

**TUHH**

**POLYMER COMPOSITES**



# Entwicklung und Gestaltungspotenzial von Fahrzeugsitzen unter Einsatz dielektrischer Elastomeraktoren

Dipl.-Ing. Daniel Jarr

2011





# **Entwicklung und Gestaltungspotenzial von Fahrzeugsitzen unter Einsatz von dielektrischen Elastomern.**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation.

von

Dipl.-Ing. Daniel Jarr

aus

Hamburg

2011

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl Schulte

*(Technische Universität Hamburg-Harburg)*

Prof. Dr. Viktor Sigrist

*(Technische Universität Hamburg-Harburg)*

Vorsitzender des Prüfungsausschusses:

Prof. Dr.-Ing. Norbert Huber

*(Technische Universität Hamburg-Harburg)*

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2011

Ein Mensch, dem innerer Frieden zuteil geworden ist, verzweifelt weder angesichts einer Katastrophe, noch verleitet Erfolg ihn zu Hochmut.

Matthieu Ricard, 2003



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2008 bis 2011 während meiner Tätigkeit im Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Schulte für die Möglichkeit meine Arbeit im Graduiertenkolleg Kunst und Technik (DFG-0925) der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchführen zu können.

Für die anregenden Diskussionen und den Austausch auf fachlicher und persönlicher Ebene danke ich allen Mitarbeitern des Instituts, sowie den Professoren, Mitgliedern und assoziierten Wissenschaftlern des Graduiertenkollegs. Vor allem möchte ich hier Herrn Prof. Dr. Viktor Sigrist hervorheben.

Ebenso gilt mein Dank den Industriepartnern, die dieses Projekt mit viel Vertrauen unterstützt haben. Firma C. Rob. Hammerstein GmbH und Co. KG danke ich für die offenen Gespräche und die Unterstützung durch Material und Informationen, Firma F.S. Fehrer Automotive GmbH für die tatkräftige Unterstützung beim Bau der Weichschaumfläche des Demonstrators und Herrn Detlef Schlüter der EMS Chemie AG für die Vielzahl der zur Verfügung gestellten Kunststoffplatten. Herrn Dipl.-Ing. Gabor Kovacs vom EMPA Zürich danke ich für den intensiven wissenschaftlichen Austausch und die Zeit im Institut *Materials and Engineering* in der Schweiz.

Für die tatkräftige Hilfe aller Studenten, die an diesem Projekt mitgearbeitet haben, möchte ich mich sehr bedanken. Die Arbeiten von Henning Eils möchte ich hierbei ganz besonders erwähnen.

Darüber hinaus danke ich meiner Familie und all meinen Freunden für die persönliche Unterstützung, den Glauben an mich und für das mir entgegengebrachte Verständnis in der Zeit dieser Dissertation.

Hamburg, April 2011

Daniel Jarr

# Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin eine frei verformbare Fläche und die dafür benötigte Aktorik zu konzipieren. Mittels eines mechanisch aktiven Werkstoffs können neue technische und gestalterische Freiheitsgrade für Verstellelemente erschlossen werden. Vorteile des hier verwendeten dielektrischen Elastomers, einem elektroaktiven Polymerfilm, liegen in der geringen Dichte und seiner hohen geometrischen Veränderung bei elektrischer Aktivierung. Damit können leichte und flache Verstellelemente konzipiert werden, die zudem eine hohe gestalterische Vielfalt ermöglichen. In dieser Arbeit ist dies am Beispiel eines neuartigen Sitzkonzepts für Automobile dargestellt.

In aktuellen Fahrzeugsitzen nimmt die Anzahl der Verstellmöglichkeiten zur Steigerung von Komfort und Flexibilität stetig zu. Diese werden über manuelle Kinetiken, durch Elektromotor-Getriebe-Kombinationen oder pneumatische Stellelemente bewegt. Komplexität, Gewicht und Bauraum des Sitzes steigen mit der Anzahl der Verstellmechanismen. Steigender Energiebedarf hervorgerufen von der Erhöhung des Fahrzeuggewichts und dem Betrieb der Verstellelemente, sowie die Abnahme des Bewegungsraumes der Insassen sind die Folgen.

Anhand technischer Anforderungen, Nutzeranforderungen, Nutzerwünschen und den Materialeigenschaften des dielektrischen Elastomerfilms, werden Lösungen für neue Aktoren aufgezeigt. Mechanische, elektrische, chemische und elektromechanische Prüfungen liefern Aussagen über die Materialeigenschaften des dielektrischen Elastomerfilms. Aus den dielektrischen Elastomerfilmen wird ein neuartiger Blattfederaktor für die Verstellung einer Sitzfläche im Automobil konzipiert.

Ein analytisches Modell dient der Beschreibung des stationären und des aktorischen Verhaltens des Blattfederaktors. Bei der Auslegung der Blattfederaktoren, werden konstruktionsunterstützende Methoden, wie die Finite-Elemente-Methode herangezogen. Darüber hinaus wird der Blattfederaktor in Aktivierungsversuchen hinsichtlich der Anzahl möglicher Verstellzyklen und dem Temperatureinsatzbereich untersucht.

Die neue Aktorik zeigt ein hohes Potenzial für die Gewichts- und Bauraumersparnis, und schafft darüber hinaus neue ästhetische Freiheitsgrade. Sie ist modular einsetzbar und jedes der Module ist einzeln verstellbar und konfektionierbar. Somit sind auch in Zukunft verstellbare Sitzflächen, abweichend von den hier gezeigten Lösungen, unter geringem konstruktivem Aufwand realisierbar.

Anhand eines Technologiedemonstrators, bestehend aus einer Polyurethan-Schaumfläche, getragen von freistehenden Armen aus Blattfederaktoren, werden die neu entwickelten und dadurch gewonnenen technischen und gestalterischen Freiheiten demonstriert.

# Abstract

The aim of this work is, to develop a new free deformable area and its actuators. Based on mechanically active polymer compounds - dielectric elastomers - technical and aesthetic freedoms can be increased. A low density in combination with high activation strains are the advantages of the dielectric elastomer. This leads to flat and lightweight transducers for a free deformable area, which is shown on the basis of a new concept for an automotive seat.

Recently, the increasing functionality in car seats, especially in comfort, is achieved by use of manual and pneumatic adjustments or electric motors and gears. Hence, complexity, weight and the fuel consumption rise. Furthermore room for the car's occupants decreases, due to the space taken by the adaptive seats.

Both, the technical and the user demands - user wishes - are part of the development process in this work. By means of mechanical, electrical, as well as chemical and electromechanical measurements the material properties of the dielectric elastomer are gathered. With respect to that, a new leafspring-actuator is designed.

Furthermore, arm-like structures of leafspring-actuators are engineered and tested for application in car seats. An analytical model describes the static behavior of the actuators, while finite element models are used as a tool for design and optimization of these active structures. Moreover, new ground for interior design, due to the modular build-up of the actuators can be broken, by almost identical expenditure of time and design effort.

With the help of a demonstrator, made from a thin plane of polyurethane foam, supported by arms of leafspring-actuators, new ways of designing a car seat are presented.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>Verwendete Zeichen.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Form, Funktion und Material .....	3
1.2 Sitze im Automobil .....	6
1.3 Der Fahrzeugsitz als Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	10
<b>2 Mechanisch aktive Materialien .....</b>	<b>13</b>
2.1 Mechanisch aktive Keramiken .....	14
2.2 Mechanisch aktive Metalle .....	17
2.3 Mechanisch aktive Polymere .....	19
2.3.1 Elektroaktive Polymere (EAP) .....	21
2.3.2 Weiche dielektrische EAP .....	22
2.3.3 PolyPower DE-Film.....	27
2.3.4 Dielektrische Elastomeraktoren.....	34
<b>3 Methoden.....</b>	<b>36</b>
3.1 Methoden der Produktentwicklung.....	37
3.2 Experimentelle Methoden zur Charakterisierung des dielektrischen Elastomerfilms .....	41
3.2.1 Konfektionierung dielektrischer Elastomerfilme .....	42
3.2.2 Mechanische Versuche .....	43
3.2.3 Elektromechanische Versuche.....	46
3.2.4 Elektrische Versuche .....	50
3.3 Finite Elemente Methode .....	53
3.3.1 Modellierung des hyperelastischen Materialverhaltens .....	55

3.3.2	Modellierung des elektroaktiven Verhaltens .....	57
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer aktiven Fläche unter dem Einsatz dielektrischer Elastomeraktoren .....</b>	<b>59</b>
4.1	Anforderungen .....	60
4.1.1	Technische Anforderungen.....	60
4.1.2	Ökonomische Anforderungen.....	63
4.1.3	Nutzeranforderungen .....	63
4.2	Lösungsprinzipien für eine aktive Fläche .....	65
4.2.1	Lösungsprinzip I: Aktive Netzstruktur .....	66
4.2.2	Lösungsprinzip II: Aktive Kissen.....	69
4.2.3	Lösungsprinzip III: Blattfederaktoren .....	71
4.3	Auswahl eines Lösungsprinzips.....	74
4.4	Entwurf eines Blattfederaktors für aktive Flächen .....	75
4.4.1	Dielektrischer Elastomerfilm.....	75
4.4.2	Blattfeder .....	92
4.4.3	Analytisches Modell eines Blattfederaktors .....	95
4.4.4	Arme aus Blattfederaktoren zur Stützung und Verstellung einer Fläche.....	101
4.4.5	Auslegung mit der Finite Elemente Methode.....	107
4.4.6	Elektromechanisches Verhalten eines Blattfederaktors .....	115
4.5	Beurteilung anhand der Anforderungen.....	120
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>122</b>
5.1	Zusammenfassung.....	122
5.2	Ausblick .....	124

<b>6</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>127</b>
A.	Brainstorming.....	127
B.	Prüfstand für dielektrische Elastomeraktoren.....	130
C.	Daten mechanischer Versuche DE-Film PolyPower .....	136
D.	Chemische Analyse der Elektroden des DE-Films von PolyPower .....	138
E.	Optimierung des Verstellwinkels in der FEM .....	139
F.	Arbeitsmodell aus Polystyrol .....	140
G.	Demonstrator.....	141
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>148</b>

# Abkürzungsverzeichnis

ABS	-	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ASCII	-	American Standard Code for Information Exchange
CFK	-	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNT	-	Carbon Nanotubes
CRH	-	C. Rob. Hammerstein GmbH und Co. KG
DC	-	Direct Current (elektrische Gleichspannung)
DE	-	Dielektrisches Elastomer
DEA	-	Dielektrischer Elastomeraktor
DEMES	-	Dielectric Elastomer Minimum Energy Structure
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DSC	-	Dynamische Differenzkalometrie
EAP	-	Elektroaktive Polymere
EDXRF	-	Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse
EPDM	-	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FEM	-	Finite Elemente Methode
FGL	-	Formgedächtnis-Legierung
FGP	-	Formgedächtnis-Polymere
FULCE	-	Functional Liquid Crystalline Elastomer
FVK	-	Faserverstärkte Kunststoffe
GF	-	Glasfaser

GFK	-	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HFBK	-	Hochschule für Bildende Künste
HV	-	High Voltage (elektrische Hochspannung)
IGES	-	Initial Graphics Exchange Specification
IPE	-	integrierte Produktentwicklung
IPMC	-	Ionic Polymer Metal Compound
k.A.	-	keine Angabe
MMS	-	Mensch-Maschine-Schnittstelle
NaClO	-	Natriumhypochlorit
NI	-	National Instruments
OEM	-	Original equipment manufacturer (Erstausrüster)
PA12	-	Polyamid12
PANI	-	Polyanilin
PKW	-	Personenkraftwagen
PMN	-	Blei-Magnesium-Niobate
Ppy	-	Polypyrol
PU	-	Polyurethan
PVD	-	Physical vapour deposition (physikalische Gasphasenabscheidung)
PVDF	-	Polyvinylidenfluorid
PZT	-	Blei-Zirkonat-Titanat

REM	-	Rasterlektronenmikroskopie
SRS	-	Supplemental Restraint System
TGA	-	Thermogravimetrische Analyse
UV	-	Ultraviolett
VDA	-	Verband der Automobilindustrie
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	-	vergleiche
z.B.	-	zum Beispiel

# Verwendete Zeichen

Zeichen	Einheit		
$\lambda$		-	Materialstreckung
$\nu$		-	Querkontraktionszahl
$a$	$\text{m/s}^2$	-	Beschleunigung
$A$	$\text{mm}^2$	-	Fläche
$b$	$\text{mm}$	-	Breite
$c$		-	Korrekturfaktor
$C$	$F$	-	elektrische Kapazität
$C_{i0}$	$\text{N/mm}^2$	-	Fitting Parameter
$E$	$\text{N/C, V/m}$	-	elektrisches Feld
$E_B$	$\text{kV/mm}$	-	elektrische Durchschlagsfestigkeit
$F$	$N$	-	Kraft
$G$	$\text{N/mm}^2$	-	Schubmodul
$I_i$		-	Verzerrungsinvarianten
$In$		-	Interpretant
$K$	$\text{J/g}$	-	korrigierte elektrische Energiedichte
$l$	$\text{mm}$	-	Länge
$M$		-	Mittel
$m$	$\text{kg}$	-	Masse
$n$		-	Lagenzahl

O		-	Objekt
$p_{el}$	$N/mm^2$	-	Äquivalenter elektrostatischer Druck
Q	C	-	elektrische Ladung
R	mm	-	Radius
r	$N/mm^2$	-	Fitting Parameter
s	%	-	relative Dehnung
t	mm	-	Dicke
$t_{DE}$	mm	-	Dicke des dielektrischen Elastomers
U	J/g	-	Energiedichte
v	m/s	-	Geschwindigkeit
V	V	-	elektrische Spannung
W	J	-	Arbeit
x	mm	-	Auslenkung
Y	$N/mm^2$	-	Elastizitätsmodul
$Z_R$		-	Zeichenrelation
$\beta$	°	-	Winkel
$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ AS/Vm}$	-	Permittivität des Vakuums
$\epsilon_r$		-	relative Permittivität
$\theta$	°	-	Nickwinkel
$\vartheta$	°C	-	Temperatur
$\vartheta_C$	K	-	Curie-Temperatur
$\rho$	$g/cm^3$	-	Dichte

$\varrho$	$\text{N/mm}^2$	-	Druck
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	-	mechanische Spannung
$\tau$	s	-	Zeit
$\nu$	$^\circ$	-	Wankwinkel
$\psi$	$^\circ$	-	Gierwinkel



# 1 Einleitung

Die Entwicklung des Automobils Ende des 18. Jahrhundert bewirkte eine Wende in der Mobilität des Menschen. Eine neue Form der „praktischen Ästhetik“ wächst bis heute aus dem zu Beginn eher technisch geprägten Produkt [1]. Heute werden Personenkraftwagen (PKW) nicht nur hinsichtlich technischer Merkmale konstruiert. Die Anmutungsqualität<sup>1</sup> des Fahrzeugs und die Rezeption<sup>2</sup> durch den Kunden stehen seit vielen Jahrzehnten mit im Vordergrund. Auch in Zukunft ist diese Form der individuellen Mobilität nicht weg zu denken. Eine Vielzahl von Zukunftsszenarien befassen sich damit, Aussagen über die genaue Entwicklung der zukünftigen Fortbewegung zu tätigen [2-5].

In der Geschichte des Automobils spielen neue Werkstoffe oder Werkstoffkombinationen eine wichtige Rolle. Das Interesse an Eigenschaften neuer Werkstoffe, liegt einerseits darin begründet, neue technische Funktionen generieren zu können, und auch bisher nicht realisierbare designrelevante Eigenschaften, wie z.B. Oberfläche, Textur oder Geruch zu ermöglichen [6].

Typische Zeiträume, bei der Serienentwicklung von Automobilen liegen zwischen 25-60 Monaten. Vorentwicklungsprojekte, in denen neue Werkstoffe, Prozesse und Fertigungsmittel in die Serienfertigung integriert werden, können mehrere Jahre andauern. Die Entwicklung neuer Werkstoffe, Prozesse und Fertigungsmittel kann bereits mehr als 20 Jahre vor Beginn einer Einführung in die Serie angestoßen werden.

Die Motivation liegt darin ein mechanisch aktives Material in einem technisch funktionsfähigen Produkt einzusetzen. Durch Substitution der konventionellen Aktorik im Automobilsitz, wie Elektromotoren und mechanischen Getrieben, kann Gewicht und Bauraum eingespart werden. Zudem ist diese Arbeit von dem Wunsch getrieben, mittels modular aufgebauter Aktoren, die Designfreiheit hinsichtlich technischer und ästhetischer Funktionen eines Sitzes zu erhöhen. Ebenso sollen die Ergebnisse dazu

---

<sup>1</sup> Anmutungsqualität: Wirkung einer Erscheinung auf den Betrachter, abhängig von den Eigenschaften des Objekts und der Situation des Betrachters  
<sup>2</sup> Rezeption (Kommunikation): Aufnehmen und Verarbeiten einer gesendeten Botschaft

beitragen das Verhalten des mechanisch aktiven Materials, dem dielektrischen Elastomer, und den daraus entstehenden Aktoren näher beschreiben und verstehen zu können.

Das Ziel liegt darin eine frei verformbare Fläche und die dazu benötigte Aktorik zu konzipieren, die als neuartiges Verstellkonzept für Automobilsitze einsetzbar ist. Der Schwerpunkt liegt hierbei in dem Entwurf und der Charakterisierung von aktorischen Elementen aus einem Material, welches beim Anlegen einer elektrischen Spannung seine Form verändert. Mittels dieser Aktoren soll eine neuartige Sitzfläche verstellt werden. Innerhalb der Forschungstätigkeiten entsteht ein Demonstrator, basierend auf aktorischen Elementen, einer Fläche aus verhautetem Polyurethan-Weichschaum sowie der elektrischen- und elektronischen Steuerelemente.

Der Einsatz dieses Autositzkonzepts ist noch fern vom Serieneinsatz im PKW und kann nach Sicht des Verfassers erst in drei bis fünf Dekaden erwartet werden. In diesem Zeitraum ist eine starke Veränderung in der individuellen Mobilität zu erwarten [3]. Die Zunahme von Elektromobilität, Unfallvermeidungssystemen und die steigende Bedeutung von Kommunikation innerhalb und außerhalb des PKW, sowie damit verbundene Änderungen der Nutzeransprüche lassen sich daher nur ansatzweise abschätzen.

## 1.1 Form, Funktion und Material.

Das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene mechanisch aktive Material wird im Rahmen dieser Dissertation in den Kontext ‚Automobil‘, gerückt, was dazu führt, dass es nicht nur mit rein technischen Anforderungen, sondern auch mit Anforderungen durch den direkten Kontakt mit dem Menschen konfrontiert wird. Eine rein materialzentrierte Betrachtung und Beschränkung auf technische Anforderungen ist daher nicht ausreichend.

Der Innenraum eines Automobils dient bei Weitem nicht nur der Funktion des Steuerns eines Fahrzeugs. Er ist ein Raum in dem der Mensch lebt. Er sitzt, schläft, isst, trinkt, hört Musik, spielt, telefoniert, sieht fern, liebt, arbeitet, dekoriert oder nutzt das Internet. All diesen Ansprüchen soll der automobiler Lebensraum gerecht werden und dabei den höchsten Grad an Schutz und Übersicht bieten. Darüber hinaus soll der Innenraum eine dem Fahrzeug und dem Nutzer entsprechende Ästhetik kommunizieren, was der Automobildesigner über Oberflächen, Farben, Proportionen, Radien, Konturen und auch dem Einsatz von Materialeigenschaften erschaffen möchte.

*„It is the pervading law of all things organic and inorganic, of all things physical and metaphysical, of all things human and all things superhuman, of all true manifestations of the head, of the heart, of the soul, that the life is recognizable in its expression, that form ever follows function. This is the law.“ [7]*

Die damit von Sullivan [7] geprägte Aussage *„form [...] follows function“*, beinhaltet nach seinem Verständnis auch den Parameter *„Material“*. Demnach folgt die Form, und damit auch die Materialität eines Objekts, das dem Menschen einen Nutzen bieten soll, der ihr aufgeprägten Funktion. Unter Funktionen versteht Sullivan nicht nur

technische Funktionen, sondern auch Zierrat<sup>3</sup> und Ornament<sup>4</sup> können funktional sein. Das Material und die Form sind der Funktion jedoch nicht rein hierarchisch untergeordnet, sondern beherbergen diese in sich.

Rezeption von Form und Material ist jedoch immer abhängig von der Umgebung in der sie agieren. Je nach Kulturkreis werden Formen, Farben und auch Materialien verschiedene Bedeutungen zugeschrieben, was dazu führt, dass Objekte gleicher Form und gleichen Materials unterschiedlich wahrgenommen werden. Also werden auch Produkte, wie das Automobil, die weltweit vermarktet werden, je nach Kulturkreis anders rezipiert. Das Produkt wird zum Zeichen und die Wahrnehmung des Produktnutzers tritt in den Vordergrund. Eine solche Verknüpfung beschreibt die triadische<sup>5</sup> Zeichenrelation nach Pierce [8]:

„Ein Zeichen Z ist Mittel einer triadischen Relation  $Z_R$  welches in aktiver Beziehung zu einem Interpretanten In, und passiv zu einem Objekt O steht  $Z = Z_R(M,O,In)$ .“

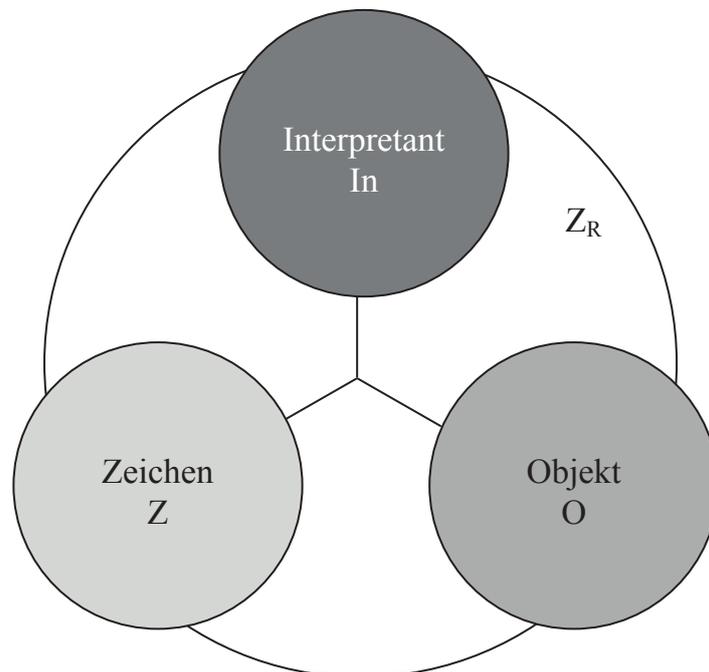


Abbildung 1.1 Triadische  $Z_R$  nach [8]

---

<sup>3</sup> Zierrat: Verzierung, Schmuck eines Objekts

<sup>4</sup> Ornament: Einem Objekt aufgeprägtes Muster, formal abweichend vom Hintergrund

<sup>5</sup> Triade: (griech. trias zu Genetiv: triados) Dreiheit oder auch Dreischritt

Die Produktsemantik befasst sich mit dieser Relation und der damit verbundenen Kommunikation zwischen Benutzer und Objekt. Form und Material agieren hier sowohl als Bestandteil des Objekts und darüber hinaus auch als Mittel. Eine Vielzahl von Arbeiten versuchen qualitative [9] oder quantitative [10] Beurteilungsfaktoren zur Bewertung dieses Verhältnisses und der damit verbundenen Vorhersage des Markterfolges zu ermitteln [11].

Die Funktion kann nach Sullivan [7] auch das Innewohnen eines Zeichens sein. Das Material, der Werkstoff, eines Objekts ist demnach Funktionsträger durch seine Bedeutung und mit ihm verknüpfte Assoziationen (als Zeichen) und zugleich Teil der Form, durch seine Oberfläche, Farbe oder geometrische Ausbildung. Die Form, das Material und die Funktion bilden hierbei einen Dreiklang in der Entwicklung des automobilen Innenraums.

Neu entwickelte Werkstoffe und Werkstoffverbunde sind häufig noch nicht offensichtlich mit einem Zeichen assoziiert. Ihnen werden noch keine kulturell festgeschriebenen Werte und Bedeutungen zugeordnet. Dieser Zustand der „Bedeutungsarmut“, füllt sich mehr und mehr durch den verstärkten Kontakt mit dem Menschen, z. B. in der Verwendung des Werkstoffes in Produkten auf. Das Material entwickelt damit ein Image wie „High-Tech-Material“, „Billigwerkstoff“ oder „Gefahrstoff“. Häufig ist das Werkstoffimage nicht festgeschrieben, sondern durchläuft Phasen der Entwicklung und Veränderung. Materialinduzierte Produktinnovationen haben damit häufig den Faktor der menschlichen Neugierde, seinem Interesse an Neuem, auf ihrer Seite. Der Reiz neue Formen und Funktionen mit einem neuen Material zu entwickeln, bietet ein weites Feld für den Forschungsgeist des Menschen [12].

Bei dem Einsatz eines neuen Werkstoffs ist dieser komplexe Zusammenhang aus Funktion, Form und Material stark an das entstehende Produkt gekoppelt. Neue Freiheitsgrade seitens des Materials lassen sich nur dann ausschöpfen, wenn alle drei Einflussfaktoren von  $Z_R$  Berücksichtigung finden. Hierfür ist eine Analyse des Automobilsitz und dessen Kommunikation mit dem Nutzer unerlässlich.

## 1.2 Sitze im Automobil

Im Folgenden wird die Technik der Fahrzeugsitze nach heutigem Stand beschrieben. Dies geschieht am Beispiel der meist baugleichen Fahrer- und Beifahrersitze in aktuellen Serien-PKW. Die vorderen Einzelsitze werden gemeinhin als Fahrersitzstruktur bezeichnet. Im *Fond*<sup>6</sup> eines Fahrzeuges befinden sich meist Sitzbänke, die ähnlich aufgebaut sind, aber hier nicht weiter beschrieben werden.

Der Sitz ist als Bestandteil des beweglichen Systems Automobil gleich nach dem Türgriff, eine der ersten Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) mit der der Nutzer in Kontakt kommt [13, 14]. Der Sitz muss nach aktueller Auffassung dem Benutzer einen Eindruck von Komfort und Sicherheit vermitteln, und zugleich eine auf das Fahrzeug angepasste Ästhetik kommunizieren [6, 15]. In Abschnitt 1.3 wird näher auf dieses Verhältnis zwischen Nutzer und Automobilsitz eingegangen.

Im Wesentlichen ist der Aufbau von Fahrzeugsitzen (siehe Abbildung 1.2) in allen Automobilklassen ähnlich. Die tragende Struktur besteht traditionell aus Metallrahmen, Verstellgestängen und –schielen, Bauteilen für Komfort (Massage, Klimatisierung,...), Airbag-Systemen und Befestigungen für die Sicherheitsgurte. An die Struktur wird der so genannte „Hut“ montiert. Dieser besteht aus Abdeckungen, Blenden, sowie Polstern und Bezügen [16].

---

<sup>6</sup> Fond: Hinterer Teil der Fahrgastzelle, der die Rücksitze beinhaltet



Abbildung 1.2 Beispielhafter Aufbau eines Autositzes<sup>7</sup>

Die Aufgabe des tragenden Strukturelements **Sitzrahmen** besteht darin mechanische Lasten aufzunehmen und die Elemente für Komfort und Sicherheit unterzubringen. Die vom Sitzrahmen aufzunehmenden mechanischen Lasten werden herstellerepezifisch in Prüfvorschriften beschrieben und umfassen [16]:

- Statische Sitzlast vom Nutzer
- Dynamische Lasten im Fahrbetrieb aus Horizontal- und Vertikalbewegung
- Verstellkräfte und Momente bei Änderung der Sitzposition
- *Crashlasten* wie z.B.

<sup>7</sup> Quelle: Audi AG, 2011

- Lasten am Gurtschloss (statisch bis 16 kN),
- Lasten am Beckengurtendbeschlag (statisch bis 6 kN),
- Schutz vor Ladung (dynamisch bis etwa 10 kN),
- Lasten an der Kissenschale (statisch bis 15 kN),
- Knicklasten Seitenaufprall (statisch 20-60 kN bei maximal 40 mm Deformation),
- Lehnenbelastung bei Heckaufprall (statisch bis 18 kN).

Art und Anzahl der **Bauteile für den Komfort** im Automobilsitz sind abhängig von Fahrzeugklasse und Ausstattung und können manuelle oder automatisierte Verstellsysteme für Lehnen und Polster, Massagesysteme und Klimatisierungssysteme (aktive Be- und Entlüftung, sowie Heizung) umfassen. Die Systeme bestehen aus Führungen, Schienen, mechanischen Kinematiken und Kissen. Sie werden manuell, elektrisch, pneumatisch oder auch hydraulisch angesteuert und dienen dazu Teile des Autositzes translatorisch, rotatorisch oder formend zu verändern.

Die **Elemente für die Sicherheit** umfassen Seiten- und Kopfairbags, aktive Stützen (z.B. Kopfstützensachführung) und Gurtbefestigungssysteme, wie Beckengurtschloss und –endbeschlag oder auch Schultergurtführung und –befestigung. Diese sollen das Verletzungsrisiko des Fahrzeuginsassen im Falle eines *Crashs* verringern.

Der Hut verdeckt die Struktur und bildet, als vom Nutzer wahrgenommene Oberfläche, die eigentliche MMS des Autositzes. Die Anforderungen an die Beschaffenheit und Qualität der wahrgenommenen Oberflächen werden von Cassel [17] und dem VDA [18] beschrieben, sind jedoch stark von den spezifischen Anforderungen der Fahrzeughersteller abhängig. In Abbildung 1.3 sind die in Anlehnung an [18] definierten Sichtzonen der Fahrersitzstruktur dargestellt.

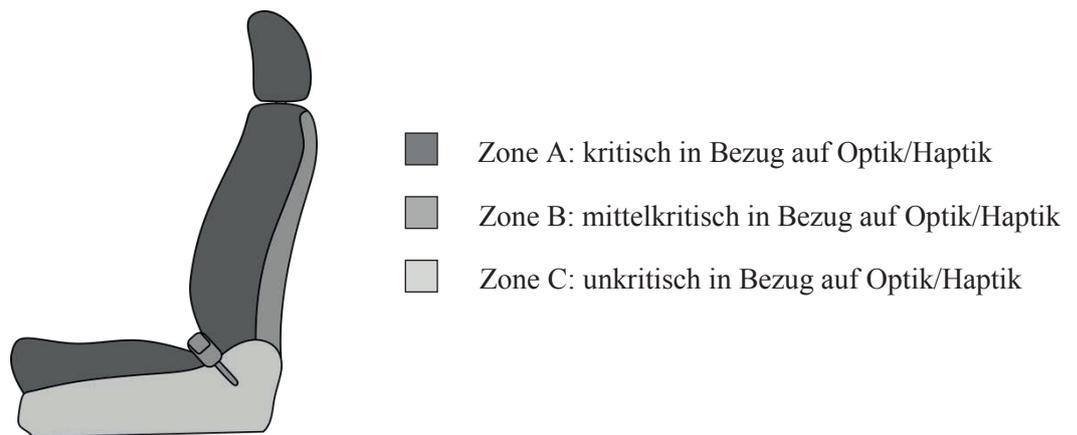


Abbildung 1.3 Sichtzonen am Automobilsitz nach [18]

**Abdeckungen und Blenden** des Huts dienen primär der Verkleidung der Strukturteile, die nicht von Polsterungen und anderen Funktionsflächen verdeckt werden. Sie dienen je nach Position am Sitz optischer und haptischer Funktion, aber schützen den Insassen auch vor möglichen Verletzungen seitens der Strukturelemente. Des Weiteren bieten sie Aufnahme­flächen für Funktionselemente wie Hebel, Schalter oder auch Displays.

Die **Polster** werden direkt auf dem Sitzrahmen (Kissenschale) befestigt. Sie nehmen die Last des Nutzers auf und leiten sie in die Struktur. Die Polster bestehen in Serienfahrzeugen aus Weichschaumsystemen auf Polyurethanbasis (PU). Über die Kontur und die Polsterhärte des PU-Schaums wird der Sitzkomfort maßgeblich mitbestimmt. Die Polsterung wird zudem hinsichtlich ihrer biologischen Verträglichkeit mit dem menschlichen Körper und ihrer Transportfähigkeit für Wärme und Feuchtigkeit eingesetzt. Sie dient somit auch der passiven Klimatisierung im Sitz.

Über die Polster werden **Bezüge** aus Leder oder Velours gespannt. Sie werden zuvor zugeschnitten, vernäht und verklebt und mit Abheft­nähten am Schaum fixiert. Die Bezüge tragen somit zum Sitzkomfort bei und bilden die größte Oberfläche in der Sichtzone A (siehe Abbildung 1.3).

### 1.3 Der Fahrzeugsitz als Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS), oder Benutzerschnittstelle, ist ein Bestandteil des Systems „Maschine“ und dient der Kommunikation zwischen Maschine und Benutzer. Die MMS stellt dem Benutzer visuelle, auditive, olfaktorische oder haptische Reize zur Verfügung, um ihm Informationen über den Betriebszustand der Maschine zu vermitteln.

- **Visuelle Reize:** Mit den Augen aufgenommene Signale, wie Formen, Farben, Kontraste, Zeichen und Lichter.
- **Auditive Reize:** Über die Ohren (und Gleichgewichtsorgan) aufgenommene Schallsignale, Geräusche und Vibrationen.
- **Olfaktorische Reize:** Über Rezeptoren in der Nase wahrgenommene Gerüche.
- **Haptische Reize:** Mit dem Tastsinn über die Haut wahrgenommene Signale, wie Dimension, Konturen, Oberflächentexturen und Gewicht eines Objekts.

Für Eingaben seitens des Benutzers stellt die MMS taktile, akustische und teilweise auch optische [19] Eingabesysteme bereit [15].

- **Taktile Eingabesysteme:** Stellelemente wie Knöpfe, Schalter, Regler oder berührungssensitive Flächen.
- **Akustische Eingabesysteme:** Akustische Schallaufnehmer, wie Mikrofone.
- **Optische Eingabesysteme:** Licht- oder reflexionssensible Aufnehmer, wie Kameras oder Laser.

Der Fahrzeugsitz teilt dem Nutzer Informationen mit, empfängt aber ebenso Informationen und dient damit als MMS im System Automobil.

Das Fahrzeug beschreibt im Betrieb nach DIN 70000 [20] translatorische Bewegungen. In Fahrzeuglängsrichtung ( $x$ ), quer zum Fahrzeug ( $y$ ), Kombinationen aus  $x$  und  $y$  in der horizontalen Ebene ( $h$ ) und in der Hochachse ( $z$ ) werden die Geschwindigkeiten  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $v_h$  und die Beschleunigungen  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ,  $a_c$ , und  $a_h$  definiert. Zudem treten rotatorische Bewegungen, wie Wanken  $\nu$ , Nicken  $\theta$  und Gieren  $\psi$  auf (siehe Abbildung 1.4). Der Automobilsitz gibt dem sitzenden Benutzer haptische

Rückmeldung über Lage und Beschleunigungen des Fahrzeugs wieder, so dass dieser während der Nutzung des Fahrzeuges entsprechende Handlungen hieraus ableiten kann.

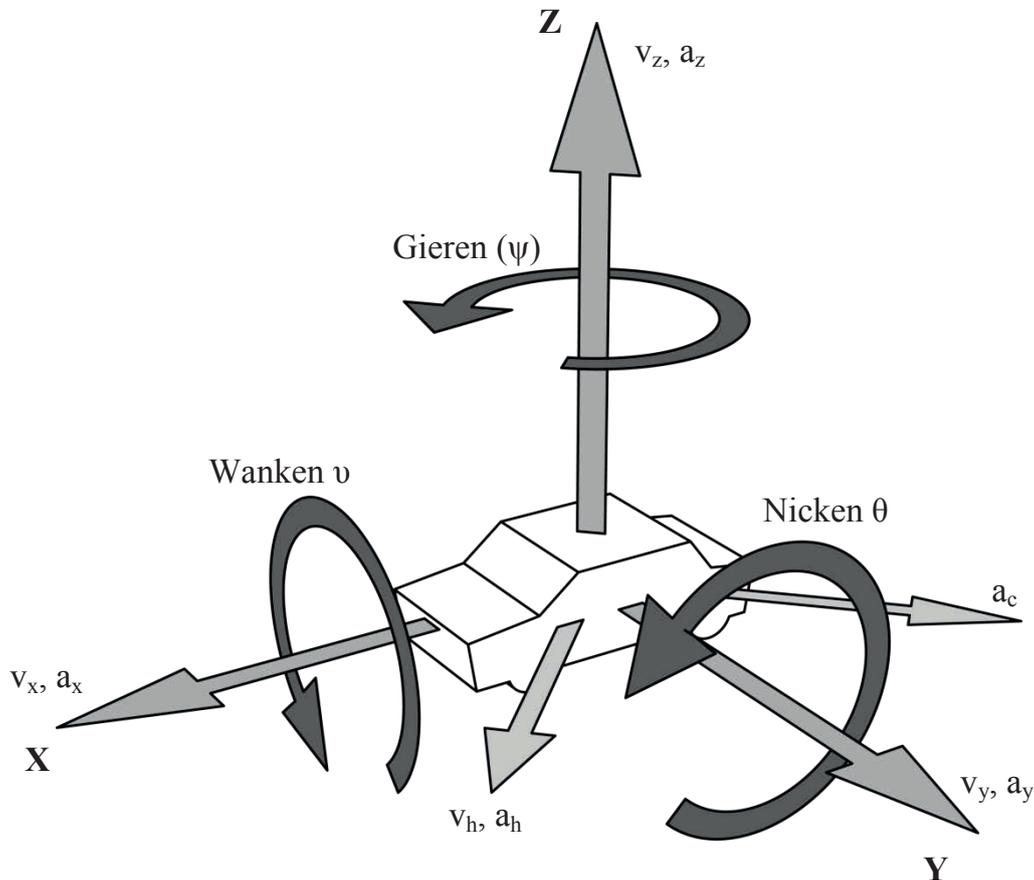


Abbildung 1.4 Fahrdynamische Größen im Automobil nach [20]

Des Weiteren dient der Autositz als visueller und auch olfaktorischer Informationstransporteur. Über bestimmte Merkmale von Form, Oberfläche und Material lassen sich Fahrzeugzugehörigkeiten, Fahrzeugklassen oder Ausstattungsvarianten und Sondereditionen kommunizieren. Merkmale, wie Lederbezüge und elektrische Stellelemente, werden vom Nutzer bereits einem Fahrzeug der „Premiumklasse“, schalenförmige Sitze mit dünnen Polsterungen üblicherweise Fahrzeugen aus dem „Sportwagensegment“ zugeordnet. Über die gleichen Reizgeber können erlernte emotionale Eindrücke, z.B. über den Sitzkomfort vom Designer angesprochen werden [9, 21].

Darüber hinaus kann der Sitz über Kommunikationsflächen (z.B. Beschriftungen: Airbag oder SRS<sup>8</sup>) das Vorhandensein eines oder mehrerer Sicherheitssysteme vermitteln.

Bei Sitzen, die über Verstellmechanismen verfügen, ist das akustische *Feedback* bei Betätigung des Mechanismus ebenso ein Bestandteil in der Kommunikation Mensch-Maschine. Bei der Entwicklung aktueller Sitze werden von Seiten der Erstausrüster (*OEM*) Zielgeräusche für die elektrischen Verstellkomponenten definiert [16]. Ebenso sind die auditiven Reize beim Ansitzen – also beim ersten Hineinsetzen – maßgeblich für die Kommunikation und den Qualitätseindruck des Sitzes.

Die Auslegungen der Polster, Bezüge und der Strukturelemente für den Komfort beziehen auch ergonomische Anforderungen ein. Die Ergonomie beschreibt die Beschaffenheit geeigneter Ausführungsbedingungen eines Arbeitsplatzes für den Menschen. Beim „Arbeitsplatz im Automobil“ liegt das Ziel darin, für den Großteil der Menschen (vom 5. Perzentil<sup>9</sup> Frau, bis zum 95. Perzentil Mann [22]) einen „komfortablen“ Sitzplatz zu schaffen. Das Komfortempfinden des Menschen wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Im Fahrzeugsitz sind diese Parameter beispielsweise Ansitzgefühl, Druckverteilung, Mikroklima, Schwingungskomfort, Seitenführungseigenschaften, Langzeitkomfort oder Haltungskomfort [23]. Diese Fähigkeiten zur Anpassung an den menschlichen Körper gewinnen mehr an Bedeutung und sind zu einem wichtigen Bestandteil der MMS Automobilsitz geworden.

---

<sup>8</sup> SRS: *Supplemental Restraint System, engl.* ergänzendes Rückhaltesystem

<sup>9</sup> Perzentil: (Hundertstelwert) Angabe bezogen auf 100% von statistischen erhobenen Daten, kumulative Angabe der Werte bis zum angegebenen Wert. 95. Perzentil: Einschluss aller Werte bis 95%

## **2 Mechanisch aktive Materialien**

Der Begriff „aktives Material“ beschreibt nicht eindeutig die Art des Werkstoffverhaltens. Sowohl Materialien, die eine gezielte Veränderung auf ihre Wechselwirkung mit elektromagnetischen Wellen aufweisen, die optisch aktiven Materialien [24], wie auch radioaktive Materialien werden mit diesem Begriff umschrieben. Die in dieser Arbeit behandelten aktiven Materialien verändern ihren geometrischen Zustand: Unter der Zufuhr von chemischer, elektrischer, magnetischer, optischer oder auch thermischer Energie können diese eine mechanische Arbeit verrichten. Daher werden sie nachfolgend als mechanisch aktive Materialien bezeichnet.

In allen Werkstoffgruppen, Metallen, Keramiken und Polymeren gibt es mechanisch aktive Materialien. Darüber hinaus existiert eine Reihe mechanisch aktiver Verbundwerkstoffe [25].

Tabelle 2.1 bis Tabelle 2.3 zeigen eine Zusammenstellung mechanisch aktiver Werkstoffe. Manche der genannten Werkstoffe biegen, dehnen sich uniaxial oder verformen sich in alle Raumrichtungen. Bei der Auswahl eines mechanisch aktiven Werkstoffs sollte darüber hinaus die Reaktionsgeschwindigkeit, die Energiedichte und die maximale mechanische Spannung bei Aktivierung berücksichtigt werden.

## 2.1 Mechanisch aktive Keramiken

Die Beschreibung mechanisch aktiver Keramiken erfolgt hier anhand einer kristallinen Zelle einer PZT-Piezokeramik. Diese ist oberhalb der Curie-Temperatur kubisch aufgebaut und unpolar. Unterhalb der Curie-Temperatur  $\vartheta_C$  wird die Zelle tetragonal oder rhomboedrisch verzerrt und das Titan- oder Zirkonium-Atom nimmt einen Platz außerhalb des Zellmittelpunkts ein, vgl. Abbildung 2.1. Die einzelne Piezokeramikzelle ist damit anisotrop<sup>10</sup> und wird zum Dipol. Wird auf den Werkstoff ein mechanischer Druck ausgeübt, so werden die Ladungsträger in der Keramikzelle gegeneinander verschoben und es tritt eine Potenzialdifferenz an den Oberflächen der Piezokeramik auf. Die proportionale Abhängigkeit von Potenzialdifferenz und aufgebrachtem mechanischen Druck wird „direkter piezoelektrischer Effekt“ genannt. Der „reziproke oder inverse piezoelektrische Effekt“ bezeichnet die Längenänderung einer Piezokeramik in Folge des Anlegens eines elektrischen Feldes. Zu den Piezokeramiken gehören unter anderem Quarze, Turmalin und Sinterkeramiken, deren Strukturformel nach der Perowskit-Formel nach Gleichung (2.1) zusammengesetzt sind



Darunter befinden sich Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) oder Blei-Magnesium-Niobate (PMN). Piezokeramiken dehnen sich bei elektrischen Feldern von 2 kV/mm bis zu 0,2 % [26, 27].

---

<sup>10</sup> anisotrop: richtungsabhängig

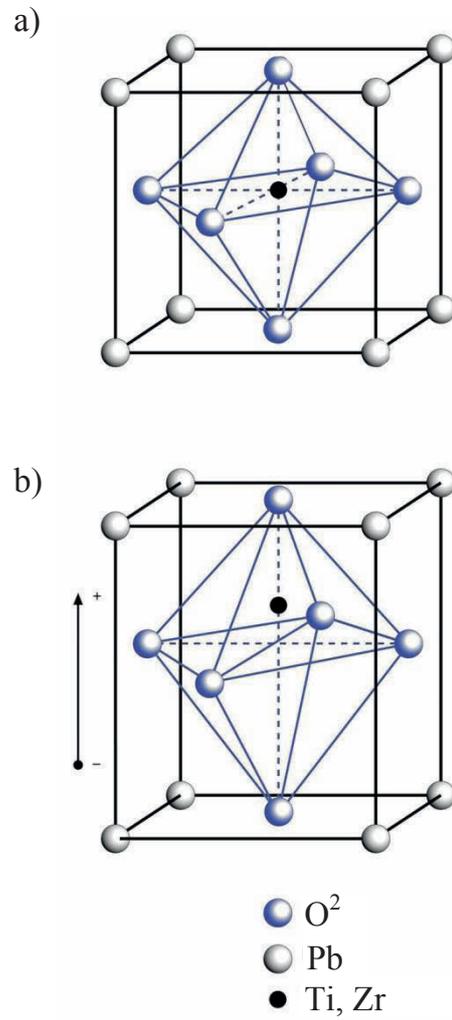


Abbildung 2.1 Kristalline Zelle einer PZT-Piezokeramik a) oberhalb und b) unterhalb der Curie-Temperatur  $\vartheta_C$  [28]

Tabelle 2.1 Mechanisch aktive Keramiken

<b>Materialfamilie</b>	<b>Benennung</b>	<b>Kurzname</b>	<b>Dehnungsbereich</b>	<b>Aktivierung</b>
<b>Piezokeramiken</b>	Blei-Magnesium-Niobat	PMN	0,200%	elektrisch
	Blei-Zirkonat-Titanat	PZT	0,200%	elektrisch
	Barium-Titanat		0,170%	elektrisch
	Quarz		0,001%	

## 2.2 Mechanisch aktive Metalle

Metallische Formgedächtnis-Legierungen (FGL) können nach mechanischer Verformung im kalten Zustand mittels thermischer Energiezufuhr ihre Ursprungsform wieder herstellen. Zweiwegeeffekt-FGL können auch zwei verschiedene Formzustände zu verschiedenen Temperaturen annehmen. FGL können Verformungsgrade bis über 10 % zurückstellen. Die Rückstellung wird über eine Strukturänderung von martensitischem<sup>11</sup> zu austenitischem<sup>12</sup> Gefüge in der FGL erreicht. FGL sind: Au – Cd, Ag – Cd, Ni – Ti, Ni – Al, Cu – Al – Ni, Cu – Zn, Cu – Zn – (X), In – Ti, Fe – Pt, Mn – Cu, Fe – Mn – Si [29].

Zu den metallischen Werkstoffen, die sich auf magnetische Anregung mechanisch aktiv zeigen, gehören die magnetostriktiven Metalle und Legierungen, wie Terfenol-D ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$  ( $x \sim 0.3$ )). Die Magnetostriktion in Metallen beruht makroskopisch betrachtet auf zwei Prozessen:

1. Domänenwände<sup>13</sup> können unter Einwirkung eines magnetischen Feldes im Werkstoff migrieren.
2. Die Domänen können unter Einwirkung des magnetischen Feldes rotieren.

Dies führt zu einer Orientierung der Domänen im Material und damit zu einer Veränderung der Geometrie des Werkstoffs und uniaxialen Dehnungen in Richtung des Magnetfeldes von bis zu 1 % [30]. Eine qualitative Übersicht von verschiedenen mechanisch aktiven Metallen ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

---

<sup>11</sup> Martenistisch: ferromagnetisches metastabiles Gefüge in Metallen

<sup>12</sup> Austenitisch: kubisch-flächenzentrierte Mischkristalle

<sup>13</sup> Domäne: Bereiche gleicher Ausrichtung der magnetischen Momente

Tabelle 2.2 Mechanisch aktive Metalle

<b>Materialfamilie</b>	<b>Benennung</b>	<b>Kurzname</b>	<b>Dehnungsbereich</b>	<b>Aktivierung</b>
<b>Form-Gedächtnis-Legierungen (FGL)</b>	Kupfer-Zink-Legierungen	CuZn		thermisch
	Kupfer-Zink-Aluminium-Legierungen	CuZnAl		thermisch
	Eisen-Nickel-Aluminium-Legierungen	FeNiAl	bis 10 %	thermisch
	Kupfer-Aluminium-Nickel-Legierungen	CuAlNi		thermisch
	Nitinol (Titan-Nickel-Legierungen)	TiNi		thermisch
<b>magnetostruktive Legierungen</b>	Terfenol-D	TbDyFe	1 %	elektrisch

## 2.3 Mechanisch aktive Polymere

Eine Vielzahl mechanisch aktiver Kunststoffe ist aktuell Gegenstand der Forschung. Verschiedene Stimuli bringen diese Kunststoffe dazu sich an eine aufgeprägte Form zu „erinnern“ oder sich abhängig von zugeführter Energie aktiv zu verformen. Polymere, die sich unter Zuführung von elektrischer Energie geometrisch verformen, werden in Abschnitt 2.3.1 näher erläutert.

Ähnlich wie bei den Metallen gibt es auch Kunststoffe, die ein Formgedächtnis aufweisen. Unter Zufuhr von Wärmeenergie formen sich diese, nach zuvor von außen aufgeprägter Deformation, wieder in ihren Ursprungszustand zurück. Die Formgedächtnis-Polymere (FGP) bestehen meist aus vernetzten Copolymeren und können Dehnungen bis zu 80 % zurückformen [31]. In Tabelle 2.3 ist eine qualitative Übersicht einiger mechanisch aktiver Polymere aufgelistet.

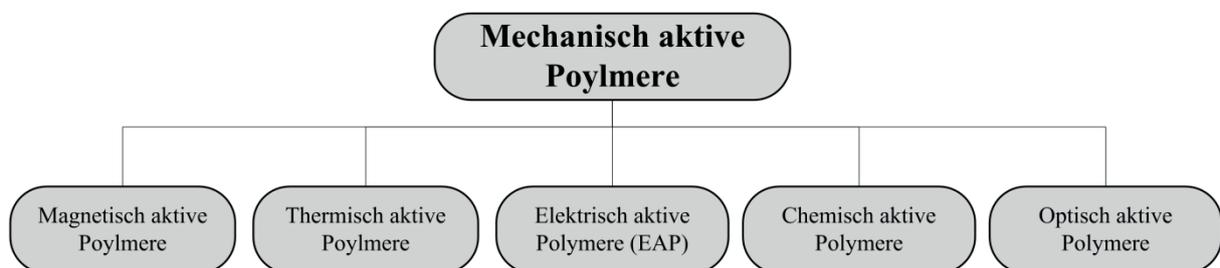


Abbildung 2.2 Unterteilung mechanisch aktiver Polymere nach [32]

Tabelle 2.3 Mechanisch aktive Kunststoffstoffe

Materialfamilie	Benennung	Kurzname	Dehnungsbereich	Hilfsenergie
<b>Ionische Polymer-Metall-Verbunde</b>	Flemion, Nafion	IPMC	Biegung	elektrisch
<b>Quellkinetische Polymere</b>	Hydrogele		bis 40 %	chemisch
<b>Flüssigkristalline Elastomere</b>	Poly(DimethylSiloxane)	FULCE	bis 160 %	thermisch
<b>Weiche dielektrische Polymere/elektrostriktive Polymere</b>	Dielektrisches Silikon-Elastomer		bis 60 %	elektrisch
	Dielektrisches Acryl-Elastomer		bis 380 %	elektrisch
<b>Elektrostriktive Propf-Elastomere</b>	Dimethylformamid		bis 4 %	elektrisch
<b>Leitfähige Polymere</b>	Polypyrrol	Ppy	bis 20 %	
	Polyanilin	PANI	bis 20 %	
	Nanopartikelmodifizierte Polymere Butylacrylat-Zimtsäure			elektrisch optisch
<b>Form-Gedächtnis-Polymere (FGP)</b>				
	<b>Physikalisch quervernetzte Copolymere:</b>			
	Polyurethan-Wachs		100 %	thermisch
	Norsorex	EPDM		thermisch
	<b>Chemisch quervernetzte Polymere:</b>			
	Polyurethan-Wachs		100 %	thermisch
	<b>andere FGP:</b>			
	quervernetztes PEO-PET / Polyurethan		80 %	thermisch
	quervernetztes Polyurethan			thermisch
<b>Piezoelektrische Polymere/ Ferroelektrische Polymere</b>	Polyvinylidenfluorid	PVDF(KYNAR, HYLAR, SYGEF), PVF2, P(VDF-TrFE)	bis 6 %	elektrisch

### 2.3.1 Elektroaktive Polymere (EAP)

Kunststoffe, die sich durch elektrische Felder oder elektrischen Strom mechanisch verformen, bezeichnet man als Elektroaktive Polymere (EAP). Die EAP lassen sich nach ihrem Wirkprinzip in zwei Gruppen einteilen [33]:

- **Ionische EAP:** Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes bewegen sich Ionen im feuchten oder trockenen Material und induzieren elektromechanisch eine Formänderung.
- **Elektronische EAP:** Elektrische Ladungsverschiebungen induzieren elektrostatische Kräfte im Material. Dies führt zu einer elektromechanischen Veränderung der Form oder des Volumens.

Die in Tabelle 2.3 aufgelisteten Kunststoffe sind, angelehnt an Lochmatter [32], folgenden beiden EAP-Gruppierungen in Abbildung 2.3 zuzuordnen:

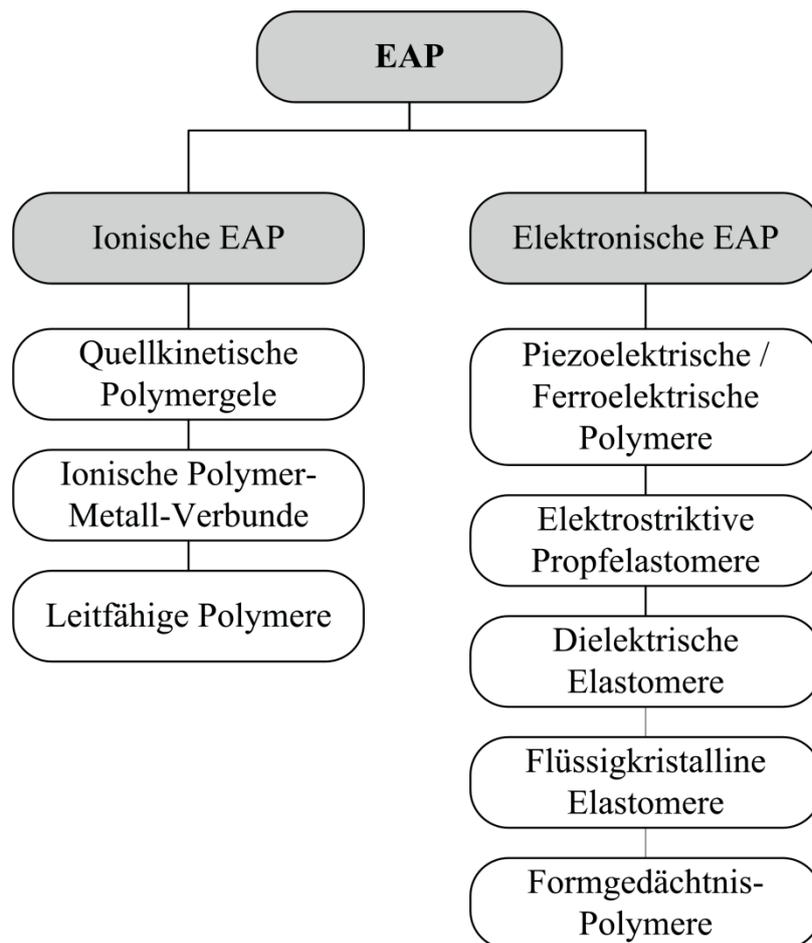


Abbildung 2.3 Einteilung der mechanisch aktiven Polymere

### 2.3.2 Weiche dielektrische EAP

Die in dieser Arbeit zur Verstellung einer Sitzfläche verwendeten weichen dielektrischen EAP zählen zu den elektronischen EAP. Sie werden nachfolgend als dielektrische Elastomere (DE) bezeichnet.

Der Aufbau eines DE entspricht im Prinzip einem nachgiebigen Kondensator. Ein DE setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zwei nachgiebigen leitfähigen Elektrodenflächen und dem dazwischen befindlichen nicht leitfähigem weichen Dielektrikum, einem inkompressiblen, elastomeren Kunststofffilm (siehe Abbildung 2.4). DE sind demnach eher als ein mechanisch aktiver Polymer-Verbundwerkstoff zu betrachten.

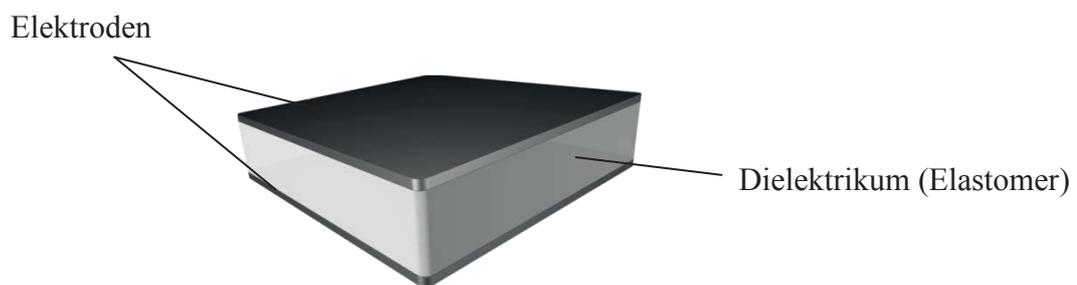


Abbildung 2.4 Aufbau eines dielektrischen Elastomers

Elastomere bestehen aus langen Ketten organischer Verbindungen. Die Ketten sind quer nur geringfügig vernetzt (siehe Abbildung 2.5). Zudem bilden die Ketten Schlaufen und Knäuel, die unter mechanischer Belastung weitestgehend reversibel auseinander gezogen werden können. Elastomere haben eine geringe Steifigkeit im Vergleich zu Thermoplasten<sup>14</sup> und Duromeren<sup>15</sup>, und verhalten sich über einen großen Dehnungsbereich (>500 %) elastisch.

---

<sup>14</sup> Thermoplast: Wieder schmelzbares Polymer aus wenig oder nicht verzweigten organischen Molekülketten

<sup>15</sup> Duromer: Nicht schmelzbares Polymer mit stark vernetztem engmaschigen Netzwerk

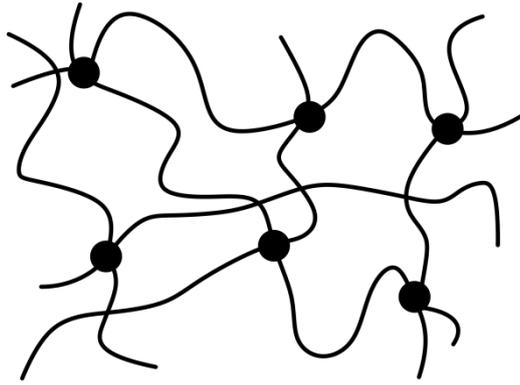


Abbildung 2.5 Modell der Struktur eines räumlich weitmaschig, chemisch vernetzten Elastomers mit Vernetzungsstellen [34]

Das nicht lineare, sondern gekrümmte Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Elastomere wird als hyperelastisch bezeichnet. Tritt innerhalb mehrerer Belastungen und Entlastungen eine Hysterese auf, so bezeichnet man dieses Verhalten als hypoelastisch (siehe Abbildung 2.6).

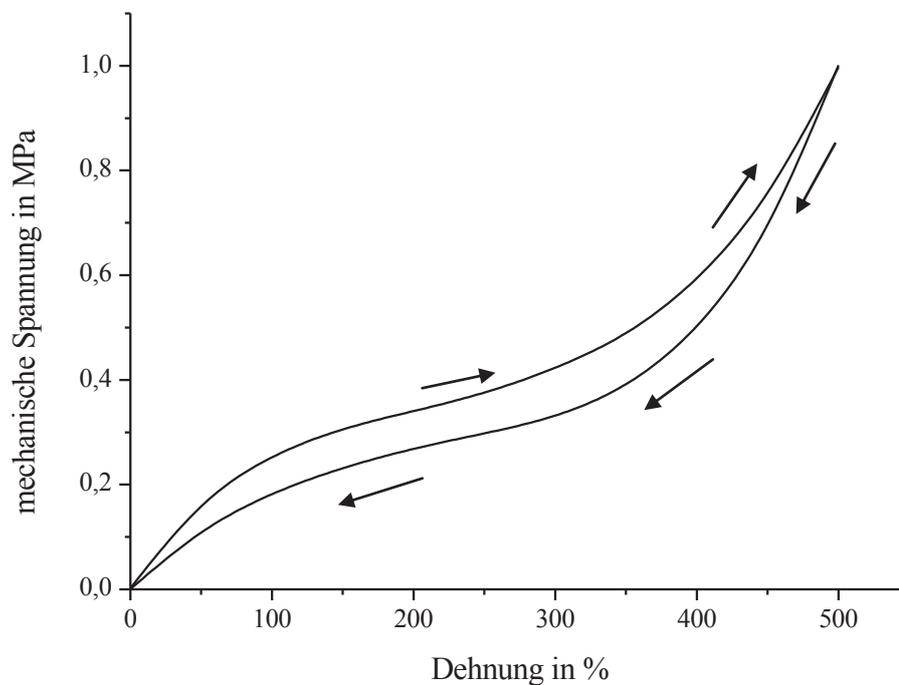


Abbildung 2.6 Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Charakteristik eines hypoelastischen Werkstoffs

Bei Elastomeren, die mit Füllstoffen versehen sind, wird zudem ein Aufweichen bei wiederholter Belastung beobachtet, der so genannte Mullins-Effekt [35].

Mit dem Aufbringen einer elektrischen Gleichspannung (DC) bis zu einigen Kilovolt (kV) auf die Elektroden, steigt deren Ladungsdifferenz  $Q$ . Das coulombsche Gesetz besagt, dass zwei Körper unterschiedlicher Ladungen einander anziehen. Der weiche dielektrische Elastomerfilm wird hierdurch zusammengedrückt. Zudem entsteht ein elektrisches Feld zwischen den Elektroden und das Dielektrikum wird polarisiert. Elastomere behalten unter mechanischer Verformung ihr Volumen bei (Querkontraktion  $v_{\text{Elastomer}} = 0,5$ ), was dazu führt, dass sich der DE lateral ausdehnt (siehe Abbildung 2.7). Unter den Annahmen der Inkompressibilität des Elastomers und einer vollständig nachgiebigen Elektrode, kann die Kompression durch die Elektroden nach Pelrine [36] über einen äquivalenten elektrostatischen Druck  $p_{\text{el}}$  beschrieben werden:

$$p_{\text{el}} = \epsilon_0 \epsilon_r \left( \frac{V}{t_{\text{DE}}} \right)^2. \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  AS/Vm die relative Permittivität des Vakuums, eine Naturkonstante, und  $\epsilon_r$  die relative Permittivität des Elastomers. Die elektrische Spannung wird durch  $V$  und die aktuelle Dicke des Elastomerfilms durch  $t_{\text{DE}}$  beschrieben. Eine durch ein elektrisches Feld hervorgerufene Änderung der mechanischen Spannung oder Verzerrung in einem Material bezeichnet man allgemein als Elektrostriktion. Eine bekannte Form der Elektrostriktion sind der piezoelektrische und inverse piezoelektrische Effekt, bei denen die Materialdeformation proportional zum Erregerfeld ist (2.3). Bei den weichen dielektrischen EAP ist dieser Zusammenhang (2.2) trotz isotropem Materialverhalten nicht linear. Man spricht bei DE demnach von elektrostriktivem Verhalten.

$$E = \frac{V}{t}. \quad (2.3)$$

Über den Elastizitätsmodul  $Y_{DE}$  des DE lässt sich die relative Dehnung in Dickenrichtung  $s_z$  in Folge elektrischer Aktivierung bestimmen:

$$s_z = \frac{p_{el}}{Y_{DE}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{Y} \left( \frac{V}{t_{DE}} \right)^2. \quad (2.4)$$

Wird ein DE in Richtung der Filmebene mechanisch gedehnt, so verringert sich in Folge der Inkompressibilität die Filmdicke  $t_{DE}$ . Nach Gleichung (2.4) sind demnach höhere Aktivierungsdehnungen zu erwarten, wenn die Steifigkeit, die relative Permittivität und die elektrische Spannung konstant bleiben.

Bedingt durch die hohe Energiedichte in einem DE (bis zu  $3,4 \text{ J/cm}^3$  bzw.  $3,4 \text{ J/g}$ ) werden aus dem elektrostatischen Druck resultierende Flächendehnungen von bis zu 300 % erreicht [37]. Zudem sind DE lautlos und verschleißfrei und zeichnen sich durch hohe Reaktionsgeschwindigkeiten aus. Zudem können durch die geringe Dichte der DE ( $\rho_{DE} \sim 1 \text{ g/cm}^3$ ) sehr leichte und maßgeschneiderte aktive Strukturen hergestellt werden.

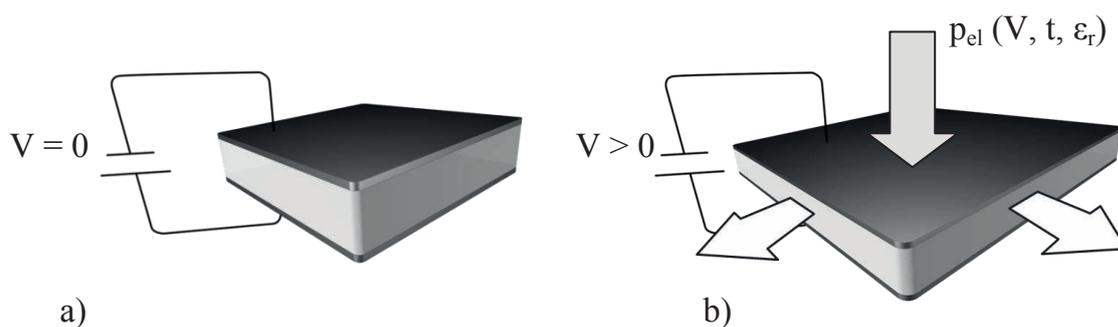


Abbildung 2.7 Funktionsprinzip eines DE, a) inaktiv, b) mit elektrischer Spannung

Um mit DE hohe Dehnungen bei elektrischer Aktivierung zu erreichen, muss das Material für die Elektroden mechanisch eine geringe Steifigkeit aufweisen oder vollständig nachgiebig sein. Es muss in dünnen Schichtstärken herstellbar und

verarbeitbar sein und dabei eine gute Adhäsionsfähigkeit an das Elastomer aufweisen. Zudem sollte es einen geringen elektrischen Widerstand aufweisen und kostengünstig sein. Die folgend aufgelisteten Materialien sind bereits in DE eingesetzt worden [38]:

- *Carbon Black* (Kohlenstoffpulver),
- *Carbon grease* (Kohlenstoffpulver gelöst in Silikonöl),
- *Carbon Nanotubes* (auch gelöst in Silikonöl),
- Salzwasser,
- Leitfähige Polymere,
- Dünne Metallschichten (Ag, Au, Pt, Al, Pd, ...).

Um hohe Dehnungen bei geringer Aktivierungsspannung zu erzielen, sollte das Elastomer eines DE in dünnen Filmen konstanter Schichtdicke herstellbar sein. Eine geringe Steifigkeit, Inkompressibilität, sowie eine hohe relative Permittivität und hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit ermöglichen hohe Dehnungen bei der Aktivierung. Es sollte zudem frei von Verunreinigungen und kostengünstig sein. Der Einsatz folgender Elastomere für DE ist dokumentiert [32, 36, 38, 39]:

- Co-Polymere auf Acrylbasis (z.B. VHB 4910 von 3M),
- Silikonelastomere (z.B. Elastosil RT625 von Wacker),
- Triblock Co-Polymere (physikalisch vernetzt),
- Polyurethane,
- Latex.

Die Grenzen der Aktivierung dielektrischer Elastomere sind sowohl mechanisch, elektrisch als auch elektromechanisch. Hierbei besteht jeweils ein komplexer Wirkzusammenhang zwischen Elektrode und Dielektrikum des jeweiligen DE. In der Literatur werden vier durch das Dielektrikum dominierte Versagensmodi beschrieben [40-43]:

- Elektrischer Durchschlag,
- Mechanischer Bruch,
- Elektromechanische Instabilität,
- Spannungsverlust.

Steife Dielektrika zeichnen sich durch Versagen mittels elektrischen Durchschlags bei hohen elektrischen Feldstärken aus. Weiche Dielektrika versagen zumeist infolge hoher mechanischer Dehnungen. Als dritter Mechanismus wird von Zhu et al. [41] die elektromechanische Instabilität beschrieben, bei der ein weiches Dielektrikum infolge seiner mechanischen Spannungs-Dehnungs-Charakteristik bei hohen Aktivierungsdehnungen aufweicht. Dieses Aufweichen führt zu einer drastischen Annäherung der Elektroden und damit zu einem elektrischen Durchschlag. Der Spannungsverlust tritt meist bei weichen DE in Verbindung mit hohen Aktivierungsspannungen und geringen mechanischen Vordehnungen auf. Hierbei führt ein wellenförmiges Zusammenziehen der Oberfläche lokal zu elektrischem oder mechanischem Versagen [42]. Die vier Versagensmodi bilden die Betriebsgrenzen des dielektrischen Elastomers.

Je nach Einsatzbereich eines DE sind für die Auswahl eines geeigneten Elektroden- und Elastomermaterials neben den bisher genannten, weitere Randbedingungen zu berücksichtigen.

### **2.3.3 PolyPower DE-Film**

Das in dieser Arbeit verwendete Material von der Firma Danfoss PolyPower A/S basiert auf einem mit pyrogener Kieselsäure gefüllten Silikonelastomer, Elastosil RT625, von Wacker [44]. In einer Polykondensation werden die Siloxane, bestehend aus Silizium (Si), Sauerstoff (O), Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) mit einem Vernetzer und der pyrogenen Kieselsäure vermischt. Das Vernetzen geschieht unter Abspaltung von Alkohol zu langen Molekülketten (siehe Abbildung 2.8).

Agglomerate<sup>16</sup> der pyrogenen Kieselsäure werden hierbei zwischen den Molekülketten eingeschlossen und sind über Van-der-Waals-Bindungen<sup>17</sup> mit diesen verbunden.

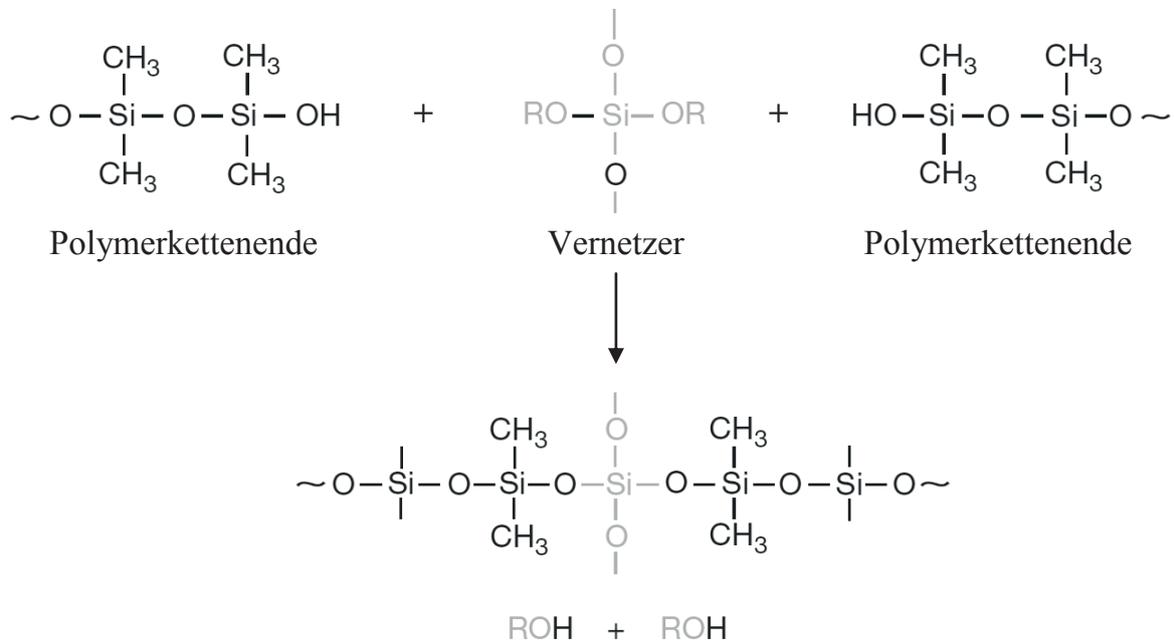


Abbildung 2.8 Strukturformel der Polykondensation bei der Vernetzung von Silikonelastomeren

Die Oberfläche des Silikonfilms weist eine gewellte Mikrostruktur auf (siehe Abbildung 2.9). Die Elektroden bestehen aus einer dünnen, aufgedampften geschlossenen Silberschicht. Die Schichtdicke des hier genutzten Materials beträgt nach Angaben des Herstellers 120  $\mu\text{m}$ , die Silberschicht ist laut Hersteller etwa 100 nm stark. Die relative Permittivität des DE-Films beträgt  $\epsilon_r = 3,1$  [45]. Die angegebene maximale Aktivierungsspannung von PolyPower bezieht sich auf einen DE-Film mit  $t_{\text{DE}80} = 80 \mu\text{m}$  und beträgt  $V_{\text{max, DE}80} = 2500 \text{ V}$  Gleichstrom (DC). Damit ergibt sich nach Gleichung (2.3) eine elektrische Feldstärke von  $E_{\text{B,DE}} = 31,25 \text{ kV/mm}$  für die Durchschlagsfestigkeit des Silikonelastomers. Der Film mit einer Dicke von  $t_{\text{DE}120} =$

<sup>16</sup> Agglomerat: ( lat.: agglomerare – zusammenballen) Anhäufung loser Bestandteile zu einem festen Verbund

<sup>17</sup> Van-der-Waals-Bindung: Nicht-kovalente Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen

120  $\mu\text{m}$  kann laut PolyPower mit einer maximalen elektrischen Spannung von  $V_{\text{max,DE120}} = 3,75 \text{ kV}$  beaufschlagt werden. Laut Hersteller ist dabei eine Aktivierungsdehnung von  $s_{\text{act}} = 0,05$  zu erwarten [45].

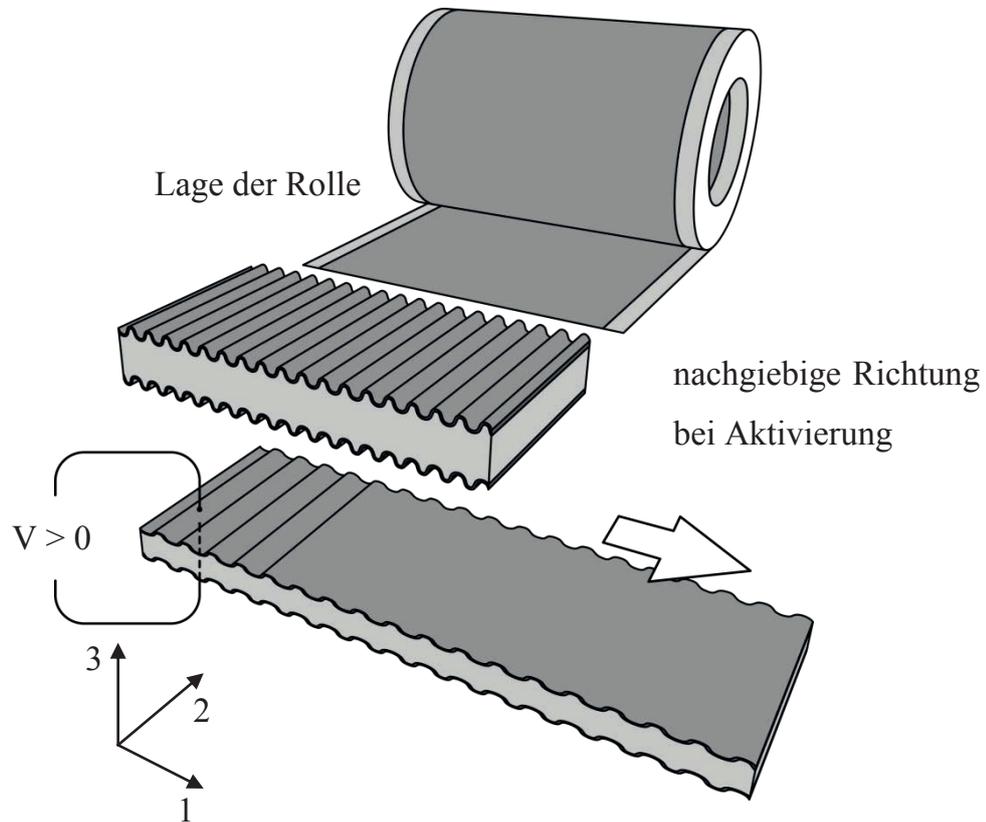


Abbildung 2.9 Schematische Darstellung des PolyPower dielektrischen Elastomerfilms

Der Film wird in Rollen geliefert. In Richtung der Rollenbreite kann der Film in Richtung 1, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, elektrisch oder mechanisch gedehnt werden.

Nachfolgend wird zur Beschreibung der Längenänderung, die Streckung  $\lambda$  eingeführt:

$$\lambda_i = s_i + 1 \quad \text{für } i = 1,2,3. \quad (2.5)$$

Die Streckung ist in Abhängigkeit der Ausgangsmaße des DE-Films (Länge  $l_0$ , Breite  $b_0$  und Dicke  $t_0$ ) mit den aktuellen Maßen  $l$ ,  $b$  und  $t$  zu beschreiben.

$$\lambda_1 = l/l_0, \quad \lambda_2 = b/b_0, \quad \lambda_3 = t/t_0. \quad (2.6)$$

Unter Streckung des DE-Films, wird die Amplitude der Mikrostruktur verringert, die Wellenlänge steigt an und die Filmdicke sinkt. Laut Hersteller kann die Streckung in Richtung 1 bis zu  $\lambda_{1,\max} = 2$  ( $s_{1,\max} = 100\%$ ) betragen, ohne, dass die geschlossene Silberschicht beschädigt wird. Bedingt durch die hohe geometrische Steifigkeit der Silberschicht (vgl. Abbildung 2.9) quer zur Wellung, erfährt der Film bei elektrischer Aktivierung nahezu keine Dehnung in Richtung 2,  $s_2 = 0$  [45]. Die Beschreibung der Inkompressibilität des Silikonelastomers erfolgt nach [46]:

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1, \quad (2.7)$$

mit  $s_2 = 0$  folgt:

$$\lambda_2 = 1, \quad (2.8)$$

Für die Beschreibung von  $\lambda_3$  in Abhängigkeit von  $\lambda_1$  gilt mit (2.7) und (2.8):

$$\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1}. \quad (2.9)$$

Die Abhängigkeit der Streckung  $\lambda_3$  über  $\lambda_1$  ist in Abbildung 2.10 dargestellt und beschreibt die Abnahme der Dicke  $t$  des DE infolge einer mechanisch oder elektrisch induzierten Streckung in Richtung 1.

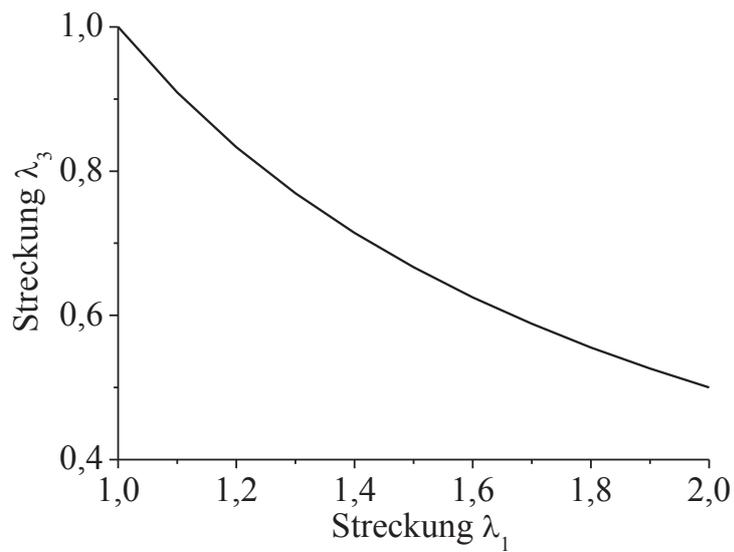


Abbildung 2.10 Theoretische Abhängigkeit der Streckung  $\lambda_3$  von  $\lambda_1$  des DE-Films

Die Herstellung des DE-Films findet nach Kiil und Benslimane [47] in mehreren hintereinander geschalteten Prozessen statt. Im ersten Schritt wird das flüssige Elastosil RT625 über einen Walzenbeschichtungsprozess auf eine Trägerfolie mit welliger Oberfläche aufgebracht und daraufhin unter Temperatur oder UV-Licht vernetzt. Der Silikonfilm wird auf dem Trägerfilm aufgewickelt (siehe Abbildung 2.11).

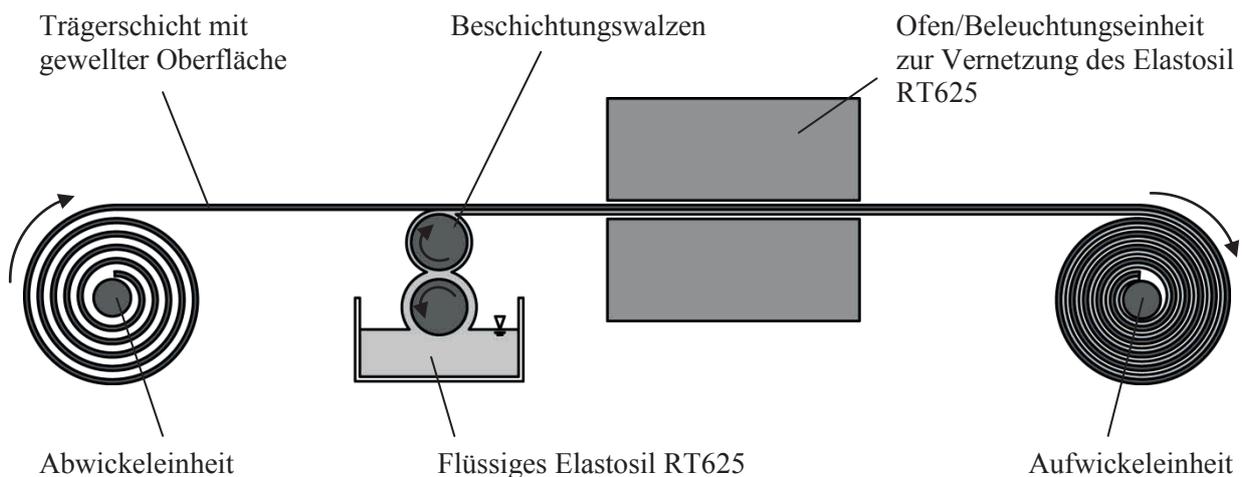


Abbildung 2.11 Schematische Darstellung des ersten Prozessschrittes bei der Herstellung des dielektrischen Elastomerfilms der Danfoss PolyPower A/S [47]

Im zweiten Prozessschritt wird das Silikon über einen speziellen Delaminationsvorgang von der gewellten Trägerschicht entfernt und mit der nicht gewellten Rückseite auf eine weitere beschichtete Trägerfolie (siehe Abbildung 2.12) gerollt.

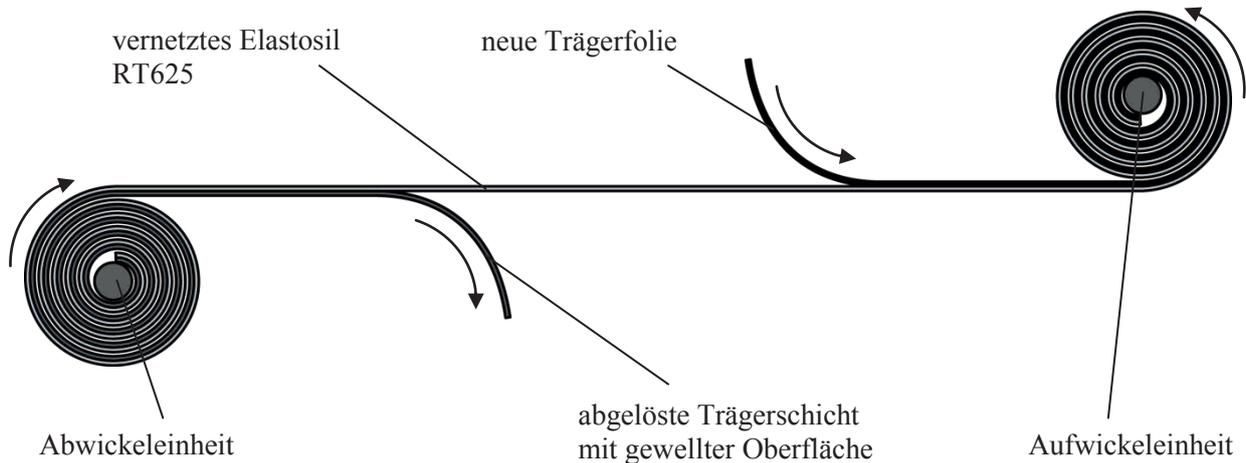


Abbildung 2.12 Schematische Darstellung der Delamination und des Aufbringens des Silikonfilms auf einen weiteren Trägerfilm bei der Herstellung des dielektrischen Elastomerfilms der Danfoss PolyPower A/S [47]

Während eines dritten Schritts wird eine leitfähige Silberschicht über ein zweistufiges PVD-Verfahren (*physical vapour deposition*) in einer Vakuumatmosphäre auf die gewellte Seite des Films aufgebracht. Hierzu wird die Oberfläche vor dem Aufdampfen der Metallschicht vorbehandelt, um die Haftung von Metall und Silikon zu verbessern. Der Silikonfilm verbleibt hierbei, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, auf der Trägerfolie.

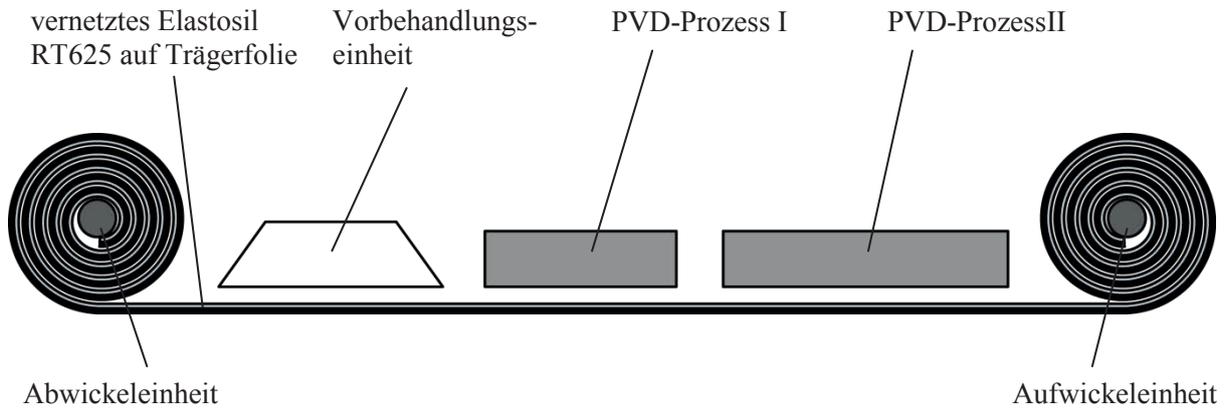


Abbildung 2.13 Schematische Darstellung des Silber-Beschichtungsprozesses bei der Herstellung des dielektrischen Elastomerfilms der Danfoss PolyPower A/S [47]

Der letzte Schritt besteht darin, zwei der so produzierten und beschichteten Filme mit der metallfreien glatten Seite des Filmes übereinander zu legen und miteinander zu verbinden. Infolge dessen entsteht ein DE-Film mit gewellter Elektrodenfläche (siehe Abbildung 2.9).

### 2.3.4 Dielektrische Elastomeraktoren

Aktoren sind Ausgabeelemente für Kräfte, Momente und Bewegungen, sowie derer Kombinationen in Form von mechanischer Arbeit. Sie werden eingesetzt, um Energie oder Material in Regelprozessen zu transportieren [48].

Ein Aktor besteht immer aus einem Energiesteller (z.B. Schalter, Relais etc.) und einem Energiewandler. Dem Energiesteller wird die Hilfsenergie in Form chemischer, elektrischer, thermischer oder Strömungsenergie zugeführt. Der Energiewandler ändert die zugeführte Hilfsenergie und gibt eine mechanische Energie in Form von Bewegung und/oder Kraft aus [48].

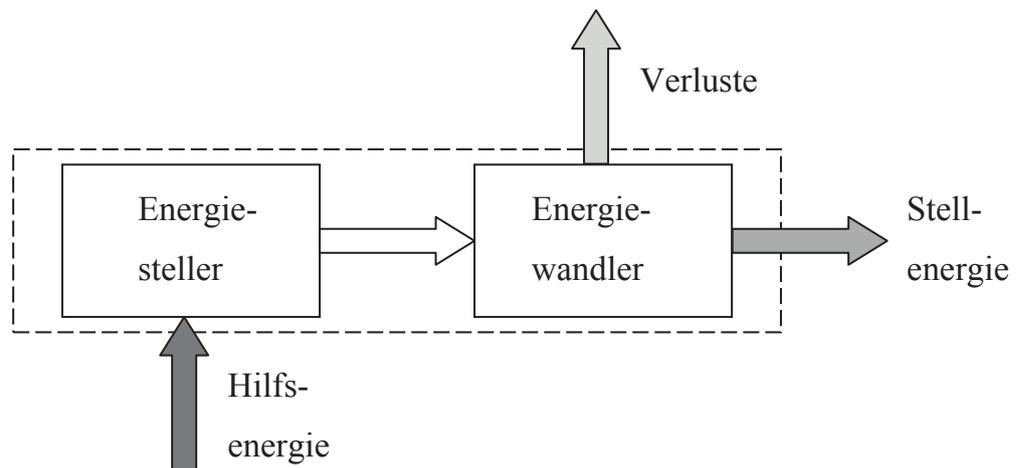


Abbildung 2.14 Strukturbild eines Aktors nach [48]

Bei Aktoren, die auf dielektrischen Elastomeren als Energiewandlern basieren, wird gemeinhin zwischen der Art der aktorischen Nutzungsrichtung des DE unterschieden. Wird die Kontraktion des DE in Dickenrichtung (Richtung des elektrischen Feldes) in Folge elektrischer Aktivierung genutzt, so bezeichnet man diesen als Längseffektaktor. Bei Quereffektaktoren wird die laterale Flächendehnung des DE für die Aktorik genutzt. Obwohl stets beide Effekte in den dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) auftreten, wird meist nur einer aktorisch genutzt. Beide Effekte können mit oder ohne

mechanischer Vordehnung betrieben werden, was nach Lochmatter [32] vier aktorisch nutzbare Modi ermöglicht.

Eine Reihe von DEA ist Gegenstand aktueller Forschung. DE-Filme werden auf Hilfsstrukturen montiert, gerollt oder gefaltet und nutzen stets einen der vier aktorischen Modi [42, 47, 49-64].

Da für DEA elektrische Hochspannung (HV) zur Verfügung gestellt werden müssen, bestehen die Energiesteller aus elektrischen Gleichspannungs-HV-Netzteilen, Hochspannungsschaltern, -relais oder -verstärkern. Der Vorteil in der Verwendung von HV-Verstärkern besteht darin, dass die bei der Entladung aus den DE abgeführte elektrische Energie von diesen absorbiert und dissipiert werden kann. Kontrollierte Lade- und Entladevorgänge sind somit möglich. Beim Betrieb eines DE an einem HV-Netzteil müssen für eine schnelle Entladung eines DE hohe elektrische Widerstände parallel geschaltet oder über HV-Schalter hinzu geschaltet werden können. Der DE würde im Falle eines Abschaltens der HV-Quelle ohne Entladewiderstände auf dem hohen elektrischen Potenzial verweilen und sich lediglich langsam durch Ladungsverluste entladen. An die Entladung gekoppelt ist auch die mechanische Rückformung des DE. Ein kontrolliertes aktorisches Verhalten ist ohne Entladung also nicht steuerbar.

### **3 Methoden**

Diese Arbeit bedient sich Methoden der integrierten Produktentwicklung (IPE) aus Ingenieurwissenschaften [65] und dem Industrial-Design [66]. Unter IPE wird nach Ehrlenspiel ein zielorientiertes und ganzheitliches methodisches Vorgehen verstanden. Dies wird insbesondere durch eine enge Zusammenarbeit der betroffenen fachlichen Disziplinen erreicht [67].

Es werden daher Methoden aus anderen Disziplinen, wie beispielsweise dem Produktdesign, angewendet. Die Entwicklung der in Kapitel 4 beschriebenen aktiven Polsterfläche wurde in Kooperation mit einem Designer der Hochschule für Bildende Künste Hamburg (HFBK) durchgeführt. Methoden der Designer und Ingenieure sind in dieser Arbeit demnach gleichermaßen Bestandteil des Entwicklungsprozesses.

Zur Charakterisierung des dielektrischen Elastomers werden Methoden aus den Materialwissenschaften eingesetzt. Es werden mechanische, elektromechanische, chemische und elektrische Prüfungen durchgeführt, um die Eigenschaften des DE-Films zu ermitteln.

### 3.1 Methoden der Produktentwicklung

Die Entwicklung eines Produkts durchläuft viele Stadien und beinhaltet häufig iterative Schritte. Eine Richtlinie des ingenieurwissenschaftlichen Verständnisses ist der Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [68]. Dieser unterteilt sich in sieben Arbeitsschritte, dem Festhalten der Ergebnisse jeden Schrittes und dem iterativen Vor- und Rückspringen zwischen diesen. Nach [65] kann dieser Prozess, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, in die vier übergeordneten Phasen „Planen (I), Konzipieren (II), Entwerfen (III) und Ausarbeiten (IV)“ unterteilt werden.

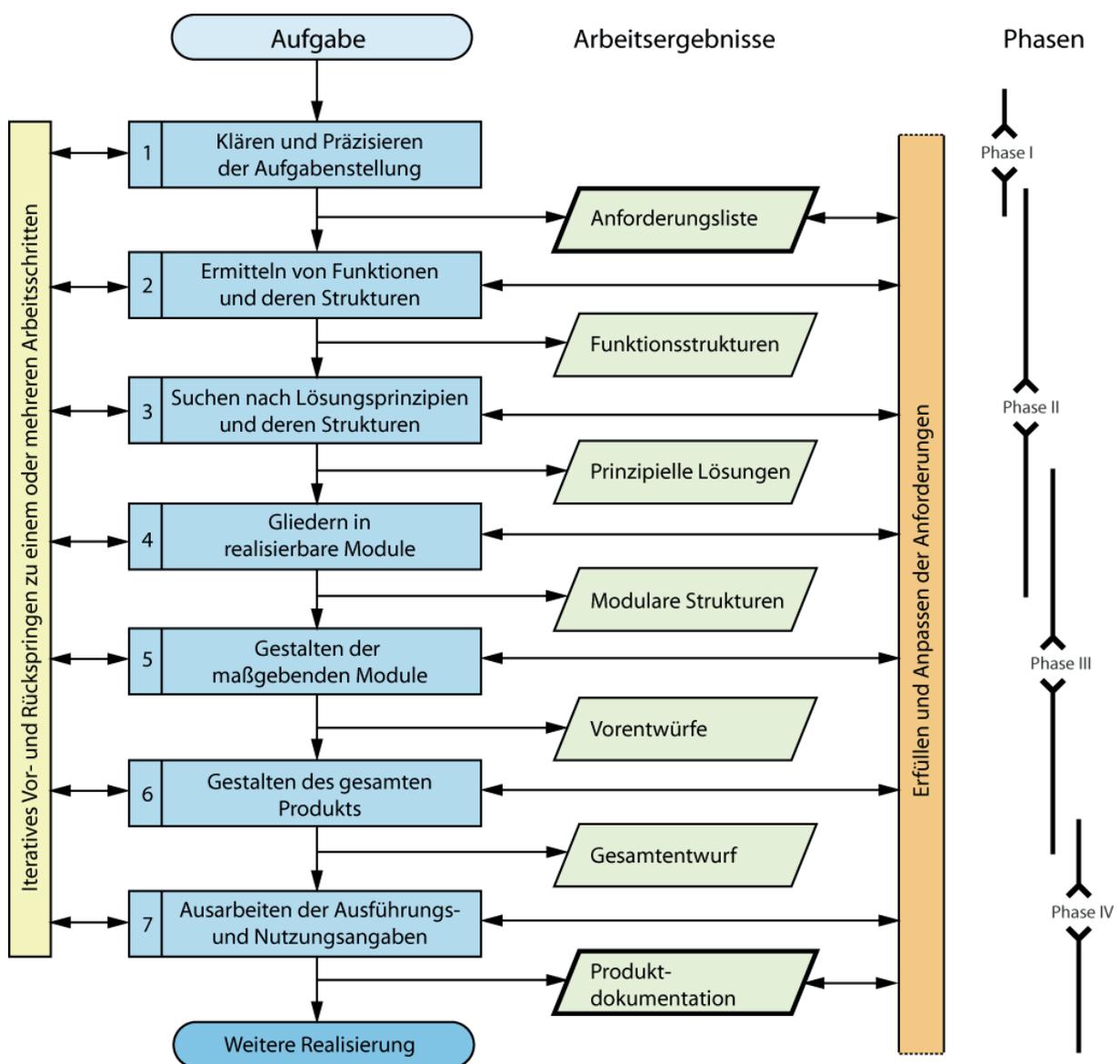


Abbildung 3.1 Methodisches Vorgehen der Produktentwicklung nach VDI 2221 [65, 68]

Dieser stringente Ansatz zur Entwicklung eines Produkts ist mit dem Vorgehen von Designern meist schwer zu vergleichen. Der Designer arbeitet häufig emotional geleitet und lateral an einem Produkt. Bei einer integrierten Produktentwicklung, innerhalb derer häufig Personen unterschiedlicher Disziplinen miteinander arbeiten, kann die Verschiedenheit der Methoden zu Hemmnissen und Schwierigkeiten führen. Designer und Ingenieure arbeiten dann parallel, aber nicht synchron [69].

Zur Minderung dieser Hemmnisse kann eine übergeordnete Produktdefinition, die auch designrelevante Anforderungen festschreibt, hilfreich sein. Die Richtlinie VDI 2424 [66] stellt einen IPE-Prozess unter die steuernde und kontrollierende Einheit (siehe Abbildung 3.2) der Unternehmensleitung und der Produktplanung. Hierbei arbeiten beispielsweise Design und technische Entwicklung parallel und interagieren während der IPE.

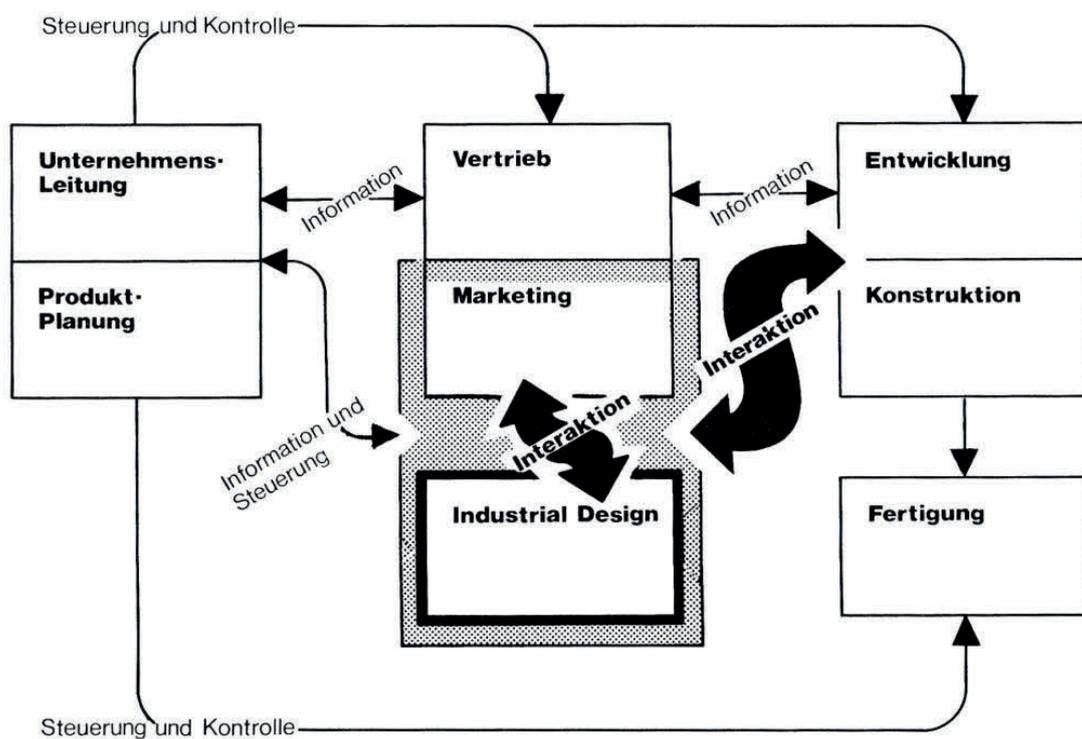


Abbildung 3.2 Integrierte Produktentwicklung nach VDI 2424 [66]

In der VDI-Richtlinie sind drei Merkmale eines Produktes definiert:

- Technische Merkmale,
- Ökonomische Merkmale,
- Wechselbeziehungen des Produkts mit dem Menschen.

Die beiden ersten Merkmale, technische und ökonomische, werden überwiegend von den Ingenieuren betreut; die auf den Menschen bezogenen Anforderungen durch den Designer. Dies macht die Entwicklung eines Produkts zu einem interdisziplinären Prozess, in dem Ingenieur und Designer gleichwertig an einem definierten Ziel arbeiten.

Dennoch bestehen weiterhin zwischenmenschliche Faktoren, die eine Zusammenarbeit erschweren können. Vorurteile, falsche Eindrücke, fehlendes Wissen oder unterschiedliche Interpretationen führen oft zu einer Akzeptanzverweigerung zwischen beiden Professionen [69].

Ein weiterer Konflikt besteht in der fehlenden Transparenz der Methoden zwischen beiden Disziplinen. Designer und Entwickler beschäftigen sich zwar mit dem gleichen Produkt, sie befassen sich jedoch zu den einzelnen Entwicklungszeitpunkten mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden, technischen Details, Anforderungen und Bewertungsmaßstäben [70].

In dieser Arbeit fand eine gemeinsame Definition der Produktmerkmale zwischen Designer und Ingenieur statt. Diese Definition ist nicht statisch, sondern wandelt sich im Laufe des Entwicklungsprozesses. Von beiden Seiten werden die drei Produktmerkmale im ständigen Diskurs verfeinert und im Detail ausgearbeitet. Abbildung 3.3 zeigt den steigenden Detailierungsgrad dieser Merkmale im Laufe der IPE. Zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung steigt der Informationsgehalt innerhalb des Produktvorschlags an.

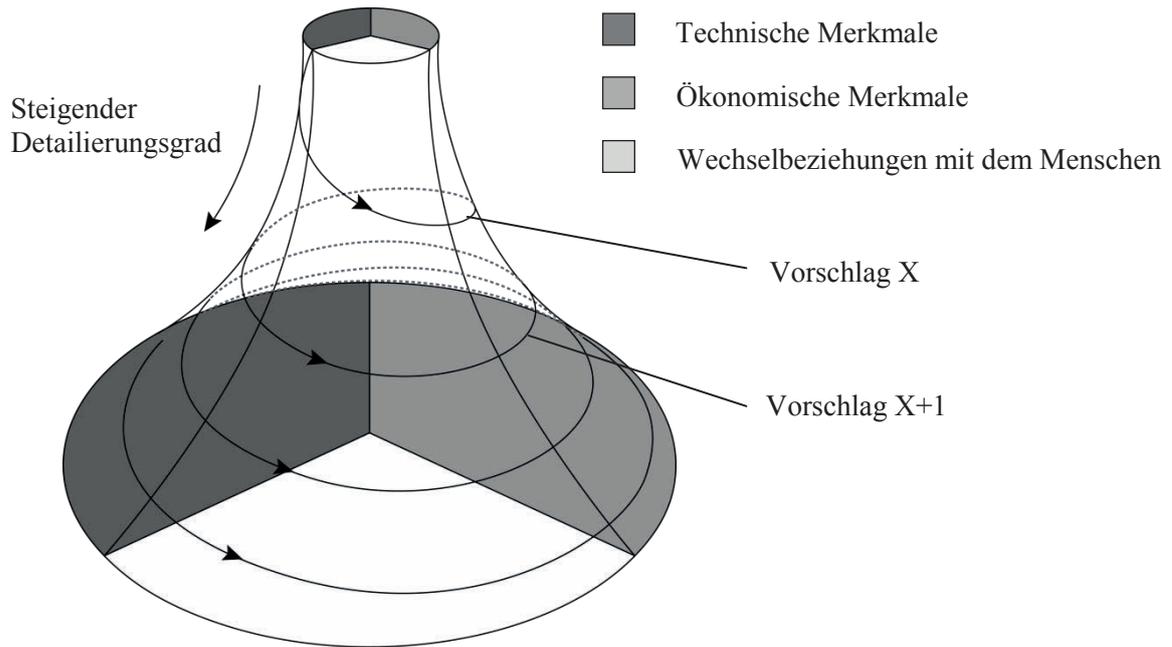


Abbildung 3.3 Spiralmodell des steigenden Detailierungsgrads der Produktmerkmale bei der integrierten Produktentwicklung nach [71]

Um Produktmerkmale zu definieren, sowie Ideen und Lösungen zu generieren, wurden im Laufe des IPE-Prozesses in Abschnitt 4 stark diskursiv und iterativ gearbeitet. Zur Findung von Lösungsprinzipien wird eine Vielzahl von Kreativitätstechniken angewendet.

## 3.2 Experimentelle Methoden zur Charakterisierung des dielektrischen Elastomerfilms

Für den Einsatz der DE-Filme in DEA werden mechanische und elektrische Versuche durchgeführt. Darüber hinaus werden die Oberflächenstruktur, die Geometrie und die chemische Zusammensetzung des DE untersucht. Zur Herstellung von DEA müssen die DE-Filme auf die gewünschten Dimensionen konfektioniert und gegebenenfalls von den Elektroden befreit werden.

Folgende Methoden werden hierfür eingesetzt:

- Manuelle Konfektionierung,
- Zugversuche (uniaxial, zyklisch und gestuft),
- Kriech- und Relaxationsversuche,
- Elektromechanische Versuche,
- Rasterelektronenmikroskopie (REM),
- Thermogravimetrische Analyse (TGA),
- Dynamische Differenzkalometrie (DSC),
- Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (EDXRF).

Folgende Testmethoden werden für die Charakterisierung des entstandenen Blattfederaktors eingesetzt:

- Druckversuch Blattfeder,
- Elektromechanisches Verhalten des Aktors mittels
  - Langzeitversuch,
  - Temperatureinfluss,
  - Kriechen unter konstanter Aktivierung.

### 3.2.1 Konfektionierung dielektrischer Elastomerfilme

Die DE-Filme der Firma PolyPower werden wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, in Rollen geliefert. In Richtung der Rollenbreite dehnt sich das Material bei angelegter Hochspannung (vgl. Abbildung 2.9). Die Durchschlagsfestigkeit des DE-Films beträgt nach Angaben des Herstellers etwa  $E_{B,DE} = 31,25 \text{ kV/mm}$ . Zum Vergleich liegt die Durchschlagsfestigkeit von Luft bei maximal  $E_{B,Luft} = 3,3 \text{ kV/mm}$ . An den Kanten des DE-Films kann es daher bei elektrischen Spannungen von  $V > 400 \text{ V}$  zu einem Luftdurchschlag kommen, da dort die Elektroden nicht mehr vollständig durch den Silikonfilm getrennt sind. Zur Vermeidung dieser Spannungsdurchschläge werden die Kanten des DE-Films von der Silberschicht befreit. Nur so ist sicherzustellen, dass sich an jeder Stelle zwischen den Elektroden auch Silikonfilm befindet. Bei einem elektrodenfreien Rand von 1 mm an Ober- und Unterseite werden elektrische Spannungen von  $V > 6 \text{ kV}$  benötigt, um einen Durchschlag durch die Luft herbeizuführen. Dies liegt bereits weit oberhalb der maximalen Aktivierungsspannung der hier durchgeführten Aktivierungsversuche.

Außerdem werden Bereiche einseitig von der Elektrode befreit, an denen keine Verformung durch elektrische Aktivierung erwünscht ist. Also die Bereiche in denen der DE-Film eingespannt oder kontaktiert wird.

Zur Entfernung der Elektroden wird eine 10 %-ige Natriumhypochloritlösung ( $\text{NaClO}$ ) verwendet. Diese löst das Silber und lässt den Silikonfilm zurück. Um die gewünschten Bereiche des DE-Films mit  $\text{NaClO}$  zu benetzen, wird der DE-Film auf eine Glasplatte gelegt und die Lösung manuell mit einem Pinsel aufgetragen. Die Reinigung des DE-Films von Rückständen der Lösung erfolgt mit Wasser. Nach Trocknung wird der DE-Film auf die benötigten Maße zugeschnitten.

### 3.2.2 Mechanische Versuche

Für die mechanische Charakterisierung der DE-Filme werden zyklische und gestufte Zugversuche durchgeführt. Insbesondere die gestuften Zugversuche dienen der Erlangung von neuem Wissen über den Einfluss der Silberschicht auf das mechanische Verhalten des DE-Films. Um darüber hinaus Aussagen über zeitabhängige Effekte des Materials zu tätigen, werden Kriechversuche durchgeführt.

#### Uniaxialer Zugversuch

Das durch eine Zuglast induzierte mechanische Spannungs-Dehnungs-Verhalten der DE-Filme wird nach der DIN EN ISO 527-3 [72] ermittelt. Die DE-Filme werden in Richtung 1 (vgl. Abbildung 2.9) geprüft. Die Proben werden hierzu in einer Universalprüfmaschine zwicki-Line Z2.5 der Zwick GmbH eingespannt und belastet. Die Dehnung wird hierbei mittels optischer Wegerfassung durch eine Kamera berührungslos ermittelt. Die verwendete Probengeometrie ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

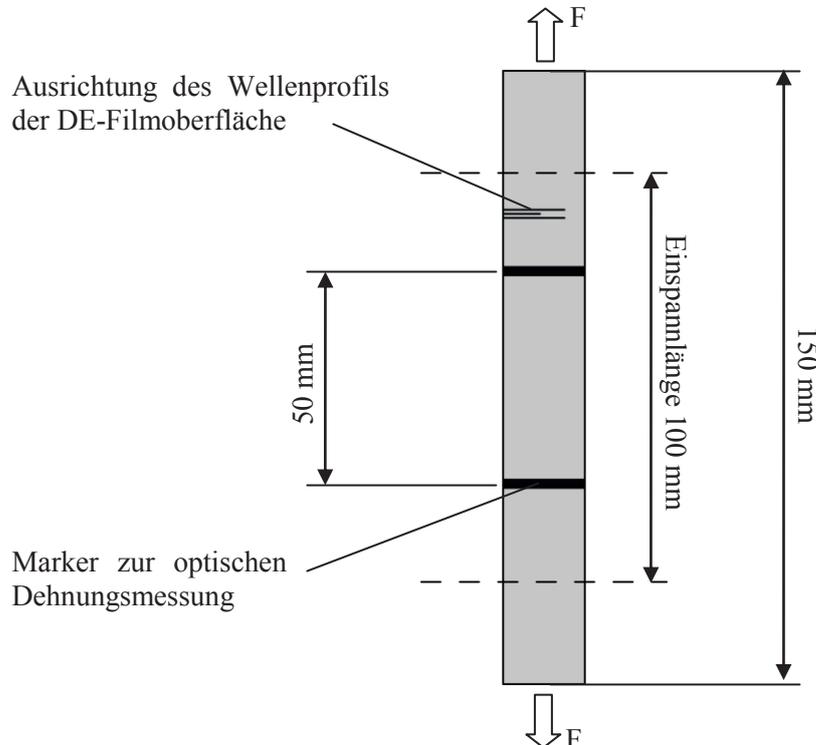


Abbildung 3.4 Probengeometrie der dielektrischen Elastomerfilme im Zugversuch nach DIN EN ISO 527-3 [72]

Die Versuche werden weggesteuert gefahren, wobei jede Probe dreimal auf 100 % gedehnt und danach wieder auf 5 % entlastet wird (siehe Abbildung 3.5). Der letzte Zyklus wird zur Ermittlung des mechanischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens herangezogen. So kann Aufschluss über mögliche Veränderungen der Filme durch mechanische Belastung gegeben werden.

Mit dem gleichen Versuchsaufbau und gleicher Probengeometrie werden auch die gestuften Zugversuche durchgeführt. Hierbei wird die Dehnung schrittweise um 20 % bis zu einer maximalen Dehnung von 100 % erhöht (vgl. Abbildung 3.5).

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt bei beiden Zugversuchen 50 mm/min, um dem viskosen Anteil des Materialverhaltens ausreichend Zeit für die Relaxation einzuräumen. Zum Vergleich zeigt Abbildung 3.5 die Dehnung über die Zeit von beiden Zugprüfungen.

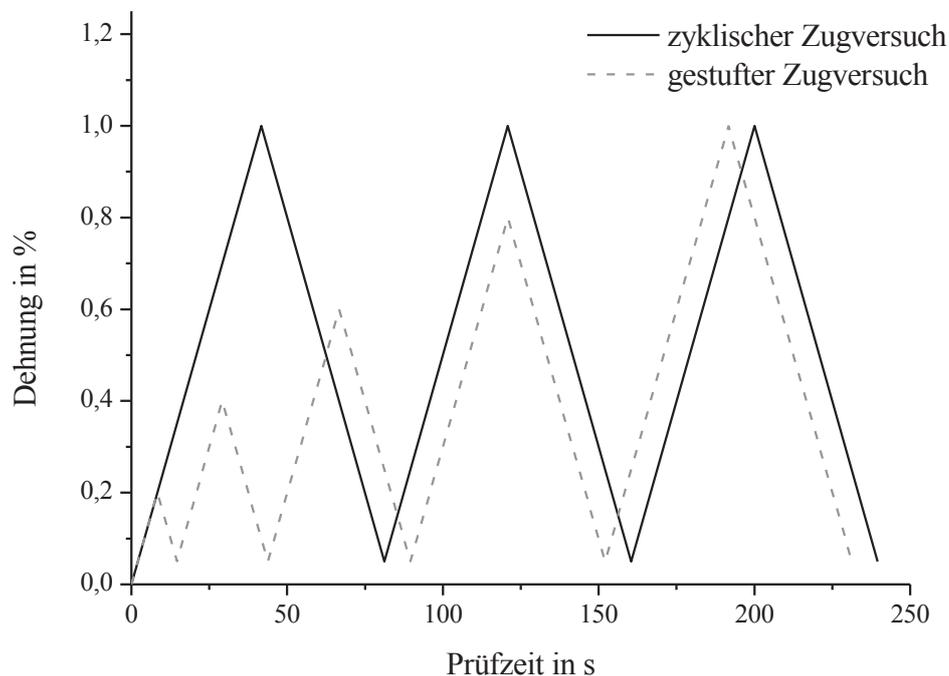


Abbildung 3.5 Prüfablauf der zyklischen und der gestuften Zugversuche

## **Kriech- und Relaxationsversuche**

Die Messungen zum zeitabhängigen mechanischen Verhalten werden mit der gleichen Probengeometrie und Einspannlänge wie in Abbildung 3.4 durchgeführt. Sowohl bei den Kriechversuchen, als auch bei den Relaxationsversuchen wird der DE-Film mit der maximalen Traversengeschwindigkeit der Universalprüfmaschine ( $v_{\text{Prüf,max}} = 800 \text{ mm/min}$ ) auf die gewünschte Anfangsdehnung gebracht. Bei den Relaxationsversuchen wird die Position der Traversen und somit die Dehnung konstant gehalten und die Veränderung der Kraft während der Haltezeit detektiert. In den Kriechversuchen wird, nach dem Anfahren der Anfangsdehnung, kraftgeregelt die Last konstant gehalten und die Veränderung der Dehnung dokumentiert. Zur Auswertung der Messdaten aus den Kriechversuchen wird die Streckung  $\lambda_1$  über der Zeit in s aufgetragen. Bei den Relaxationsversuchen wird die nominelle Spannung über die Zeit dargestellt.

### 3.2.3 Elektromechanische Versuche

Für die Beschreibung der mechanischen Dehnung bei elektrischer Aktivierung des DE-Films findet die Bestimmung des elektromechanischen Aktivierungs-Dehnungsverhaltens in einem nach DIN EN 50191 [73] ausgelegten Hochspannungsprüfstand statt. Die technischen Zeichnungen, sowie die Schaltpläne befinden sich im Anhang B.

Gemessen wird die Dehnung des DE-Films über die elektrische Spannung für verschiedene Vordehnungen  $s_{\text{pre}}$  des DE-Films.

Mittels der Programmierumgebung „NI LabVIEW“ von National Instruments kann vom Computer über eine Digital/Analog-Wandlerkarte ein gewünschtes Signal zum oder vom Prüfstand geschickt, oder interpretiert werden. Dies ermöglicht eine gezielte Veränderung der elektrischen Spannung und die Überwachung des Betriebszustands des Prüfstands. Die Messung der Dehnung des DE geschieht über eine Messkamera „Basler scout scA1300-32gc“, die außerhalb des Prüfstandes montiert ist und durch die transparenten Seitenwände des Prüfstandes hindurch filmt. In „LabVIEW“ werden die Stell- und Messwerte synchronisiert und die Ergebnisse zur Versuchsauswertung in eine Textdatei geschrieben.

Zur Beschreibung des elektroaktiven Verhaltens des DE-Films, werden Prüffilme nach der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Methode konfektioniert. Zur Kontaktierung werden im oberen Bereich des Films nur einseitig Elektroden hinterlassen, um kein elektroaktives Verhalten im Bereich der Kontaktierung hervorzurufen. Abbildung 3.6 zeigt die Geometrie der konfektionierten DE-Filme. Die Filme werden an der Kontaktierungsseite in ein Prüfportal (vgl. Abbildung 3.7) geklemmt und an der Unterseite im elektrodenfreien Bereich mit einem Kunststoffadapter beklebt. Auf diesem befindet sich eine schwarze Linie, die dem optischen Wegmesssystem als Marker dient, der Querbalken dient als stationäre Referenz.

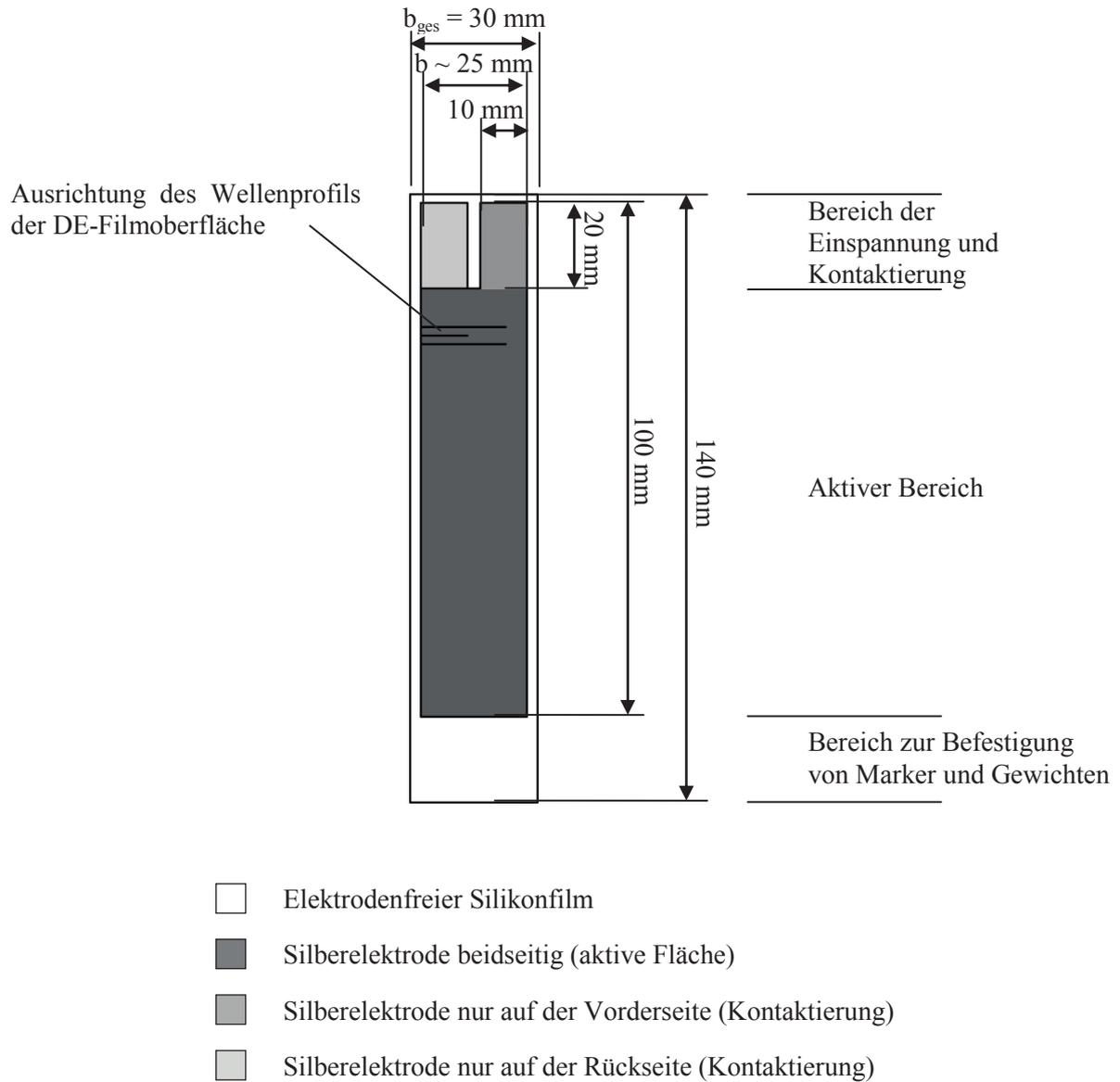


Abbildung 3.6 Geometrie der konfektionierten DE-Filme für elektromechanische Versuche

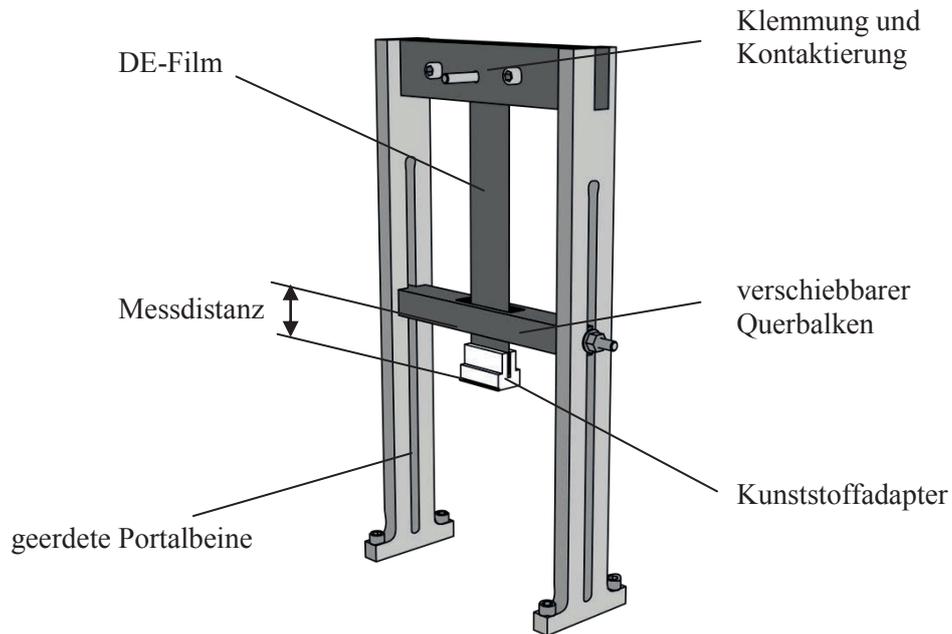


Abbildung 3.7 Prüfportal zur Bestimmung der elektromechanischen Eigenschaften des DE-Films

Ein in LabVIEW erstelltes Messprogramm erhöht in neun Stufen die Aktivierungsspannung von 0 bis 3,75 kV. Innerhalb jeder Stufe wird die elektrische Spannung für 15 Sekunden konstant gehalten und kurz vor der nächsten Spannungserhöhung das Messbild der Kamera ausgewertet. Dies dient dazu, die Fehler der von Zeit und Spannungszustand abhängigen Kriechvorgänge der DE-Filme zu minimieren. Die dem Messbild entnommene Dehnung des DE-Films wird daraufhin mit dem Wert der elektrischen Spannung in eine Textdatei geschrieben. Es ergeben sich somit zehn Messpunkte für eine Aktivierungs-Dehnungs-Messung.

Die Messungen finden unter verschiedenen Vordehnungen des DE-Films statt. Hierzu werden an dem Kunststoffadapter Gewichte befestigt. Für jedes Gewicht wird daraufhin eine Messung von 0 bis 3,75 kV durchgeführt. Um Einflüsse aus dem Materialkriechen des DE zu minimieren, wird erst das schwerste Gewicht (siehe Tabelle 3.1) an den Film gehängt. Nach einer Wartezeit von 300 Sekunden wird der Aktivierungs-Dehnungs-Versuch gestartet. Die letzte Messung findet nur mit dem

Kunststoffadapter statt. In Tabelle 3.1 sind die Gewichte und die daraus resultierenden Vordehnungen  $s_{pre}$  des DE aufgeführt. Die Umrechnung in die Vorstreckungen  $\lambda_{pre}$  kann mit Gleichung (2.5) erfolgen.

Tabelle 3.1 Angehängte Gewichte und resultierende Vordehnung der DE-Filme in den Aktivierungs-Dehnungs-Messungen des DE-Films

<b>Aktivierungsschritt</b>	<b>Masse in g</b>	<b>Vordehnung <math>s_{pre}</math></b>
1	88,349	0,73
2	78,347	0,63
3	68,477	0,52
4	58,475	0,40
5	48,451	0,29
6	38,517	0,21
7	28,515	0,14
8	18,645	0,09
9	8,643	0,04

Die inaktiven Randbereiche der Probekörper leisten, ähnlich wie der aktive Bereich, Widerstand gegen die mechanische Verformung durch die Gewichte. Bei elektrischer Aktivierung wird hier jedoch kein elektrostatischer Druck (2.2) erzeugt. Zudem unterliegen die manuell entfernten Randbereiche der Probekörper prozessbedingten Schwankungen. Um den Einfluss der inaktiven Randbereiche rechnerisch weitgehend zu eliminieren, werden die Bereiche als aktiviert angenommen und die gemessenen Aktivierungsdehnungen um den Faktor  $b_{ges}/b$  nach oben skaliert. Dabei beschreibt  $b_{ges}$  die vollständige Breite des DE-Films inklusive inaktiver Ränder und  $b$  nur die Breite des aktiven Bereichs (vgl. Abbildung 3.6).

### 3.2.4 Elektrische Versuche

Bei der Aktivierung des DE-Films kann die angelegte Gleichspannung zum Versagen des Films durch elektrischen Durchschlag führen. Die Feldstärke, oberhalb der es zu einem Spannungsdurchschlag kommt, wird Durchschlagsfestigkeit  $E_B$  genannt. Sie berechnet sich aus der Spannung beim Durchschlag  $V_B$  und dem Abstand der Elektroden des DE-Films  $t$ .

$$E_B = \frac{V_B}{t} \quad (3.1)$$

Es ist zu beachten, dass die in der nachfolgend beschriebenen Prüfung ermittelte Durchschlagsfestigkeit  $E_B$  nur für einen nicht vorgedehnten, aktivierten DE-Film gilt. Während der Durchschlagversuche ist mit einer Reduktion der Filmdicke  $t$  aufgrund elektrischer Aktivierung zu rechnen. Dieser Fehler ist rechnerisch zu eliminieren. Wird nach [45] von einer maximalen Aktivierungsdehnung von  $s_{act} = 0,05$ , bzw.  $\lambda_{act} = 1,05$  ausgegangen, so lässt sich unter Anwendung von Gleichungen (2.6) und (2.9) eine Ersatzfeldstärke  $E_{B,0}$ , bzw. Ersatzspannung  $V_{B,0}$  ermitteln, welche sich auf einen Film mit konstanter Dicke  $t_0$  ohne Aktivierungsverhalten bezieht:

$$E_{B,0} = \lambda_{act} E_B = 1,05 E_B, \text{ und} \quad (3.2)$$

$$V_{B,0} = \lambda_{act} V_B = 1,05 V_B. \quad (3.3)$$

Von Gleichungen (3.2) und (3.3) ausgehend, kann abhängig von einer mechanischen Vorstreckung  $\lambda_{pre}$  die maximale Durchschlagsfestigkeit  $E_{B,B}$  und Spannung  $V_{B,B}$  für den Betrieb bestimmt werden. Mit den Gleichungen (2.6), (2.9), (3.1) und (3.6) ergibt sich für  $\lambda_1 = \lambda_{pre}$ :

$$E_{B,B} = \frac{1,05 \cdot E_B}{\lambda_{pre}}, \text{ und} \quad (3.4)$$

$$V_{B,B} = \frac{1,05 \cdot V_B}{\lambda_{pre}}. \quad (3.5)$$

Zur Ermittlung der Durchschlagsfestigkeit  $E_B$  wird ein DE-Film nach dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Verfahren partiell von den Elektroden befreit (siehe Abbildung 3.8). Der elektrodenfreie Bereich dient dazu Luftdurchschläge seitlich der Elektroden zu verhindern. Die DE-Filme werden in Anlehnung an DIN EN 60243-2 [74] zwischen zwei halbsphärische Elektroden gelegt (vgl. Abbildung 3.9). Um seitliche Luftdurchschläge zu vermeiden wird die Messung in Silikonöl durchgeführt. Zwischen den Halbsphären wird eine elektrische Gleichspannung angelegt und linear von 0 V an erhöht, bis ein Durchschlag erfolgt.

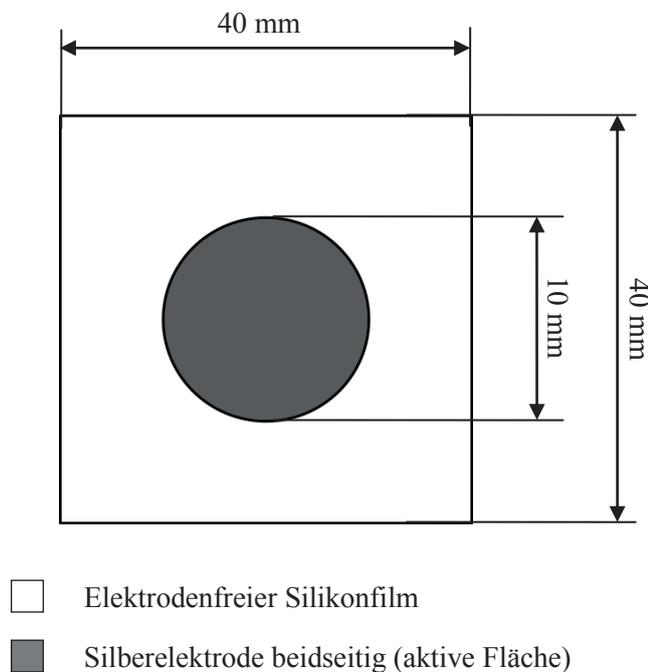


Abbildung 3.8 Probengeometrie der DE-Filme für die Ermittlung der Durchschlagsfestigkeit

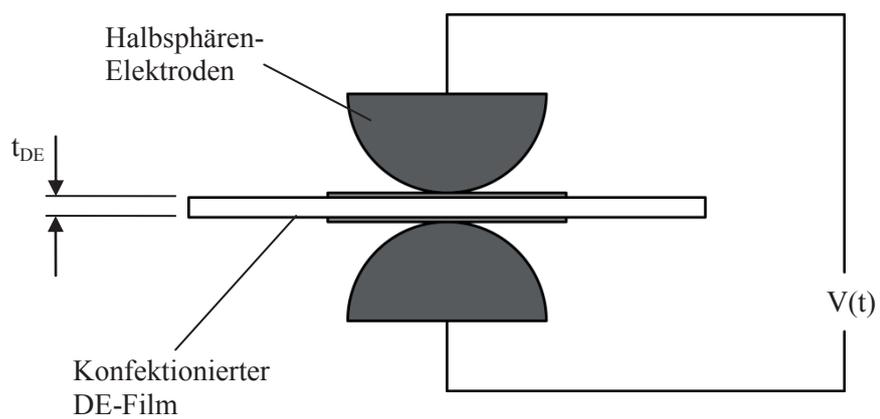


Abbildung 3.9 Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit des dielektrischen Elastomerfilms in Anlehnung an DIN EN 60243-2 [74]

### 3.3 Finite Elemente Methode

Computerbasierte Finite Elemente Methoden sind häufige Hilfsmittel beim konstruktiven Entwurf. Hierbei wird ein virtuelles Modell eines Körpers in (finite) Elemente unterteilt. Den Elementen werden Geometrie und Materialeigenschaften zugewiesen. Über Knoten sind die Elemente miteinander verbunden. Beim Aufbringen von Lasten, Verschiebungen und Randbedingungen kann über die Einzelsteifigkeit des Elements eine Aussage über dessen Verschiebungen, Verzerrungen und mechanische Spannungen getätigt werden. Durch die Verknüpfung der Elemente über die Knoten ist dies für das gesamte Modell möglich.

FEM-Programme, wie das hier verwendete Abaqus/CAE Simulia von Dassault Systèmes, berechnen Näherungslösungen über das Kräftegleichgewicht der Elemente. Bei kleinen Rotationen und Dehnungen im System wird diese durch eine linearisierte Kinematik erreicht. Für größere Verformungen und nichtlineare Materialmodelle gelten diese Annahmen nicht mehr und eine nichtlineare Modellierung ist notwendig. Zur Berechnung nichtlinearer Probleme kommen Näherungsverfahren zum Einsatz, die auf Arbeitssätzen oder Energieprinzipien beruhen, wie dem Prinzip der virtuellen Arbeit.

Das Prinzip der virtuellen Arbeit basiert auf der Annahme, dass sich ein Körper dann im Gleichgewicht befindet, wenn die innere Arbeit gleich der äußeren Arbeit ist:

$$W = W_{\text{innere}} - W_{\text{äußere}} = 0. \quad (3.6)$$

Die virtuelle Arbeit entsteht durch eine physikalische Größe, wie zum Beispiel einer Kraft, die mit einer gedachten (virtuellen) infinitesimalen Verschiebung multipliziert wird [75]. Die Berechnung des Gleichgewichts aus (3.6) erfolgt in Abaqus über eine Aufteilung des Problems in Zeitinkremente. Am Ende jedes dieser Inkremente wird das Gleichgewicht über das numerische Newton-Verfahren ermittelt [76].

Die Implementierung des FEM-Modells in Abaqus basiert auf Schritten, in denen Lasten und Verschiebungen aufgebracht werden. Die Schritte werden beim Lösen in die beschriebenen Zeitinkremente aufgeteilt. Innerhalb eines Zeitinkrements führt Abaqus Iterationen durch, um das Gleichgewicht zu berechnen. Sollte der Gleichgewichtszustand innerhalb eines Inkrements nicht erreicht werden, so verringert Abaqus das Zeitinkrement und sucht erneut nach einer Lösung. Ist das Gleichgewicht innerhalb eines Inkrements bestimmt, wird das nächste Inkrement berechnet [76].

Die geometrische Modellbildung erfolgt mittels dem 3D-Modellierprogramm Rhinoceros 4.0. Die geometrischen Daten werden daraufhin im Dateiformat IGES exportiert und in dem Programm für die FEM-Simulation Abaqus 6.9-3 eingelesen. In Abaqus erfolgt die weitere Implementierung des FEM-Modells.

Zur Modellierung von DE-Filmen gibt Wissler [77] einen Überblick der bis 2007 entstandenen analytischen und numerischen Modelle. Diese beziehen sich zumeist auf DE mit Dielektrika aus Acryl-Elastomeren. Darüber hinaus befassen sich weitere Veröffentlichungen mit der Modellierung von DE-Filmen [59, 78-83].

### 3.3.1 Modellierung des hyperelastischen Materialverhaltens

Das hyperelastische mechanische Verhalten (siehe Abbildung 4.9) des DE-Films kann mit Modellen, basierend auf einer Verzerrungsenergiedichtefunktion und den Verzerrungsinvarianten  $I_i$  in die Streckungsrichtungen  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  beschrieben werden [46]. Voraussetzung für die Anwendung der Verzerrungsenergiedichtefunktion im quasistatischen Fall ist elastisches, inkompressibles und isotropes Materialverhalten. Die drei Verzerrungsinvarianten (folgend nur noch Invarianten bezeichnet) berechnen sich aus den Streckungen nach:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (3.7)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \text{ und} \quad (3.8)$$

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3. \quad (3.9)$$

Unter der Annahme der Inkompressibilität ist  $I_3 = 1$  und die Verzerrungsenergiedichtefunktion reduziert sich auf ein Funktional abhängig von  $I_1$  und  $I_2$ . In dieser Arbeit findet das konstitutive Yeoh-Modell [84] Verwendung:

$$U_{\text{Yeoh}} = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (I_1 - 3)^i = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3. \quad (3.10)$$

Die Parameter  $C_{i0}$  dienen der Anpassung des Modells an Daten aus mechanischen Versuchen. Sie beschreiben die Änderung der Steigung in Abhängigkeit der Streckung. Um das nominelle Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu beschreiben, wird (3.10) nach der entsprechenden Streckrichtung  $\lambda_i$  abgeleitet:

$$\sigma_{ni} = \frac{U}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_i} \varrho. \quad (3.11)$$

Der hydrostatische Druck  $\varrho$  ist abhängig von den Randbedingungen. Für den im FEM-Modell verwendeten einachsigen Verzerrungszustand nach (2.8) ist:

$$\varrho = -2\lambda_i^2 \cdot C_{10} (I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3. \quad (3.12)$$

Unter Berücksichtigung der Inkompressibilität (2.7) ist die Beschreibung der nominellen mechanischen Spannung [46]:

$$\sigma_{n,uniaxial} = 2 \left( \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^3} \right) \left( C_{10} - 2 C_{20} \left( \lambda_1^2 - \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) - 3 C_{30} \left( \lambda_1^2 - \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right)^2 \right). \quad (3.13)$$

### 3.3.2 Modellierung des elektroaktiven Verhaltens

O'Brien implementiert das elektroaktive Verhalten eines Acrylelastomers, besprüht mit Elektroden aus in Silikonöl gelösten *Carbon-Black*-Partikeln direkt in die Gleichung der Energiedichtefunktion [78]. Dieses Modell ist für den DE-Film von Eils [85] angepasst worden. In dem Modell wird die elektrische Energiedichte im DE durch:

$$U_{el} = \frac{0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_r V^2}{t}, \quad (3.14)$$

dargestellt. Die Verzerrungsenergiedichte des DE-Films  $U_{YEOH}$  wird hier durch das hyperelastische Materialmodell aus Gleichung (3.10) ausgedrückt. Die Subtraktion von Gleichung (3.14) von der Verzerrungsenergiedichte  $U_{YEOH}$  führt zu der von Eils [85] implementierten Energiedichtefunktion:

$$U = U_{YEOH} - U_{el} = \sum_{i=1}^n C_{i0} (I_1 - 3)^i - \frac{K}{\lambda_3^2}, \quad \text{mit} \quad (3.15)$$

$$K = c \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V^2}{2t_0^2}, \quad (3.16)$$

wobei der Faktor  $c$  ein von der Vordehnung abhängiger Korrekturfaktor ist. Dieser passt die Aktivierungsdehnungen des Modells an das tatsächliche Verhalten des DE-Films, gemessen in Aktivierungs-Dehnungs-Versuchen, an. Die Funktion (3.15) und die schrittweise Erhöhung der Aktivierungsspannung  $V$  werden über die Fortran-basierten Subroutinen UHYPER, beziehungsweise USDFLD in Abaqus eingebunden.

Die DE-Filme werden in Abaqus durch Vierknoten-Membranelemente des Typs M3D4 in der FEM dargestellt. Die Membranelemente müssen für die Modellierung eine zusätzliche Randbedingung ( $u_3=0$ ) zur Verhinderung der Querkontraktion

erhalten. Andernfalls ist die Gültigkeit des Modells bei Modellierung der elektrischen Aktivierung nicht gegeben.

Der Zustand einer uniaxialen mechanischen Vorspannung wird in Abaqus im ersten Schritt als *Initial Parameter* in den Elementrichtungen 1 und 2 hinzugefügt. Diese initialen mechanischen Spannungen  $\sigma_{C1}$  und  $\sigma_{C2}$  müssen als Cauchy-Spannungen nach:

$$\sigma_{C1/C2} = 2\lambda_i^2 \cdot C_{10} (I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + q, \quad (3.17)$$

berechnet werden. Der hydrostatische Druck  $q$  ist hierbei abhängig von der Vordehnung und wird mit Gleichung (3.12) für  $i=3$  bestimmt [85].

## **4 Entwicklung einer aktiven Fläche unter dem Einsatz dielektrischer Elastomeraktoren**

Unter einer aktiven Sitzfläche wird in dieser Arbeit eine dünne flächige Struktur verstanden, die sich unter dem Einsatz von elektrischer Hilfsenergie verformen kann. Hierbei soll die Fläche dazu in der Lage sein, den Menschen im Fahrbetrieb des Automobils zu stützen. Die dafür zu entwickelnden Aktoren müssen demnach möglichst nah an oder in die Fläche integriert und trotzdem ausreichend steif konzipiert werden.

Die folgenden Abschnitte der Arbeit beschäftigen sich mit der Entwicklung einer solchen aktiven Fläche. Die Verknüpfung des Potenzials vom aktiven Material mit den Nutzerwünschen stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar. Das Hauptaugenmerk ist darauf gerichtet, die Designfreiheit für andere Formen und Funktionen von Flächen möglichst wenig einzuschränken.

Anhand ausgewählter Aspekte der Anforderungslisten aus Kapitel 4.1 wird aus drei hier vorgestellten Lösungskonzepten eines zur weiteren Ausgestaltung ausgewählt. Es folgen Materialcharakterisierung, sowie Berechnung, Konstruktion und Test der Aktorik. Eine geeignete Polsterfläche wird in Anhang G vorgeschlagen. Im Anschluss wird die beschriebene Aktorik bewertet und das Potenzial der aktiven Fläche abgeschätzt.

## **4.1 Anforderungen**

Um die in Kapitel 3.1 beschriebenen Produktmerkmale zu ermitteln, wird eine Anforderungsliste aufgestellt. Hierbei muss zwischen technischen, ökonomischen und Nutzeranforderungen unterschieden werden. Teilweise können aktuelle Anforderungen an den heutigen Autositz übernommen werden. Verschiedene Szenarien deuten an, dass die Bedeutung des Sitzes als Bestandteil des automobilen Sicherheitssystems aufgrund der Zunahme unfallvermeidender Systeme im PKW abnehmen kann [86]. Sicherheitsbezogene Anforderungen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Eine Aussage über die Art und Ausprägung von Sicherheitskonzepten zukünftiger Automobile zu tätigen, ist nicht Teil dieser Arbeit.

Eine vollständige Auflistung der ökonomischen Anforderungen ist ebenfalls nicht Bestandteil dieser Betrachtung, da ansonsten Kosten und Nutzen für den Einsatz in einem Serienfahrzeug in 30 bis 50 Jahren abgeschätzt werden müssten. Bisher nicht vorhandene Fertigungsprozesse und auch die nicht absehbare Entwicklung des mechanisch aktiven Materials lassen dies zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu.

### **4.1.1 Technische Anforderungen**

Bei der technischen Auslegung werden Faktoren, wie Randbedingungen, Funktionen, Belastungen, Dimensionen und der ökologische Kontext berücksichtigt. Viele der nachfolgend genannten technischen Anforderungen stehen im direkten Zusammenhang mit den später in Kapitel 4.1.3 behandelten Nutzeranforderungen.

Temperatureinsatzbereich und Nutzungsdauer werden aus den aktuellen Lastenheften der Automobilindustrie übernommen, da hier auch in Zukunft nur geringfügige Veränderungen erwartet werden. Die Fläche soll durch die Aktoren an möglichst vielen Stellen verformt werden. Auch unter Belastung durch den Insassen soll der Verstellmechanismus ausreichend hohe Stellkräfte und –momente zur Verstellung aufbringen. Sollte die tragende Struktur des Sitzes in die Aktoren integriert werden, so müssen die Lasten, die durch den Insassen entstehen, von dieser getragen werden

können. Die statischen Lasten, die auf den Sitzbereich wirken, werden in Anlehnung an die Dauerfunktionstüchtigkeit von Büromöbeln nach DIN 1335 [87] angenommen. Die Norm orientiert sich hierbei an anthropologischen<sup>18</sup> Daten [88]. Für die Berechnung der Lasten auf die Rückenlehne wird von der Körpermasse eines 95. Perzentil Mannes mit  $m_{95} = 100 \text{ kg}$  nach DIN 33402 [88] ausgegangen. Die maximale Belastung der Rückenlehne wird für den Fall horizontaler Beschleunigung in Fahrtrichtung berechnet. Mit der Beschleunigung eines Mittelklassefahrzeugs  $a_x = 5 \text{ m/s}^2$  ist die quasistatische Last:

$$F_{RL} = a_x \cdot m_{95} = 500 \text{ N} \quad (4.1)$$

Die Funktion der Sitzfederung soll ebenso über die Aktoren ermöglicht werden.

Eine konkrete Anforderung zu den Verstellwegen und -winkeln in der aktiven Fläche erfolgt nicht, da die maximal mögliche Verstellung bei Aktivierung der Aktoren zur Diskussion des Potenzials in Abschnitt 5.1 herangezogen wird. Die geometrischen Dimensionen für die Fläche werden nach aktuellen Automobilsitzen und entsprechend DIN EN 1335-3 [87] angenommen.

Da in zukünftigen Fahrzeugen die Notwendigkeit einer Schalt-/Mittelkonsole und auch eines Mitteltunnels möglicherweise nicht mehr gegeben ist, kann der dadurch entstehende Bauraum zugunsten der Sitzbreite genutzt werden.

Eine weitere Forderung besteht darin, die Aktoren so zu konzipieren, dass sie miteinander kombinierbar sind. Sie sollten Schnittstellen für die elektrische Kontaktierung, der Anbindung aneinander oder an die Fahrzeugstruktur aufweisen. Bei Beschädigung der Aktorik oder anderen Bauelementen der aktiven Fläche, soll ein manueller oder auch automatisierter Tausch ermöglicht sein. In Tabelle 4.1 sind die technischen Anforderungen an die aktive Fläche zusammengefasst:

---

<sup>18</sup> Anthropologie: (ánthropos, griech. – Mensch, logos, griech – Lehre) Lehre vom Menschen

Tabelle 4.1 Technische Anforderungen an eine aktive Fläche im Automobil [16], [87]

<b>1A. Randbedingungen</b>	<b>Wert/Forderung</b>
Temperatureinsatzbereich	-40°C bis +80°C
Nutzungsdauer	>12 Jahre
Betriebsart	elektrisch

---

<b>2A. Funktionen</b>	
Flächenverstellung	Sitzfläche muss durch Aktorik verformbar sein, zur Anpassung an Nutzungssituation
Lastaufnahme	Aktorik muss Last des Nutzers vollständig halten und Sitzfläche verstellen
Federung	Aktorik soll federnde Funktion des Sitzes übernehmen
Freie Schnittstellen der Aktoren / modular	Aktorschnittstellen geeignet für Kontaktierung, Fixierung untereinander und an tragender Basis
Klimatisierung	belüftete, kühlende, oder wärmende Sitzfläche

---

<b>3A. Lasten und Wege</b>	
maximale Traglast Sitzfläche	1500 N
maximale Lehnenlast	500 N
Verstellwege	k.A.

---

<b>4A. Geometrie</b>	
Breite der Sitzfläche	ca. 600 mm
Tiefe der Sitzfläche	min. 450 mm
Breite der Rückenlehne	ca. 600 mm
Höhe der Rückenlehne	min. 650 mm
Dicke des Sitzes	möglichst gering
Gewicht	möglichst gering

---

<b>5A. Montage/Instandhaltung</b>	
manuell und maschinell montierbar, demontierbar	falls notwendig ist ein manueller Austausch einzelner Aktoren vorzusehen

---

<b>6A. Recycling</b>	
Erneuter Einsatz	erneuter Einsatz der Aktoren in neuen Fahrzeugen -> lange Lebensdauer der Aktoren

---

### 4.1.2 Ökonomische Anforderungen

Die ökonomischen Anforderungen werden hier zwar aufgeführt, Zahlenwerte können jedoch nicht genannt werden. Es werden lediglich Faktoren angeführt, die bei Einführung in die Serie Berücksichtigung finden könnten. Die genannten ökonomischen Forderungen sind nicht vollständig und werden zur späteren Diskussion der aktiven Fläche nur teilweise herangezogen.

Tabelle 4.2 ökonomische Anforderungen an eine aktive Fläche im Automobil

<b>1B. Kosten</b>	
Herstellkosten	gleich/geringer als Sitz mit herkömmlicher Aktorik
Beschaffungskosten	möglichst geringe Investition in Maschinen und Infrastruktur
Personalkosten	gering, automatisierte Herstellung
Herstellzeit	gleich/kürzer als Sitz mit herkömmlicher Aktorik
Energiekosten	k.A.
<b>2B. Nutzen</b>	
Zielgruppe	kostengünstige Anpassung an Zielgruppe durch Funktion/Ästhetik
Markt	k.A.
Funktionsintegration	Zahl der Bauteile pro Sitz soll sinken
Entsorgung	Erneutes Nutzen der Aktorik / Einsparung Recycling- oder Entsorgungskosten

### 4.1.3 Nutzeranforderungen

Um die Ansprüche der Benutzer zu erfassen, werden neben dem Einbeziehen volkscundlicher Literatur, z.B. Hengartner [89] und einer Vielzahl von Automobilstudien, zwei so genannte Brainstormings (siehe Anhang A) durchgeführt. Hieraus ergeben sich eine Reihe Wünsche und Vorstellungen, denen eine Sitzstruktur im Automobil in Zukunft gerecht werden sollte:

Tabelle 4.3 Nutzeranforderungen an eine aktive Fläche im Automobil

<b>1C. Änderungsfähigkeit der Sitzfläche</b>	
global veränderbar	Kippung, Drehung, Translation des Sitzes
lokal veränderbar	voneinander unabhängige starke Verformungen und Verschiebungen in der Sitzfläche
veränderliche Beschaffenheit	Form, Sitzhärte, Oberflächenstruktur und -farbe individuell veränderbar

<b>2C. Bedienung</b>	
intuitiv	Veränderung der Sitzfläche selbsterklärend
geringe körperliche Einschränkung	kein einengendes Sitzgefühl

Anhand der aufgestellten Anforderungen werden im folgenden Abschnitt Lösungsprinzipien erarbeitet. In Abschnitt 4.4 wird eine mögliche Gesamtlösung für eine aktive Fläche, gestützt von Aktoren mit DE, konstruktiv ausgearbeitet und charakterisiert.

## **4.2 Lösungsprinzipien für eine aktive Fläche**

Die Generierung von Lösungsprinzipien erfolgt einerseits über die Betrachtung des in den Abschnitten 1.2 und 2.3 beschriebenen Stands der Technik von Autositz und aktivem Werkstoff, andererseits bedient sie sich verschiedener Kreativitätstechniken. Darunter finden sich bionische Ansätze, Abstraktionsmethoden und Synektik. Hierüber sollen bestehende Funktionen neu durchdacht und neue Funktionen generiert werden. Das Ziel liegt darin eine nach den in 4.1 beschriebenen Anforderungen frei verformbare Fläche und die dazu benötigte Aktorik zu konzipieren. Wie bereits in 3.1 beschrieben werden die hier vorgestellten Lösungsprinzipien nicht detailliert ausgearbeitet. Im Kapitel 4.4 findet die Ausgestaltung einer aktiven Fläche auf Basis eines der vorgestellten Lösungsprinzipien statt. Innerhalb dieser Ausgestaltung steigt der Detaillierungsgrad an (vgl. Abbildung 3.3). Nachfolgend sind drei Lösungsprinzipien näher dargestellt.

#### 4.2.1 Lösungsprinzip I: Aktive Netzstruktur

Die Lastaufnahme im Sitz kann in Anlehnung an die natürlichen Vorbilder, die Kieselalgen (*Bacillariophyta*) und Riesenseerosen (*Victoria amazonica*) ausgeführt werden. Die hohe Steifigkeit von deren Schalenstrukturen ergibt sich aus den fraktalen Waben, Rippen und Poren in unterschiedlichen Dimensionen [90]. In eine große Wabenstruktur ist beispielsweise eine kleinere Wabenstruktur eingelassen, die wiederum mit einer noch kleineren Wabenstruktur versteift ist, wie Abbildung 4.1 zeigt.

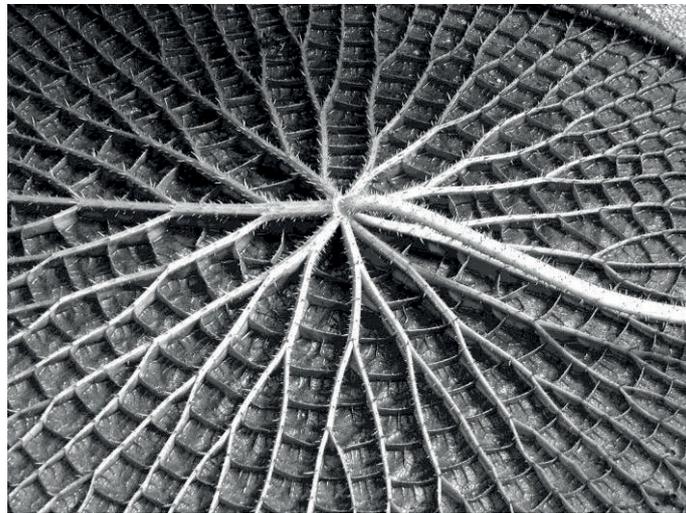


Abbildung 4.1 Blattunterseite der Riesenseerose (*Victoria amazonica*)<sup>19</sup>

Die Konstruktion einer Sitzschale, die diesem Prinzip folgt, ermöglicht es zudem maßgeschneiderte Aktoren in den Zwischenräumen der fraktalen Elemente unterzubringen (siehe Abbildung 4.2). Der Einsatz gestapelter DE-Aktoren, deren Längseffekt für eine Verstellung genutzt werden kann, ist damit ermöglicht. Bei elektrischer Aktivierung der gestapelten Aktoren verringern diese ihre Höhe.

---

<sup>19</sup> Quelle: <http://idw-online.de/pages/de/news292841>

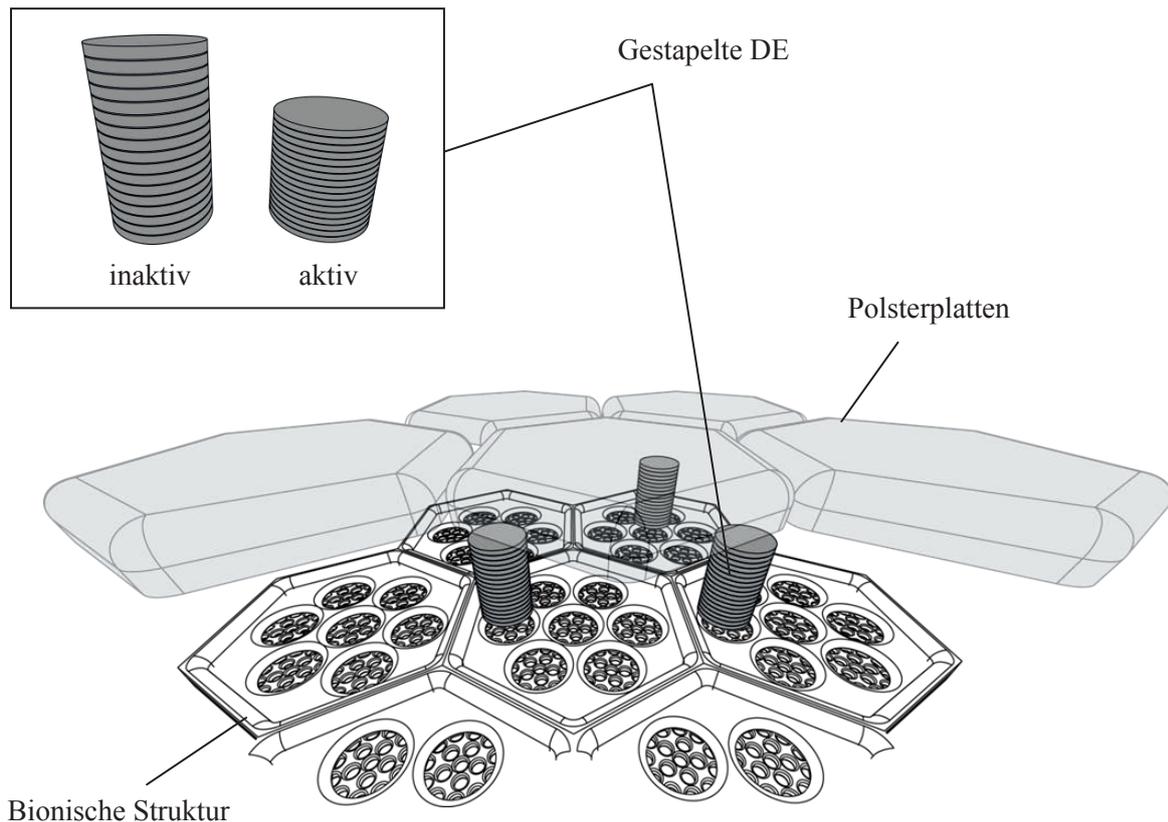


Abbildung 4.2 Schematische Darstellung einer steifen Netzstruktur mit gestapelten DE und aufgesetzten Polsterplatten

Auf die Aktoren lässt sich eine gepolsterte Kontaktfläche montieren, die je nach Ansteuerung der DE-Aktoren ihre Lage variiert. Nach diesem Prinzip lässt sich eine beliebige Anzahl veränderbarer Polsterplatten zu einer Fläche zusammenfügen. Die Funktionen „Verstellung“ und „Lastaufnahme“ sind demnach getrennt. Die Krafteinleitung der Belastungen des sitzenden Menschen in die Sitzstruktur erfolgt direkt über die gestapelten Aktoren, die hierdurch mechanisch komprimiert werden. Durch diese Kompression wird die Schichtdicke der einzelnen DE-Lagen verringert, was entsprechend Gleichung (2.2) bei elektrischer Aktivierung zu einem höheren elektrostatischen Druck und somit zu größeren Stellwegen führt.

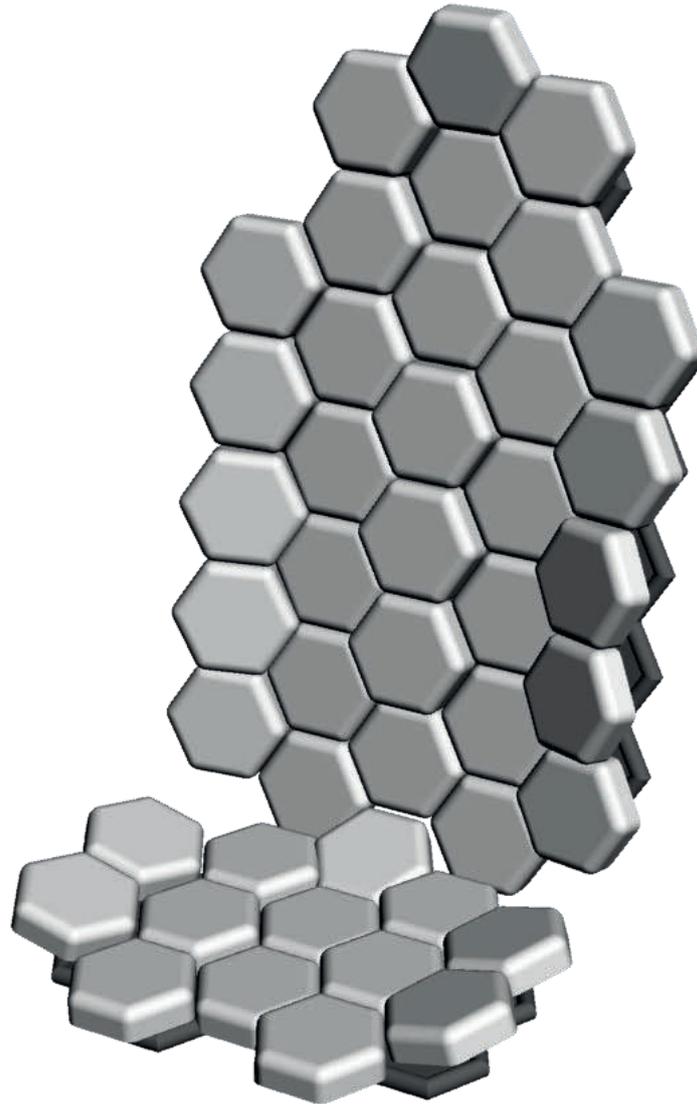


Abbildung 4.3 Mögliche Lösung eines Fahrzeugsitzes basierend auf dem Prinzip der aktiven Netzstruktur unter Einsatz gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren

Darüber hinaus kann eine Vielzahl geometrischer Faktoren verändert werden, was wiederum großen Freiraum für die Formsprache dieses Prinzips bietet. Auch eine geschlossene Polsterfläche, die lokal von den gestapelten Aktoren verstellt wird, ist hier denkbar.

## 4.2.2 Lösungsprinzip II: Aktive Kissen

Dielektrische Elastomerfilme bieten die Möglichkeit sehr flache Aktoren herzustellen. Für das Lösungsprinzip der aktiven Kissen sind tendenziell alle vier Aktormodi (siehe Kapitel 2.3.4) einsetzbar. Längseffektaktoren werden hierfür auf die Seite gekippt, Quereffektaktoren sind direkt nutzbar. Die Aktoren werden in eine Längsführung mit einem fixen und einem uniaxial verschiebbaren Ende gesetzt (siehe Abbildung 4.4 a)). Bei Aktivierung der Aktoren wird das bewegliche Ende verschoben (siehe Abbildung 4.4 b)). Eine Umlenkung der Verschiebung ist über Drähte, Seilzüge oder Hebel zu einer negativen vertikalen Verstellung erzielbar. Wird diese vertikale Verstellvorrichtung mit dem Oberflächenbezug eines gefüllten Polsterkissens verbunden, kann so das Oberflächenprofil lokal verändert werden.

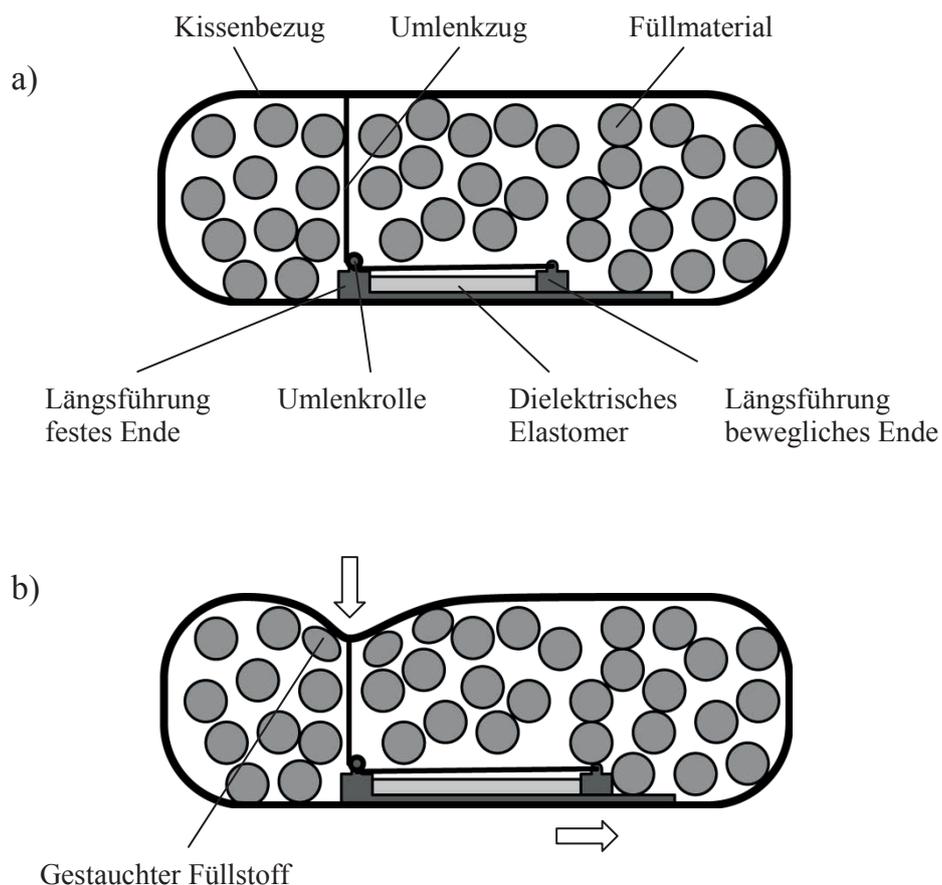


Abbildung 4.4 Schematische Darstellung eines aktiven Kissens mit einstellbarem Oberflächenprofil und Sitzhärte mit a) inaktivem und b) aktivem dielektrischen Elastomer

Dies hat neben der optischen Veränderung auch einen Einfluss auf die Sitzhärte, sofern die Härte des Füllmaterials sich progressiv mit der Stauchung verändert. Auxetische<sup>20</sup> Polyurethanschäume, die aufgrund ihrer Zellstruktur eine negative Querkontraktionszahl aufweisen, zeigen beispielsweise exponentiell beschreibbares Druckverhalten [91]. Die aktiven Kissen können in beliebiger Form, Größe und Anzahl zu einer Fläche zusammengesetzt werden. Es ist denkbar, mehrere Aktoren in ein einzelnes Kissen oder mehrere Kissen über einen DE-Aktor zu betreiben. In einer kippbaren Schale können demnach viele Sitzsituationen erreicht und der funktionale und gestalterische Nutzen kann dem gewünschten Einsatz angepasst werden. Abbildung 4.5 zeigt mögliche Gestaltungen für Fahrzeugsitze nach dem Konzept der aktiven Kissen.

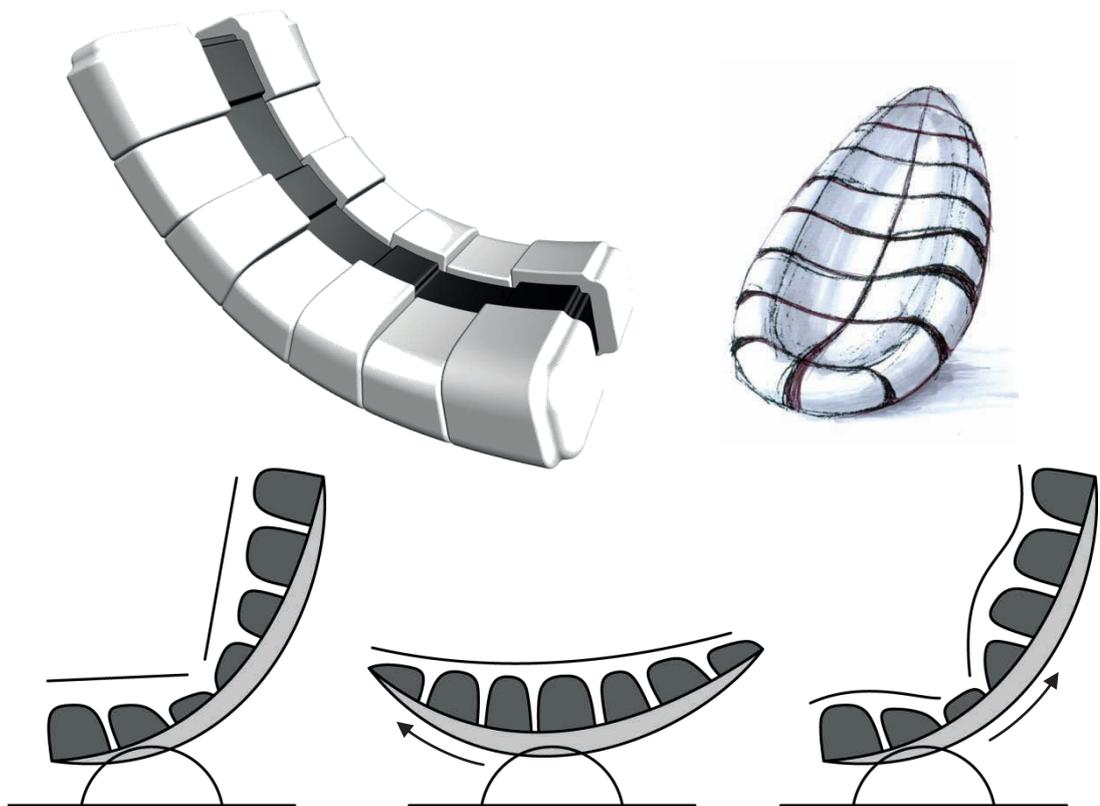


Abbildung 4.5 Darstellung möglicher Sitze und Sitzpositionen unter dem Einsatz aktiver Kissen mit dielektrischen Elastomeraktoren

---

<sup>20</sup> Auxetisch: Aus dem Griechischen *αυξήσις* (auxeos) für dehnbar. Beschreibt die Eigenschaft eines Materials sich bei Dehnung auch quer zur Dehnrichtung auszubreiten. Auxetische Materialien werden durch negative Poissonzahlen beschrieben

### 4.2.3 Lösungsprinzip III: Blattfederaktoren

Die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten DE-Filme verformen sich aufgrund der Wellenstruktur der Silberelektrode nur in die Richtungen 1 und 3. Demnach ist bei Aktivierung eine deutlich höhere Querstreckung  $\lambda_1$  als Längsstreckung  $\lambda_3$  zu erwarten (vgl. Abbildung 2.10). Der zu erwartende Nutzen des Quereffekts ist demnach höher. Da die Filme aber keine direkten Verstellkräfte bei Aktivierung aufbringen können, eignet sich das Prinzip der *dielectric elastomer minimum energy structures* (DEMES) von Kofod [53] für den Bau eines Aktors. Dazu wird eine rechteckige Blattfeder mit einem uniaxial in 1-Richtung gedehnten DE-Film gestaucht. In dem folgend „Blattfederaktor“ genannten Modul stellt sich, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, ein Gleichgewicht aus der Vordehnung des DE-Films und einem daran gekoppelten Blattfederelement ein.

Unter der Aktivierung des DE wird das in der Struktur gespeicherte mechanische Spannungsgleichgewicht um den zusätzlichen elektrostatischen Druck (2.2) verschoben. Die Struktur scheint zu relaxieren, und die Aktivierungsdehnung des DE wird mechanisch nutzbar.

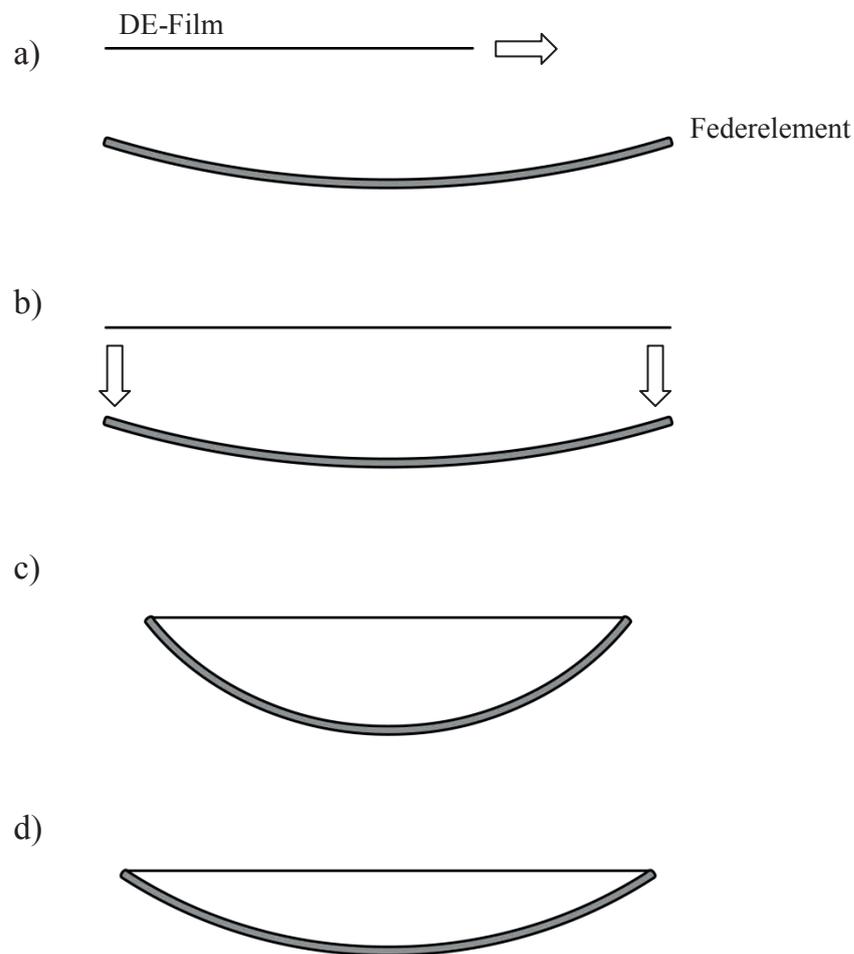


Abbildung 4.6 Funktionsprinzip eines Blattfederaktors in Anlehnung an [53]: a) mechanische Vordehnung des dielektrischen Elastomerfilms (DE-Film), b) Kopplung des DE-Films an ein ungedehntes Federelement, c) Entspannung der gekoppelten Struktur zum Gleichgewichtszustand, d) elektrische Aktivierung des DE-Films

Aus aneinander gereihten Blattfederaktoren kann ein tragender Rahmen hergestellt werden. Das Aufsetzen einer verformbaren Fläche auf die Verbindungsstellen der DEMES-Aktoren führt zu einer frei verformbaren Fläche (siehe Abbildung 4.7). Die freie Anordnung und Kopplung der Blattfederaktoren untereinander ermöglicht einen großen Spielraum für die Konstruktion unterschiedlichster Sitzformen, wie in Abbildung 4.8 gezeigt.

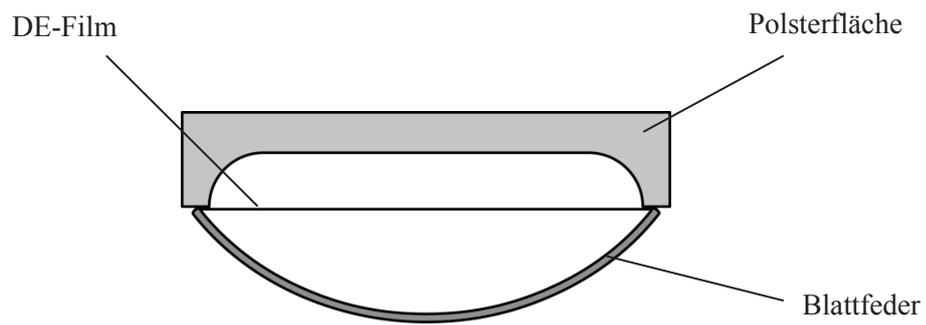


Abbildung 4.7 Ausschnitt der Kopplung eines Blattfederaktors mit einer Polsterfläche

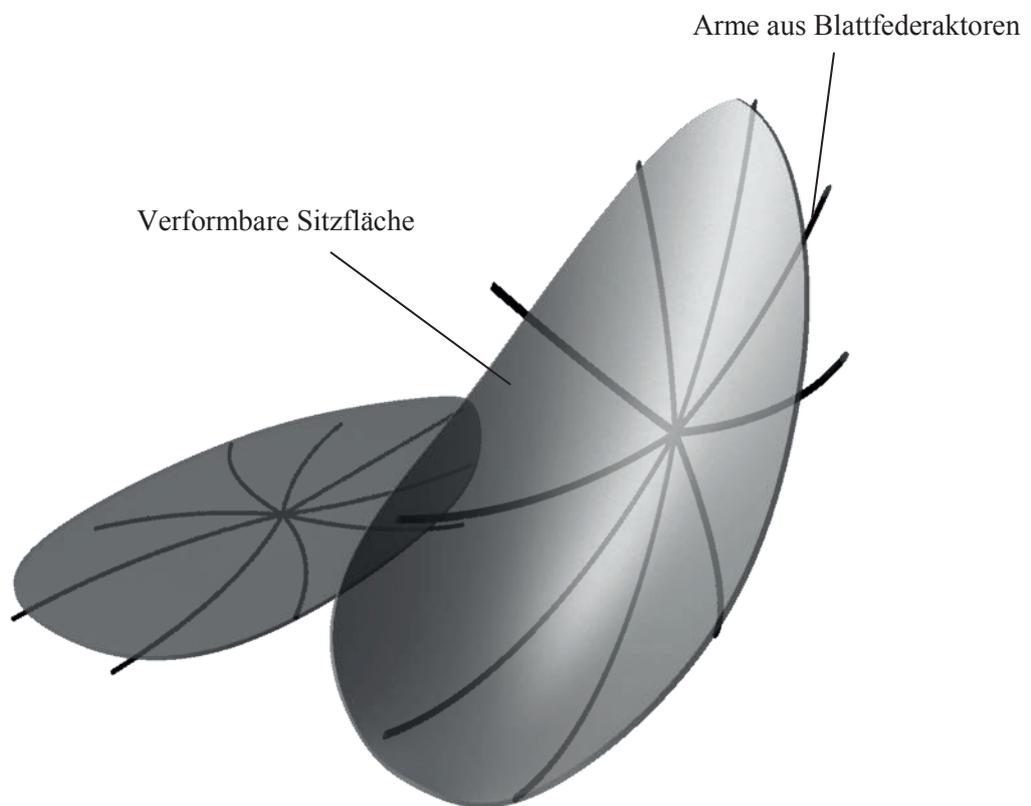


Abbildung 4.8 Mögliche Lösung zur Bildung einer aktiven Fläche unter dem Einsatz von Armen aus Blattfederaktoren

### 4.3 Auswahl eines Lösungsprinzips

Die Auswahl der in 4.2 vorgestellten Lösungsprinzipien kann in diesem Stadium der Entwicklung nicht anhand aller Anforderungen aus Abschnitt 4.1 getroffen werden. Zur Entscheidungsfindung des Konzepts zur weiteren Ausgestaltung werden einige der technischen Kriterien und Nutzeranforderungen herangezogen. Die Kriterien werden in einer Nutzwertanalyse (Tabelle 4.4) in Anlehnung an Haberfellner [92] gewichtet, deren Summe für das jeweilige Anforderungsfeld 100 ergibt. Die Erfüllung durch die Lösungsprinzipien wird nach Empfehlung von Pahl und Beitz [65] zwischen 0 und 4 bewertet (0: unbefriedigend, 1: gerade noch tragbar, 2: ausreichend, 3: gut, 4: sehr gut). Die Produktsummen aus den Werten und Gewichtungsfaktoren werden schlussendlich addiert. Das Lösungsprinzip mit der höchsten Gesamtsumme und damit dem größten Potenzial zur Verstellung einer Fläche, wird zur weiteren Ausgestaltung gewählt.

Tabelle 4.4 Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Lösungsprinzips auf Basis ausgewählter Anforderungskriterien

	Kriterium	Gewichtung	Lösungsprinzip I	Lösungsprinzip II	Lösungsprinzip III
2A	Lastaufnahme	40	4	4	2
	Federung	20	2	4	4
	Freie Schnittstellen	20	0	0	4
	Klimatisierung	20	4	0	3
	<b>Σ technisch</b>	100	<b>280</b>	<b>240</b>	<b>300</b>
1C	Global veränderbar	50	2	2	4
	Lokal veränderbar	40	2	4	3
	Veränderliche Beschaffenheit	10	2	2	1
	<b>Σ Nutzer</b>	100	<b>200</b>	<b>280</b>	<b>330</b>
	<b>Σ Gesamt</b>		<b>480</b>	<b>520</b>	<b>630</b>

Tabelle 4.4 zeigt eine Abgrenzung von Lösungsprinzip III. Dieses wird in den folgenden Abschnitten der Arbeit weiter ausgestaltet.

## **4.4 Entwurf eines Blattfederaktors für aktive Flächen**

Zur Ausgestaltung des Blattfederaktors müssen dessen Bestandteile charakterisiert und ausgelegt werden. In Abschnitt 4.4.1 erfolgt eine Charakterisierung des DE-Films hinsichtlich seiner mechanischen, elektrischen und elektromechanischen Eigenschaften. Kapitel 4.4.2 beschreibt die Materialauswahl und die Bestimmung des mechanischen Verhaltens der Blattfeder.

Die Auslegung zielt darauf ab, die Aktoren modular und skalierbar zu entwerfen, um auch Flächen mit anderen Formen und Verstellfunktionen realisieren zu können. Der Gestaltungsspielraum für Formen und Funktionen soll möglichst wenig eingegrenzt werden.

Für die Kopplung der Blattfederaktoren untereinander, die Kontaktierung und Befestigung der DE-Filme, sowie für die Anbindung einer Polsterfläche werden Lösungen aufgezeigt. Die Auskonstruktion der Polsterfläche für einen Automobilsitz erfolgt nicht im Rahmen dieser Arbeit. Anhang G stellt aber hierfür eine denkbare Option aus Polyurethan-Weichschaum vor, die in Zusammenarbeit mit der Firma F.S. Fehrer Automotive GmbH entstand [93].

### **4.4.1 Dielektrischer Elastomerfilm**

Der in Abschnitt 2.3.3 beschriebene DE-Film wird als mechanisch aktives Stellelement eingesetzt. Für Auslegung und Konstruktion ist die Bestimmung der mechanischen und elektromechanischen Eigenschaften, sowie die Kenntnis über die Versagensmechanismen des DE-Films notwendig.

#### **Verhalten bei mechanischer Belastung auf Zug**

Zur mechanischen Charakterisierung werden, die in 3.2.2 beschriebenen Versuche durchgeführt. Zur genauen Analyse des Einflusses der Silberschicht auf das mechanische Verhalten des DE-Films werden darüber hinaus weitere Verfahren eingesetzt:

- Rasterelektronenmikroskopie (REM),
- Dynamische Differenzkalometrie (DSC).

Insgesamt wurden 16 DE-Filme im zyklischen Zugversuch getestet, die Daten des dritten Zyklus aller Filme sind im Anhang C in Abbildung 6.8 aufgeführt.

Abbildung 4.9 zeigt das Verhalten eines DE-Films im zyklischen Zugversuch. Aufgetragen ist die nominale mechanische Spannung über der Streckung. Es zeigt sich ein mechanisches Aufweichen vom ersten zum zweiten Zyklus des Zugversuchs. Zwischen dem zweiten und dritten Versuch ist eine bleibende Hysterese zu erkennen.

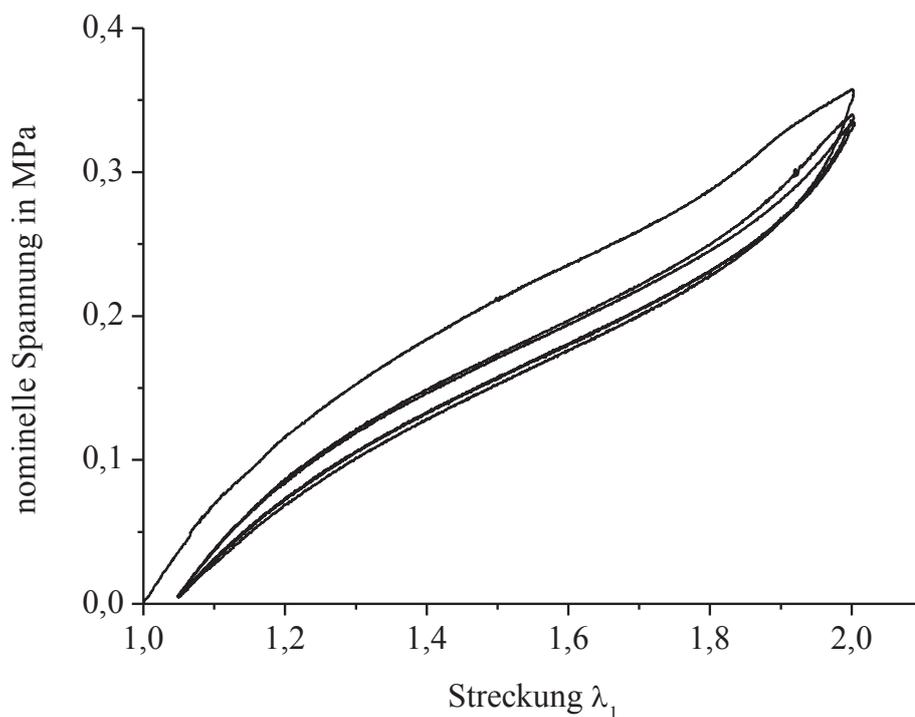


Abbildung 4.9 Zyklischer Zugversuch eines dielektrischen Elastomers nach DIN 527-3 [72]

In jedem einzelnen Belastungsschritt zeigt der DE-Film ein für Elastomere typisches hyperelastisches Verhalten. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben verhält sich der DE-Film in den letzten beiden Testzyklen hypoelastisch.

Eine bleibende Restdehnung bei Entlastung weist auf eine Veränderung oder Schädigung des Materials hin. Die Silberschicht und die Füllstoffe im Silikon können die Ursache hierfür sein.

Laut Angaben des Herstellers können die DE-Filme bis zu 100 % gedehnt werden, ohne dass ein Schaden an der Silberschicht auftritt. Um zu untersuchen, ob die Materialveränderung bereits bei geringen Dehnungen stattfindet, werden die in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen gestuften Zugversuche durchgeführt. Es wurden drei Filme im gestuften Zugversuch getestet. Die Daten der Filme sind in Abbildung 6.9 im Anhang C gezeigt. Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch den Verlauf eines DE-Films im gestuften Zugversuch.

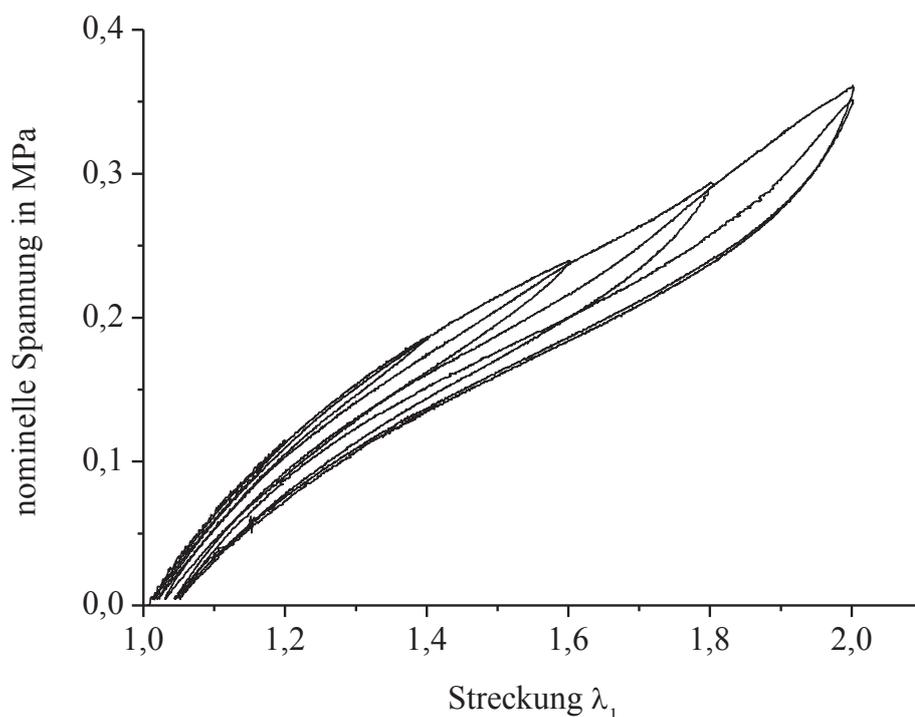


Abbildung 4.10 Gestufter Zugversuch eines dielektrischen Elastomerfilms

Bereits in den ersten Stufen des Versuchs, bei geringen Dehnungen, ist das Aufweichen des DE-Films zu erkennen. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein:

- (1) **Aufbrechen der Agglomerate und Van-der-Waals-Bindungen** der Silikatfüllstoffe im Elastomer.
- (2) **Ablösung der Elektroden vom Elastomer** durch die Verhinderung der Querkontraktion des Silikons durch die Elektroden.
- (3) Einmaliges **Aufreißen lokaler Defekte** in der Silberschicht.

Das in Abbildung 4.10 beobachtete Aufweichen des DE-Films, ist für partikelgefüllte Elastomere bereits 1903 von Bouasse und Carrière [94] beobachtet und später intensiv von Mullins [35] behandelt worden. Eine Vielzahl phänomenologischer Modelle [95] versuchen dieses Verhalten zu beschreiben. Das Elastosil RT 625 des DE-Films ist laut Herstellerangaben [44] mit Füllstoffen aus pyrogener Kieselsäure modifiziert (vgl. Abschnitt 2.3.3). Diese können als Einzelstoffe oder als Agglomerate im Silikon vorliegen und sind nicht kovalent, sondern über van-der-Waals-Bindungen eingebunden. Ein Aufbrechen dieser Bindungen zwischen Füllstoff und Silikon kann zum in Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 gezeigten Aufweichen des DE-Films führen. Darüber hinaus ist es auch möglich, dass sich das Netzwerk des Silikons in Folge der mechanischen Belastung verändert.

Um diesen Effekt zu beobachten, wird ein bereits im zyklischen Zugversuch getesteter DE-Film nach einer Lagerzeit von drei Tagen erneut geprüft. Die Ergebnisse beider Versuche sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Wiederholung des Zugversuchs zeigt weiterhin das hypoelastische Materialverhalten. Eine Rückbildung zu dem Anfangszustand eines unbelasteten Filmes ist nicht zu beobachten. Ein Einfluss durch die Veränderung im Vernetzungsgrad des Silikons kann damit jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

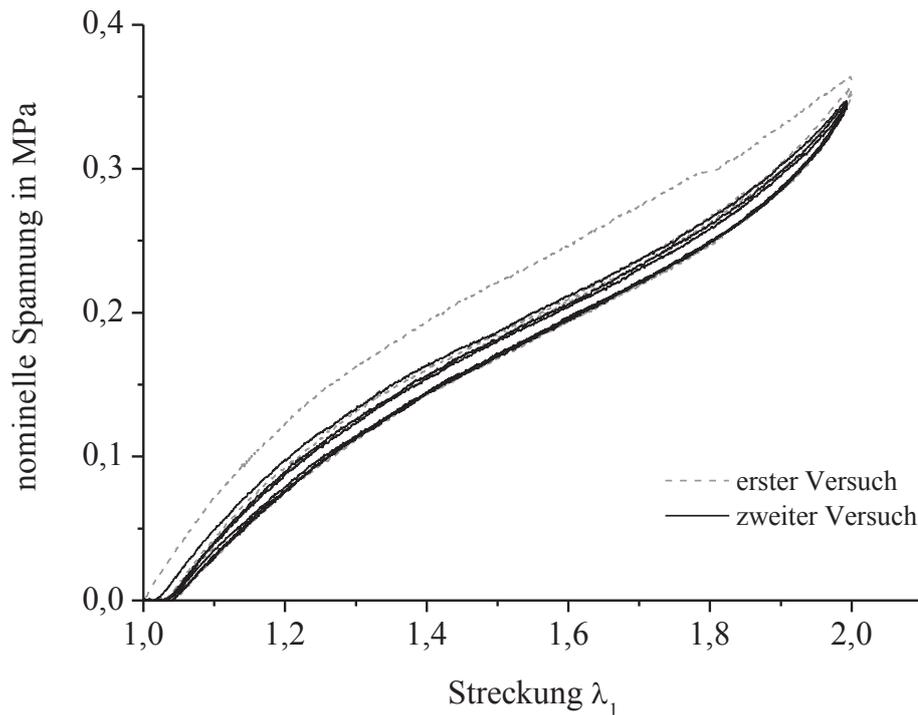


Abbildung 4.11 Zyklischer Zugversuch und wiederholter zyklischer Zugversuch nach dreitägiger Lagerung eines DE-Films

Daher werden mit Hilfe der DSC ein DE-Film nach mechanischer Belastung und ein unbelasteter Film analysiert. Hierbei wird die aufgenommene Wärmemenge beim Aufheizen der Filme von  $-170^{\circ}\text{C}$  auf  $150^{\circ}\text{C}$  gemessen. Danach wird die abgegebene Wärmemenge beim Abkühlen von  $100^{\circ}\text{C}$  auf  $-170^{\circ}\text{C}$  erfasst und ein weiteres Mal die Wärmemenge beim Aufheizen der Filme ermittelt. Abbildung 4.12 zeigt im Vergleich die beiden ersten Aufheizzyklen für beide DE-Filme bei einer Heizrate von 10 K/min.

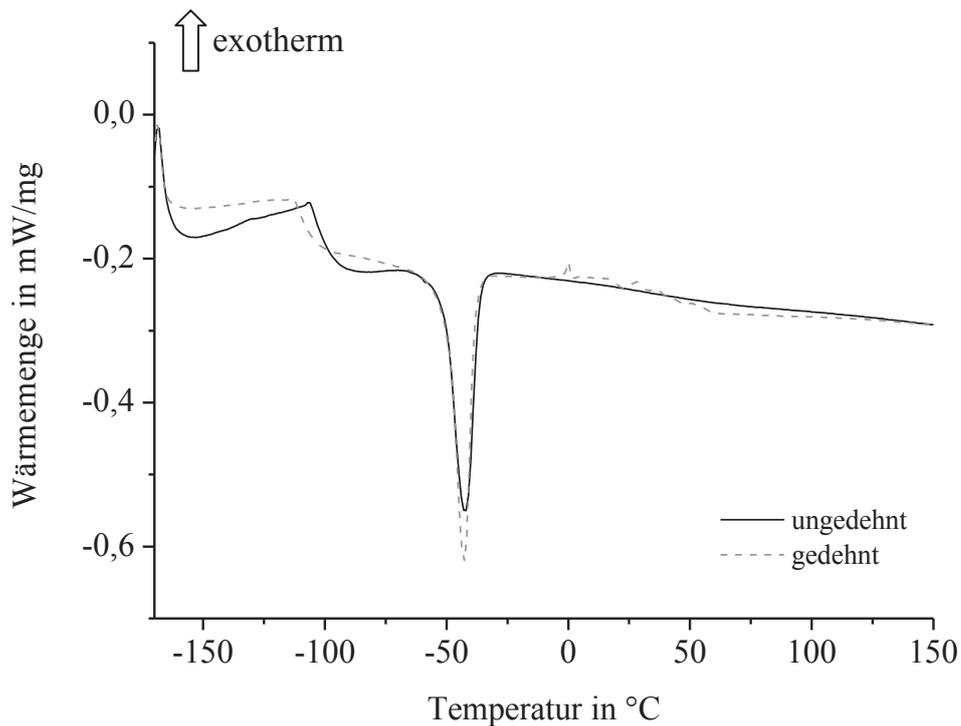


Abbildung 4.12 Erster Heizzyklus der Dynamischen Differenzkalometrie zweier DE-Filme vor und nach mechanischer Belastung (ungedehnt, gedehnt), Heizrate 10 K/min

Bei beiden Filmen ist bei etwa  $\vartheta_c = -43 \text{ °C}$  ein Kristallisationspeak festzustellen. Beim Aufheizen gehen die kristallinen Bereiche im Silikon in eine amorphe Struktur über. Auch die absorbierte Wärmeenergie bei den Kristallisationspeaks ist bei beiden Filmen ähnlich und liegt bei etwa  $U_C = 20 \text{ J/g}$ .

Unterschiede zeigen sich in der Glasübergangstemperatur. Der ungedehnte Film hat einen Glasübergang bei  $\vartheta_G = -102 \text{ °C}$ , der gedehnte bei  $\vartheta_{G,,} = -109 \text{ °C}$ . Auch weisen die Unterschiede der Plateaus unterhalb des Glasübergangs auf eine veränderte Struktur im gedehnten Film hin. Dies zeigt sich bei den Messungen des Abkühlvorgangs in Abbildung 4.13. Die Rekristallisation findet bei dem ungedehnten DE-Film bei einer Temperatur von  $\vartheta_{RC} = -87 \text{ °C}$  statt, bei dem gedehnten bereits bei  $\vartheta_{RC,,} = -78 \text{ °C}$ . Die Ergebnisse aus den DSC-Messungen zeigen, dass die mechanischen Belastungen zu Veränderungen im Vernetzungsgrad des Silikonelastomers führen. Ursache (1) ist somit bestärkt. Die Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften

sind nach den wiederholten Zugversuchen aus Abbildung 4.11 jedoch vernachlässigbar gering.

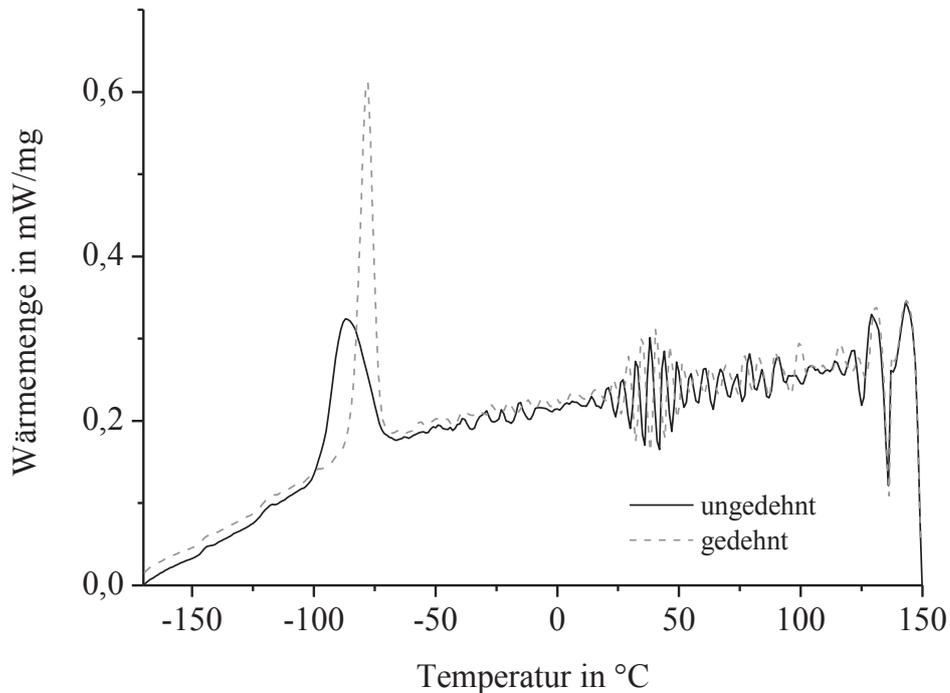


Abbildung 4.13 Abkühlvorgang der Dynamischen Differenzkalometrie zweier DE-Filme vor und nach mechanischer Belastung (ungedehnt, gedehnt), Heizrate 10 K/min

Ursachen (2) und (3) für das Aufweichen der Spannungs-Dehnungs-Kurve des DE-Films, beruhen auf Beschädigungen der Silberelektroden in Folge der mechanischen Belastung und werden nachfolgend diskutiert.

Interlaminare Spannungen in der Grenzschicht von Elektrode und Elastomer können, infolge der Behinderung einer Querkontraktion des isotropen Elastomers bei uniaxialer Dehnung, zu einer lokalen Ablösung der Elektrode vom Elastomer führen. Somit ändert sich der Belastungsfall der Elektrode und es kann zu lokalem Ausbeulen oder auch zum Brechen der Elektrode kommen. Bei erneutem Dehnen nach Entlastung ist der DE-Film dann weicher, da die abgelösten oder gebrochenen Bereiche der Silberschicht einen geringeren Widerstand gegen die Querverformung leisten. Die

Folge ist ein weiches Spannungs-Dehnungs-Verhaltens in Richtung 1 (siehe Abbildung 4.9).

Es ist ebenso wahrscheinlich, dass der Effekt auf lokale Defekte in der Elektrode, also Ursache (3), zurückzuführen ist, die bereits bei geringen Dehnungen aufreißen. Bei erneuter Dehnung nach Entlastung werden diese Risse wieder aufgezogen, reißen jedoch nicht weiter ein (siehe Abbildung 4.14).

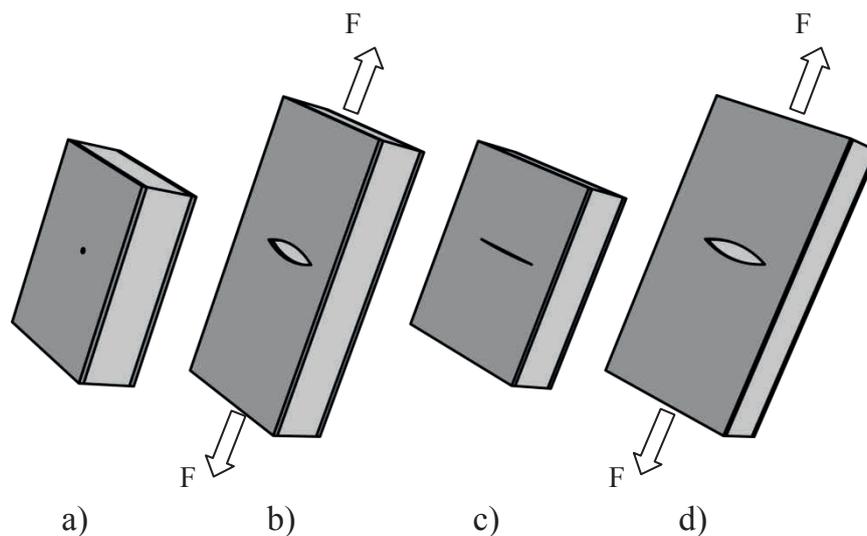


Abbildung 4.14 Schematische Darstellung einer möglichen Rissbildung der Silberelektrode des DE-Films unter mechanischer Belastung, a) Defekt in der Elektrode, b) Aufweitung des Defekt unter Last, c) konstante Risslänge nach Entlasten, d) keine weitere Rissaufweitung bis zum Erreichen der vorangegangenen mechanischen Belastung

Zur Untersuchung der Ursachen (2) und (3) werden REM-Aufnahmen der DE-Filme erstellt. Hierfür wurden die DE-Filme gedehnt und daraufhin auf einem Probenträger fixiert. Die in Abbildung 4.15 dargestellten Aufnahmen von einem nicht gedehnten Referenzfilm und zwei unterschiedlich stark gedehnten DE-Filmen zeigen Risse in der Silberschicht. Der nicht gedehnte Referenzfilm zeigt keinerlei Beschädigungen auf der Oberfläche, das Elektrodenprofil ist gleichmäßig und zeigt einen homogenen Wellenabstand von  $5,6 \mu\text{m}$ . Der um 16 % gedehnte Film zeigt bereits Schädigungen in Wellenrichtung (Richtung 1). Bei dem Film mit 70 % Dehnung sind bereits gerissene Elektrodenbereiche quer zur Wellenrichtung erkennbar, wobei die Schädigungen in Wellenrichtung zunehmen.

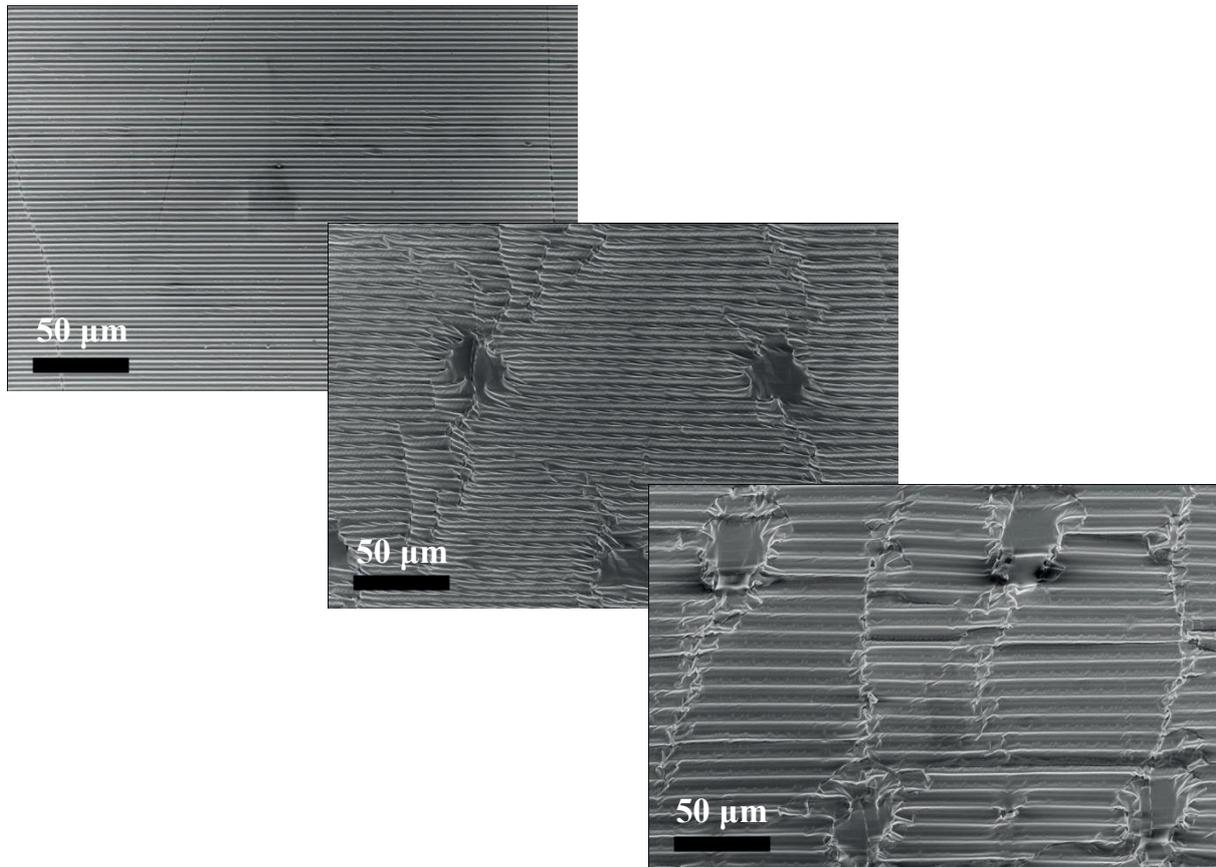


Abbildung 4.15 REM-Aufnahmen der Elektrodenoberflächen der DE-Filme, links: nicht gedehnt, mittig: 16 % Dehnung, rechts: 70 % Dehnung

Eine Vergrößerung des um 16 % gedehnten DE-Films zeigt deutliche Schädigungen, die auf Knicken der Elektroden zurück zu führen sind (siehe Abbildung 4.16). Auch sind Ablösevorgänge der Elektroden vom Silikonfilm zu beobachten. Dies stützt die Ursache (2), wonach die Beschädigungen durch Knicken der Elektroden, in Folge der Querkontraktion, zu einer bleibenden Aufweichung des DE-Films führen (vgl. Abbildung 4.9).

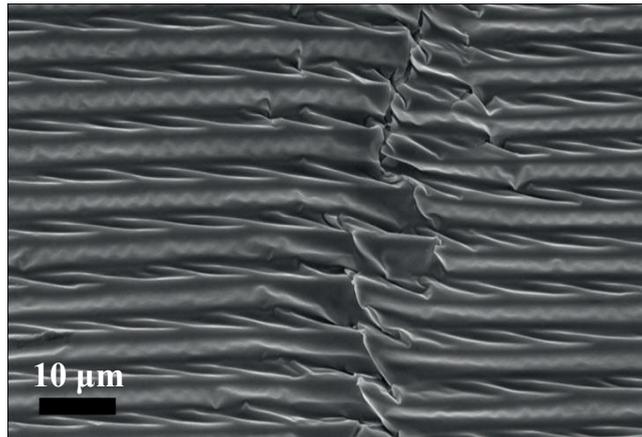


Abbildung 4.16 REM der Elektrodenoberfläche eines um 16 % mechanisch gedehnten DE-Films

Dehnungen über 100 % führen zu einer starken Zerstörung der Elektrodenoberflächen (Abbildung 4.17). Hierbei überlagern sich Schädigungen in Richtung und quer zur Richtung der Wellung, sodass sich schräg verlaufende Risse durch die Elektrodenschicht ziehen. Partiiell sind auch vollständige Ablösungen von dem Silikonfilm zu beobachten.

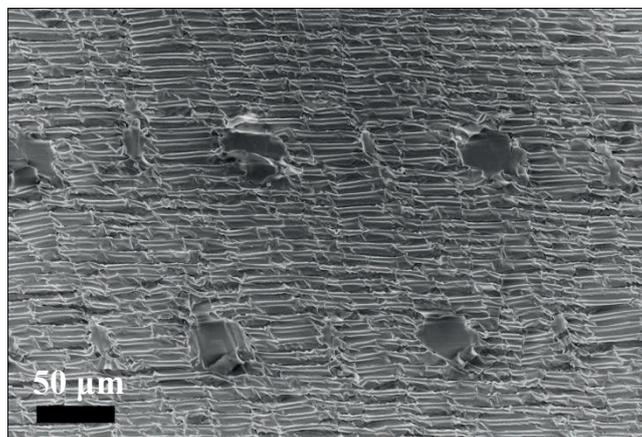


Abbildung 4.17 REM einer zerstörten Elektrodenoberfläche eines über 100 % mechanisch gedehnten DE-Films

Bei den REM-Aufnahmen konnten keine aufgeweiteten Defekte, wie in Abbildung 4.14 dargestellt aufgefunden werden. Demnach scheint Ursache (3) nicht der Grund für die zu beobachtende Aufweichung in den Zugversuchen zu sein.

Abbildung 4.11 zeigt, dass die Veränderungen im chemischen Netzwerk aus Silikon und dessen anorganischen Füllstoffen, nur einen vernachlässigbar geringen Anteil zum Aufweichen in den Zugversuchen beitragen. Vielmehr sind die Ergebnisse aus den REM-Aufnahmen (Abbildung 4.15), und somit Ursache (2) der Grund für das erweichte Spannungs-Dehnungs-Verhalten nach der ersten mechanischer Zugbelastung anzuführen. Die Silberschicht beginnt demnach aufgrund der Querkontraktion des Silikons unter uniaxialer Zugbelastung quer zur Belastungsrichtung zu beulen. Bereits bei Dehnungen um 16 % (siehe Abbildung 4.16) führt dies zu Rissen in Richtung der Belastungsrichtung. Ursache (3) konnte in den Untersuchungen nicht verifiziert werden.

### **Verhalten bei langzeitiger mechanischer Belastung**

Aus den letzten beiden Be- und Entlastungskurven der Zugversuche aus Abbildung 4.9 ist neben dem elastischen auch ein viskoses Materialverhalten zu vermuten, welches bereits bei Aktuatoren basierend auf Elastosil RT 625 von Kofod dokumentiert wurde [96]. Um die viskoelastischen Eigenschaften der DE-Filme beurteilen zu können, werden Kriech- und Relaxationsversuche (vgl. Kapitel 3.2.2) durchgeführt.

Bei den Kriechversuchen werden sieben Filme innerhalb 1,5 Sekunden auf  $\lambda_1 = 1,6$  gedehnt und die Last kraftgeregelt konstant gehalten. Die Filme werden nach 24-stündiger Relaxation bei  $\lambda_1 = 1,4$  erneut hinsichtlich ihres Kriechverhaltens untersucht.

In Abbildung 4.18 sind die gemittelten Kurven der Versuche dargestellt. Die ermittelten Retardationszeiten<sup>21</sup> der Kriechversuche liegen bei  $\tau_{C 1,4} = 9$  s, bzw.  $\tau_{C 1,6} = 12$  s. Die in Abbildung 4.19 dargestellten Relaxationsversuche der DE-Filme bei einer konstanten Streckung von  $\lambda_1 = 1,6$  zeigen eine Zeitkonstante<sup>22</sup> von etwa  $\tau_{R 1,6} = 4$  s.

Die Retardationszeit und die Zeitkonstante können für eine Modellierung des zeitabhängigen mechanischen Materialverhaltens verwendet werden. Dies geschieht nicht im Rahmen dieser Arbeit, jedoch bietet das in Abschnitt 3.3.1 beschriebene

---

<sup>21</sup> Retardationszeit: Zeit in der ein exponentiell wachsender Prozess auf 63,2 % des Endwertes ansteigt

<sup>22</sup> Zeitkonstante: Zeit in der ein exponentiell sinkender Prozess auf 36,8 % des Ausgangswertes sinkt

Materialmodell nach Eils [85] bereits die Möglichkeit einer Implementierung des zeitabhängigen Materialverhaltens.

Beide Versuche zeigen, dass der DE-Film eine zeitabhängige Dehnungsantwort auf eine konstante mechanische Last ausgibt. Bei der Relaxation stellt sich ein nahezu stationärer Zustand bei  $\tau_{R\ 1,6} = 4$  s ein. Kriechvorgänge können erst nach  $\tau_{C\ 1,4} = 9$  s, bzw.  $\tau_{C\ 1,6} = 12$  s als stationär betrachtet werden. Für die Auslegung eines DEA ist also je nach Richtung der Dehnungsänderung des DE-Films erst nach diesen Zeiten ein gleichbleibender Zustand des Aktors zu erwarten.

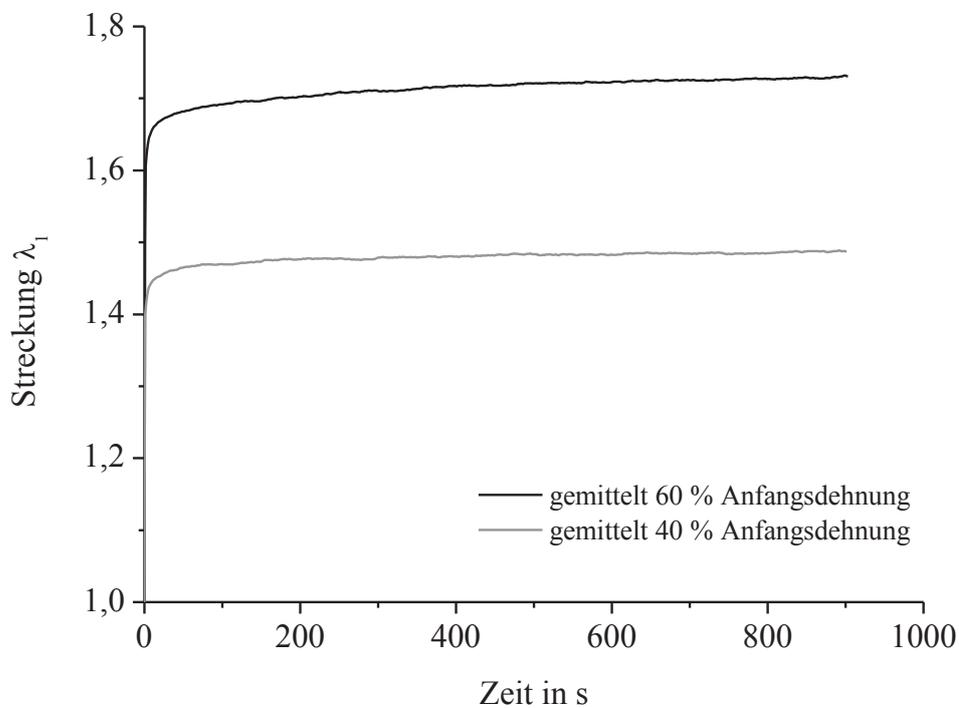


Abbildung 4.18 Gemittelte Kurven aus Kriechversuchen mit je 7 DE-Filmen bei unterschiedlichen Anfangsdehnungen

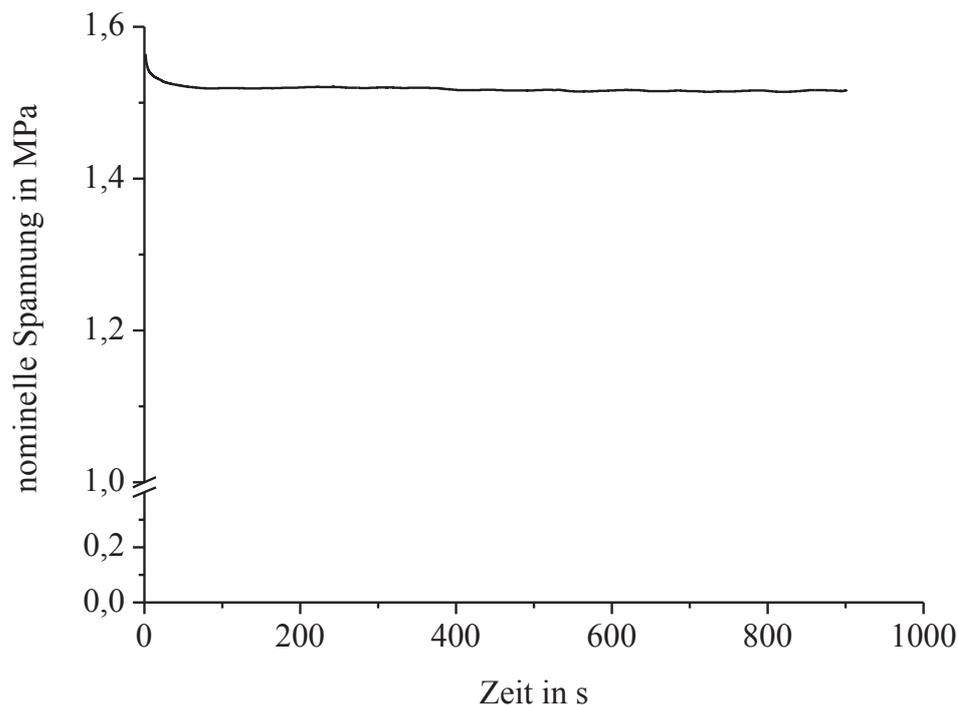


Abbildung 4.19 Gemittelte Kurve aus Relaxationsversuchen DE-Filme bei konstanter Streckung von  $\lambda_1 = 1,6$

### Elektrische Eigenschaften

Hinsichtlich der elektrischen Aktivierung der DE-Filme sind die Betriebsgrenzen des Materials zu ermitteln. Da das Versagen des DE-Films von elektrischen Durchschlägen ausgeht, die zu mechanischem Versagen führen, werden die in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Durchschlagsversuche durchgeführt. Elf DE-Filme werden bis zum elektrischen Durchschlag getestet. Aus den gemessenen Durchschlagsspannungen  $V_B$  werden die Feldstärke  $E_{B,0}$  und die Spannung  $V_{B,0}$  für die Filme mittels Gleichungen (3.2) und (3.3) berechnet. Tabelle 4.5 zeigt die Messdaten  $V_{B,0}$  und  $E_{B,0}$ , sowie Mittelwert und Standardabweichung der Messung.

Tabelle 4.5 Ergebnisse der elektrischen Durchschlagmessungen der DE-Filme, nach DIN EN 60243-2 [74]

Probennummer	$V_B$ in kV	$E_{B,0}$ in V/ $\mu\text{m}$	$V_{B,0}$ in kV
D1-120	7,80	68,25	8,19
D2-120	8,00	70,00	8,40
D3-120	7,60	66,50	7,98
D4-120	7,75	67,81	8,14
D5-120	6,40	56,00	6,72
D6-120	6,10	53,38	6,41
D7-120	6,50	56,88	6,83
D8-120	7,80	68,25	8,19
D9-120	6,30	55,13	6,62
D10-120	7,40	64,75	7,77
D11-120	7,30	63,88	7,67
Mittelwert	7,18	62,80	7,54
Standardabweichung	0,71	6,20	0,74

Aus den Mittelwerten  $\bar{E}_{B,0} = 62,80 \text{ V}/\mu\text{m}$  und  $\bar{V}_{B,0} = 7,54 \text{ kV}$  kann mit Hilfe von Gleichung (3.5) für jede Vorstreckung des DE-Films die maximale Betriebsspannung berechnet werden.

Im Anschluss an die Durchschlagversuche werden diese im REM untersucht. Abbildung 4.20 zeigt einen solchen elektrischen Durchschlag. In der Mitte des Bildes ist dieser als ein schwarzes „Nadelloch“ mit einem Durchmesser von etwa  $50 \mu\text{m}$  zu erkennen. Um den Durchschlag herum ist die Elektrode stark beschädigt.

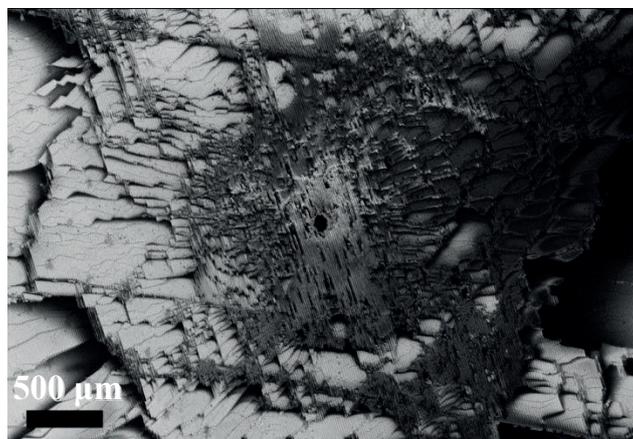


Abbildung 4.20 REM-Aufnahme eines elektrischen Durchschlags in einem DE-Film

Abhängig von der Intensität und Häufigkeit dieser Durchschläge ist der DE-Film in den meisten Fällen noch weiter nutzbar. Eine Erklärung für die weiterhin gegebene Funktionsfähigkeit liegt in der starken Beschädigung der Elektrode um den Durchschlag (siehe Abbildung 4.20). Vermutlich ist der beschädigte Bereich nicht mehr ausreichend leitfähig, so dass diese Bereiche inaktiv bleiben. Dies ist bereits von Benslimane et al. [47] und Jones et al. [97] beobachtet worden.

### **Elektromechanische Eigenschaften**

Um die elektromechanischen Eigenschaften des DE-Films zu untersuchen, wurden neun DE-Filme, wie in 3.2.3 beschrieben, aktiviert. Die maximale Betriebsspannung ist laut Gleichung (3.5) von der Vorstreckung abhängig. Die maximale Vorstreckung  $\lambda_{\text{pre}}$  für die Aktivierungs-Dehnungsversuche ergibt sich laut Tabelle 3.1 und Gleichung (3.1) zu  $\lambda_{\text{pre}} = 1,73$ . Nach Gleichung (3.5) darf die maximale Spannung also  $V_{\text{B,B}} = 4,36$  kV betragen.

Bei Aktivierungs-Dehnungs-Versuchen, die mit Spannungen über 4 kV durchgeführt werden, treten bereits elektrische Durchschläge auf. Insbesondere im Bereich der Einspannung (siehe Abbildung 3.7) sind diese zu verzeichnen. Hier wird der DE-Film durch die Klemmkräfte des Prüfportals (siehe Abbildung 3.7) stark zusammengedrückt. Die Dicke  $t_{\text{DE}}$  des Films wird reduziert und somit sinkt auch die Durchschlagsfestigkeit (vgl. Kapitel 3.2.4).

Um frühzeitiges Versagen der Filme im Bereich der Klemmung auszuschließen, wird die Aktivierungsspannung in LabView auf 3,75 kV begrenzt. Die Umrechnung der Stellspannungen aus Labview auf Basis einer Kalibrierung des HV-Netzteils (siehe Anhang B) führt zu einer realen maximalen Spannung von  $V_{\text{act,max}} = 3,91$  kV. Für die Auswertung und Darstellung der Daten wird stets die reale, kalibrierte Spannung verwendet. Abbildung 4.21 zeigt die Mittelwerte der Ergebnisse aus neun elektromechanischen Versuchen für drei Vordehnungen  $s_{\text{pre}}$  bei einer Spannung von 3,91 kV. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Aktivierungsdehnung  $s_{\text{act}}$  von der Vordehnung.

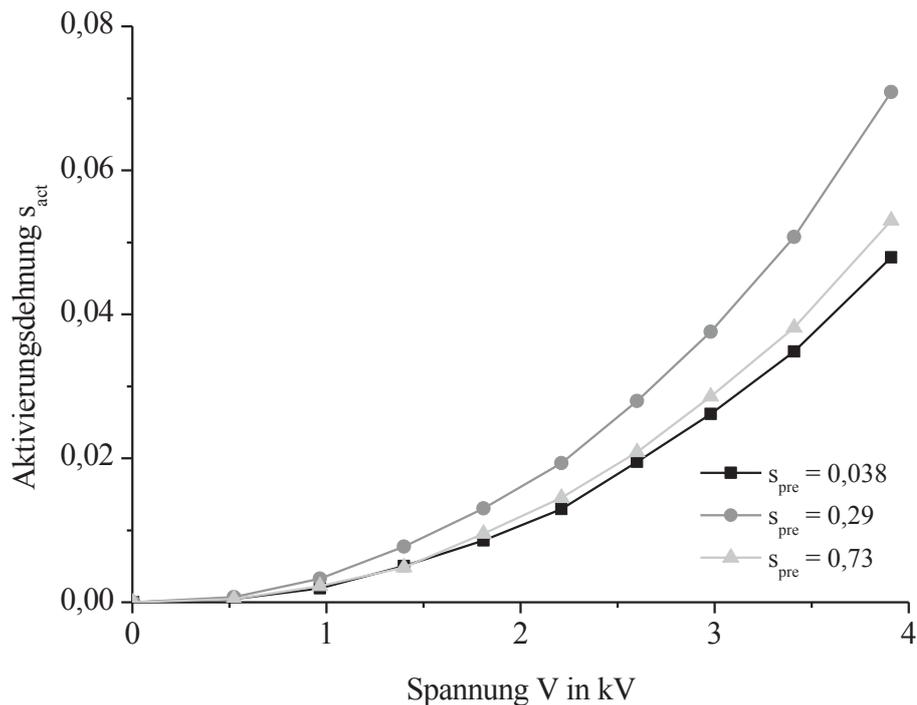


Abbildung 4.21 Gemittelte Daten elektrischer Aktivierungsversuche bei drei Vordehnungszuständen der DE-Filme bei 3,91 kV

Trägt man die gemittelten Aktivierungsdehnungen über Spannung und Vordehnung auf, zeichnet sich bei  $\lambda_{pre} \sim 1,4$  ein Bereich maximaler elektrischer Aktivierungsdehnung ab (siehe Abbildung 4.22). Die hier gemessenen maximalen Aktivierungsdehnungen liegen bei  $s_{act} = 0,07$ .

Für die Konstruktion eines DEA ist daher eine maximale Dehnung von  $s_{act} = 0,07$  bei einer elektrischen Spannung von  $V_{act,max} = 3,91$  kV zu erwarten. Dies gilt für eine Vorstreckung des DE-Films von  $\lambda_{pre} \sim 1,4$  bzw. einer Vordehnung von  $s_{pre} \sim 0,4$ . Weitere Betriebszustände des DE-Films können aus Abbildung 4.22 entnommen werden.

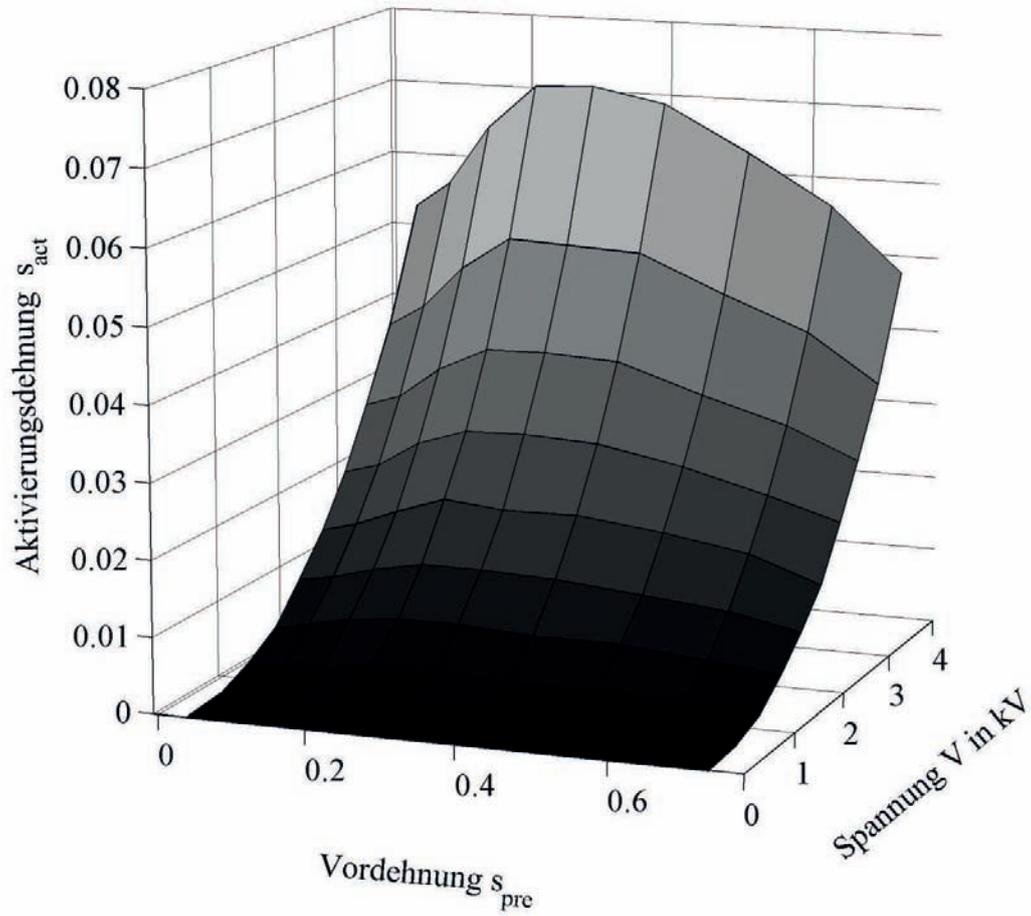


Abbildung 4.22 Gemittelte Daten elektrischer Aktivierungsversuche in Abhängigkeit von der mechanischen Vordehnung der DE-Filme

#### **4.4.2 Blattfeder**

Die Auswahl des Materials für die Blattfeder sollte hinsichtlich der im Betrieb zu erwartenden Lasten erfolgen. Um hohe Stellkräfte unter Aktivierung des DE-Films zu erreichen und den statischen Lasten im Betrieb standzuhalten, sollte die Blattfeder eine möglichst hohe Steifigkeit aufweisen, also ein Werkstoff mit hohem Elastizitätsmodul eingesetzt werden.

Ein Federelement des Blattfederaktors ist als aufrecht stehende, zylindrisch gekrümmte Schale anzusehen. Unter Kopplung mit dem DE-Film wird diese zusammengedrückt (vgl. Abbildung 4.6 c)), was große Stellwege und somit auch große Deformationen der Blattfeder ermöglicht. Somit treten bei hohen Auslenkungen der Blattfeder, infolge der Biegung, lokal hohe Dehnungen auf. Es entstehen hohe Zug- und Druckspannungen, denen der Werkstoff standhalten muss.

Vom Einsatz elektrisch leitfähiger Werkstoffe wie Metallen ist abzusehen, da diese von den DE-Filmen aufwendig elektrisch isoliert werden müssten. Andernfalls besteht das Risiko von elektrischen Überschlügen auf die Federstruktur.

Denkbar sind Werkstoffe, die folgende materialspezifische Voraussetzungen erfüllen:

- Hohen Elastizitätsmodul  $> 6 \text{ GPa}$ ,
- Geringe Dichte,
- Linear-elastisches Dehnungsverhalten (Streckdehnung  $> 1 \%$ ),
- Hohe Bruchdehnung (je nach Form der Blattfeder bis  $> 3 \%$ ),
- Nicht elektrisch leitfähig.

Tabelle 4.6 zeigt eine Auswahl an Werkstoffen, die hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften als Blattfeder für den Aktor eingesetzt werden können.

Tabelle 4.6 Übersicht geeigneter Werkstoffe und deren mechanischen Eigenschaften für den Einsatz im Blattfederaktor. Die Kennwerte der Faserverstärkten Kunststoffe beziehen sich auf die Eigenschaften eines unidirektionalen Aufbaus in Richtung der Faserorientierung bei einem Faservolumengehalt von 50 %, [98-102]

Werkstoff	Dichte	Steifigkeit	Bruchdehnung	elektr. leitfähig
Federstahl 1.4310	7,95 kg/dm <sup>3</sup>	190 GPa	40 %	ja
Kohlenstofffaser- verstärkte Epoxidharze (CFK)	1,5 kg/dm <sup>3</sup>	115-240 GPa	1,8 %	ja
Glasfaserverstärkte Epoxidharze (GFK)	1,8 kg/dm <sup>3</sup>	38 GPa	3-5 %	nein
Polymerfaserverstärkte Thermoplaste	~1 kg/dm <sup>3</sup>	45 GPa	3,6 %	nein
Naturfaserverstärkte Thermoplaste	~1,4 kg/dm <sup>3</sup>	5-6 GPa	2-10 %	nein
Kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste	~1,2 kg/dm <sup>3</sup>	bis 6,5 GPa	2-8 %	nein

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften eignet sich der Federstahl, jedoch sind die hohe Dichte und die elektrische Leitfähigkeit ausschließende Kriterien für die Verwendung.

Der Einsatz Endlosfaserverstärkter Kunststoffe (FVK) mit Fasern aus Kohlenstoff, Glas, Aramid oder anderen Thermoplasten ist von Seiten der mechanischen Eigenschaften möglich. Bei der Auslegung von Blattfedern aus FVK müssen jedoch dehnungsbezogene Versagenkriterien bei starken Durchbiegungen der Blattfedern berücksichtigt werden. FVK mit Glas- oder Thermoplastfasern zeigen als Werkstoff für die Blattfeder hohes Potenzial hinsichtlich der Bruchdehnung und der spezifischen Steifigkeit. Einzig das stark temperaturabhängige mechanische Verhalten von Thermoplast-Thermoplast FVK [103] ist für den Temperatureinsatzbereich im Automobil kritisch zu betrachten und muss im Einzelfall näher untersucht werden.

In dieser Arbeit erfolgt eine beispielhafte Auslegung einer Blattfeder aus einem unidirektionalen<sup>23</sup> Glasfaser-Epoxidharz-Verbund (GFK) für eine

<sup>23</sup> Unidirektionaler Faserverbundwerkstoff:

Ausrichtung der Fasern in einem Verbund in eine Richtung

Automobilsitzfläche. Die Kombination dessen Materialeigenschaften aus Tabelle 4.6 zeigen großes Potenzial für diese Anwendung. GFK ist nicht elektrisch leitfähig, weist einen Elastizitätsmodul  $> 6$  GPa und Bruchdehnungen größer als 3 % auf. Zudem trägt die geringe Dichte des Werkstoffs zu einem niedrigen Gewicht des Aktors bei.

Die Form der Blattfeder, als wesentliches Bauteil des Aktors, kann je nach Forderung angepasst und in die nachfolgend beschriebenen Modelle eingefügt werden. Sollten die Blattfedern Bestandteil einer sichtbaren Fläche, Sichtzonen A oder B (vgl. Abbildung 1.3) sein, so können sie an die gewünschte visuelle Erscheinung angepasst werden und trotzdem ihre technische Funktion als Spannelement im Aktor erfüllen.

Für den in Anhang G beschriebenen Demonstrator und für die qualitativen Versuche an Blattfederaktoren in Abschnitt 4.4.6 wird ein Polyamid12 (Grilamid LV-3H) von der Firma EMS Chemie AG, verwendet. Grilamid ist ein mit 30%-Kurzglasfasern verstärktes Polyamid12 (PA12) [100]. Dies zeigt im Labormaßstab eine einfache Herstellung der gewünschten Blattfederform (Abbildung 6.16). Für den Einsatz in langen Stützarmen aus Blattfederaktoren ist das PA12 nur dann geeignet, wenn die auftretenden Lasten im Betrieb deutlich geringer ausfallen als in [87] und [16] gefordert.

### 4.4.3 Analytisches Modell eines Blattfederaktors

Zur Beschreibung des Verhaltens des Blattfederaktors wird ein Ersatzmodell entwickelt. Für die Modellbildung wird ein idealisiertes Modell des Blattfederaktors, bestehend nur aus DE-Film und Blattfeder, herangezogen. Koppel- und Kontaktelemente werden in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Der idealisierte Aktor wird als hochkant stehend und statisch bestimmt gelagert angenommen (siehe Abbildung 4.23 a)). Zur Vereinfachung wird nur die Veränderung der Länge des Aktors  $x_m$  berechnet. Somit kann der Gleichgewichtszustand nach Montage, aber auch die Längenänderung in Folge elektrischer Aktivierung ermittelt werden. DE-Film und Blattfeder werden in dem Ersatzmodell durch ideale Federn dargestellt (siehe Abbildung 4.23 b)). Viskose und plastische Anteile der Werkstoffe, sowie die Gewichtskräfte werden hierbei vernachlässigt.  $F_{act}$  entsteht unter der Annahme, dass der elektrostatische Druck durch elektrische Aktivierung des DE-Films vollständig in axiale Richtung  $x_m$  umgewandelt wird.

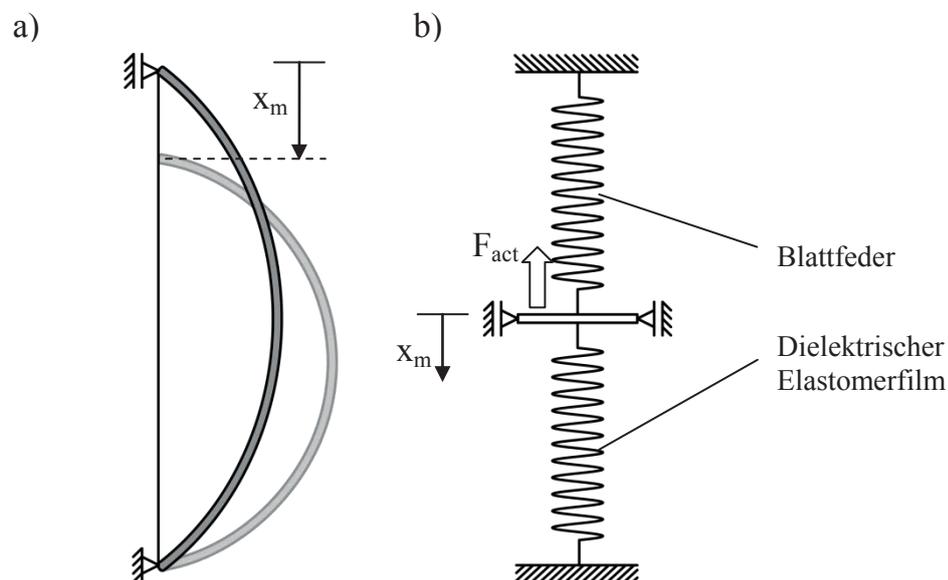


Abbildung 4.23 a) Schematische Darstellung eines Blattfederaktors beim Kontrahieren in den mechanischen Gleichgewichtszustand ohne elektrische Aktivierung, b) Federersatzmodell des Blattfederaktors

Der Freischnitt (Abbildung 4.24) am Kräfteangriffspunkt des Federersatzmodells liefert zusammen mit der Gleichgewichtsbedingung (4.2) das Modell für die Aktorauslenkung  $x_m$  in jedem quasistationären Zustand:

$$\Sigma F_x = 0. \quad (4.2)$$

Die im Freischnitt eingetragenen Kräfte  $F_{DE}$  und  $F_{BF}$  sind mit mathematischen Modellen des mechanischen Verhaltens der beiden Elemente zu beschreiben. Die Auslenkung  $x_m$  bezieht sich auf den Zustand in dem der DE-Film vorgespannt auf die unbelastete Blattfeder montiert wird, noch bevor das System den Gleichgewichtszustand anstrebt.

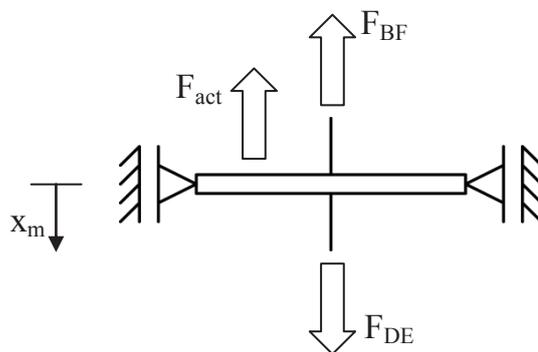


Abbildung 4.24 Freischnitt des Federersatzmodells eines Blattfederaktors

Aus Gleichung (4.2) folgt also zur Berechnung des Gleichgewichtszustands:

$$F_{DE} - F_{BF} - F_{act} = 0. \quad (4.3)$$

Zum Zeitpunkt der Montage ist die Länge der unbelasteten Blattfeder  $l_{0,BF}$ . Die Vorstreckung des DE-Films wird durch  $\lambda_{pre}$  definiert, unter der Annahme, dass der DE-Film auf die Länge der unbelasteten Blattfeder  $l_{0,BF}$  gespannt und an deren Kanten fixiert wird:

$$\lambda_{pre} = \frac{l_{0,BF}}{l_{0,DE}} \quad (4.4)$$

Während die mechanische Spannung der Blattfeder direkt in Abhängigkeit der Koordinate  $x_m$  beschrieben wird, ist die Streckung  $\lambda_1$  des DE-Films:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{pre} \cdot l_{0,DE} - x_m}{l_{0,DE}} \quad (4.5)$$

Um die Kraftantwort des DE-Films von  $x_m$  abhängig darzustellen, muss zunächst das Materialverhalten mit (3.13) beschrieben werden. Die Parameter  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  und  $C_{30}$  werden aus den Daten der Zugversuche (Anhang C, Abbildung 6.8) bestimmt. Hierzu werden die Daten aus dem letzten Zyklus der zyklischen Zugversuche gemittelt und mittels der Software Origin von National Instruments mit dem Yeoh-Modell (3.13) gefittet. Die gemittelten Daten und der Yeoh-Fit sind in Abbildung 4.25 dargestellt. Die Materialparameter  $C_i$  des Yeoh-Modells sind in Tabelle 4.7 aufgeführt.

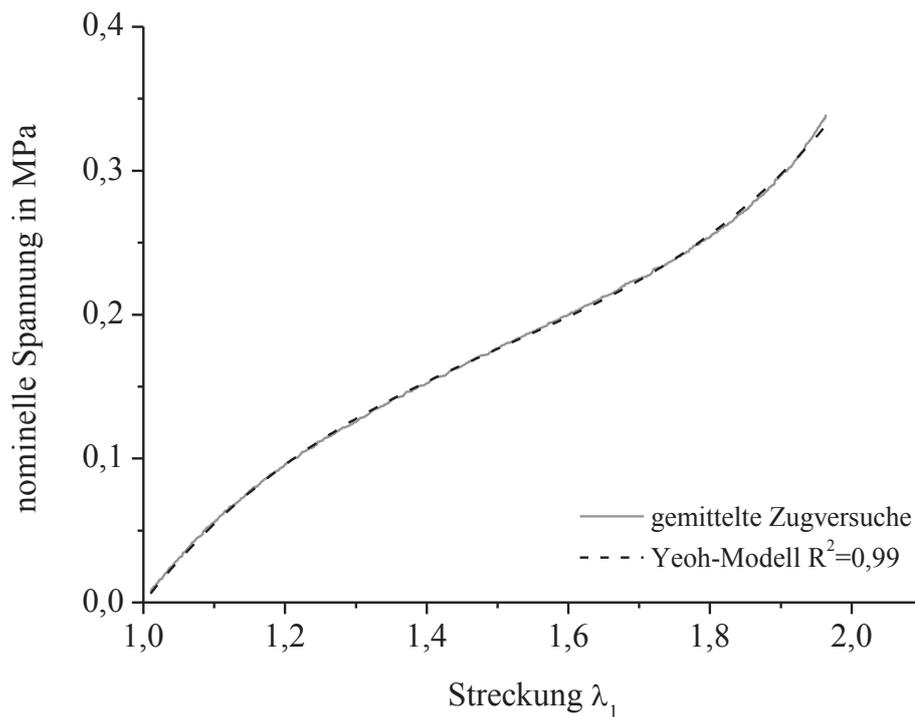


Abbildung 4.25 Gemittelte Daten aus dem letzten Zyklus der Zugversuche und nichtlinearer Fit mit dem hyperelastischen Yeoh-Modell [84]

Tabelle 4.7 Materialparameter für das Yeoh-Modell nach Kurvenfit der gemittelten Zugversuche des DE-Films

Materialparameter	Wert in Mpa
$C_{10}$	0,07867
$C_{20}$	-0,00830
$C_{30}$	0,00407

Für die Berechnung der Kraft  $F_{DE}$  aus dem nominellen Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird die Querschnittsfläche  $A_{0,DE}$  aus der Dicke  $t_{0,DE}$  und der Breite  $b_{0,DE}$  des DE-Films bestimmt:

$$A_{0,DE} = t_{0,DE} \cdot b_{0,DE} \quad (4.6)$$

$F_{DE}$  wird unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche  $A_{0,DE}$  und der Anzahl der Lagen  $n_{DE}$  des DE-Films errechnet:

$$F_{DE} = 2 \left( \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^3} \right) \left( C_{10} - 2 C_{20} \left( \lambda_1^2 - \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) + 3 C_{30} \left( \lambda_1^2 - \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right)^2 \right) n_{DE} A_{0,DE} \quad (4.7)$$

Die Kraft  $F_{act}$  kann nach Gleichung (2.2) in Bezug auf den Vordehnungszustand und unter Berücksichtigung der veränderlichen Querschnittsfläche  $A_{DE}$ , der aktuellen Filmdicke  $t_{DE}$  sowie der Lagenzahl  $n_{DE}$  ermittelt werden:

$$F_{act} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left( \frac{V}{t_{DE}} \right)^2 n_{DE} A_{DE}. \quad (4.8)$$

Die Abhängigkeit der Filmdicke  $t_{DE}$  und der Querschnittsfläche  $A_{DE}$  von der Streckung  $\lambda_1$  ist, nach den Gleichungen (2.6), (2.7), (2.8) und (2.9):

$$t_{DE} = t_{0,DE} \frac{1}{\lambda_1}, \quad (4.9)$$

$$A_{DE} = b_{0,DE} t_{DE}. \quad (4.10)$$

Die Berechnung der Kraft durch die Aktivierung folgt aus Gleichungen (4.8), (4.9) und (4.10):

$$F_{act} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{t_{0,DE}^2} \lambda_1 b_{0,DE}, \quad (4.11)$$

Aus den Gleichungen (4.3), (4.5), (4.6), (4.7) und (4.11) folgt zur Berechnung des Gleichgewichtszustands eines einzelnen Blattfederaktors  $x_m$ :

$$2 \left( \frac{l_{0,BF} - x_m}{l_{0,DE}} - \frac{l_{0,DE}^3}{(l_{0,BF} - x_m)^3} \right) \cdot \left( C_{10} - 2 \cdot C_{20} \cdot \left( \frac{(l_{0,BF} - x_m)^2}{l_{0,DE}^2} + \frac{2l_{0,DE}}{l_{0,BF} - x_m} - 3 \right) \right) \cdot n_{DE} \cdot A_{0,DE} \\ - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V^2 (l_{0,BF} - x_m) n_{DE} b_{0,DE}}{t_{0,DE} l_{0,DE}} - F_{BF}(x_m) = 0 \quad (4.12)$$

Die Bestimmung der genauen Kraft-Weg-Kennlinie der Blattfeder  $F_{BF}(x_m)$  sollte in einer Versuchsanordnung ähnlich Abbildung 4.26 erfolgen. Über geeignete mathematische Funktionen kann die Kennlinie daraufhin beschrieben werden.

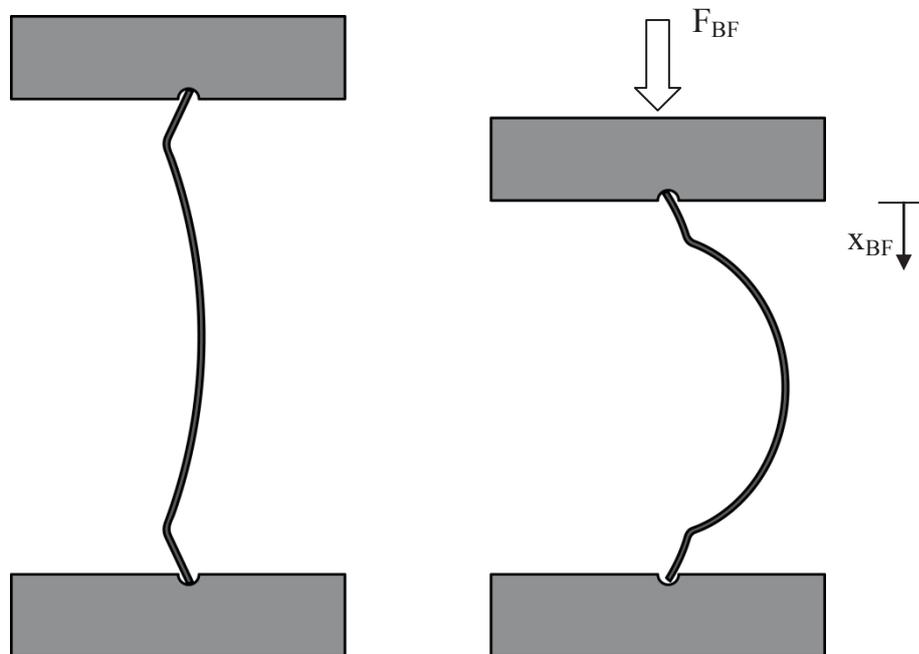


Abbildung 4.26 Schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Kraft-Weg-Kennlinie einer Blattfeder für Blattfederaktoren

Für die erste Auslegung der Blattfeder kann der in Abbildung 4.26 dargestellte Versuch virtuell mit der FEM durchgeführt werden. Die damit erzeugte Kraft-Weg-Kennlinie wird ebenso mathematisch angepasst und kann im Modell der Gleichung (4.12) zur Bestimmung von  $x_m$  eingesetzt werden.

Befindet sich der Blattfederaktor im Gleichgewichtszustand (Abbildung 4.7) kann die Montage einer Polsterfläche erfolgen. Um das Modell mit der Kraft-Weg-Charakteristik der angekoppelten Polsterfläche zu erweitern, kann optional ein weiterer Federterm  $F_{SF}(x_m)$  eingeführt werden. Dieser würde vom in (4.12) beschriebenen Kräftegleichgewicht subtrahiert.  $F_{SF}(x_m)$  kann jedoch nur an einem physikalischen Bauteil ermittelt werden oder aus FEM-Simulationen der Polsterfläche hervorgehen.

#### **4.4.4 Arme aus Blattfederaktoren zur Stützung und Verstellung einer Fläche**

Zum Stützen und Verstellen einer Fläche werden die Blattfederaktoren aneinander gekoppelt. Der Verstellwinkel  $\beta$  (siehe Abbildung 4.27 links) dient folgend der Beschreibung des Verhaltens eines frei stehenden Aktors bei elektrischer Aktivierung. Der Winkel ist von der Vorstreckung  $\lambda_{pre}$  und der Lagenanzahl  $n_{DE}$  des DE-Films, sowie von Dimension und Steifigkeit der Blattfeder abhängig (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Aneinanderreihung mehrerer Blattfederaktoren bewirkt mit zunehmender Anzahl  $m$  durch das Prinzip der Superposition steigende absolute Verstellwinkel (4.13). Dies hat zur Folge, dass die horizontale Auslenkung mit zunehmendem Abstand vom Lagerpunkt ansteigt (vgl. Abbildung 4.27 rechts).

$$\beta_1 < \beta_2 < \dots < \beta_m \quad (4.13)$$

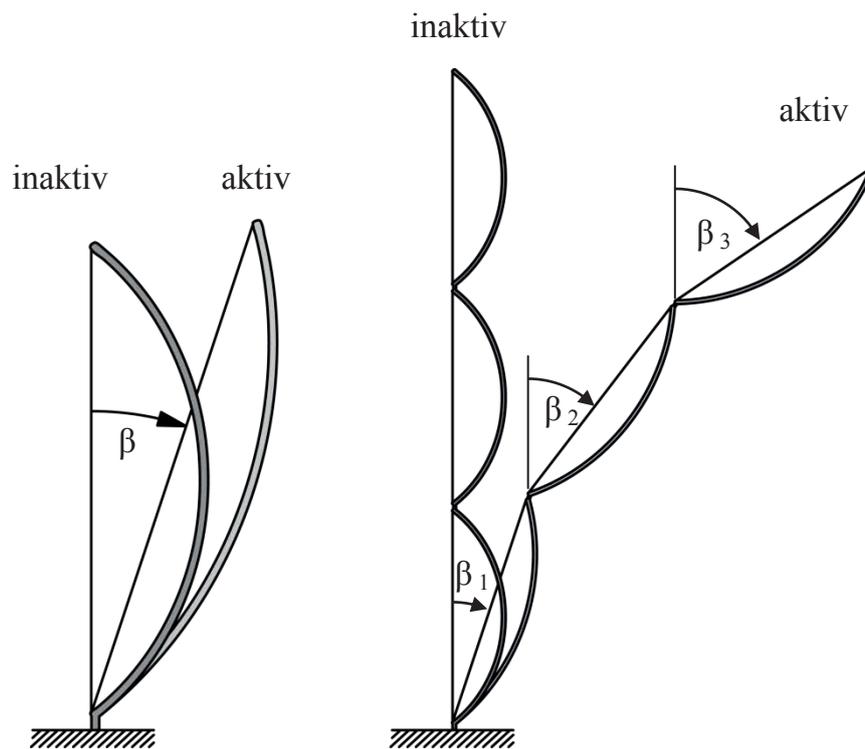


Abbildung 4.27 Verstellwinkel der Blattfederaktoren unter elektrischer Aktivierung, links: einzelner Blattfederaktor, rechts: zu Armen gekoppelte Blattfederaktoren

Die Kopplungen der Blattfedermodule über Koppelemente sind flach, kurz und mit wenigen Einzelbauteilen auszuliegen. Alle zum Betrieb notwendigen Funktionen:

- Befestigung der DE-Filme an der Blattfeder
- Kontaktierung der DE-Filme
- Kopplung der Module aneinander
- Anbindung an die Polsterfläche

werden in die Kopplungselemente integriert. Abbildung 4.28 zeigt exemplarisch, wie eine solche Kopplung für den entwickelten Demonstrator (siehe Anhang G) aussieht. Eine Positionsänderung der Blattfederaktoren zueinander ist über die Veränderung der Geometrie der Koppelemente zu erreichen. Die Arme sind in Länge, Richtung und Anzahl der Aktoren anpassbar. Die Kopplung ist zudem als lösbare

Schraubverbindung ausgeführt, was eine Veränderung oder den Austausch einzelner Module und Bauelemente zulässt. Eine vollständige Demontage ist ebenfalls gewährleistet.

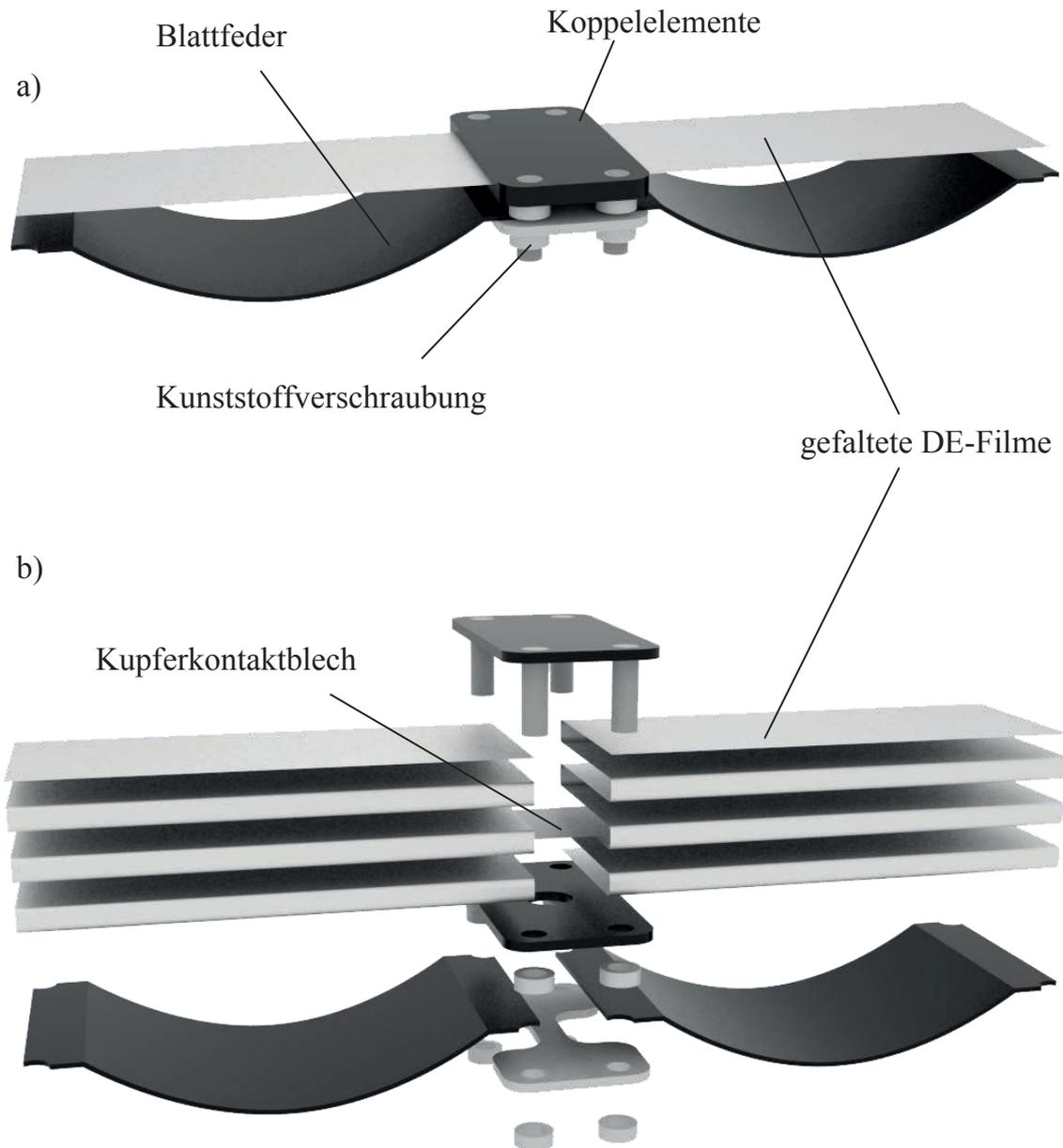


Abbildung 4.28 Darstellung der Schnittstelle zweier Blattfederaktoren, gekoppelt über Kunststoffplatten zur Kontaktierung und Klemmung des DE-Films in  
a) Zusammenbau b) Explosionsdarstellung

Die Länge sowie die Anordnung der Arme zur Stützung einer Polsterfläche richten sich nach der Geometrie der Polsterfläche und den Befestigungsmöglichkeiten im Fahrzeug. Aus dem modularen Aufbau ergibt sich ein hohes Potenzial zur Gestaltung unterschiedlicher Flächen.

Die Ermittlung von Position und Anzahl der Arme erfolgt in dieser Arbeit anhand eines Arbeitsmodells der Polsterfläche aus Polystyrol im Maßstab 1:1. Drei Arme mit jeweils fünf verbundenen Blattfederaktoren stützen den Bereich der Rückenlehne. Weitere drei Arme aus zwei Aktormodulen sind unterhalb der Fläche angeordnet (siehe Abbildung 4.29).

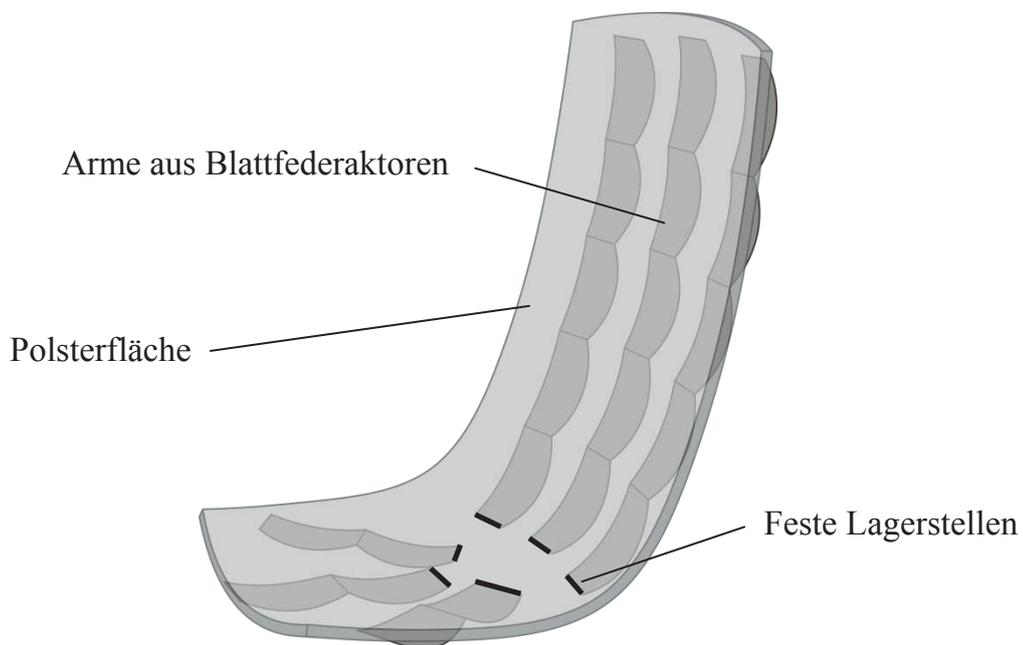


Abbildung 4.29 Position und Anzahl von Armen aus Blattfederaktoren zur Stützung und Verstellung einer Fläche für einen Fahrzeugsitz

Durch Steuerung der elektrischen Aktivierung jedes einzelnen Blattfederaktors, kann eine Vielzahl von Sitzpositionen eingestellt werden (siehe Abbildung 4.30). Unter der Annahme einer maximalen Aktivierungsdehnung des DE-Films von  $s_{act} = 5\%$  können je nach Dimensionierung Stellwinkel von  $\beta = 1-3^\circ$  mit einem einzelnen Blattfederaktor erzielt werden.

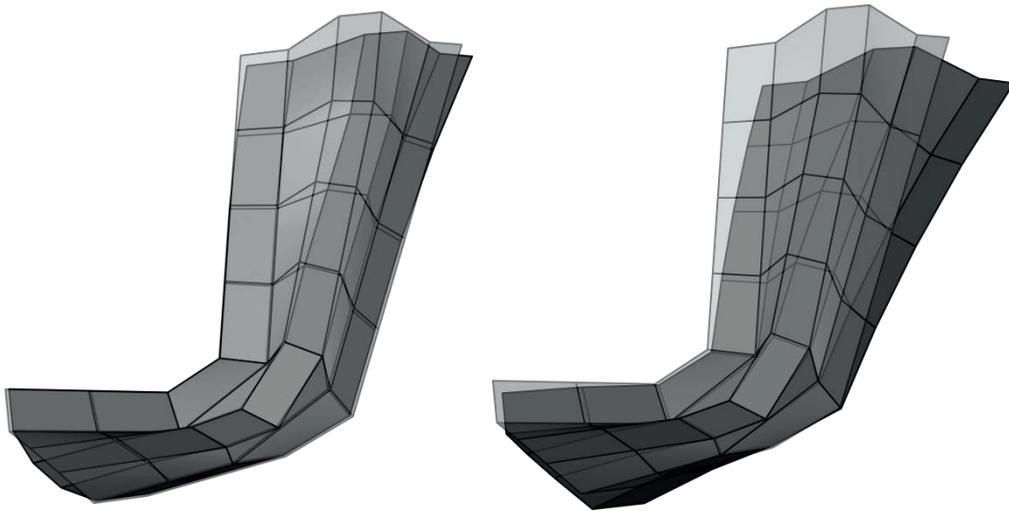


Abbildung 4.30 Schematische Darstellung verschiedener erzielbarer Sitzpositionen einer von Blattfederaktoren gestützten Fläche bei Aktivierung der einzelnen Aktoren

Je nach Position wird hierbei die Dicke der jeweiligen Blattfeder  $t_{DE}$ , die Anzahl der DE-Lagen  $n_{DE}$  und die Vorstreckung  $\lambda_{pre}$  eingestellt. Jede Variation der Freiheitsgrade verändert das System „Blattfederaktor“, wobei auch gegenläufige Effekte zu beobachten sind. Die Erhöhung der Blattfederdicke  $t_{DE}$  bewirkt:

- Aufnahme statischer Lasten  $F_{max} \uparrow$ ,
- Anzahl der Lagen zur Komprimierung der Blattfeder  $n_{DE} \uparrow$ ,
- Gewicht des Blattfederaktors  $m_{BA} \uparrow$ ,
- Mechanische Dehnungen im Blattfederwerkstoff  $\uparrow$ .

Bei steigender Lagenzahl  $n_{DE}$  sind die Wirkungen:

- Komprimierung der Blattfeder  $\uparrow$ ,
- Verstellwinkel bei Aktivierung  $\uparrow$ ,
- Aufnahme statischer Lasten  $F_{max} \uparrow$ ,
- Gewicht des Blattfederaktors  $m_{BA} \uparrow$ ,
- Dehnungen im Blattfederwerkstoff  $\uparrow$ .

Aus der Erhöhung der Vorstreckung des DE-Films  $\lambda_{\text{pre}}$  folgt:

- Komprimierung der Blattfeder  $\uparrow$ ,
- Anzahl der Lagen zur Komprimierung der Blattfeder  $n_{\text{DE}} \downarrow$ ,
- Gewicht des Blattfederaktors  $m_{\text{BA}} \downarrow$ ,
- Verstellwinkel bei Aktivierung  $\downarrow$ .

Ein optimaler Betriebszustand ist demnach nicht einzustellen. Zur Auslegung der Blattfederaktoren muss vorerst die Tragfähigkeit der kritischen Größe „mechanische Belastung“ sichergestellt sein. Die konstruktive Auslegung erfolgt daher mit der FEM.

#### 4.4.5 Auslegung mit der Finite Elemente Methode

Zur Auslegung der Arme aus Blattfederaktoren, bezogen auf die in Abbildung 4.29 gezeigte Konstellation, wird die FEM eingesetzt. Die Beschreibung des DE-Films erfolgt mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Modell von Eils [85].

Abbildung 4.31 zeigt die in dieser Arbeit untersuchte Geometrie eines Blattfederaktors im Moment der Montage des DE-Films. Der DE-Film ist vorgespannt, während die Blattfeder noch nicht komprimiert ist. Eine vertikale Erhöhung der Montagegestelle zwischen DE-Film und Blattfeder um 15 mm, ersetzt in der Simulation die erhöhte Montage durch die Koppellemente. Hierdurch steigen die Rückstellkräfte der DE-Filme auf die Feder aufgrund der Hebelwirkung.

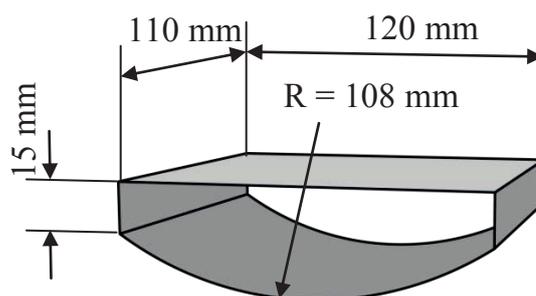


Abbildung 4.31 Maße des dreidimensionalen Flächenmodells des Blattfederaktors für die Finite Elemente Simulation

Für die Blattfeder und die Flächen der Koppellemente wird ein unidirektionaler FVK aus E-Glasfasern und Epoxidharz mit einem Faservolumenanteil von  $v_F = 50 \%$  mittels eines orthotropen Materialmodells modelliert. Aufgrund der geringen Materialdicke der Blattfeder, im Vergleich zu Breite und Länge kann die Feder in Abaqus über vierknotige, quadratische Schalenelemente vom Typ „S4“ dargestellt werden. Das Materialmodell kann daher auf den ebenen Spannungszustand reduziert werden [76]:

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ 12 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/Y_{1,BF} & -\nu_{12}/Y_{1,BF} & 0 \\ -\nu_{12}/Y_{1,BF} & 1/Y_{2,BF} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Die ingenieurmäßigen Konstanten zur Berechnung der Steifigkeitsmatrix mittels Gleichung (4.14) sind Tabelle 4.8 zu entnehmen. Für die Modellierung von transversalem Schub durch Biegebelastungen, werden zu den Konstanten in (4.14) noch die Schubmoduln  $G_{13}$  und  $G_{23}$  benötigt [76]. Die Berechnung aller ingenieurmäßigen Konstanten des FVK erfolgt durch das Berechnungsprogramm Compositor [98].

Tabelle 4.8 Ingenieurmäßige Materialkonstanten eines unidirektionalen Glasfaser-Epoxidharz-Verbunds bei einem Faservolumenanteil von 50 % [98]

$Y_{1,BF}$	$Y_{2,BF}$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
38175 MPa	6406 MPa	0,285	2288 MPa	2288 MPa	2383 MPa

Die Modellierung ist in die Berechnungsschritte *Relax* und *Activation* unterteilt. Im Schritt *Relax* erfolgt die Modellierung der Entspannung zum mechanischen Gleichgewichtszustand eines vorgespannten DE-Films mit einer Blattfeder. In *Activation* wird das DE aktiviert und der modellierte Arm somit verstellt.

Aufgrund der Geometrie der Blattfeder ist eine nichtlineare Antwort der Feder in Folge der Kompression zu erwarten. Der maximale Verstellwinkel des Blattfederaktors wird nicht mehr im Bereich der optimalen Vorspannung des DE-Films erreicht, sondern ist abhängig von Werkstoff und Geometrie der Blattfeder [85]. Um hohe Verstellungen bei elektrischer Aktivierung zu erzielen, bietet ein Python-basiertes Optimierungsscript von Eils [85] die Option die Lagenzahl für den

maximalen Verstellwinkel für den Blattfederaktor zu bestimmen. Anhand dieses parametrisierten FEM-Modells wird eine Parameterstudie durchgeführt. Sie dient der Ermittlung der Lagenzahl der DE-Filme, ermittelt für Blattfedern mit variierenden Dicken  $t_{BF}$ . Die Ergebnisse der Parameterstudie sind für zwei verschiedene Vorstreckungen  $\lambda_{pre}$  des DE-Films durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.9 aufgeführt.

Tabelle 4.9 Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der Lagenanzahl für den maximalen Verstellwinkel des Blattfederaktors nach [85]

Vorstreckung $\lambda_{pre}$	Blattfederdicke in mm	Lagen $n_{DE}$	Winkel $\theta$ in °
<b>1,8</b>	4	4901	2,51
	3	2082	2,53
	2	621	2,54
	1	80	2,54
	0,5	10	2,55
<b>1,4</b>	4	11505	2,68
	3	4979	2,70
	2	1502	2,70
	1	156	2,71
	0,5	23	2,71

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen einen kubischen Anstieg der Lagenzahl über die Blattfederdicke (4.15). Der Faktor  $r$  variiert in Abhängigkeit von der Vorstreckung des DE-Films (vgl. Tabelle 4.10):

$$n_{DE}(t_{BF}) = r \cdot t_{BF}^3. \quad (4.15)$$

Tabelle 4.10 Parameter für das exponentielle Verhalten der Verstellwinkeloptimierung

Vorstreckung $\lambda_{pre}$	r
1,8	180,56
1,4	76,67

Mit dem Polynom (4.15) ist für jeden Vorstreckungszustand die Lagenzahl in Abhängigkeit von der Blattfederdicke ermittelbar. Über die Optimierungsroutine können weitere Parameter für verschiedene Blattfedergeometrien und Blattfederwerkstoffe bestimmt werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass das Optimierungsscript keine Versagensgrenzen des Blattfederwerkstoffs berücksichtigt. So werden auch sehr hohe Dehnungen in der Blattfeder von dem Modell toleriert. In Anhang E sind die vier Modelle der Optimierungssimulationen dargestellt.

Für die Auslegung der Arme aus den Blattfederaktoren findet eine Erweiterung des bestehenden Modells von Eils [85] statt. Ein weiterer Schritt *Force* wird zwischen *Relax* und *Activation* eingefügt. Er dient der Modellierung der Arme unter statischen Belastungen. Für den Schritt *Force* werden die Kräfte aus Tabelle 4.1 auf jeweils einen der drei Sitz- bzw. Lehnenarme aufgebracht. Die Kraft auf die Sitzfläche wird als einzelne Punktlast angenommen. Da die Kraft auf die Lehne eigentlich als Flächenlast auf dem Polster zu verstehen ist [23], wird diese hier auf drei Punktlasten (siehe Abbildung 4.32) verteilt. Exemplarisch werden nachfolgend zwei Arme mit  $\lambda_{pre} = 1,6$  ausgelegt.

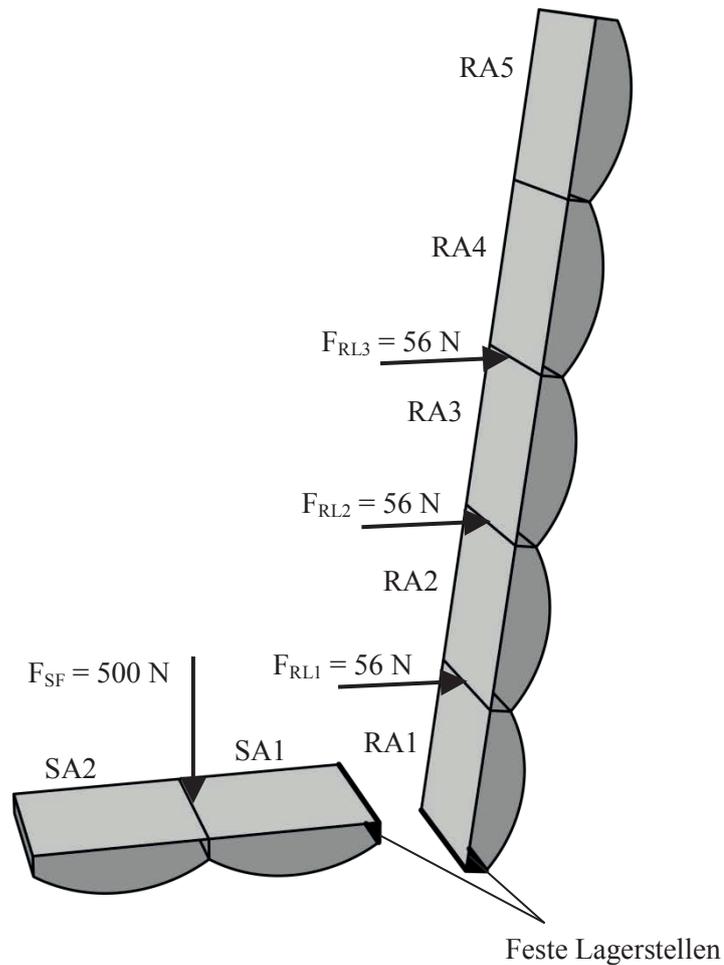


Abbildung 4.32 Darstellung der Montagezustände, Kräfte und Kraftangriffspunkte zweier Arme aus Blattfederaktoren für die FEM-Simulationen

Der Arm der Rückenlehne, bestehend aus den Blattfederaktormodulen RA1 bis RA5 (vgl. Abbildung 4.32) wird mit den Parametern aus Tabelle 4.11 modelliert. Eine Reduktion der Blattfederdicke in den Modulen RA1 bis RA3 hätte starke Biegungen der Arme zur Folge. Aus diesem Grund wird nur die Lagenzahl weiter variiert. Die maximal tolerierte Anzahl Lagen wird auf 300 beschränkt. Andernfalls übersteigen Gewicht und Bauraum der Aktoren vertretbare Dimensionen.

Tabelle 4.11 Parameter zur Simulation der Rückenlehne bestehend aus fünf Blattfederaktoren

<b>Aktormodul</b>	<b>Lagenzahl</b> <b><math>n_{DE}</math></b>	<b>Blattfederdicke</b> <b><math>t_{BF}</math> in mm</b>
RA1	300	5
RA2	300	5
RA3	250	4
RA4	50	2
RA5	15	1

Abbildung 4.33 zeigt qualitativ die Ergebnisse aus der Simulation des Arms der Rückenlehne. Neben den Simulationsschritten ist zum Vergleich der Montagezustand mit abgebildet.

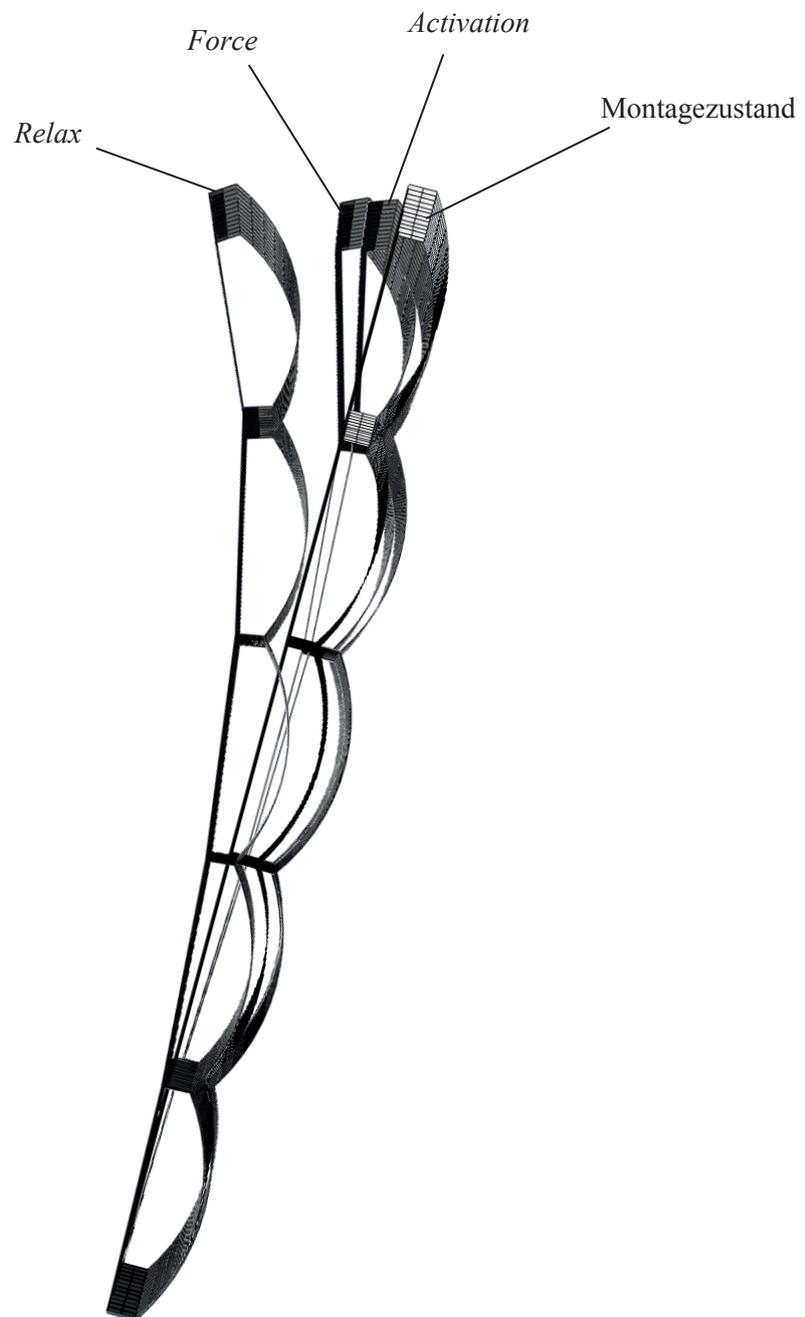


Abbildung 4.33 Qualitative Darstellung der Ergebnisse aus der Simulation eines Armes aus Blattfederaktoren zur Stützung und Verstellung einer Rückenlehne

Die statische Last auf der Sitzfläche ist nach Tabelle 4.1 deutlich höher als auf die Rückenlehne. Da die Arme der Sitzfläche aber nur aus zwei Modulen SA1 und SA2 bestehen ist das maximal zu erwartende Biegemoment geringer. Abbildung 4.34 zeigt qualitativ die Ergebnisse der Simulation mit den Parametern aus Tabelle 4.12.

Tabelle 4.12 Parameter der Simulation der Sitzflächenarme bestehend aus zwei Blattfederaktoren

<b>Aktormodul</b>	<b>Lagenzahl</b> <b><math>n_{DE}</math></b>	<b>Blattfederdicke</b> <b><math>t_{BF}</math> in mm</b>
SA1	300	4
SA2	120	2

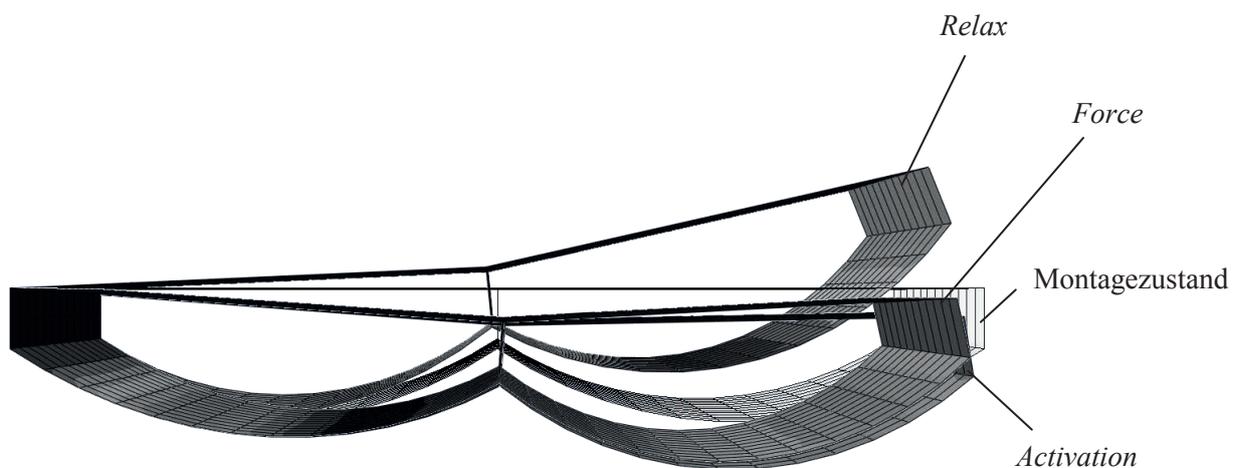


Abbildung 4.34 Qualitative Darstellung der Ergebnisse aus der Simulation eines Sitzflächenarmes aus Blattfederaktoren zur Stützung und Verstellung einer Sitzfläche

Bei den Modellen ist zu beachten, dass das Verhalten der Blattfeder nicht durch Versuche evaluiert ist. Die Aussagen der durchgeführten Simulationen geben das qualitative Verhalten des Blattfederaktors wieder.

#### **4.4.6 Elektromechanisches Verhalten eines Blattfederaktors**

In diesem Kapitel werden die qualitativen Versuche an Blattfederaktoren beschrieben. Das Blattfederwerkstoff PA12 liegt als Plattenhalbzeug mit 1 mm Dicke vor und wird unter Temperatur in einem Formwerkzeug zu der in Abbildung 6.16 aus Anhang G gezeigten Geometrie umgeformt. Daraufhin wird die Feder, wie in Abbildung 4.28 beschrieben, mit den DE-Filmen verbunden. Dazu wird ein DE-Film mit den geometrischen Maßen  $b = 405$  mm und  $l = 60$  mm und einer aktiven Fläche von  $A_{\text{act,BA}} = 20$  cm<sup>2</sup> gefaltet und in die Koppellelemente eingeklemmt und kontaktiert. Im gespannten Zustand befindet sich der DE-Film im Aktor unter einer mechanischen Vorstreckung von etwa  $\lambda_{\text{pre}} = 1,52$ . Die Masse eines Blattfederaktors mit Kabel beträgt  $m_{\text{BA}} = 31$  g. Für die qualitativen Untersuchungen wird ein einzelner Blattfederaktor hinsichtlich seines Langzeit- und seines Temperaturverhaltens untersucht.

Der Aktor wird vertikal aufgestellt und fortlaufend mit einer Frequenz von 0,5 Hz aktiviert und wieder deaktiviert (siehe Abbildung 4.35). Im aktivierten Zustand liegt die maximale elektrische Spannung von 3,91 kV an. Gemessen wird die horizontale Auslenkung des obersten Aktorpunktes. Dies erfolgt über eine optische Messung der Distanz zwischen einem am Aktor angebrachten Marker und einem feststehenden Referenzmarker. Die Differenz der Distanzen in aktiviertem und inaktivem Zustand ergibt die Auslenkung.

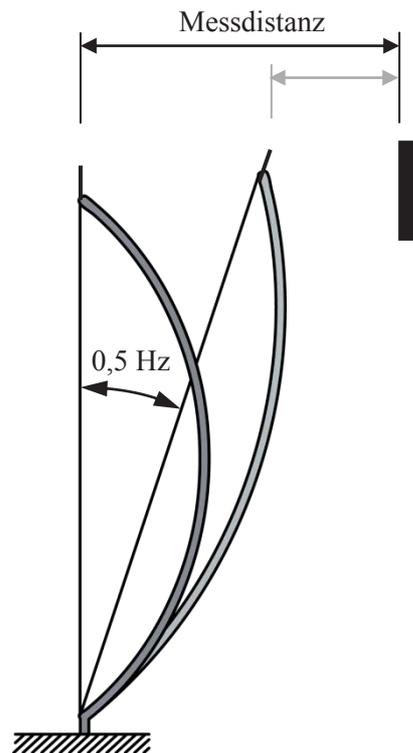


Abbildung 4.35 Messaufbau zur Bestimmung des Langzeit- und Temperaturverhaltens eines aktivierten Blattfederaktors

### Langzeitverhalten

Unmittelbar nach dem Einspannen des DE-Films im Blattfederaktor, wird die in Abbildung 4.35 beschriebene Messung begonnen. So können auch Setz- oder Krieeffekte nach der Montage erfasst werden. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 4.36 gezeigt. In den ersten Zyklen krümmt sich die Blattfeder immer weiter zusammen. Die Blattfeder verformt sich plastisch, bis die Kräfte des DE-Films für eine weitere Biegung nicht mehr hoch genug sind. Erst oberhalb von 100.000 Zyklen scheint die Betriebsposition annähernd stationär zu sein. Hingegen verläuft die Differenz der Messdistanzen über den gesamten Messbereich qualitativ annähernd linear. Ein linearer Kurvenfit der Auslenkung zeigt, dass diese zwischen 100.000 und 580.000 Zyklen um etwa 6 % sinkt.

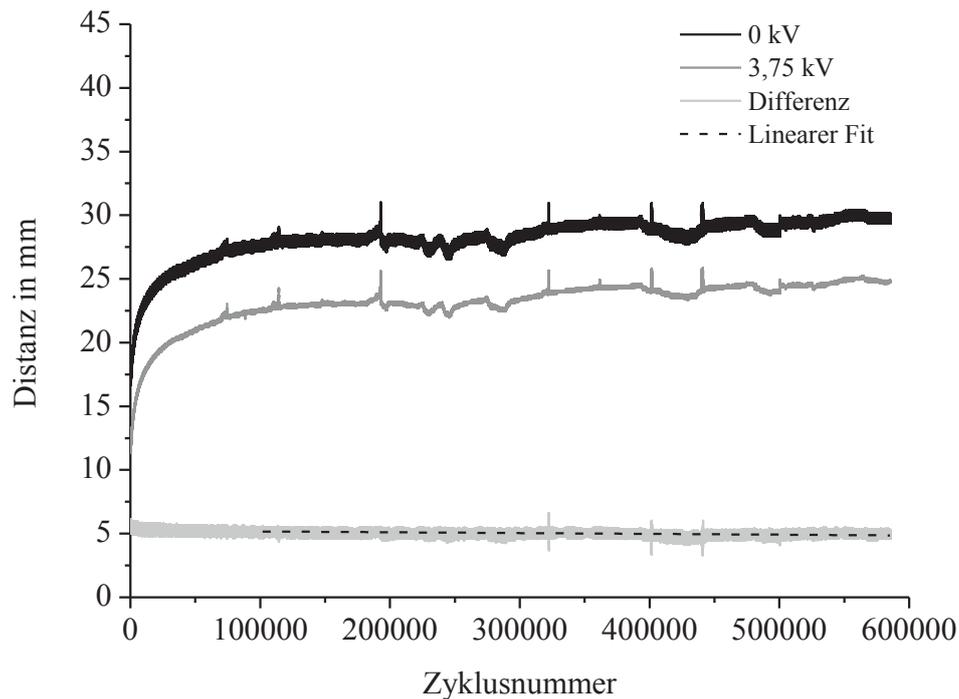


Abbildung 4.36 Ergebnisse der Langzeitmessung eines Blattfederaktors bei einer Aktivierungsfrequenz von 0,5 Hz

Die Messdaten für 0 kV und 3,75 kV zeigen des Weiteren starke Unregelmäßigkeiten. Neben Temperaturschwankungen könnten Erschütterungen durch dynamische Universalprüfmaschinen nahe dem Messaufbau einen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Bei 580.000 Zyklen wird die Messung vorzeitig beendet. Der Blattfederaktor weist nach visueller Untersuchung keinerlei Beschädigungen auf.

### Temperaturverhalten

Nach den Langzeitversuchen wird der Blattfederaktor mit identischem Versuchsaufbau in einer Klimakammer auf sein Temperaturverhalten überprüft. Die Mess- und Steuerelektronik befindet sich außerhalb des klimatisierten Bereichs, um Fehlerquellen zu minimieren. Die Messungen werden im geforderten Temperaturbereich zwischen -40°C und +80°C fortgeführt. In Abbildung 4.37 sind die Ergebnisse der Prüfung

dargestellt. Aufgetragen ist die Messdistanz des Aktors zu einem stationären Marker (vgl. Abbildung 4.35) über die Temperatur.

Wie in den vorangegangenen Langzeitversuchen (siehe Abbildung 4.36), ist die Auslenkung des Aktors als annähernd linearer Verlauf zu bezeichnen. Die starke Änderung in der Position des Aktors, um etwa 30 mm, deutet auf temperaturabhängige Veränderungen im Blattfederwerkstoff hin. Bei den Messungen mit steigender Temperatur hat der Blattfederaktor im nicht aktivierten Zustand und Raumtemperatur eine Distanz von 19,6 mm zu dem stationären Marker. Bei der Abkühlung von +80°C auf Raumtemperatur wird eine Distanz von 22,5 mm gemessen. Der Blattfederaktor erreicht nicht mehr die ursprüngliche Position (vgl. Abbildung 4.38).

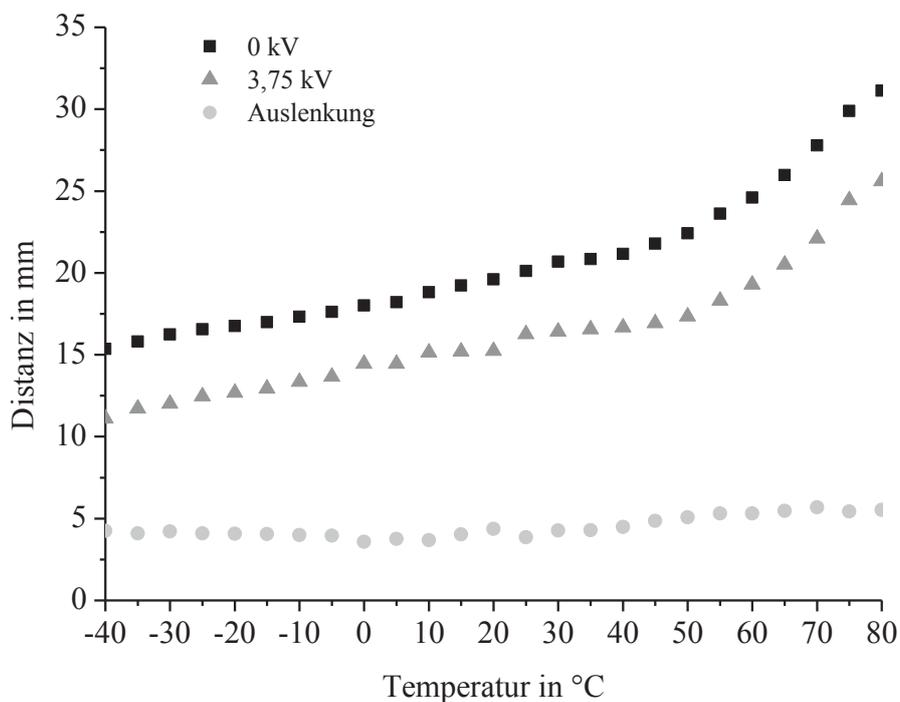


Abbildung 4.37 Messwerte aus Aktivierungsversuchen eines Blattfederaktors bei steigender Temperatur von -40°C auf +80°C

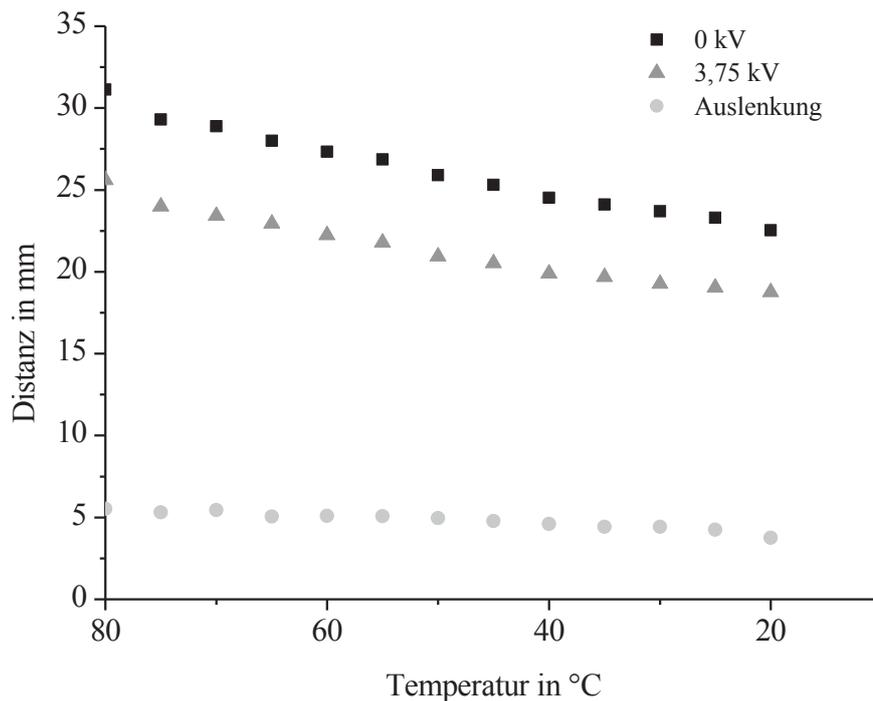


Abbildung 4.38 Messwerte aus Aktivierungsversuchen eines Blattfederaktors beim Abkühlen der Temperatur von +80°C auf +20°C

In den Temperaturversuchen übersteht der Blattfederaktor weitere 20.000 Zyklen. Insgesamt verzeichnet der Aktor damit etwa 600.000 Aktivierungszyklen ohne sichtbare Beschädigungen. Durch den Einfluss der Temperatur hat sich jedoch eine bleibende Verformung der Blattfeder eingestellt. Für einen Einsatz in dem gemessenen Temperaturbereich ist das PA12 nicht als Blattfederwerkstoff zu verwenden. Die elektrische Aktivierung des DE-Films ist über den Temperaturbereich von -40°C bis +80°C für einen Einsatz im Automobil sichergestellt.

## **4.5 Beurteilung anhand der Anforderungen**

Die Beurteilung geschieht nach dem gleichen Vorgehen wie bei der Auswahl des Lösungskonzepts in Abschnitt 4.3. Hierbei werden die Anforderungskriterien mit einer Gewichtung zwischen 1 und 10 belegt und die Erfüllung des Kriteriums dann mit einer Bewertungszahl zwischen 0 und 4 beurteilt. Die Produktsumme aus Gewichtungen und Bewertungszahlen wird errechnet. In Bezug auf die maximal zu erreichende Produktsumme wird das Potenzial als Prozentsatz angegeben. Dies geschieht für die Gruppen der Anforderungskriterien und als gesamtes Potenzial für die aktive Sitzfläche aus Blattfederaktoren.

Einige Kriterien der Beurteilungsmatrix in Tabelle 4.13 sind hierbei schwer zu bewerten und werden daher nach bestem Wissen abgeschätzt. Darüber hinaus waren die Abschätzung eines erneuten Einsatzes und der Bedienung der aktiven Sitzfläche nicht Gegenstand der Untersuchungen. Aus diesem Grund wird auf die Angabe von Werten verzichtet. Die Entsorgung der DE-Filme ist aufgrund des verwendeten Silikonelastomers nach heutigem Stand kritisch zu sehen.

Das gewählte Lösungsprinzip der Blattfederaktoren, aktiviert durch dielektrische Elastomere, erfüllt die Anforderungskriterien für den Einsatz in einem adaptiven Autositz aktuell zu 60 %.

Tabelle 4.13 Beurteilung der Stützung und Verstellung einer Fläche durch Arme aus Blattfederaktoren mit DE-Filmen nach [92]

Kriterium	Gewichtung	Blattfederfaktor	relatives Potenzial
Temperatureinsatzbereich	7	4	
1A Nutzungsdauer	7	4	
Betriebsart	3	2	
Flächenverstellung	7	0	
Lastaufnahme	7	3	
2A Federung	6	4	
Freie Schnittstellen	6	4	
Klimatisierung	4	3	
3A statische Last Sitzfläche	7	2	
statische Last Rückenlehne	7	2	
Breite Sitzfläche	4	4	
Tiefe Sitzfläche	4	4	
4A Breite Rückenlehne	4	4	
Tiefe Rückenlehne	4	4	
Dicke des Sitzes	7	3	
Gewicht	7	4	
5A Manuell/maschinell montierbar	2	3	
Demontierbar	4	4	
6A Erneuter Einsatz	3	k.A.	
<b>Σ Gewichtung   technisch   relativ</b>	100	306	0,77
1B Materialkosten	10	4	
2B Zielgruppe	30	3	
Funktionsintegration	30	4	
Entsorgung	30	2	
<b>Σ Gewichtung   ökonomisch   relativ</b>	100	310	0,78
1C Global veränderbar	30	0	
Lokal veränderbar	25	1	
2C Veränderliche Beschaffenheit	5	0	
Intuitive Bedienung	20	k.A.	
Geringe körperliche Einschränkung	20	4	
<b>Σ Gewichtung   Nutzer   relativ</b>	100	105	0,26
<b>Σ Gesamt   relativ</b>		721	0,6

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

### **5.1 Zusammenfassung**

Fahrzeugsitzstrukturen auf Basis von aktiven dielektrischen Elastomeren zu konzipieren, birgt ein großes Potenzial. Die Schwierigkeiten liegen in der Konstruktion geeigneter Aktoren, welche die Energie bei Aktivierung des Materials in Stellkräfte wandeln. Insbesondere die Aufnahme der Lasten im Fahrbetrieb macht dies zu einer schwer lösbaren Aufgabe. Die in dieser Arbeit entwickelten Blattfederaktoren sind als erste Annäherung an eine solche Aktorik zu verstehen. Eine Herstellung der DE-Filme in großen Mengen und beliebigen Maßen erfolgt bereits in industriellem Maßstab und bildet die Basis für den Serieneinsatz der DE-Filme.

Für die Konstruktion ist neben der analytischen Beschreibung des Blattfederaktors die Finite Elemente Methode eingesetzt worden. Das dabei entstandene Konstruktionsmodell kann flexibel hinsichtlich Veränderungen der Geometrie, der Anordnung der Aktoren zueinander und der Vorspannungszustände angepasst werden.

Während der Auslegung zeigen sich Konflikte bei der Kopplung der DE-Filme mit der Blattfeder. Ein Vorspannen der DE-Filme über nachgiebige Bauteile dient der Speicherung mechanischer Energie, die mit der Aktivierung der Filme abgerufen werden kann. Darüber hinaus müssen die Aktoren zur Verstellung großer Lehnflächen, diese auch unter Belastung stützen können. Die Blattfeder muss dazu sehr steif ausgeführt werden. Infolge dessen sind schon für geringe Vorspannungen der Federelemente mehrere Lagen DE-Filme notwendig. Das Gewicht der Aktoren erhöht sich, die Stellwinkel sinken.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein Blattfederaktor Verstellwinkel bis zu  $2,7^\circ$  ermöglicht. Ein Aneinanderreihen der Aktoren, zur Erhöhung der Stellwinkel scheint daher zielführend. Rechnerisch sind mit Armen aus Blattfederaktoren hohe Stellwinkel realisierbar. Dieses Potenzial ist momentan noch nicht vollständig abrufbar, wie die Auslegungen der Stützarme für Sitz- und Lehnflächen zeigen. Starke Biegungen der

Arme infolge der hohen Biegemomente unter Belastung behindern den Betrieb der Aktoren in ihrem optimalen Betriebsbereich.

Positive Ergebnisse zeigen die Langzeit- und Temperaturversuche mit Blattfederaktoren. Auch nach vielen Aktivierungszyklen (über 600.000) ist kein signifikanter Abfall der Aktorik zu beobachten. Von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}$  arbeitet der Blattfederaktor hinsichtlich seiner Stellwege nahezu konstant. Der hier verwendete Blattfederwerkstoff zeigt ein starkes temperaturabhängiges Verhalten, was zu einer absoluten Verschiebung der Aktorauslenkung führt.

Die Blattfederaktoren sind flach und leicht konstruiert, was neben der Federung der Lehnflächen durch die Arme, großen Gestaltungsspielraum für weitere Stützkonzepte bietet und das Potenzial der Aktorik erhöht. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass über die Blattfederaktoren bestehende Funktionen in die Verstellelemente integriert werden können und in Zukunft neue Designfreiheiten für Nutzer und Produkt geschaffen werden.

Durch die Entkopplung der Polsterung von den Blattfederaktoren, kann diese in Form von dünnen Schalen aus Weichschaum oder auch aus dreidimensional vernetzten Textilien [6] ausgeführt werden. Dies ermöglicht neue Freiheiten in der Gestaltung neuer Sitze.

## **5.2 Ausblick**

Aktive Sitzflächen, basierend auf den in dieser Arbeit beschriebenen Blattfederaktoren, können viele Formen annehmen und Funktionen erfüllen. Im Anhang G ist ein Beispiel für eine mögliche Realisierung gegeben. Darüber hinaus liegt der Vorteil der modular aufgebauten Blattfederaktoren darin, beliebig große und völlig frei konturierte Flächen anzusteuern. Diese Flächen müssen nicht zwangsläufig an einem Punkt mit der Fahrzeugkarosserie verbunden sein, sie können mehrere Fundamente und Verzweigungen aufweisen, oder zu einem aktiven Netz zusammengesetzt werden (vgl. Abbildung 5.1).

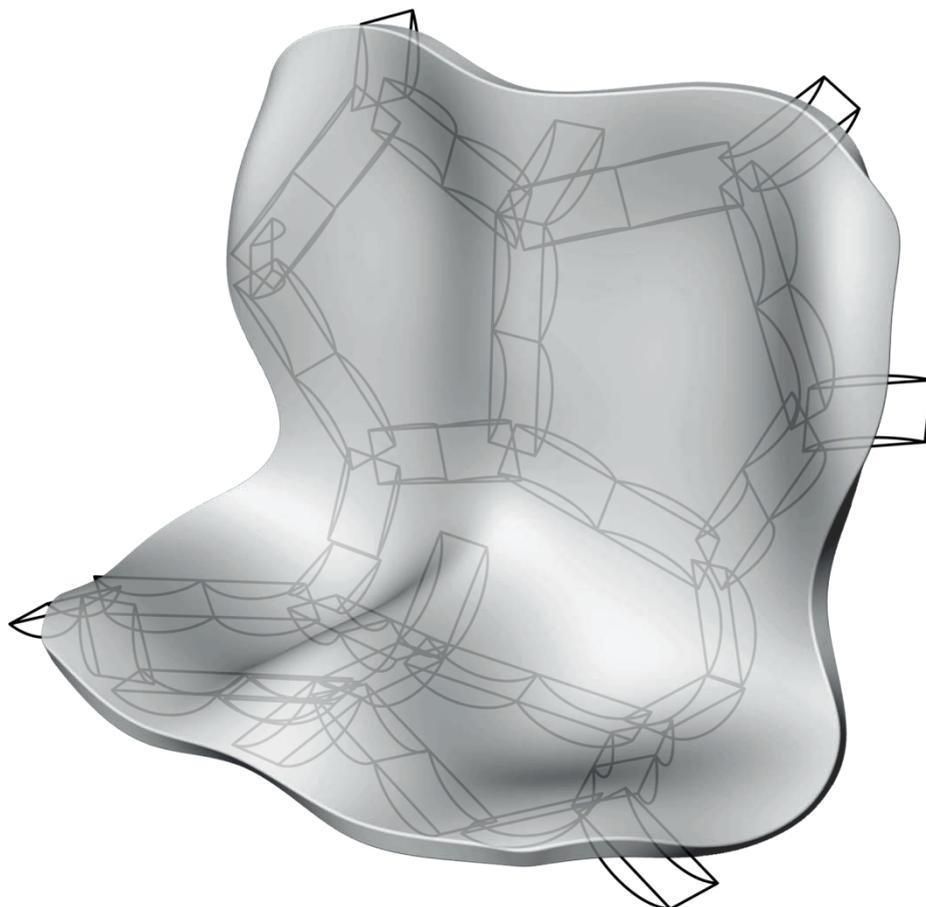


Abbildung 5.1 Netzwerk aus Blattfederaktoren zur Verstellung großer Sitzflächen

Die mechanischen Lasten können so über mehrere Arme oder auch andere Formen und Werkstoffe der Blattfedern aufgenommen werden. Denkbar ist ebenso die Kopplung mit anderen Konstruktionsprinzipien, wie beispielsweise dem bionischen Prinzip der Fischgräte (siehe Abbildung 5.2).

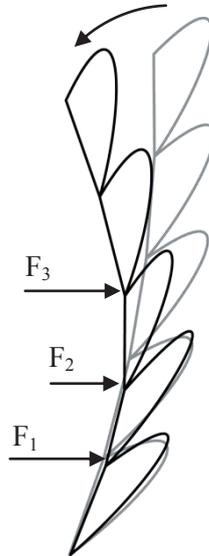


Abbildung 5.2 Verbindung des bionischen Konstruktionsprinzips der Fischgräte in Kombination mit dem Prinzip der Blattfederaktoren

Dielektrische Elastomere werden bisher mit hohen elektrischen Spannungen aktiviert. Bestrebungen Dielektrika mit hoher relativer Permittivität und geringer Steifigkeit herzustellen sind bei weitem nicht ausgeschöpft [59]. Untersuchungen verschiedener Elektrodenwerkstoffe, wie z.B. *carbon nanotubes* (CNT) oder Rußpartikel zeigen großes Potenzial, um bereits bei geringeren Aktivierungsspannungen hohe Dehnungen zu erzeugen [38]. Die im Material gespeicherte Energiedichte  $U$  ist hierfür ein maßgeblicher Faktor.

Darüber hinaus gibt die Messung der Kapazität des DE-Films die Möglichkeit den momentanen Dehnungszustand des Materials zu bestimmen. Somit kann eine absolute Bestimmung der Position und des aktuellen Belastungszustands, genannt *sensing*, erfolgen [40, 104].

Eine Umkehrung der Aktivierung zur Erzeugung elektrischer Energie aus Änderungen des Dehnungszustandes, wird gemeinhin als *Energy Harvesting* bezeichnet. Neben dem Aktivieren und dem *Sensing* könnte durch die Bewegung des Menschen über die DE im Fahrzeugsitz Energie generiert werden [40, 45].

Das in dieser Arbeit verwendete FEM-Modell kann über das Einbinden viskoelastischer Parameter erweitert werden. Die Durchführung weiterer Kriech- und Relaxationsversuche wird empfohlen. Eine Überprüfung der Parameter für das hier verwendete hyperelastische Materialmodell nach Yeoh, kann in Zugversuchen mit Relaxationsstufen nach Lion [105] stattfinden. Das bisher über Korrekturfaktoren angepasste FEM-Modell kann bezüglich genauerer Abbildung der physikalischen Effekte im DE-Film untersucht werden. Insbesondere elektrische Effekte, wie bereits von Lassen et al. [106] beschrieben, sind hierbei durch geeignete Beschreibungen zu berücksichtigen.

Genauere Lastannahmen für die Auslegung der Arme können über die Modellierung gemittelter Sitzdruckverteilungen erfolgen. Damit ist die Auslegung und Verstellung der Arme nach ergonomischen Kriterien möglich.

Über den Einsatz in Automobilsitzen hinaus, können die Blattfederaktoren in dieser oder abgewandelter Form für zahlreiche weitere Anwendungen eingesetzt werden. Sitzstrukturen für Züge, Flugzeuge oder Schiffe bis hin zu Sonnenkollektoren von Satelliten, Parabolantennen, verformbare Displays und Spiegel oder Leitwerksysteme sind hier zu nennen.

## 6 Anhang

### A. Brainstorming

Zur Untersuchung der Wünsche des Menschen an einen automobilen Innenraum der Zukunft wurden zwei Brainstormings durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse dienten der Aufstellung der Anforderungslisten von Kapitel 4.1. Das Brainstorming mit der ersten Gruppe: „C. Rob. Hammerstein“ wurde am 20.08.2009 in Solingen durchgeführt. Die Gruppe 2 „TUHH“ hat sich am 15.10.2009 in Hamburg-Harburg versammelt. Auf eine namentliche Erwähnung der Teilnehmer wird verzichtet:

**Gruppe 1 „C. Rob. Hammerstein“** bestehend aus:

- CTO,
- Dipl.-Ing./Engineering Manager,
- PL Fertigungstechnik,
- Man. Component Fzg.,
- Dipl.-Ing. Leiter Entwicklung,
- Adv. Eng. Manager,
- Lead Eng.,
- Entwickler.

**Gruppe 2 „TUHH“** bestehend aus:

- Prof. Produktdesign,
- Student Design,
- Prof. Transportationdesign,
- wiss. Mitarbeiter Materialwissenschaften,
- wiss. Mitarbeiter Konstruktionstechnik und Produktentwicklung,
- Student Maschinenbau,
- Magister Kunstgeschichte,
- freie Künstlerin.

Die Ergebnisse der Brainstorming-Runden sind nicht quantifiziert, sondern hinsichtlich ihrer Ausprägung von technischem und emotionalem Charakter gruppiert worden. Diese Gruppen sind nach Ähnlichkeit in einem Feld grafisch dargestellt (siehe Abbildung 6.1). Häufig wiederkehrende oder stark ähnliche Begriffsansammlungen sind mit einer Erhellung vom Hintergrund abgehoben.

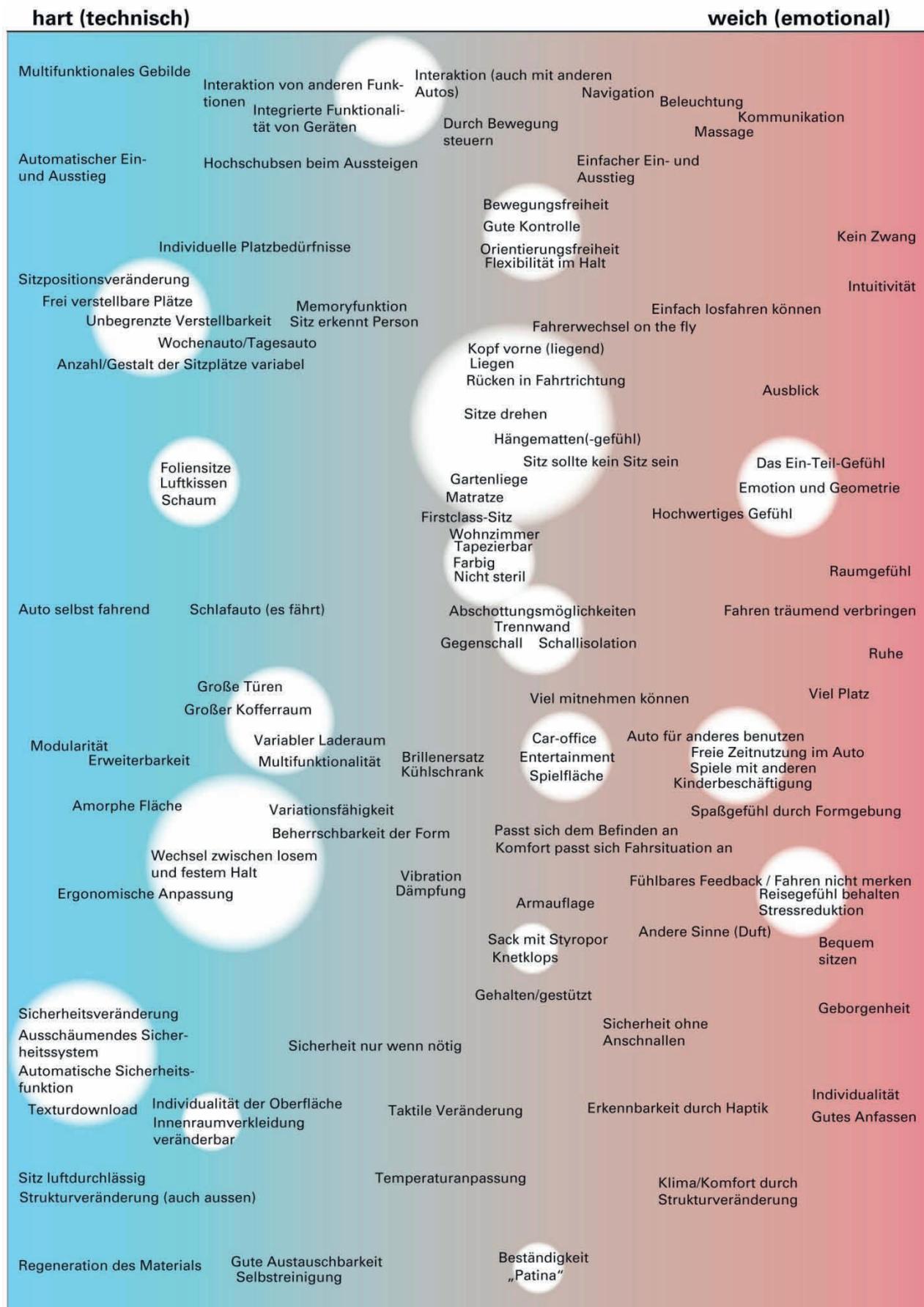


Abbildung 6.1 Grafische Auswertung der Ergebnisse aus dem Brainstorming

## B. Prüfstand für dielektrische Elastomeraktoren

In diesem Abschnitt sind die technischen Zeichnungen und Schaltpläne des Prüfstands für die Aktivierung von DE-Filmen und Blattfederaktoren aufgeführt. Der Prüfstand ist nach Vorgaben der DIN EN 50191 [73] für Prüfspannungen bis 6000 V ausgelegt.

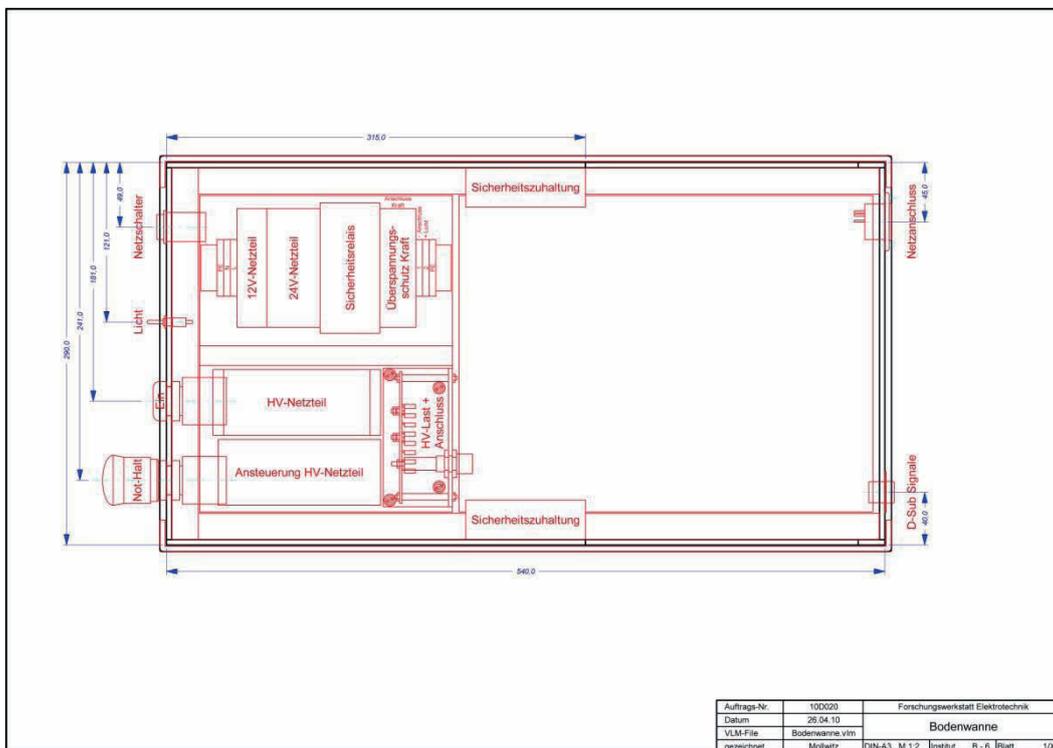


Abbildung 6.2 Technische Zeichnung der Lage aller Bauteile im Prüfstand für dielektrische Elastomere

Abbildung 6.3 Prüfstandschialtung, Sicherheitselektronik und elektronische Bauelemente

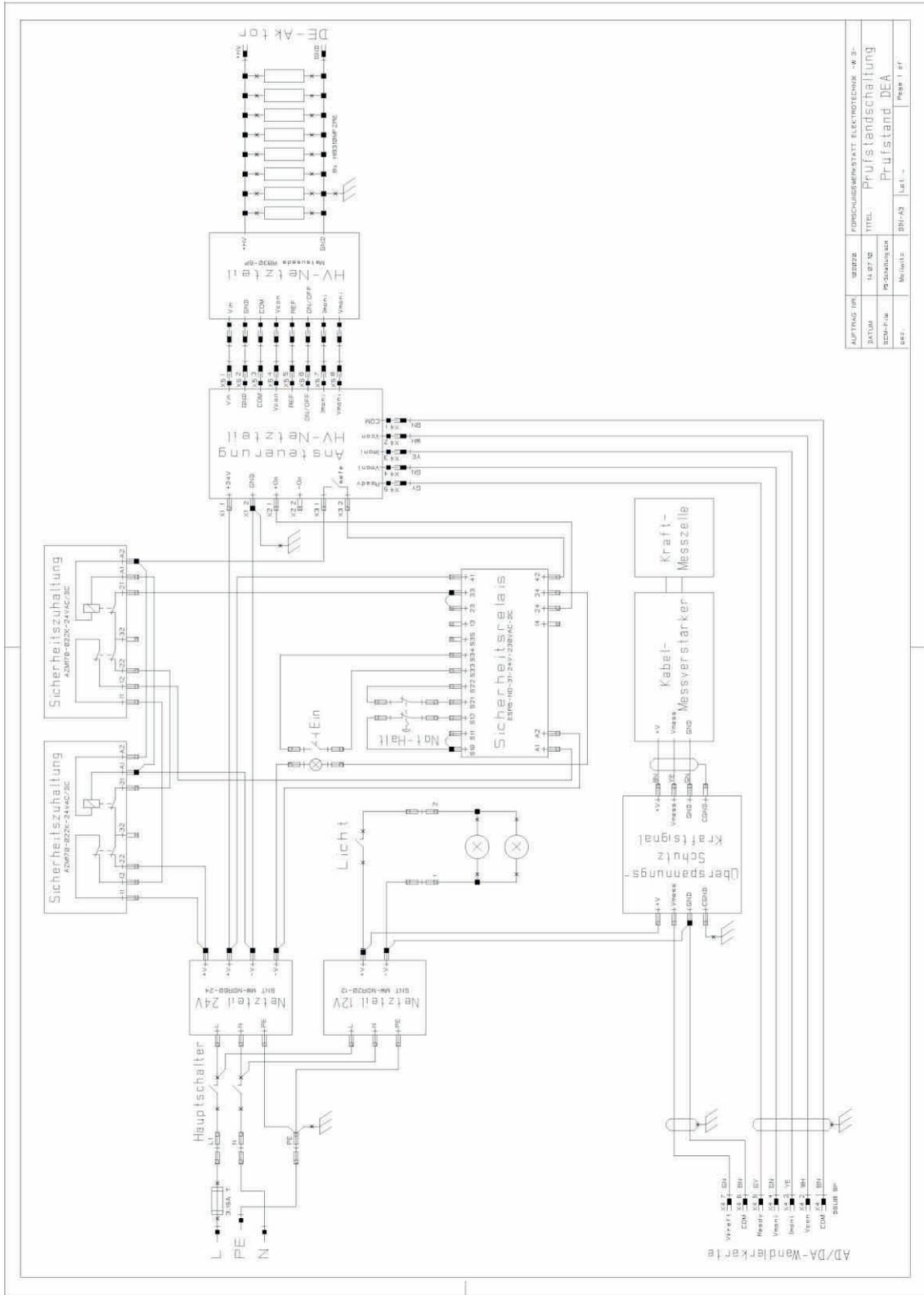
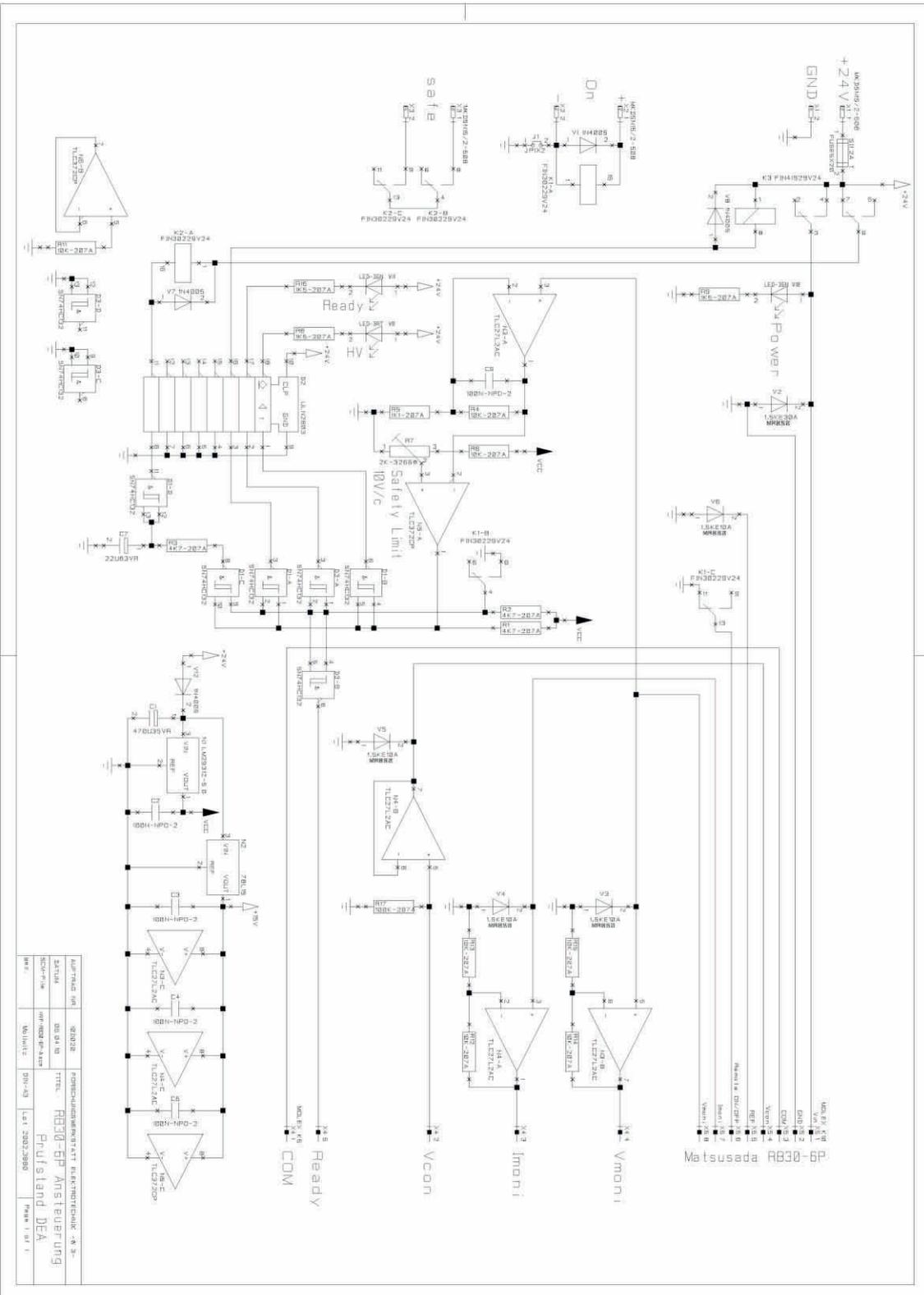


Abbildung 6.4 Prüfstandsaltung, Steuer- und Messschaltung



Hersteller	MD32	Produktname	RS30-5P Ansteuerung
Datum	09.04.03	Rev.	01
Gezeichnet	MD32	Gezeichnet	MD32
Geprüft	MD32	Geprüft	MD32
Freigegeben	MD32	Freigegeben	MD32
Proj. Nr.	1000000000	Proj. Nr.	1000000000
Rev.	01	Rev.	01

Die Ansteuerung des Prüfstands erfolgt mit LabView 2009 von National Instruments. In einem dafür erstellten Prüfprogramm wird die Stellspannung in Schritten von 15 s von 0 V auf 3,75 kV erhöht (Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6). Über eine Digital/Analog-Wandlerkarte USB-6009 von National Instruments wird diese in Form einer Steuerspannung von 0 - 5 V DC an den Prüfstand übermittelt. Im Prüfstand wird die Steuerspannung von dem HV-Netzteil RB30-6P der Matsusada Precision Inc. auf einen Spannungsbereich von 0 - 6 kV interpretiert. Das Netzteil bietet die Möglichkeit eines Spannungs- und Strommonitors, der über die Wandlerkarte in LabView eingelesen und überwacht werden kann.

Die Längung des DE-Films in Folge der elektrischen Aktivierung wird optisch von einer Messkamera Basler scout scA1300-32gc erfasst. Über das NI-Vision-Modul von LabView erfolgt die Kalibrierung und Umrechnung der Pixelwerte in mm. LabView schreibt die Steuerspannung, Spannungs- und Strommonitor und die gemessene Distanz im ASCII-Format eine Textdatei.

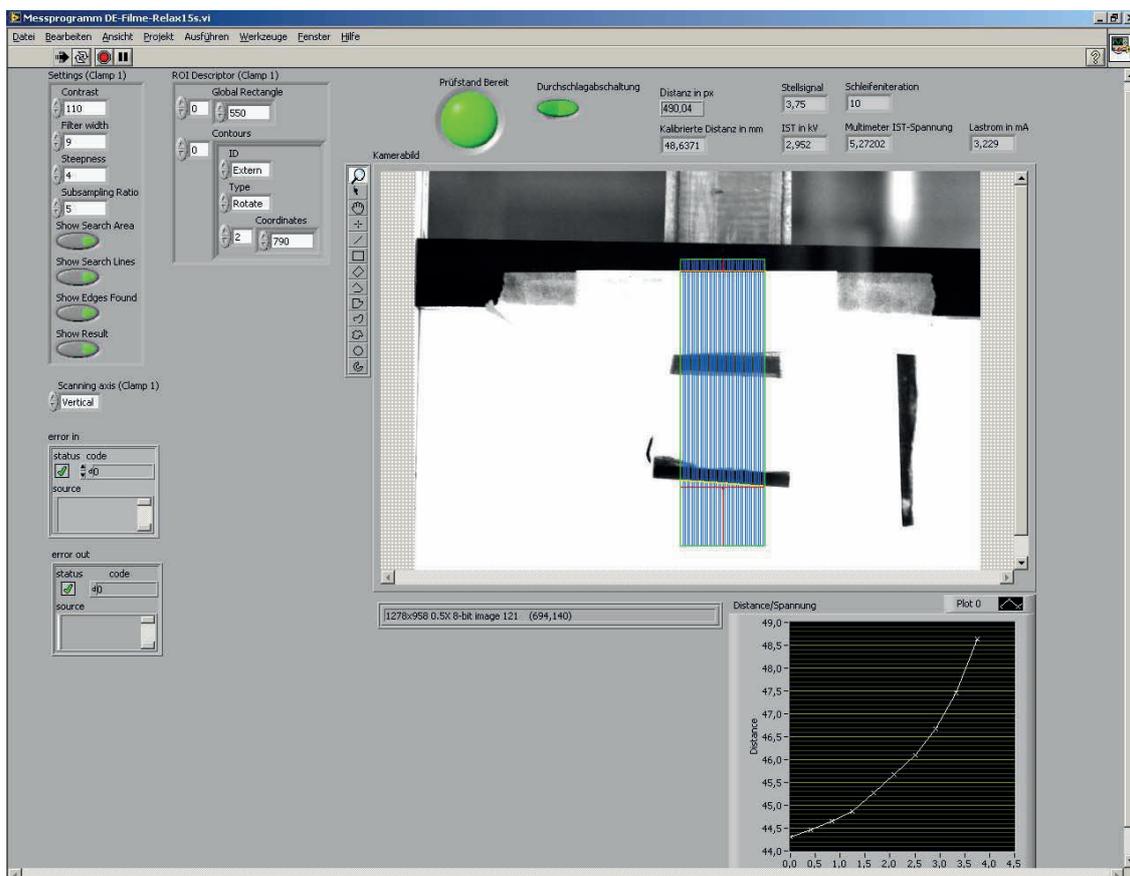


Abbildung 6.5 Frontpanel in LabView 2009 zur Steuerung des Prüfstands für dielektrische Elastomeraktoren

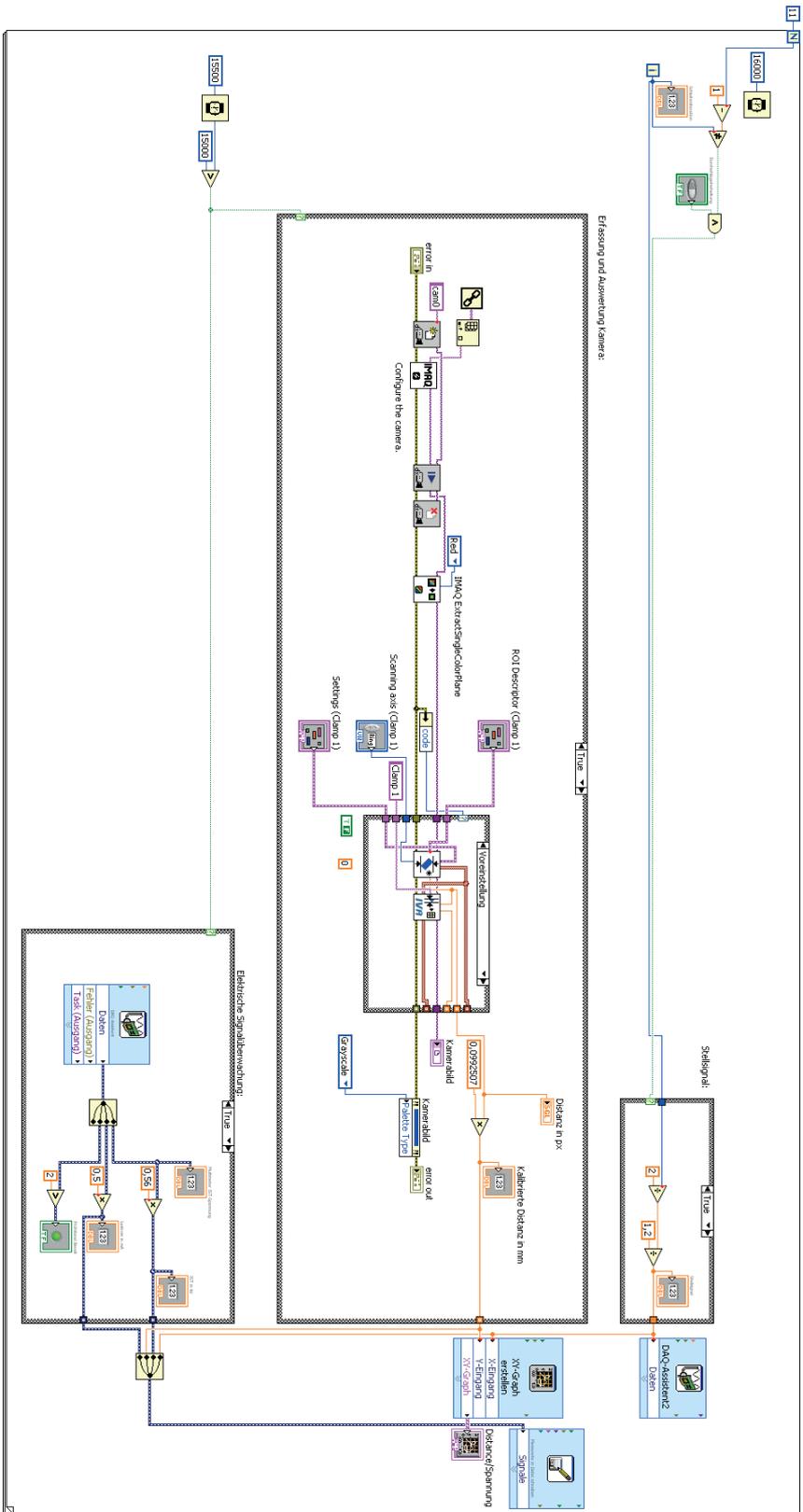


Abbildung 6.6 Blockdiagramm in LabView zur Steuerung des Prüfstands für dielektrische Elastomeraktoren

Die Kalibrierung des HV-Netzteils erfolgte mit einer Hochspannungsmessspitze. Abbildung 6.7 zeigt die gemessene Spannung in Abhängigkeit der Stellspannung aus LabView, sowie die prozentualen Abweichungen. Zur Auswertung der Aktivierungsversuche werden die Stellspannungen in den von LabView ausgegebenen Messdateien gegen die gemessenen Spannungen substituiert. Damit reduziert sich der Messfehler auf den der Messgeräte und der Hochspannungsmessspitze.

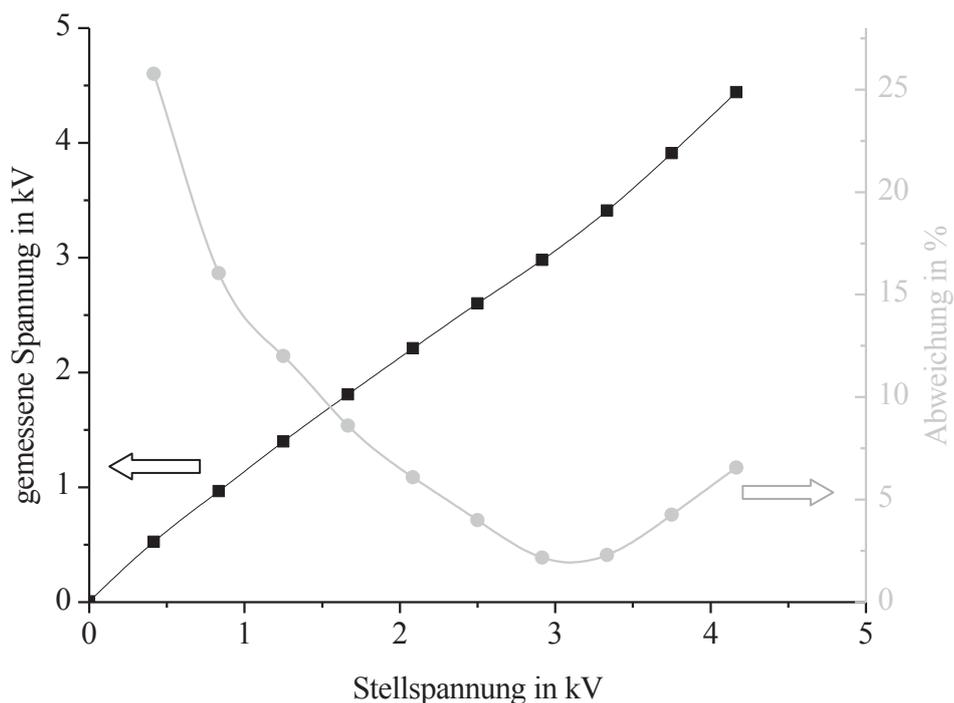


Abbildung 6.7 Kalibrierungsmessung am Hochspannungsnetzteil des Prüfstands für dielektrische Elastomeraktoren

### C. Daten mechanischer Versuche DE-Film PolyPower

Insgesamt 18 DE-Filme sind in zyklischen Zugversuchen getestet worden. Abbildung 6.8 zeigt die nominelle Spannung des letzten Be- und Entlastungszyklus aller Filme über die Streckung.

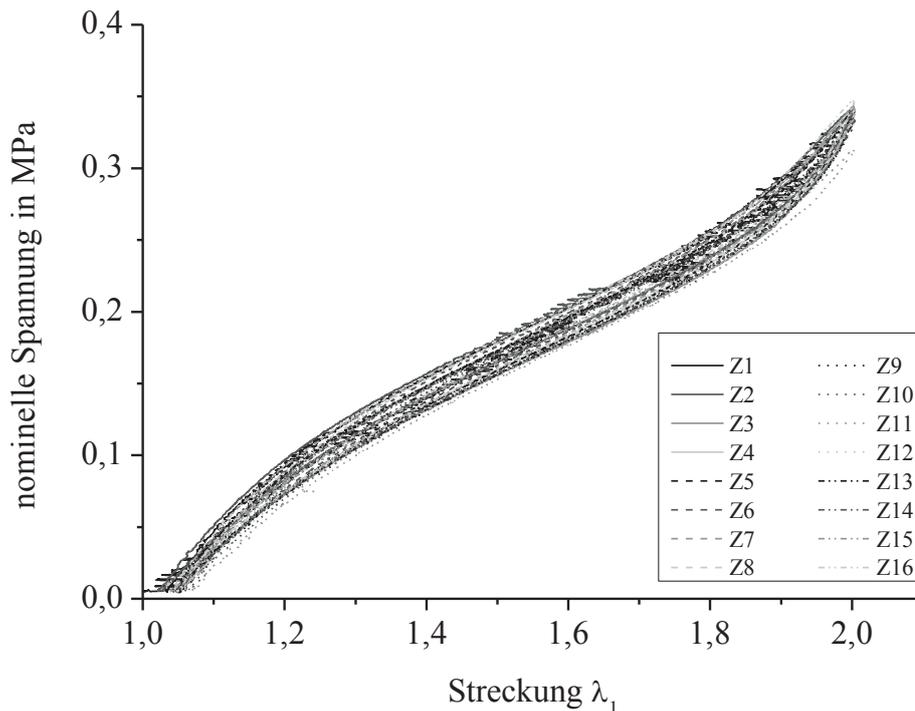


Abbildung 6.8 Daten des dritten Zyklus der zyklischen Zugversuche der DE-Filme nach DIN 527-3 [72]

Außerdem wird in gestuften Zugversuchen der Einfluss der Elektroden und der Füllstoffe im Silikon qualitativ untersucht. Die Messungen dreier DE-Filme ist in Abbildung 6.9 gezeigt. Für eine erste Bewertung der Güte der bestimmten Materialparameter für das hyperelastische Yeoh-Modell wird der qualitative Verlauf eines zyklischen Zugversuchs mit Relaxationsstufen nach Lion [105] betrachtet. Die Näherung einer gemittelten Kurve aus Be- und Entlastung (vgl. Abbildung 4.25) erscheint in Anbetracht von Abbildung 6.10 hinreichend genau.

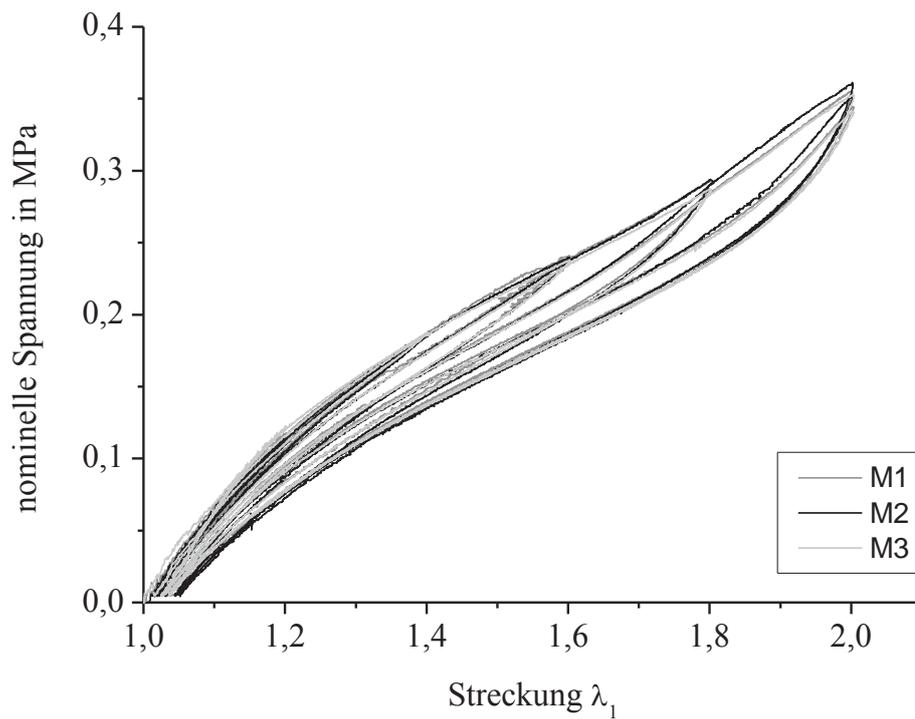


Abbildung 6.9 Daten der gestuften Zugversuche der DE-Filme

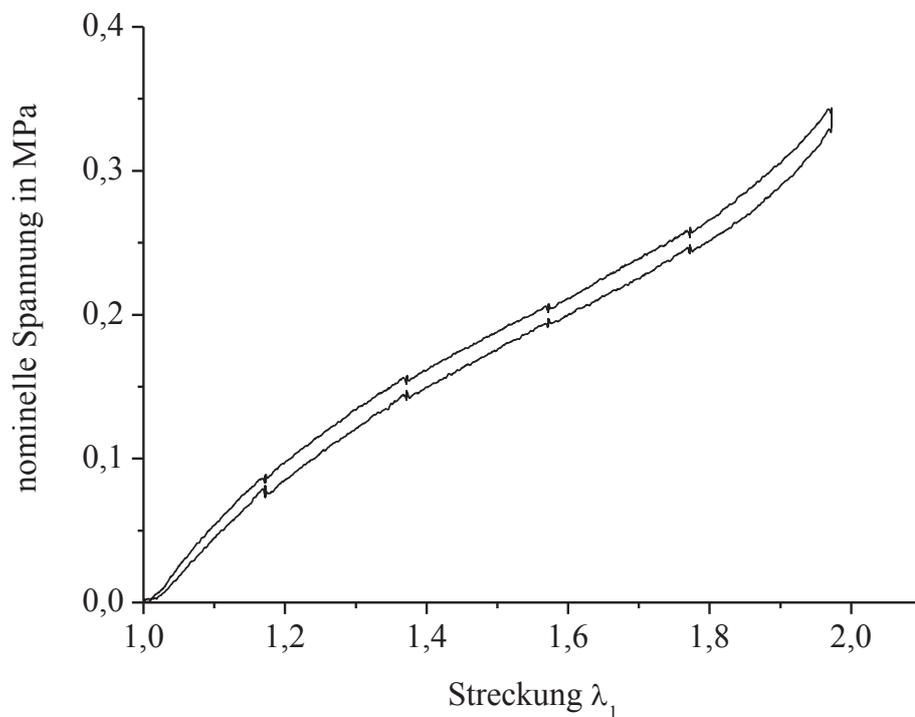


Abbildung 6.10 Zyklischer Zugversuch eines DE-Films mit Relaxationsstufen von 40 s nach Lion [105]

## D. Chemische Analyse der Elektroden des DE-Films von PolyPower

Der DE-Film besteht nach Angaben von PolyPower [45] im Wesentlichen aus einem Silikonelastomer Elastosil RT 625, dessen Füllpartikeln und den aufgesputterten Elektroden aus Silber (vgl. Kapitel 2.3.3). Zur Verifikation der Bestandteile des DE-Films wurde eine chemische Analyse durchgeführt. Die Untersuchung der Filme mit der Energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (EDXRF) zeigte, dass neben dem von Hersteller genannten Silber auch Anteile von Aluminium in den Elektroden zu finden ist. Außerdem weisen obere und untere Elektrode unterschiedliche Anteile von Silber und Aluminium auf. Über die quantitativen Anteile der Metalle ist hier keine Aussage zu treffen.

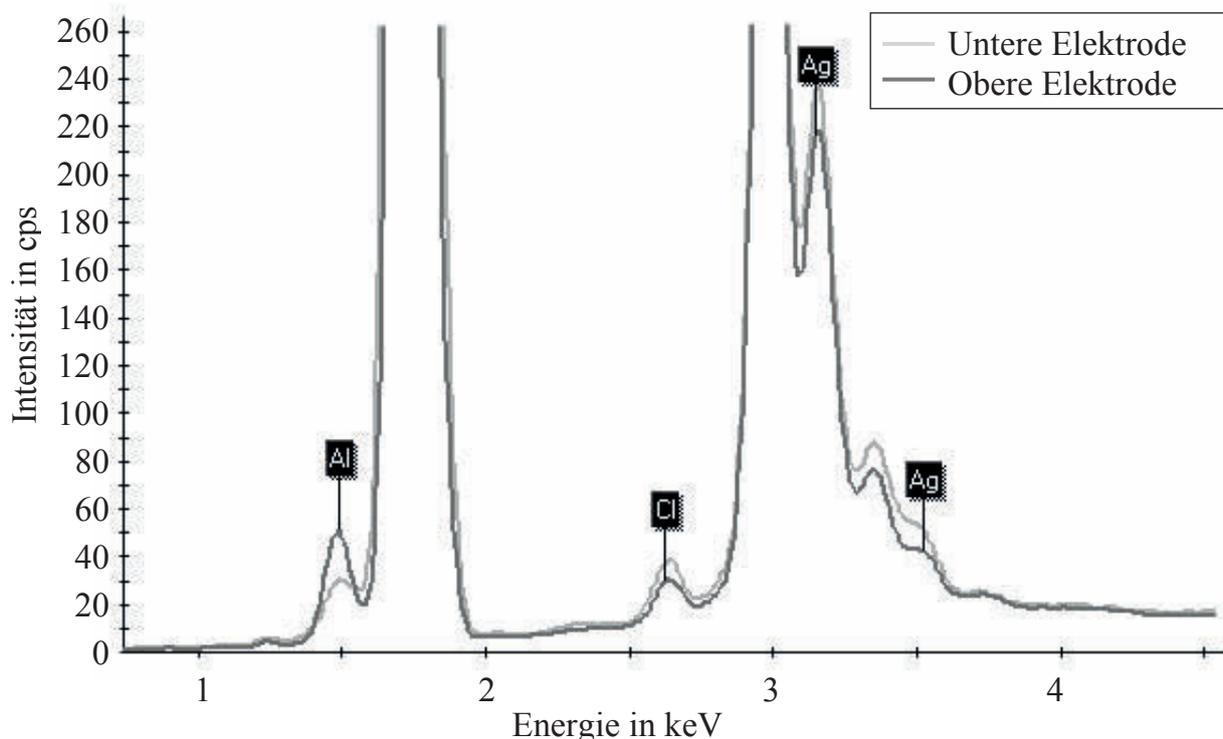


Abbildung 6.11 Spektrum der Energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse der Elektroden des DE-Films

## E. Optimierung des Verstellwinkels in der FEM

Exemplarisch werden zwei Simulationsergebnisse der Optimierungsroutinen aus dem Abaqusscript nach Eils [85] dargestellt. Jeweils für eine Blattfeder mit der Dicke  $t_{BF} = 0,5$  mm zeigen Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 den Montagezustand, sowie die Schritte *Relax* und *Activation* eines Blattfederaktors.

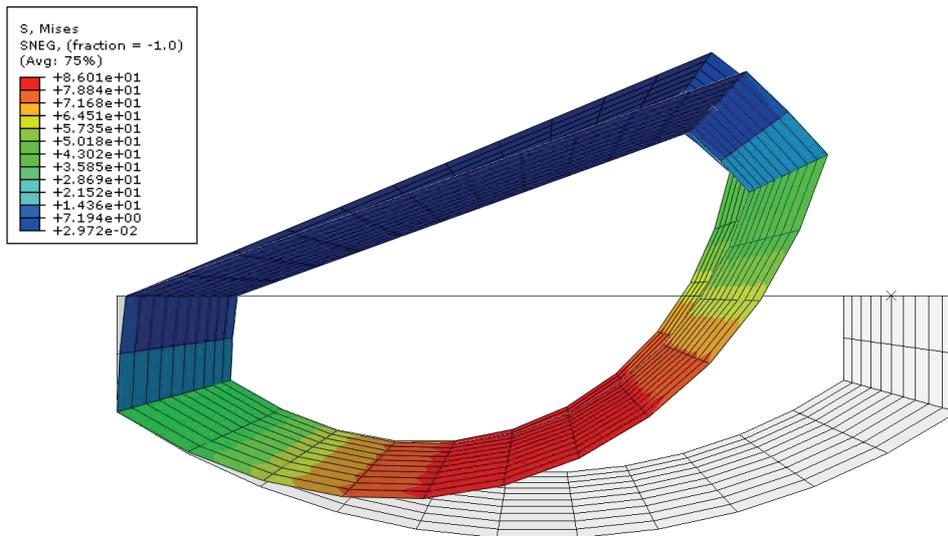


Abbildung 6.12 Ergebnisse aus dem Abaqus-Optimierungscript eines Blattfederaktors mit einer Vorstreckung des DE-Films von  $\lambda_{pre} = 1,4$

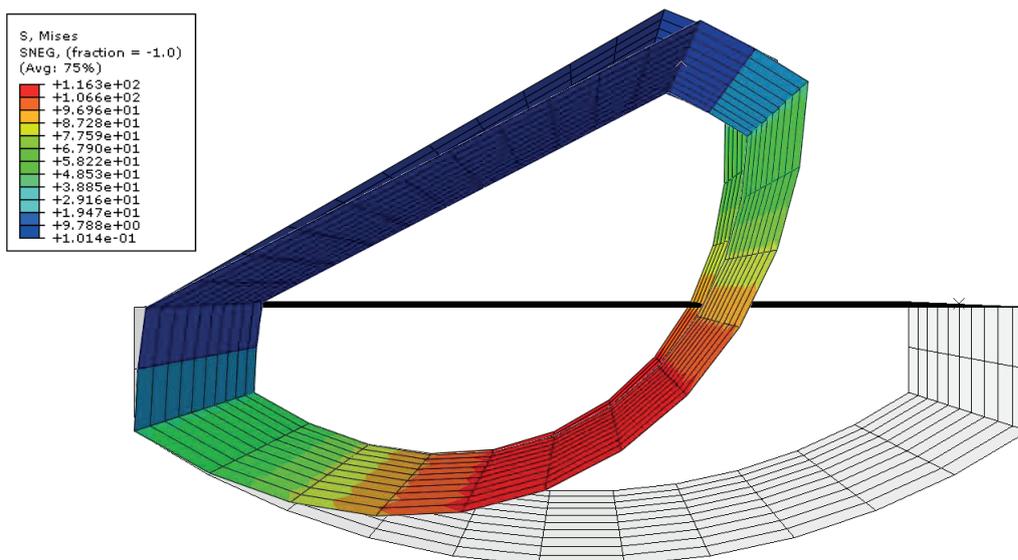


Abbildung 6.13 Ergebnisse aus dem Abaqus-Optimierungscript eines Blattfederaktors mit einer Vorstreckung des DE-Films von  $\lambda_{pre} = 1,8$

## F. Arbeitsmodell aus Polystyrol

Für die Auslegung und Dimensionierung der Blattfederaktoren wurde in Zusammenarbeit mit der HFBK ein Arbeitsmodell aus Polystyrol im Maßstab 1:1 hergestellt. Durch Verklebung und manueller spanender Bearbeitung von Blöcken aus Polystyrol entsteht ein ergonomisches Modell einer dreidimensionalen Freiformfläche. Auf der Fläche werden Geometrie und die Lage der aktiven Arme angezeichnet. Die Fläche dient ebenso als Vorlage für die PU-Weichschaumfläche des Demonstrators aus Anhang G.



Abbildung 6.14 Herstellung eines Arbeitsmodells aus verklebten Blöcken Polystyrols im Maßstab 1:1

## G. Demonstrator

Der Demonstrator soll als Brücke zwischen bestehenden Autositzen und der zukünftigen Technik der Blattfederaktoren dienen.

In Zusammenarbeit mit der HFBK ist ein Technologiedemonstrator im Maßstab 7:10 entstanden. Zur Darstellung des technischen Prinzips sollen die Blattfederaktoren in den Vordergrund gestellt werden. Die Ausführung der Polsterfläche und der Grundfläche sind daher in Form, Farbe und Oberfläche minimiert.

Neben den technischen Funktionen, soll auch der gestalterische Freiraum kommuniziert werden. Dies geschieht mit der Betrachtung folgender Kriterien [107]:

- Produktästhetik (Zweck),
- Funktionsästhetik (Art des Gebrauchs),
- Formalästhetik (Wirkung),

Durch die Verwendung der aktiven Blattfederaktoren bewegt sich der Demonstrator. Bewegungen haben hier einen funktionalen aber auch formalästhetischen Charakter. Bei der Auslegung der Art der Bewegung steht die Assoziation der Rezipienten im Vordergrund [21]. Der Sitz soll bei Aktivierung möglichst keine bedrohliche Wirkung haben. Die Aktoren bieten das Potenzial, je nach Steuerung auch ungleichförmige Bewegungen auszuführen. Das Anfahren der Zielpositionen soll in einer harmonischen Bewegung erfolgen. Hohe Stellgeschwindigkeiten und Beschleunigungen sind zu vermeiden.

Gestaltungselemente sind neben der Bewegung [107]:

- Geometrie (Dimension, Winkel, Radien,...),
- Farbe (Farbton, Helligkeit),
- Kontraste (Formkontrast, Farbkontrast, Oberflächenkontrast),
- Oberflächen (Struktur, Muster,...),

sowie deren Komposition.

Die Bestimmung der Gestaltungselemente beginnt anhand von Arbeitsmodellen. An den Modellen wird das Ziel verfolgt, die **Polsterung** als Freiformfläche zu gestalten. Die Kontur der Fläche soll frei von spitzen Winkeln und geringfügig organisch geschwungen sein. Die Oberfläche wird unstrukturiert und dreidimensional gewölbt realisiert. Die Wölbungen sollen auf die Möglichkeit hindeuten den Sitz ergonomisch auszulegen.

Die Rückseite der Fläche bietet Aufnahmen für die Blattfederaktoren. Um diese optisch in die Fläche zu integrieren werden zwei Ansätze verfolgt. Einerseits „wachsen„ Erhöhungen aus dem Polster und bieten Ebenen zur Ankopplung der Blattfederaktoren. Andererseits werden die Kanten der Polsterfläche mit einer Sichtlippe versehen (siehe Abbildung 6.15).

Als Farbton der glatten, strukturlosen Fläche wird Weiß (RAL 9016)<sup>24</sup> gewählt, um einen Kontrast zu den schwarzen (RAL 9017) Blattfedern zu erzeugen.

Die Fläche wird aus funktionalen Gründen aus einem Polyurethan-Weichschaum ausgeführt. Der weiche Schaum lässt sich durch Aktivierung der Blattfederaktoren verformen und bildet die Brücke zu heutigen Automobilsitzpolsterungen.



Abbildung 6.15 Modell der Polsterfläche aus PU-Weichschaum für den Demonstrator

---

<sup>24</sup> RAL: normiertes Farbsystem des Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen von 1927

Aufgrund der geringen Bauteildicke von 10 mm an der dünnsten Stelle, ist das Schäumen der PU-Fläche in einer Form aufgrund hoher Scherung problematisch. Daher wird diese von der Firma F.S. Fehrer Automotive GmbH aus Blockmaterial gefräst. Eine metallische Gießform wird daher nicht benötigt.

Die Konstruktion der **Blattfederaktoren** erfolgt mittels der vorangegangenen Methoden. Da im Betrieb des Demonstrators jedoch nur die Lasten der Gewichtskräfte aller Bauteile zu erwarten sind, werden die Aktoren mit geringer Lagenzahl und einem dünneren und weniger steifen Blattfederwerkstoff ausgeführt.

Als Blattfederwerkstoff dienen spritzgegossene Platten aus Polyamid12 mit 30% Kurzglasfaseranteil (Grilon LV-3H) der EMS Chemie AG. Diese haben eine Dicke von 1 mm und werden in einem Formwerkzeug bei 178°C umgeformt, sodass die in Abbildung 6.16 dargestellten Maße entstehen.

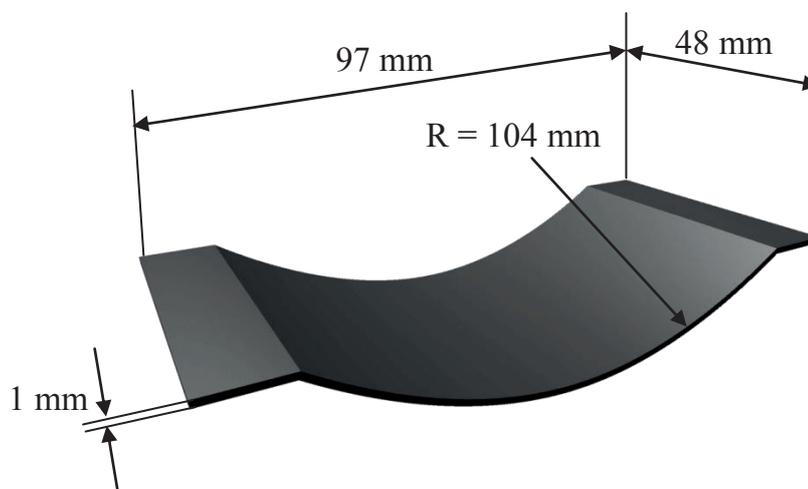


Abbildung 6.16 Geometrie der Blattfeder aus PA12-GF30 für die Ermittlung der Federkennlinie

Die Blattfeder wird nach dem in Abbildung 4.26 beschriebenen Versuch getestet. Parallel wird die Blattfeder mittels FEM modelliert und der gleiche Versuch simuliert.

Als geeignet für die Modellierung mit *shell*-Elementen zeigt sich ein linear-elastisches isotropes Materialmodell mit den in Tabelle 6.1 angegebenen Werten.

Tabelle 6.1 Materialdaten für das FEM-Modell des Blattfederwerkstoffs PA12

$Y_{\text{Grilon}}$	$\nu$
8156 MPa	0,39

Der Vergleich der Simulation und des Versuchs in Abbildung 6.17 legt den Schluss nahe, dass bei Auslenkungen oberhalb von 2 mm plastische Änderungen im PA12 auftreten. In dem hier verwendeten Materialmodell wird das plastische Verhalten nicht abgebildet.

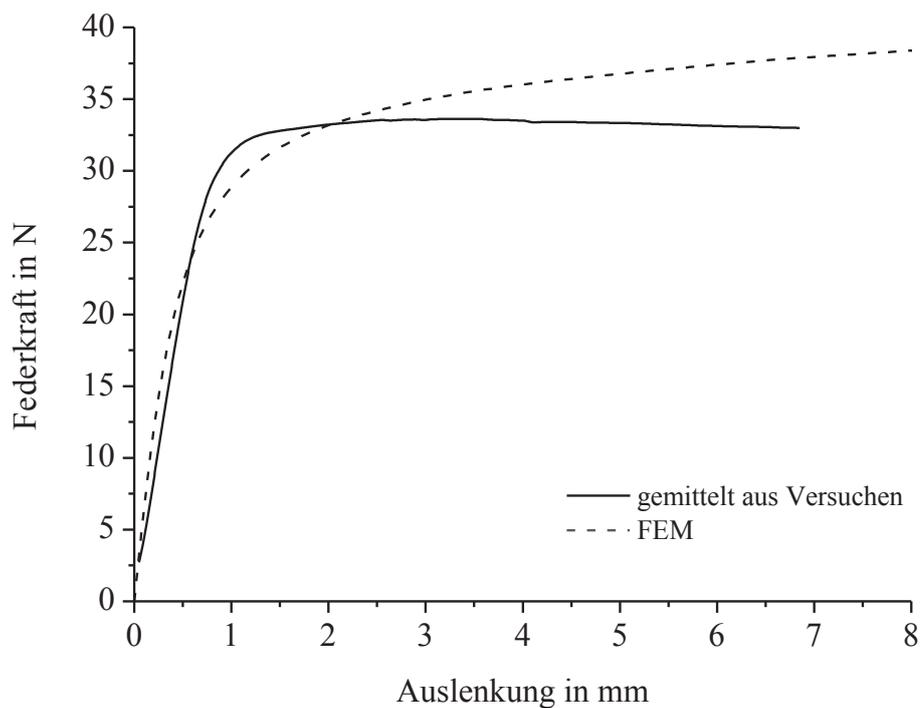


Abbildung 6.17 Vergleich des FEM-Modell mit den Versuchen der Blattfedern aus PA12

Für die Auslegung des Demonstrators wird die FEM um die DE-Filme erweitert. Abbildung 6.18 zeigt einen Arm aus zwei Blattfederaktoren bei einer Lagenzahl von  $n_{\text{DE}} = 10$ .

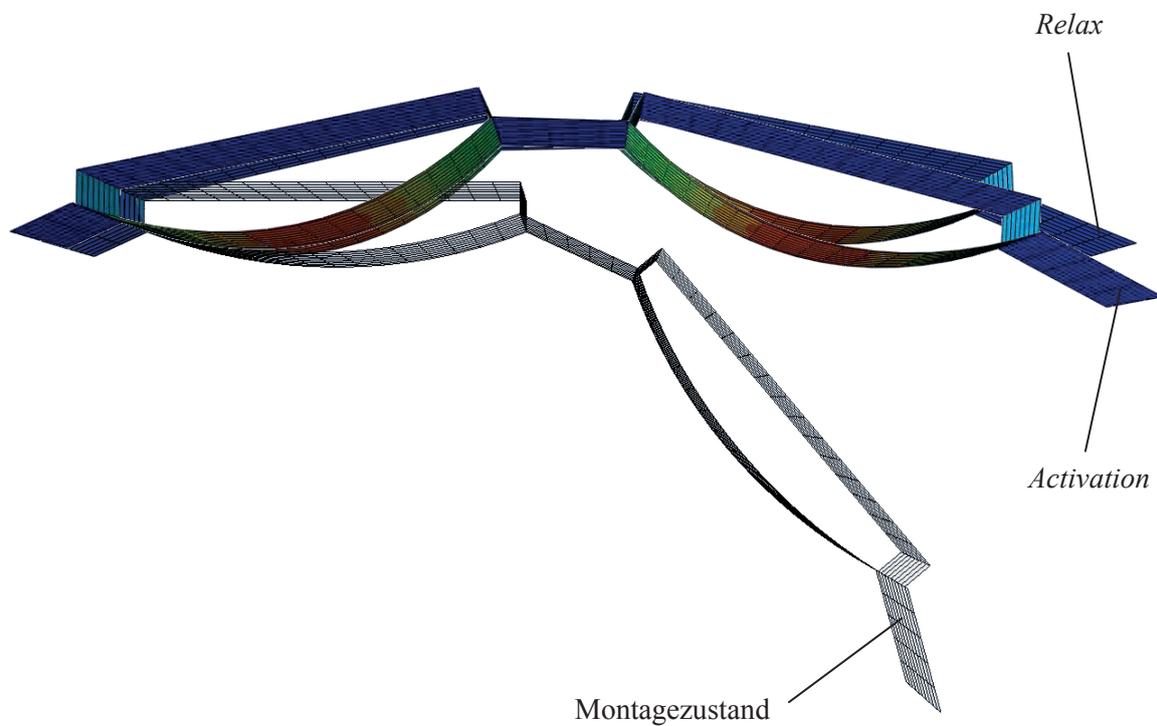


Abbildung 6.18 FEM-Modell eines Arms aus zwei Blattfederaktoren für die Stützung der Sitzfläche des Demonstrators

Insgesamt werden drei aktive Arme aus jeweils fünf Blattfederaktoren zur Stützung der Rückenlehne eingesetzt, drei weitere Arme mit je zwei Aktoren halten die Sitzfläche. Die Kontaktierung erfolgt, wie in Abbildung 4.28. An die Kontaktplättchen werden Hochspannungskabel gelötet und außerhalb der Aktoren zur HV-Quelle geführt (siehe Abbildung 6.19). Die Platten zur Klemmung des DE-Films werden aus schwarzem Thermoplast, Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), gefertigt. Die Platten zur Klemmung der Blattfeder und zur Abdeckung der Kontaktstellen bestehen aus weißem ABS.

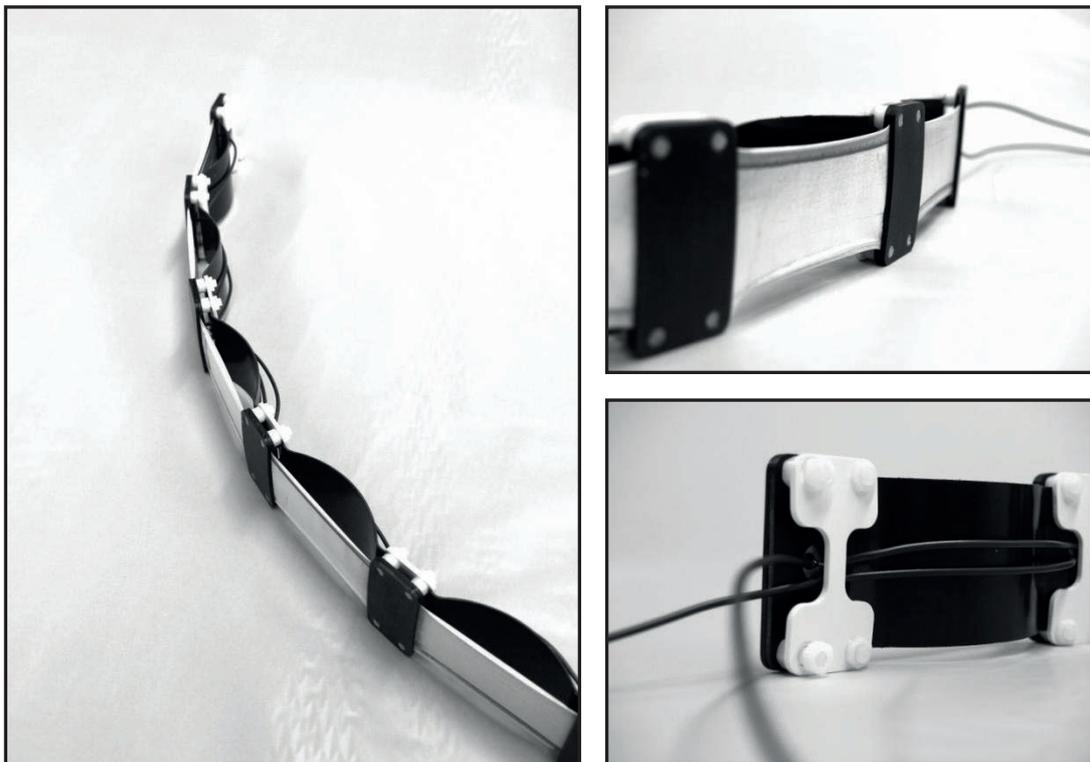


Abbildung 6.19 Fotografien der Arme aus Blattfederaktoren für den Technolgie demonstator

Zur Montage der Arme mit der Polsterfläche werden diese vorerst auf einer **Grundplatte** fixiert. Um zu zeigen, dass der Anschluss der Arme auf beliebigen Flächen erfolgen kann, dient eine runde Grundplatte mit einer großen Auswölbung. Diese wird aus Polystyrol manuell geformt und anschließend mit Glasfasergewebe und Epoxidharz manuell laminiert. Die Oberfläche wird geschliffen und in einem matten weiß (RAL 9016) lackiert. Zur Anbindung der Arme an die Grundplatte dienen thermisch umgeformte Kunststoffelemente aus ABS und PA12. Die Kabel zur Kontaktierung der Arme werden durch ein Loch in der Grundplatte geführt.

Abbildung 6.21 zeigt den Technolgie demonstator aus dem Zusammenbau der Blattfederaktoren, der Polsterung und der Grundplatte.



Abbildung 6.20 Grundplatte zur Montage der Arme aus Blattfederaktoren



Abbildung 6.21 Technologiedemonstrator einer aktiven Sitzfläche gestützt von Blattfederaktoren

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] N. Schefer. Philosophie des Automobils : Ästhetik der Bewegung und Kritik des automobilen Designs. Fink, Paderborn [u.a.], 2008.
- [2] J. Cooper, T. Ryley, A. Smyth. Contemporary lifestyles and the implications for sustainable development policy: Lessons from the UK's Most Car Dependent City, Belfast. *Cities* 2001. 18: S. 103-113.
- [3] D. R. Nolte. neuStart - Szenarien für den Automobilverkehr der Zukunft. 2007. Adresse: <http://www.neustart-ausstellung.de/>.
- [4] Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung. Abschlussbericht FE-Nr.: 070.757/2004. Szenarien der Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bis 2050. Magdeburg, 2006.
- [5] Deutsche Shell Holding GmbH. Shell PKW-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. Hamburg, 2009.
- [6] B. Scheufele. Perceived quality through optimal seat design. Konferenzbeitrag der 9th International CTI Forum "Automotive Seating". Köln, 2009.
- [7] L. H. Sullivan. The tall office building artistically considered. *Lippincott's Magazine*. 1896. Vol. 57: S. 403-409.
- [8] C. S. Peirce, C. Hartshorne, P. Weiss. Collected papers of Charles Sanders Peirce. Belknap Press of Harvard Univ. Press, Cambridge, 1931.
- [9] P. Rosenthal. Automobildesign und Gesellschaft - Zu Attraktivitätsaspekten der automobilen Gestaltsymbolik als Medien der sozialen Strukturierung. Dissertation. Darmstadt, 1999.
- [10] R. M. Balzer. Modellierung der Außengestalt von Personenkraftwagen zur Ermittlung eines Gestaltwertes. Inst. f. Maschinenkonstruktion u. Getriebebau d. Univ., Stuttgart, 2002.
- [11] M. Bense. Semiotische Prozesse und Systeme in Wissenschaftstheorie und Design, Ästhetik und Mathematik. Agis-Verl., Baden-Baden, 1975.
- [12] A. Kalweit, C. Paul, S. Peters. Handbuch für Technisches Produktdesign. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [13] R. B. Villaverde. Automotive Seats: a necessary change of mentality in terms of ergonomics. Konferenzbeitrag der 9th International CTI Forum "Automotive Seating". Köln, 2009.
- [14] H. Bubb. Seat comfort. Konferenzbeitrag der 9th International CTI Forum "Automotive Seating". Köln, 2009.
- [15] P. Fuchs-Frothnhofen, E. A. Hartmann, D. Brandt, D. Weydandt. Designing human-machine interfaces to match the user's mental models *Control Engineering Practice* 1996. 4: S. 13-18.
- [16] Persönliche Gespräche mit: Firma C. Rob. Hammerstein GmbH & Co. KG. Solingen, 2010.
- [17] M. Cassel. ISO/TS 16949 - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie umsetzen. Hanser, München [u.a.] /// München, 2007.
- [18] QMC Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA). Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Dekorative

- Oberflächen von Anbau- und Funktionsteilen im Außen- und Innenbereich von Automobilen - Beurteilungsbedingungen, Merkmalsdefinitionen und Fehleransprache, Annahmekriterien. Band 16. 2008.
- [19] Z. Zhu, Q. Ji. Robust real-time eyenext term detection and previous termtrackingnext term under variable lighting conditions and various face orientations. *Computer Vision and Image Understanding* 2005. 98: S. 124-154.
- [20] Deutsches Institut für Normung e. V. *Fahrdynamik und Fahrverhalten*. DIN 70000. 1991.
- [21] B. Arent. A practical framework to enhance the experiences for the late majoritys adoption within social communication technology. Dissertation. 2008.
- [22] Deutsches Institut für Normung e.V. *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. DIN 33402-2. 2005.
- [23] C. Mergl. Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen. Dissertation. München, 2006.
- [24] J.-P. D. M. Imlau. Skriptum "Optische Materialien". Osnabrück, 2004.
- [25] E. Hornbogen, N. Jost. *Fragen und Antworten zu Werkstoffe*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2005.  
<http://dx.doi.org/10.1007/b139013>. 04.11.2011.
- [26] A. Bies. *Piezo-Aktoren, Physikalische Grundlagen, Arbeitsprinzipien, Anwendungsbereiche* Semesterbegleitende Arbeit. Berlin, 2000.
- [27] F. Spitzer. *Piezoelektrizität und Verwandtes*. *Naturwissenschaften : organ of Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften ; Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte ; Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren*. 2004. Vol. 34: S. 40-45.
- [28] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co KG. *Piezo Tutorial: Piezoelectrics in Nanopositioning, Designing with Piezoelectric Actuators*. 2011. Adresse: [http://www.piezo.ws/piezoelectric\\_actuator\\_tutorial/Piezo\\_Design\\_part2.php](http://www.piezo.ws/piezoelectric_actuator_tutorial/Piezo_Design_part2.php).
- [29] A. Musolff. *Formgedächtnislegierungen - Experimentelle Untersuchung und Aufbau von adaptiven Strukturen*. Dissertation. Berlin, 2005.
- [30] G. Engdahl. *Handbook of giant magnetostrictive materials*. Academic Press, San Diego, Calif. [u.a.], 2000. 1-125.
- [31] S. D. Jinsong Leng. *Shape-memory polymers and multifunctional composites*. CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, 2010.
- [32] P. Lochmatter. *Development of a Shell-like Electroactive Polymer (EAP) Actuator*. Dissertation. Zürich, 2007.
- [33] Y. Bar-Cohen, American Institute of Aeronautics and Astronautics. *Smart structures and materials 2004 - Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD) : 15 - 18 March 2004, San Diego, California, USA*. SPIE, Bellingham, Wash., 2004.
- [34] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer. *Kunststoffe*. Springer eBook Collection. Berlin, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-72401-8>.
- [35] L. Mullins. Softening of rubber by deformation. *Rubber Chem. Technol.* 1969. 42: S. 339–362.
- [36] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh, J. P. Joseph. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation. *Sensors and Actuators A: Physical* 1998. 64: S. 77-85.

- [37] S. M. Ha, W. Yuan, Q. Pei, R. Pelrine, S. Stanford. Interpenetrating networks of elastomers exhibiting 300% electrically-induced area strain. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES* 2007. 16: S. 5280-5287.
- [38] Q. Pei. Dielectric Elastomers: Compliant Electrode Materials. Konferenzbeitrag der PhD Winterschool on Dielectric Elastomer Transducers. Ascona, Switzerland, 2010.
- [39] G. Kofod, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers. *Proc. of SPIE Smart Struct. and Mat.: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2001. 4329: S. 141-147.
- [40] Z. Suo. Theory of dielectric elastomers. *Acta Mechanica Solida Sinica* 2010. 23: S. 549-578.
- [41] J. Zhu, H. Stoyanov, G. Kofod, Z. Suo. Large deformation and electromechanical instability of a dielectric elastomer tube actuator. *Journal of applied Physics* 2010. 108: S. 1-5, DOI: 10.1063/1061.3490186.
- [42] J.-S. Plante, S. Dubowsky. Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators. *International Journal of Solids and Structures* 2006. 43: S. 7727-7751.
- [43] J. Zhou, W. Hong, X. Zhao. Propagation of instability in dielectric elastomers. *International Journal of Solids and Structures* 2008. 45: S. 3739-3750.
- [44] Persönliche Gespräche mit: Firma Wacker Chemie AG. München, 2010.
- [45] Internetpräsenz: Danfoss Polypower A/S. Nordborg, Denmark, 2011. Adresse: <http://www.polypower.com/>. 18.01.2011.
- [46] R. Johannknecht. The physical testing and modelling of hyperelastic materials for finite element analysis. Düsseldorf, 1999.
- [47] H. E. Kiil, M. Benslimane. Scalable industrial manufacturing of DEAP. Konferenzbeitrag der Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), *Proc. SPIE 7287, 72870R*. San Diego, CA, USA, 2009. 10.1117/12.815741
- [48] W. Roddeck. Einführung in die Mechatronik. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, 2006. 119-120.
- [49] J.-S. Plante, S. Dubowski. On the performance mechanisms of Dielectric Elastomer Actuators. *Sensors and Actuators A: Physical* 2007. 137: S. 96-109.
- [50] P. Lochmatter, G. Kovacs, P. Ermanni. Design and characterization of shell-like actuators based on soft dielectric electroactive polymers. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES* 2007. 16: S.
- [51] M. Cianchetti, V. Mattoli. A new design methodology of electrostrictive actuators for bio-inspired robotics. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2009. 142: S. 288-297.
- [52] G. Berselli, R. Vertechy. Experimental Evaluation of Optimal Conically-Shaped Dielectric Elastomer Linear Actuators. Konferenzbeitrag der The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2009.
- [53] G. Kofod, M. Paajanen, S. Bauer. Self-organized minimum-energy structures for dielectric elastomer actuators. *Applied Physics* 2006. A 85: S. 141-143.
- [54] B. Aryana. Implementing DEA to create a novel type of compressor. *Materials Science and Engineering C* 2009. 30: S. 42-49.

- [55] R. Heydt, R. Kornbluh, R. Pelrine, V. Mason. Design and performance of an electrostrictive-polymer-film acoustic actuator. *Journal of Sound and Vibration* 1998. 215: S. 297-311.
- [56] R. Zhang, A. Kunz, G. Kovacs, S. Michel, A. Mazzone. Dielectric Elastomer Actuators for A Portable Force Feedback Device. Zürich, 2004.
- [57] J. Vogan, A. Wingert, J.-S. Plante, S. Dubowsky, M. Hafez. Manipulation in MRI Devices using Electrostrictive Polymer Actuators: With an Application to Reconfigurable Imaging Coils. Konferenzbeitrag der IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans 2004. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 2004.
- [58] J. W. Kwak, H. J. Chi, K. M. Jung, J. C. Koo. A Face Robot Actuated With Artificial Muscle Based on Dielectric Elastomer. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2005. 19: S. 578-588.
- [59] F. Carpi, D. D. Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen. Dielectric elastomers as electromechanical transducers : fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology. Elsevier, Amsterdam ;London, 2008.
- [60] C. Menon, FedericoCarpi, DaniloDeRossi. Concept design of novel bio-inspired distributed actuators for space applications *Acta Astronautica* 2009. 65: S. 825-833.
- [61] H.-M. Wang, J.-Y. Zhu, K.-B. Ye. Simulation, experimental evaluation and performance improvement of a cone dielectric elastomer actuator. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 2009. 10: S. 1296-1304.
- [62] G. Kofod, H. Stoyanov, R. Gerhard. Multilayer coaxial fiber dielectric elastomers for actuation and sensing. *Applied Physics A* 2010. 102: S. 577-581.
- [63] M. Matysek. Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [64] S. Michel, G. Kovacs, P. Lochmatter. Patent: Antrieb für einen Leichter-als-Luft-Flugapparat. Patent, 2005.
- [65] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote, B. Pahl. *Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung.* Springer. Berlin ;Heidelberg, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34061-4>. 11.01.2011.
- [66] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2424. *Industrial Design – Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen.* 1986.
- [67] K. Ehrlenspiel. *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.* Hanser, München, 2007.
- [68] Verein Deutscher Ingenieure-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* VDI 2221. 1993.
- [69] J. Reese, U. Lindemann, H. Seeger, A. Thallemer, H. H. Wetcke. *Der Ingenieur und seine Designer: Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/b138631>. 12.01.2011.
- [70] J. Goos, R. Zang. Abschlussbericht: Lösungen für eine neuartige Integration von Produktdesign in den Produktentwicklungsprozess für die

- Investitionsgüterbranche. IAF – Institut für Angewandte Forschung. Hochschule Pforzheim. Pforzheim, 2009.
- [71] The Open University. Engineering and Technology: T173-2: Manufacturing. Milton Keynes, 2011.  
<http://openlearn.open.ac.uk/mod/oucontent/view.php?id=399740&direct=1>
- [72] Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. DIN EN ISO 527-3. 2003.
- [73] Deutsches Institut für Normung e.V. Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen. DIN EN 50191. 2001.
- [74] Deutsches Institut für Normung e.V. Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren Teil 2: Zusätzliche Anforderungen für Prüfungen mit Gleichspannung DIN EN 60243-2 2001.
- [75] P.-D.-I. B. Kröplin. Skriptum: Diskretisierung I - Einführung in die Finite Elemente Methode. Stuttgart, 2006.
- [76] ABAQUS/Standard Manual. Version 6.9-3, Hibbitt, Karlsson und Sorensen, Inc., 2009.
- [77] M. T. Wissler. Modeling dielectric elastomer actuators. Dissertation. Zürich, 2007.
- [78] B. O'Brien. Finite element modelling of dielectric elastomer minimum energy structures. Applied Physics A 2009. 94: S. 507-514.
- [79] M. Wissler, D. G. Kovacs, P. D. M. Farshad, P. D. E. Mazza. Modeling and Simulation of Dielectric Elastomer Actuators. SMART MATERIALS AND STRUCTURES 2005. 14: S. 1396-1402.
- [80] M. Wissler, E. Mazza. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers. Sensors and Actuators A: Physical 2005. 120: S. 184-192.
- [81] M. Wissler, E. Mazza. Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuators Sensors and Actuators A: Physical 2007. 134: S. 494-504.
- [82] M. Wissler, E. Mazza. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators Sensors and Actuators A: Physical 2007. 138: S. 384-393.
- [83] W. Jung, Y. Toi. Computational Modeling of Electromechanical Behaviors of Dielectric Elastomer Actuators Konferenzbeitrag der International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. 2010.
- [84] O. H. Yeoh. Some forms of the strain energy function for rubber. Rubber Chemistry and Technology 1993. 66: S. 754-771.
- [85] H. Eils, D. Jarr, K. Schulte. Modeling and evaluation of a leafspring actuator made of dielectric elastomer with compliant metallic electrode. Sensors and Actuators A: Physical. Eingereicht 2011.
- [86] Internetpräsenz: SARTRE Project. 2009. Adresse: <http://www.sartre-project.eu/>. 22.03.2011.
- [87] Deutsche Institut für Normung e. V. Büromöbel - Büro-Arbeitsstuhl - Teil 2: Sicherheitsanforderungen. DIN EN 1335-3. 2009.
- [88] Deutsches Institut für Normung e.V. Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte. 2005.
- [89] T. Hengartner, J. Rolshoven. Technik - Kultur : Formen der Veralltäglicung von Technik - Technisches als Alltag. Chronos, Zürich, 1998.

- [90] T. Rossmann, C. Tropea. Bionik - Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur-und Geisteswissenschaft. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/b138351>. 02.02.2010.
- [91] A. Bezazi, F. Scarpa. Mechanical behaviour of conventional and negative Poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading. *International Journal of Fatigue* 2005. 29: S. 922-930.
- [92] R. Haberfellner, W. F. Daenzer. Systems engineering. Methodik und Praxis. Zürich, 2002.
- [93] Persönliche Gespräche mit: F.S. Fehrer Automotive GmbH. Kitzingen, 2011.
- [94] H. Bouasse, Z. Carrière. Courbes de traction du caoutchouc vulcanisé. *Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse Sci. Math. Sci. Phys.* 1903. 5: S. 257–283.
- [95] D. D. Tommasi, G. Puglisi. A micromechanics-based model for the Mullins effect. *Journal of Rheology* 2006. 50: S. 495-512.
- [96] G. Kofod, P. Sommer-Larsen. Silicone dielectric elastomer actuators Finite-elasticity model of actuation. *Sensors and Actuators A: Physical* 2005. 122: S. 273-283.
- [97] R. W. Jones, P. Wang, B. Lassen, R. Sarban. Dielectric Elastomers and Compliant Metal Electrode Technology. Konferenzbeitrag der MELECON 2010 - 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference 2010.
- [98] I. f. Kunststoffverarbeitung. Compositor. Hilfsmittel zur Analyse von Laminaten aus Faserverbundkunststoffen. Aachen, 2009
- [99] K. Schulte. Skriptum "Structure and Properties of Composite Materials". Hamburg, 2004.
- [100] Internetpräsenz: EMS-Chemie AG. EMS, 2011. Adresse: <http://ems.materialdatacenter.com/eg/>. 08.03.2011.
- [101] Internetpräsenz: Deutsche Edelstahlwerke GmbH. Witten, 2011. Adresse: <http://www.dew-stahl.com>. 08.03.2011.
- [102] S. Odenwald. Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste. Dissertation. 2002.
- [103] F. v. Lacroix. Polyethylen / Polyethylen. Entwicklung eines sortenreinen Verbundwerkstoffes. Dissertation. Hamburg, 1997.
- [104] S. Laflamme, M. Kolloosche, J. J. Connor, G. Kofod. Large-scale capacitance sensor for health monitoring of civil structures. Konferenzbeitrag der 5th World Conference on Structural Control and Monitoring. 2010.
- [105] A. Lion. On the large deformation behaviour of reinforced rubber at different temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1998. 57: S. 1805-1834.
- [106] B. Lassen, P. Wang, R. W. Jones, X. Zhang. Fully Coupled Electromechanical Model for Dielectric Elastomer Sheets. *Transactions on mechatronics* 2011. 16: S. 9-15.
- [107] G. Lenschow. Skriptum: Flächengestaltung 1-2. Stuttgart, 2007.



# Lebenslauf

<b>Name</b>	Jarr
<b>Vorname</b>	Daniel
<b>Geburtsdatum</b>	05.06.1981
<b>Geburtsort, -land</b>	Hamburg, Deutschland
<b>08.1987-06.1991</b>	Grundschule Meckelfeld, Niedersachsen
<b>08.1991-06.1992</b>	Orientierungsstufe Meckelfeld, Niedersachsen
<b>08.1992-06.2000</b>	Alexander-von-Humboldt-Gymnasium, Hamburg
<b>09.2000-06.2001</b>	Zivildienst bei der Deutschen Muskelschwund-Hilfe e.V., Hamburg
<b>10.2001 – 12.2007</b>	Studium Maschinenbau/Produktentwicklung an der Technischen Universität Hamburg-Harburg Abschluss: Diplom
<b>01.2008 – 04.2011</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Hamburg-Harburg



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

### **Impressum**

TuTech Verlag  
TuTech Innovation GmbH  
Harburger Schloßstr. 6-12  
21079 Hamburg  
Tel: +49 40 76629-0  
Fax: +49 40 76629-6559  
E-Mail: [verlag@tutech.de](mailto:verlag@tutech.de)  
[www.tutechverlag.de](http://www.tutechverlag.de)

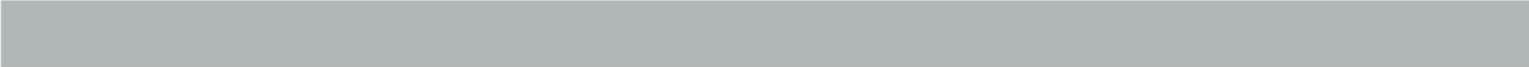
Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder -verwertungssysteme sind -auch auszugsweise- ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TuTech Innovation GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus der Technisch wissenschaftlichen Schriftenreihe des Instituts für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.  
© TuTech Innovation GmbH

ISBN 978-3-941492-32-5





# TUHH

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

Editor: Karl Schulte

**ISBN 978-3-941492-32-5**

2011, all rights reserved

[www.tutechverlag.de](http://www.tutechverlag.de)

**TuTech**  
VERLAG

