: Physical* **161** 182–90
- [25] Berselli G, Vertechy R, Vassura G and Castelli V P 2009 Design of a linear dielectric elastomer actuator of conical shape with quasi-constant available thrust *Intelligent Engineering Systems, 2009. INES 2009. International Conference on* (Barbados, Barbados: IEEE) pp 89–94
- [26] York A, Dunn J and Seelecke S 2010 Experimental characterization of the hysteretic and rate-dependent electromechanical behavior of dielectric electro-active polymer actuators *Smart Materials and Structures* **19** 094014
- [27] York A, Hodgins M and Seelecke S 2009 Electro-mechanical analysis of a biased dielectric EAP actuator *ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (Oxnard, California: American Society of

- 
- Mechanical Engineers) pp 289–297
- [28] Henke M and Gerlach G 2013 On the development of planar actuators for variable stiffness devices *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 8687, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 868727
- [29] Gupta U, Godaba H, Zhao Z, Chui C K and Zhu J 2015 Tunable force/displacement of a vibration shaker driven by a dielectric elastomer actuator *Extreme Mechanics Letters* **2** 72–7
- [30] Rosset S, Araromi O A and Shea H R 2015 Maximizing the displacement of compact planar dielectric elastomer actuators *Extreme Mechanics Letters* **3** 72–81
- [31] Carpi F and Mazzoldi A 2003 Dielectric elastomer planar actuators for small scale applications *Proc. of SPIE European Workshop on Smart Structures in Engineering and Technology* vol 4763 (Giens, France) p 0277/786X
- [32] Hill M, Rizzello G and Seelecke S 2017 Development and experimental characterization of a pneumatic valve actuated by a dielectric elastomer membrane *Smart Materials and Structures* **26** 085023
- [33] Cadwell S M, Merrill R A, Sloman C M and Yost F L 1940 Dynamic Fatigue Life of Rubber *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY* **12** pp 19-23
- [34] Lake G J and Lindley P B 1965 The mechanical fatigue limit for rubber *Journal of Applied Polymer Science* **9** 1233–1251
- [35] Lake G J 1995 Fatigue and Fracture of Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*: **68** 435–60
- [36] Lake G J and Lindley P B 1964 Cut growth and fatigue of rubbers. II. Experiments on a noncrystallizing rubber *Journal of Applied Polymer Science* **8** 707–721
- [37] Mars W V and Fatemi A 2004 Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey *Rubber Chemistry and Technology* **77** 391–412
- [38] Rainier E T and Gerke R H 1935 A Fatigue Cracking Test for Tire Tread Compounds *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* **7** 368–373
- [39] Madsen F B, Zakaria S, Yu L and Skov A L 2016 Mechanical and Electrical Ageing Effects on the Long-Term Stretching of Silicone Dielectric Elastomers with Soft Fillers: Long-Term Stretching of Silicone Dielectric Elastomers *Advanced Engineering Materials* **18** 1154–65
- [40] Madden J D, Rinderknecht D, Anquetil P A and Hunter I W 2007 Creep and cycle life in polypyrrole actuators *Sensors and Actuators A: Physical* **133** 210–7
- [41] Blok J and LeGrand D G 1969 Dielectric Breakdown of Polymer Films *Journal of Applied Physics* **40** 288–93
- [42] Kollosche M, Kofod G, Suo Z and Zhu J 2015 Temporal evolution and instability in a viscoelastic dielectric elastomer *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*

- [43] Kollosche M and Kofod G 2010 Electrical failure in blends of chemically identical, soft thermoplastic elastomers with different elastic stiffness *Applied Physics Letters* **96** 071904
- [44] Kollosche M, Zhu J, Suo Z and Kofod G 2012 Complex interplay of nonlinear processes in dielectric elastomers *Physical Review E* **85**
- [45] De Tommasi D, Puglisi G and Zurlo G 2014 Failure modes in electroactive polymer thin films with elastic electrodes *Journal of Physics D: Applied Physics* **47** 065502
- [46] Liu L, Zhang Z, Liu Y and Leng J 2014 Failure modeling of folded dielectric elastomer actuator *Science China Physics, Mechanics and Astronomy* **57** 263–72
- [47] Kaltenbrunner M, Keplinger C, Arnold N and Bauer S 2008 Analysis of safe and failure mode regimes of dielectric elastomer actuators *Sensors, 2008 IEEE* (Lecce, Italy: IEEE) pp 156–159
- [48] Plante J-S and Dubowsky S 2006 Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators *International Journal of Solids and Structures* **43** 7727–51
- [49] Pharr M, Sun J-Y and Suo Z 2012 Rupture of a highly stretchable acrylic dielectric elastomer *Journal of Applied Physics* **111** 104114
- [50] Huang J, Shian S, Diebold R M, Suo Z and Clarke D R 2012 The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer *Applied Physics Letters* **101** 122905
- [51] Gisby T A, Xie S Q, Calius E P and Anderson I A 2010 Leakage current as a predictor of failure in dielectric elastomer actuators *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 7642, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 764213
- [52] Zakaria S, Morshuis P H, Benslimane M Y, Germaey K V and Skov A L 2014 The electrical breakdown of thin dielectric elastomers: thermal effects *Proc. of SPIE SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* vol 9056 (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) p 90562V
- [53] Gerratt A P and Bergbreiter S 2013 Dielectric breakdown of PDMS thin films *Journal of Micromechanics and Microengineering* **23** 067001
- [54] Gatti D, Haus H, Matysek M, Frohnapfel B, Tropea C and Schlaak H F 2014 The dielectric breakdown limit of silicone dielectric elastomer actuators *Applied Physics Letters* **104** 052905
- [55] Chen B, Kollosche M, Stewart M, Busfield J and Carpi F 2015 Electrical breakdown of an acrylic dielectric elastomer: effects of hemispherical probing electrode's size and force *International Journal of Smart and Nano Materials* **6** 290–303
- [56] Chakraborty R, Yang S and Biggs J 2006 Breakdown field in compression molded

- 
- silicone dielectric elastomer actuators *Proc. of SPIE EAPAD* vol 6168 (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) p 616809
- [57] Pelrine R, Kornbluh R D, Pei Q, Stanford S, Oh S, Eckerle J, Full R J, Rosenthal M A and Meijer K 2002 Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 4695 (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) pp 126–137
- [58] Wingert A, Lichter M D, Dubowsky S and Hafez M 2002 Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary-dielectric polymers *Proc. of SPIE SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials* (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) pp 415–423
- [59] Plante J-S, Devita L M and Dubowsky S 2007 A road to practical dielectric elastomer actuators based robotics and mechatronics: discrete actuation *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 6524, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 652406
- [60] Sugiyama Y and Hirai S 2006 Crawling and Jumping by a Deformable Robot *The International Journal of Robotics Research* **25** 603–20
- [61] Kovacs G, Lochmatter P and Wissler M 2007 An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators *Smart Materials and Structures* **16** S306–17
- [62] Bar-Cohen Y, Xue T, Shahinpoor M, Simpson J and Smith J 1998 Flexible, low-mass robotic arm actuated by electroactive polymers and operated equivalently to human arm and hand *Robotics* **98** pp 15–21
- [63] Shintake J, Rosset S, Schubert B E, Floreano D and Shea H R 2015 A Foldable Antagonistic Actuator *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **20** 1997–2008
- [64] Shintake J, Rosset S, Schubert B, Mintchev S, Floreano D and Shea H R 2015 DEA for soft robotics: 1-gram actuator picks up a 60-gram egg *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 9430, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 94301S
- [65] Heydt R, Pelrine R, Joseph J, Eckerle J and Kornbluh R 2000 Acoustical performance of an electrostrictive polymer film loudspeaker *The Journal of the Acoustical Society of America* **107** 833–839
- [66] Heydt R, Kornbluh R, Eckerle J and Pelrine R 2006 Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers *Proc. of SPIE* vol 6168, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California: Proc. of SPIE) p 61681M
- [67] Lassen B 2013 Modelling of dielectric elastomer loudspeakers including dissipative effects *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 8687, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 86871E
- [68] Hochradel K, Rupitsch S J, Sutor A, Lerch R, Vu D K and Steinmann P 2012 Dynamic performance of dielectric elastomers utilized as acoustic actuators *Applied Physics A* **107** 531–8

- 
- [69] Hosoya N, Baba S and Maeda S 2015 Hemispherical breathing mode speaker using a dielectric elastomer actuator *The Journal of the Acoustical Society of America* **138** EL424–EL428
- [70] Lu Z, Cui Y and Debiasi M 2016 Active membrane-based silencer and its acoustic characteristics *Applied Acoustics* **111** 39–48
- [71] Carpi F, Frediani G and De Rossi D 2012 Bioinspired tunable lens driven by electroactive polymer artificial muscles *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems* (Berlin, Heidelberg: Springer) pp 74–82
- [72] Schirrmann C, Costache F, Bornhorst K, Pawlik B, Rieck A and Schenk H 2014 Design and Fabrication of a Tunable Two-fluid Micro-lens Device with a Large Deflection Polymer Actuator *Procedia Engineering* **87** 1553–6
- [73] Shian S, Diebold R M and Clarke D R 2013 Tunable lenses using transparent dielectric elastomer actuators *Optics Express* **21** 8669
- [74] Maffli L, Rosset S, Ghilardi M, Carpi F and Shea H 2015 Ultrafast All-Polymer Electrically Tunable Silicone Lenses *Advanced Functional Materials* **25** 1656–65
- [75] Lu T, Cai S, Wang H and Suo Z 2013 Computational model of deformable lenses actuated by dielectric elastomers *Journal of Applied Physics* **114** 104104
- [76] Keong G-K, La T-G, Shiau L-L and Tan A W Y 2014 Challenges of using dielectric elastomer actuators to tune liquid lens *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 9056, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 90561J
- [77] Kim H, Park J, Chuc N H, Choi H R, Nam J D, Lee Y, Jung H S and Koo J C 2007 Development of dielectric elastomer driven micro-optical zoom lens system *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 6524, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 65241V
- [78] Lee H S, Phung H, Lee D-H, Kim U K, Nguyen C T, Moon H, Koo J C, Nam J and Choi H R 2014 Design analysis and fabrication of arrayed tactile display based on dielectric elastomer actuator *Sensors and Actuators A: Physical* **205** 191–8
- [79] Frediani G, Mazzei D, De Rossi D E and Carpi F 2014 Wearable Wireless Tactile Display for Virtual Interactions with Soft Bodies *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* **2**
- [80] Goulbourne N, Frecker M I, Mockensturm E M and Snyder A J 2003 Modeling of a dielectric elastomer diaphragm for a prosthetic blood pump *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, vol 23 (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) pp 319–331
- [81] Pope K, Tews A, Frecker M I, Mockensturm E, Goulbourne N C and Snyder A J 2004 Dielectric elastomer laminates for active membrane pump applications *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 5385, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 60

- 
- [82] Swayze J and Ortiz M Electroactive polymer-based pump *US Patent US7353747 B2*
- [83] Xia F, Tadigadapa S and Zhang Q M 2006 Electroactive polymer based microfluidic pump *Sensors and Actuators A: Physical* **125** 346–52
- [84] Loverich J J, Kanno I and Kotera H 2006 Concepts for a new class of all-polymer micropumps *Lab on a Chip* **6** 1147
- [85] Carpi F, Menon C and De Rossi D 2010 Electroactive Elastomeric Actuator for All-Polymer Linear Peristaltic Pumps *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **15** 460–70
- [86] Xu T-B and Su J 2005 Development, characterization, and theoretical evaluation of electroactive polymer-based micropump diaphragm *Sensors and Actuators A: Physical* **121** 267–74
- [87] Tanaka Y, Fujikawa T, Kazoe Y and Kitamori T 2013 An active valve incorporated into a microchip using a high strain electroactive polymer *Sensors and Actuators B: Chemical* **184** 163–9
- [88] Jhong Y-Y, Huang C-M, Hsieh C-C and Fu C-C 2007 Improvement of viscoelastic effects of dielectric elastomer actuator and its application for valve devices *Proc. of SPIE* vol 6524, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California: Proc. of SPIE) pp 65241Y-65241Y – 9
- [89] Proulx S, Bigué J-P L, Chouinard P, Miron G and Plante J-S 2013 Dielectric Elastomer Jet Valve for Magnetic Resonance Imaging-Compatible Robotics *Journal of Medical Devices* **7** 021002
- [90] Giousouf M and Kovacs G 2013 Dielectric elastomer actuators used for pneumatic valve technology *Smart Materials and Structures* **22** 104010
- [91] Böse H and Fuß E 2014 Novel dielectric elastomer sensors for compression load detection *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 9056, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 905614
- [92] Kim D S, Chuc N H, Jin S M, An K J, Phuc V H, Koo J, Lee Y, Nam J-D and Choi H R 2010 A flexible fingertip tactile sensor *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 7642, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 76420F
- [93] Xu D, Michel S, McKay T, O'Brien B, Gisby T and Anderson I 2015 Sensing frequency design for capacitance feedback of dielectric elastomers *Sensors and Actuators A: Physical* **232** 195–201
- [94] Jean-Mistral C, Iglesias S, Pruvost S, Duchet-Rumeau J and Chesné S 2016 Dielectric elastomer for stretchable sensors: influence of the design and material properties *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 9798, ed Y Bar-Cohen and F Vidal (Las Vegas, Nevada) p 97982G
- [95] Iskandarani Y and Karimi H R 2012 Sensing Capabilities Based on Dielectric Electro Active Polymers; Feasibility and Potential State-of-the-Art Application

- [96] Xu D, McKay T G, Michel S and Anderson I A 2014 Enabling large scale capacitive sensing for dielectric elastomers *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 9056, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 90561A
- [97] Kollosche M, Stoyanov H, Laflamme S and Kofod G 2011 Strongly enhanced sensitivity in elastic capacitive strain sensors *Journal of Materials Chemistry* **21** 8292
- [98] Hill M 2012 Sensorische Anwendung eines dielektrischen Elastomeraktors und Analyse von Versagensmechanismen *Saarland University*
- [99] York A and Seelecke S 2010 Towards self-sensing of DEAP actuators: Capacitive sensing experimental analysis *ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (Philadelphia, Pennsylvania: American Society of Mechanical Engineers) pp 307–314
- [100] Rosenthal M, Bonwit N, Duncheon C and Heim J 2007 Applications of dielectric elastomer EPAM sensors *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 6524, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 65241F
- [101] York A, Dunn J and Seelecke S 2013 Systematic approach to development of pressure sensors using dielectric electro-active polymer membranes *Smart Materials and Structures* **22** 094015
- [102] Dastoor S and Cutkosky M 2012 Design of dielectric electroactive polymers for a compact and scalable variable stiffness device *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (Saint Paul, Minnesota: IEEE) pp 3745–3750
- [103] Matysek M, Lotz P, Flittner K and Schlaak H F 2008 High-precision characterization of dielectric elastomer stack actuators and their material parameters *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 6927, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 692722
- [104] Lotz P, Matysek M and Schlaak H F 2011 Fabrication and Application of Miniaturized Dielectric Elastomer Stack Actuators *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **16** 58–66
- [105] Kaal W and Herold S 2011 Electroactive Polymer Actuators in Dynamic Applications *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **16** 24–32
- [106] Kaal W 2014 *Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden für strukturdynamische Anwendungen* (tuprints, E-Publishing-Service der TU-Darmstadt)
- [107] Berselli G, Vertechy R, Babič M and Parenti Castelli V 2013 Dynamic modeling and experimental evaluation of a constant-force dielectric elastomer actuator ed M Elahinia *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **24** 779–91
- [108] Vertechy R, Berselli G, Parenti Castelli V and Vassura G 2010 Optimal Design of

- 
- Lozenge-shaped Dielectric Elastomer Linear Actuators: Mathematical Procedure and Experimental Validation *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **21** 503–15
- [109] Wang P and Conn A 2015 Elastic Cube Actuator with Six Degrees of Freedom Output *Actuators* **4** 203–16
- [110] Carpi F and De Rossi D 2004 Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modelling and experimental evaluation *Materials Science and Engineering: C* **24** 555–62
- [111] Zhu J, Stoyanov H, Kofod G and Suo Z 2010 Large deformation and electromechanical instability of a dielectric elastomer tube actuator *Journal of Applied Physics* **108** 074113
- [112] Pei Q, Rosenthal M, Stanford S, Prahlad H and Pelrine R 2004 Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators *Smart Materials and Structures* **13** N86–92
- [113] Pei Q, Rosenthal M A, Pelrine R, Stanford S and Kornbluh R D 2003 Multifunctional electroelastomer roll actuators and their application for biomimetic walking robots *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 5051 (San Diego, California: International Society for Optics and Photonics) pp 281–290
- [114] Szabo J P 2005 *Fabrication of Polyurethane Dielectric Actuators* (Dartmouth, N.S., Canada: Defence R&D Canada - Atlantic)
- [115] Rajamani A, Grissom M D, Rahn C D and Zhang Q 2008 Wound Roll Dielectric Elastomer Actuators: Fabrication, Analysis, and Experiments *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **13** 117–24
- [116] Berselli G, Mammano G S and Dragoni E 2014 Design of a Dielectric Elastomer Cylindrical Actuator With Quasi-Constant Available Thrust: Modeling Procedure and Experimental Validation *Journal of Mechanical Design* **136** 125001
- [117] Zhang R, Kunz A, Lochmatter P and Kovacs G 2006 Dielectric elastomer spring roll actuators for a portable force feedback device *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on* (Alexandria, Virginia: IEEE) pp 347–353
- [118] Potz M, Artusi M, Soleimani M, Menon C, Cocuzza S and Debei S 2010 Rolling dielectric elastomer actuator with bulged cylindrical shape *Smart Materials and Structures* **19** 127001
- [119] Lau G-K, Lim H-T, Teo J-Y and Chin Y-W 2014 Lightweight mechanical amplifiers for rolled dielectric elastomer actuators and their integration with bio-inspired wing flappers *Smart Materials and Structures* **23** 025021
- [120] Carpi F, Frediani G, Tarantino S and De Rossi D 2009 Millimetre-scale bubble-like dielectric elastomer actuators *Polymer International* **59** 407–14

- 
- [121] Ahmadi S, Gooyers M, Soleimani M and Menon C 2013 Fabrication and electromechanical examination of a spherical dielectric elastomer actuator *Smart Materials and Structures* **22** 115004
- [122] Keplinger C, Li T, Baumgartner R, Suo Z and Bauer S 2012 Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation *Soft Matter* **8** 285–8
- [123] Carpi F, Migliore A, Serra G and Rossi D D 2005 Helical dielectric elastomer actuators *Smart Materials and Structures* **14** 1210–6
- [124] Siu S, Rhode-Barbarigos L, Wagner S and Adriaenssens S 2013 Dynamic relaxation study and experimental verification of dielectric-elastomer minimum-energy structures *Applied Physics Letters* **103** 171906
- [125] Shintake J, Rosset S, Floreano D and Shea H R 2013 Effect of mechanical parameters on dielectric elastomer minimum energy structures *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 8687, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 86872V
- [126] Nguyen C H, Alici G and Mutlu R 2014 A compliant translational mechanism based on dielectric elastomer actuators *Journal of Mechanical Design* **136** 061009
- [127] Kofod G, Paajanen M and Bauer S 2006 Self-organized minimum-energy structures for dielectric elastomer actuators *Applied Physics A* **85** 141–3
- [128] Tadakuma K, DeVita L M, Plante J-S, Shaoze Y and Dubowsky S 2008 The experimental study of a precision parallel manipulator with binary actuation: With application to MRI cancer treatment *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (Pasadena, California: IEEE) pp 2503–2508
- [129] Wang H, Zhu J and Ye K 2009 Simulation, experimental evaluation and performance improvement of a cone dielectric elastomer actuator *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* **10** 1296–304
- [130] Berselli G, Veretchy R, Vassura G and Parenti-Castelli V 2011 Optimal Synthesis of Conically Shaped Dielectric Elastomer Linear Actuators: Design Methodology and Experimental Validation *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **16** 67–79
- [131] Chouinard P and Plante J-S 2012 Bistable Antagonistic Dielectric Elastomer Actuators for Binary Robotics and Mechatronics *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **17** 857–65
- [132] Maffli L, Rosset S and Shea H R 2013 Zipping dielectric elastomer actuators: characterization, design and modeling *Smart Materials and Structures* **22** 104013
- [133] Schweitzer P 1972 *Handbook of Values* (Industrial Press Inc., U.S.)
- [134] Skousen P 1997 *Valve Handbook* (McGraw-Hill)
- [135] Nesbitt B 2007 *Handbook of Valves and Actuators* (Oxford: Butterworth-Heinemann)

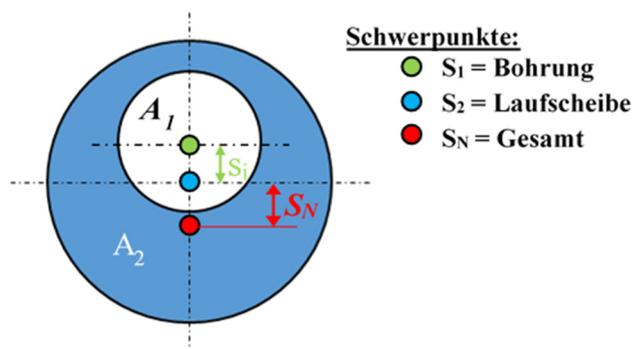
- 
- [136] Kofod G 2008 The static actuation of dielectric elastomer actuators: how does pre-stretch improve actuation? *Journal of Physics D: Applied Physics* **41** 215405
- [137] Hill M, Rizzello G and Seelecke S 2018 Development and experimental characterization of a dielectric elastomer membrane strip actuator *Smart Materials and Structures* **27** 025019
- [138] Mullins L 1969 Softening of Rubber by Deformation *Natural Rubber Producers' Research Association* **Vol. 42** 339–62
- [139] O'Brien B, Thode J, Anderson I, Calius E, Haemmerle E and Xie S 2007 Integrated extension sensor based on resistance and voltage measurement for a dielectric elastomer *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 6524, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 652415
- [140] Jung K, Kim K J and Choi H R 2008 A self-sensing dielectric elastomer actuator *Sensors and Actuators A: Physical* **143** 343–51
- [141] Buchberger G, Mayrhofer B, Jakoby B, Hilber W and Bauer S 2012 Dynamic capacitive extensometry setup for in-situ monitoring of dielectric elastomer actuators *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International* (Graz, Austria: IEEE) pp 75–80
- [142] Huu Chuc N, Thuy D V, Park J, Kim D, Koo J, Lee Y, Nam J-D and Choi H R 2008 A dielectric elastomer actuator with self-sensing capability *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 6927, ed Y Bar-Cohen (San Diego, California) p 69270V
- [143] Rizzello G, Naso D, York A and Seelecke S 2016 A Self-Sensing Approach for Dielectric Elastomer Actuators Based on Online Estimation Algorithms *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **Volume: 22** 728–38
- [144] Gisby T A, O'Brien B M and Anderson I A 2013 Self sensing feedback for dielectric elastomer actuators *Applied Physics Letters* **102** 193703
- [145] Rosset S, O'Brien B M, Gisby T, Xu D, Shea H R and Anderson I A 2013 Self-sensing dielectric elastomer actuators in closed-loop operation *Smart Materials and Structures* **22** 104018
- [146] Hoffstadt T, Griese M and Maas J 2014 Online identification algorithms for integrated dielectric electroactive polymer sensors and self-sensing concepts *Smart Materials and Structures* **23** 104007
- [147] Gisby T A, Xie S, Calius E P and Anderson I A 2009 Integrated sensing and actuation of muscle-like actuators *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices* vol 7642, ed Y Bar-Cohen and T Wallmersperger (San Diego, California) p 728707
- [148] Hoffstadt T and Maas J 2017 Model-based self-sensing algorithm for dielectric elastomer transducers based on an extended Kalman filter *Mechatronics*
- [149] Tietze U and Schenk C *Halbleiter-Schaltungstechnik* (Springer Berlin Heidelberg)

- 
- [150] Matysek M, Lotz P and Schlaak H 2011 Lifetime Investigation of Dielectric Elastomer Stack Actuators *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **18**
- [151] Rosset S, de Saint-Aubin C, Poulin A and Shea H R 2017 Assessing the degradation of compliant electrodes for soft actuators *Review of Scientific Instruments* **88** 105002
- [152] de Saint-Aubin C A, Rosset S, Schlatter S and Shea H 2017 High-cycle electromechanical aging of dielectric elastomer actuators with carbon-based electrodes *Smart Materials and Structures* **ACCEPTED MANUSCRIPT**
- [153] CTS GmbH C70-350 Datasheet
- [154] Gorn S, Bemer R W and Green J 1963 American Standard Code for Information Interchange *Communications of the ACM* **Volume 6**
- [155] The HDF Group *HDF5 standard*
- [156] The MathWorks, Inc. MAT-File Format
- [157] Rizzello G 2015 Modeling, Identification, and Control of a Dielectric Electro-Active Polymer Positioning System *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **23** 632–43
- [158] Hill M, Seelecke S, Krippner P, de Carvalho Rhodegheri C and Konstandin M 2017 Folienwandler *Patent DE 102 016 11 4531 A1*
- [159] Hill M, Rizzello G and Seelecke S 2017 Development of a Fatigue Testing Setup for Dielectric Elastomer Membrane Actuators *Proc. of SPIE Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* vol 10163 (Portland, Oregon) p 101630X

## Anhang A Mechanik

### A.I Berechnung der Unwuchtkräfte

Um bei der Auslegung des Prüfstandes eine möglichst lange Standzeit zu erreichen, ist eine Betrachtung der Unwucht der Kurvenschleife notwendig. Dies ist wichtig, um einerseits eine vorzeitige Ermüdung der Welle zu vermeiden und andererseits einen ruhigen Lauf des Ermüdungsmechanismus zu gewährleisten. Um die Unwuchtkräfte der Kurvenscheiben bestimmen zu können, werden zuerst die Schwerpunkte der Kurvenscheiben in Abhängigkeit der Exzentrizität bestimmt (Abbildung A.1).



**Abbildung A.1:** Schematische Schwerpunktdarstellung einer Kurvenscheibe

Zunächst werden die Flächen des Laufrades und der Bohrung sowie deren spezifischen Schwerpunkte

$$A_1 = A_{\text{Bohrung}} = (0.006 \text{ m})^2 \pi = 0.00131 \text{ m}^2, \quad s_{1y} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad (\text{A.1})$$

$$A_2 = A_{\text{Scheibe}} = (0.015 \text{ m})^2 \pi = 0.00707 \text{ m}^2, \quad s_{2y} = 0 \text{ mm} \quad (\text{A.2})$$

bestimmt, um daraus die Gesamtschwerpunkte der Kurvenscheiben zu berechnen. Die Schwerpunkte  $S_N$  der Kurvenscheiben werden zu

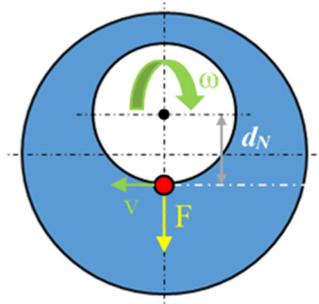
$$S_N \begin{pmatrix} h_{\max} = 1 \text{ mm} \\ h_{\max} = 3 \text{ mm} \\ h_{\max} = 5 \text{ mm} \end{pmatrix} = \frac{s_2 A_2 - s_1 A_1}{A_2 - A_1} = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.29 \\ 0.48 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad (\text{A.3})$$

berechnet. Diese Werte geben den Abstand der Schwerpunkte von der Mittelachse der Kurvenscheiben an. Zusätzlich müssen noch die Abstände der Kurvenscheibenmittelpunkte zur Drehachse beachtet werden. Daraus lassen sich die Abstände der Schwerpunkte zu den Drehachsen  $d_N$  zu

$$d_N = S_N + S_1 = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.29 \\ 0.48 \end{pmatrix} \text{ mm} + \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \end{pmatrix} \text{ mm} = \begin{pmatrix} 0.6 \\ 1.79 \\ 2.99 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad (\text{A.4})$$

ermitteln. Aufbauend auf diesen Werten lassen sich die Unwuchtkräfte der einzelnen

Kurvenscheiben berechnen (Abbildung A.2).



**Abbildung A.2:** Angreifende Unwuchtkraft einer Kurvenscheibe

Die Unwuchtkraft lässt sich durch

$$F_U = m d_N (2\pi f)^2 \quad (\text{A.5})$$

berechnen. Die Masse der Exzentrerscheiben beträgt gemessen  $m = 70 \text{ g}$ . Die maximale Auslenkungsfrequenz  $f_M$  beträgt  $10 \text{ Hz}$ . Daraus werden die Unwuchtkräfte für jeweils eine Kurvenscheibe zu

$$F_U \begin{pmatrix} h_{max} = 1\text{mm} \\ h_{max} = 3\text{mm} \\ h_{max} = 5\text{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1645 \\ 0.4935 \\ 0.8225 \end{pmatrix} \text{N} \quad (\text{A.6})$$

bestimmt. Die maximal mögliche Unwuchtkraft ergibt sich, wenn alle drei Kurvenscheiben in einer Reihe stehen, einen Hub von  $h = 5 \text{ mm}$  generieren und wird zu

$$F_{U,max} = 3F_U(h = 5\text{mm}) = 2.4675 \text{ N} \quad (\text{A.7})$$

berechnet. Obwohl diese maximale Unwuchtkraft gering ist, wird diese Unwucht für diesen Prüfstand ausgeglichen. Deswegen wird neben jeder Kurvenscheibe eine baugleiche Kurvenscheibe angebracht, die um  $180^\circ$  versetzt ist. Durch diese Maßnahme sollten die freien Massenkräfte 1.Ordnung kompensiert und eine gute Laufruhe bei der vorgegebenen Frequenz garantiert werden. Die Anordnung der Kurvenscheiben auf der Welle ist in Abbildung A.3 dargestellt.



**Abbildung A.3:** Anordnung der Kurvenscheiben auf der Welle

Bei dieser Betrachtung wurde bisher die lokale Unwucht nicht betrachtet. Deswegen wird eine finite Elemente Simulation in Solidworks durchgeführt, um die Eigenmoden und die Eigenfrequenzen der Antriebswelle zu bestimmen. Dabei wurde angenommen, dass die

Welle rotiert. Die Eigenmoden der Welle wurden durch finite Elemente Simulation ermittelt und sind in Abbildung A.4 dargestellt. Die zugehörigen Eigenfrequenzen sind in Tabelle A.1 aufgelistet. Die maximale Rotationsfrequenz der Welle liegt bei  $f_{M,max} = 10 \text{ Hz}$  und damit weit unter der kleinsten Eigenfrequenz der Welle. Somit ist die Welle sicher vor Beschädigungen durch Eigenfrequenzen.

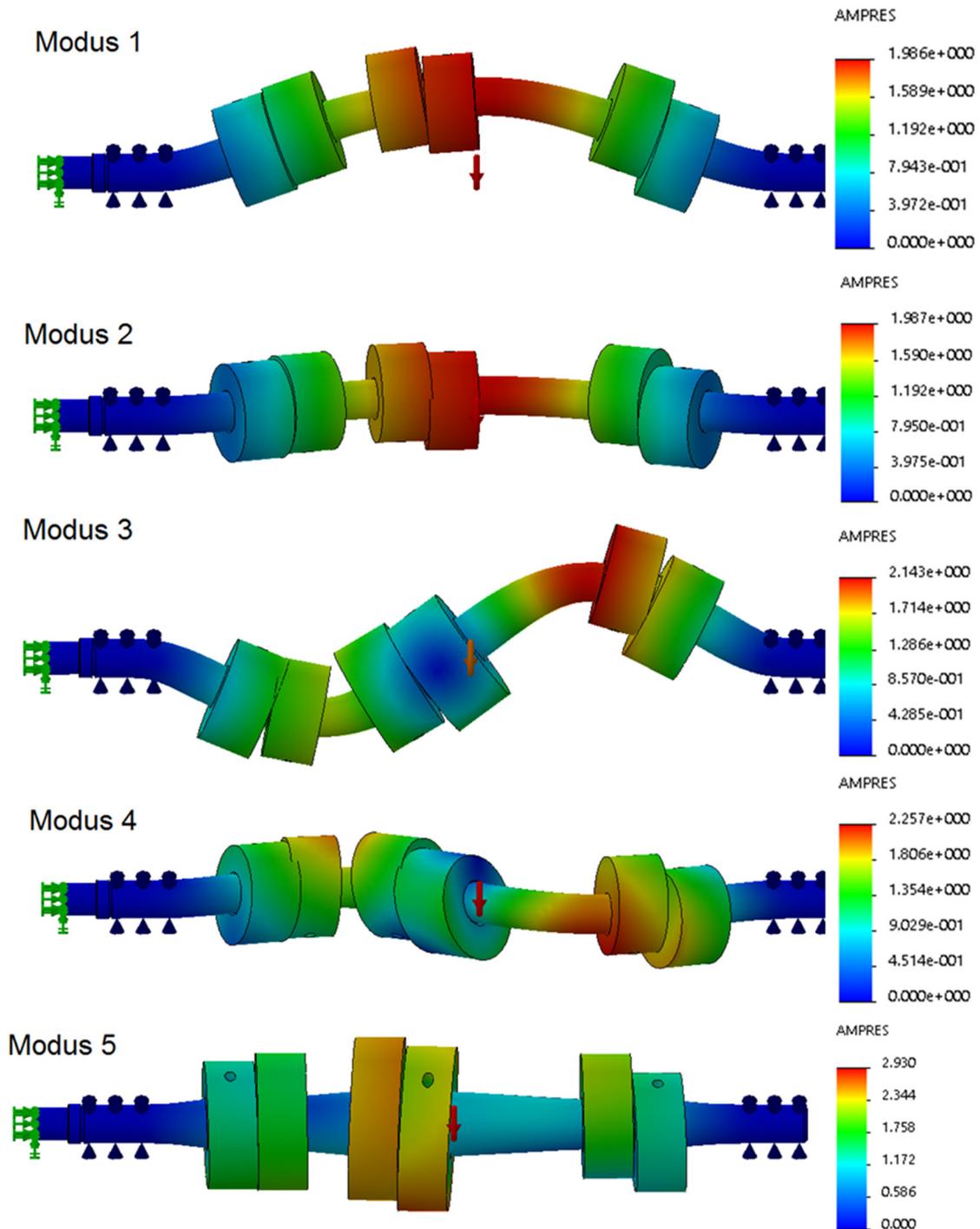


Abbildung A.4: Eigenmoden der Antriebswelle

**Tabelle A.1: Eigenfrequenzen der Antriebswelle**

Modus	Frequenz /Hz
1	782.85
2	784.09
3	2164.6
4	2167.6
5	2214.9

## A.II Thermische Ausdehnung Ermüdungsmodul

Bei der Auslegung der einzelnen Komponenten des Ermüdungsmoduls musste wegen des großen Temperaturbereichs die thermische Ausdehnung der verwendeten Werkstoffe berücksichtigt werden. Hierbei ist vor allem bei der mechanischen Ermüdung die Ausdehnung der DE-Halterung und des Auslenkungsmechanismus zueinander wichtig. Die DE-Halterung besteht aus der Basisplatte, den vier Aluminiumhaltern sowie den DE-Gehäusen. Die relative Ausdehnung gibt an inwieweit bei höheren Temperaturen die erforderlichen Auslenkungswerte eingehalten werden. Die thermische Längenänderung wird durch

$$\Delta l = l_0 \alpha (T - 20^\circ\text{C}) \quad (\text{A.8})$$

beschreiben, wobei  $l_0$  die Basislänge,  $\alpha$  den Ausdehnungskoeffizient und  $\Delta T$  die Temperaturänderung bezeichnen. Die Werte der Basislängen in Auslenkungsrichtung der DE-Halterung und des Auslenkungsmechanismus sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Die Ausdehnungskoeffizienten sind in Tabelle 7.2 gegeben.

**Tabelle 7.1: Basislängen der Materialien bei 20°C**

DE-Halterung		Auslenkungsmechanismus	
Material	Länge $l_0$ /mm	Material	Länge $l_0$ /mm
Aluminium	160	Aluminium	68.5
FR4	20	Stahl X90	75
PEEK	2.5	PEEK	39.2

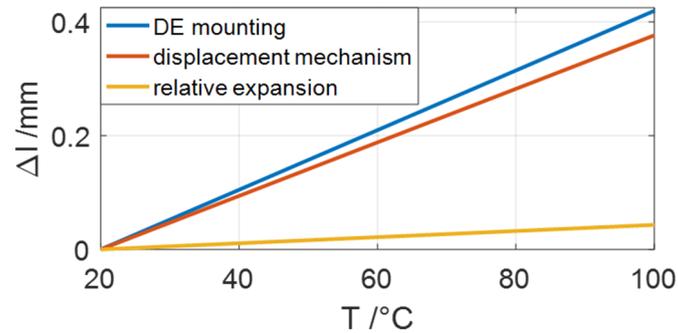
**Tabelle 7.2: Ausdehnungskoeffizient der verwendeten Materialien**

Material	Ausdehnungskoeffizient $\alpha / \text{K}^{-1}$ (20°C..100°C)
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$
Stahl X90	$10.3 \cdot 10^{-6}$
FR4	$70 \cdot 10^{-6}$
PEEK	$60 \cdot 10^{-6}$

Die absoluten Längenänderungen der DE-Halterung und des Auslenkungsmechanismus sind in Abbildung A.5 dargestellt. Die relative Ausdehnung der DE-Halterung zum

---

Auslenkungsmechanismus bei  $100\text{ °C}$  beträgt  $0.043\text{ mm}$ . Dies bedeutet, dass bei der maximalen Temperatur von  $100\text{ °C}$  die maximale Auslenkung um  $0.043\text{ mm}$  geringer ist als bei  $20\text{ °C}$ . Dieser Wert entspricht einer Abweichung von  $0.86\%$  bei einer maximalen Auslenkung von  $5\text{ mm}$  und ist somit akzeptabel.



**Abbildung A.5:** Absolute und relative Ausdehnung der Komponenten des Ermüdungsmoduls

## Anhang B Implementierung

### B.I Grundlagen LabVIEW

Die Beschreibung der Struktur des *LabVIEW* Programms zur Steuerung des Ermüdungsprüfstandes wird zur besseren Übersicht durch Pseudocode dargestellt. Zwei grundlegende Werkzeuge der LabVIEW-Programmierung sind Sequenzen, Schleifen und FPGA-Programme. Sequenzen geben die Reihenfolge der auszuführenden Operationen an. Schleifen wiederholen solange Operationen solange eine Bedingung (*if*) erfüllt ist. Dies hängt von der Programmierung der Schleifen ab. Die FPAG-Programme zeigen an, dass der Programmcode auf dem FPGA-System ausgeführt wird. Die im Folgenden verwendeten Schleifen und Sequenzen sind in Abbildung B.1 dargestellt.

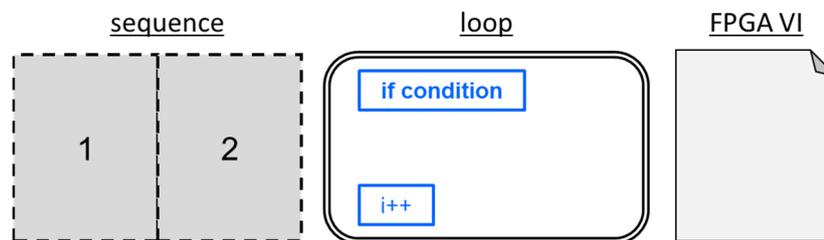
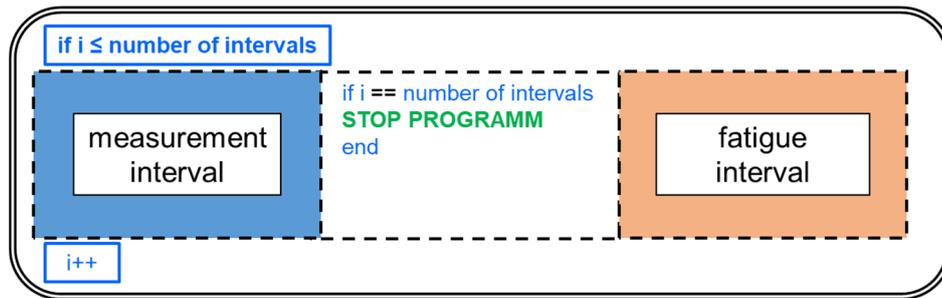


Abbildung B.1: Grundbausteine der LabVIEW Programmierung

### B.II Programmstruktur

Dieser Abschnitt beschreibt die Code-Struktur des Hauptprogrammes in LabVIEW, welches die Ermüdungstests durchführt und überwacht. Die Hauptstruktur des Programmes besteht aus einer Schleife, die angibt wie viele Intervalle aus Messen und Ermüden im Testverlauf durchgeführt werden. Dabei wird die Ermüdungsprüfung in Messintervalle und Ermüdungsintervalle unterteilt. Messintervalle und Ermüdungsintervalle wechseln sich währenddessen gegenseitig ab (siehe Abbildung B.2). Es wird mit einem Messintervall begonnen, um den Grundzustand der DE-Aktoren zu ermitteln. Anschließend werden die Aktoren in einem Ermüdungsintervall mehrere tausend Zyklen mechanisch, elektrisch oder elektromechanisch ermüdet.

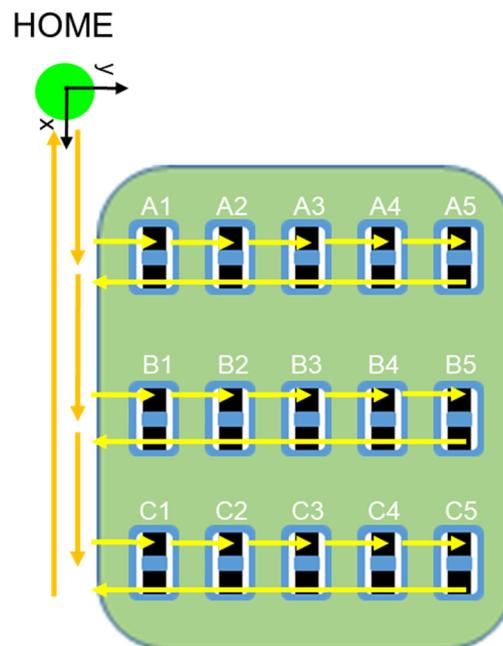


**Abbildung B.2:** Basisstruktur des Programms zur Steuerung des Ermüdungsprüfstandes

Dieser Vorgang wird wiederholt bis die Anzahl der gewünschten Ermüdungszyklen erreicht ist. Dabei ist zu beachten, dass immer ein Messintervall mehr durchgeführt wird, als Ermüdungsintervalle absolviert werden. Dies wird durchgeführt, damit nach jedem Ermüdungsintervall auch eine Vermessung jedes DE durchgeführt wird.

### B.III Messintervall

Das Messintervall dient dazu die DE-Aktoren einen nach dem anderen zu vermessen. Abbildung B.3 zeigt den Bewegungspfad der Messvorrichtungen zur seriellen Vermessung der DE. Hierbei sind das Vorgehen und die Implementierung bei beiden Ermüdungsarten weitgehend identisch.

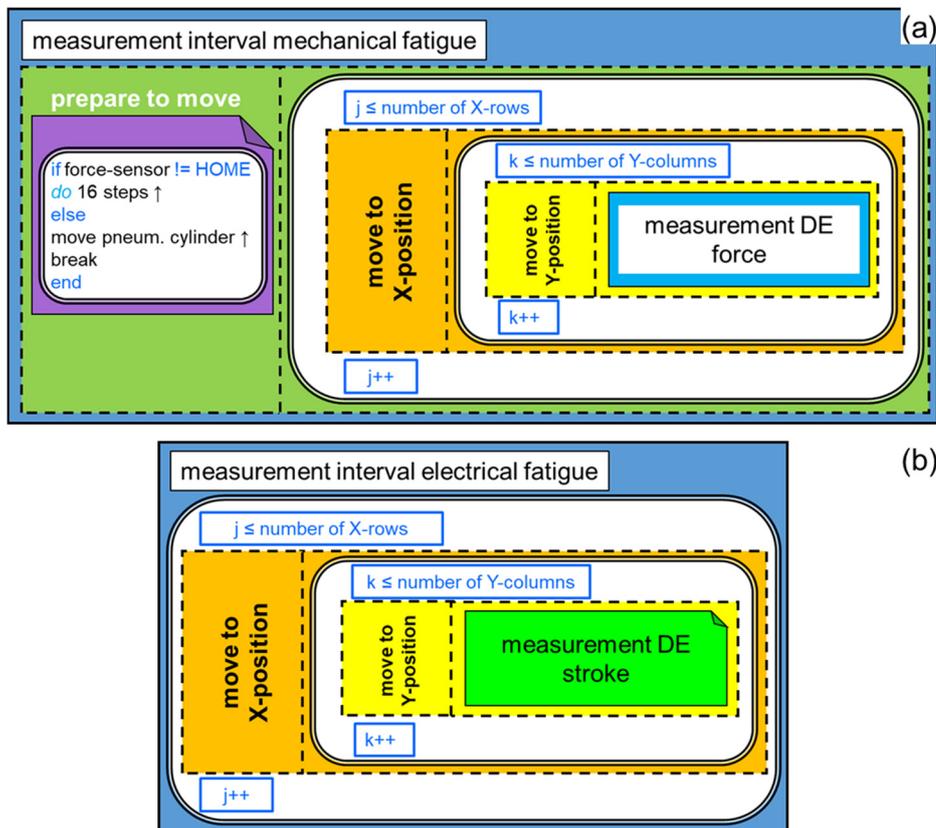


**Abbildung B.3:** Bewegungspfad der Messvorrichtungen

Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei der mechanischen Ermüdungsprüfung die Messvorrichtung vor dem Verfahren auf ihre Stellung überprüft wird (siehe Abbildung B.4 (b)). Befinden sich der Kraftsensor und die pneumatischen Zylinder nicht in ihrer Ausgangsstellung, werden sie dorthin gefahren. Dieser Vorgang wird durch ein FPGA-

Programm ausgeführt.

Vor der Vermessung der DE werden zuerst die Ausgangspositionen des X/Y-Tisch („HOME-Position“) angefahren. Davon ausgehend wird die Messvorrichtung in x-Richtung an der zu vermessenden Reihe positioniert. Ist die Positionierung in x-Richtung beendet, fährt die Messvorrichtung die Y-Positionen nacheinander an und vermisst die Aktoren.



**Abbildung B.4:** Implementierung der Messintervalle; (a) mechanische Ermüdung, (b) elektrische Ermüdung, (c) Positionierung der Messvorrichtung

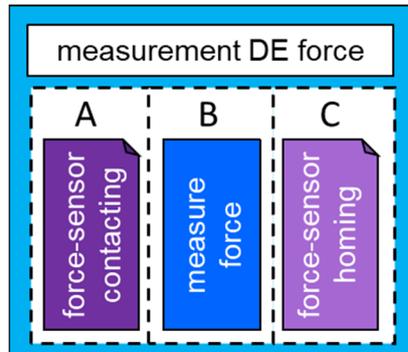
Ist die Reihe vermessen, fährt der X/Y-Tisch zurück auf die Ausgangsposition in Y-Richtung. Ist die Y-Ausgangsposition erreicht, wird die nächste Reihe angefahren und deren DE vermessen. Dieser Vorgang wird wiederholt bis alle DE vermessen wurden. Hierbei ist zu beachten, dass die Positionierung in X- und Y-Richtung getrennt durchgeführt werden, um Beschädigungen der Messvorrichtung vorzubeugen. Dieser Bewegungspfad wurde ausgewählt, da er einfach durch zwei ineinander liegende Schleifen zu implementieren ist. Die Vermessungen bei der DE unterscheiden sich bei der mechanischen und elektrischen Ermüdung voneinander. Deshalb wird deren Implementierungen separat beschrieben.

## B.IV Messung Reaktionskraft

Die Messung der Reaktionskraft der DE erfordert mehrere Schritte. Zuerst muss Kontakt

---

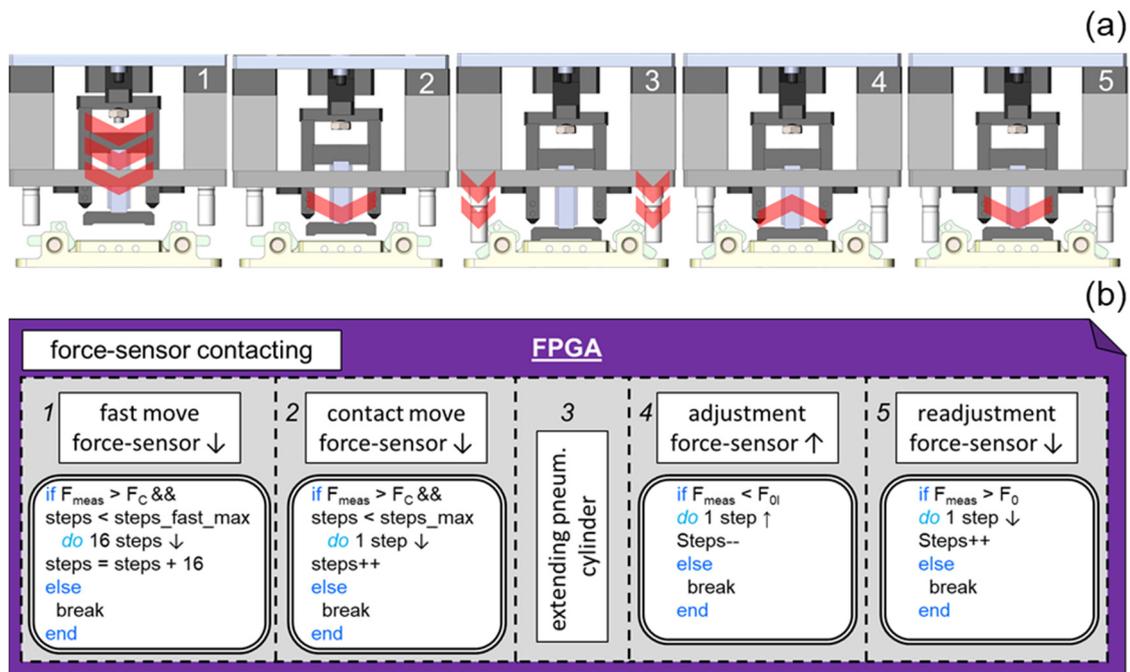
zwischen dem Kraftsensor und dem DE-Gehäuse hergestellt werden. Erst danach kann die Reaktionskraft gemessen werden. Nach der Messung muss der Kraftsensor wieder in die Ausgangsstellung gebracht werden. Die einzelnen Schritte werden durch voneinander getrennten FPGA –Programme durchgeführt (siehe Abbildung B.5).



*Abbildung B.5: Vorgehen zur Messung der Reaktionskraft*

#### **A. Kraftsensor kontaktieren**

Die Kontaktierung des Kraftsensors mit dem DE-Gehäuse wird durch ein FPGA-Programm realisiert (siehe Abbildung B.6). Dieses FPGA-Programm wird vom Hauptprogramm gestartet. Die Kraft die zum Auslenken der Aktoren benötigt, wird durch einen Kraftsensor gemessen. Der Kraftsensor benötigt dafür Kontakt zu dem Aktor. Dieser Kontakt wird durch das Absenken des Kraftsensors durch den elektrischen Hubzylinder auf das Gehäuse des DE realisiert. Dieser Hubzylinder wird durch einen Schrittmotor angetrieben, dessen Controller eine maximale Schrittauflösung von  $1/16$  besitzt. Der Kraftsensor kennzeichnet Druckkraft mit negativem Vorzeichen und Zugkraft mit positivem Vorzeichen. Die Kontaktierung wird durch einen einfachen Regler realisiert. Hierbei wird zuerst die Kraft am Kraftsensor  $F_{\text{meas}}$  gemessen und mit einer vorgegebenen Kraft verglichen.



**Abbildung B.6:** Vorgehen zur Kontaktierung des Kraftsensors mit dem DE-Gehäuse; (a) Ablauf; (b) Implementierung des FPGA-Programms

Diese vorgegebenen Kräfte sind die Kontaktkraft  $F_C$ , die während des Entriegelns das Gehäuse festhält und die Anpresskraft  $F_0$ , mit der der Kraftsensor während der Messung auf die DE gepresst wird. Die Kontaktierung des Kraftsensors mit dem Gehäuse ist in fünf Schritten unterteilt und in Abbildung B.6 abgebildet.

- A1. Zuerst wird der Kraftsensor im Schnellgang (16/16-Schritt) abgesenkt. Damit wird die Distanz zwischen Kraftsensor und Aktorgehäuse überbrückt. In diesem Programmabschnitt ist kein Kontakt des Kraftsensors zum Aktorgehäuse vorgesehen, trotzdem wird die Kraft überwacht. Primäre Abbruchbedingung dieser Schleife ist das Erreichen einer festgelegten Anzahl von Schritten ( $Steps_{fast\_max}$ ).
- A2. Der Kraftsensor wird auf das Aktorgehäuse (1/16-Schritt) abgesenkt. Primäre Abbruchbedingung ist die gemessene Kraft. Der Kraftsensor wird solange abgesenkt bis die Kontaktkraft unterschritten wird. Parallel werden die Schritte gezählt und mit einer festgelegten Obergrenze von Schritten  $Steps_{max}$  verglichen. Sollte diese Obergrenze erreicht werden ohne die Kontaktkraft zu unterschreiten, wird dieses FPGA-Programm beendet, da kein Kontakt zum DE-Gehäuse hergestellt werden konnte und das Hauptprogramm springt zu Programmschritt C.
- A3. Die pneumatischen Zylinder werden abgesenkt und dadurch der Gehäusedeckel entriegelt.

- 
- A4. Durch die Entriegelung ändert sich die gemessene Kraft. Der Kraftsensor wird an die vorgegebene Anpresskraft justiert, indem der Elektrozylinder solange mit 1/16-Schritten angehoben wird bis die gemessene Kraft größer oder gleich der Anpresskraft ist.
- A5. Der Elektrozylinder wird solange mit 1/16-Schritten gegen das Aktorgehäuse gefahren bis die gemessene Kraft kleiner oder gleich der vorgegebenen Anpresskraft ist.

### **B. Messung Reaktionskraft**

Die Vermessung der DE-Aktoren wird durch zwei Schleifen im Hauptprogramm realisiert. Die erste Schleife gibt dem Schrittmotor Phytron ESS (4000 Schritte/Umdrehung bei 1/20-Schritt-Auflösung), der über die Antriebswelle den Hub generiert. Dabei wird Drehfrequenz (Voreinstellung  $f_M = 1 \text{ Hz}$ ) und die Anzahl der Schritte vorgegeben und gewartet bis der Motor die Drehbewegung beendet hat. Währenddessen werden die Schritte und Zeit im Hauptprogramm gespeichert, da der FPGA keine Verbindung zum Schrittmotor besitzt. Zeitgleich wird ein FPGA-Programm (jeder Aktor hat sein eigenes FPGA-Programm für 0 V und eines für Hochspannung) aufgerufen. Dieses Programm schaltet alle zu dem speziellen DE gehörigen Relais und misst die Schlüsselgrößen wie Zeit, Kraft, Identifikationsspannung und –strom beziehungsweise Hochspannung und Strom. Diese Daten werden während des Messvorgangs kontinuierlich in einen FIFO-Speicher (*First-In-First-Out*) geladen. Das FPGA-Programm ist zeitgesteuert und wird nach Ablauf des Zeitlimits  $t_{max}$  beendet. Bei der Messung der Reaktionskraft bei Niederspannung werden zusätzlich die Identifikationsgrößen aufgezeichnet. Diese werden mit einer höheren Samplerate abgetastet und deswegen in einer separaten Schleife erfasst und einem zusätzlichen FIFO gespeichert. Im Anschluss werden im Hauptprogramm die Messdaten aus den FIFO-Speichern geladen und zusammen mit den Daten des Schrittmotors auf der Festplatte gespeichert.

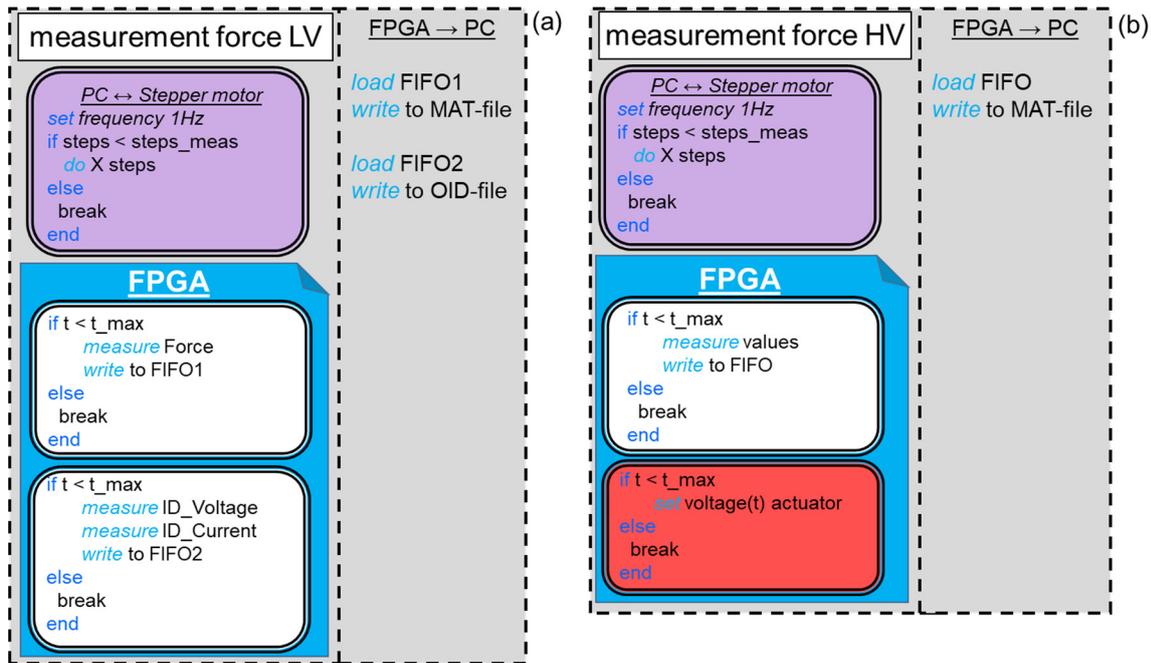


Abbildung B.7: Messung der Reaktionskraft; (a) Niederspannung, (b) Hochspannung

### C. Kraftsensor zurückfahren

Das Zurückfahren des Kraftsensors in die Ausgangsstellung wird durch ein eigenes FPGA-Programme ausgeführt und ist in zwei Teile gegliedert (siehe Abbildung B.8).

- C1. Die pneumatischen Zylinder werden eingefahren und damit das DE-Gehäuse verriegelt.
- C2. Danach wird der Kraftsensor durch den Hubzylinder im Schnellgang (16/16-Schritte) hochgefahren bis die beiden HOME-Taster den Stromkreis schließen und das Programm erkennt, dass sich der Kraftsensor auf der HOME-Position befindet.

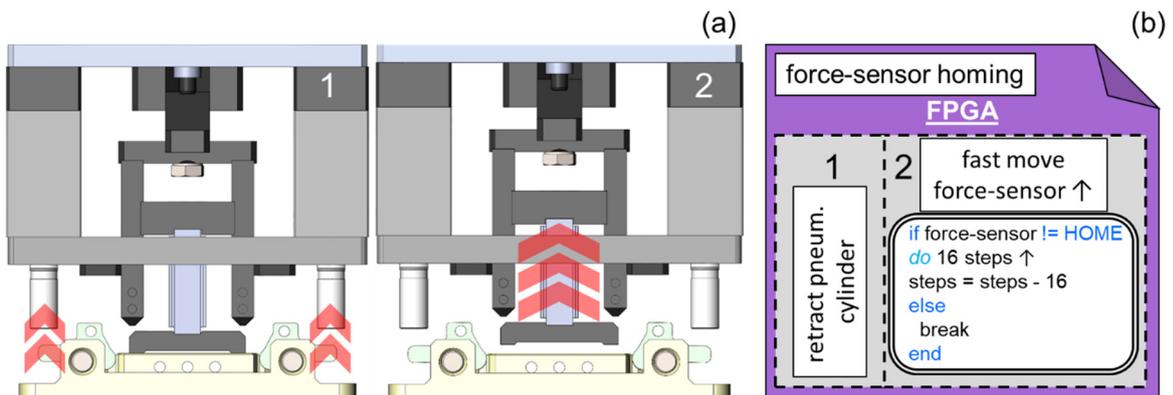
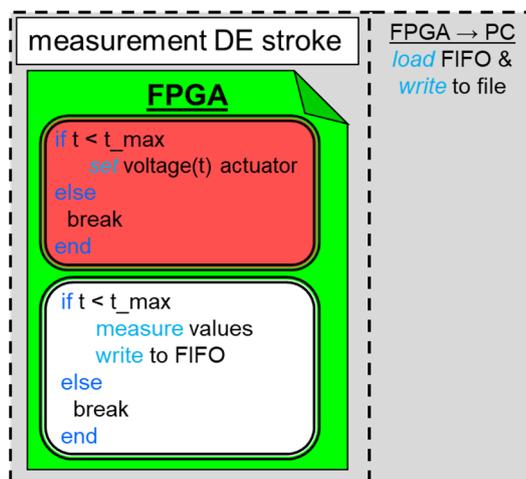


Abbildung B.8: Bewegung des Kraftsensors in Ausgangsstellung; (a) Schematischer Ablauf; (b) Implementierung des FPGA Programm

## B.V Messung Hub

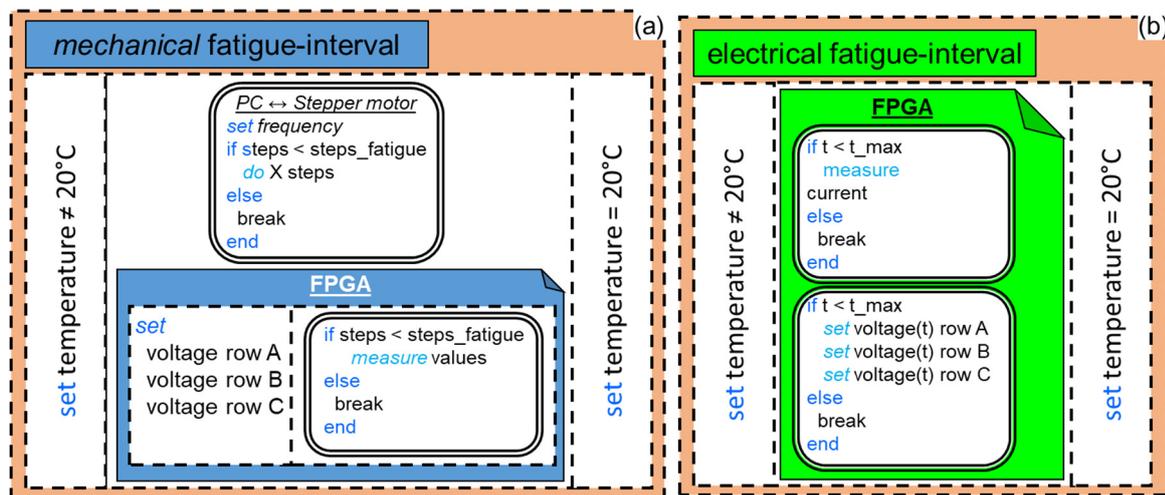
Die Messung des Hubes bei elektrischer Ermüdung ist weniger aufwendig als die Messung der Reaktionskraft bei mechanischer Ermüdung. Auch hierbei besitzt jeder Aktor ein eigenes FPGA-Programm, um Fehlschaltungen von Relais zu verhindern. Dieses FPGA-Programm schaltet alle zu dem vermessenen DE-Aktor gehörigen Relais und beginnt danach die Schlüsselgrößen wie Hub, Hochspannung und Strom zu messen und in den FIFO-Speicher zu schreiben. Das FPGA-Programm ist zeitgesteuert und wird nach Ablauf der Zeitlimits  $t_{max}$  beendet. Im Anschluss werden die Messdaten aus dem FIFO geladen und auf der Festplatte gespeichert. Das Vorgehen ist in Abbildung B.9 dargestellt.



*Abbildung B.9: Implementierung der Messung des DE-Hubes*

## B.VI Ermüdungsintervall

Vor dem eigentlichen Ermüdungsintervall wird durch das Hauptprogramm die Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingestellt, bei der die Ermüdung durchgeführt werden soll. Ist die Temperatur erreicht, wird bei mechanischer Ermüdung dem Schrittmotor die Drehfrequenz (Voreinstellung  $f_F = 10 \text{ Hz}$ ) und die Anzahl der durchzuführenden Schritte übergeben. Anschließend wird der Motor gestartet. Gleichzeitig steuert ein FPGA-Programm die Hochspannungsquellen und überwacht alle Aktoren auf elektrisches Versagen. Dieses Programm trennt bei elektrischem Versagen den DE von der Hochspannungsquelle. Nach Vollendung der Ermüdung wird die Temperatur im Klimaprüfschrank wieder auf  $20 \text{ °C}$  eingestellt. Bei elektrischer Ermüdung werden die DE für eine bestimmte Anzahl mit einer zeitabhängigen Hochspannung beaufschlagt.



**Abbildung B.10:** Implementierung Ermüdungsintervall; (a) mechanische Ermüdung, (b) elektrische Ermüdung

---

## B.VII Umsetzung der Messdaten in Matlab-Datenbank

Die Übertragung der Messdaten aus den einzeln gespeicherten Dateien in eine Matlab-Datenbank wird mittels eines Matlab-Skripts realisiert. Dieses Skript befindet sich im selben Ordner wie die Dateien mit den Messdaten. Das Matlab-Skript listet zunächst alle MAT-Dateien im Ordner auf und lädt nacheinander deren Daten. Aus den Dateinamen werden die Unterstrukturen der neuen Hauptstruktur erstellt und die Daten darin gespeichert. Dieser Schritt wird danach auch für die OID- Dateien wiederholt. Der Matlab-Code zur Erzeugung der Hauptdatenstruktur ist in Abbildung B.11 dargestellt.

```
fls=dir('*.mat');
[row,column]=size(fls);

for j=1:row

    load(fls(j).name);
    fg=regexprep(fls(j).name, '\\.(.*)', '');
    newSub=strsplit(fg, {'_',});
    [r,c]=size(newSub);

    if c==3
        FTG.(newSub{1}).(newSub{2}).HV = A;
    end

    if c==2
        FTG.(newSub{1}).(newSub{2}).NV = A;
    end

end

fls=dir('*.oid')
[row,column]=size(fls);

for j=1:row
    A=load(fls(j).name);
    fg=regexprep(fls(j).name, '\\.(.*)', '');
    newSub=strsplit(fg, {'_',});
    FTG.(newSub{1}).(newSub{2}).NV.ID_time = A(:,1);
    FTG.(newSub{1}).(newSub{2}).NV.ID_current = A(:,2)/1.1e6;
    FTG.(newSub{1}).(newSub{2}).NV.ID_voltage = A(:,3);
end

save('FTG.mat', '-struct', 'FTG', '-v7.3')
```

**Abbildung B.11:** Matlab-code zur Erstellung einer Messdaten-Struktur

Beim Speichern muss berücksichtigt werden, dass die Attribute ‚-struct‘ und ‚-v7.3‘ verwendet werden. Dies ist notwendig, um Unterstrukturen aus der Hauptstruktur laden zu können und Dateigrößen über 1GB zu ermöglichen.

# Eigene Veröffentlichungen

## Konferenzbeiträge:

- M. Hill, A. York and S. Seelecke, ‚Ein Dielektrisches Elektroaktives Polymeraktor-System mit „Self-Sensing“-Fähigkeit‘, *VDI Fachtagung Mechatronik 2013*, Aachen, Germany, March 06-08, 2013.
- M. Hill, G. Rizzello and S. Seelecke, ‚Development of a fatigue testing setup for dielectric elastomer membrane Actuators‘ *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, OR, USA*, 2017, pp 1–7.

## Posterpräsentationen:

- M. Hill, A. York and S. Seelecke, ‚Development and Experimental Validation of a Valve Driven by a Dielectric Electro-Active Polymer Membrane Actuator‘, *EuroEAP 2015*, June, Tallinn, Estonia.
- M. Hill, G. Rizzello and S. Seelecke, ‚Development of a fatigue testing setup for dielectric elastomer membrane Actuators‘, *EuroEAP 2016*, June, Copenhagen, Denmark.
- M. Hill, A. York and S. Seelecke, ‚Development and Experimental Validation of a Valve Driven by a Dielectric Electro-Active Polymer Membrane Actuator‘, *ACTUATOR 2016, 15th International Conference on New Actuators & 9th Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*, pp. 1-4, June 13-15, Bremen, Germany.

## Journal Veröffentlichungen:

- M. Hill, G. Rizzello, and S. Seelecke, ‚Development and experimental characterization of a pneumatic valve actuated by a dielectric elastomer membrane‘, *Smart Materials and Structures*, vol. 26, no. 8, p. 085023, Aug. 2017.
- M. Hill, G. Rizzello and S. Seelecke, ‚Development and experimental characterization of a dielectric elastomer membrane strip actuator‘, *Smart Materials and Structures*, vol. 27 p. 025019., Feb 2018.

## Patente

- Hill M, Seelecke S, Krippner P, de Carvalho Rhodegheri C and Konstandin M 2017  
‚Folienwandler‘ Patent Aktenzeichen DE 102 016 11 4531 A1

---

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH am Lehrstuhl für Intelligente Materialsysteme der Universität des Saarlandes unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke.

Zunächst bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke und Bürkert Fluid Control Systems sowohl für die Bereitstellung der spannenden Aufgabenstellung als auch für die fachliche Betreuung während meines Promotionsstudiums. An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich für die eingeräumten Freiräume bei der Bearbeitung der Thematik und das mir damit entgegengebrachte Vertrauen, die ich in der Zeit meiner Dissertation erhalten habe, zu bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ing. Rainer Müller für das Interesse an meiner Arbeit und deren Begutachtung.

Ferner möchte ich mich bei Dr. rer. nat. Cricia Rhodegheri und B. Eng. Marcel Konstandin für deren Unterstützung bedanken.

Ebenfalls möchte ich meinen Dank den Mitarbeitern des Lehrstuhls für intelligente Materialsysteme aussprechen. Insbesondere möchte ich mich bei Dipl. Ing. (FH) Thomas Würtz und Dipl. Ing. (FH) Benedikt Holz für ihre Unterstützung bei Elektronikfragen bedanken. Des Weiteren möchte ich Johannes Feld danken, der mich bei der Montage mechanischer Baugruppen mit Rat und Tat unterstützt hat.

Besonderen Dank gilt Maschinenbauermeister Frank Bruckmann und Feinwerkmechaniker Julius Scherthan, die mich bei fertigungstechnischen Fragen unterstützten und die Einzelteile meines Prüfstandes fertigten.

Abschließend bedanke ich mich auch bei meinen Eltern, Margaretha Sand-Hill und Dieter Hill, die mein Studium der Mechatronik erst ermöglicht haben.

# Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

## *Ort, Datum*

Saarbrücken den, \_\_\_\_\_

## *Unterschrift*

\_\_\_\_\_  
(Marc Hill)