



FAU Studien aus dem Maschinenbau 455

Sina Martin

Einstellung anisotroper Eigenschaften
dielektrischer Elastomersysteme
mittels eines selektiven
Druckverfahrens

Sina Martin

Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme
mittels eines selektiven Druckverfahrens

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 455

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Sina Martin

**Einstellung anisotroper Eigenschaften
dielektrischer Elastomersysteme
mittels eines selektiven
Druckverfahrens**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2024

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.

Kontakt: Sina Martin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), ORCID: 0000-0002-2146-8265

Bitte zitieren als

Martin, Sina. 2024. *Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 455. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-790-6

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-789-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-790-6 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-790-6

**Einstellung anisotroper Eigenschaften
dielektrischer Elastomersysteme
mittels eines selektiven Druckverfahrens**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Sina Martin, M.Sc.

aus Fürth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 02.02.2024

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach,
TU Dresden

Vorwort

Die Arbeit wurde während meiner Beschäftigung als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg verfasst.

Ich möchte mich insbesondere bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke bedanken, der mich mit seiner anspruchsvollen Art motiviert und mir großes Vertrauen als Leiterin des Forschungsbereichs Medizintechnik entgegengebracht hat. Ich schätze die vielen Freiheiten, die wir am Lehrstuhl haben und die Chance, unser Können und Wissen auszubauen. Ich danke besonders Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. Gerald Gerlach, der mein zweites Gutachten übernommen und wertvolles Feedback zu meiner Arbeit gegeben hat. Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk W. Schubert möchte ich meinen Dank als weiteres Mitglied des Prüfungsausschusses und Prof. Paul Steinmann für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens aussprechen.

Ein besonderer Dank geht an die Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, mit denen stets angeregte fachliche Diskussionen möglich sind. Viele von ihnen sind inzwischen gute Freunde, mit denen man nicht nur fachlichen und kreativen Input austauschen, sondern auch abseits des Arbeitsalltags die Gedanken schweifen lassen kann. Insbesondere möchte ich mich bei der Biomechatronik und der Medizintechnik für die Hilfe bedanken. Ich konnte die Arbeit nur durch euren Einsatz fürs Team und den fachlichen Austausch erfolgreich abschließen. Außerdem danke ich den Kollegen und Kolleginnen der anderen Forschergruppen im Bereich dielektrischer Elastomere, die durch intensiven Austausch auf den Konferenzen zur Fertigstellung der Arbeit beigetragen haben.

Abschließend möchte ich mich bei den wichtigsten Personen, meiner Familie und meinen Freunden, für eure Ehrlichkeit, euer Verständnis und eure Unterstützung bedanken. Insbesondere bei meinen Eltern, die mir ein unergründliches Vertrauen in meine Fähigkeiten entgegenbringen und bei meinen Freunden, die mir meinen Freiraum geben und dennoch immer ein offenes Ohr für mich haben.

Ich danke euch dafür, dass ihr in mir seht, was ich oft selbst nicht sehe!

Erlangen, Februar 2024

Sina Martin

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis	xxiv
1 Einleitung	1
1.1 Bedarf intelligenter Materialsysteme nach dem Vorbild der Natur.....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Forschung	7
2.1 Grundlagen dielektrischer Elastomere.....	7
2.1.1 Physikalische Zusammenhänge dielektrischer Elastomeraktoren	8
2.1.2 Funktionsprinzipien dielektrischer Elastomersensoren	11
2.2 Modellierung des statischen Systemverhaltens	14
2.2.1 Einflüsse des nicht linearen Materialverhaltens	15
2.2.2 Systembetrachtung auf Basis perkolierender Partikelsysteme	18
2.2.3 Randbedingungen anisotroper Systeme zur Modellierung des Systemverhaltens.....	21
2.3 Konzepte für anisotrope dielektrische Elastomere	24
2.3.1 Systemkenngrößen zur Anisotropieerzeugung.....	24
2.3.2 Forschungsansätze zur Erzeugung anisotroper Bewegungsmuster	26
2.3.3 Stand der Forschung zur Erzeugung richtungsabhängiger Signale	30
2.4 Herstellungsverfahren für anisotrope dielektrische Elastomere	35
2.4.1 Konzeption eines geeigneten Fertigungsverfahrens.....	36
2.4.2 Automatisierte Herstellung komplexer elektromechanischer Wandler	39
2.4.3 Einflussgrößen des Aerosol-Jet-Drucks.....	44
2.5 Forschungsbedarf für optimierte anisotrope dielektrische Elastomere	47

3	Quantifizierung des Aerosol-Jet-Druckprozesses für die Herstellung funktionalisierter Elektroden	51
3.1	Prozesscharakterisierung der selektiven additiven Fertigung	51
3.1.1	Analyse der signifikanten Haupteffekte	51
3.1.2	Wechselwirkungen der elektrischen Eigenschaften gedruckter Elektroden	54
3.1.3	Quantifizierung der Effekte mittels linearer Regressionsanalyse der Prozessparameter	58
3.2	Prozessseitige Einstellbarkeit additiv gefertigter Elektroden unter mechanischer Last	61
3.2.1	Kausalitäten der prozessabhängigen Haupteffekte auf die Systemeigenschaften unter mechanischer Last	62
3.2.2	Wechselwirkung druckstrategieabhängiger Systemeigenschaften unter Last	64
3.2.3	Statistische Modellbildung zur Quantifizierung additiv gefertigter Elektroden unter Last	67
3.3	Zusammenfassung und Fazit der Prozessuntersuchung	70
4	Anisotrope dielektrische Elastomeraktoren mit segmentierten, homogenen Elektroden.....	73
4.1	Herleitung der physikalischen Zusammenhänge anisotroper Aktoren	73
4.1.1	Konzeptionierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren mit segmentierten Elektroden	74
4.1.2	Wirkprinzip der elektromechanischen Kopplung segmentierter dielektrischer Elastomeraktoren.....	76
4.2	Numerische Betrachtung der anisotropen Systemanpassungen	80
4.2.1	Elektromechanisches Modell anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren	81
4.2.2	Zielgrößenoptimierung für Systeme mit segmentierten Elektroden	83
4.3	Gestaltungsrichtlinien für optimierte anisotrope Aktoren	86
5	Aufbau und Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren	91
5.1	Experimentelle Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren	91
5.1.1	Expansionsverhalten segmentierter Elektroden	91
5.1.2	Validierung der anisotropen Eigenschaften	94
5.1.3	Schlussfolgerungen für optimierte anisotrope Aktoren	95

5.2	Praktische Evaluierung anisotroper dielektrischer Elastomerkatoren	96
5.2.1	Anisotrope Irisaktoren für den Einsatz als funktionelles Implantat	97
5.2.2	Evaluierung des anisotropen Bewegungsverhaltens.....	99
5.2.3	Validierung des resultierenden Leistungsspektrums	102
6	Anisotrope dielektrische Elastomersensoren für richtungsabhängige Signale	105
6.1	Herleitung der anisotropen Sensoren basierend auf heterogenen Elektroden	105
6.1.1	Funktionsweise dielektrischer Elastomersensoren mit heterogenen Elektroden	106
6.1.2	Wechselwirkung des belasteten Perkolationsclusters mit dem Systemverhalten	109
6.2	Modellbasierte Betrachtung der anisotropen Systemanpassungen ...	110
6.2.1	Erweitertes Perkolationsmodell für Systeme mit elektrischer Anisotropie.....	111
6.2.2	Zielgrößenoptimierung für gerichtete Perkolationscluster	114
6.3	Gestaltungsrichtlinien für optimierte anisotrope Sensoren.....	116
7	Experimentelle Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomersensoren	119
7.1	Evaluierung der anisotropen Sensorsignale	119
7.1.1	Funktionsüberlagerte Sensorelemente für gesteigerte Informationsdichten.....	120
7.1.2	Charakterisierung von unterschiedlichen Lastrichtungen.....	123
7.1.3	Schlussfolgerung für optimierte anisotrope Sensoren.....	126
7.2	Praktische Evaluierung anisotroper dielektrischer Elastomersensoren	128
7.2.1	Körpergetragene anisotrope Sensoren für die ganzheitliche Bewegungskdetektion	128
7.2.2	Evaluierung der anisotropen Sensorsignale.....	130
7.2.3	Validierung des resultierenden Systemeigenschaften	133
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
9	Summary and outlook.....	141
	Anhang.....	145

Literaturverzeichnis.....	147
Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen.....	165
Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten	167

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
k_{ξ}		Zusammenhangslänge des Perkulationsclusters
\parallel		Index für Orientierung parallel zur Bahnrichtung
\perp		Index für Orientierung senkrecht zur Bahnrichtung
μ		Kritischer Leitfähigkeitsexponent des Perkulationsclusters
A	μm^2	Elektrodenfläche
A^*		Anteil der Elektrodenfläche an Gesamtfläche
a_{DEA}		Anisotropieverhältnis zwischen maximaler und minimaler Deformationsrichtung
a_{DES}		Anisotropieverhältnis der richtungsabhängigen Signalamplituden
AJP		Aerosol-Jet-Druck (engl. aerosol jet printing)
b_{E}	μm	Breite der Elektrodensegmente
b_{P}	μm	Breite der passiven Zonen zwischen den Elektrodensegmenten
C	nF	Kapazität
CAD		Computergestütztes Design (engl. computer aided design)
$C_{i,j}$		Rechter Cauchy-Green-Tensor
CNT		Kohlenstoffnanoröhrchen (engl. carbon nano tubes)
C-PDMS		Polydimethylsiloxan gefüllt mit Kohlenstoff
d	μm	Dielektrikumsdicke
D		Dämpfungsfaktor
d_{B}	μm	Bahnabstand
d_{D}	μm	Abstand zwischen Düse und Substrat
DE		Dielektrischer Elastomer

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
DEA		Dielektrischer Elastomeraktor
DES		Dielektrischer Elastomersensor
DIW		Auf flüssigen Werkstoffen basierendes direkt-schreibendes Druckverfahren (engl. Direct Ink Writing)
E	Ws	Elektrische Energie
EAP		Elektroaktiver Polymer
E -Feld		Elektrisches Feld
f	s ⁻¹	Frequenz der Wechselspannung
FEM		Methode der finiten Elemente
FFF		Strangextrusionsverfahren (engl. fused filament fabrication)
I_1		Erste Invariante des Cauchy-Green-Tensors
I_2		Zweite Invariante des Cauchy-Green-Tensors
I_3		Dritte Invariante des Cauchy-Green-Tensors
L		Kantenlänge des betrachteten Ausschnitts
<i>LCR-Meter</i>		Messgerät für die elektrischen eigenschaften Induktivität (L), Kapazität (C) und Widerstand (R))
m		Ordnung der Perkolation
$M(L)$		Anzahl der Punkte des Hauptclusters
m_v	sccm	Volumenstrom
n		Stichprobenumfang
n_L		Anzahl der Schichten pro Elektrodenlage
p		Besetzungsdichte
P		Dichte der besetzten Gitterpunkte
$p(\lambda)$		Besetzungsdichte in Abhängigkeit der Dehnung
$P_\infty(p)$		Perkolationswahrscheinlichkeit
p_c		Perkolationschwelle
PDMS		Polydimethylsiloxan
p_{el}	Pa	Elektrostatischer Druck

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
PLA		Polylactid
p_z	Pa	Vertikale Druckkomponente von p_{el}
Q	As	Elektrische Ladung
r	μm	Radius
R_{\square}	$\text{k}\Omega$	Flächenwiderstand
R_0	$\text{k}\Omega$	Ausgangswiderstand (unbelastet)
R^2	%	Bestimmtheitsmaß
R2R		Rolle-zu-Rolle
SBAS		Einzelblock-Adsorptionszustand (engl. single-block adsorption state)
TPU		Thermoplastisches Polyurethan
U	V	Elektrische Spannung
$u(p)$	$\text{m}^2 \text{Vs}^{-1}$	Beweglichkeit der Ladungsträger in Abhängigkeit der Besetzungsdichte
v_{AJP}	μms^{-1}	Verfahrgeschwindigkeit der Düse
W	J	Verzerrungsenergie
X_c	Ω	Blindwiderstand des Kondensators
Y	Pa	Young'scher Modul
Z_c	Ω	Impedanz des Kondensators
β		Kritischer Exponent des Perkolationsclusters
Δl	μm	Längenänderung
ϵ_0	As Vm^{-1}	Permittivität des Vakuums ($8,85 \cdot 10^{-12}$)
ϵ_l	μm	Längsdehnung
ϵ_q	μm	Querdehnung
ϵ_r	As Vm^{-1}	Materialabhängige Permittivität (3,0 für Elastosil® P7670 von Wacker)
ϵ_x	μm	Deformation in x-Richtung
ϵ_y	μm	Deformation in y-Richtung
ϵ_z	μm	Deformation in z-Richtung
θ	rad	Winkel der Gelenkbewegung
λ	%	Mechanische Streckung

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
ρ		Korrelationskoeffizient nach Pearson
$\sigma(\rho)$	Ω^{-1}	Spezifischer elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der Besetzungsdichte
σ_{x-z}	Pa	Normalspannungen in den Hauptrichtungen
τ_{xy}	Pa	Tangentialspannung in der x-y-Ebene
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz ($=2\pi f$)
ν		Poissonzahl ($=0,5$ ~ inkompressibel)
GF		Dehnungsfaktor (engl. Gauge factor)

Bildverzeichnis

Bild 1:	Beispielbilder der Bionik, welche die Parallelen zwischen natürlichem Vorbild und technischer Umsetzung verdeutlichen. Lotus-Effekt® von Oberflächenstrukturen in Anlehnung an die Oberflächen von Pflanzenblättern (links), Klettverschluss mit ähnlicher Geometrie zu Pflanzenstrukturen (rechts)	1
Bild 2:	Vergleich des Aufbaus der menschlichen Skelettmuskulatur (links) mit dem Systemaufbau gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren (rechts)	2
Bild 3:	Vergleich der erreichbaren Energiedichte und der maximalen Dehnungen von DEA mit der menschlichen Muskulatur (Werte entnommen aus [9, 10, 5, 12])	3
Bild 4:	Mechanorezeptoren der Haut in verschiedenen Schichten mit multiplen sensorischen Funktionen (links) im Vergleich zu einem mehrschichtigen Sensoraufbau auf Basis von DES (rechts)	4
Bild 5:	Schematische Darstellung des Wirkprinzips von DEA im Ausgangszustand (links) und im gestauchten Zustand unter angelegter elektrischer Spannung U (rechts). Für konventionelle DE baut sich ein homogenes E-Feld E zwischen den Elektroden auf. Die dargestellte Flächenvergrößerung senkrecht zu den Feldlinien des flexiblen Systems stellt den Quereffekt dar, der in Membranaktoren genutzt wird.	9
Bild 6:	Leistungspotenzial einfacher Membranaktoren im Vergleich zu passiv gedehnten Membranen und Systemvarianten mit zusätzlichen Bauteilen, die in Kapitel 2.3.2 näher erläutert werden [10, 24, 30–35]	11
Bild 7:	Schematische Darstellung der untersuchten Sensorprinzipien zur Detektion mechanischer Deformation. Sowohl unter Druck- als auch unter Zugkräften können Widerstands- und Kapazitätsänderungen gemessen werden.	12

Bild 8:	Ersatzschaltbilder zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften von DE über ein RC-Glied (Mitte) oder unter Berücksichtigung parasitärer Effekte (rechts)	13
Bild 9:	Festkörpermodell, zusammengesetzt aus einer Reihenschaltung aus Feder und Dämpfer (Maxwell) und einer Parallelschaltung mit einer Feder (Kelvin-Voigt), in Anlehnung an [21]	15
Bild 10:	Vergleich der praktischen Testdaten (Punkte) von Elastosil® P7670 mit 15 % Silikonöl AK 100 mit den Kurven verschiedener hyperelastischer Modelle (Linien) in „ANSYS (2021 R2)“ von Ansys Inc. (2021). Dargestellt sind uniaxiale (blau) und biaxiale (rot) Testdaten (Messdaten [S ₂])	17
Bild 11:	Perkolationscluster aus leitfähigen Graphenpartikeln (schwarz) mit unterschiedlicher Besetzungsdichte. Die farbliche Markierung zeigt beispielhaft die elektrisch leitfähige Verbindung bei Überschreiten der Perkolationschwelle. (Aufnahmen in 100-facher Vergrößerung, erstellt mit dem Durchlichtmikroskop Kern OBE 114).....	19
Bild 12:	Zusammenhang der spezifischen Leitfähigkeit und der Besetzungsdichte des Partikelclusters oberhalb von 0,50 (n = 12)	20
Bild 13:	Deformation eines finiten Elements elektrostatischen Druckkräften mit den resultierenden Materialspannungen σ_x und σ_y in x- und y-Richtung.....	23
Bild 14:	Einteilung der Forschungsansätze zur Erzeugung anisotropen Verhaltens von DE nach den jeweiligen Wirkmechanismen.....	25
Bild 15:	Alternative Aufbauformen von DEA zur Umlenkung der uniaxialen Bewegung eines Membranaktors in eine Vorzugsrichtung als a) Rollenaktor, b) Helixaktor oder c) Spinnenaktor (von links nach rechts).....	28
Bild 16:	a) Segmentierung der Elektroden in einzelne DES, b) Mikrostrukturierung der Elektroden, c) Stempelgeometrie zur Umwandlung von Druck- in Zugbelastungen nach [37], d) Schematische Darstellung des elektrischen	

	Dämpfungsverhaltens dielektrischer Elastomere für die lokale Auflösung applizierter mechanischer Kräfte	31
Bild 17:	Schematische Darstellung des mikroskopischen Elektrodenaufbaus in Abhängigkeit von Bahnorientierung und Krafrichtung. Eine senkrecht zum Druckmuster wirkende Kraft führt dabei zu einer stärkeren Separation der einzelnen Bahnen. Dadurch werden die Abstände im Perkolationsnetzwerk vergrößert und der Flächenwiderstand erhöht.....	32
Bild 18:	Aufzählung der aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren für die Herstellung anisotroper DE auf Basis der Elektrodenmodifizierung nach DIN 8580. Die übrigen Hauptgruppen der Norm (Urformen, Trennen und Stoffeigenschaften ändern) sowie die anderen Unterkategorien werden zur übersichtlicheren Darstellung weggelassen.....	35
Bild 19:	Schematische Darstellung des AJP-Prozesses zur Herstellung von DE bestehend aus getrennten Behältern für die Silikonkomponenten, die mit einer Düse gedruckt werden und einem Hybridatomizer für die Herstellung von leitfähigen Elektroden	40
Bild 20:	Prinzipiskizze der Überlappung einzelner Druckbahnen, durch einen geringeren Bahnabstand d_B kommt es zu einer größeren Überlappung, wobei jede Schicht aus mehreren Materiallagen besteht	41
Bild 21:	Schematische Darstellung der digitalen Prozesskette für additiv gefertigte Bauteile, wobei die spezifischen Anpassungen grau hinterlegt sind	42
Bild 22:	Ursache-Wirkungs-Diagramm für die betrachteten Einflussfaktoren auf die Systemparameter der DE. Für eine übersichtliche Darstellung werden die als konstant betrachteten Haupteinflussparameter „Mensch“ und „Milieu“ vereinfacht dargestellt.....	45
Bild 23:	Schematische Darstellung der Wirkprinzipien basierend auf heterogenen Elektroden zur Erzeugung anisotropen Systemverhaltens. Die vom System erzeugten Deformationen sind in schwarz dargestellt, externe Lasten in grün	48

Bild 24:	Aufbau der vorliegenden Dissertationsschrift mit farblicher Zuordnung der Abschnitte zu den jeweiligen Forschungsfragen.....	50
Bild 25:	Black-Box-Diagramm des betrachteten Aerosol-Jet-Druckprozesses. Von links fließen die einstellbaren Prozessparameter als Einflussfaktoren in den Prozess ein, die von den von oben einfließenden Störgrößen gestreut werden. Die Zielgrößen rechts sind das Resultat dieser Wechselwirkung. Nicht beeinflussbare Größen sind grau, konstant gehaltene Größen schraffiert	52
Bild 26:	Haupteffektdiagramme der maßgeblichen Einflussfaktoren des Prozesses und deren Auswirkung auf die elektrische Leitfähigkeit als Basis für die Herstellung anisotroper Systemeigenschaften von DE ($n = 36$; sofern nicht anders angegeben $n_L = 4$, $d_B = 200 \mu\text{m}$).....	53
Bild 27:	Konturdiagramme der Beziehung zwischen Lagenzahl und Bahnabstand und deren Effekt auf die Bedeckung der Elektrodenfläche (links) und den resultierenden Widerstand (rechts) ($n = 36$).....	55
Bild 28:	Zusammenhang des elektrischen Flächenwiderstands und der Besetzungsdichte der Partikel beim Überschreiten der Perkolationsgrenze (links). Das Verhalten oberhalb dieser Grenze ist durch das Wechselwirkungsdiagramm der Haupteffekte Lagenzahl und Bahnabstand auf die Zielgröße des elektrischen Widerstands abgebildet. (rechts) Die gepunktete Linie stellt die Näherung der Messpunkte über eine Potenzfunktion dar ($n = 36$)	56
Bild 29:	Analytische Untersuchung des Zufalls-Widerstandsnetz des Partikelclusters in Abhängigkeit der Besetzungsdichte mit eingezeichneter Perkolationsgrenze p_c . Die gepunkteten Linien stellen die Approximation über Potenzfunktionen dar. ($n = 18$).....	57
Bild 30:	Lineare Abhängigkeit der messbaren Kapazität von der Besetzungsdichte der Elektrode, wobei die grüne Linie die rechnerisch ermittelten Werte darstellt. Für die Extremwerte der Besetzungsdichte sind Bilder der Elektroden unter dem Durchlichtmikroskop gezeigt ($n = 6$)	58

Bild 31:	Residuenauswertung der Regressionsanalyse für den prozessabhängigen elektrischen Widerstand ($n = 18$).....	59
Bild 32:	Korrelationsgerade zwischen Kapazität und elektrischem Widerstand mit $\rho = -0,99$ ($n = 6$)	60
Bild 33:	Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Charakterisierung elektrischer Eigenschaften unter uniaxialer Zugbeanspruchung.....	62
Bild 34:	Wechselwirkungsdiagramme der Zusammenhänge von Lagenzahl n_L , Bahnrichtung und Bahnabstand d_B in μm mit dem dehnungsabhängigen Widerstand und der jeweiligen Approximation über Potenzfunktionen ($n = 10$)...	63
Bild 35:	Haupteffekte des Widerstands und der Bahnrichtung im Ruhezustand sowie der Dehnung auf die Kapazität inklusive der Annäherung über die jeweiligen Potenzfunktionen ($n = 12$)	65
Bild 36:	Abhängigkeit der messbaren Kapazität von der mechanischen Dehnung bei Be- und Entlastung für Partikelelektroden und Grafitfettelektroden inklusive Annäherung über lineare Trendlinien im Vergleich zu den theoretischen Werten (grün) ($A_0 = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$, $n_L = 4$, $d_B = 200 \mu\text{m}$, $n = 4$).....	66
Bild 37:	Nicht lineare Regressionsanalyse für das Widerstandsverhalten unter Zuglasten parallel und senkrecht zur Druckrichtung gegenüber der statischen Besetzungsdichte (grün) angenähert durch die jeweiligen Potenzfunktionen ($n = 16$)	68
Bild 38:	Zusammenhänge der Besetzungsdichte (links) und der Kapazität (rechts) in Abhängigkeit der mechanischen Dehnung inklusive Annäherung der Zusammenhänge über die jeweiligen Potenzfunktionen ($n_L = 4$, $d_B = 250 \mu\text{m}$, $n = 5$)	70
Bild 39:	Prozesseitige Anpassungen der heterogenen Partikelabdeckung (links) und des resultierenden elektrostatischen Drucks, der eine lokal unterschiedliche Deformation hervorruft (rechts)	74

Bild 40:	Schematische Darstellung der resultierenden Deformationen ε_{x-z} in aktiven und passiven DEA-Segmenten unter Vernachlässigung von Reibung.....	75
Bild 41:	Schematische Darstellung der Druckkomponenten p_z des elektrostatischen Drucks zweier Elektrodensegmente (1) und (2) sowie der wirkenden Hauptspannungen im Material σ_x	77
Bild 42:	Darstellung des ebenen Spannungszustands im passiven Bereich zwischen zwei Elektrodensegmenten mit den Schubspannungen σ_x und σ_y sowie den Tangentialspannungen τ_{xy}	78
Bild 43:	Schematische Darstellung der konstruktiven Anpassungsmöglichkeiten eines quadratischen anisotropen DEA (links) und der resultierenden Deformationsvektoren (rechts).....	80
Bild 44:	Konturdiagramm der maximalen uniaxialen Deformation in Abhängigkeit des Flächenanteils der Elektrode A^* und des Verhältnisses zwischen der Elektrodenbreite b_E und der Breite der passiven Zonen b_P ($n = 10$) (Messdaten [S7])...	82
Bild 45:	Verformung anisotroper DEA mit einem Flächenanteil der Elektroden von 0,50 und unterschiedlichen Segmentbreiten.....	83
Bild 46:	Veranschaulichung der Berechnung der Anisotropierate a_{DEA} (links) für den Vergleich der Simulationsdaten anisotroper DEA-Konfigurationen mit unterschiedlich breiten passiven Zonen b_P (rechts).....	84
Bild 47:	Erreichbare Anisotropieraten in Abhängigkeiten geometrischer Parameter von DEA mit drei Elektrodensegmenten inklusive der Annäherung durch die jeweilige Potenzfunktion ($n = 6$).....	85
Bild 48:	Richtungsabhängige uniaxiale Deformation in Abhängigkeit von der Breite der passiven Bereiche b_P	86
Bild 49:	Auswirkung der geometrischen Systemparameter auf die richtungsabhängige uniaxiale Deformation und die Anisotropierate a_{DEA} des DEA	87

Bild 50:	Flächendiagramm der Wechselwirkung zwischen Elektrodenbreite und Breite der passiven Zonen mit der Anisotropierate a_{DEA}	88
Bild 51:	Darstellung einer gedruckten Probengeometrie (links), schematische Darstellung einer quadratischen Probe mit drei Segmenten (rechts)	92
Bild 52:	Absolute Deformation der uniaxialen Deformation in Abhängigkeit vom Elektrodenanteil an der Gesamtfläche. Die untersuchten Systemkombinationen besitzen abweichende Werte der Segmente und Abstände, die $0,8 \times 10^3 \mu\text{m}$, $1,9 \times 10^3 \mu\text{m}$ und $3,0 \times 10^3 \mu\text{m}$ annehmen können. ($n = 10$) (Messdaten [S7])	93
Bild 53:	Experimentell ermittelte Anisotropieraten a_{DEA} für gedruckte Konfigurationen mit unterschiedlich breiten Elektroden und passiven Bereichen ($n = 8$).....	94
Bild 54:	Box-Plot der Anisotropierate a_{DEA} für unterschiedliche Kombinationen von Elektroden- und Abstandsweiten (Angabe in μm) im Bereich von 4000 V bis 5000 V ($n = 12$) (Messdaten [S7])	95
Bild 55:	Vergleich der physiologischen Funktionsweise der menschlichen Iris (links) gegenüber dem technischen Systemaufbau auf Basis von DEA (rechts) (Bemaßung in μm)	98
Bild 56:	Mechanische Simulation der ringförmigen (links) und der anisotropen Iris (rechts) in der Darstellung der Gesamtdeformation	99
Bild 57:	Gedruckte Probe der untersuchten Irisaktoren in segmentierter Bauweise	100
Bild 58:	Vergleich der Flächendeformation (rot) eines vollständigen Irisaktors gegenüber der anisotropen Variante aus Segmenten ($n = 6$) (Messdaten S_{11})	101
Bild 59:	Gegenüberstellung der Pupillendeformation für anisotrope (segmentierte) und nicht anisotrope (ringförmige) künstliche Iriden im Vergleich zur Deformation und der resultierenden Anisotropie ($n = 6$).....	102

Bild 60:	Oberflächenprofil eines gedruckten Partikelpfads unter Angabe der gemessenen Höhenwerte. Die theoretische Betrachtung zeigt die Normalverteilung einer Bahn (türkis) und die theoretische Überlappung mit benachbarten Bahnen. ($n_L = 8$).....	107
Bild 61:	Gegenüberstellung der Funktionsweise konventioneller DES mit den Wirkmechanismen der anisotropen Aufbauformen unter uniaxialer Zugbeanspruchung (blau) ..	108
Bild 62:	Konstruktive Anpassungsmöglichkeiten durch Bahnabstand d_B sowie Bahnrichtung und schematische Darstellung des resultierenden Mikrogefüges der Partikelelektroden	110
Bild 63:	Schematische Darstellung der Gewichtung der Gitterpositionen im statischen anisotropen Perkolationscluster	111
Bild 64:	Gegenüberstellung einer Mikroskopaufnahme einer gedruckten Graphenelektrode (links) mit der abgeleiteten Gewichtung für die Simulation des perkolierenden Clusters (rechts) ($d_B = 250 \mu\text{m}$, $n_L = 4$; $L = 100$).....	113
Bild 65:	Modellierter Zusammenhang der absoluten Besetzungsdichten gegenüber dem funktional verbundenen Gitterpunkten, die über die Clustergröße dargestellt sind (links), Monte-Carlo-Simulation der mittleren Besetzungsdichte p in Abhängigkeit der Dehnung unter Annäherung an die Perkolationsgrenze p_c (rechts) ($L = 100$, $n = 30$)	114
Bild 66:	Simulative Betrachtung der gerichteten Zusammenhangslängen der Cluster von anisotropen Partikelelektroden mit unterschiedlichen Bahnabständen (links), Anzahl der separaten Partikelcluster bei steigender Besetzungsdichte (rechts) ($L = 100$, $n = 30$)	115
Bild 67:	Schematische Darstellung des Messaufbaus für anisotrope DES unter uniaxialer mechanischer Belastung.....	120
Bild 68:	Resistive Messsignale für große Deformationsbereiche mit $150 \mu\text{m}$ Bahnabstand der Elektroden, wobei links für einen Dehnungsbereich bis 80 % lineares Verhalten zu beobachten ist ($n_L = 4$, $n = 4$)	121

Bild 69:	Zusammenhang der richtungsabhängigen Steigung der resistiven Messsignale im Vergleich zur berechneten Vorhersage ($n_L = 4$, $n = 4$)	122
Bild 70:	Abhängigkeit der richtungsabhängigen Steigung der resistiven Messsignale im linearen Wertebereich ($n_L = 4$, $n = 4$).....	123
Bild 71:	Vergleich der Signale für die kapazitive Erfassung der mechanischen Dehnung im Vergleich zu richtungsabhängigen resistiven Signalanteilen ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$).....	124
Bild 72:	Qualitative Gegenüberstellung von uniaxialen, biaxialen Zug- und Druckkräften zur Unterscheidung verschiedener Belastungsarten ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$).....	126
Bild 73:	Bewegungsradius und Berechnung der resultierenden Deformation von rotatorischen Bewegungen des Handgelenks zur Evaluation der anisotropen DES	129
Bild 74:	Zustandsauswertung unterschiedlicher Belastungsformen eines anisotropen DES durch resistive Signalanteile ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, \parallel , $n = 2$)	131
Bild 75:	Richtungsabhängige Veränderung des Elektrodenwiderstands gegenüber der Kapazität bei Abduktionsbewegungen mit linearen Trendlinien ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$, $n = 6$)	132
Bild 76:	Signalverläufe für die Bewegungsrichtungen radiale und ulnare Abduktion sowie Flexion des Handgelenks inklusive der polynomischen Trendlinien ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$, $n = 6$)	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich des erreichten Anisotropieverhältnis a_{DEA} der verschiedenen Ansätze von anisotropen DEA.....	29
Tabelle 2: Vergleich der erreichten anisotropen Systemparameter der verschiedenen Ansätze von DES. In Silikon eingebundene Kohlenstoffpartikel werden als C-PDMS aufgeführt.	34
Tabelle 3: Evaluation der bekannten Herstellungsverfahren, die für die Erstellung anisotroper Eigenschaften eingesetzt werden.....	38
Tabelle 4: Zusammenfassung der idealen Prozessparameter [P5], die, sofern nicht anders beschrieben, für die Probenherstellung genutzt werden.....	43
Tabelle 5: Modellannahmen für die vereinfachte Untersuchung der Wechselwirkungen in anisotropen DEA.....	81
Tabelle 6: Vergleich der Iriskonfigurationen mit eigenen anisotropen Ansätze und Literaturwerten.....	104

1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Erzeugung anisotroper Eigenschaften in dielektrischen Elastomeren (DE) durch strukturierte Elektroden. Ein neuartiges Fertigungskonzept ermöglicht die Realisierung anisotroper Elastomersysteme mit komplexen Bewegungsmustern und die parallel sensorische Erfassung mehrerer Kenngrößen. Dadurch nähern sich die Systeme dem menschlichen Vorbild an und können in vielen Bereichen wie der Medizintechnik oder der Robotik Anwendung finden.

1.1 Bedarf intelligenter Materialsysteme nach dem Vorbild der Natur

Die Bionik – zusammengesetzt aus den Worten Biologie und Technik - ist eine Forschungsdisziplin, die technologische Lösungen nach dem Vorbild der Natur entwickelt. Dabei werden Wirkprinzipien oder Teilaspekte natürlicher Systeme als effektive Lösungsansätze in technische Anwendungen übertragen. Die unterschiedlichen Arten der Bionik sind nach der VDI 6221-6226 eingeteilt und decken alle Bereiche von Oberflächen bis hin zur Informationsverarbeitung ganzer Systeme ab [1]. Bekannte Beispiele sind der Lotus-Effekt® und der Klettverschluss. Selbstreinigende Oberflächen können realisiert werden, indem eine besondere Oberflächenstruktur von Pflanzenblättern nachgeahmt wird, welche die Benetzbarkeit reduziert. Die Funktionsweise des Klettverschlusses ist den Haken von Pflanzensamen nachempfunden, die eine gute Haftung ermöglichen. Beide Prinzipien sind in Bild 1 vergleichend dargestellt. [2]



Bild 1: Beispielbilder der Bionik, welche die Parallelen zwischen natürlichem Vorbild und technischer Umsetzung verdeutlichen. Lotus-Effekt® von Oberflächenstrukturen in Anlehnung an die Oberflächen von Pflanzenblättern (links), Klettverschluss mit ähnlicher Geometrie zu Pflanzenstrukturen (rechts)

Nach dem Vorbild der Natur lassen sich ebenso adaptive Materialien entwickeln, die sich an veränderte Umgebungsbedingungen anpassen. Diese intelligenten Werkstoffe – auch „Smart Materials“ genannt – werden daher

häufig mit Bionik assoziiert. Indem sie auf sich verändernde Umgebungsbedingungen reagiert, erfüllt diese Werkstoffgruppe neben ihrer Struktur eine antreibende oder sensorische Funktion. Dazu zählen physikalische Größen wie Druck, Temperatur oder elektrische Spannung. [3] Bekannte Beispiele sind Stents, deren typische Gitterstruktur von einer Vielzahl natürlicher Vorbilder wie Blattgerüsten, Knochenstrukturen und Wurzelgeflechten inspiriert ist. Neue Varianten bestehen aus intelligenten Formgedächtniswerkstoffen, die sich nach Implantation durch den Temperaturunterschied im Körper selbstständig verformen [4]. Zu den „Smart Materials“ zählen auch DE, die sich durch besonders vielfältige Einsatzmöglichkeiten hervorheben [5].

Als Aktoren betrieben, ermöglichen DE die Nachbildung der Muskelfunktion und ähneln in Aufbau und Funktion dem natürlichen Vorbild, wie in Bild 2 verdeutlicht wird. [6] Die menschliche Skelettmuskulatur besteht aus mehreren repetitiven Einheiten, die jeweils mikroskopische Bewegungsamplituden ausführen. In Summe erzeugen die kleinsten Einheiten, die Sarkomere, makroskopische Deformationen. Dazu werden diese zunächst zu Myofibrillen und anschließend zu Muskelfasern gebündelt. [7]

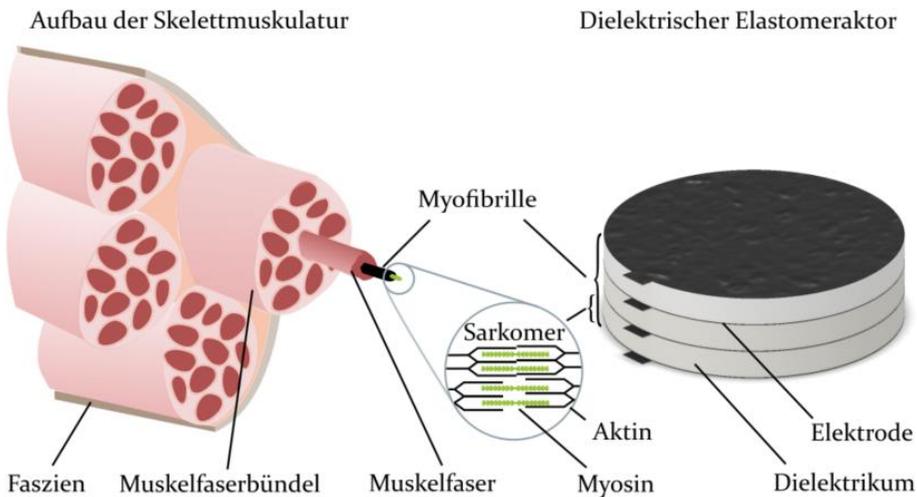


Bild 2: Vergleich des Aufbaus der menschlichen Skelettmuskulatur (links) mit dem Systemaufbau gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren (rechts)

Den einfachsten Systemaufbau besitzen Membranaktoren, die aus einer auf Ober- und Unterseite mit Elektrodenmaterial beschichteten Elastomermembran bestehen. Die einzelnen Lagen des dielektrischen Elastomeraktors (DEA) fungieren im technischen System als Sarkomere. Zur Erzeugung großer Bewegungsamplituden ist die Stapelung zu Muskelfaserbündeln wie

im natürlichen Vorbild möglich. Analog zum technischen System werden die Muskeln durch elektrische Spannungen angesteuert, die jedoch im Millivoltbereich liegen und über die Nerven an die Muskulatur übertragen werden. [8]

Die Aktoren weisen Parallelen zum organischen Vorbild auf, die nicht nur im Aufbau, sondern auch im Vergleich von Dehnung und Energiedichte des Systems sichtbar werden [9]. In Bild 3 ist dieser Zusammenhang für unterschiedliche Materialgruppen veranschaulicht. Die Darstellung zeigt keine vollständige Überschneidung, jedoch eine hinreichende Ähnlichkeit mit den menschlichen Muskeln hinsichtlich Energiedichte und ausführbarer Dehnung. Insbesondere DEA mit Silikondielektrika besitzen Überschneidungen im Leistungsspektrum mit der Muskulatur. [9, 10] Aufgrund dieser Gemeinsamkeit stellt der Einsatz von DEA als funktionelle Implantate ein viel beforschtes Gebiet dar [11, P1].

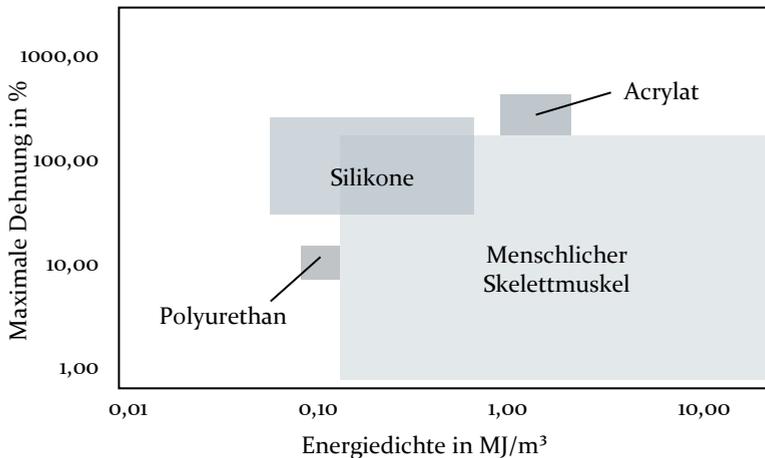


Bild 3: Vergleich der erreichbaren Energiedichte und der maximalen Dehnungen von DEA mit der menschlichen Muskulatur (Werte entnommen aus [9, 10, 5, 12])

Im Vergleich zur Muskulatur verhalten sich einfache Membranaktoren jedoch isotrop und deformieren sich gleichmäßig in alle drei Raumrichtungen, wodurch Teile der umgewandelten Energie für uniaxiale Bewegungen ungenutzt bleiben [13, 14]. Daher ist eine anisotrope Auslegung der DEA notwendig, um das Verformungsverhalten gezielt ausnutzen zu können. Im natürlichen Muskel wird die gerichtete Bewegung durch den anisotropen Aufbau der längsgerichteten Muskelfasern realisiert [15]. Analog dazu wird in der vorliegenden Dissertationsschrift erforscht, wie durch morphologische Intelligenz (engl. morphological computation) eine Vorzugsrichtung in das System eingebracht werden kann. [16]

Des Weiteren können die Materialsysteme als dielektrische Elastomersensoren (DES) genutzt werden und eignen sich zur bionischen Nachbildung der Haut. Die Parallelen zwischen biologischem und technologischem Aufbau sind in Bild 4 gegenübergestellt. Im anatomischen Vorbild erfassen die Mechanorezeptoren in den einzelnen Hautschichten physikalische Parameter wie Vibration, Berührung, Zug oder Druck. Dabei befinden sich in jeder Hautschicht verschiedene Rezeptoren, die unterschiedliche Anteile der Berührung parallel erfassen. [17] Analog erlaubt ein einzelner, isotrop aufgebauter DES nur die Interpretation einer Komponente einer einwirkenden mechanischen Kraft. Sowohl die funktionale Ähnlichkeit als auch die materialbedingte Flexibilität der Sensoren ermöglichen den Systemen die Anpassung an fließende Bewegungen und gekrümmte Konturen. In der Medizintechnik können DES zur Therapieüberwachung eingesetzt werden und Bewegungsabläufe oder den Sitz von Orthesen überwachen. [18, 19, P2]

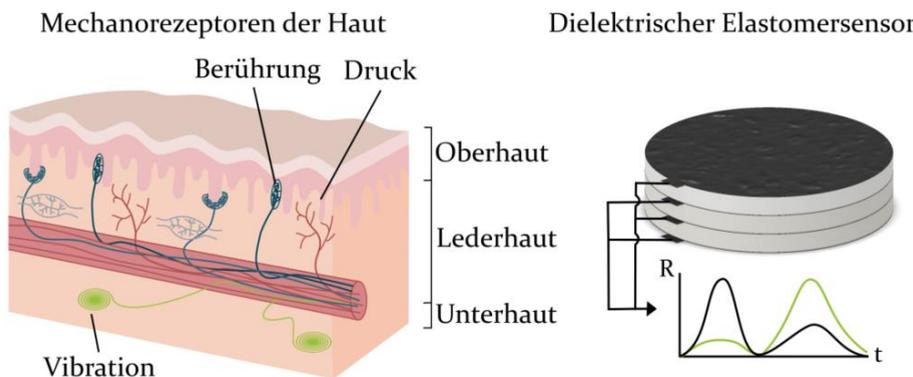


Bild 4: Mechanorezeptoren der Haut in verschiedenen Schichten mit multiplen sensorischen Funktionen (links) im Vergleich zu einem mehrschichtigen Sensoraufbau auf Basis von DES (rechts)

Um die auf das System einwirkenden Kräfte ganzheitlich charakterisieren zu können, besteht der Bedarf, die Informationsdichte innerhalb einer Sensorschicht zu erhöhen. Im natürlichen Vorbild wird dies durch den heterogenen Aufbau verschiedener Rezeptoren in unterschiedlichen Schichten möglich [17]. Um diese sensorischen Funktionen der Haut besser nachbilden zu können, wird in der vorliegenden Dissertationsschrift die richtungs- und lastabhängige Signaldetektion innerhalb einer Materiallage erforscht. Durch ein lokal variables Druckverfahren kann die Systemarchitektur so angepasst werden, dass die inhärente morphologische Intelligenz zur Parallelisierung der Signalauswertung genutzt werden kann. Das gezielte Einbringen von Anisotropie führt somit zu einer höheren Datendichte bei

gleichem Bauraum und einer Reduktion der benötigten Rechenleistung. [20]

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Trotz technischer Neuerungen postieren sich menschengemachte Systeme in Bezug auf das Zusammenspiel und die Kombination von Eigenschaften häufig hinter den natürlichen Vorbildern. [2]. Diese Überlegenheit lässt sich auf den heterogenen Aufbau und die Anisotropie biologischer Systeme zurückführen [21]. Im Gegensatz dazu sind die Grundbausteine vieler DE-Systeme isotrop wirkende Membranaktoren. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Anpassung der elektromechanischen Eigenschaften durch die Einstellung der elektrisch leitfähigen Systemkomponente.

In Kapitel 2 dieser Dissertation werden die grundlegenden Prinzipien von DE erläutert. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften und Aufbauformen von DE betrachtet, um ein Verständnis für das Systemverhalten zu schaffen. Die theoretische Beschreibung wird durch eine Modellierung des statischen Systemzustands ergänzt, um das Verhalten zu veranschaulichen. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden bestehende Lösungsansätze identifiziert, die zur Erzeugung anisotropen Verhaltens dienen. Darüber hinaus werden Konzepte für die Realisierung anisotroper mechatronischer Systeme entwickelt und erläutert. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Anwendung eines geeigneten additiven Herstellungsverfahrens, um die erforderlichen anisotropen Eigenschaften zu erreichen. Kapitel 2 schließt mit der Erläuterung des Forschungsbedarfs an anisotropen DE.

Kapitel 3 befasst sich mit der Quantifizierung des Aerosol-Jet-Druckprozesses zur Herstellung funktionalisierter Elektroden in DE. Dabei werden sowohl die Prozesscharakterisierung als auch die prozesseitige Einstellbarkeit selektiv gefertigter Elektroden beleuchtet. Die resultierenden Systemeigenschaften werden im statischen Zustand sowie unter Zugbeanspruchung charakterisiert. Die statistische Prozessbetrachtung beantwortet die Frage nach geeigneten Parametern, durch die sich das Verhalten anisotroper DE einstellen lässt.

Die Herleitung physikalischer Zusammenhänge anisotroper Aktoren wird in Kapitel 4 behandelt. Mit Hilfe einer numerischen Betrachtung der Systemanpassung kann eine umfassende Analyse gewährleistet werden. Die Maximierung der uniaxialen Auslenkung der Aktoren wird durch die Untersuchung konstruktiver Parameter erreicht, die eine richtungsabhängige

Wechselwirkung zwischen passiven und aktiven Zonen im Aktor ermöglichen. Die theoretischen Zusammenhänge dieser Wechselwirkungen werden zunächst beschrieben und anschließend in Kapitel 5 anhand praktischer Untersuchungen verifiziert. Darüber hinaus wird die Anwendung der anisotropen DEA am Beispiel einer funktionalen künstlichen Iris in die Praxis überführt. Die gewonnenen Erkenntnisse für anisotrope Membranaktoren bilden die Grundlage für weitere Forschungsfelder, die die anisotropen Grundbausteine nutzen und zu Gesamtsystemen integrieren.

Der Fokus von Kapitel 6 liegt auf der Untersuchung anisotroper Sensoren. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen dem Partikelgefüge der Elektroden und dem Herstellungsprozess angepasst und charakterisiert. Die selektive Partikelverteilung innerhalb der Elektroden wird mithilfe der Perkolations- theorie modelliert, um die Grundlagen für die weiteren Analysen zu schaffen. Anschließend werden die Erkenntnisse aus dem Modell durch praktische Versuche in Kapitel 7 erweitert. Dabei werden die Hauptparameter identifiziert. Die heterogene Partikelverteilung führt zu einer morphologischen Intelligenz, die eine umfassende Charakterisierung der einwirkenden mechanischen Kräfte ermöglicht. Dies wird anhand eines praktischen Beispiels zur Erfassung von Handgelenksbewegungen umgesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf verschiedene Lastarten erweitert werden und ermöglichen eine effiziente Auswertung von Lastzuständen auch außerhalb der Medizintechnik.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, das mechanische Verhalten der DE durch gezielte Anisotropie zu variieren. Dazu werden die geometrische Segmentierung und die Mikrostrukturierung der Elektroden genutzt. In Kapitel 8 werden die Erkenntnisse abschließend zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Forschungspotenziale im Bereich anisotroper DE gegeben.

2 Stand der Forschung

Innerhalb der Gruppe der adaptiven intelligenten Materialsysteme können dielektrische Elastomere (DE) den elektroaktiven Polymeren (EAP) zugeordnet werden. Diese lassen sich anhand der Wirkprinzipien in ionische und elektrische EAP unterteilen. Im Gegensatz zu ionischen EAP, die dem Wirkprinzip der Ladungsdiffusion folgen, basiert die Funktion der DE auf elektrostatischen Effekten. [23] Durch ihren Aufbau können sie als Aktoren, Generatoren und Sensoren sowie in Kombination eingesetzt werden.[22] In Kapitel 2.1 werden die Wirkprinzipien der DE beschrieben, die in Kapitel 2.2 durch elektromechanische Modelle nachgebildet werden. Anschließend werden die aus der Literatur bekannten Ansätze für anisotrope Aufbauformen der DE in Kapitel 2.3 diskutiert. Zur Materialisierung der Systemmodifikationen wird in Kapitel 2.4 ein geeignetes Herstellungsverfahren identifiziert. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Herleitung offener Forschungsfragen und der anschließenden Konzeptionierung anisotrop wirkender DE.

2.1 Grundlagen dielektrischer Elastomere

DE ähneln im Aufbau einem elastischen Plattenkondensator. Deshalb kann die Formel zur Kapazitätsberechnung von Kondensatoren für eine vereinfachte Beschreibung angewendet werden. Entsprechend Gleichung (1) geht die Kapazität C aus der materialspezifischen Permittivität des Dielektrikums ϵ_r , der Permittivitätskonstante des Vakuums ϵ_0 und der Geometrie des Kondensators mit der Elektrodenfläche A und der Dicke d des Dielektrikums hervor. Mit der anliegenden Spannung U lässt sich über Gleichung (2) die elektrische Energie E des Systems beschreiben und in Abhängigkeit zur gespeicherten Ladung Q angeben. [23] Auf Basis dieser Gleichungen lassen sich Aktor- und Sensoreigenschaften ableiten und anpassen.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} Q U \quad (2)$$

Im nachfolgenden Kapitel 2.1.1 werden die physikalischen Zusammenhänge für den Einsatz als Aktor sowie die erzielbaren Bewegungsamplituden und Methoden zur Leistungssteigerung durch externe Bauteile beschrieben.

Anschließend werden in Kapitel 2.1.2 die verschiedenen Modi zur sensorischen Nutzung über die Erfassung unterschiedlicher Systemeigenschaften dargestellt.

2.1.1 Physikalische Zusammenhänge dielektrischer Elastomeraktoren

Das Wirkprinzip der DE als Aktoren, sogenannte dielektrische Elastomeraktoren (DEA), basiert auf der Umwandlung elektrischer in mechanische Energie. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung werden die gegenüberliegenden Elektroden gegenpolig aufgeladen. Die dabei auftretenden Coulomb-Kräfte bewirken deren Anziehung. Das dadurch entstehende elektrische Feld (E-Feld) und der resultierenden Maxwell-Druck stauchen das zwischenliegende, verformbare Dielektrikum aufgrund des elektrostatischen Drucks p_{el} . Der wirkende Druck kann mit Gleichung (3) berechnet werden. Die elektrische Energie hängt nach Gleichung (2) von der Ladungsdichte auf der Elektrodenfläche ab. [13]

$$p_{el} = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \frac{Q^2}{\epsilon_0 \epsilon_r A^2} \quad (3)$$

Durch die inkompressiblen Materialeigenschaften des Elastomers, welches die isolierende Trennschicht darstellt, dehnt sich das System isotrop in der Ebene senkrecht zum einwirkenden Druck aus. Dieser Zusammenhang wird in Bild 5 veranschaulicht, das den Aufbau eines Membranaktors zeigt. Neben der lateralen Expansion kommt es beim Anlegen einer elektrischen Spannung zur Reduktion der Höhe der Elastomerschicht durch die Normalspannung σ_z . Die Stauchung, die vom Young'schen Modul Y des Polymers abhängt, folgt dem Zusammenhang aus Gleichung (4). [24] Die Inkompressibilität des Elastomers lässt sich durch eine Poissonzahl ν von näherungsweise 0,50 ausdrücken. Daraus ergibt sich ein linearer Zusammenhang der Materialdehnung unter einachsiger mechanischer Last im Hooke'schen Spannungsbereich, der über Gleichung (5) dargestellt werden kann. [25] Dabei ist die Querdehnung ϵ_q mit der Längsdehnung ϵ_l verknüpft. Daraus ergibt sich die Einteilung der Aktoren nach der verwendeten Wirkrichtung in Längseffekt- und Quereffektaktoren. Diese können über unterschiedliche Bauweisen nutzbar gemacht werden und sind von Kornbluh et al. in [5] anhand der Grundprinzipien der meist genutzten Bauformen beschrieben.

Die uniforme Bewegung der DEA in alle Raumrichtungen ist bedingt durch die isotropen Materialeigenschaften, einer homogenen Verteilung der

elektrischen Ladungen über die gesamte Elektrodenfläche sowie einer idealen Lagerung des Aktors. Vereinfachend wird in den genannten Formeln zur Beschreibung der DEA das Materialverhalten über den gesamten Bewegungsbereich als konstant angenommen und versteifende Effekte werden vernachlässigt.

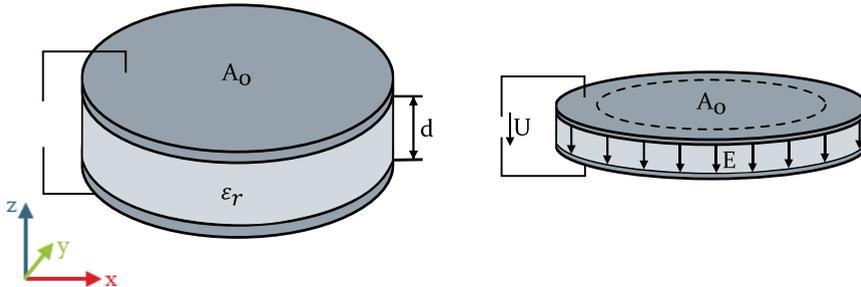


Bild 5: Schematische Darstellung des Wirkprinzips von DEA im Ausgangszustand (links) und im gestauchten Zustand unter angelegter elektrischer Spannung U (rechts). Für konventionelle DE baut sich ein homogenes E -Feld E zwischen den Elektroden auf. Die dargestellte Flächenvergrößerung senkrecht zu den Feldlinien des flexiblen Systems stellt den Quereffekt dar, der in Membranaktoren genutzt wird.

$$\sigma_z = -\frac{p_{el}}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{Y} \quad (4)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (5)$$

Um den Zusammenhang zwischen der Geometrieänderung und dem davon abhängigen E -Feld in die Systembetrachtung einzubeziehen, kann der Ansatz von Pelrin et al. [13] verwendet werden. Dieser zeigt einen exponentiellen Zusammenhang für die Ladungsverteilung in Abhängigkeit des Spannungszustands auf. Aufgrund der Annahme sehr dünner Dielektrika werden jedoch für Deformationen unter 10,00 % Vereinfachungen vorgenommen [13]. Dynamische Effekte, wie das veränderliche E -Feld, können damit über den gesamten Spannungsbereich vereinfacht mit der Distanz d zwischen den Elektroden berechnet werden. Die beschriebenen Systemvereinfachungen dienen als Basis für die modellhafte Beschreibung der Systeme aus Kapitel 2.2.

Typische Bewegungsamplituden, die mit konventionellen Membranaktoren erzeugt werden können, liegen im Bereich von 8,00 % bis 41,00 % und sind abhängig von der Fertigungsstrategie und der Materialauswahl. Je nach eingesetztem Elastomer variiert die Energiedichte der Systeme, wie

Bild 3 zu entnehmen ist. Dabei zeigen Acrylate größere Deformationen als Silikone, unterliegen jedoch auch größeren zeitabhängigen Effekten. [12, 10]

Da Silikone nach Bild 3 die größte Schnittmenge mit der menschlichen Muskulatur besitzen und schnelle Reaktionsgeschwindigkeiten ermöglichen, werden diese für die praktischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit eingesetzt. Zusätzlich entscheiden Fertigungsprinzipien über die Dicke der flexiblen Elektroden. Diese führen mit zunehmender Schichthöhe aufgrund der steigenden Materialsteifigkeit zu negativen Auswirkungen auf die Systemeigenschaften [26]. Dem gegenüber ist das Leistungsspektrum der DEA mit externen Bauteilen optimierbar, die jedoch häufig den flexiblen, leichtbauenden Systemeigenschaften durch rigide Elemente entgegenwirken [14]. Im Folgenden werden diese Optimierungsansätze gegenübergestellt.

Externe Einflussfaktoren auf das Leistungsprofil von dielektrischen Elastomeraktoren

Die technologischen Systemgrenzen beruhen nach Gleichung (1) und (4), die das Kondensatorverhalten und die Stauchung durch den elektrostatischen Druck beschreiben, auf den Materialeigenschaften und der Geometrie der Systeme. Auf molekularer Ebene werden die verknäulten Polymerketten des Elastomers durch die elektrische Aktivierung zunächst geordnet, bevor sie aneinander entlang gleiten und eine makroskopisch sichtbare Bewegung zeigen. Diese Blockierkraft (engl. blocking force) muss vom DEA zuerst überwunden werden, weshalb eine vorherige mechanische Dehnung des Elastomerfilms einen leistungssteigernden Effekt hervorrufen kann. Die applizierte mechanische Kraft muss so gewählt werden, dass sie die Polymerketten ordnet, aber das Elastomer nicht versteift und somit den ersten Effekt kompensiert. Um die induzierte Dehnung des Dielektrikums zu erhalten, werden statische Bauteile wie Rahmen oder Federn genutzt. [27] Jedoch weisen die durch die applizierte Dehnung senkrecht zum E-Feld ausgerichteten Polymerketten eine verringerte Permittivität auf. Dieser Effekt wird von Kofod et al. [28] auf die Limitierung der Freiheitsgrade der Dipole im Elastomer zurückgeführt [29]. Nach Gleichung (3) resultiert daraus eine Reduktion des wirkenden elektrostatischen Drucks.

Eine weitere Methode zur Steigerung des Deformationspotenzials ist die Stapelung mehrerer Aktorlagen, die in Bild 2 als Analogie zur menschlichen Muskulatur gezeigt ist. Hierbei wird der Längseffekt basierend auf der Dickenreduktion der Systeme nutzbar gemacht, welcher sich durch die repetitiven Einheiten aufsummiert. [12] Das Systemdesign wirkt sich auf die

uniaxiale Längenänderung des DEA aus. Dieses Phänomen tritt auch bei anderen Varianten des Systemaufbaus [30, 31] auf, die in Kapitel 2.3.2 als Form der Anisotropieerzeugung näher betrachtet werden.

Um verschiedene Systemvariationen vergleichen zu können, werden in Bild 6 die Aktionspotenziale gegenübergestellt. Die Darstellung zeigt die Systemdeformation der jeweiligen Variation. Ersichtlich ist, dass die größte Deformation durch eine vorherige passive Dehnung erzielt werden kann. In [32, 33] wird dadurch ein Aktionspotenzial von über 200,00 % erreicht.

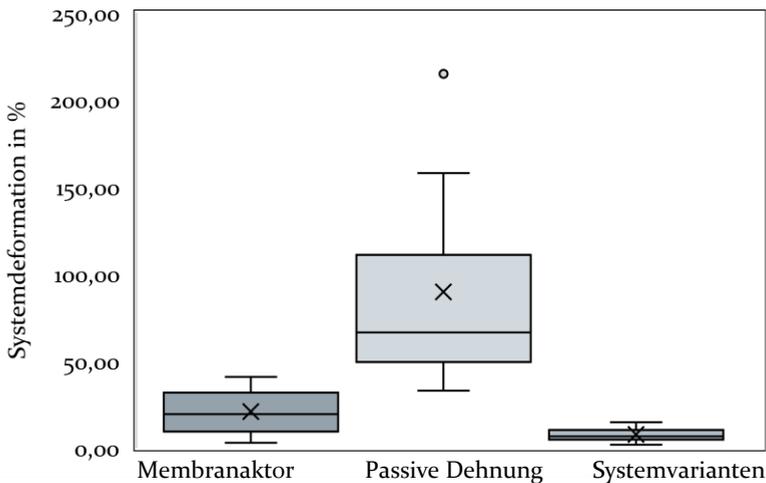


Bild 6: Leistungspotenzial einfacher Membranaktoren im Vergleich zu passiv gedehnten Membranen und Systemvarianten mit zusätzlichen Bauteilen, die in Kapitel 2.3.2 näher erläutert werden [10, 24, 30–35]

2.1.2 Funktionsprinzipien dielektrischer Elastomersensoren

Elastomerwandler können ebenso als Sensoren genutzt werden. Die Erfassung der Systemparameter funktioniert dabei im Allgemeinen über drei Ansätze. Diese beruhen auf den unterschiedlichen Systemeigenschaften und erfassen den Systemzustand anhand der Kapazität [19], des elektrischen Widerstands [24] oder der Impedanz [36].

Die kapazitive Messung basiert auf der deformationsabhängigen Systemgeometrie, die in Gleichung (5) beschrieben ist. Durch Zug- und Scherkräfte verändert sich die kongruente Fläche der Elektroden, woraus eine Kapazitätsänderung resultiert. Diese verhält sich direkt proportional zur Veränderung der Elektrodenfläche und beschreibt dadurch das Maß der Deformation, wie Gleichung (1) entnommen werden kann. [19] Besteht der

dielektrische Elastomersensoren (DES) aus einer sehr dünnen Dielektrikumsschicht, kann für die Verarbeitung des Sensorsignals die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass die mechanisch induzierte Reduktion der Dicke vernachlässigbar ist und keinen messbaren Einfluss auf die Veränderung der Kapazität besitzt. Dünne Dielektrikumsschichten bewirken jedoch eine eingeschränkte Detektion mechanischer, druckbasierter Deformationen. [37] Häufig werden Druckbeanspruchungen deshalb durch zusätzliche Systemkomponenten in Zuglasten umgewandelt. Beispiele sind weiche Substrate, welche die Deformation des Gesamtsystems in Druckrichtung ermöglichen und somit eine Dehnung der Elektrodenfläche zulassen [38]. Außerdem werden Stempel eingesetzt, um die Membran definiert zu dehnen und dadurch eine Flächenvergrößerung der Elektrode zu bewirken [37]. Die auf der Geometrieänderung beruhenden Messprinzipien sind schematisch in Bild 7 dargestellt.

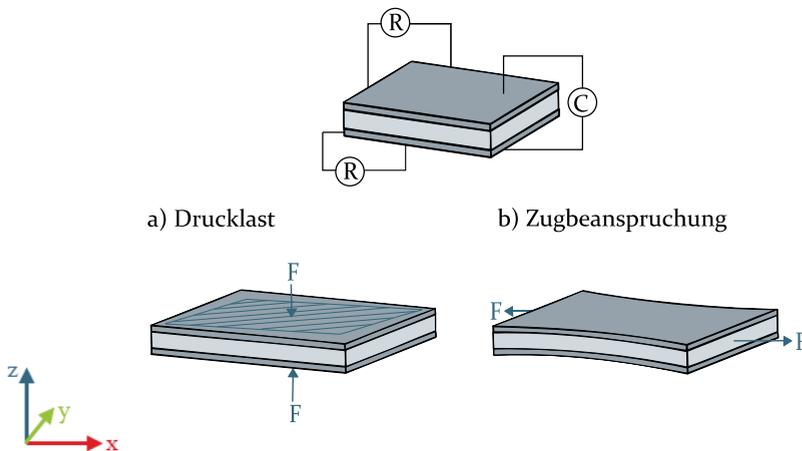


Bild 7: Schematische Darstellung der untersuchten Sensorprinzipien zur Detektion mechanischer Deformation. Sowohl unter Druck- als auch unter Zugkräften können Widerstands- und Kapazitätsänderungen gemessen werden.

Darüber hinaus kann die mechanisch induzierte Geometrieänderung kapazitiv über den Zusammenhang aus Gleichung (1) und den für Kondensatoren geltenden Eigenschaften, wie die charakteristische Ladekennlinie der Elektroden, erfasst werden. Dabei verhält sich die Kapazität umgekehrt proportional zur Dicke des Dielektrikums.

Der Elektrodenwiderstand, der in der Regel $> 1,00 \text{ k}\Omega$ beträgt, beeinflusst nach [39] das Kondensatorverhalten. Es kann deshalb nicht von einem idealen Plattenkondensator ausgegangen werden. Daher wird der Zusammenhang über erweiterte elektrische Ersatzschaltbilder betrachtet, die in Bild 8 dargestellt sind. Dabei wird das Schaltbild für kleine Spannungen, wie sie

typischerweise in Messschaltungen auftreten, zu einer Reihenschaltung aus Widerstand und Kondensator vereinfacht. [39]

Neben der Deformation des Systems können DES als kapazitive Näherungssensoren eingesetzt werden. Die Annäherung eines Objektes an die Randfelder des DES führt zu einer Veränderung der dielektrische Konstante und damit zu einer messbaren Änderung der Systemparameter. Mit einem einzelnen DES ist über die Erfassung der kapazitiven Eigenschaften nur die Messung der Höhe der Signaländerung möglich, die auch aus einer Mischform verschiedener Lastarten resultieren kann. Eine Unterscheidung zwischen diesen kann mit einem konventionellen Aufbau nicht getätigt werden. [19]

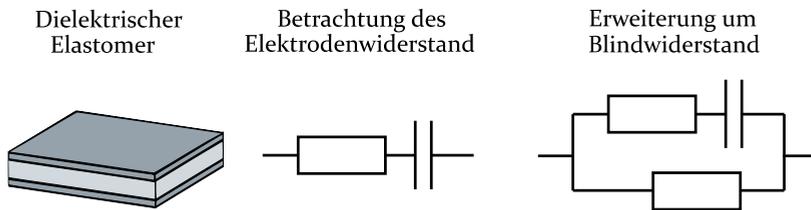


Bild 8: Ersatzschaltbilder zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften von DE über ein RC-Glied (Mitte) oder unter Berücksichtigung parasitärer Effekte (rechts)

Wird der Kondensator mit Wechselspannung statt mit Gleichspannung versorgt, verändert sich dessen Verhalten. Die Bauteileigenschaften hängen von der anliegenden Frequenz der elektrischen Spannung ab. Durch die ständige Ladungsverschiebung kann der Kondensator als Widerstand mit einem Blindwiderstand von X_C beschrieben werden. Dieser ist nach Gleichung (6) von der Frequenz f und der Kapazität C des Kondensators abhängig.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6)$$

Zusätzlich kommt es zu einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, die charakteristisch für Kondensatoren ist und über die Impedanz Z_C ausgedrückt wird.

$$Z_C = R_{\square} + \frac{1}{j\omega C} \quad (7)$$

Da die Impedanz eines DEA von dessen Kapazität abhängt, die wiederum durch geometrische Deformation beeinflusst werden kann, ändert sich bei

mechanischer Deformation auch die Impedanz. Durch die Erweiterung von Gleichung (7) um den Elektrodenwiderstand R_{\square} können degenerativer Effekte der Partikelelektroden berücksichtigt werden [40]. Wie in [S1] kann die Signalmodulation durch das Kondensatorverhalten genutzt und Lastzustände detektiert werden. [41, P2]

Um die Auslenkung der Elektroden eines DES resistiv zu erfassen, ist insbesondere die Beschaffenheit der Elektroden der entscheidende Parameter. Dabei wird zur Erfassung der Deformation die Eigenschaft der dehnungsabhängigen elektrischen Widerstandsänderung genutzt. Der resistive Ansatz wird in der Literatur als der ungenaueste beschrieben, da die auftretenden Effekte stark von der Qualität der Elektroden abhängen. Große Deformationen können zu einer Degradation der Elektroden führen, wodurch die Signale verfälscht werden. [42] Bei ideal homogenen Elektroden wird für diese Messmethode eine gleichmäßige Verteilung der Partikel angenommen. Dabei wird der Zusammenhang der Perkolations-theorie [43] genutzt, die das Systemverhalten bei einer reduzierten Anzahl leitfähiger Pfade im Material beschreibt. [44]

Das Verhältnis zwischen Längenänderung und Änderung des elektrischen Flächenwiderstands der Elektrode, auch als Dehnungsfaktor GF (engl. Gauge factor) bezeichnet, ist unter anderem von Herstellungsprozess und Werkstoffen abhängig. Bei bekanntem Verhalten der lastabhängigen elektrischen Parameter eines DES kann durch die Änderung des Elektrodenwiderstands, unter der Annahme zufällig homogen verteilter Partikel, auf die Deformation des Systems geschlossen werden. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die Lastungsrichtung zu. Zusätzlich kann es bei großen Deformationen zu einer dauerhaften Schädigung der Elektroden kommen. Dadurch kehren diese bei Entlastung nicht mehr in ihren Ausgangszustand zurück. [42]

Das beschriebene Materialverhalten bildet die Grundlage für die computergestützte Berechnung des Systemverhaltens und muss in Abhängigkeit der Fertigungsparameter betrachtet werden. Die modellhafte Beschreibung des Systemverhaltens wird im Folgenden näher erläutert.

2.2 Modellierung des statischen Systemverhaltens

Die theoretischen Zusammenhänge und Eigenschaften aus Kapitel 2.1 bilden die Grundlage für die Simulation der Materialsysteme, stellen jedoch idealisierte Systemgrößen dar. Die bekannten Modelle basieren dabei auf

homogenen Spannungszuständen und konstanten E-Feldern, die für anisotrope Systeme nur eingeschränkt Anwendung finden. Für die Modellbildung anisotroper DE werden Annahmen getroffen, die eine vereinfachte Beschreibung zulassen. Zunächst werden die allgemeingültigen Modelle zur mechanischen und elektrischen Abbildung von DE beschrieben und die vereinfachenden Randbedingungen hergeleitet. Anschließend werden die Systemeigenschaften auf den mechanischen Lastzustand abgebildet und zu einem elektromechanischen Modell zur Beschreibung anisotroper Systeme verknüpft.

2.2.1 Einflüsse des nicht linearen Materialverhaltens

Aufgrund des größeren Volumenanteils des Elastomers werden die Systeme in der Literatur meist vereinfacht und die mechanischen Eigenschaften der Elektroden vernachlässigt. Das mechanische Verhalten von Elastomeren zeigt drei Verformungsarten: elastisch, viskoelastisch und viskos. Der viskose Deformationsbereich findet für Elastomere keine Anwendung, sodass das mechanische Verhalten anhand eines Schaubilds unter Kombination konventioneller Bauteilen beschrieben werden kann. Das Verhalten wird durch die Fusion des Maxwell- und des Kelvin-Voigt-Modells abgebildet und besteht wie in Bild 9 gezeigt, aus einer Parallelschaltung von Federelementen, wovon eines in Reihe mit einem Dämpfer geschaltet ist. [21]

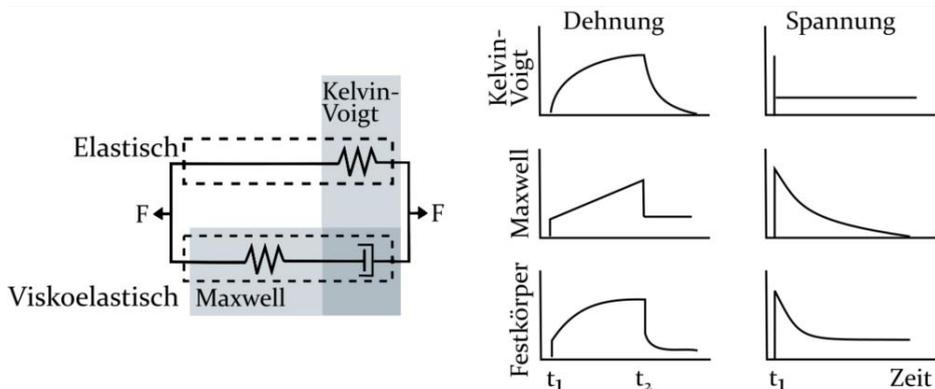


Bild 9: Festkörpermodell, zusammengesetzt aus einer Reihenschaltung aus Feder und Dämpfer (Maxwell) und einer Parallelschaltung mit einer Feder (Kelvin-Voigt), in Anlehnung an [21]

Das mechanisch dämpfende Element, das durch die Materialeigenschaften des Elastomers auftritt, sorgt für die zeitverzögerten Bewegungsantworten

der DE, die je nach Material unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Aufgrund der besseren Systemeigenschaften werden in der vorliegenden Dissertationsschrift Silikone verwendet. Die folgenden Betrachtungen bezieht sich daher auf diese Materialgruppe. [45]

Das Materialverhalten von Silikonen wird nur unzureichend durch lineare Elastizität beschrieben, weshalb hyperelastische Eigenschaften durch verschiedene Modelle angenähert werden. Die Hyperelastizität hängt dabei ausschließlich vom zuvor herrschenden Systemzustand ab und kehrt nach der Belastung wieder zu diesem zurück. Die Hyperelastizität wird somit als zeitunabhängig betrachtet. Damit nähert sich das Verhalten der DE einem quasistatischen Zustand an, dessen Frequenzabhängigkeit vernachlässigbar ist. Diese Vereinfachung kann für Silikone aufgrund der geringen Kriecheffekte und des daraus resultierenden geringen Einflusses der Zeitabhängigkeit getroffen werden. Werkstoffe wie Acrylate zeigen hingegen deutlich stärkere zeitabhängige Effekte. [45-47]

Das Neo-Hooke'sche-Modell ist die einfachste hyperelastische Beschreibungen, da nur geringe Bewegungsamplituden im elastischen Deformationsbereich beschrieben werden [48]. Eine weitere phänomenologische Betrachtung ist das Mooney-Rivlin-Modell, welches auf mindestens drei und bis zu neun Materialparametern beruht und dadurch auch Wendepunkte über 100,00 % Dehnung abbilden kann [49-51]. Im Gegensatz zuvor genannten Modellen eignen sich die Beschreibungen von Ogden und Yeoh insbesondere für große Deformationen [52].

Um ein geeignetes Modell für das verwendete Elastosil® P7670 von Wacker zu identifizieren, werden Daten aus mechanischen Prüfungen (DIN 53504:2017-03 und DIN ISO 7743) [53] ermittelt und qualitativ mit den jeweiligen Kurven der Modelle verglichen. In Bild 10 sind die experimentellen und theoretischen Materialkennwerte gegenübergestellt. [S2] Aus der Betrachtung der Kurvenverläufe geht hervor, dass die Beschreibung des Mooney-Rivlin-Modells mit neun Parametern die realen mechanischen Eigenschaften am besten abbildet. Dabei wird das Elastomer durch ein ideal inkompressibles Verhalten und isotrope Eigenschaften approximiert. Die ermittelten Messwerte werden in der Datenbank der Simulationssoftware hinterlegt. In der Simulation wird vereinfachend angenommen, dass eine Geometrie, der dieser Werkstoff zugewiesen wird, eine homogene Struktur aufweist. Diese Annahme ist jedoch für anisotrope Systeme nur bedingt gültig, da durch Inhomogenitäten und asymmetrische

Werkstoffverteilung richtungsabhängiges Verhalten erzeugt wird. Die Methoden zur Simulation dieser Systemeigenschaften werden in Kapitel 2.2.3 näher beschrieben.

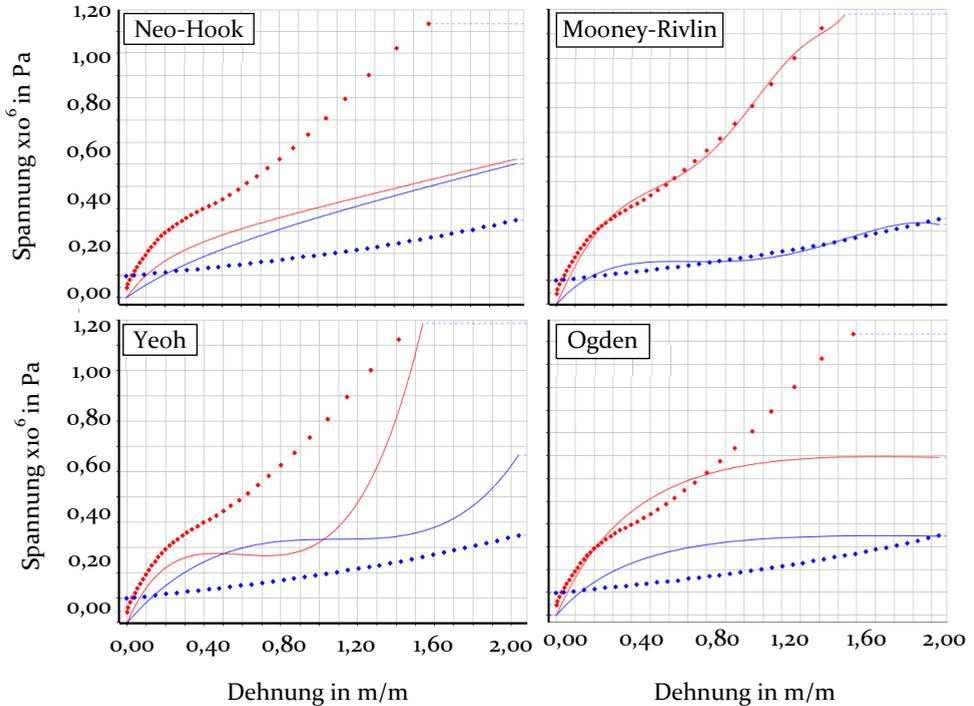


Bild 10: Vergleich der praktischen Testdaten (Punkte) von Elastosil® P7670 mit 15 % Silikonöl AK 100 mit den Kurven verschiedener hyperelastischer Modelle (Linien) in „ANSYS (2021 R2)“ von Ansys Inc. (2021). Dargestellt sind uniaxiale (blau) und biaxiale (rot) Testdaten (Messdaten [S₂])

Den volumenbezogenen geringeren Anteil stellen die Elektroden dar, die in der Regel aus Partikelsystemen bestehen, um die Dehnbarkeit der DE nicht zu limitieren. Dabei müssen die Elektroden auch unter mechanischer Deformation ihre Leitfähigkeit behalten. [54] Diese bestehen aus verschiedenen elektrisch leitfähigen Materialien und variieren in ihrer Partikelgeometrie. Zu den häufigsten Vertretern zählen Kohlenstoff-Nano-Röhrchen (CNT) [55], Silber-Nano-Wires [56–58] und Graphen [54]. Je nach Fertigungsstrategie liegen die Partikel in einem Trägermedium wie Silikon oder Fett vor oder werden in einem Lösungsmittel verarbeitet, das sich während des Herstellungsprozesses verflüchtigt.

In der Literatur wird mehrfach nachgewiesen, dass die Materialsteifigkeit der leitfähigen Komponente einen signifikanten Einfluss auf das mechanische Verhalten von DE hat und sogar zur Adaption von DE genutzt wird.

[59, 60] Die Ausprägung der mechanischen Versteifung ist von Material- und Prozessparametern abhängig und muss für jede Konfiguration individuell ermittelt werden. Die in Simulationsdatenbanken hinterlegten Kennwerte werden in der Regel an homogenen Werkstoffen und Probekörpern aus Vollmaterial ermittelt. Insbesondere bei partikelbasierten Elektroden kommt es jedoch aufgrund der heterogenen Materialverteilung zu Abweichungen zwischen praktischen und theoretischen Werten. [54]

Aufgrund der guten elektrischen Eigenschaften unter Dehnung und des Fehlens einer inhärenten Orientierungsrichtung werden in dieser Arbeit Partikelelektroden aus Graphen betrachtet. Für lose Partikelsysteme, wie sie von Reitelshöfer et al. [61] untersucht werden, hat sich gezeigt, dass rund 5,00 µm dicke Schichten aus Graphenpartikeln keinen Einfluss auf die Materialsteifigkeit des Gesamtsystems haben. Analog zur Materialprüfung in Bild 10 werden daher geschichtete Proben aus reinem Silikon und Proben mit einer zwischenliegenden Elektrodenschicht im uniaxialen und biaxialen Zugversuch untersucht. Der Einfluss der eingeschlossenen Partikel ist jedoch nicht signifikant, so dass sehr dünne Elektroden bei der mechanischen Betrachtung vernachlässigt werden können. Die Ergebnisse der mechanischen Testung sind im Anhang einsehbar.

Dagegen hat die Partikelverteilung einen großen Einfluss auf das elektrische Verhalten der DE. Durch den heterogenen Aufbau lassen sich die Elektroden nicht ausreichend genau mit vereinfachten Modellen abbilden und werden im Folgenden mit statistischen Methoden beschrieben. Dazu wird in Kapitel 2.2.2 ein geeignetes Modell zur Beschreibung des elektromechanischen Verhaltens gesucht.

2.2.2 Systembetrachtung auf Basis perkolierender Partikelsysteme

Die Materialverteilung typischer partikelbasierter Elektroden lässt sich durch die Perkolationstheorie erklären [43]. Diese beschreibt die zufällige Verteilung von Partikeln in einem System. Mathematisch kann dieses Verhalten durch einen Graphen beschrieben werden, welcher besetzte Punkte in einem Gitter zu sogenannten Clustern verbindet. Dabei unterscheidet man zwischen Knotenperkolation (engl. site), die die Besetzung der Gitterpunkte beschreibt, und Kantenperkolation (engl. bond), die die Wahrscheinlichkeit von bestehenden Verbindungen zwischen zwei Punkten angibt. Eine durchgehende Verbindung zwischen zwei gegenüberliegenden Kanten stellt das Überschreiten der Perkolationsschwelle dar, bei der sich, wie im vorliegenden Beispiel, eine elektrische Leitfähigkeit einstellt. [62]

Bild 11 veranschaulicht verschiedene Perkolationsnetzwerke von Partikelelektroden mit unterschiedlicher Besetzungsdichte. Die Besetzungsdichte ist dabei durch die anteilig besetzten Gitterpunkte im Betrachtungsbereich definiert und reicht von eins für die vollständige Besetzung bis zu null für den Fall, dass kein Gitterpunkt besetzt ist. Der linke Bildausschnitt zeigt ein stärker agglomeriertes Partikelcluster, das mit einem erhöhten elektrischen Flächenwiderstand einhergeht. [63] Das mittlere Bild stellt eine durchgängige Verbindung zwischen zwei Seiten dar, durch die eine Leitfähigkeit gemessen werden kann. Diese steigt bei stärkerer Besetzungsdichte an. Das entstandene Cluster kann durch die Anzahl der zusammenhängenden besetzten Gitterpunkte und die Zusammenhangslängen k_ξ definiert werden, die die Ausdehnung des Clusters in die jeweilige Raumrichtung angibt. Aufgrund der geringen Schichtdicke der Elektroden erfolgt die Betrachtung für den zweidimensionalen Fall.

Die Besetzungsdichte des Clusters und die daraus resultierenden Systemeigenschaften können durch eine statistische Betrachtung beschrieben werden. Dabei bezeichnet die Perkolationswahrscheinlichkeit $P_\infty(p)$ den Anteil der besetzten Punkte auf dem Gitter. Mathematisch wird diese über die Besetzungsdichte p und die Perkolationschwelle p_c angenähert. Wobei β den kritischen Exponenten darstellt und von der Gitterstruktur und der Clustergröße abhängt. [64]

$$P_\infty(p) \sim (p - p_c)^\beta \quad \text{für } p \geq p_c \quad (8)$$

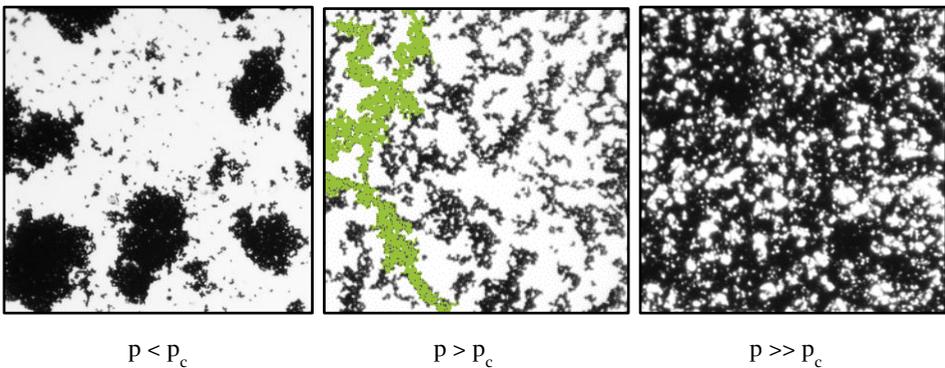


Bild 11: Perkolationscluster aus leitfähigen Graphenpartikeln (schwarz) mit unterschiedlicher Besetzungsdichte. Die farbliche Markierung zeigt beispielhaft die elektrisch leitfähige Verbindung bei Überschreiten der Perkolationschwelle. (Aufnahmen in 100-facher Vergrößerung, erstellt mit dem Durchlichtmikroskop Kern OBE 114)

Der Anteil der Partikelabdeckung im DE ist ausschlaggebend für die elektrischen Systemeigenschaften wie die Ladungsspeicherung und das davon abhängige E-Feld respektive die spezifische elektrische Leitfähigkeit $\sigma(p)$. Diese lässt sich über die effektive Beweglichkeit der Ladungsträger $u(p)$ mit der Perkolationswahrscheinlichkeit verknüpfen. Dabei bewegt sich die Kurve der Leitfähigkeit stets unterhalb der von $P_\infty(p)$ für $u(p) \leq 1$, da über die nicht verbundenen Enden des Clusters keine Ladungen transportiert werden können. [64]

$$\sigma(p) = u(p)P_\infty(p) \quad (9)$$

Ein großer Teil der einzelnen Cluster ist nicht mit den benachbarten Clustern verbunden. Diese Cluster tragen dadurch nicht zur elektrischen Leitfähigkeit des Systems bei. Der für die geometrische Betrachtung genutzte kritische Exponent β wird deshalb durch den Leitfähigkeitsexponenten μ für die Beschreibung der elektrischen Eigenschaften ersetzt. Bei einer hohen Besetzungsdichte des Gitters von $p \gg p_c$ steigt die spezifische Leitfähigkeit etwa linear mit der Konzentration der Partikel, bis die Leitfähigkeit des reinen Materials erreicht ist. [62] Dieser Zusammenhang ist in Bild 12 beispielhaft für Elektroden aus Graphenpartikeln gezeigt. Außerdem kann für dünne Schichten, wie die der vorliegenden Elektroden, die spezifische Leitfähigkeit über den Kehrwert des spezifischen Flächenwiderstands R_\square dargestellt werden.

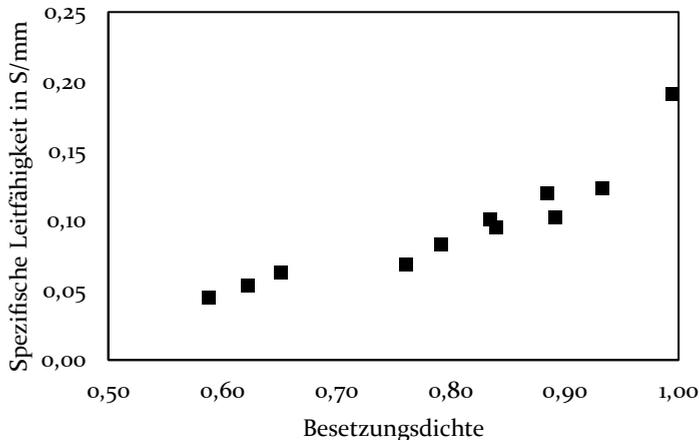


Bild 12: Zusammenhang der spezifischen Leitfähigkeit und der Besetzungsdichte des Partikelclusters oberhalb von 0,50 ($n = 12$)

$$\frac{1}{R_{\square}} \sim \sigma(p) \sim (p - p_c)^{\mu} \quad (10)$$

Neben der spezifischen Leitfähigkeit ist auch die Kapazität von der Besetzungsdichte des Perkolationsclusters abhängig. Durch die nicht verbundenen Cluster ist die effektive Fläche zur Ladungsspeicherung kleiner als die geometrischen Maße der Elektroden, von denen die elektrische Systemgröße abhängig ist. Für die Ladungsspeicherung kann angenommen werden, dass die Perkolationsschwelle überschritten ist. Daher wird der Fall $p > p_c$ betrachtet, für den die Wahrscheinlichkeit, Teil des Clusters zu sein, gleich der Besetzungsdichte ist. Daraus lässt sich folgender Zusammenhang ableiten: für einen betrachteten quadratischen Ausschnitt ist die Dichte der Punkte P über die Anzahl der Punkte $M(L)$ im Hauptclusters abhängig von der Kantenlänge L . [62]

$$P = M(L)/L^2 \quad (11)$$

Obwohl Teile des Perkolationsclusters nicht zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen, müssen sie als Teil des Systems mechanisch bewegt werden. Die Partikel können innerhalb einer Lage zudem zufällig orientiert sein und dadurch unterschiedliche Effekte auf das mechanische Systemverhalten haben. Folglich müssen diese Einflüsse in der theoretischen Systembeschreibung betrachtet werden, um eindeutige Aussagen über das Verhalten der DE treffen zu können. Für die Erstellung von Partikelclustern sind in der Literatur geometrische Ansätze beschrieben, welche die Ausdehnung und Orientierung der Partikel mit deren Konzentration korrelieren. Damit lassen sich die Signalantworten unter einachsigen Spannungszuständen vorhersagen. [65]

2.2.3 Randbedingungen anisotroper Systeme zur Modellierung des Systemverhaltens

Für ein ganzheitliches Modell zur Abbildung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften eines DE müssen die getroffenen Annahmen und Näherungen zusammengeführt werden. Zudem besteht der Bedarf an Abbildungsmöglichkeiten für die anisotropen Systemvariationen.

Um die Annahme der Homogenität der Elektroden aufrecht zu erhalten, werden Systeme, die einen heterogenen Aufbau aufweisen, in Teilabschnitte zerlegt und als homogen betrachtet. Die Wechselwirkung zweier Teilsysteme kann über die Methode der finiten Elemente (FEM) beschrie-

ben werden. Die Betrachtung eines infinitesimal kleinen Abschnitts ermöglicht dadurch die Modellierung des Systemverhaltens an einzelnen Punkten. Dabei ist vor allem die Untersuchung der Grenzflächen in den Randbereichen eines DEA für die Auswertung relevant. Durch den erzeugten elektrostatischen Druck entstehen Schubspannungen im Material, die senkrecht zur Wirkrichtung verlaufen und anhand der Normalspannungen in den drei Hauptkoordinatenrichtungen betrachtet werden (vgl. Bild 13). Für die Berechnung wird das ermittelte Materialmodell aus Kapitel 2.2.1 herangezogen. Dieses wird über die Verzerrungsenergiefunktion W beschrieben und folgt für das Verhalten inkompressibler Werkstoffe nach Mooney-Rivlin folgendem allgemeinen Zusammenhang. [50, 51]

$$W = \sum_{i,j}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (12)$$

C_{ij} ist der rechte Cauchy-Green-Tensor und die Invarianten I_1 bis I_3 , beschreiben die Verformung in den drei Hauptrichtungen. [66]

$$\begin{aligned} I_1 &= \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 \\ I_2 &= \varepsilon_x^2 \varepsilon_y^2 + \varepsilon_y^2 \varepsilon_z^2 + \varepsilon_x^2 \varepsilon_z^2 \\ I_3 &= \varepsilon_x^2 \varepsilon_y^2 \varepsilon_z^2 \quad (= 1, \text{ wenn } v \sim 0,5) \end{aligned} \quad (13)$$

Nach Suo et al. [67] kann aus der Änderung der Energiedichte dW auf die mechanischen Spannungen σ_{x-z} im DE geschlossen werden, da die wirkenden Kräfte in den Systemdeformationen ε_{x-z} resultieren.

$$dW = \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z \quad (14)$$

$$\sigma_i = \frac{\partial W(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)}{\partial \varepsilon_i} \quad (15)$$

Die nicht mit Elektroden beschichteten Bereiche der DE stellen passive Zonen dar. Diese passiven Bereiche werden daher nur durch den Materialfluss verformt, der aus den Schubspannungen des verdrängten Dielektrikums der aktiven Bereiche resultiert. Dies führt bei konventionellen Aktoren zu Verformungen in den Randbereichen. Durch die mechanische Kopplung mehrerer Elektrodensegmente auf einer gemeinsamen Membran treten die Schubspannungen jedoch auch in den Zwischenräumen zweier Elektrodensegmente auf. Der Einfluss solcher nicht aktivierbaren Materialstrukturen in DEA ist von Flittner und Timoshenko et al. in [68, 69] beschrieben.

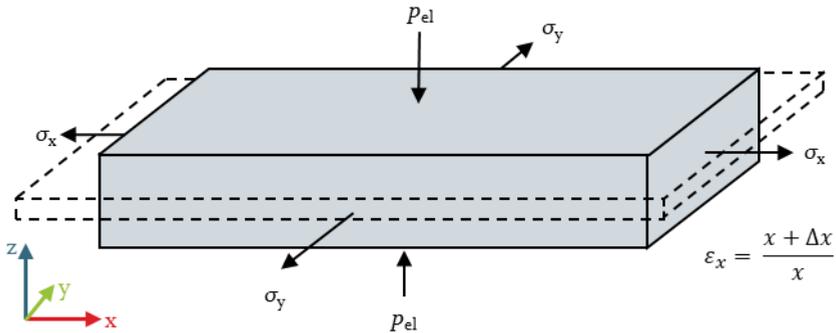


Bild 13: Deformation eines finiten Elements elektrostatischen Druckkräften mit den resultierenden Materialspannungen σ_x und σ_y in x- und y-Richtung

Ein weiterer Effekt, der bei der Modellierung berücksichtigt werden muss, ist die Deformation des Partikelclusters unter mechanischer Last, wodurch sich die Abstände zwischen den Partikeln vergrößern. Dies führt zu einer Abnahme der Leitfähigkeit unter mechanischer Last, die auch in [P3] gezeigt wird. [62] Die verringerte Anzahl elektrisch leitfähiger Verbindungen beeinflusst die zeitabhängigen Eigenschaften der Ladekurve und die Ladungsspeicherung. Die Deformation kann dazu führen, dass einzelne Cluster ihre Verbindung zum Hauptcluster verlieren und somit keine Ladung mehr dorthin transportiert werden kann. Aufgrund der höheren mechanischen Deformationen ist das resistive Verhalten der elastischen Perkolationscluster am stärksten betroffen und führt aufgrund der ansteigenden Impedanz zu Störeinflüssen auf die Signaldetektion in DES. [42]

Der Partikelanteil im System bleibt jedoch konstant, so dass die mechanischen Eigenschaften dauerhaft durch die Eigenschaften des leitfähigen Elektrodenmaterials beeinflusst werden. Dies wird durch die unterschiedlichen kritischen Exponenten β und μ verdeutlicht, welche die mechanischen und elektrischen Eigenschaften beschreiben. Nach Sahimi et al. [70] und Roux et al. [71] kann der Zusammenhang des Young'schen Modul Y ebenfalls über das allgemeine Potenzgesetz der Perkolationsstheorie angenähert werden. Dabei verhält sich das Deformationsverhalten proportional zur Zusammenhangslänge k_ξ des Hauptclusters, die die Länge des zusammenhängenden, mit Partikeln besetzten Bereichs beschreibt. Bei anisotropen Perkolationsgittern unterscheiden sich die Zusammenhangslängen entlang verschiedener Raumrichtungen signifikant.

$$Y \sim k_{\xi} \sim (p - p_c)^{\tau} \quad (16)$$

mit $\tau = \mu + 2\vartheta$
 ϑ kritischer Exponent der Zusammenhangslänge k_{ξ}

Die dehnungsabhängige Veränderung der Permittivität besitzt einen geringen Einfluss und kann als vereinfachende Randbedingung über den gesamten Deformationsbereich als konstant angenommen werden [72]. Der elektrostatische Druck wird in der mechanischen Simulation über eine statische Kraft senkrecht zur Elektrodenfläche nachgebildet. Dadurch bleiben elektromechanische Effekte wie die dynamische Veränderung des E-Felds bei reduzierter Schichtdicke unbeachtet. Die Dicke der Dielektrikumschicht und die Höhenreduzierung sind um ein Vielfaches kleiner als die Elektrodenfläche und tragen daher nicht wesentlich zur Auslenkung des Aktors bei. [73, 74] Die DE werden als frei stehende Systeme betrachtet, die keine direkte Kopplung mit zusätzlichen Komponenten besitzen. Deshalb wird der betrachtete Anwendungsfall vereinfacht und zusätzliche Randbedingungen wie Reibung oder Gravitation vernachlässigt. [68]

2.3 Konzepte für anisotrope dielektrische Elastomere

Die Inkompressibilität des Dielektrikums führt zu einem isotropen Bewegungsverhalten. Für Aktoren resultiert daraus eine Geometrieänderung in alle Raumrichtungen und für Sensoren eine richtungsunabhängige Signalantwort [13]. Um die Materialsysteme optimiert als Aktoren für Softrobots [14, 75] oder als Sensoren für die Bewegungsdetektion [76, 77] einsetzen zu können, muss das isotrope Bewegungsverhalten des Gesamtsystems anwendungsspezifisch ausgerichtet werden. Dazu wird die Deformations- oder Signalantwort des Systems entlang einer Vorzugsrichtung fokussiert. Diese Richtungsabhängigkeit wird als Anisotropie bezeichnet und beschreibt das variable Verhalten physikalischer Eigenschaften der Systeme in Abhängigkeit der Raumrichtung [78]. Die Anpassungen können sowohl während des Herstellungsprozesses als auch nachgeschaltet erfolgen. Im folgenden Kapitel werden Ansätze zur Herstellung anisotropen Systemverhaltens betrachtet und deren Potenziale gegenübergestellt.

2.3.1 Systemkenngrößen zur Anisotropieerzeugung

Die in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Erzeugung von anisotrop wirkenden DEA lassen sich anhand der Wirkmechanismen in vier Kategorien einteilen (vgl. Bild 14). Zusätzlich erfolgt eine Einteilung in inhärente,

fertigungsbedingte oder materialspezifische Eigenschaften und extrinsische Eigenschaften durch nachgeschaltete Systemmanipulation mit Hilfe zusätzlicher Komponenten.

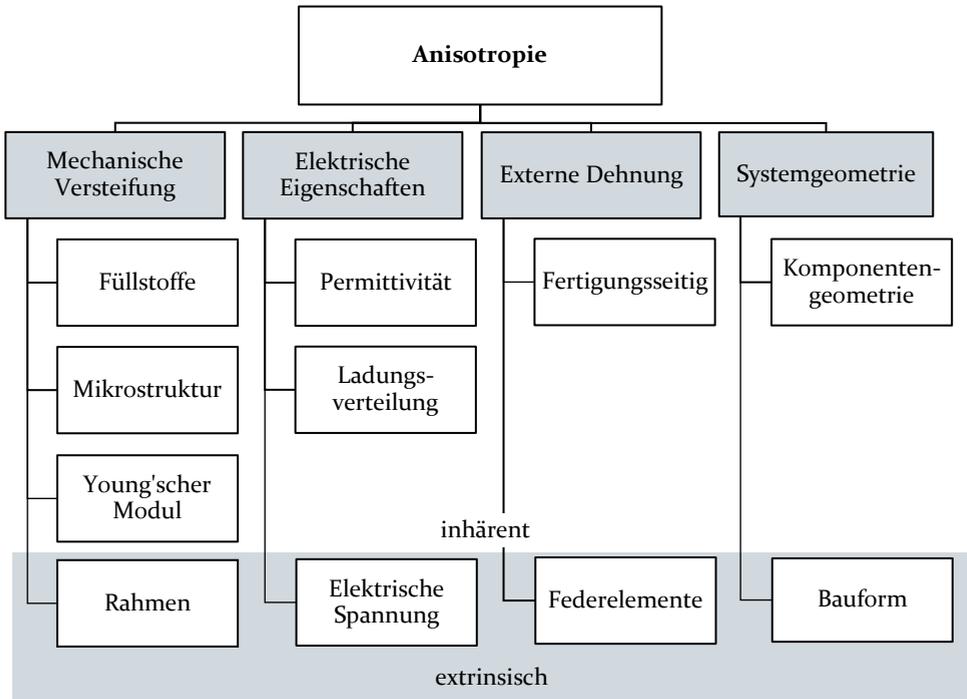


Bild 14: Einteilung der Forschungsansätze zur Erzeugung anisotropen Verhaltens von DE nach den jeweiligen Wirkmechanismen

Die vier genannten Kategorien basieren auf den Abhängigkeiten, die durch die Gleichungen (1), (2) und (4) beschrieben sind. Die in den Gleichungen vorkommenden Variablen der Systemeigenschaften dienen der allgemeinen Einstellung des Systemverhaltens und können zusätzlich zur Erzeugung von Anisotropie genutzt werden. Dabei wirken sich die einzelnen Variablen unterschiedlich stark auf die Betriebsarten der DE aus. Daher erfolgt eine getrennte Betrachtung für Aktoren und Sensoren.

Um die erreichbare Anisotropie einheitlich bewerten zu können, wird das Anisotropieverhältnis a_{DEA} eingeführt. Dieses gibt das Verhältnis zweier senkrecht zueinander orientierter Deformationsrichtungen ε_x und ε_y eines Systems gemäß Gleichung (17) an.

$$a_{DEA} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (17)$$

Analog zur Anisotropieerzeugung für Aktoren wird auch für Sensoren ein Verhältnis der anisotropen Signalintensität a_{DES} festgelegt, welches sich über Gleichung (18) beschreiben lässt. Dazu werden die Dehnungsfaktoren GF_{\parallel} und GF_{\perp} bei unterschiedlichen Lastrichtungen und gleicher Deformation verglichen. Die elektrischen Messsignale, die in der vorliegenden Dissertationsschrift untersucht werden, umfassen den elektrischen Widerstand und die Kapazität.

$$a_{DES} = \frac{GF_{\parallel}}{GF_{\perp}} \quad (18)$$

2.3.2 Forschungsansätze zur Erzeugung anisotroper Bewegungsmuster

Der am häufigsten verwendete Ansatz für anisotrope Bewegung ist die Änderung der molekularen Struktur durch gezielte Aushärtung des Elastomers unter Ausnutzung der lokalen mechanischen Versteifung. Diese beruht auf der Ausrichtung der Polymerketten entlang einer Vorzugsrichtung. Zusätzlich wird Anisotropie über das Einbringen von Füllstoffen erzeugt. [14, 79, 80] Die Füllstoffe werden dabei durch Vorspannung oder elektrische Aktivierung orientiert und versteifen das Material in der Raumrichtung senkrecht zur Partikelorientierung. [14] Das Einbringen von polarisierbaren Monomeren erhöht die Permittivitätskonstante des Dielektrikums, wodurch der elektrostatische Druck laut Gleichung (2) proportional ansteigt. [14] Ein weiteres Verfahren ist die partiell verstärkte Vernetzung des Polymergitters und die damit einhergehende Versteifung des Systems durch gezielte, räumlich begrenzte UV-Belichtung. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass das Materialverhalten nicht durch zusätzlich eingebrachte Füllstoffe beeinflusst wird. [79]

Neben der Manipulation des Dielektrikums beeinflussen die Elektroden durch heterogene Ladungsverteilung und Materialversteifung die Systemeigenschaften. Die Zusammenhänge lassen sich anhand von Gleichung (2) herleiten. Daraus ist ersichtlich, dass eine erhöhte Ladungskapazität zu einer Steigerung des effektiv wirkenden Drucks führt. Bei flexiblen Elektroden, die aus Partikelsystemen bestehen, geht dies mit einer höheren Besetzungsdichte einher. [44, 65] Dies kann zu einer Versteifung des Systems führen, wodurch sich der Elastizitätsmodul Y erhöht und dem erhöhten Systemdruck entgegengewirkt. Die Verwendung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien stellt aufgrund der verschiedenen Leitfähigkeiten einen zusätzlichen Einflussfaktor dar. [26] Neben partikelbasierten Elektroden

eignen sich gerichtete Kohlenstofffasern zur Beeinflussung der Vorzugsrichtung. Durch das Einbringen von Kohlenstofffasern weisen sowohl die Materialsteifigkeit als auch die Leitfähigkeit eine Richtungsabhängigkeit auf. [81] Dieser Effekt kann ebenfalls durch das linienweise Auftragen eines Elektrodenwerkstoffes durch ein selektives Herstellungsverfahren hervorgerufen werden [P4].

Zusätzlich zur graduellen Ladungsverteilung innerhalb heterogener Elektroden können diese so angeordnet werden, dass die passiven Systemanteile zu einer anisotropen Bewegungsantwort führen. Die aus einzelnen Aktorelementen bestehenden DEA besitzen anisotrope Eigenschaften, die von der konstruktiven Auslegung der aktiven und passiven Zonen des Systems abhängen [82]. Zudem kann durch den komplexen Aufbau aus mehreren separat ansteuerbaren Aktoren eine einstellbare Anisotropie erreicht werden [83].

Außer den inhärenten Faktoren, die bereits im Herstellungsprozess auftreten, können die Aktoren auch nachträglich durch externe Einflüsse beeinflusst werden. Dazu wird in der Literatur vor allem die vorherige Dehnung des Elastomers genutzt, um eine Vorzugsrichtung zu definieren. Auch diese Anpassung nutzt indirekt die Adaption der Elastomerstruktur, da sich die verknäulten Molekülketten entlang der Dehnungsrichtung ausrichten. Dadurch trägt die umgewandelte mechanische Kraft vollständig zur makroskopischen Deformation bei und wird nicht für die Ausrichtung der Polymerkette aufgewendet. [27, 60, 84–86]

Weiterhin werden passive mechanische Bauteile wie Rahmen oder Federn zur Limitation und Umlenkung der Deformation der Aktoren eingesetzt. Die Bauteile wirken dabei in Kombination mit einer vorher applizierten Dehnung und halten diese aufrecht. [87–89] Außerdem können damit alternative Bauformen von DEA wie Rollenaktoren [90] oder Spinnenaktoren [91] aufgebaut werden, mit deren Hilfe die Flächendehnung in eine uniaxiale Bewegung umgewandelt wird. So können durch uniaxiale Dehnung und Befestigung des Elastomers in einem biegbaren Rahmen Biegespannungen im System induziert werden. Diese führen zu einer Deformation des Systems aus der Ebene heraus. [88, 92] Wird die bei der Herstellung applizierte mechanische Dehnung des DE wieder gelöst, führen die Eigenspannungen im Material zum Einrollen des DE. Auf diese Weise ist die Herstellung von Helixaktoren mit einer uniaxialen Vorzugsrichtung möglich. [93, 94] Eine schematische Darstellung der alternativen Aufbauformen zur Nutzung linearer Bewegungen und Biegeaktoren ist in Bild 15 zu sehen.

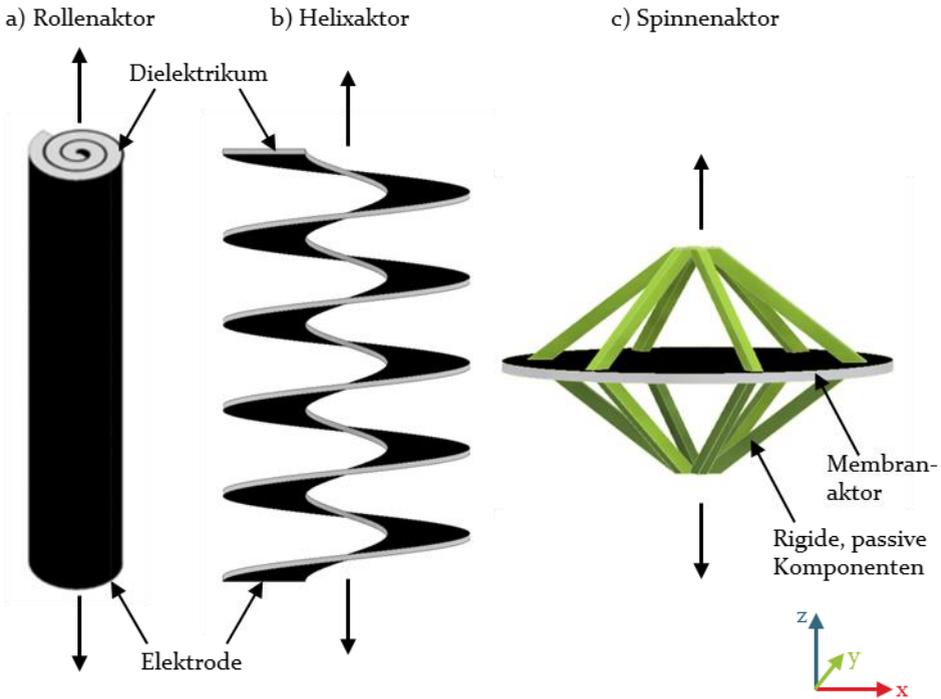


Bild 15: Alternative Aufbauformen von DEA zur Umlenkung der uniaxialen Bewegung eines Membranaktors in eine Vorzugsrichtung als a) Rollenaktor, b) Helixaktor oder c) Spinnenaktor (von links nach rechts)

Die Potenziale der aufgezeigten Adaptionen von DEA werden in Tabelle 1 gegenübergestellt und anhand des Anisotropieverhältnisses und der Herstellung verglichen. Für Membranaktoren kann mit einer passiven Dehnung ein Anisotropieverhältnis von bis zu 9,46 [89] erreicht werden. Dabei variieren die durch passive Dehnungen erzeugten Anisotropien zwischen 1,85 und 9,46 und sind vom Dehnungsverhältnis der Membran sowie passiven Elementen abhängig.

Das maximale Anisotropieverhältnis wird von Liu et al. [89] durch eine Kombination aus passiver Dehnung der Elastomermembran und einer mittels Fused Filament Fabrication (FFF) aufbrachten starren Wabenstruktur erreicht. Aus der Beschreibung geht hervor, dass das Verfahren zum Erzeugen des nahezu uniaxialen Bewegungsmusters mehrstufig ist und verschiedene separate Prozesse benötigt. Diese Systemanpassung ist in Tabelle 1 dem Ansatz durch passive Dehnung zugeordnet.

Dem gegenüber steht das zweitgrößte Anisotropieverhältnis, welches im Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R) halb-automatisiert hergestellt wird. Das

damit erzielbare Anisotropieverhältnis liegt bei 7,50 und ist durch die heterogenen mechanischen Eigenschaften der Kohlenstofffasern bestimmt. Somit wird diese Ansatz in Tabelle 1 den gerichteten Elektroden zugeordnet. Das von Cakmak et al. [81] beschriebene Verfahren beruht auf entsprechenden Halbzeugen, die in vorgeschalteten Prozessen hergestellt werden müssen. Der Prozess des Zusammensetzens ist jedoch automatisierbar und eignet sich gut für großflächige Systeme. Der Nachteil dieses DEA besteht in der mechanischen Beschädigung der Kohlenstofffasern bei hohen Zuglasten, wodurch diese zerbrechen und die elektrische Leitfähigkeit beeinträchtigen können. [81]

Tabelle 1: Vergleich des erreichten Anisotropieverhältnis a_{DEA} der verschiedenen Ansätze von anisotropen DEA.

Ansätze	Anisotropieverhältnis a_{DEA}	Materialien	Herstellungsprozess
Heterogene Elastomerstruktur	2,23 [79]	SBAS & Kohlenstofffett	Manuell
	1,60 [14, 79]	SBAS & CNT	Siebdruck
Gerichtete Elektroden	7,50 [81]	CNT-Fasern & Acryl	R2R
Heterogene Elektroden	2,33 [P4]	Graphenpartikel & PDMS	AJP
Passive Bereiche	2,13 [P4]	Graphenpartikel & PDMS	AJP
Passive Dehnung (Dehnungsverhältnis)	5,60 [86] (1,00 : 1,75)	PDMS & Au-Ionen	Ionen Implantation
	1,85 [60] (2,80 : 0,90)	PDMS & Kohlenstoffpartikel	Tampondruck
	9,46 [89] (4,00 : 2,50)	Acryl & Kohlenstofffett	FFF & manuell

Im Gegensatz dazu besteht ein Vorteil von Partikelsystemen darin, dass sie größeren Deformationen standhalten können. Durch eine mittels Aerosol-Jet-Druck (AJP) aufgetragene heterogene Verteilung der Partikel, die in

[P4] beschrieben ist, kann ein Anisotropieverhältnis von 2,33 hervorgerufen werden. Der Effekt beruht dabei auf der indirekt herbeigeführten heterogenen Ladungsverteilung in Zusammenhang mit einer erhöhten Materialsteifigkeit an bedruckten Stellen. Erste Ergebnisse zeigen außerdem, dass sich durch Variation von Geometrie und Partikelabdeckung die Systemeigenschaften einstellen lassen [P4].

Den geringsten Effekt zeigt die lokale Aushärtung des Dielektrikums. Durch das Ausbilden von geordneten Gitterstrukturen wird die Vorzugsrichtung des Elastomers definiert. [14, 79] Dabei verstärkt das Elastomergitter die mechanischen Eigenschaften, wodurch die absolute Deformation reduziert wird. Zudem ist der Herstellungsprozess mehrstufig und weist eine hohe Komplexität auf.

Der Stand der Forschung zeigt umfassende Erkenntnisse in der Erzeugung anisotropen Bewegungsverhaltens und unterstreicht damit den Bedarf an uniaxial wirkenden DEA. Jedoch zeigen die bisherigen Ansätze Limitierungen in der Prozesskomplexität und der eingeschränkten Flexibilität der Aktoren. Dabei bleiben insbesondere die Potenziale, die sich aus der Modifikation der Elektroden ergeben, weitgehend ungenutzt.

2.3.3 Stand der Forschung zur Erzeugung richtungsabhängiger Signale

Eine homogene Bauweise des DES führt zu richtungsunabhängigen Signalantworten bei externer mechanischer Belastung. Um die Informationsdichte der DES zu steigern, sind unterschiedliche Konzepte zur Generierung anisotroper Sensorsignale beschrieben. Die Ansätze zur anisotropen Signalerzeugung können folgenden Systemanpassungen zugeordnet werden (vgl. Bild 16):

- a) Konstruktive Veränderung der Systemeigenschaften
- b) Heterogener Aufbau der Elektroden
- c) Variable Deformation durch externe Bauteile
- d) Signalmodulation eines oszillierenden Eingangssignals

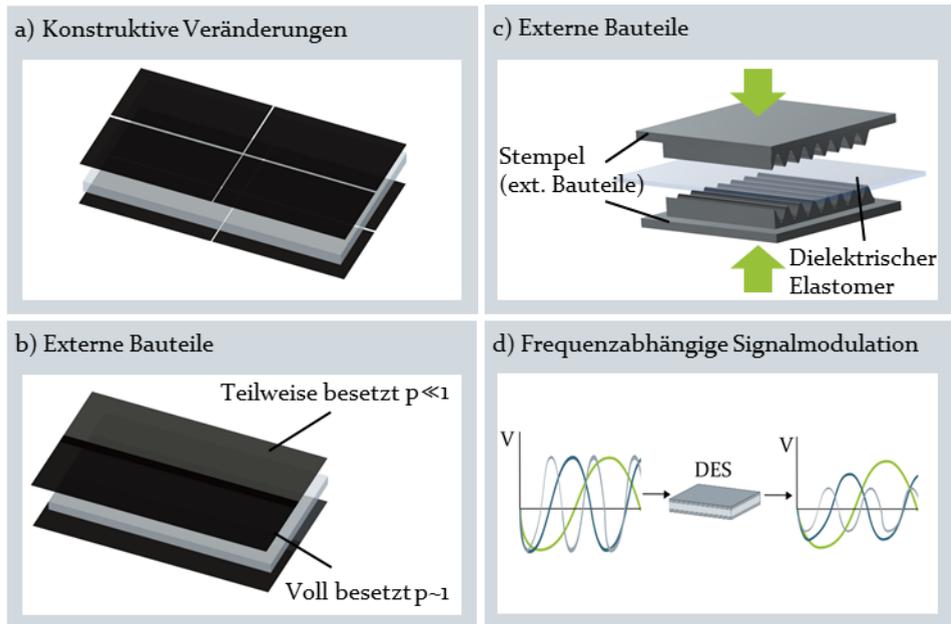


Bild 16: a) Segmentierung der Elektroden in einzelne DES, b) Mikrostrukturierung der Elektroden, c) Stempelgeometrie zur Umwandlung von Druck- in Zugbelastungen nach [37], d) Schematische Darstellung des elektrischen Dämpfungsverhaltens dielektrischer Elastomere für die lokale Auflösung applizierter mechanischer Kräfte

Für die Erfassung richtungsabhängiger oder lokaler Signalantworten werden unter anderem verschiedene Matrixbauweisen eingesetzt. Durch eine lokale oder unidirektionale mechanische Last verformen sich die Segmente unterschiedlich stark, wodurch charakteristische Messwerte an jedem Element abgegriffen werden können. Diese lassen Rückschlüsse auf den Applikationsbereich, die Höhe der Last und die Kraftrichtung zu. Die kapazitiven Eigenschaften der DES ermöglichen eine eindeutige Zuordnung zur applizierten Kraft und/oder dem Applikationsort. [18, 95] Neben den genutzten planaren Konfigurationen können durch Stapelung der Elektroden auch in mehrlagige Anordnungen realisiert werden [96].

Mithilfe dieses Ansatzes lassen sich lokale Druckkräfte durch Höhe der wirkenden Last und Ort charakterisieren, Scherkräfte erfassen und Zugrichtung sowie Höhe der Last unterscheiden. Matrixanordnungen haben den Nachteil, dass sich die Kapazitäten der einzelnen Segmente aufgrund der kleinflächigeren Elektroden reduziert. Dadurch steigen die Anforderungen an die Elektronik zur Signalauswertung. Zur Erfassung der Messsignale sind außerdem eine Vielzahl an Messleitungen notwendig [18].

Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung resistiver Signalanteile, analog zu Dehnmessstreifen. [97] Hierfür werden heterogene Elektroden mit unterschiedlichen Druckmustern hergestellt. Diese zeigen ein richtungsabhängiges Verhalten, das schematisch in Bild 17 dargestellt ist. Eine senkrecht zur Bahnrichtung verlaufende Kraft führt zu einem steileren Anstieg des Flächenwiderstandes als eine parallel applizierte. Durch die richtungsaspezifische Signalantwort kann auf eine anisotrope Verformung rückgeschlossen und deren Richtung sowie Intensität erfasst werden. Um eine flächige Elektrode mit Mikrostrukturierung herstellen zu können, wird im Stand der Forschung auf digitale Druckverfahren zurückgegriffen. Das mäanderförmige Druckbild stellt bei diesen eine charakteristische Prozesseigenschaft dar, die zur Strukturierung genutzt wird. [98, P3]

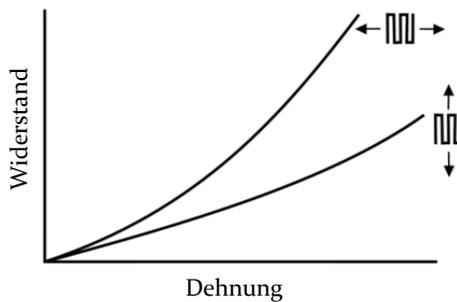


Bild 17: Schematische Darstellung des mikroskopischen Elektrodenaufbaus in Abhängigkeit von Bahnorientierung und Krafrichtung. Eine senkrecht zum Druckmuster wirkende Kraft führt dabei zu einer stärkeren Separation der einzelnen Bahnen. Dadurch werden die Abstände im Perkolationsnetzwerk vergrößert und der Flächenwiderstand erhöht.

Außerdem kann der Einsatz externer Bauteile bei gleicher Last unterschiedliche Signalantworten hervorrufen. Dafür können einerseits verschieden geformte Stempel genutzt werden. Diese dehnen den Sensor bei gleicher Druckbelastung unterschiedlich stark, wodurch Kapazitätsunterschiede messbar werden. Dabei wird die Druckkraft in eine Zugkraft umgewandelt und das Messsignal durch die größere Verformung verstärkt. [37, 99] Eine schematische Darstellung der Funktionsweise ist in Bild 16 c) gezeigt.

Andererseits ist die Deformation bei Kompression vom Untergrund abhängig, welcher das Messsignal des DES beeinflusst. Ein nachgiebiger Untergrund führt daher zu größeren Geometrieänderungen. Diese hängen direkt proportional mit einer höheren Kapazitätsänderung zusammen. Dadurch

wird die Detektion von Druckkräften analog zum vorher genannten Ansatz verstärkt. [19, 38, 100]

Neben den Systemanpassungen können lokale Lasten auch über oszillierende Messsignale aufgelöst werden. Dafür wird der Sensor mit passiven Bauteilen bekannter Eigenschaften zu einem Schwingkreis verschaltet. Durch die sich verändernde Kapazität unter Belastung kommt es zu einer Modulation des oszillierenden Eingangssignals. Der anschließende Vergleich zwischen Ein- und Ausgangssignal gibt Aufschluss über die Höhe der applizierten mechanischen Last. [101, 102, P2] Außerdem können die Dämpfungseigenschaften D der DES genutzt werden, um eine lokale Auflösung der angreifenden Kräfte zu erfassen. Diesem Ansatz liegen die Filtereigenschaften der hochohmigen Elektroden als resistive Messmethode zugrunde. Dafür erfolgt die Anregung der Sensoren bei unterschiedlichen Frequenzen. Höhere Frequenzen werden durch den Elektrodenwiderstand früher und tiefere Frequenzen später gedämpft, so dass Deformationen an weiter entfernten Messpunkten erfasst werden können. [102, 103] Der Zusammenhang der Signalmodulation ist in Bild 16 d) grafisch dargestellt.

Die erfassten Signalunterschiede hängen stark von der durchgeführten Datenverarbeitung und der Systemgröße ab, was zu großen Unterschieden in den Anisotropieverhältnissen von 1,60 bis zu 40,00 führt. In Tabelle 2 sind die erreichbaren Signalunterschiede und Technologien gegenübergestellt. Die größten Anisotropieverhältnisse treten für die Unterscheidung von Segmenten auf. Dabei werden Matrizen verschiedener Größen unterteilt und deformierte mit nicht deformierten Bereichen verglichen. Die Charakterisierung erfolgt über lokale Druckkräfte, welche die Kapazitäten der Einzelelemente verändern. [95, 96] Die Segmentierung kann zu einem erhöhten Messaufwand führen, da mehrere elektrische Kontakte angebracht und kleinere Messgrößen erfasst werden müssen. Der Ansatz von Meyer et al. [18] sieht daher eine Anpassung des Sensorlayouts vor, sodass eine Elektrode mehrere Arrayelemente detektiert. Dadurch kann die Anzahl der Kabel reduziert und die Segmentgröße vergrößert werden.

Ebenfalls nach dem kapazitiven Messprinzip funktioniert der Ansatz, unterschiedliche Geometrien und Materialhärten von Druckstempeln zu nutzen, um variable Signalantworten zu erzeugen. Diese erreichen jedoch nur Anisotropieverhältnisse von 1,60. Zudem werden für die Messungen hohe Kräfte und flächige Komponenten benötigt, welche die Einsetzbarkeit und den benötigten Bauraum limitieren. [37]

Im Gegensatz dazu nutzen die resistiven Ansätze die inhärenten Materialeigenschaften der Elektroden unter Zugbelastung. Der Flächenwiderstand steigt proportional zur aufgetragenen Dehnung. Durch selektive Druckverfahren hergestellte Elektroden weisen herstellungsbedingt eine Struktur auf, die diese elektrischen Eigenschaften beeinflusst. Aufgrund der mäanderförmigen Druckbahnen sind die Messsignale richtungsabhängig unterschiedlich stark ausgeprägt. Für senkrecht zur Bahnstruktur applizierte Kräfte besitzt der Effekt den größten Einfluss. [98, P3] Der Vorteil dieses Ansatzes ist die Nutzung der intrinsischen Materialstruktur ohne zusätzliche Anpassungen, mit dem sich Anisotropieverhältnisse a_{DES} von durchschnittlich 16,50 eingestellt werden können.

Tabelle 2: Vergleich der erreichten anisotropen Systemparameter der verschiedenen Ansätze von DES. In Silikon eingebundene Kohlenstoffpartikel werden als C-PDMS aufgeführt.

Ansätze	Anisotropieverhältnis a_{DES}	Materialien	Herstellungsprozess
Heterogene Elektroden (Dehnung in %) (resistiv)	1,74 (50 %) [P3]	Graphenpartikel & PDMS	AJP
	16,50 (1 %) [98]	PLA-CNT-Komposit & TPU	FFF
Segmentierung (kapazitiv)	~40,00 [18]	C-PDMS [104] & PDMS	Siebdruck
	~6,50 [96]	C-PDMS [105] & PDMS [100]	Rakel/manuell
	~38,00 [95]	C-PDMS & PDMS	Rakel/manuell
Externe Bauteile (Belastung in N) (kapazitiv)	1,60 (400,00 N) [37]	C-PDMS & PDMS	Manuell

Die vorgestellten Ansätze zeigen die breite Funktionalität der DES, die für die verschiedensten Anwendungen einsetzbar sind. Zudem werden die Messmoden bisher meist isoliert betrachtet. Die Kombination der Einzelösungen stellt jedoch die Grundlage für multi-modale Messsysteme dar. Daraus resultiert das Potenzial einer höheren Informationsdichte, die

durch heterogene Strukturierung in einer einzelnen Sensorlage erfasst werden kann.

2.4 Herstellungsverfahren für anisotrope dielektrische Elastomere

Aus den Konzepten für anisotrope DE im vorhergehenden Kapitel ergeben sich zusätzliche Anforderungen an ein geeignetes Herstellungsverfahren. Für die Verarbeitung von mehreren Materialien sind in der Literatur bereits Prozesse beschrieben, mit denen anisotrope DE hergestellt werden können. Davon lassen sich die meisten nach DIN 8580 dem Beschichten zuordnen, da die Einzellagen des DE sehr dünn sind. Jedoch befinden sich ebenso urformende und fügende Prozesse zur Herstellung im Einsatz. Eine Übersicht über die in der Literatur verwendeten Herstellungsverfahren zur Fertigung anisotroper DE ist in Bild 18 zu sehen. [106–109, P3]

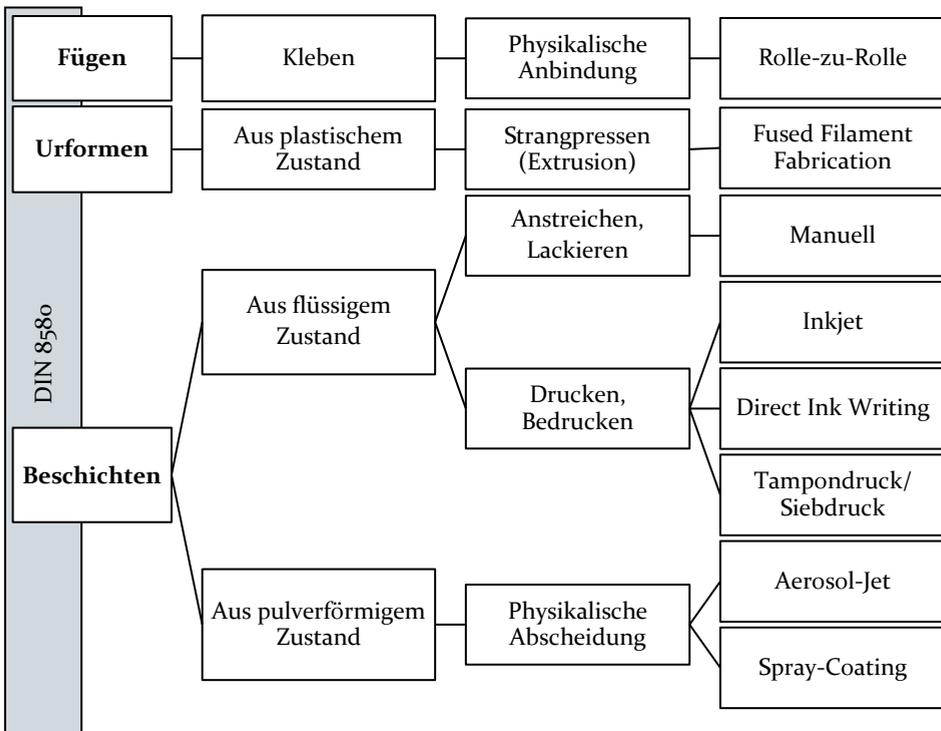


Bild 18: Aufzählung der aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren für die Herstellung anisotroper DE auf Basis der Elektrodenmodifizierung nach DIN 8580. Die übrigen Hauptgruppen der Norm (Urformen, Trennen und Stoffeigenschaften ändern) sowie die anderen Unterkategorien werden zur übersichtlicheren Darstellung weggelassen.

Um die Anisotropie basierend auf den Partikelelektroden einzustellen, muss das Fertigungsverfahren den variablen Materialauftrag ermöglichen, der für heterogene Eigenschaften der Elektroden verantwortlich ist. Darüber hinaus können die Systeme über die Geometrie der elektrisch leitfähigen Lagen eingestellt werden, die eine hohe Komplexität aufweisen können. Um deren Fertigung zu gewährleisten, muss der Prozess flexibel und in die automatisierte Prozesskette integrierbar sein. Zunächst werden mögliche Herstellungsverfahren identifiziert und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung zur Fertigung anisotroper Elektroden bewertet. Nach der Auswahl werden der Prozess und die Automatisierung näher betrachtet. Da sich die Prozessparameter direkt auf die Systemeigenschaften auswirken, sind diese Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Kapitel 2.4.3 dargestellt.

Eine erste Eingrenzung beschränkt die Betrachtung auf Verfahren zur Erzeugung anisotroper Eigenschaften, die die Adaption der Elektroden betreffen. Prozesse zur Erzeugung von lokal unterschiedlich vernetzten Dielektrika [14, 79] werden nicht näher betrachtet. Ein manuelles Fertigungsverfahren, wie es in der Literatur häufig beschrieben ist, wird aufgrund der variablen Ergebnisse und ungenügender Reproduzierbarkeit als unzureichend genau eingestuft und ebenfalls nicht näher erläutert.

2.4.1 Konzeption eines geeigneten Fertigungsverfahrens

Zur Fertigung der neuartigen anisotropen DE muss ein geeignetes Herstellungsverfahren gesucht werden, welches die Anpassung der Elektroden-eigenschaften ermöglicht. Dafür erfolgt eine Gegenüberstellung der bisher genutzten Verfahren für anisotrope DE anhand der realisierbaren Parameter und der Automatisierbarkeit komplexer Geometrien. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Bewertung der Prozesse übersichtlich in Tabelle 3 dargestellt.

Aus der Struktur der DE kann die Anforderung abgeleitet werden, verschiedene Materialien in einem Prozess zu verarbeiten. Dieses Kriterium ist für alle vorgestellten Verfahren realisierbar. Die Beschichtung im R2R-Verfahren und durch Spray-Coating sowie beim Tampondruck und Siebdruck sehen standardmäßig ein Halbzeug und einen andersartigen Beschichtungswerkstoff vor. Für die anderen Verfahren ist die Integration zweier Werkstoffgruppen möglich, jedoch wird hierfür ein zweiter Druckkopf und dessen Peripherie benötigt. Zudem ist der schichtweise Aufbau entscheidend für die Funktionsfähigkeit der DE, welche durch multiple Lagen weiter ausgebaut werden kann. Die Erzeugung der Lagenstruktur ist daher ein weiteres Entscheidungskriterium, das für die direktschreibenden additiven

Fertigungsverfahren als erfüllt gilt. Der schichtweise Auftrag entspricht dem Funktionsprinzip digitaler Druckverfahren und bedarf keiner weiteren Anpassung. Auch für die Beschichtungsverfahren sind nur geringe Anpassungen notwendig, welche das Umlenken und/oder Einlegen weiterer Lagen des Halbzeuges beinhalten oder einen zweiten Werkstoff integrieren. [106]

Geringere Dielektrikumsdicken sind für die meisten Anwendungsfälle vorteilhaft, da daraus geringere elektrische Einsatzspannungen resultieren. Für die Systemoptimierung geht durch Einsetzen von Gleichung (1) in (3) hervor, dass ein direkt proportionaler Zusammenhang mit dem dünneren Dielektrikum besteht. Die geringsten Schichtdicken können mit dem Spray-Coating, Tampondruck [110, 111] oder dem AJP-Verfahren erzeugt werden. Die Dicke der hergestellten Elektroden im R2R-Verfahren beträgt zwischen 25,00 μm und 40,00 μm und ist wegen der verfügbaren Halbzeuge eingeschränkt. [112] Wohingegen die Schichtdicken beim Direct Ink Writing (DIW) [113, 114] und FFF-Verfahren [98] mit über 100,00 μm am stärksten sind. Die so hergestellten Elektroden besitzen dadurch eine größere Steifigkeit, die das mechanische Systemverhalten negativ beeinflusst.

Eine flexible Formgebung ist ein wesentliches Auswahlkriterium für die Anpassung der Elektrodenorientierung, wie aus Kapitel 2.3.1 hervorgeht. Diese frei einstellbare Geometrie ist in den selektiven Verfahren gegeben, da die Steuerung auf computergestützten Konstruktionsdaten basiert und keine speziellen Werkzeuge benötigt werden. Dies wird in [P4] beispielsweise über das AJP-Verfahren realisiert. Im Gegensatz dazu nutzen Spray-Coating, Tampon- und Siebdruck [111] Stempel oder Masken, um eine definierte Geometrie aufzubringen, die für jede abweichende Form getauscht werden müssen. Beim Tampondruck bestimmt die Geometrie des Stempels die Form der Elektrode. [110] Im R2R-Verfahren kann die Formgebung erst in einem nachgeschalteten Prozess durch Zuschnitt erfolgen.

Außerdem sind die intrinsischen Materialeigenschaften, die über einen variablen Werkstoffauftrag eingestellt werden können, für das Verhalten des DE entscheidend. Dies kann unter anderem im Fertigungsprozess realisiert werden. Dabei sind insbesondere die tröpfchenbasierten Verfahren geeignet, da die Abdeckung der Oberfläche von Dauer und Massenstrom der Tinte abhängt. [115] Die aufgetragenen Partikel bilden dabei ein Perkolationsnetzwerk in Form einer porösen Schicht aus. Diese wird durch längeres Auftragen oder höheren Massenstrom dichter, bis es zur vollständigen Abdeckung kommt, ohne die Schichtdicke signifikant zu erhöhen. [P5] Dem gegenüber sind die Bahnen bei FFF und DIW durchgängig abgedeckt,

wodurch zwei Überfahrten zu einer Verdopplung der Schichtdicke führen. Dies stellt einen konstruktiven Eingriff in den Systemaufbau dar, welcher die Eigenschaften nach Gleichung (16) zusätzlich beeinflusst.

Der Aufbau der Elektrodenfläche aus mehreren modularen Bahnen stellt einen Vorteil selektiver Druckverfahren dar. Dadurch ist es möglich, die Materialverteilung einer Lage einzustellen und eine heterogene Bedeckung zu erzeugen. Ähnlich zum AJP [P3] weisen auch die Elektroden des Inkjet-Drucks eine Bahnstruktur auf. Diese können ebenfalls als anisotrope Elektroden eingesetzt werden. Die richtungsabhängigen Eigenschaften der Elektroden werden von Schlatter et al. [115] beschrieben. [106, 107]

Tabelle 3: Evaluation der bekannten Herstellungsverfahren, die für die Erstellung anisotroper Eigenschaften eingesetzt werden

Auswahlkriterium	Herstellungsverfahren							
	RzR	FFF	Inkjet	AJP	DIW	Tampondruck	Siebdruck	Spray-Coating
Multi-Material	●	◐	◐	◐	◐	●	●	●
Mehrlagige Systeme ($n_l > 2$)	◐	●	●	●	●	◐	◐	◐
Dünne Schichten	◐	○	●	●	○	●	●	●
Geometriefreiheit	○	●	●	●	●	◐	◐	◐
Heterogener Materialauftrag	◐	◐	●	●	◐	○	○	○
Automatisierbarkeit	◐	●	●	●	●	◐	◐	◐

●=erfüllt ◐=geringe Anpassungen notwendig ◑=Anpassungen notwendig
 ○=umfangreiche Anpassungen ○=nicht erfüllt

Für die anderen Herstellungsverfahren, die auf flächigem Materialauftrag basieren, ist die Einstellung unterschiedlicher Eigenschaften innerhalb einer Elektrodenlage nicht möglich. Im Fall des RzR-Verfahrens ist der heterogene Materialauftrag abhängig vom genutzten Halbzeug und kann durch einen Materialwechsel angepasst werden. Das Material liegt dazu als

Halbzeug in geordneten Schichten vor. Die Elektroden bestehen aus einlagigen, unidirektional ausgerichteten Fasern, die von einer auf einer Walze aufgetragenen adhäsiven Acrylschicht aufgenommen werden. [112]

Die Automatisierbarkeit ist bei allen Verfahren gegeben und lässt sich bei direkt schreibenden Technologien über den Maschinencode steuern. Für die anderen Verfahren ist ein zusätzlicher Aufbau notwendig, der vor dem erneuten Auftrag einer Elektrode eine weitere Dielektrikumsschicht einlegt oder ein weiteres Material appliziert. [116]

Aus der Bewertung geht hervor, dass AJP und Inkjet die besten Eigenschaften für die Umsetzung der anisotropen DE besitzen. Durch die Integration einer zweiten Komponente können beide Materialsysteme simultan gedruckt und in abwechselnden Lagen geschichtet werden. Aufgrund der flexibleren Auswahl von Materialien und des größeren Düsenabstands, der sich für komplex geformte Bauteile eignet, wird das AJP-Verfahren für die praktische Umsetzung der anisotropen DE verwendet. [61] Die Funktionsweise sowie deren Anbindung an die digitale Prozesskette zur Herstellung komplexer Geometrien werden im Folgenden beschrieben.

2.4.2 Automatisierte Herstellung komplexer elektromechanischer Wandler

Das AJP-Verfahren ist Gegenstand eingehender Untersuchungen zur automatisierten Herstellung von DE und ist im Detail in [61] beschrieben. In getrennten Prozesskammern erfolgt die Zerstäubung der flüssigen Werkstoffe in Aerosole, welche über zwei separate Düsen auf ein Substrat aufgesprüht werden. Dabei unterscheiden sich die Wirkprinzipien für Dielektrika und Elektroden. Die Zerstäubung der Silikonkomponenten erfolgt separat pneumatisch, gefolgt von einem Prozessschritt vor dem Düsenaustritt, in dem sich die Komponenten im Verhältnis eins zu eins zu einem Gesamtgasstrom vermischen. Um die Viskosität der Werkstoffe herabzusetzen und die Aerosolproduktion zu steigern, werden die Werkstoffe erhitzt und jeweils 15,00 % Silikonöl beigemischt. [117]

Dem gegenüber basiert die Zerstäubung der leitfähigen Tinte [P5] auf einem hybriden Ansatz, der ultraschallbasierte und pneumatische Prinzipien vereint. Die applizierten Schallwellen tragen untergeordnet zur Aerosolerzeugung bei und sorgen hauptsächlich für eine homogene Partikeldispersion. [P3] Um einer Erhitzung der Tinte durch die ins System

eingebraachte Energie entgegenzuwirken, wird der Behälter mit einer Wasserkühlung aktiv auf 10,00°C gekühlt. Der Anlagenaufbau und das Funktionsprinzip sind in Bild 19 schematisch dargestellt.

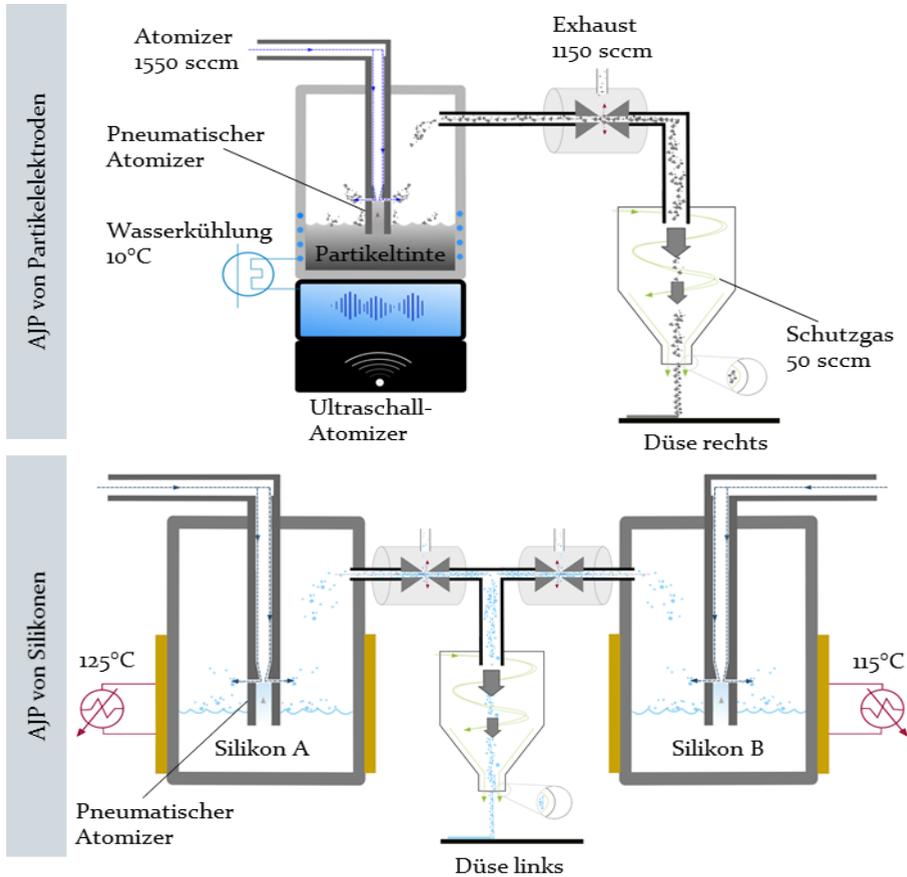


Bild 19: Schematische Darstellung des AJP-Prozesses zur Herstellung von DE bestehend aus getrennten Behältern für die Silikonkomponenten, die mit einer Düse gedruckt werden und einem Hybridatomizer für die Herstellung von leitfähigen Elektroden

Das nutzbare Materialspektrum ist abhängig von den rheologischen Eigenschaften der Werkstoffe, wobei in der vorliegenden Arbeit Elastosil® P7670 von Wacker genutzt wird. [S3] Die Verarbeitung der Elastomere beeinflusst die elektrischen Kennwerte des Elastomers wie die Permittivität oder die Durchschlagsfestigkeit nicht negativ. Jedoch kann eine Reduktion der Zugfestigkeit aufgrund der topologischen Schwächung der Silikonschicht durch die Kerbwirkung zwischen den einzelnen Bahnen entstehen. [118, P6]

Die mit dem Druckprozess herstellbaren Schichtdicken liegen bisher bei minimal $7,00\ \mu\text{m}$ für eine homogene Silikonlage [61]. Durch wiederholten Materialauftrag können diese zu einer dickeren Silikonschicht aufgestapelt werden, um eine isolierende Wirkung zu erzielen. Die Breite der aufgetragenen Linie beträgt rund $600,00\ \mu\text{m}$ und gleicht im Profil einer Gaussverteilung [61]. Um homogene Schichtdicken herstellen zu können, müssen sich die Bahnen daher anteilig überlappen. [61, P5] Der bahnbweise Materialauftrag in mehreren Lagen ist schematisch in Bild 20 dargestellt.

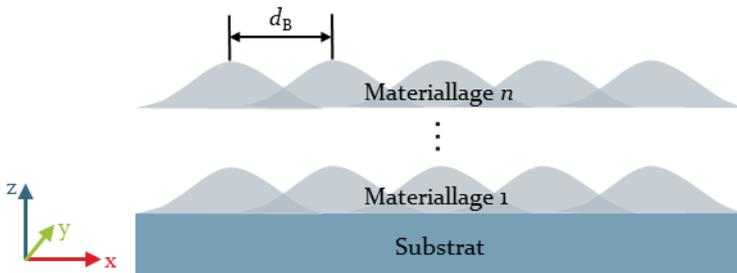


Bild 20: Prinzipskizze der Überlappung einzelner Druckbahnen, durch einen geringeren Bahnabstand d_B kommt es zu einer größeren Überlappung, wobei jede Schicht aus mehreren Materiallagen besteht

Um ausreichend leitfähige Elektroden zu formen, sind mehrere Lagen notwendig, aus denen eine homogene Schicht mit einem Flächenwiderstand von rund $3,38\ \text{k}\Omega$ erzeugt werden kann. [P5] Die aufgetragenen Partikel treffen im Prozess ungeordnet auf das Substrat und können jede Raumorientierung besitzen, wodurch sich eine hohe Rauheit der Oberfläche von rund $20,00\ \mu\text{m}$ einstellt [S4]. Zur Fixierung der Partikel auf dem Silikonsubstrat muss die Elektrode mit einer Silikonlage überzogen werden, die das Ablösen verhindert und damit Alterungseffekten entgegenwirkt. Zur Automatisierbarkeit und Fertigung komplexer, heterogener Aufbauformen wird der Prozess über Anpassungen der digitalen Prozesskette integriert.

Anpassung der digitalen Prozesskette

Digitale Druckverfahren sind in der Lage, Muster und Geometrien auf Basis von Konstruktionsdaten direkt über die digitale Prozesskette herzustellen. Um die automatisierte Fertigung zu ermöglichen, werden Schnittstellen zwischen den genutzten Programmen etabliert und Anpassungen für die jeweiligen Bauteile und Herstellungsverfahren getätigt. Bild 21 stellt die digitale Prozesskette dar, welche aus den Hauptaufgaben der Vorbereitung, des Druckprozesses und der Nachbereitung bestehen [119]. Zusätzlich sind die Anpassungen, die für den Druck von DE mittels AJP notwendig sind,

hervorgehoben. Die durchgeführten Anpassungen wurden teils im Rahmen der studentischen Arbeit von Vogelsang et al. [S5] konzipiert.

Die Eigenschaften der gedruckten Elektroden hängen mitunter von der Anzahl der aufgetragenen Materiallagen ab. Diese werden über das CAD (engl. computer aided design) -Modell definiert, sodass die Dicke einer Schicht über ein Vielfaches von 13,00 µm festgelegt wird. Dadurch entspricht eine Kombination aus vier Silikonlagen und vier Elektrodenlagen einer realen Systemdicke von rund 100,00 µm. Außerdem ist darauf zu achten, dass Bereiche zur elektrischen Kontaktierung vorgesehen werden.

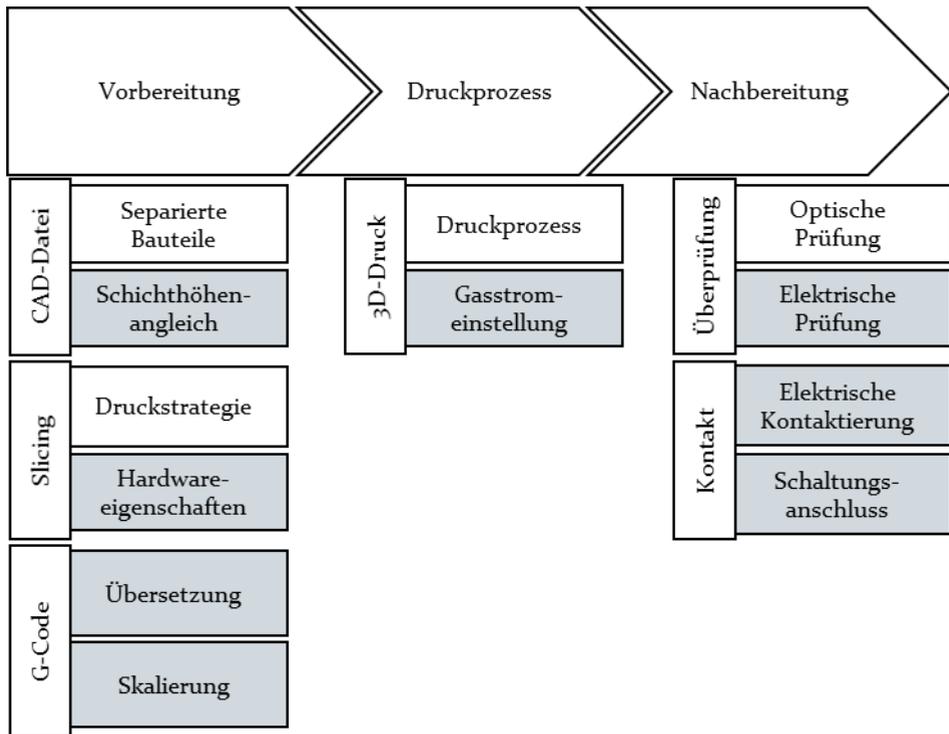


Bild 21: Schematische Darstellung der digitalen Prozesskette für additiv gefertigte Bauteile, wobei die spezifischen Anpassungen grau hinterlegt sind

Da der AJP-Drucker hardwareseitige Anpassungen enthält, die nicht in der Datenbank der verwendeten Software „CURA (4.13.1)“ von Ultimaker (2021) hinterlegt sind, müssen die Spezifikationen als Profil angelegt und Bau-raum sowie Extruderoffset definiert werden. Zudem verlangt der eigene Programmcode-dialekt des Druckers spezifische Start- und Endbefehle, die im Profil hinterlegt werden. In diesem Schritt lassen sich über die Stan-dardeinstellungen Parameter wie die Verfahrensgeschwindigkeit der Düse, der Bahnabstand und die Richtung der Bahnen vorgegeben. Jedoch müssen

beim Ausleiten des G-Codes Anpassungen vorgenommen werden, um den standardisierten Dialekt in den der Maschinensteuerung umzuwandeln. [S5]

Der Druckcode kann anschließend über ein portables Speichermedium auf den Drucker transferiert werden. Externe Steuerungseinheiten regeln den Materialstrom, welche nicht über den G-Code ansteuerbar sind. Ein Unterbrechen des Materialauftrags ist prinzipiell mittels eines Codebefehls möglich. Dies führt jedoch zu großen Prozessinstabilitäten, weshalb der Materialauftrag bei Überfahrten nicht gestoppt wird. Dadurch bleiben die Verbindungslinien sichtbar. [61]

Die Einstellungen für die Materialströme sind getrennt von der Maschinensteuerung, wobei typische Werte in Tabelle 4 angegeben sind. Diese ergeben sich aus empirischen Prozessstudien [P3, P5]. Über die Festlegung der Einstellungen lässt sich der Massenstrom regeln, der während des Drucks aufgetragen wird. Durch das vorherige Zuordnen der Extruder erfolgt die automatisierte, alternierende Herstellung der Geometrien aus einzelnen Schichten. Die Heizelemente im Inneren des Druckers werden extern gesteuert und liefern eine konstante Wärmeleistung, die das Substrat auf 150,00 °C erhitzt. Dadurch sorgen sie für eine instantane Trocknung der Schichten, die für Maßhaltigkeit und Formstabilität des Werkstücks entscheidend ist.

Tabelle 4: Zusammenfassung der idealen Prozessparameter [P5], die, sofern nicht anders beschrieben, für die Probenherstellung genutzt werden

Einstellungen	Silikon A	Silikon B	Graphentinte
Massestrom in sccm	600,00	600,00	400,00
Mantelgas in sccm		50,00	50,00
Verfahrgeschwindigkeit der Düse in $\mu\text{m/s}$		$20,00 \times 10^3$	$15,00 \times 10^3$
Bahnabstand in μm		250,00	200,00

Für gestapelte DE ist keine Nachbehandlung der Systeme durch Entfernung von Stützstrukturen notwendig, jedoch müssen die Elektroden elektrisch kontaktiert und mit einer geeigneten Schaltung verbunden werden. Durch die Halterung des Substrats in einem Rahmen mit ausreichend Abstand zum Elektrodenbereich ist eine möglichst reibungsfreie Lagerung gewährleistet. [120]

Analog zu anderen additiven Fertigungsverfahren werden auch beim AJP die Bauteileigenschaften erst während der Fertigung definiert. Zur Optimierung der Eigenschaften der DE werden der Prozess und die Einflussfaktoren auf das Systemverhalten abgebildet und mit Hilfe der statistischen Prozessbeschreibung dargestellt. Im Folgenden werden die prozessabhängigen Systemparameter des DE betrachtet.

2.4.3 Einflussgrößen des Aerosol-Jet-Drucks

Zum Erreichen definierter Zielgrößen bei der Herstellung von DE müssen die erforderlichen Eingangsgrößen und deren Wechselwirkungen bekannt sein. Dafür können diese in einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang betrachtet werden. Die Einflussparameter und deren Auswirkung lassen sich mit der nach dem japanischen Wissenschaftler benannten grafischen Darstellung des Ishikawa-Diagramms schematisch aufzeigen. Aufgrund der meistverwendeten Haupteinflussgrößen Material, Mensch, Maschine und Methode sowie der Erweiterbarkeit um zwei bis vier zusätzliche Faktoren wird dieses Schema ebenfalls als 6M-Methode bezeichnet. [121] Diese Repräsentation von Kausalbeziehungen wird im Folgenden für die Einflussgrößen des additiven Fertigungsprozesses zur Erstellung von anisotropen mechatronischen Systemen herangezogen. Die schematische Darstellung der Parameter des AJP ist in Bild 22 gezeigt.

Die häufig verwendete Makroebene „Milieu“ wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet, da die Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit stabil gehalten werden und atmosphärische Einflüsse als vernachlässigbar einzustufen sind. Gleiches gilt für die Haupteinflussgröße „Mensch“, der Prozessinstabilitäten durch unsachgemäßen Betrieb der Anlage verursachen kann. Störeinflüsse wie mangelhafte Reinigung werden durch Reinigungsprotokolle und Schulungen minimiert. Die manuelle Positionierung des Werkstückträgers wird durch eine formschlüssige Aufnahme sichergestellt. Dadurch ist zu erwarten, dass durch den Faktor „Mensch“ ebenfalls keine signifikanten Einflüsse entstehen.

Die vier Haupteinflussgrößen, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, sind: Material, Maschine, Methode und Morphologie, die in Bild 22 dargestellt sind. Dabei sind die Einflussgrößen „Material“ und „Maschine“ über die jeweiligen Kennwerte definiert, wodurch sich die Zielgrößen der DE beeinflussen lassen. Dem gegenüber steht die „Morphologie“ des Systems, welche anhand des CAD-Modells angepasst werden kann. Die letzte

Haupteinflussgröße ist die „Methode“, welche die prozesseitigen Parameter gezielt einsetzt, um die Zielgrößen der DE einzustellen.

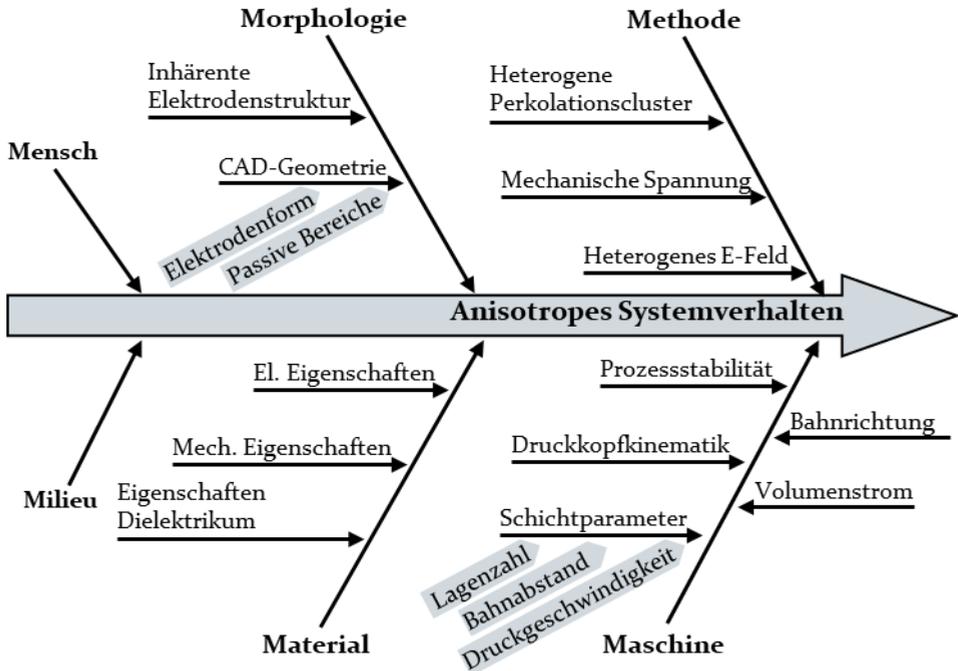


Bild 22: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die betrachteten Einflussfaktoren auf die Systemparameter der DE. Für eine übersichtliche Darstellung werden die als konstant betrachteten Haupteinflussparameter „Mensch“ und „Milieu“ vereinfacht dargestellt

Die Werkstoffeigenschaften, die unter der Haupteinflussgröße „Material“ zusammengefasst sind, haben einen signifikanten Einfluss auf den resultierenden Verbundwerkstoff. In der vorliegenden Arbeit werden nur die Elektrodenwerkstoffe betrachtet, da während der Untersuchungen stets das gleiche Dielektrikum verwendet wird. Sowohl der eingesetzte Elektrodenwerkstoff als auch die Geometrie der Partikel besitzen Einfluss auf das Gesamtverhalten des Systems. Dabei können die materialabhängigen Eigenschaften wie Härte und Leitfähigkeit während der Nutzung des gleichen Werkstoffes als konstant angesehen werden. [122] Zusätzlich zu den Materialeigenschaften haben Orientierung und Konzentration der leitfähigen Partikel einen Einfluss auf das Systemverhalten der DE [58]. Die Ergebnisse von Untersuchungen der genutzten Partikeldispersion für einen optimierten Betrieb bei maximierter Leitfähigkeit können [S4, S6]

entnommen werden. Basierend darauf wird eine gleichbleibende Zusammensetzung der leitfähigen Tinte mit einem 5,00 mg : 1,00 ml-Verhältnis für die Suspension aus leitfähigen Partikeln und Lösungsmittel genutzt.

Neben den Materialeigenschaften bringt der Fertigungsprozess feste Randbedingungen mit sich, die die Systemeigenschaften beeinflussen. Der Faktor „Maschine“ inkludiert Parameter wie den Volumenstrom, die Verfahrgeschwindigkeit der Düse und den Bahnabstand. Außerdem gehört die Prozessstabilität zu den wichtigen Einflussfaktoren, die durch eine statistische Prozessbeschreibung auf die resultierenden Systemeigenschaften abgebildet werden. Die Betriebsart hat keinen direkten Einfluss auf das Systemverhalten. Jedoch vereinfacht eine automatisierte Prozesskette die Erstellung komplexer Strukturen, wodurch eine gezielte Systemmanipulation ermöglicht wird.

Der Einfluss der makroskopischen Gestaltung des Systems ist unter dem Aspekt der „Morphologie“ zusammengefasst. Darunter werden die konstruktiven Designparameter wie der kongruente Bereich der Elektroden, die Elektrodengeometrie und die passiven Zonen eingeordnet. Neben makroskopischen geometrischen Konstruktionsparametern wird auch die inhärente Struktur betrachtet. Die zur Anisotropieerzeugung notwendigen komplexen Strukturen lassen sich über CAD-Modelle erstellen. Dazu wird die entwickelte automatisierte Prozesskette eingesetzt, durch die die Drucktrajektorien jeder Lage eingestellt werden können.

Als letzter Faktor wird die „Methode“ zur Adaption inhärenter physikalischer Parameter über gezieltes Einstellen der fertigungsbedingten Abhängigkeiten in Bild 22 aufgeführt. Diese methodische Nutzung der Einflussfaktoren wirkt sich auf die elektrischen und mechanischen Systemeigenschaften aus, die in Kapitel 2.3.1 beschrieben sind. Darunter zählen kombinierte Aufbauformen, der gezielte Einsatz aktiver und passiver Zonen und heterogene Materialverteilungen. Die Wirkmechanismen basieren beispielsweise auf der mechanischen Versteifung und auf höheren elektrischen Ladungsdichten.

Um die Kausalbeziehungen für die anisotropen Systemeinstellungen nutzen zu können, werden diese für die praktische Evaluation anhand eines strukturierten Versuchsplans ermittelt und Zusammenhänge gebildet. Die Untersuchung betrachtet die Haupteinflussgrößen „Maschine“ und „Material“. Die Nutzung der gefundenen Parameter bildet die Basis, um ein komplexes System aufzubauen und die resultierenden anisotropen Eigenschaften zu charakterisieren.

2.5 Forschungsbedarf für optimierte anisotrope dielektrische Elastomere

Die anisotrope Gestaltung von DE bietet großes Potenzial für die Effizienzsteigerung der Sensoren und Aktoren. Jedoch bestehen große Herausforderungen im optimierten Systemaufbau und der Fertigung anisotroper DE. Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass die meisten Ansätze eine passive Dehnung oder lokale Anpassungen des Elastomers nutzen, um eine Vorzugsrichtung zu definieren. Dafür sind komplexe mehrstufige Prozesse und zusätzliche Einspannung in rigidem Rahmen notwendig. Diese wirken den vorteilhaften Eigenschaften der flexiblen Systeme entgegen und limitieren den Einsatzbereich der DE. Dem gegenüber sind die anderen Wirkprinzipien bisher wenig erforscht, wobei vor allem der Einfluss der Elektroden Potenziale birgt.

Die Anpassung der Elektrodenstrukturen ermöglicht die Realisierung einer Mehrzahl der in Kapitel 2.3 beschriebenen Wirkmechanismen. Die heterogene Partikelverteilung sorgt dafür, dass sich die Ladungen aufgrund des höheren Flächenanteils stärker in einem Areal konzentrieren, wodurch der elektrostatische Druck in diesem Segment gesteigert werden kann. Diese heterogene Struktur ist zudem für den resistiven Signalanteil der Elektroden nutzbar. Der linienweise Materialauftrag resultiert in einem Perkolationsgitter, das lokal unterschiedliche und richtungsabhängige Besetzungsdichten p aufweist. Dadurch ermöglicht das anisotrope Materialverhalten, welches mit Hilfe der Druckparameter eingestellt werden kann, die Unterscheidung von Richtung und Art der wirkenden Kraft. Zusätzlich wird die Wechselwirkung der definierten aktiven (schwarz) und passiven (weiß) Zonen des DEA über die makroskopische Segmentierung zusammenhängender Elektrodensegmente beeinflusst. Die Wechselwirkung der im Dielektrikum wirkenden Schubspannungen sorgen dabei für eine anisotrope Deformation der DE. Die Wirkprinzipien, die durch die Modifikation der Elektroden in der vorliegenden Dissertationsschrift adressiert werden, sind schematisch in Bild 23 dargestellt.

Um die Funktionalisierung über heterogene Elektroden zu erforschen und das Systemdesign zu optimieren, wird in der vorliegenden Arbeit der Aufbau einfacher DE-Membranen erforscht. Diese dienen als Grundbaustein für alternative Bauformen (vgl. Bild 15), durch die die Anisotropie des Gesamtsystems verstärkt werden kann. Zur Materialisierung der anisotropen DE dient ein selektives, additives Herstellungsverfahren, woraus sich folgende übergeordnete Forschungsthese ergibt:

Eine Modifikation der Elektroden durch ein selektives Druckverfahren ermöglicht die Einstellung optimierten, anisotropen Systemverhaltens von DE auf Basis elektromechanischer Wechselwirkungen.

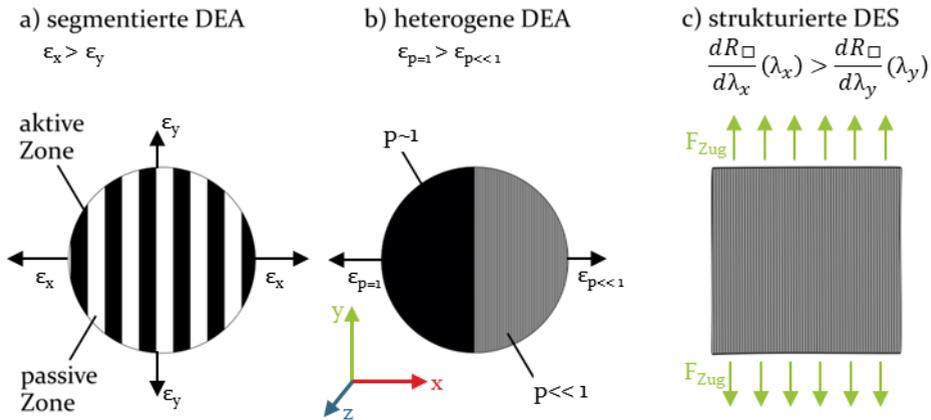


Bild 23: Schematische Darstellung der Wirkprinzipien basierend auf heterogenen Elektroden zur Erzeugung anisotropen Systemverhaltens. Die vom System erzeugten Deformationen sind in schwarz dargestellt, externe Lasten in grün

Zur Beantwortung dieser Hypothese wird im ersten Schritt das ausgewählte AJP-Verfahren quantifiziert. Mit dessen Hilfe lassen sich Geometrie und Partikelverteilung der Elektroden anpassen, was Auswirkungen auf die Systemeigenschaften hat. Um die anisotropen Eigenschaften optimiert einstellen zu können, stellen sich in Bezug auf den Herstellungsprozess folgende Forschungsfragen:

1. Welche Haupteinflussfaktoren auf das Verhalten der DE lassen sich unter den Herstellungsparametern identifizieren?
2. Welche Wechselwirkungen besitzen die Parameter für Elektroden unter mechanischer Last?

Da die Abhängigkeiten zwischen Aktoren und Sensoren variieren, werden diese im Folgenden separat betrachtet. Um optimiertes Aktorverhalten zu ermöglichen, wird der Einfluss konstruktiver Größen auf das Deformationsverhalten untersucht. Dafür wird das Verhältnis aktiver und passiver Segmente sowie die geometrischen Abhängigkeiten untersucht. Die konstruktiven Anpassungsmöglichkeiten werden numerisch mittels FEM

modelliert. Dafür sind die Ergebnisse der Parameteranalyse vom AJP-Verfahren notwendig. Um das Ziel anisotroper DEA zu erreichen, werden die folgenden Forschungsfragen beantwortet:

3. Wie muss das Verhältnis von aktiven und passiven Segmenten ausgelegt werden, um ein optimiertes anisotropes Verhalten zu erzielen?
4. Lässt sich die anisotrope Funktionalisierung der DEA am Beispiel eines aktiven Irisimplantats zeigen?

Demgegenüber basiert das anisotrope Verhalten der Sensoren auf dem Partikelgefüge, welches sich ebenfalls über den selektiven Druckprozess einstellen lässt. Um die Zusammenhänge zu untersuchen, wird das Materialverhalten über die Perkolationstheorie abgebildet. Dafür sind Modellanpassungen für gerichtete Partikelcluster notwendig, deren Zufallsverteilung mittels Monte-Carlo-Simulation abgebildet wird. Die Überprüfung der richtungsabhängigen Widerstands- und Kapazitätswerte wird empirisch untersucht, was die Identifizierung von geeigneten Elektrodenstrukturen ermöglicht. Dabei werden die folgenden Forschungsfragen adressiert:

5. Wie muss die Elektrode gestaltet sein, um signifikante Unterschiede in den Sensorsignalen hervorzurufen?
6. Lassen sich Gelenkbewegungen ganzheitlich mit Hilfe eines einzelnen anisotropen Sensorelements charakterisieren?

Das systematische Vorgehen der vorliegenden Arbeit wird in Bild 24 schematisch dargestellt. Darin werden die aufgeführten Forschungsfragen den jeweiligen Abschnitten der Dissertationsschrift zugeordnet.



Bild 24: Aufbau der vorliegenden Dissertationsschrift mit farblicher Zuordnung der Abschnitte zu den jeweiligen Forschungsfragen

3 Quantifizierung des Aerosol-Jet-Druckprozesses für die Herstellung funktionalisierter Elektroden

Zur Materialisierung der anisotropen dielektrischen Elastomere (DE) dient der Aerosol-Jet-Druck (AJP), der die beschriebenen konstruktiven und prozessseitigen Anpassungen ermöglicht. Um die Auswirkung der unterschiedlichen Parameter auf die Systemeigenschaften in der Praxis untersuchen zu können, werden zunächst die Prozessabhängigkeiten analysiert. Dabei erfolgt die Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften in Kapitel 3.1 im Ruhezustand und in Kapitel 3.2 unter mechanischer Last. Die Daten dienen als Grundlage für die anschließende simulative Betrachtung der Konfigurationen anisotroper DE.

3.1 Prozesscharakterisierung der selektiven additiven Fertigung

Um eine statistische Modellbetrachtung des AJP-Prozesses vorzunehmen, müssen experimentelle Daten erhoben werden. Diese stellen im vorliegenden Fall die Druckparameter dar, welche die Qualitätszielgrößen der DE beeinflussen. Zunächst erfolgt die Ermittlung der Haupteinflussgrößen. Anschließend wird der Parameterraum dieser analysiert und die Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren untersucht. Zur Quantifizierung der Effekte wird die Auswirkung der Fertigungsparameter auf das Systemverhalten der DE abgeleitet. Die Beschreibung erfolgt mittels statistischer Prozessbetrachtung über Regressionsanalysen. Die Erkenntnisse werden im Anschluss für die systematischen Variationen der Elektrodeneigenschaften der DE verwendet.

3.1.1 Analyse der signifikanten Haupteffekte

Um eine Anisotropie in den DE, wie in Bild 23 gezeigt, zu erzeugen, ist die Anpassung der inhärenten Schubspannungen und der Partikelverteilung der Elektroden notwendig. Diese hängen wiederum von der elektrischen Leitfähigkeit σ , der Ladungsspeicherung Q und dem Dehnverhalten in Abhängigkeit der Dehnung λ ab, welche durch eine Vielzahl an prozessseitigen Einflussfaktoren beeinflusst werden können. In Bild 25 sind die Prozessgrößen in einem Black-Box-Diagramm grafisch dargestellt. Darin

werden die links aufgeführten Einflussfaktoren durch die Störgrößen von oben innerhalb des Prozesses gestreut und führen zu den der Streuung unterliegenden Systemeigenschaften auf der rechten Seite. Die in Bild 25 dargestellten Einflussfaktoren werden für die Analyse der Haupteffekte um die Auslegung der Bahnrichtung reduziert. Dies kann damit begründet werden, dass die Richtung der Druckstruktur keinen Einfluss auf den statischen elektrischen Widerstand besitzt und erst unter mechanischer Dehnung in Erscheinung tritt. [P3] Die genutzten Materialien, die in Kapitel 2.4.3 beschrieben sind, werden aus den Studien in [S4] übernommen und konstant gehalten.

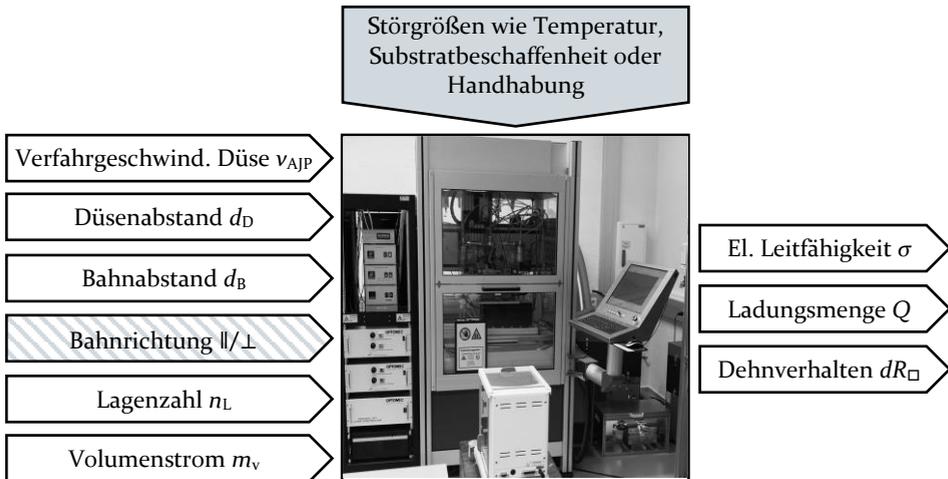


Bild 25: Black-Box-Diagramm des betrachteten Aerosol-Jet-Druckprozesses. Von links fließen die einstellbaren Prozessparameter als Einflussfaktoren in den Prozess ein, die von den von oben einfließenden Störgrößen gestreut werden. Die Zielgrößen rechts sind das Resultat dieser Wechselwirkung. Nicht beeinflussbare Größen sind grau, konstant gehaltene Größen schraffiert

Für die verbleibenden fünf Faktoren werden jeweils drei Faktorstufen untersucht. Der Bereich der Datenerhebung beschränkt sich dabei auf Parameterkombinationen, die reproduzierbaren Materialauftrag und Prozessstabilität ermöglichen. Da der elektrische Widerstand der Elektroden eine zentrale Eigenschaft der DE darstellt und basierend auf der Perkolationstheorie ein Maß für die Ladungsspeicherung des Systems beschreibt, wird jeder Parameter auf diesen abgebildet. Die Haupteffekte sind vergleichend in Bild 26 dargestellt.

Um den elektrischen Widerstand möglichst störungsfrei messen zu können, wird eine vier-Punkt-Messung eingesetzt, wodurch sich der Einfluss von Kontaktwiderständen minimieren lässt. Dabei wird über die äußeren

der vier parallel angeordneten Messpins Strom durch die Elektrode geleitet. An den inneren beiden Pins kann dann eine Spannung abgegriffen werden. Mit diesem Verfahren wird der Flächenwiderstand R_{\square} der Probe gemessen, der aufgrund der dünnen Schichtdicke der Elektrode mit dem Elektrodenwiderstand gleichgesetzt werden kann. [123]

Die ausgewerteten Graphen zeigen, dass der Düsenabstand d_B und der Volumenstrom m_v des erzeugten Aerosols innerhalb des betrachteten Prozessfensters keinen signifikanten Einfluss auf den elektrischen Widerstand besitzen. Die Parameter eignen sich dadurch nicht für die Einstellung der Systemeigenschaften und werden während der weiteren Versuche konstant gehalten. Aus Untersuchungen in [S4] lassen sich für den Abstand zwischen Düse und Substrat $5,00 \times 10^3 \mu\text{m}$ und eine Differenz von $400,00 \text{ sccm}$ für Atomizer- und Exhaustgas ableiten. Zudem zeigen die Haupteffektprogramme in Bild 26 eine Variation $< 10,00 \%$ des elektrischen Widerstands durch die Verfahrensgeschwindigkeit der Düse v_{AJP} . Diese ist gegenüber den Abhängigkeiten von Bahnabstand und Lagenzahl vernachlässigbar und wird im Rahmen der Versuche ebenfalls konstant gehalten. Für die Elektroden wird in [P5] eine ideale Verfahrensgeschwindigkeit der Düse von $15,00 \times 10^3 \text{ mm/s}$ ermittelt, die gleichermaßen für den Druck von Silikon und Graphen einsetzbar ist.

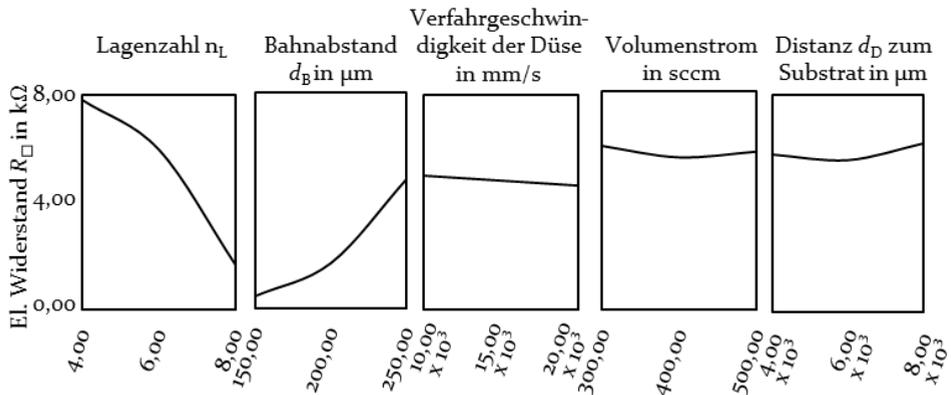


Bild 26: Haupteffektprogramme der maßgeblichen Einflussfaktoren des Prozesses und deren Auswirkung auf die elektrische Leitfähigkeit als Basis für die Herstellung anisotroper Systemeigenschaften von DE ($n = 36$; sofern nicht anders angegeben $n_L = 4$, $d_B = 200 \mu\text{m}$)

Anhand von Bild 26 lassen sich die Haupteffekte auf zwei wesentliche Einflussfaktoren reduzieren. Der elektrische Widerstand hängt demnach maßgeblich von der Anzahl der aufgetragenen Lagen n_L und dem Bahnabstand d_B der Linien ab. Der Zusammenhang lässt sich durch die

Besetzungsdichte und das daraus resultierende Perkolationscluster erklären. Dieses wird mit stärkerer Überlappung oder mehrmaligem Auftragen dichter. Dabei zeigt sich für den Effekt der Lagenzahl eine stärkere Ausprägung als für den Bahnabstand, da jede weitere Lage eine gaussförmige Partikelbahn zu der vorherigen addiert. Dem gegenüber wird durch den verkleinerten Bahnabstand nur die Überlappung zweier Bahnen im Randbereich vergrößert (vgl. Bild 20).

Resultierend daraus sind für die Nutzung als Aktoren zwei signifikante Einflussfaktoren, der Bahnabstand d_B und die Lagenzahl n_L definierbar. Für die statistische Analyse werden diese jeweils auf drei Faktorstufen untersucht. Da bei der Nutzung der DE als Sensoren zusätzlich eine lastbedingte Widerstandsänderung in Abhängigkeit der Druckstrategie hervorgerufen wird, wird die weiterführende Untersuchung in Kapitel 3.2 um den kategorialen Einflussfaktor der Druckrichtung erweitert.

3.1.2 Wechselwirkungen der elektrischen Eigenschaften gedruckter Elektroden

Aus Kapitel 2.2.2 geht hervor, dass die elektrischen Systemparameter auf dem mit Partikeln bedeckten Anteil der Elektrode beruhen. Dafür werden die Einflussfaktoren Bahnabstand d_B und Lagenzahl n_L auf die Besetzungsdichte p des Perkolationsclusters abgebildet. Diese gibt die tatsächlich von Partikeln bedeckte Oberfläche an und wird im Konturdiagramm in Bild 27 links dargestellt. Die betrachteten Parameter zeigen darin ein annähernd invers proportionales Verhalten. Demnach steigt die Besetzungsdichte mit der Lagenzahl und geringer werdendem Bahnabstand an. Dies kann durch den höheren Materialauftrag bei mehrfachem Auftragen oder stärkerer Überlappung erklärt werden. Analog hat eine gesteigerte Besetzungsdichte einen positiven Einfluss auf den elektrischen Widerstand, der mit zunehmender Dichte der Partikel geringer wird. Durch die höhere Abdeckung der Oberfläche wird der Ladungstransport vereinfacht, wodurch die Leitfähigkeit steigt. Der Zusammenhang beider Einflussfaktoren zeigt sich durch die gemeinsamen Kausalitätsergebnisse in Bild 27.

Die in Bild 27 gezeigten Werte für die Elektroden werden direkt auf der Partikeloberfläche gemessen. Jedoch sind diese im DE mit einer Silikonschicht versiegelt, um den typischen Schichtaufbau zu erzielen. Dies schützt die Elektrode gleichzeitig vor Alterung und dem Ablösen der Partikel unter mechanischer Last. Durch die poröse Oberfläche der Partikelschicht gelangt das Silikon in die Zwischenräume und isoliert diese, wodurch es zu einer Erhöhung des messbaren Widerstands kommt. Dabei

korrelieren die Werte vor und nach dem Beschichten linear, woraus sich ein Korrelationskoeffizient von 0,84 ergibt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieses Zusammenhangs liegt bei 97,08 %. Die Werte der beschichteten Elektroden können Bild 28 entnommen werden. Um die realitätsnahe Bestimmung der Systemeigenschaften zu ermöglichen, beziehen sich alle weiteren Messungen auf die in den DE integrierten, beschichteten Elektroden.

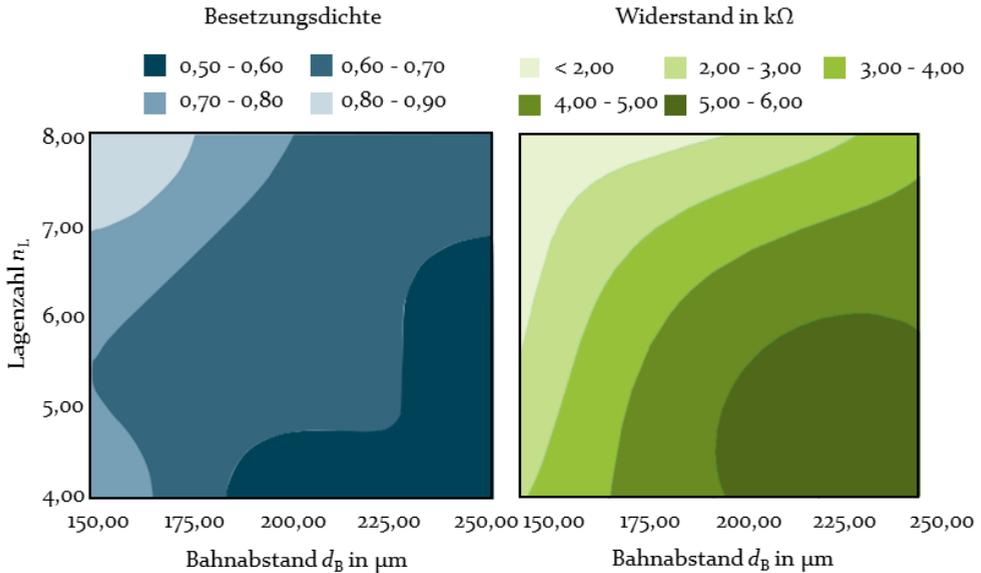


Bild 27: Konturdiagramme der Beziehung zwischen Lagenzahl und Bahnabstand und deren Effekt auf die Bedeckung der Elektrodenfläche (links) und den resultierenden Widerstand (rechts) ($n = 36$)

Die resultierende Reduktion des Widerstands mit steigender Besetzungsdichte wird außerdem mit den Abhängigkeiten der Haupteffekte verknüpft. Den stärksten Einfluss haben dabei eine Reduktion des Bahnabstands von 250,00 μm auf 200,00 μm oder eine Erhöhung von vier auf sechs Lagen bei 250,00 μm Bahnabstand, wie in Bild 28 (rechts) zu sehen. Diese sprunghafte Reduktion des elektrischen Widerstands kann durch den Kurvenverlauf in Bild 28 (links) nach Überschreiten der Perkolationsgrenze erklärt werden. Die Perkolationsgrenze p_C wird empirisch aus den Messdaten ermittelt und markiert den Punkt, ab dem der elektrische Widerstand stark abzunehmen beginnt. Die Kurve flacht anschließend sichtlich ab und der elektrische Widerstand nähert sich einem materialspezifischen Grenzwert.

Dadurch kann von einem perkolierenden System mit großflächigem Cluster ausgegangen werden, welches die Leitfähigkeit zwischen den gegenüberliegenden Kanten der Elektrodenfläche sicherstellt.

Physikalisch betrachtet beruht dieses Verhalten auf unterschiedlicher Partikelverteilung und -orientierung [124, 125]. Durch die bessere Verbindung zwischen den einzelnen Clustern kann ein größerer Anteil der Partikel mit dem Ladungsfluss verbunden werden, was durch den Zusammenhang in Bild 28 veranschaulicht wird. Der isolierende Effekt der Silikonschicht zeigt sich in den erhöhten Widerstandswerten im Vergleich zu Bild 27.

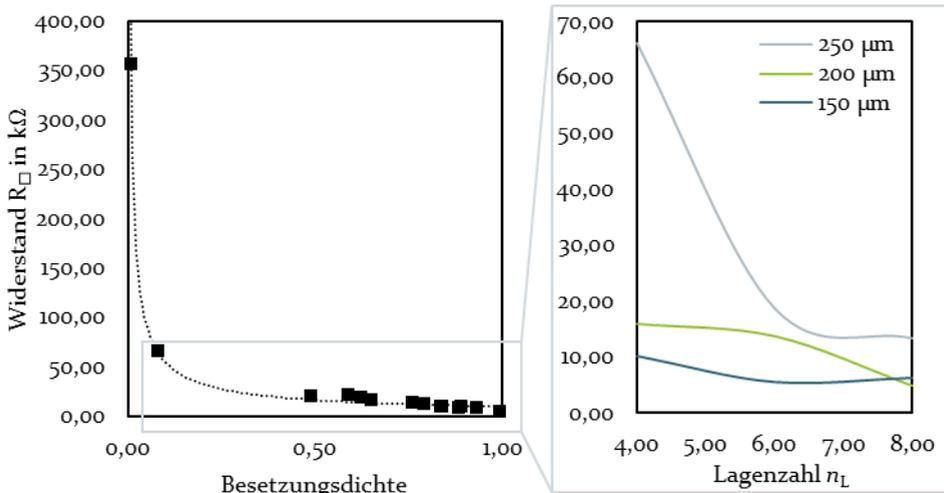


Bild 28: Zusammenhang des elektrischen Flächenwiderstands und der Besetzungsdichte der Partikel beim Überschreiten der Perkolationsgrenze (links). Das Verhalten oberhalb dieser Grenze ist durch das Wechselwirkungsdiagramm der Haupteffekte Lagenzahl und Bahnabstand auf die Zielgröße des elektrischen Widerstands abgebildet. (rechts) Die gepunktete Linie stellt die Näherung der Messpunkte über eine Potenzfunktion dar ($n = 36$)

Mit einem Durchlichtmikroskop (Kern OBE 114) wird die prozentual bedeckte Fläche ermittelt. Anhand der Messdaten kann der kritische Exponent μ für die vorliegenden Perkolationscluster bestimmt werden. Mathematisch ist dieser über Gleichungen (10) definiert. Der experimentell ermittelte Wert aus Bild 29 für μ für $p > p_C$ liegt im Mittel bei $1,37 \pm 0,03$. Die Perkolationsgrenze wird aus Bild 29 bei einer Besetzungsdichte von 0,20 festgesetzt. Die exakte Bestimmung der Parameter stellt jedoch eine Herausforderung dar, da die hierarchische Struktur des Perkolationsgitters aufgrund der unbestimmten Partikelgeometrie nicht bekannt ist. Um das Verhalten der Elektrodengitter näherungsweise zu beschreiben, eignet sich

eine Monte-Carlos-Simulation, die in der vorliegenden Dissertationsschrift zur simulativen Betrachtung anisotroper Partikelcluster eingesetzt wird.

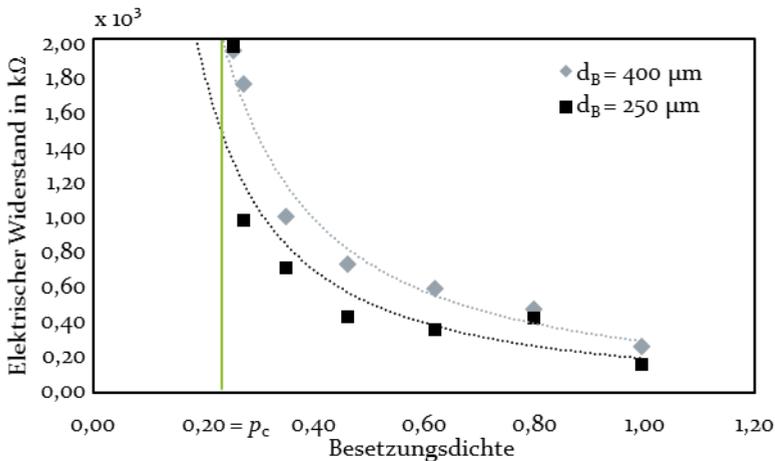


Bild 29: Analytische Untersuchung des Zufalls-Widerstandsnetz des Partikelclusters in Abhängigkeit der Besetzungsdichte mit eingezeichneter Perkolationsgrenze p_c . Die gepunkteten Linien stellen die Approximation über Potenzfunktionen dar. ($n = 18$)

Als weiterer elektrischer Parameter wird die Kapazität betrachtet, die sich nach Gleichung (1) proportional zur Elektrodenfläche verhält. Die weiteren Variablen aus Gleichung (1) sind materialspezifisch oder werden in der vorliegenden Dissertationsschrift konstant gehalten. Mit der optisch gemessenen Besetzungsdichte ergibt sich Bild 30, das einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der realen Elektrodenfläche und der gemessenen Kapazität zeigt. Zusätzlich liegen die gemessenen Werte nahe an den rechnerischen, die als grüne Linie dargestellt sind. Von den Messwerten wird eine konstante Grundkapazität von $0,04 \text{ nF}$ abgezogen, die auf die Eigenschaften des verwendeten Messgeräts (Benning MM11) sowie der Messleitungen zurückzuführen ist. Die gemessenen Werte zeigen lineares Verhalten mit einer Standardabweichung von $0,01 \text{ nF}$ auf. Durch den Zusammenhang mit der Besetzungsdichte lässt sich die Kapazität indirekt auf die Prozessparameter abbilden. Der lineare Anstieg zeigt jedoch eine umgekehrt proportionale Beziehung zum elektrischen Widerstand, die nachfolgend mathematisch beschrieben wird.

Durch eine lineare Regressionsanalyse werden die elektrischen Systemeigenschaften zusätzlich zur physikalischen Darstellung mit Hilfe der erhobenen Daten statistisch beschrieben. Damit können die theoretischen Abhängigkeiten der Messgrößen quantifiziert werden. Die Berechnung der

Regressionsparameter und deren Überprüfung auf Signifikanz erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

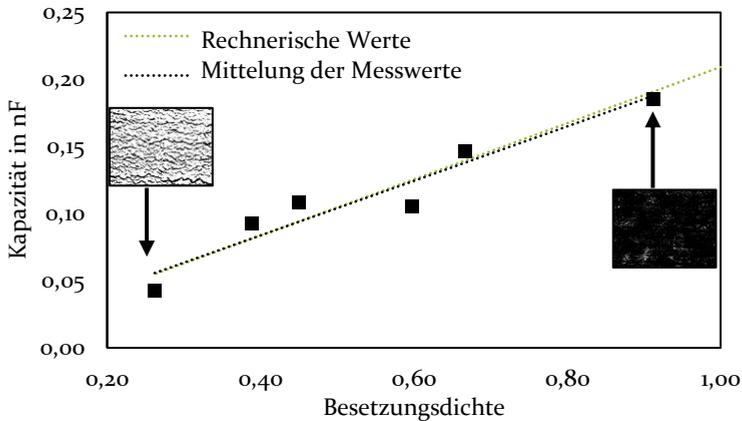


Bild 30: Lineare Abhängigkeit der messbaren Kapazität von der Besetzungsdichte der Elektrode, wobei die grüne Linie die rechnerisch ermittelten Werte darstellt. Für die Extremwerte der Besetzungsdichte sind Bilder der Elektroden unter dem Durchlichtmikroskop gezeigt (n = 6)

3.1.3 Quantifizierung der Effekte mittels linearer Regressionsanalyse der Prozessparameter

Die Regressionsanalyse der Prozessparameter wird auf Basis der erhobenen Daten durchgeführt. Dafür wird zunächst die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von den Prozessparametern beschrieben. Für die Annahme des Modells wird ein übliches Signifikanzniveau von 95,00 % angesetzt. Damit kann durch einen Quartilswert < 0,05 die Signifikanz bestätigt werden. [126] Die untersuchte Hypothese postuliert die Einstellbarkeit der Systemeigenschaften durch die identifizierten Haupteffekte. Die p-Werte der Varianzanalyse liegen für die Eingangsgrößen Lagenzahl und Bahnabstand bei 0,01, respektive 0,00. Daraus ergibt sich für die Regression ein p-Wert von 0,00. Somit ist eine statistisch signifikante Erklärung der Antwortvariablen sowie die Bestätigung der Nullhypothese gegeben. Folglich ergibt sich die lineare Regressionsgleichung zur Darstellung des Elektrodenwiderstands zu:

$$R_{\square} = -6,26 n_L + 0,28 d_B \quad (19)$$

Der R^2 -Wert für das ermittelte Modell liegt bei 60,51 %. Dieser Wert ist durch die Anzahl an ausgewerteten Datenpunkten über den gesamten Leit-

fähigkeitsbereich begründet und für eine erste Betrachtung der Zusammenhänge ausreichend. In Bild 31 wird sichtbar, dass die erhobenen Werte annähernd normalverteilt und dadurch gut mittels eines linearen Zusammenhangs abzubilden sind. Nur ein einzelner Ausreißer mit großem Residuum weicht vom Rest der Messreihe ab. Dieser lässt sich über den hochhohmigen Messwert aus Bild 28 erklären, der unterhalb der Perkolationschwelle p_c bei einer Besetzungsdichte p von rund 0,01 liegt. Das Modell ermöglicht daher eine Abschätzung der Einstellungen der Prozessparameter für $p > p_c$.

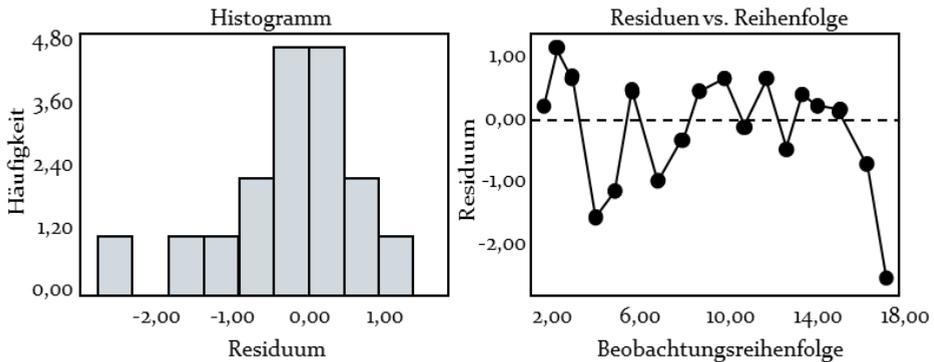


Bild 31: Residuenauswertung der Regressionsanalyse für den prozessabhängigen elektrischen Widerstand ($n = 18$)

Diese Beschreibung findet Anwendung, bis die Elektrode annähernd vollständig ($p > 0,80$) besetzt ist. Durch weiteren Materialauftrag wird der Widerstand nicht signifikant geringer, flacht ab und nähert sich einem spezifischen Grenzwert an. Dieser Zusammenhang wird auch in [61] für den Zusammenhang zwischen elektrischem Flächenwiderstand und Materialauftrag beschrieben.

Für die Kapazität muss keine separate Regressionsanalyse durchgeführt werden, da die Werte eine Korrelation mit dem elektrischen Widerstand zeigen. Dieser Zusammenhang wird mathematisch durch Gleichung (20) dargestellt und ist auf die zur Ladungsspeicherung verfügbare Elektrodenfläche zurückzuführen. Durch eine steigende Besetzungsdichte steht ein größeres Cluster zur Ladungsspeicherung zur Verfügung, was ebenfalls die Leitfähigkeit erhöht. Die stetig sinkende Korrelationsfunktion kann durch einen Pearson-Koeffizienten ρ von -0,99 beschrieben werden. Die negative Steigung der Geraden bestätigt die Annahme der inversen Proportionalität durch die Konturdiagramme in Kapitel 3.1.2 und ist grafisch in Bild 32 dargestellt.

$$C = \rho R_{\square} = -0,99(-6,26 n_L + 0,28 d_B) = 6,197 n_L - 0,277 d_B \quad (20)$$

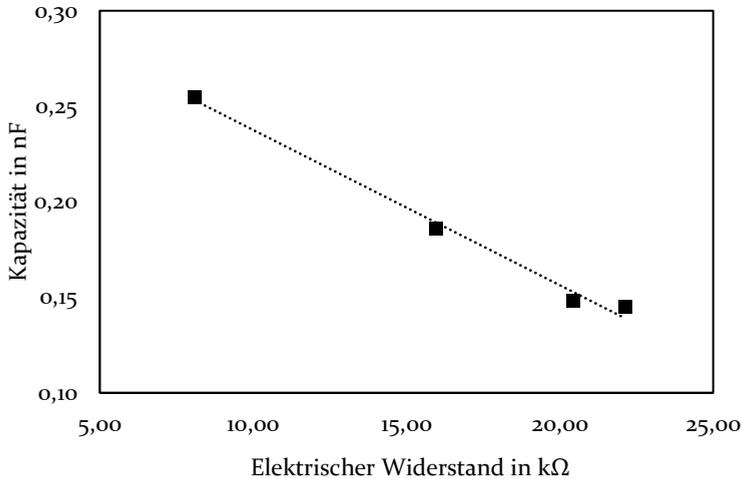


Bild 32: Korrelationsgerade zwischen Kapazität und elektrischem Widerstand mit $\rho = -0,99$ ($n = 6$)

Die statistische Prozessanalyse zeigt die Abhängigkeit der Systemeigenschaften des AJP-Prozesses auf. Durch die Druckstrategie können elektrische Eigenschaften wie Widerstand und Kapazität angepasst und das Systemverhalten gezielt modifiziert werden. Dies bietet Potenziale für die anisotropen Systemmodifikationen und bestätigt die Einstellbarkeit der Eigenschaften der DE mittels AJP. Somit kann die Forschungsfrage nach der Anpassung von DE durch den Herstellungsprozess positiv beantwortet werden. Die Haupteinflussparameter während der statischen Systembetrachtung stellen Lagenzahl und Bahnabstand dar, die eine direkte Kausalitätsbeziehung zur Besetzungsdichte aufweisen. Diese besitzt wiederum Einfluss auf die elektrischen Systemkennwerte Widerstand und Kapazität, deren Werte die Funktionalität von DE beeinflussen.

Die statische Systembetrachtung findet insbesondere im Fall der dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) Anwendung, da es sich um Deformationsamplituden $< 10,00\%$ handelt. Dem gegenüber werden die DE für die Nutzung als Sensor um ein Vielfaches ihrer Ursprungsgeometrie deformiert. Daher folgt im nächsten Kapitel die Betrachtung der Systemeigenschaften unter externer mechanischer Last.

3.2 Prozessseitige Einstellbarkeit additiv gefertigter Elektroden unter mechanischer Last

Da die DE entweder durch das Anlegen einer elektrischen Spannung oder äußere Kräfte deformiert werden, muss die Betrachtung des Elektrodenverhaltens ebenfalls unter mechanischer Last erfolgen. Dabei tritt in [P3] die Beobachtung richtungsabhängigen Verhaltens in Erscheinung. Demnach variiert der Anstieg der elektrischen Signale in Abhängigkeit der Druckrichtung, was durch gekreuzte Druckmuster kompensiert werden kann. Aus diesen Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass eine unidirektionale Druckrichtung unter mechanischer Last einen signifikanten Einfluss auf das Elektrodengefüge hat, weshalb die statistische Prozessbetrachtung um die Variable der Druckrichtung erweitert wird. Im Folgenden werden daher zusätzlich die Haupteffekte auf das Verhalten der Elektroden unter Last betrachtet und deren Wechselwirkungen charakterisiert.

Die Untersuchung der durch den Prozess einstellbaren Haupteffekte Bahnabstand und Lagenzahl in Kapitel 3.1 bildet die Grundlage für die Auslegung der anisotropen Systeme. Für die sensorische Nutzung werden diese mit einer uniaxialen Zugkraft beaufschlagt und die resultierenden Signale des elektrischen Widerstands und der Kapazität erfasst. Zunächst wird die Druckrichtung parallel (\parallel) und senkrecht (\perp) zur applizierten Kraft untersucht und die Abhängigkeit des elektrischen Verhaltens auf die Parameter abgebildet. Anschließend werden die Wechselwirkungen der signifikanten Haupteffekte auf das Systemverhalten aufgezeigt und die Zusammenhänge mathematisch beschrieben.

Für die Aufnahme der Datenpunkte wird der Aufbau aus Bild 33 verwendet und der Spannungsabfall über den Elektrodenwiderstand für unterschiedlich starke Dehnungen ausgewertet. Im Versuchsverlauf werden statische Messphasen für das Einschwingverhalten der elastischen Materialeigenschaften berücksichtigt. Daher können zeitabhängige Effekte der Materialeigenschaften des Silikondielektrikums vernachlässigt werden [45]. Eine einheitliche Vorkraft sorgt für identische Spannungszustände im System und stellt die Vergleichbarkeit der Messwerte her. Die Aufnahme der resistiven Signalanteile erfolgt über ein LCR-Meter, während die Proben mit unterschiedlicher Lagenzahl und Bahnabstand parallel und senkrecht zur Bahnrichtung durch eine uniaxiale Zugbelastung gedehnt werden.

Um die Signale unter Last störungsfrei erfassen und auswerten zu können, darf die Kontaktierung mit den rigiden Messleitungen nicht mechanisch belastet werden. Aufgrund unterschiedlicher Elastizität des elektrischen

Leiters und des elastischen Substrats kann es zu Reibung und folglich zu starken Artefakten kommen. Daher wird die Kontaktstelle während der Tests fixiert, um mechanische Deformationen zu vermeiden. [19, S1] Die Klemmung der DE-Kontaktstellen ist in Bild 33 abgebildet.

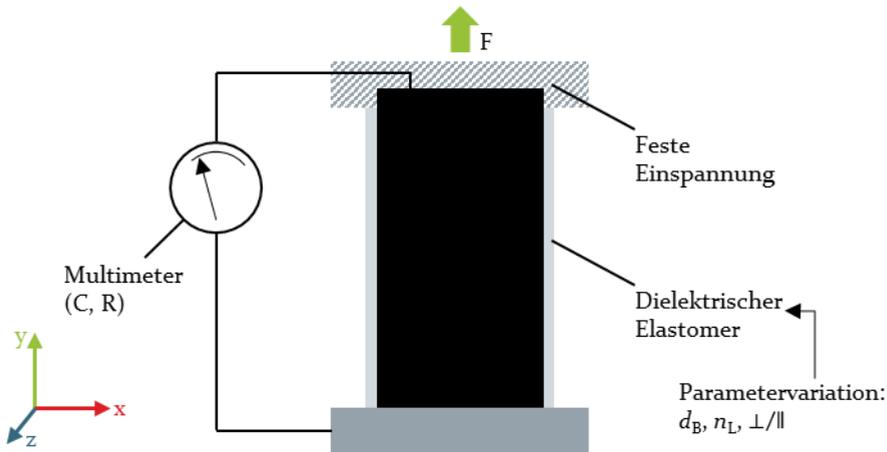


Bild 33: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Charakterisierung elektrischer Eigenschaften unter uniaxialer Zugbeanspruchung

3.2.1 Kausalitäten der prozessabhängigen Haupteffekte auf die Systemeigenschaften unter mechanischer Last

Die Abhängigkeit der Signalhöhe von der Druckrichtung lässt sich durch die Perkolations-theorie herleiten. Die lokal höhere Partikeldichte entlang der Druckbahn führt dazu, dass die Cluster stärker miteinander verbunden sind als in den überlappenden Bereichen zweier Linien. Das Applizieren einer Zuglast führt zum Separieren und zur Isolation einzelner Cluster. Dadurch werden der Ladungstransport und das Speichern von Ladungen beeinträchtigt. Eine senkrecht zu den Druckbahnen verlaufende Kraft führt aufgrund der geringeren Besetzungsdichte in den Zwischenräumen dazu, dass die leitfähigen Pfade stärker auseinandergezogen werden. Deshalb erreicht die Elektrode schneller den Wert der Perkolationsgrenze, was sich in einem steileren Anstieg des elektrischen Widerstands zeigt. Dieser Effekt ist ausgeprägter für eine geringere Besetzungsdichte und demzufolge höhere Eingangswiderstände. Der unbelastete Eingangswiderstand kann, wie in Kapitel 3.1 beschrieben über die Haupteffekte Lagenzahl und Bahnabstand eingestellt werden. Deshalb folgt die Charakterisierung der Zusammenhänge der Parameter Bahnabstand, Lagenzahl und Bahnrichtung mit den elektrischen Systemeigenschaften unter mechanischer Last. Die

statistische Analyse aus Kapitel 3.1 wird dabei um die kategoriale Variable der senkrechten (\perp) oder parallelen (\parallel) Ausrichtung der Druckrichtung zur applizierten Last ergänzt.

Die Wechselwirkungsdiagramme aus Bild 34 spiegeln die Zusammenhänge der lastabhängigen Systemparameter wider. Dafür ist im linken Diagramm die Abhängigkeit des Signalanstiegs vom ursprünglichen Flächenwiderstand gezeigt. Darin wird der steilere Anstieg des elektrischen Widerstands unter Last bei einem höheren initialen Widerstand ersichtlich. Im mittleren Diagramm wird der Effekt der unterschiedlichen Bahnrichtungen aufgezeigt und dem rechten Diagramm zum Einfluss unterschiedlicher Bahnabstände gegenübergestellt. Daraus gehen Richtungs- und Widerstandsabhängigkeit hervor.

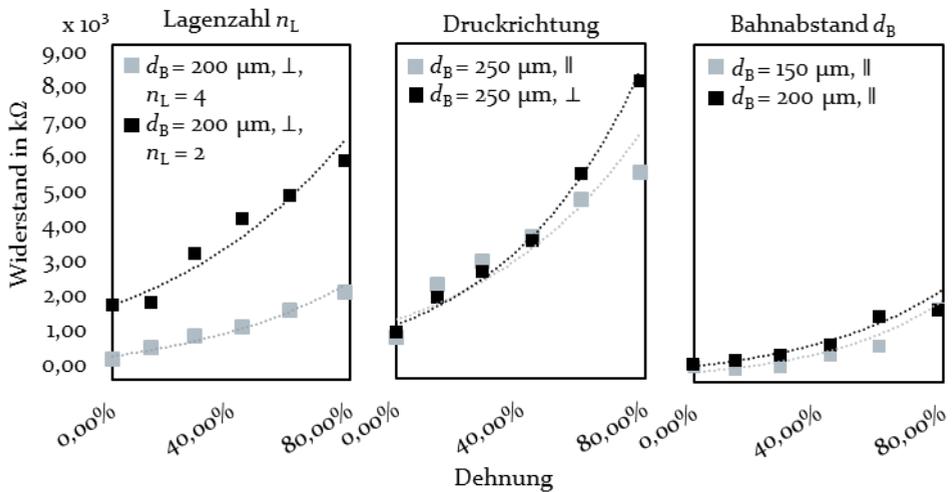


Bild 34: Wechselwirkungsdiagramme der Zusammenhänge von Lagenzahl n_L , Bahnrichtung und Bahnabstand d_B in μm mit dem dehnungsabhängigen Widerstand und der jeweiligen Approximation über Potenzfunktionen ($n = 10$)

Durch die in normaler Richtung zur Bahnstruktur (\perp) applizierte Kraft steigt der Widerstand bei gleichen Ausgangsparametern ab 30,00 % Dehnung steiler an als in paralleler (\parallel) Lastrichtung. Dabei zeigt das mittlere Diagramm, dass der Einfluss der Bahnrichtung auf die Signalhöhe bei größeren Dehnungsamplituden stärker ausgeprägt ist. Geringe Unterschiede der Bahnabstände zeigen kaum einen Einfluss auf die Sensorsignale. Das unterschiedliche Verhalten zweier Proben ist insbesondere auf die Erhöhung des Widerstands zurückzuführen und führt zu einer veränderten Signalhöhe der elektrischen Kennwerte.

Durch die mechanische Last kommt es bei allen betrachteten Parametern zu einem signifikanten Anstieg des Elektrodenwiderstands um bis zu 400,00 %. Die Beschreibung des Elektrodenverhaltens unter Last folgt dabei im Gegensatz zum unbelasteten Zustand keinem linearen Zusammenhang. Dies zeigen die gekrümmten Signalverläufe aus den Diagrammen in Bild 34. Die Nachbildung des Elektrodenverhaltens erfolgt deshalb über Regressionsgleichungen höherer Ordnungen.

Aus der Betrachtung der Haupteffekte wird zudem ersichtlich, dass die einzelnen Signalanteile und Amplituden nicht eindeutig sind und isoliert betrachtet keine Zuordnung zur applizierten Last ermöglichen. Da die resistiven Signalanteile außerdem nach [42] Schwankungen unterliegen, können zusätzlich die kapazitiven Eigenschaften erfasst werden. Dabei wird ebenfalls untersucht, ob sich die Bahnstruktur in den kapazitiven Messsignalen widerspiegelt.

3.2.2 Wechselwirkung druckstrategieabhängiger Systemeigenschaften unter Last

Die kapazitiven Eigenschaften zweier kongruent gedruckter Elektroden ermöglichen die Detektion des Betrags der applizierten Last. Dafür werden die Proben bei unterschiedlichen mechanischen Dehnungen vermessen und die Einflüsse der Prozessparameter analog zu den vorherigen Versuchen mit dem Aufbau aus Bild 33 evaluiert. Die Proben sind auf einem 100,00 µm dicken Dielektrikum (Elastosil® Film 2030, Wacker) gefertigt, das von beiden Seiten bedruckt wird. Die Haupteffekte werden in Bild 35 dargestellt.

Die Diagramme in Bild 35 zeigen die Abhängigkeiten der messbaren Kapazität von elektrischem Widerstand, Bahnrichtung und Dehnung. Dabei wird der Zusammenhang des steigenden Widerstands bei größeren Dehnungen mit einer sinkenden Kapazität ersichtlich. Dieser Zusammenhang kann auf das elektrische Ersatzschaltbild und die Berechnung der Impedanz aus Gleichung (7) zurückgeführt werden. Zudem zeigen sich geringfügig höhere Kapazitäten für parallel zur Richtung des Stromflusses gedruckte Elektroden. Dieses Verhalten ist statistisch jedoch nicht signifikant, sodass es nicht für eine Auswertung der Art oder Richtung der wirkenden Kraft genutzt werden kann. Außerdem wird auch für den Lastfall eine Abhängigkeit der Kapazität vom Flächenwiderstand ersichtlich. Dabei weicht das Verhalten der Kapazität analog zum Widerstandsverhalten unter Last vom linearen Zusammenhang ab.

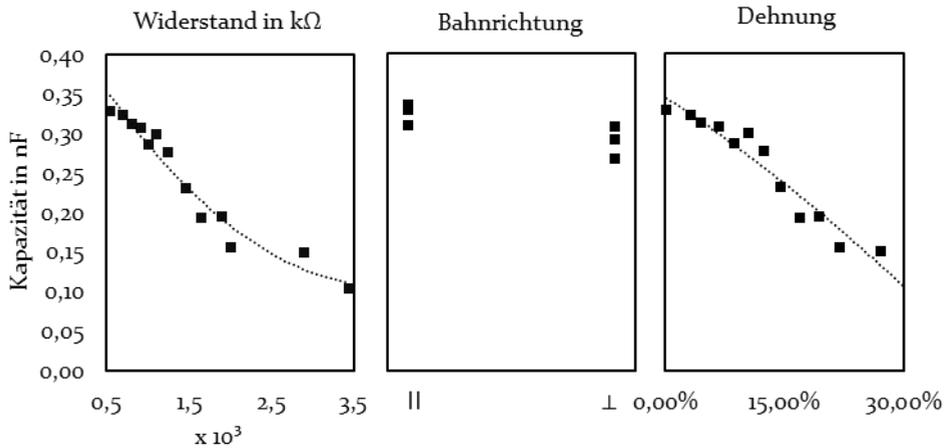


Bild 35: Haupteffekte des Widerstands und der Bahnrichtung im Ruhezustand sowie der Dehnung auf die Kapazität inklusive der Annäherung über die jeweiligen Potenzfunktionen ($n = 12$)

Aus den Verläufen der gemessenen Kurven in Bild 35 lässt sich die Abhängigkeit der Kapazität vom uniaxialen Zug ablesen. Dabei fällt auf, dass diese nicht dem idealen Zusammenhang folgt, nach dem die Kapazität proportional zur Elektrodenfläche ansteigt, analog zur theoretischen Berechnung der Kapazität aus Gleichung (1). Der stetig fallende Verlauf resultiert aus der Vielzahl an Partikelclustern, die durch die Separierung isoliert werden. Dadurch sinkt die zur Ladungsspeicherung nutzbare Elektrodenfläche und analog dazu die Kapazität.

Um den Effekt zu überprüfen, wird eine Elektrode auf Grafitfettbasis evaluiert, welche aufgrund des Trägermediums, das die Partikel umschließt, geringeren Effekten durch das Perkolationscluster unterliegt. Die viskose Phase des Werkstoffes folgt der Deformation unter mechanischer Last und erhält dabei die Verbindung zwischen den leitfähigen Partikeln aufrecht. Dies wird durch den geringeren Anstieg des elektrischen Widerstandes von Grafitfettelektroden unter uniaxialer Belastung in [42] verdeutlicht. Das kapazitive Verhalten der beiden Elektrodenwerkstoffe ist in Bild 36 gegenübergestellt.

Der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Effekt des Perkolationsclusters spiegelt sich auch in der Kapazitätserhöhung wider. Nach Gleichung (1) führt eine Dehnung um 43,10 % rechnerisch zu einer Kapazitätssteigerung von 34,00 %. Bei der Partikelelektrode zieht die Dehnung jedoch eine Abnahme um 41,20 % nach sich. Die Abweichung vom idealen Verhalten ist bedingt durch den nicht linearen Anstieg des elektrischen Widerstands, der durch

die Separierung der Partikelcluster und die daraus folgende Reduktion der Ladungsspeicherung hervorgerufen wird. Die Kapazitätswerte der Grafitfettelektrode steigen bei gleicher uniaxialer Belastung um 19,50 % an. Zwar bleibt ein Großteil der Cluster durch das viskose Trägermedium verbunden, jedoch tritt auch hier der materialabhängige Effekt des ansteigenden elektrischen Widerstands in Erscheinung, der die Kapazitätserhöhung verringert.

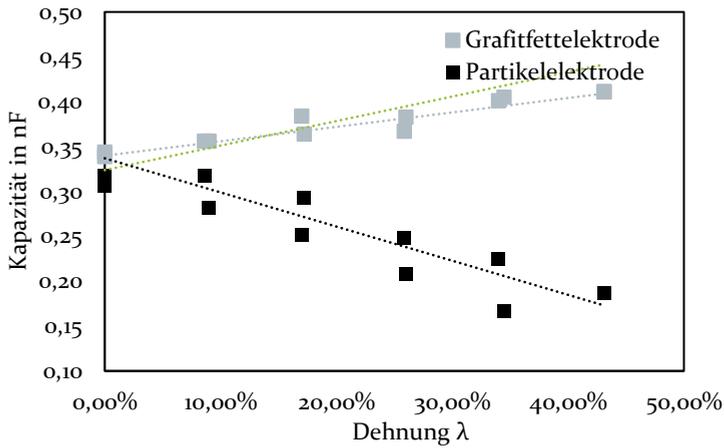


Bild 36: Abhängigkeit der messbaren Kapazität von der mechanischen Dehnung bei Be- und Entlastung für Partikelelektroden und Grafitfettelektroden inklusive Annäherung über lineare Trendlinien im Vergleich zu den theoretischen Werten (grün) ($A_0 = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $d = 100 \text{ }\mu\text{m}$, $n_L = 4$, $d_B = 200 \text{ }\mu\text{m}$, $n = 4$)

Jedoch zeigen die Werte aus Bild 36 eine gute Wiederholgenauigkeit der Systemeigenschaften bei zyklischer Belastung. Die Partikelelektroden weisen dabei maximale Standardabweichung von $\pm 0,03 \text{ nF}$ zwischen einem Be- und Entlastungszyklus auf. Demnach kehren die elektrischen Kennwerte der DE nach jedem Lastzyklus zu ihren ursprünglichen Werten zurück. Dieses Verhalten bestätigt die zyklische Testung des DES aus [61].

Es zeigt sich, dass unterhalb der Perkolationsgrenze keine Kapazität mehr gemessen werden kann. Deshalb entsprechen die untersuchten Dehnungsamplituden nicht den maximalen Streckgrenzen der DES, die bis zu 300,00 % Dehnung aufnehmen können [127]. Bei Elektroden, die unterhalb einer Besetzungsdichte von 0,50 liegen, wird dieser Wert bei rund 30,00 % Dehnung erreicht. Um die Abhängigkeiten der elektrischen Kennwerte von der Besetzungsdichte mathematisch zu beschreiben, wird mit den erhobenen Daten eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die sich ergebenden Wechselwirkungen und Parameterkombinationen werden anschließend für die Konzeptionierung der anisotropen DES eingesetzt.

3.2.3 Statistische Modellbildung zur Quantifizierung additiv gefertigter Elektroden unter Last

Über eine multiple Regression können die Zusammenhänge der Einflussparameter auf die elektrischen Systemeigenschaften abgebildet werden. Dabei fließt der kategoriale Faktor der Bahnrichtung als binäre Größe ein. Die auf das System wirkende Dehnung ist der stetige Eingangsparameter, der das Systemverhalten am stärksten beeinflusst. Die Auswirkung von Bahnabstand und Lagenzahl werden über die resultierende Änderung des Eingangswiderstands, der die Besetzungsdichte widerspiegelt, zusammengefasst. Dadurch reduziert sich die Zahl der Eingangsparameter des Modells auf drei. Um die Wechselwirkung zu charakterisieren, sind mehrere statische Lastpunkte definiert, an denen die resistiven Signalanteile als Ausgangsgröße erfasst werden. Die Erhebung der Datenpunkte folgt einem erweiterten fraktionellen Versuchsplan, um die Effekte der Zentral- und der Randpunkte zu betrachten.

Im Gegensatz zu den Einflüssen der Prozessparameter auf das unbelastete Systemverhalten kann der Zusammenhang im Lastfall nicht mehr über eine lineare Regression dargestellt werden. Die Verteilungen der Datenpunkte in Bild 35 zeigen einen nicht linearen Zusammenhang der Haupteffekte. Deshalb wird das Systemverhalten unter Last über eine Potenzfunktion angenähert, die auf dem Perkolationstheorem beruht. Da die Steigung des elektrischen Widerstands von der Bahnrichtung abhängt, lässt sich die Betrachtung in richtungsabhängige Funktionen aufteilen. Die entsprechenden Graphen der nicht linearen Regressionsfunktionen für die beiden Druckmuster sind in Bild 37 zu sehen. Darin wird die Vorhersagbarkeit der Datenpunkte durch die mathematische Funktion gezeigt. Die Steigungen der Graphen, die in Bild 37 durch gepunktete Linien dargestellt sind, weisen die eindeutige Richtungsabhängigkeit der Cluster nach.

In den Messungen erweisen sich die Effekte des Eingangswiderstands, der von der Lagenzahl n_L und dem Bahnabstand d_B abhängt, als stärker ausgeprägt als die der Bahnrichtung. Erst ab einem Bahnabstand von 250,00 μm wird ein Signifikanzniveau von 95,00 % der Richtungsabhängigkeit für Dehnungen < 60,00 % überstiegen. Bei niedrigeren Abständen sorgt die starke Überlappung der Bahnen für eine homogene Bedeckung, wodurch keine signifikanten Unterschiede der richtungsabhängigen Signale auftreten. Dieses Verhalten kann anhand der Haupteffekte aus Bild 34 abgelesen werden.

3 Quantifizierung des Aerosol-Jet-Druckprozesses für die Herstellung funktionalisierter Elektroden

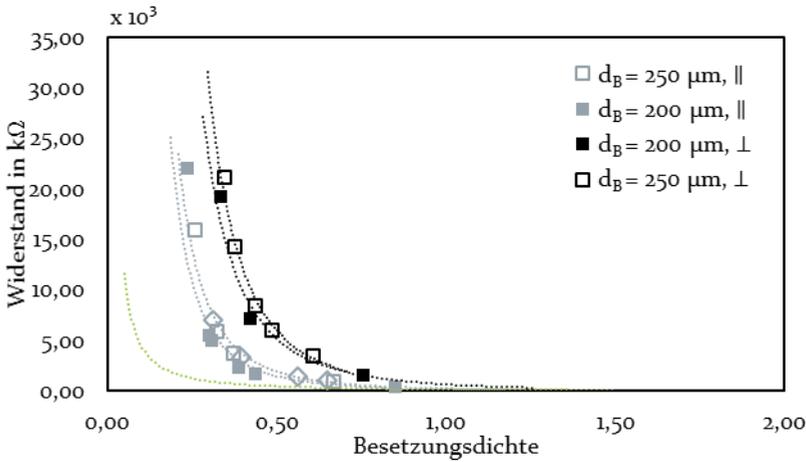


Bild 37: Nicht lineare Regressionsanalyse für das Widerstandsverhalten unter Zuglasten parallel und senkrecht zur Druckrichtung gegenüber der statischen Besetzungsdichte (grün) angenähert durch die jeweiligen Potenzfunktionen ($n = 16$)

Die mathematische Beschreibung resultiert aus dem Zusammenhang zwischen dem Perkolationsverhalten und den hyperelastischen Materialeigenschaften aus Gleichung (16). Durch das inkompressible Materialverhalten kann eine dynamische Besetzungsdichte $p(\lambda)$ berechnet werden, die auf der Annahme beruht, dass die Fläche der Partikel aufgrund der Materialsteifigkeit konstant bleibt. Eingesetzt in das Perkolationstheorem aus Gleichung (10) ergeben sich die generalisierten Zusammenhänge in Gleichung (21) und (22) für $p > p_{c,\lambda}$ für $\lambda < 120,00\%$. Die kritischen Exponenten unterschieden sich je nach Druckrichtung und liefern für parallel orientierte Elektroden einen Wert von $\mu_{\parallel} = 2,86 \pm 0,01$ sowie $\mu_{\perp} = 3,04 \pm 0,13$ für senkrechte Strukturen. Die Regressionsgleichungen bilden den Zusammenhang der Dehnung und dem resultierenden Widerstand mit einem R^2 von 98,30 %, respektive 93,55 % ab.

$$\frac{1}{R_{\parallel}(\lambda)} \sim \frac{1}{R_0} (p(\lambda) - p_c)^{\mu_{\parallel}} \quad (21)$$

$$\frac{1}{R_{\perp}(\lambda)} \sim \frac{1}{R_0} (p(\lambda) - p_c)^{\mu_{\perp}} \quad (22)$$

Jedoch zeigen die Messwerte verhältnismäßig hohe Standardabweichungen von 0,38 MΩ. Dies ist auf die Beschaffenheit des Perkolationsclusters zurückzuführen, welches in Kapitel 2.2.2 beschrieben ist. Dadurch hängt das Dehnungsverhalten von der Besetzungsdichte im Ruhezustand ab und zeigt nicht lineares Verhalten unter Last. Dieser Zusammenhang ist in Bild 38 (links) zu sehen, in dem die dehnungsabhängige Besetzungsdichte

dargestellt ist. Die von Partikeln besetzte Fläche bleibt aufgrund der fehlenden Elastizität der Partikel identisch, während die Gesamtfläche des Systems zunimmt.

Die inverse Proportionalität des elektrischen Widerstands und der messbaren Kapazität in Abhängigkeit der Besetzungsdichte weicht im Lastfall ab. Daher wird das lastabhängige Verhalten ebenfalls über eine nicht lineare Regression abgebildet und kann nicht wie im unbelasteten Zustand über einen Korrelationskoeffizienten abgebildet werden. Die Haupteffektdiagramme aus Bild 35 zeigen auch für die Kapazität die dominierende Charakteristik des deformierten Perkolationsclusters, welches sich in einer Erhöhung des Widerstands widerspiegelt. Daher wird für die Beschreibung des statistischen Zusammenhangs ebenfalls eine Potenzfunktion angesetzt. Die Veränderung der Kapazität mit steigender uniaxialer Zugbeanspruchung ist in Bild 38 (rechts) zu sehen und kann mathematisch über Gleichung (23) dargestellt werden. Der mathematische Zusammenhang bildet 97,70 % der Werte ab und ist damit für die Beschreibung des Zusammenhangs geeignet. Die Kapazitätsabnahme wird durch den steigenden Elektrodenwiderstand verursacht (vgl. Bild 8), zeigt aber keinen signifikanten Einfluss der Bahnrichtung, so dass eine Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit ausreicht. Diese wird über das Perkolationstheorem hergeleitet, welches die Besetzungsdichte charakterisiert und in Abhängigkeit der vorherrschenden uniaxialen Dehnung λ ein Maß für die zur Ladungsspeicherung verfügbare Fläche ist. Der unbelastete Elektrodenwiderstand R_0 dient als zusätzlicher Faktor und bildet die Besetzungsdichte im Ruhezustand ab. Der kritische Exponent wird empirisch über die Messwerte ermittelt und auf $1,812 \pm 0,00$ festgelegt.

$$C(\lambda) \sim R_0 (p(\lambda) - p_c)^\beta \quad (23)$$

Die erhobenen Zusammenhänge dienen als Grundlage für die optimierte Einstellung anisotroper Systemeigenschaften und zeigen auf, dass durch die Wahl der Fertigungsparameter Signalamplitude und Sensitivität der DES eingestellt werden können. Die erfassten Wechselwirkungen tragen zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage bei, nach der die Herstellungsparameter genutzt werden können, um die DE zu funktionalisieren. Die statistische Auswertung hat gezeigt, dass eine Betrachtung im Lastfall auch unter Zusammenfassung von Lagenzahl und Bahnabstand als Möglichkeit zur Variation des Widerstands geeignet ist. Daraus folgt die

Reduktion auf die Parameter Druckrichtung, Eingangswiderstand und Dehnung. Die Zusammenhänge der Herstellungsparameter werden im Folgenden herangezogen, um das Verhalten der anisotropen Elektroden als Bestandteil des Gesamtsystems einzustellen.

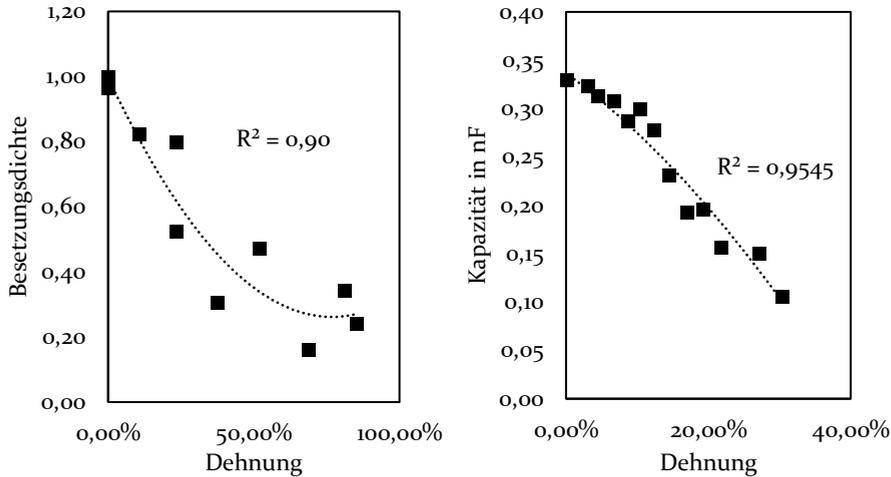


Bild 38: Zusammenhänge der Besetzungsdichte (links) und der Kapazität (rechts) in Abhängigkeit der mechanischen Dehnung inklusive Annäherung der Zusammenhänge über die jeweiligen Potenzfunktionen ($n_L = 4$, $d_B = 250 \mu\text{m}$, $n = 5$)

3.3 Zusammenfassung und Fazit der Prozessuntersuchung

Die vorliegende Forschungsthese zur Herstellung anisotroper DE basiert auf der Einstellbarkeit der Systeme über das Herstellungsverfahren. Daher besteht die erste Forschungsfrage darin, welche Haupteinflussfaktoren für die Anisotropie relevant sind. Die statistische Prozessuntersuchung zeigt, dass die Haupteinflussfaktoren für statische Systeme die Lagenzahl und der Bahnabstand einer Elektrodenschicht sind. Ausschlaggebend ist dabei die resultierende Besetzungsdichte, die mit steigender Lagenzahl zu- und mit steigendem Bahnabstand abnimmt. Die Auswertung der Wechselwirkungen der Prozessparameter mit der Besetzungsdichte ermöglichen das Festlegen der Perkolationsgrenze bei einer Besetzungsdichte von 0,20. Die für die Funktionalität relevanten Systemeigenschaften sind der Widerstand und die Kapazität, die direkt von der Besetzungsdichte abhängen. Dabei ergibt sich für den unbelasteten Fall ein linearer Zusammenhang. Zudem zeigen Kapazität und Widerstand eine negative Korrelation.

Darauf aufbauend werden die Wechselwirkungen untersucht, die insbesondere als Parameter für die Nutzung von dielektrischen Elastomersensoren (DES) Relevanz haben. Hierbei zeigt sich ein komplexer, nicht linearer Zusammenhang zwischen der Besetzungsdichte und den uniaxialen Dehnungszuständen, der sich mit Hilfe des Perkolationstheorems beschreiben lässt. Die resultierenden Potenzfunktionen sind abhängig von den elektrischen Kennwerten des unbelasteten DE und der applizierten uniaxialen Dehnung. Außerdem wird ein anisotropes Verhalten des Perkolationsclusters in Abhängigkeit der Druckrichtung beobachtet. Daraus ergeben sich richtungsabhängige kritische Exponenten für die dynamische Systembeschreibung anhand des Perkolationstheorems. Die mathematischen Zusammenhänge aus Gleichung (21) und (22) erklären die Wechselwirkungen des richtungsabhängigen elektrischen Widerstands sowie das Verhalten der Kapazität unter uniaxialem Zug, die über Gleichung (23) berechnet werden kann. Daher beschreiben diese Gleichung das Systemverhalten unter mechanischer Last und beantworten dadurch die zweite Forschungsfrage.

Durch die Prozessbetrachtung werden die Auswirkungen des angepassten Elektrodengefüges auf die Performanz der DE erfasst. Dabei besitzt die Ladungsspeicherung in Abhängigkeit der Besetzungsdichte Einfluss auf die Funktionalität als Aktoren. Wird die Dichte der Partikel geringer, sinkt auch die Kapazität, die nach Gleichung (3) für den elektrostatischen Druck verantwortlich ist. Für DES ist die Auswirkung des Elektrodengefüges bei Geometrieänderung von entscheidender Bedeutung und führt durch die richtungsabhängige Applikation der Partikel zu unterschiedlichen elektrischen Signalen in Abhängigkeit der Richtung der angreifenden Kraft. Um das Potenzial der herstellungsabhängigen Eigenschaften auszuschöpfen, fließen die erhobenen Zusammenhänge in die nachfolgenden Konzepte der anisotropen DE ein.

4 Anisotrope dielektrische Elastomeraktoren mit segmentierten, homogenen Elektroden

Konventionelle dielektrische Elastomer (DE)-Membranaktoren zeigen isotropes Aktivierungsverhalten, welches in vielen Anwendungen zu einem Leistungsverlust der ungenutzten Deformationsrichtungen führt. Zusätzlich weisen Lösungskonzepte mit passiv gedehnten Elastomeren und/oder Rahmen Limitationen in deren Einsetzbarkeit auf. Daher wird in der vorliegenden Dissertationsschrift die Generierung anisotropen Verhaltens durch gezielte Variation der Elektroden untersucht. Diese anisotropen Grundbausteine sind ebenfalls in die komplexen Aufbauformen wie Helix- oder Spinnenaktoren aus Bild 15 integrierbar und können darin die Anisotropie des Gesamtsystems verstärken.

In diesem Kapitel werden die Wirkprinzipien hergeleitet, die sich über die geometrisch selektiv aufgetragenen Elektroden einstellen lassen. Die Grundlage dafür bilden die quantifizierten Herstellungsparameter des Aerosol-Jet-Drucks (AJP) zur Einstellung der physikalischen Zusammenhänge. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ermöglicht die Untersuchung der mechanischen Spannungszustände in den dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) und damit die simulative Überprüfung der Forschungsfrage nach den geometrischen Zusammenhängen des anisotropen Designparadigmas.

4.1 Herleitung der physikalischen Zusammenhänge anisotroper Aktoren

Die Funktionsweise der DEA beruht auf den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen physikalischen Prinzipien und lässt sich durch Material, Geometrie und elektrische Spannung beeinflussen. Der elektromechanische Druck, welcher die Deformation eines DEA hervorruft, ist von der materialspezifischen Permittivität, der Elektrodenfläche und dem dazwischenliegenden elektrischen Feld (E-Feld) abhängig. Die Permittivität stellt eine Materialkonstante dar und lässt sich nicht über das AJP-Verfahren einstellen [61]. Jedoch lassen sich aus den beiden anderen Variablen zwei Ansätze für anisotrope DEA basierend auf heterogenen Elektroden ableiten.

Die erste Systemmodifizierung betrifft die Ladungsdichte Q auf den Elektroden. Diese ist zwar homogen auf der zusammenhängenden Elektroden-

fläche, kann jedoch indirekt über die unterschiedliche Dichte der applizierten leitfähigen Partikel eingestellt werden, wodurch sich das entstehende E-Feld modifizieren lässt. Die Prozessuntersuchung in Kapitel 3.1.3 zeigt, dass sich die Kapazität proportional zur Besetzungsdichte verhält, die maßgeblich durch Bahnabstand und Lagenzahl beeinflusst werden kann. Daher folgt nach Gleichung (3) folgende Proportionalität für die Ladungsspeicherung:

$$\Downarrow p_{el} = \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 = \frac{Q^2 \downarrow}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A^2} \quad (24)$$

Die Performanz der Aktoren reduziert sich demnach durch die geringere Abdeckung der Elektroden, wodurch sich der weniger stark bedeckte Teil in reduziertem Maße ausdehnt. Durch diese verringerte Ausdehnung von Flächen mit geringeren Besetzungsdichten p kann das Bewegungsverhalten adaptiert werden. Die Funktionsweise ist schematisch in Bild 39 dargestellt. Da das Leistungsspektrum der Aktoren durch die Verringerung der wirkenden Kräfte ebenfalls reduziert wird (vgl. Bild 39), erfolgt jedoch keine nähere Betrachtung dieser Systemanpassung in der vorliegenden Dissertationsschrift. Stattdessen erfolgt die Betrachtung der makroskopischen Elektrodenstrukturierung durch Segmente, die in Kapitel 2.5 in Bild 23 a) gezeigt ist.

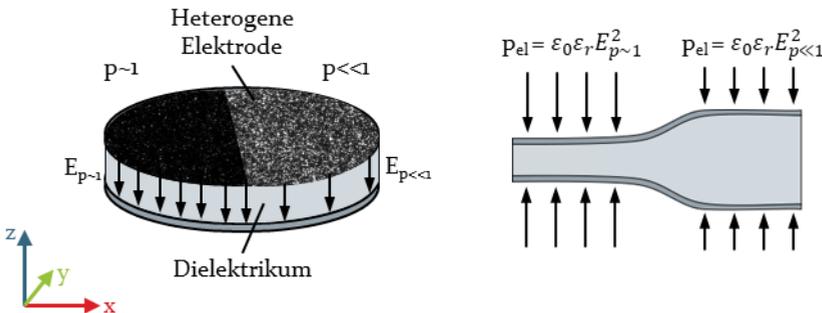


Bild 39: Prozessseitige Anpassungen der heterogenen Partikelabdeckung (links) und des resultierenden elektrostatischen Drucks, der eine lokal unterschiedliche Deformation hervorruft (rechts)

4.1.1 Konzeptionierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren mit segmentierten Elektroden

Die in der vorliegenden Dissertationsschrift betrachtete Modifikation bezieht sich auf die Geometrie der Aktoren, welche über die Form der Elektroden definiert ist. Im Gegenteil zur unterschiedlich starken Besetzung ist

der für die Deformation verantwortliche elektromechanische Druck bei gleichbleibender Elektrodenfläche identisch. Eine geometrische Segmentierung der Elektrodenoberfläche geht daher nicht zwangsläufig mit einem Leistungsverlust einher, sondern steht in Wechselwirkung mit der elektromechanischen Kopplung der Elektrodensegmente.

Um anisotropes Verhalten zu erzeugen, werden mit Hilfe des AJP-Verfahrens, in Anlehnung an die Kopplung mehrerer einzelner Elektroden und der Nutzung von gerichteten Werkstoffen erstmals segmentierte Elektroden betrachtet. Durch die mechanische Kopplung mehrerer zusammenhängender Elemente führen die mechanischen Spannungen im Material zu einer anisotropen Deformation. Dieses Verhalten ist in Bild 40 über die Betrachtung eines segmentierten DEA unterteilt in finite Elemente dargestellt. Es zeigt die Deformation ϵ_{x-z} in allen Raumrichtungen durch mechanische Spannungen in inkompressiblen Materialien.

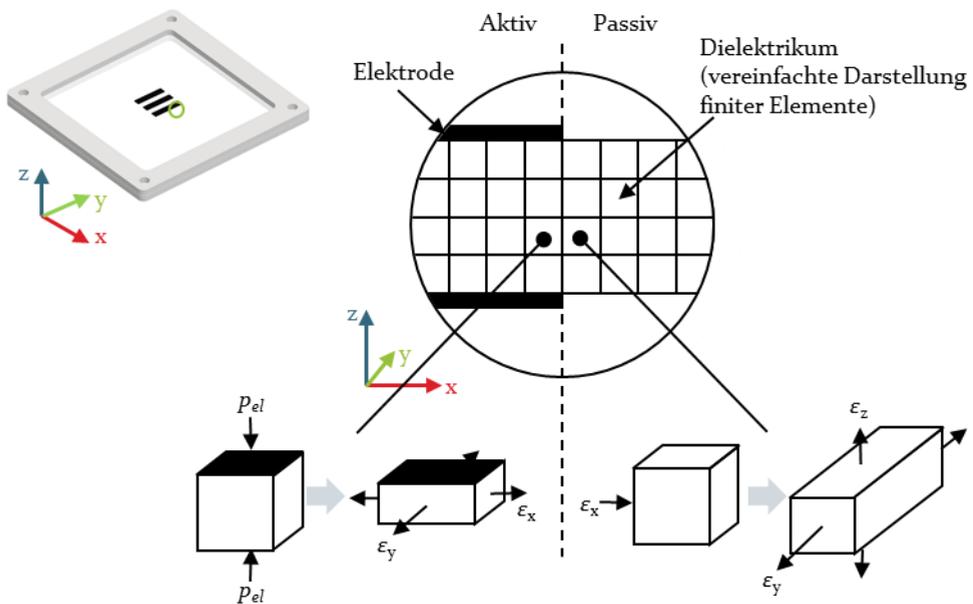


Bild 40: Schematische Darstellung der resultierenden Deformationen ϵ_{x-z} in aktiven und passiven DEA-Segmenten unter Vernachlässigung von Reibung

Aktive Segmente werden durch den elektromechanischen Druck p_{el} in z-Richtung gestaucht und dehnen sich durch die wirkenden Spannungen in x- und y-Richtung aus. Aufgrund der inkompressiblen Materialeigenschaften erfahren die passiven Bereiche Normal- und Schubspannungen, die senkrecht zum wirkenden Druck gerichtet sind. Elemente, die zu den

passiven Bereichen zählen, da sie nicht mit Elektroden bedeckt sind, werden demzufolge nur durch die Effekte der Materialspannungen deformiert. Dies führt zu einem Fortsetzen der Deformation in 90° gedrehter Orientierung, wie es in Bild 40 veranschaulicht ist. Aufgrund der um ein Vielfaches kleineren Dicke des Dielektrikums (z-Richtung) im Vergleich zu den Abmessungen des Systems in y-Richtung folgt für die resultierenden Deformationen der passiven Bereiche: $\varepsilon_y \gg \varepsilon_z$.

Die resultierende Materialverdrängung sorgt dafür, dass die DEA von ihrem isotropen Verhalten abweichen. Daher beruht die Forschungsthese zur Erzeugung anisotropen Verhaltens auf der elektromechanischen Kopplung mehrerer Elektrodensegmente über ein gemeinsames Dielektrikum. Durch die Wechselwirkungen zwischen den Elektrodenflächen weichen anisotrope DEA von der nach Gleichung (4) herrschenden Proportionalität zwischen der Normalspannung σ_z und der Elektrodenfläche A ab. Um diesen Zusammenhang zu beschreiben, muss die Wechselwirkung der Spannungen im Material in Abhängigkeit der Elektrodengeometrie betrachtet werden.

4.1.2 Wirkprinzip der elektromechanischen Kopplung segmentierter dielektrischer Elastomeraktoren

Der mathematische Nachweis der These lässt sich über die isotropen Materialeigenschaften des Elastomers herleiten. Nach [13, 128] folgt die Aufteilung des elektrostatischen Drucks p_{el} zu gleichen Teilen in eine vertikale Druckkomponente p_z und eine horizontale Druckkomponente. Somit erweitert sich Gleichung (3) um folgende Bestandteile:

$$p_z = 0,5 p_{el} = 0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{U^2}{d^2} \quad (25)$$

Durch die Inkompressibilität des Dielektrikums wird die Deformation des Systems nicht durch den quasi hydrostatischen Lastzustand gehemmt [128]. Deshalb resultiert die elektromechanische Kopplung zweier aktiver Segmente in einem ebenen Spannungszustand der zwischenliegenden passiven Zone. Die mechanischen Spannungen verlaufen normal zu den Kanten der Elektrodensegmente, parallel zur Oberfläche des Dielektrikums. Die passiven Bereiche werden in x-Richtung von beiden Seiten gestaucht, wodurch das Material zu gleichen Teilen in y- und z-Richtung verdrängt wird. Die mechanischen Hauptspannungen σ_{x-z} folgen dem Zusammen-

hang aus Gleichung (26) und sind von den inkompressiblen Materialeigenschaften des Elastomers abhängig. Der Zusammenhang ist anhand zweier gekoppelter aktiver Segmente in Bild 41 veranschaulicht.

$$\sigma_{xy} = -0,5 \sigma_z \quad \text{mit} \quad \sigma_{xy} = \sigma_x = \sigma_y \quad (26)$$

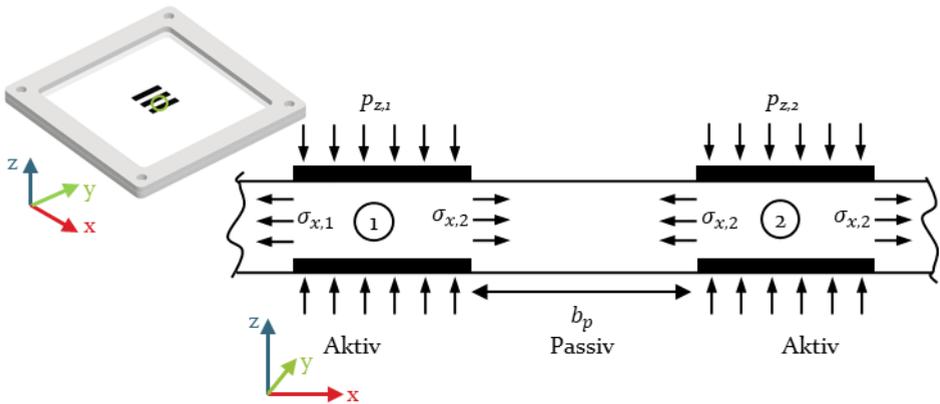


Bild 41: Schematische Darstellung der Druckkomponenten p_z des elektrostatischen Drucks zweier Elektrodensegmente (1) und (2) sowie der wirkenden Hauptspannungen im Material σ_x

Da es sich beim Dielektrikum um eine sehr dünne Membran handelt, kann der vorliegende Fall als ebener Spannungszustand betrachtet werden. Die Deformation in z -Richtung wird aufgrund der geometrischen Gegebenheiten vernachlässigt. Daraus folgt die Darstellung eines finiten Elements im passiven Bereich zwischen zwei Elektrodensegmenten in Bild 42, welches die Draufsicht von Bild 41 zeigt.

Basierend auf dieser Beschreibung folgt die Deformation an frei gelagerten Elektrodenrändern direkt aus Gleichung (25) mit $0,5 p_{el}$. Wohingegen eine passive Zone zwischen zwei Elektrodensegmenten durch die induzierten Spannungen im Material deformiert wird. Durch die Aufteilung in die beiden deformierbaren Raumrichtungen folgt für die Deformation in y -Richtung eine anteilige Wirkung der Normal- und Schubspannungen σ_y und τ_{xy} .

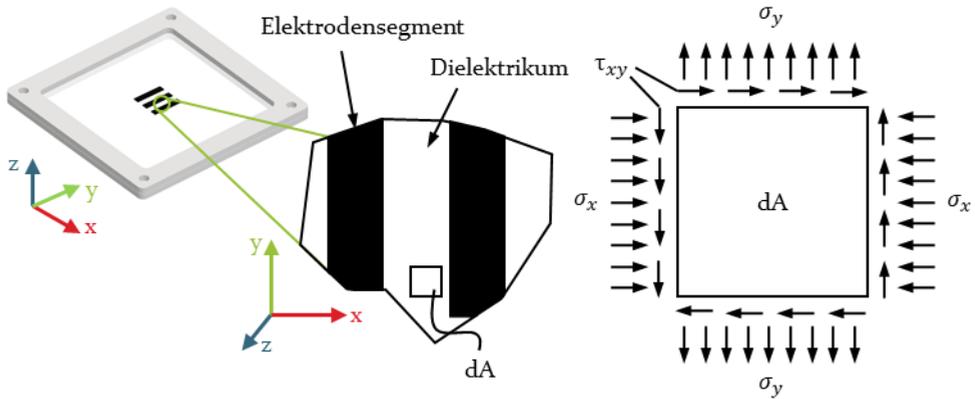


Bild 42: Darstellung des ebenen Spannungszustands im passiven Bereich zwischen zwei Elektrodensegmenten mit den Schubspannungen σ_x und σ_y sowie den Tangentialspannungen τ_{xy}

Die horizontale Stauchung der passiven Zone entlang der x -Achse wird durch die Materialspannung verursacht, welche aus Gleichung (27) hervor geht. Über die Inkompressibilität errechnet sich die anteilig gleiche Verschiebung in die jeweils senkrecht dazu verlaufenden y - und z -Richtungen. Dabei wird in der Betrachtung die z -Komponente aufgrund der dünnen Membrandicke vernachlässigt. Die Volumenverschiebung in y - und z -Richtung sorgt dafür, dass sich die Deformation in y -Richtung aus den Schub- und Tangentialspannungen σ_y und τ_{xy} der aktiven und passiven Zonen ergibt. Die Abhängigkeit der Deformation in y -Richtung von den Abmessungen des DEA ergibt sich dabei aus dem Zusammenhang in Gleichung (28). Die Zusammenhänge aus Gleichung (27) und (28) sind vereinfachend über das Hook'sche Materialmodell für geringe Deformationen hergeleitet. Die aus den Kräften resultierenden Deformationen lassen sich durch Einsetzen der Gleichungen (14) und (15) in die Gleichungen (27) und (28) auf das hyperelastische Materialmodell anpassen, die die Abhängigkeit der Energiedichte von der Systemdeformation und den Spannungszuständen beschreiben.

$$\sigma_x = \frac{p_{el}}{Y} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U^2}{Y d^2} = \frac{Y}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (27)$$

mit $\nu = 0,5$

$$\sigma_{y,ges} = \sigma_y \frac{b_E}{b_P} + \tau_{xy} \left(1 - \frac{b_E}{b_P}\right) \quad (28)$$

Die theoretische Betrachtung beruht auf ideal inkompressiblen Materialeigenschaften und einer reibungsfreien Deformation. Zudem wird von einer

homogenen Verteilung der Materialspannungen ausgegangen, was die Realität nur stark vereinfacht abbildet. Für die Ableitung von Designrichtlinien für reale Anwendungszwecke wird zur Untersuchung der These die Anpassung der Elektrodengeometrie auf mehrere parallelverlaufende Segmente untersucht. Ein System mit zwei Segmenten stellt einen Grenzfall dar, bei dem alle Segmente am Rand des anisotropen DEA-Systems liegen.

Die Umsetzung erfolgt durch das AJP-Verfahren mit dem sich die Geometrie der Elektroden frei einstellen lässt. Dies ermöglicht die Variation der Größe der aktiven und passiven Bereiche. Die Elektrodenanpassung mittels AJP hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Komponenten oder Werkzeuge benötigt werden. Die dünnenschichtigen Partikelelektroden zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der DEA, wodurch die Effekte der elektromechanischen Kopplung isoliert beobachtet werden können. Zudem kann das Verhalten des DEA über die Systemauslegung für den jeweiligen Anwendungsfall eingestellt werden.

Anhand der aufgestellten Zusammenhänge zeigt sich, dass die Materialspannungen stärker vom isotropen Fall abweichen, wenn der Abstand zur nächsten Elektrode b_P größer ist. Wird der Anteil der Bereiche ohne Elektroden jedoch zu groß, leidet die Performanz der Aktoren in allen Wirkrichtungen, die nach Gleichung (1) mit der verringerten Elektrodenfläche zusammenhängt. Aufgrund der Volumenkonstanz kann der elektrostatische Druck ebenfalls basierend auf der Elektrodenfläche berechnet werden. Deshalb stellt die Breite b_E der Elektroden zusätzlich einen Parameter zur Einstellung des elektromechanischen Verhaltens dar. Die Länge l der Elektrodensegmente wird so gewählt, dass sich ein quadratischer Funktionsbereich ergibt und die Länge als konstant angenommen werden kann. Die konstruktiven Anpassungsparameter sind schematisch in Bild 43 dargestellt. Darin wird die Verschiebung der Elektrodensegmente basierend auf den Spannungszuständen mittels FEM betrachtet.

Um ein optimiertes anisotropes Verhalten der DEA zu erzielen, müssen geeignete Konfigurationen der Parameter ausgewählt werden. Dafür wird im Folgenden eine Methodik anhand der numerischen Betrachtung der Systeme aufgezeigt und Designregeln für optimierte anisotrope Elektroden abgeleitet.

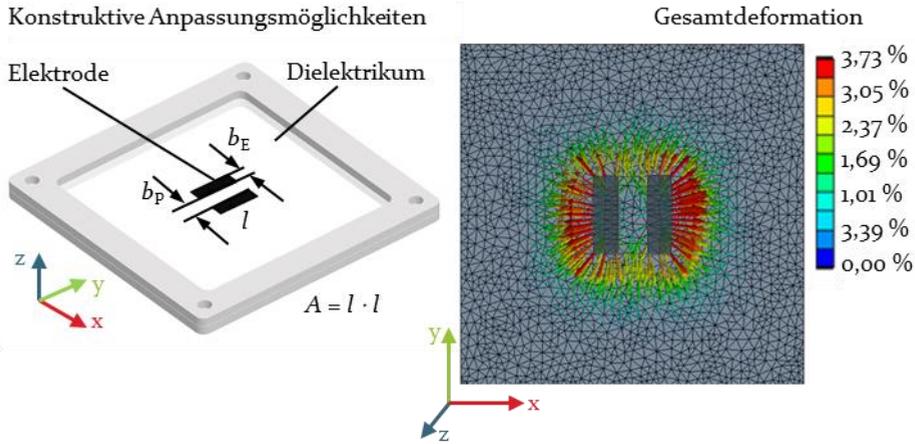


Bild 43: Schematische Darstellung der konstruktiven Anpassungsmöglichkeiten eines quadratischen anisotropen DEA (links) und der resultierenden Deformationsvektoren (rechts)

4.2 Numerische Betrachtung der anisotropen Systemanpassungen

Die Analyse der im vorherigen Kapitel beschriebenen Variationen erfolgt anhand einer Simulation von Parameterkombinationen für die geometrischen Systemanpassungen. Dafür werden die Auswirkungen verschiedener Druckmuster untersucht und die Zusammenhänge mit der anisotropen Deformation mittels FEM-Simulation hergeleitet. Die untersuchten Effekte umfassen die Wechselwirkung von alternierenden, passiven und aktiven Zonen unterschiedlicher Geometrien. Die Kombination passiver und aktiver Systemanteile stellt eine neuartige Möglichkeit zur Einstellung der Vorzugsrichtung von Membranaktoren dar.

Im Folgenden werden die methodischen Anpassungen der DEA simulationsbasiert ausgelegt und anhand der Ergebnisse evaluiert. Anschließend folgt der Transfer der Erkenntnisse in Gestaltungsrichtlinien für ein optimiertes Verhalten der DEA in Kapitel 4.3 und die praktische Validierung in Kapitel 5.

4.2.1 Elektromechanisches Modell anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren

Für die Optimierung des anisotropen Aktorverhaltens mittels FEM erfolgt zunächst eine vereinfachende Untersuchung des passiven Bereichs zwischen zwei aktiven Segmenten. Da die Elektroden keinen signifikanten Einfluss auf das mechanische Materialverhalten zeigen, werden diese nicht als separate Festkörper simuliert. Stattdessen wird die lokal wirkende mechanische Kraft als idealer elektrostatischer Druck direkt auf Ober- und Unterseite des Dielektrikums appliziert.

Zur Parametersimulation wird ein geometrisch vereinfachtes 3D-Modell in Anlehnung an Bild 43 genutzt. Der applizierte elektrostatische Druck p_{el} wird anhand der jeweiligen Elektrodenfläche und des verwendeten Materials hergeleitet und berechnet sich über Gleichung (3). Passive Zonen werden als energiefreie Bereiche simuliert, die nur die mechanischen Materialeigenschaften aufweisen [129, 130]. Dabei wird für das Dielektrikum aus Elastosil® P7670 eine Durchschlagsfestigkeit von 30,00 V/ μm angenommen. [131] Die vereinfachten Simulationsparameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Modellannahmen für die vereinfachte Untersuchung der Wechselwirkungen in anisotropen DEA

	Modellannahmen
Lagerung	Feste Einspannung des Elastomers am Außendurchmesser
Material	Hyperelastisch, Mooney-Rivlin mit neun Parametern (vgl. Kapitel 2.2.1)
Last	p_{el} als konstante Flächenlast (nach Gl. (3))
Randbedingungen	Luft und Gravitation vernachlässigt

Simulativ werden verschiedene Parameterkombinationen für unterschiedliche Segmentbreiten analysiert, wobei das Verhältnis A^* für die Beschreibung des Flächenverhältnisses herangezogen wird. A^* besitzt dabei Werte zwischen eins für vollflächige Elektroden und nähert sich dem Wert null für infinitesimal kleine Segmente.

$$A^* = \frac{A_{\text{Elektrode}}}{A} \quad [0 \leq A^* < 1] \quad (29)$$

Die Simulation des Deformationsverhaltens bezieht zwei zu optimierende Zielgrößen ein. Zum einen soll das Anisotropieverhältnis a_{DEA} möglichst groß werden und dabei einen maximalen Wert für die uniaxiale Deformation annehmen. Zum anderen wird die Gesamtdeformation als Maß für die Systemperformanz betrachtet. Die Gesamtdeformation setzt sich aus den Deformationen ε_{x-z} in allen Raumrichtungen zusammen, wobei die Deformation in z-Richtung aufgrund der dünnen Membran vernachlässigt werden kann und vereinfacht ein Maß für die Flächendeformation in x- und y-Richtung darstellt. Diese folgt für herkömmliche vollflächige Elektroden ($A^* = 1,00$) einem linearen Zusammenhang mit der größer werdenden Elektrodenfläche.

Zur Untersuchung der allgemeinen Systemperformanz wird die maximale uniaxiale Deformation der anisotropen Aktorkonfigurationen simuliert. Im Konturdiagramm in Bild 44 zeigt sich ein annähernd proportionaler Zusammenhang zwischen Flächenanteil der Elektrode und der maximalen Deformation. Je geringer der Elektrodenanteil an der Gesamtfläche ist, desto geringer ist die aktive Fläche, was für die absolute Deformation nachteilig ist. Jedoch veranschaulicht Bild 44 auch, dass die maximale Deformation segmentierter Elektroden bereits mit einem Flächenanteil von 0,80 erreicht werden kann.

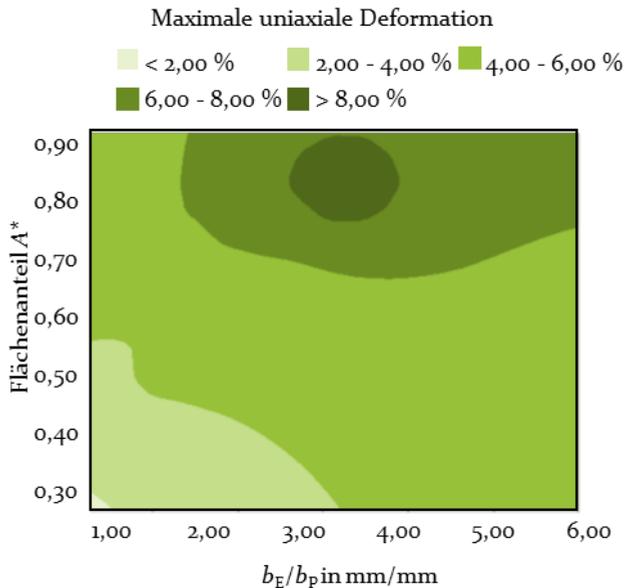


Bild 44: Konturdiagramm der maximalen uniaxialen Deformation in Abhängigkeit des Flächenanteils der Elektrode A^* und des Verhältnisses zwischen der Elektrodenbreite b_E und der Breite der passiven Zonen b_P ($n = 10$) (Messdaten [S7])

Dies zeigt, dass die Deformation durch die elektromechanische Kopplung vom idealen theoretischen Verhalten einer linearen Korrelation abweicht. Durch die auftretenden Schubspannungen zwischen zwei Elektrodensegmenten wird das Material des Dielektrikums entlang der normalen Raumrichtungen verdrängt. Demnach müssen die Faktoren Flächenanteil sowie die Breite der aktiven und passiven Segmente in das Systemdesign einbezogen und für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

4.2.2 Zielgrößenoptimierung für Systeme mit segmentierten Elektroden

Die theoretische Betrachtung anisotroper Aktoren lässt darauf schließen, dass breitere passive Zonen zu größeren Deformationsunterschieden zwischen x- und y-Richtungen führen. Dies ist jedoch nachteilig für die Gesamtdeformation der DEA, die durch diese Anpassungen verringert wird. In einer numerischen Betrachtung wird dieser Effekte und dessen Wechselwirkung in einem vollständigen anisotropen DEA untersucht. Zunächst wird die elektromechanische Kopplung segmentierter Elektroden gezeigt. Anschließend erfolgt eine Zielwertoptimierung im Hinblick auf maximale Deformation und Anisotropie durch die geometrischen Systemgrößen.

Im segmentierten Aufbau kann jeder Streifen als eigenständiger DEA betrachtet werden. Die durch den elektrostatischen Druck hervorgerufenen Schubspannungen im zwischenliegenden Dielektrikum gegenüberliegender Segmente wirken daher entgegengesetzt. Der resultierende anisotrope Materialfluss ist in Bild 45 angedeutet.

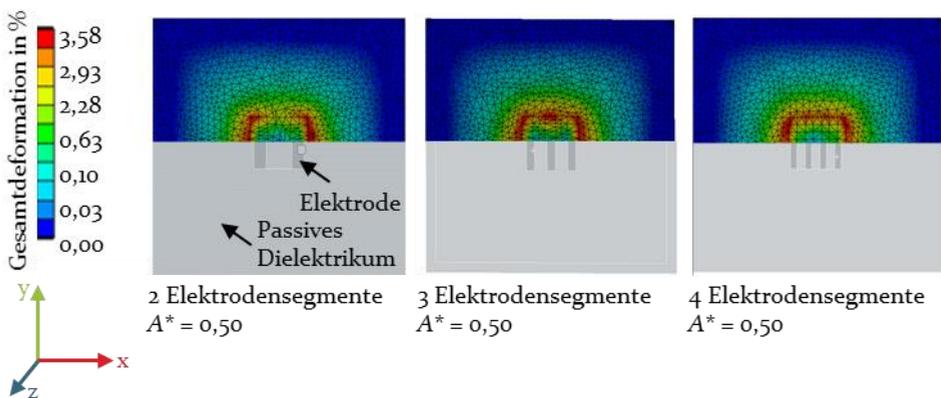


Bild 45: Verformung anisotroper DEA mit einem Flächenanteil der Elektroden von 0,50 und unterschiedlichen Segmentbreiten

Durch die Inkompressibilität des Dielektrikums entstehen Tangentialspannungen in 90° versetzter Wirkrichtung. Die isotrope Ausdehnung jedes Elements führt zu Spannungen im Dielektrikum entlang der segmentierten Elektroden und zu einer vernachlässigbaren Verdickung im Raum zwischen den passiven Bereichen in z-Richtung. Die im Material induzierten Spannungen σ_{x-z} hängen von der Systemgeometrie ab (vgl. Gleichung (27) und (28)).

Aus dem Zusammenhang in Gleichung (27) ergeben sich Abhängigkeiten zwischen Systemgeometrie, Druck und Material, die mittels FEM-Simulation überprüft werden. Die Ausdehnung entlang der y-Richtung, die parallel zu den Segmenten verläuft, hängt maßgeblich vom Abstand der Elektrodensegmente ab. Dieser Zusammenhang kann anhand der Simulationsdaten in Bild 46 nachgewiesen werden. Durch den größeren passiven Bereich reduziert sich der wirkende Druck, wodurch die Materialausdehnung in y-Richtung kleiner wird. Folglich vergrößert sich das Anisotropieverhältnis a_{DEA} .

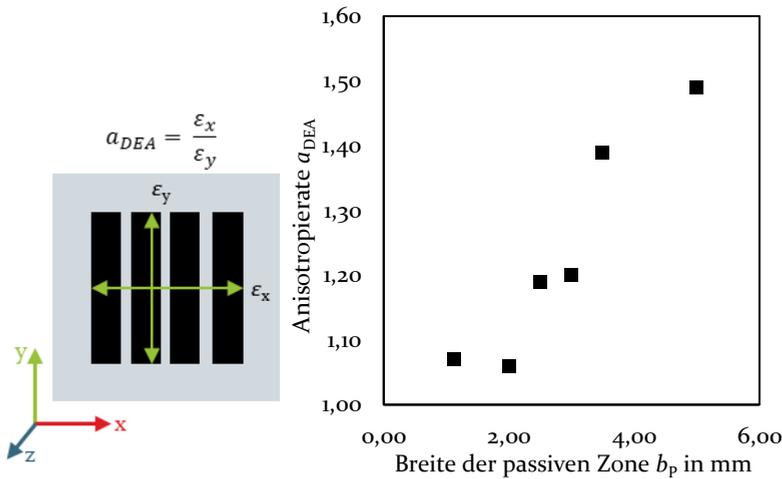


Bild 46: Veranschaulichung der Berechnung der Anisotropierate a_{DEA} (links) für den Vergleich der Simulationsdaten anisotroper DEA-Konfigurationen mit unterschiedlich breiten passiven Zonen b_p (rechts)

Zudem hängt die Anisotropie vom Verhältnis zwischen passiven und aktiven Flächen ab. Da es sich bei der Anordnung zweier Elektrodensegmente um einen Spezialfall handelt, bei dem jedes Elektrodensegment ein Randsegment ist, werden unterschiedliche geometrische Konfigurationen mit drei Elektrodensegmenten in Bild 47 betrachtet. Die simulative Untersuchung verschiedener Aktorstrukturen zeigt dabei, dass signifikante

Werte von $a_{DEA} > 1,10$ nur für den Zusammenhang $\frac{b_E}{b_P} < 1,00$ auftreten. Dadurch wird die Beobachtung aus Bild 46 bestätigt, da die größeren Werte der passiven Bereiche b_P mit einem kleineren Verhältnis $\frac{b_E}{b_P}$ einhergehen. Der Schnittpunkt der gemittelten Kurven zeigt den Fall $\frac{b_E}{b_P} = 1,00$. Die nicht linearen Zusammenhänge können damit begründet werden, dass zu der Proportionalität der Elektrodenfläche die Wechselwirkungen der Schubspannungen im Dielektrikum hinzukommen. Da sowohl die Materialspannungen σ_x und σ_y von den geometrischen Parametern b_P und b_E abhängen, hat die Veränderung einer Größe Auswirkung auf Ausdehnung in x- und y-Richtung.

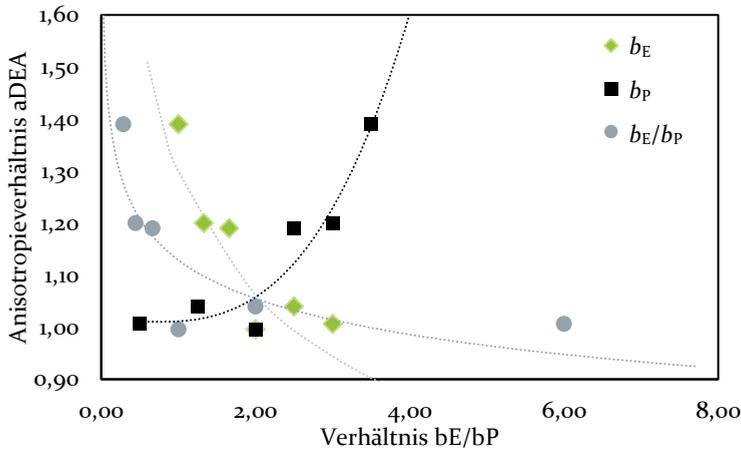


Bild 47: Erreichbare Anisotropieraten in Abhängigkeiten geometrischer Parameter von DEA mit drei Elektrodensegmenten inklusive der Annäherung durch die jeweilige Potenzfunktion ($n = 6$)

Die Performanz der anisotropen DEA wird neben der Anisotropierate durch die maximale Deformation bestimmt. Analog zum Verhalten vollflächiger Elektroden zeigen die Simulationsdaten in Bild 48 einen linearen Zusammenhang zwischen uniaxialer Deformation und dem Anteil der Elektroden an der Gesamtfläche. Die anisotropen Effekte sind anhand der unterschiedlichen Steigungen der Graphen zu erkennen, die für größer werdende passive Bereiche Abweichungen zwischen den Raumrichtungen aufweisen. Die Abhängigkeit von der Elektrodenbreite verhält sich invers proportional. Systemkonfigurationen, in denen $b_P \geq b_E$, zeigen eine signifikante Reduktion der uniaxialen Deformation. Für $b_P < b_E$ steigt die Deformation, wobei mit einem Besetzungsverhältnis von 0,60 bereits 88,41 % der Deformation eines vollflächigen DEA erzielt werden kann. Dieses

Verhalten lässt sich durch die Schubspannungen erklären, die aus der Materialverschiebung in den passiven Bereichen resultieren. Die elektromechanische Kopplung sorgt dafür, dass die Deformation durch die Schubspannungen verstärkt wird.

Aufgrund der gegensätzlichen Effekte der Anisotropie und der Deformation in Abhängigkeit des Flächenanteils der Elektroden muss für anisotrope DEA eine anwendungsspezifische Konfiguration gefunden werden. Diese hängt von den Anforderungen und der Geometrie des Gesamtsystems ab.

Im Folgenden werden die Wechselwirkungen der inversen Eigenschaften für quadratische Aktoren aufgezeigt. Die dritte Forschungsfrage kann durch die gezeigten geometrischen Abhängigkeiten der anisotropen Deformation beantwortet werden. Die Schubspannungen in den passiven Zwischenräumen tragen zu einem einstellbaren anisotropen Verhalten mit einer verstärkten Deformation senkrecht zur Streifenrichtung bei. Diese Vorzugsrichtung ist in den gezeigten Abbildungen entlang der x-Richtung orientiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst. Anhand der theoretischen Zusammenhänge und der simulativen Daten lassen sich Designrichtlinien für die anisotropen DEA aufstellen.

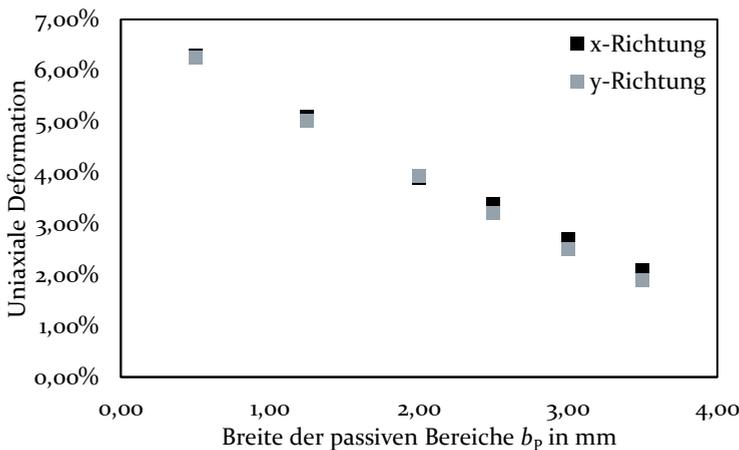


Bild 48: Richtungsabhängige uniaxiale Deformation in Abhängigkeit von der Breite der passiven Bereiche b_p

4.3 Gestaltungsrichtlinien für optimierte anisotrope Aktoren

Aus der Simulation in Kapitel 4.2 geht die Abhängigkeit der Anisotropie von den geometrischen Parametern hervor. Die Deformation folgt nach

Gleichung (1) einem linearen Zusammenhang. Die beiden Eigenschaften Anisotropie und uniaxiale Deformation verhalten sich jedoch nahezu invers zueinander, so dass eine Maximierung des einen Parameters zu einer Reduktion des anderen führt. Der direkte Vergleich der beiden Zielgrößen Anisotropierate und Maximierung der uniaxialen Deformation ist in Bild 49 gezeigt.

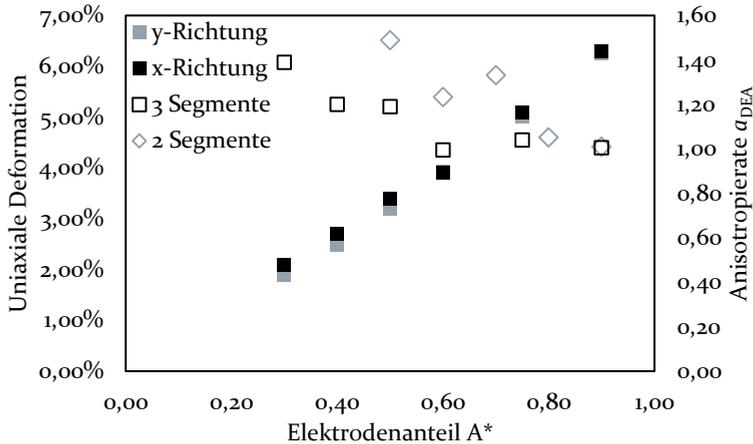


Bild 49: Auswirkung der geometrischen Systemparameter auf die richtungsabhängige uniaxiale Deformation und die Anisotropierate a_{DEA} des DEA

Da für Membranaktoren ohne Modifikation Deformationen $< 10\%$ erwartet werden, wird für die Herleitung des Deformationsverhaltens ein linearer Zusammenhang nach Neo-Hook'schem Materialverhalten herangezogen. Dieser bestätigt sich anhand der Simulationsdaten, die in Bild 49 gezeigt sind. Der Verlauf der Deformation in Bild 49 wird durch die mit steigendem Elektrodenanteil fallende Anisotropierate geschnitten.

Anisotrope DEA mit zwei Segmenten zeigen bereits bei höheren Elektrodenanteilen anisotropes Verhalten. Dabei stellen diese Systemkonfigurationen einen Sonderfall dar, bei dem jedes Segment ein Randsegment ist. Durch die nahezu freie Lagerung des DEA tragen die im Zwischenraum wirkenden Schubspannungen zu einer Verschiebung in entgegengesetzter Richtung bei (vgl. Bild 45). Dem gegenüber zeigen anisotrope DEA mit drei oder mehr Segmenten erst ab Elektrodenanteilen $< 0,60$ signifikante anisotrope Eigenschaften. Die inneren Segmente werden dabei stärker durch die in den passiven Zonen entgegengesetzt wirkenden Schubspannungen deformiert. Dies resultiert in einer Materialverdrängung entlang der senkrecht dazu verlaufenden Richtungen.

Die Abhängigkeit des Anisotropieverhältnisses von den Breiten der aktiven und passiven Segmente ist in Bild 50 gezeigt. Daraus geht hervor, dass die Anisotropie mit größeren Werten von b_P ansteigt und für vollflächige Elektroden gegen null tendiert. Die Abhängigkeit der geometrischen Parameter bestätigt den nicht linearen Zusammenhang der Anisotropierate. Die Inkompressibilität des Dielektrikums ermöglicht die mathematische Abschätzung der Deformationen entlang der x- und y-Richtung. Die z-Richtung wird aufgrund der dünnen Membrandicke vernachlässigt.

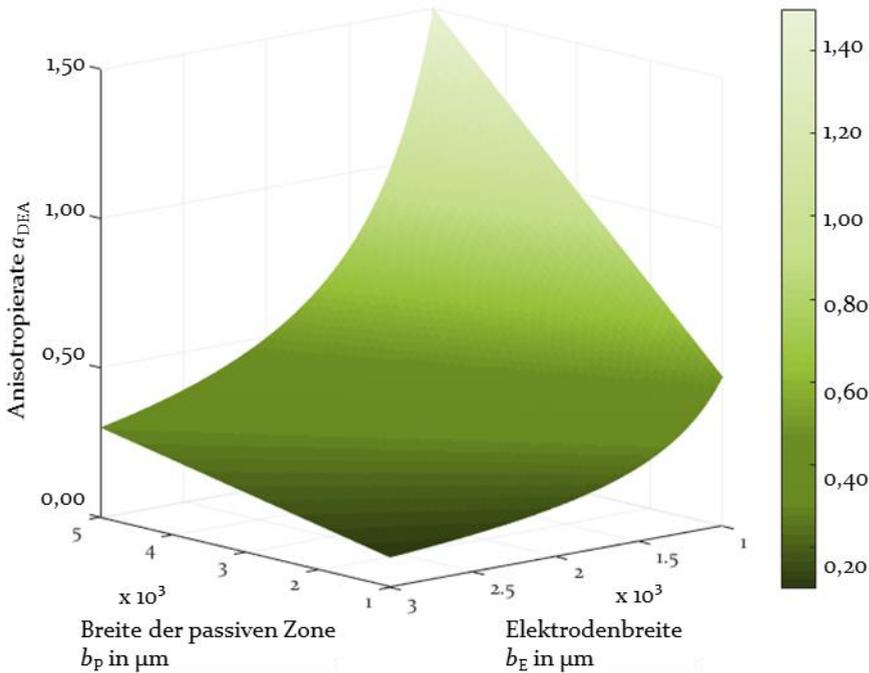


Bild 50: Flächendiagramm der Wechselwirkung zwischen Elektrodenbreite und Breite der passiven Zonen mit der Anisotropierate α_{DEA}

Auf der Grundlage der vereinfachten Systembetrachtung aus Kapitel 4.1.2 lassen sich die Kenngrößen der anisotropen Aktoren herleiten. Die einzelnen Segmente stellen individuelle Aktoren dar, für die die allgemeinen Zusammenhänge aus Kapitel 2.1.1 gelten. Sind zwei identische Segmente über eine gemeinsame Elastomermembran elektromechanisch gekoppelt, kommt es zu den beschriebenen Wechselwirkungen. Diese lassen sich für quadratische Elektrodenbereiche über die Designparameter b_P und b_E einstellen. Eine Maximierung der Anisotropie in x-Richtung erfolgt durch

möglichst schmale Elektrodensegmente unter der Bedingung $b_E > 0$. Je größer der passive Bereich zwischen den Segmenten ist, desto größer wird der Einfluss der Tangentialspannungen. Dem gegenüber kann die Deformation maximiert werden, wenn die Breite der passiven Zone gegen Null tendiert: $b_P \rightarrow 0$.

Mit den beschriebenen Zusammenhängen lässt sich die dritte Forschungsfrage nach einem effizienten Designparadigma für anisotrope DEA analytisch und simulationsbasiert beantworten. Um die Kausalitäten zu validieren, werden im Folgenden gedruckte Proben experimentell charakterisiert. Anschließend wird ein Vergleich zwischen den realen Testdaten und den Simulationsdaten durchgeführt, um das erstellte Modell zu evaluieren.

5 Aufbau und Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren

Die Auslegung der anisotropen Elektroden wird aus Kapitel 4.3 übernommen und für eine definierte Parameterauswahl praktisch umgesetzt. Die Untersuchung erfolgt über eine allgemeine Charakterisierung der Bewegungsamplituden und dem anschließenden Vergleich mit der numerischen Betrachtung aus Kapitel 4.2. Abschließend werden die Erkenntnisse in einem praktischen Anwendungsbeispiel anhand eines funktionellen Irisimplantats umgesetzt und evaluiert.

5.1 Experimentelle Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren

Die numerische Betrachtung aus Kapitel 4.2 bestätigt die Forschungsthese und zeigt, dass die Anpassung der Aktorgeometrie eine neuartige Methode darstellt, um das anisotrope Verhalten der dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) einzustellen. Dabei stellt die Auslegung des Verhältnisses zwischen aktiven und passiven Segmenten den Haupteinflussfaktor dar. Die simulativ untersuchten Elektrodenkonfigurationen werden im Folgenden für die experimentelle Untersuchung mit dem Aerosol-Jet-Druck (AJP) hergestellt und praktisch evaluiert. Für die praktische Umsetzung der Elektrodensegmente sind homogene, reproduzierbare Eigenschaften von großer Bedeutung. Sofern nicht anders angegeben, bestehen die gedruckten Elektroden der DEA aus vier Lagen bei einem Bahnabstand von 200,00 μm und einem 100,00 μm dicken Dielektrikum. Die Analyse folgt dabei den Standards, die in [120] beschrieben sind unter Nutzung der in [P7] gezeigten Messaufbauten. Die Ausdehnung der Membranaktoren wird optisch über Kamerabilder erfasst, die senkrecht von oben aufgenommen werden. Die binarisierten Bilder des aktivierten und passiven Zustands werden voneinander abgezogen, um die Expansion als Differenz zu erhalten. Die vorgestellten Proben und Auswertungen sind teils im Rahmen studentischer Arbeiten erstellt worden [S8, S7].

5.1.1 Expansionsverhalten segmentierter Elektroden

Die untersuchten Aktoren basieren auf quadratischen Geometrien, die in Segmente aufgeteilt werden. Durch die Einspannung in einen Rahmen mit

einem konstanten Abstand zur aktiven Fläche, der um ein Vielfaches größer als die Bewegungsamplitude ist, kann von einer nahezu freien Lagerung ausgegangen werden [120]. Die Silikonmembran wird ohne passive Dehnung in den Rahmen eingespannt, um das Induzieren einer Vorzugsrichtung zu vermeiden. Zudem führt ein Druckpfad zu den Kontakten der in Bild 51 verwendeten Proben, wodurch die mechanische Versteifung reduziert wird. Die Kontakte sind nicht kongruent und tragen daher nicht zur aktiven Kondensatorfläche bei.

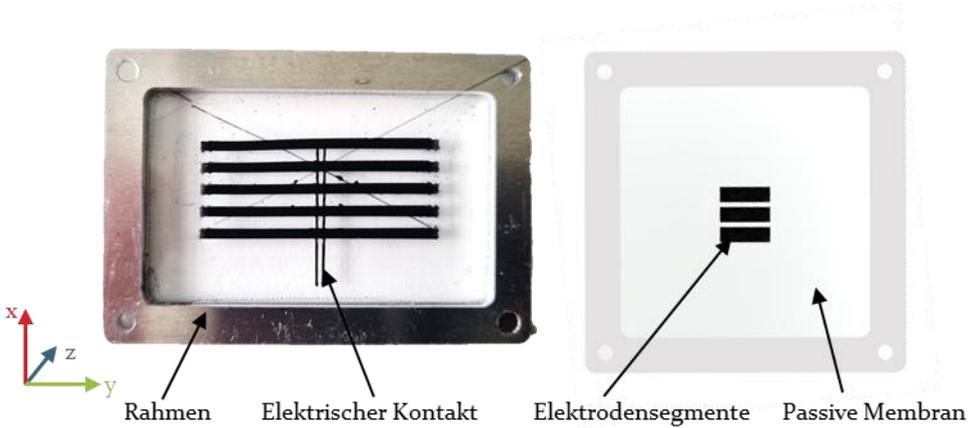


Bild 51: Darstellung einer gedruckten Probengeometrie (links), schematische Darstellung einer quadratischen Probe mit drei Segmenten (rechts)

Bei der geometrischen Anpassung der Elektrode zu einem streifenförmigen Muster mit passiven Zwischenräumen ergibt sich ein anisotropes Verhalten, das im Versuchsaufbau optisch erfasst wird [P7]. Durch die Segmentierung wird die Elektrodenfläche herabgesetzt, welche nach Gleichung (1) direkt mit dem elektrischen Feld zusammenhängt. Zum Vergleich der Effizienz des Systems wird eine vollständig bedruckte Fläche als Referenzwert evaluiert. Die Charakterisierung des Anisotropieverhältnisses erfolgt nach dem Zusammenhang aus Gleichung (17). Danach werden die einzelnen Deformationen in unterschiedlichen Wirkrichtungen untersucht. Die erhobenen Datensätze stammen teils aus [S7] und [P4].

Die Flächenausdehnung des Aktors verhält sich nach Kapitel 4.2 proportional zum bedeckten Anteil der Elektrodenfläche. Dies entspricht dem erwarteten Zusammenhang, der sich durch Einsetzen der Gleichung (1) in (2) und (3) ergibt. Die Flächendeformation gedruckter segmentierter Elektroden zeigt dabei ein vergleichbares Verhalten. Die Verteilung der Messwerte kann rechnerisch über eine lineare Funktion angenähert werden. Aufgrund

der Streuung der Messwerte liegt der R^2 -Wert bei 88,64 %, der eine Abschätzung des Expansionsverhaltens erlaubt. Die Vorhersage der Flächenvergrößerung mit Hilfe des linearen Regressionsmodells ist mit einer Genauigkeit von 93,92 % gegeben.

Für die Anwendung anisotroper Aktoren steht jedoch die Nutzung der uniaxialen Bewegungsrichtung im Vordergrund. Dafür werden in Bild 52 die uniaxialen Deformationen gedruckter Proben entlang der jeweiligen Raumrichtungen gegenüber dem Elektrodenanteil A^* betrachtet. Die Messwerte bestätigen die linearen Zusammenhänge der geometrischen Auslegung. Die Streuung der positiven Korrelation kann durch Messunsicherheiten und Fertigungsabweichungen erklärt werden. Insgesamt zeigen die Messwerte der praktischen Versuche höhere Deformationen als die Simulationswerte, was auf die vereinfachenden Randbedingungen zurückzuführen ist.

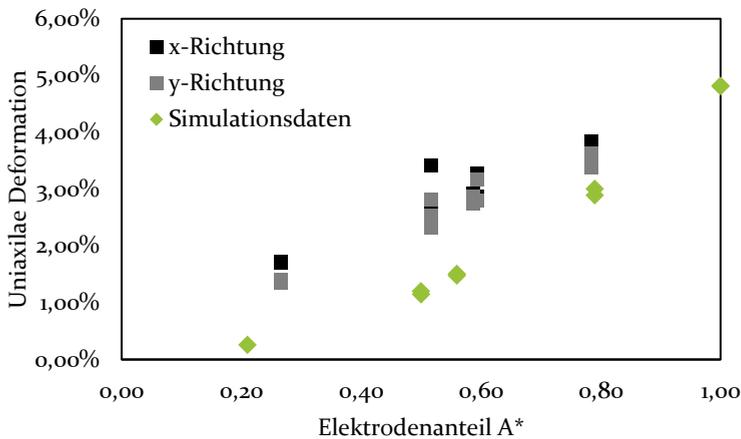


Bild 52: Absolute Deformation der uniaxialen Deformation in Abhängigkeit vom Elektrodenanteil an der Gesamtfläche. Die untersuchten Systemkombinationen besitzen abweichende Werte der Segmente und Abstände, die $0,8 \times 10^3 \mu\text{m}$, $1,9 \times 10^3 \mu\text{m}$ und $3,0 \times 10^3 \mu\text{m}$ annehmen können. ($n = 10$) (Messdaten [S7])

Die statistische Beschreibung bestätigt die invers proportionale Abhängigkeit der uniaxialen Deformation und der Anisotropie von der prozentualen Flächenabdeckung der Elektrodensegmente. Die positive Korrelation der experimentell ermittelten Werte der Expansion mit steigendem Elektrodenanteil bestätigt die Simulationswerte. Jedoch weichen die Werte in Bild 52 systematisch nach oben ab und zeigen eine stärkere Streuung durch die praktischen Versuchsbedingungen.

5.1.2 Validierung der anisotropen Eigenschaften

Zur Bewertung der maximal erreichbaren Anisotropie wird das Verhältnis zwischen der Deformation des Aktors in x- und y-Richtung gemessen. Die größten Werte werden bei großen Abständen zwischen den Elektroden erzielt. Außerdem zeigt sich eine Plateauphase über einen großen Bereich der Kennwerte, analog zu den simulierten Abhängigkeiten aus Bild 50. Dadurch bestätigen die praktischen Ergebnisse die simulativ ermittelten Zusammenhänge. Die praktischen Testdaten für $b_E = b_P$ zeigen Anisotropieverhältnisse zwischen 1,20 und 1,40. Die Ergebnisse sind in Bild 53 dargestellt.

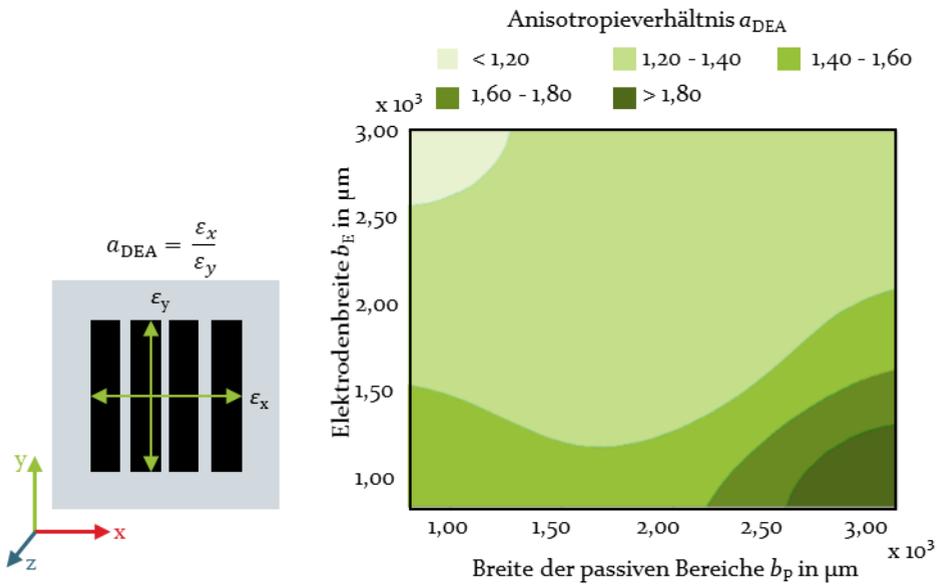


Bild 53: Experimentell ermittelte Anisotropieraten α_{DEA} für gedruckte Konfigurationen mit unterschiedlich breiten Elektroden und passiven Bereichen ($n = 8$)

Die Betrachtung der Anisotropieverhältnisse bestätigt die beschriebene Wechselwirkung, bei der eine höhere Anisotropie für breitere passive Bereiche prognostiziert wird. Das größte gemessene Anisotropieverhältnis liegt in der praktischen Evaluation bei 2,02. Die Deformation in der Vorzugsrichtung ist somit doppelt so hoch im Vergleich zur 90° versetzten Diagonale. Im Gegensatz dazu liegt der maximale Wert der Simulation mit 1,80 unter den maximalen Messwerten. Die Anisotropiewerte der Simulationen sind in Bild 54 vergleichend in Grün dargestellt.

Dennoch bilden die Daten der FEM-Simulation die Werte in der korrekten Größenordnung ab. Die Abweichungen zu den Mittelwerten der praktischen Versuche aus Bild 54 liegen bei $0,26 \pm 0,08$. Die Streuung zwischen den experimentellen und simulativen Werten können über die vereinfachenden Annahmen zur Modellbildung und die Messunsicherheiten in den praktischen Versuchsdaten erklärt werden. Die Evaluation der Systeme bestätigt die Forschungsthese, nach der anisotropes Verhalten durch die geometrische Anpassung der Elektroden hervorgerufen werden kann. Dadurch wird die Basis für komplexere Systemaufbauten geschaffen, deren anisotropes Verhalten das Potenzial besitzt, durch passive Bauelemente verstärkt zu werden.

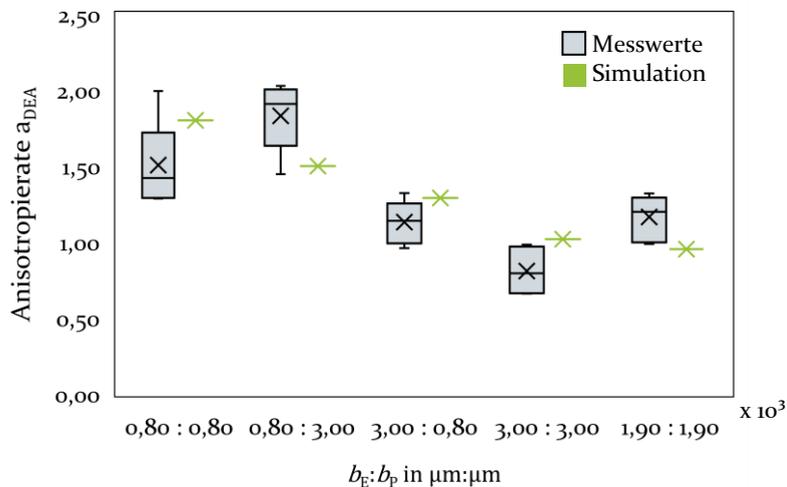


Bild 54: Box-Plot der Anisotropierate a_{DEA} für unterschiedliche Kombinationen von Elektroden- und Abstandsbreiten (Angabe in μm) im Bereich von 4000 V bis 5000 V ($n = 12$) (Messdaten [S7])

5.1.3 Schlussfolgerungen für optimierte anisotrope Aktoren

In der vorliegenden Dissertation kann erstmals eine gezielte anisotrope Verformung durch segmentierte Elektroden erzeugt werden. Die richtungsabhängige Verformung bestätigt die Simulation der resultierenden Schubspannungen im Material. Für den Sonderfall, dass alle Elektroden Randlelektroden sind, wie es bei quadratischen Elektroden mit zwei Segmenten der Fall ist, ist die Anisotropie aufgrund der minimierten Materialspannungen im umgebenden Dielektrikum stärker ausgeprägt. Dadurch ergibt sich bereits bei hohen Elektrodenanteilen A^* eine große Anisotropierate a_{DEA} .

Anisotrope DEA mit drei oder mehr Segmenten weisen die in Kapitel 4.1.2 dargestellten Schubspannungen auf, durch die das Material zwischen den Elektrodensegmenten verdrängt und seitlich verschoben wird. Dieser Mechanismus erhöht einerseits die Flächenverformung, da mit 60,00 % Elektrodenfläche bereits über 80,00 % Verformung erreicht werden kann. Andererseits führt die zusätzliche Verformung in y -Richtung zu einer Verringerung der Anisotropierate.

Im Allgemeinen können die beiden Zielgrößen Anisotropie und uniaxiale Verformung über geometrische Parameter eingestellt werden. Die Anisotropie nimmt mit der Breite der passiven Zonen $b_p \rightarrow \infty$ zu. Gleichzeitig nimmt die Deformation mit abnehmendem Elektrodenflächenanteil A^* ab, wobei die Elektrodenbreite b_E nicht Null werden darf.

Abschließend kann die dritte Forschungsfrage positiv beantwortet werden, da die praktischen Versuche die simulativen Zusammenhänge bestätigen, wonach eine geometrieabhängige Anisotropie in DEA eingestellt werden kann. Dadurch wird der Stand der Technik um eine Methode zur gezielten Erzeugung anisotropen Aktorverhaltens erweitert. Je nach Anwendungsfall müssen die inversen Eigenschaften Anisotropieverhältnis und uniaxiale Deformation in die Konzeption der anisotropen DEA einbezogen werden.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse auf das praktische Anwendungsbeispiel eines funktionellen Irisimplantats übertragen. Dabei wird die Segmentierung der Elektroden genutzt, um die Deformation am äußeren Rand der Iris zu reduzieren und nach innen zu fokussieren. Dadurch wird ein natürliches Deformationsverhalten erzeugt. Dies dient der Überprüfung der Funktionalität zur Beantwortung der vierten Forschungsfrage nach der praktischen Umsetzung des neuartigen Ansatzes.

5.2 Praktische Evaluierung anisotroper dielektrischer Elastomeraktoren

Die zu Beginn der Arbeit beschriebene Ähnlichkeit zur menschlichen Muskulatur bietet optimale Voraussetzungen für die Umsetzung von weichen Aktoren in der Medizintechnik. Die künstlichen Muskeln werden daher im Forschungsumfeld bereits als funktionale Exoprothesen oder Unterstützung des menschlichen Bewegungsapparats eingesetzt. [11, 132]

Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift wird auf Basis der erforschten Anisotropie eine künstliche Iris entwickelt. Diese soll zur Therapie pathologischer Iriden des Menschen dienen. Eine solche Indikation

kann durch Aniridie oder durch traumatische Verletzungen der Iris gegeben sein. Eine Fehlbildung der Iris kann durch eine Mutation im PAX 6 Gen hervorgerufen werden. Dabei ist die Iris nur teils oder gar nicht veranlagt. [133] Durch das Fehlen der Iris kommt es im optischen Apparat zu Abbildungsfehlern und starker Lichtempfindlichkeit.

Im Folgenden werden die Anforderungen anhand des Deformationsverhaltens der natürlichen Iris aufgestellt und ein optimiertes Systemkonzept anhand der Gestaltungsrichtlinien aus Kapitel 4.3 erarbeitet. Dieses wird nach einer praktischen Evaluation mit den Anforderungen und anderen Forschungsansätzen verglichen und validiert. Die vorgestellten Ergebnisse sind teils im Rahmen studentischer Arbeiten entstanden [S9–S11].

5.2.1 Anisotrope Irisaktoren für den Einsatz als funktionelles Implantat

Die Anforderungen an eine bionische Iris auf Basis von anisotropen DEA lassen sich anhand des biologischen Vorbildes ableiten. Die Iris fungiert im optischen Apparat des Menschen als eine Blende, die einen plötzlichen, starken Lichteinfall von der Retina abhalten soll, um diese zu schützen. Dabei besitzt die Iris eine Dicke von nur $0,50 \times 10^3 \mu\text{m}$ im Randbereich bis $3,00 \times 10^3 \mu\text{m}$ im Zentrum. Der durchschnittliche Außenumfang beträgt $37,50 \times 10^3 \mu\text{m}$. Durch die Kombination aus zirkulär (*Musculus sphincter pupillae*) und radial (*Musculus dilatator pupillae*) verlaufender Muskulatur ist die Apertur der Pupille das zentrale Sehloch der Iris, in der Größenordnung von $1,2 \times 10^3 \mu\text{m}$ bis $9,00 \times 10^3 \mu\text{m}$ Durchmesser adaptierbar. Dies führt zu einer Reduktion des Lichteinfalls um mehr als 80,00 % [134, 135]. Die Reaktionszeit der Iris liegt im Bereich von Millisekunden [136]. Die Anatomie der natürlichen Iris ist in Bild 55 dem Aufbau des anisotropen DEA gegenübergestellt.

Auf Basis des physiologischen Vorbilds soll eine funktionelle Iris auf Basis anisotroper DEA erforscht werden, die ein anisotropes Bewegungsverhalten aufweist. Analog zum menschlichen Vorbild wird eine Fokussierung der Deformation im Zentrum bei konstant gehaltenem Außendurchmesser angestrebt. Hierzu wird der isotrope Systemaufbau mit Hilfe der beschriebenen Erkenntnisse anisotrop ausgelegt.

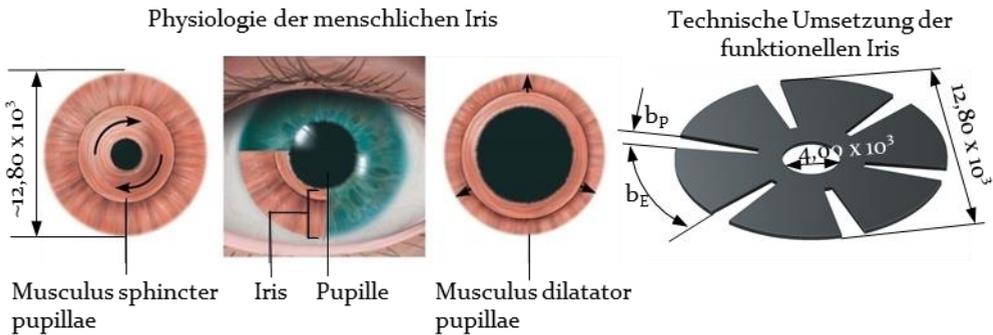


Bild 55: Vergleich der physiologischen Funktionsweise der menschlichen Iris (links) gegenüber dem technischen Systemaufbau auf Basis von DEA (rechts) (Bemaßung in μm)

Für die in Bild 55 gezeigte Geometrie wird der radiale Muskel durch eine kreisförmige Elektrode um den inneren Rand der Iris abgebildet. Der schmale Bereich des ringförmigen Aktors führt zu einer vollständigen Flächenabdeckung und damit zu einem maximalen elektrostatischen Druck, der zur Kontraktion der Irisöffnung beiträgt. Dieser ist verbunden mit radialen Elementen, deren Abstände zum äußeren Randbereich hin zunehmen, um die Anisotropie zu verstärken. In den Randbereichen folgt die Elektrodengeometrie den Designvorschriften aus Kapitel 4.3. Die Iridenkonfiguration, welche in Bild 55 gezeigt ist, wird mit dem AJP-Verfahren hergestellt und im Folgenden experimentell evaluiert. Dazu werden die Deformation und die erreichbare Verdunkelung verglichen. Die Arbeiten sind im Rahmen des Forschungsprojekts ADAI in Kooperation mit der HumanOptics Holding AG (ZIM-Förderkennzeichen: ZF4222613SK8) entstanden.

Die Ermittlung der optimalen Auslegung für die Maße der anisotropen Iris erfolgt mittels Zielgrößenoptimierung der Basisgeometrie in einer FEM-Simulation. Die Eingangsparameter stellen die Größe der Segmente und der dazwischenliegenden passiven Bereiche dar. Als zu optimierende Zielgröße wird die maximale Veränderung des Innendurchmessers herangezogen, da dieser für die Verdunkelung zuständig ist.

Durch die radiale Anordnung der passiven Bereiche sind die entstehenden Schubspannungen zweier gegenüberliegender Kanten radial nach außen gerichtet. Die größer werdenden Abstände zum äußeren Rand hin reduzieren die Deformation zusätzlich, wodurch sich die Vergrößerung des Außendurchmessers einschränken lässt. Die Simulationsergebnisse der optimierten Geometrie der Elektroden sind in Bild 56 einem herkömmlichen ringförmigen Aktor gegenübergestellt. Die anisotrope Auslegung erreicht

eine größere Deformation im Inneren als am äußeren Rand der Iris. Dadurch ist die Deformation der anisotropen Aufbauform im Zentrum der Iris doppelt so hoch im Vergleich zum homogenen Ansatz links. Dabei liegt der Anteil der Elektrodenfläche bei 77,78 %, was dem Deformationsmaximum aus Kapitel 4.2.2 entspricht. Die Deformationszone der vollständigen ringförmigen Iris (vgl. Bild 56 links) zeigt hingegen eine größere deformierte Fläche und eine verringerte Verformung am inneren Radius. Die Simulation bestätigt dadurch den Lösungsansatz aus Kapitel 4.3.

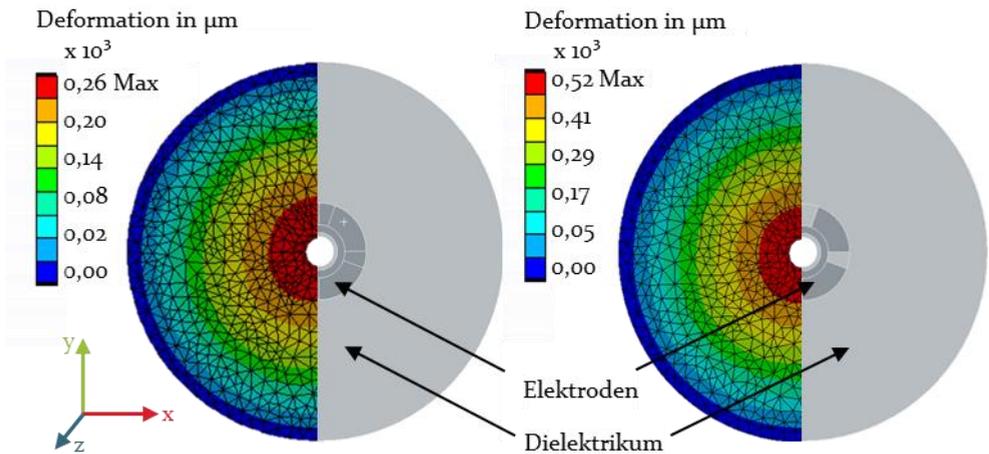


Bild 56: Mechanische Simulation der ringförmigen (links) und der anisotropen Iris (rechts) in der Darstellung der Gesamtdeformation

Für die praktische Evaluation wird die modifizierte Elektrodengeometrie im Folgenden mittels AJP gefertigt und optisch untersucht. Dafür wird das Vorgehen aus [S11] genutzt, welches Bilder der verschiedenen Konfigurationen bei unterschiedlichen Aktivierungszuständen binarisiert und vergleicht. Durch die Subtraktion der Bilddaten werden die Deformationsbereiche quantifizierbar.

5.2.2 Evaluierung des anisotropen Bewegungsverhaltens

Analog zum natürlichen Vorbild weist der konzeptionierte Aktor eine ringförmige Geometrie auf, die einen variablen Lichteinfall im Zentrum ermöglicht. Um ungewollte Abschattung und Lichtbrechung im Inneren zu vermeiden, wird das Silikonsubstrat nach der Herstellung mittels Laser ausgeschnitten. Dies sorgt zusätzlich für eine erhöhte Bewegungsfreiheit im Zentrum, da die entstehenden Schubspannungen abgebaut werden. Die

Iris besitzt den Maßstab 1:1, dadurch wird ausreichend Abstand zum Rahmen gewahrt, in dem die Membran eingelegt ist. Somit folgt der Aufbau den Maßstäben aus [120] und ist in Bild 57 gezeigt.

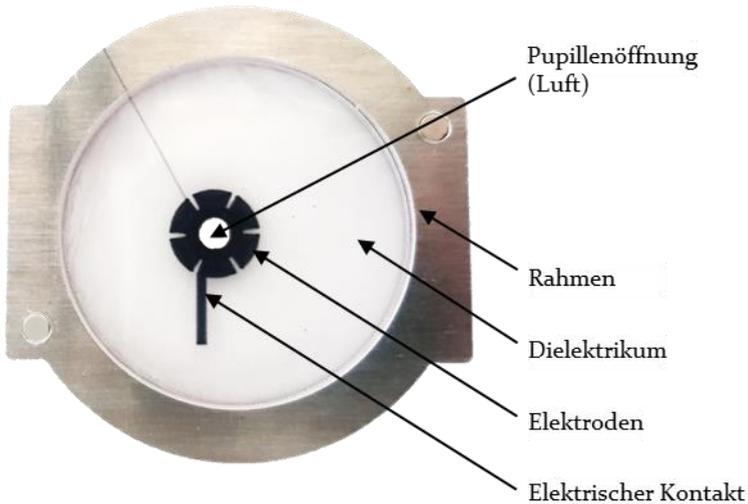


Bild 57: Gedruckte Probe der untersuchten Irisaktoren in segmentierter Bauweise

Durch die anisotrope Konstruktion des Systems soll die radiale Bewegung des runden Aktors nach innen fokussiert und der äußere Umfang konstant gehalten werden. Dafür wird die anisotrope Konfiguration experimentell mit einem herkömmlichen ringförmigen Irisaktor verglichen. Dieser gleicht dem anisotropen Aktor im Außen- und Innendurchmesser, besitzt jedoch die volle Elektrodenfläche. Analog zur Untersuchung in Kapitel 5.1 wird die Anisotropierate bewertet. Diese setzt sich im vorliegenden Beispiel aus dem Verhältnis der Bewegungsamplituden des Innen- und des Außenradius zusammen. Weiterhin wird die Größe der Deformation in Bezug auf die Pupillenöffnung und die gesamte Flächendeformation verglichen. Für die Untersuchung wird der Teststand aus [P7] eingesetzt.

Der praktische Vergleich der anisotropen Konfiguration mit einer vollständigen Ringgeometrie wird unter Anlegen einer maximalen Spannung von 3000,00 V durchgeführt. Auf Basis der optischen Daten wird zunächst die Deformation der Gesamtfläche beider DEA in Bild 58 gegenübergestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die größere Fläche der vollständigen Ringelektrode erwartungsgemäß in einer größeren Gesamtdeformation resultiert.

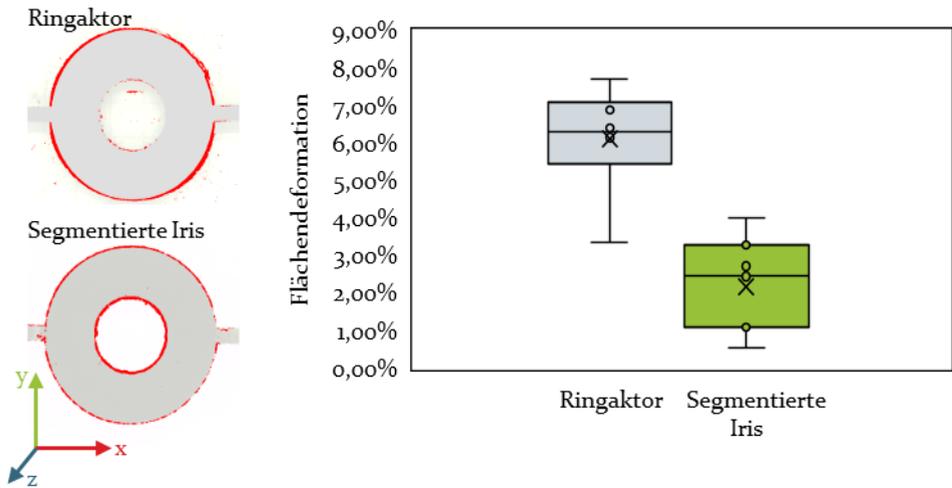


Bild 58: Vergleich der Flächendeformation (rot) eines vollständigen Irisaktors gegenüber der anisotropen Variante aus Segmenten ($n = 6$) (Messdaten S11)

Jedoch wird ein größerer Teil der umgewandelten Energie in die Bewegung des äußeren Randes der Iris dissipiert und trägt dadurch nicht zur Verschattung bei. Im Vergleich zwischen beiden Systemen ist der prozentuale Anteil der mechanischen Flächendeformation des Innendurchmessers bei der anisotropen Konfiguration höher. Dieser Zusammenhang wird in Bild 58 (links) anhand der Subtraktionsbilder grafisch ersichtlich.

Die Bewegungsunterschiede zeigen sich ebenfalls bei der Betrachtung der prozentualen Deformation der Blenden im Inneren, die in Bild 59 dargestellt sind. Die segmentierte Iris zeigt eine größere Auslenkung im Inneren als der vollflächige Ringaktor. Durch die anisotrope Konfiguration lässt sich der Pupillendurchmesser um $4,95 \% \pm 0,36 \%$ reduzieren. Daraus ergibt sich ein Anisotropieverhältnis zwischen Außen- und Innendurchmesser von 0,55. Dagegen ist bei der herkömmlichen Ringelektrode durch die starke Deformation des Außendurchmessers und kaum Bewegung im Inneren sichtbar.

Die Analyse der anisotropen funktionellen Iris zeigt eine Fokussierung der Deformation nach innen. Dabei wird die genutzte Bewegung im Vergleich zum isotropen System um das Dreifache erhöht. Durch die Fokussierung gleicht das anisotrope System stärker dem natürlichen Original und bildet die natürliche Bewegung besser ab. Dadurch kann das Designparadigma zur Konzeptionierung anisotroper Aktoren im praktischen Anwendungsfall bestätigt werden.

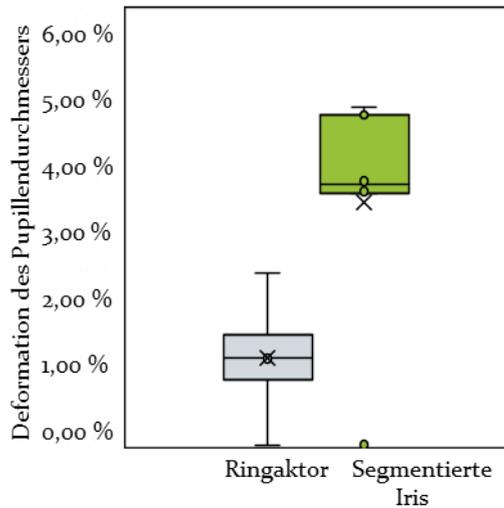


Bild 59: Gegenüberstellung der Pupillendeformation für anisotrope (segmentierte) und nicht anisotrope (ringförmige) künstliche Iriden im Vergleich zur Deformation und der resultierenden Anisotropie ($n = 6$)

Somit folgt die Beantwortung der vierten Forschungsfrage zur Übertragbarkeit und dem Nutzen des neuartigen Ansatzes für anisotrope DEA. Die Forschungsinhalte erweitern den Stand der Technik und zeigen die gesteigerte Deformation der Blendenöffnung eines funktionellen Irisimplantats, wodurch die Forschungsfrage positiv beantwortet werden kann.

5.2.3 Validierung des resultierenden Leistungsspektrums

Durch die Elektrodensegmente der DEA kann eine Anpassung des Deformationsverhaltens an das natürliche Vorbild erzielt werden. Die Membranstruktur wird im Folgenden mit anderen Konfigurationen DEA basierter Iriden verglichen. Dafür wird sowohl die Flächendeformation als auch die Pupillenverengung betrachtet und die Eignung als Implantat bewertet.

Neben der anisotropen Auslegung der Elektroden wird auch die Anpassung des Deformationsverhaltens über versteifende Elemente im äußeren Randbereich getestet. Durch diese ist eine Limitierung der Bewegung möglich, jedoch ist die Nutzbarkeit aufgrund der starren Strukturen eingeschränkt. Dazu erfolgen Tests in festen Rahmen [P8] und mit passiven Materialanhäufungen rund um die Iris [P1]. In [P1] werden Modifikationen des Aktors durch unterschiedlich große Ausschnitte der Membran in der Pupillenöffnung und äußere Begrenzungen diskutiert. Die erreichten Anisotropie-

werte liegen bei 4,37 und die Verengung der Pupille bei 4,25 %. Dem gegenüber wird in [P8] der Abstand der aktiven Fläche zu einem steifen Rahmen untersucht. Mit dem Demonstratoraufbau aus [P8], der in [S10] angefertigt wurde und die natürliche Iris im Maßstab von 4,00:1,00 abbildet, kann eine Lichtreduzierung um 24,00 % erreicht werden. Durch die Variation der passiven Zonen um und innerhalb der Iris ist die Verdunklung zwischen 18,00 % und 12,00 % einstellbar.

Zusätzlich werden in der Literatur beschriebene Iriden für den Vergleich herangezogen. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird eine Normierung durchgeführt, da die Ergebnisse von Systemen unterschiedlicher Konfigurationen herrühren. Aus der Normierung auf einen einheitlichen Maßstab resultiert der Vergleich für die Systeme, der in Tabelle 6 dargestellt ist. Im Stand der Technik werden häufig Linsen und Iriden als Gesamtsystem betrachtet. Tsai et al. [137] beschreiben beispielsweise eine Iris mit flüssigen Elektroden, die hohe Kontraktionen der Pupille ermöglichen. Durch den Aufbau, der in einem rigiden Rahmen eingespannt ist, kann sich die Pupille von 4,00 mm auf 1,50 mm verengen. Das System ist im Maßstab 1,00:1,00 aufgebaut.

Die in der Literatur beschriebenen Ansätze zeigen teils höhere Gesamtdeformationen der Pupille, als mit dem vorliegenden Ansatz der anisotropen Elektroden erreicht werden. Dies beruht insbesondere auf vorher gedehnten Membranen in den anderen Aufbauten. Dabei wird die Blockierkraft des Elastomers überwunden, wodurch die gesamte umgewandelte mechanische Energie für die Kontraktion der Pupille aufgewendet wird. Zusätzlich werden steife Rahmen genutzt, um die mechanische Dehnung aufrecht zu erhalten. Dies steht jedoch aufgrund des Bauraums und der steifen Strukturen, die das Gewebe aufgrund mechanischer Interaktion gefährdet, in gegenteiligem Effekt zu der Möglichkeit, die Iris als Implantat einzusetzen. Dabei bietet eine Zwischenlösung, wie sie in [P1] beschrieben ist, die Möglichkeit, die Membran in einem biegbaren Rahmen vorbereitend zu dehnen und anschließend analog zu einer festen Kontaktlinse einzusetzen. Durch die zusätzliche Dehnung resultiert eine Verstärkung der Bewegungsamplitude der anisotropen DEA. Die Blendenfunktion des natürlichen Vorbilds kann bisher von keinem der in Tabelle 6 Systeme erreicht werden.

Tabelle 6: Vergleich der Iriskonfigurationen mit eigenen anisotropen Ansätze und Literaturwerten

Irisaktor	Pupillenverengung	max. Gesamtdeformation	Systemaufbau
Anisotrope Elektroden	4,95 % ± 0,36 %	1,40 % ± 0,6 %	Membran
Versteifender Rahmen [P8]	1,08 %	2,10 %	Passive Bauteile
Materialanhäufung und Ausschnitt [P1]	0,60 % ± 0,01 %	3,31 % ± 1,23 %	Passive Bauteile
Ringlektrode mit Rahmen [138]	- 4,00 %	10,90 %	200 % passive Dehnung
Ringlektrode mit Origami [139]	- 6,00 %	5,30%	500 % passive Dehnung

* negative Werte repräsentieren eine Vergrößerung der Pupille

Die Beispiele aus der Literatur zeigen, dass sich die Performanz der Iriden über die Kopplung mit steifen Bauteilen und Vorspannung steigern lässt. Jedoch limitieren die Systemmodifikationen aufgrund ihres höheren Raumbedarfs und der fehlenden Adaption den Einsatz als Implantat. Die dargestellten Systeme aus dem Stand der Forschung basieren dabei auf isotropen Membranaktoren. Eine Integration der hier erforschten anisotropen DEA hat das Potenzial die Anisotropie der alternativen Bauformen weiter zu steigern.

Durch die Analyse der Systemmodifikationen zeigt sich, dass sich anisotrope Eigenschaften in den DEA erzeugen lassen, indem die Konfiguration der Elektroden variiert wird. Am Anwendungsbeispiel der funktionellen künstlichen Iris wird sichtbar, dass die wirkenden Kräfte über das vorgeschlagene Designparadigma ins Innere gelenkt werden. Damit kann die vierte Forschungsfrage nach der Umsetzung anisotroper Muskelfunktionen bestätigt werden. Der segmentierte Ansatz bietet die Möglichkeit, die natürliche Funktion der Iris naturgetreu nachzuahmen. Dadurch wird der Stand der Technik durch einen neuartigen Ansatz zur Erzeugung anisotropen Verhaltens ohne versteifende Element erweitert. Die gezeigten anisotropen DEA basieren auf Membranaktoren, deren Leistung durch die Integration vorheriger Dehnung oder Einspannung gesteigert werden kann.

6 Anisotrope dielektrische Elastomersensoren für richtungsabhängige Signale

Einfache dielektrische Elastomersensoren (DES) gleichen dehnbaren Plattenkondensatoren, deren Kapazität direkt proportional zu den geometrischen Maßen ist. Eine mechanische Deformation des Systems kann daher durch die elektrischen Kennwerte Kapazität und Widerstand charakterisiert werden. Diese sind für homogene Elektroden jedoch richtungsunabhängig. Daher wird in der Literatur häufig der Ansatz des Signalvergleichs mehrerer DES herangezogen, um die Richtung einer angreifenden mechanischen Last bestimmen zu können. Um die Systemkomplexität zu verringern, zielt die vorliegende Dissertationsschrift darauf ab, die strukturelle Intelligenz selektiv gedruckter Elektroden zu nutzen, um eine ganzheitliche Charakterisierung der applizierten Kraft zu erreichen. Dafür werden die Eigenschaften des Partikelgefüges genutzt, die durch den Aerosol-Jet-Druck (AJP) ermöglicht werden und in Kapitel 3.2 beschrieben sind. Durch die Applikation von mechanischen Lasten wird die Ladungsspeicherung und der Ladungstransport im heterogenen Perkollationscluster beeinflusst, was sich auf die Messgrößen wie den elektrischen Widerstand und die Kapazität auswirkt. Die simultane Auswertung mehrerer anisotroper Elektrodenschichten innerhalb eines DES ermöglicht das Erfassen von resistiven sowie kapazitiven Messsignalen. Aufgrund der Anisotropie der Druckstrategie kann die eindeutige Charakterisierung einer mechanischen Kraft erfolgen.

In diesem Kapitel wird das Wirkprinzip, das sich über die selektiv aufgetragenen Elektroden einstellen lässt, hergeleitet. Die Grundlage dafür bilden die quantifizierten Herstellungsparameter des AJP-Verfahrens für die Einstellung der physikalischen Zusammenhänge aus Kapitel 3.2. Die Monte-Carlo-Simulation ermöglicht die Untersuchung der anisotropen Partikelgefüge solcher DES, womit die simulative Überprüfung der Forschungsthese erfolgt.

6.1 Herleitung der anisotropen Sensoren basierend auf heterogenen Elektroden

Die beiden Messgrößen elektrischer Widerstand und Kapazität beruhen auf der Anordnung und Dichte des Partikelgefüges, die für den Ladungstransport verantwortlich sind. Die Eigenschaften des Elektrodengefüges

lassen sich mittels AJP einstellen, wie die Prozessstudie aus Kapitel 3 zeigt. Aus der Studie geht hervor, dass größere Besetzungsdichten eine Verringerung des Elektrodenwiderstands bewirken. Durch den größeren besetzten Flächenanteil können mehr Ladungen gespeichert werden, wodurch die Kapazität proportional zur Besetzungsdichte ansteigt. Die Versuche unter mechanischer Last in Kapitel 3.2 zeigen jedoch, dass auch die Richtung der gedruckten Bahnen Auswirkung auf das Verhalten der deformierten DES hat. Demnach lassen sich die Richtung und die heterogene Verteilung der Partikel nutzen, um die Messsignale der Systeme einzustellen.

Der in der vorliegenden Dissertationsschrift untersuchte Ansatz basiert auf einer heterogenen Mikrostrukturierung der Partikelelektroden, wodurch die Messdaten um eine richtungsabhängige Komponente erweitert werden. Mit dem neuartigen Ansatz lässt sich eine mechanische Last ganzheitlich durch einen einzelnen anisotropen DES charakterisieren, wodurch die Informationsdichte der Sensoren gesteigert wird.

6.1.1 Funktionsweise dielektrischer Elastomersensoren mit heterogenen Elektroden

Die Forschungsthese zur Nutzbarkeit der Druckrichtung der Elektroden wird mittels eines neuen Designkonzepts erforscht, welches die selektive Druckstruktur der Elektroden variiert. Die Funktionsweise der anisotropen DES basiert dabei auf einer Anpassung und einer Kombination aus resistiven und kapazitiven Signalanteilen, die durch das AJP-Verfahren möglich sind. Durch die mäanderförmige Ablage der leitfähigen Partikel entstehen richtungsabhängige Effekte, die zu zusätzlichen interpretierbaren Signalanteilen führen. Diese Messsignale beruhen auf der Verschiebung der leitfähigen Partikel unter Last mit der gezielten Nutzung lokal unterschiedlicher Partikeldichten.

Die Partikelverteilung jedes einzelnen AJP gedruckten Elektrodenpfades stellt nahezu eine Normalverteilung dar. Dies wird in Bild 60 sichtbar, welches einen Oberflächenscan einer gedruckten Bahn zeigt. Über den einstellbaren Versatz zwischen den Linien werden die Überlappung und damit die anteilige Bedeckung der Elektrode adaptiert. Die Besetzungsdichte ist dadurch konstant entlang eines gedruckten Pfades (\parallel) und heterogen in der senkrecht (\perp) verlaufenden Richtung. Durch die Applikation einer mechanischen Last sinkt die Besetzungsdichte im Zentrum der gedruckten Bahnen nur minimal, wohingegen die geringeren Besetzungsdichten der Randbereiche unter die Perkolationsschwelle absinken können.

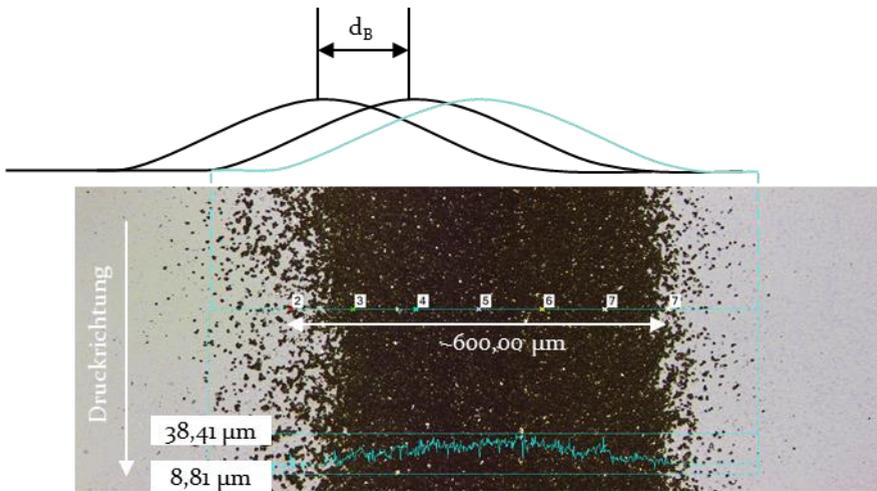


Bild 60: Oberflächenprofil eines gedruckten Partikelpfads unter Angabe der gemessenen Höhenwerte. Die theoretische Betrachtung zeigt die Normalverteilung einer Bahn (türkis) und die theoretische Überlappung mit benachbarten Bahnen. ($n_L = 8$)

Zum Einstellen der anisotropen Messsignale wird die Druckstrategie über Richtung und Bahnabstand adaptiert. Im obersten in Bild 61 gezeigten Aufbau sind die Partikel aufgrund der 90° versetzten Druckstrategie homogen verteilt, dadurch werden die Partikel durch eine mechanische Last in allen Richtungen gleich stark auseinander bewegt. Dies führt zu einem richtungsunabhängigen resistiven Signal. Dem gegenüber sorgt eine heterogene Verteilung der Partikel für einen unterschiedlich starken Anstieg des Elektrodenwiderstands in Abhängigkeit der Lastrichtung. Die Ablage der Partikel entlang gleich orientierter Bahnen hat eine Verdichtung in der Mitte und eine geringere Abdeckung in den Randbereichen jeder Bahn zur Folge. Durch die Kombination unterschiedlich ausgerichteter Elektroden innerhalb eines DES kann über den Vergleich der Signalanteile auf Charakteristika der angreifenden Last geschlossen werden.

Die Flächenvergrößerung hat nach Gleichung (1) eine Erhöhung der Kapazität analog zur Funktion von homogen gestalteten Elektroden zur Folge. Anhand der Analyse in Kapitel 3.2.2 wird jedoch ersichtlich, dass auch die kapazitiven Eigenschaften vom Elektrodengefüge abhängen und sich nur in niedrigen Dehnungsbereichen und bei Besetzungsdichten ~ 1 ideal verhalten. Durch große Dehnungen werden die Partikel stärker separiert, wodurch die Besetzungsdichte der Fläche reduziert wird. Dadurch werden die Verbindungen einzelner Cluster unterbrochen, wodurch diese nicht mehr zur Ladungsspeicherung beitragen.

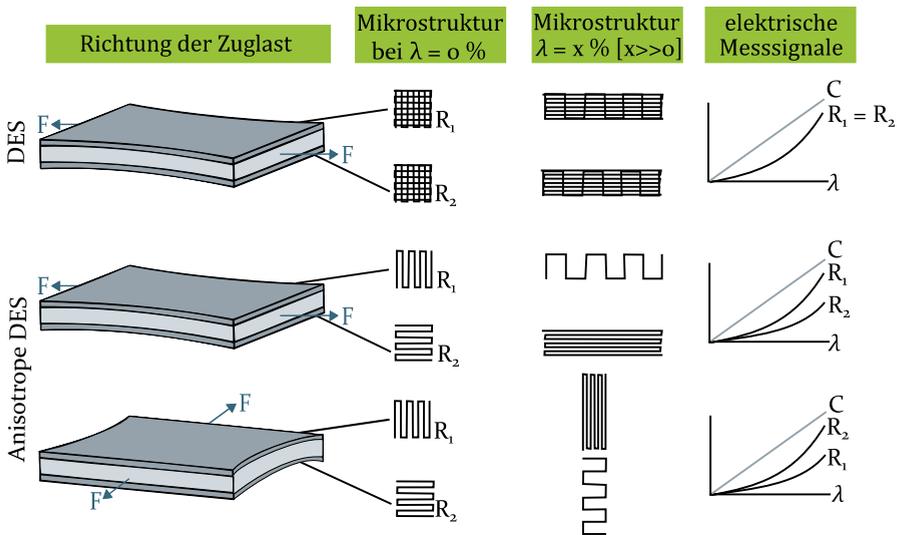


Bild 61: Gegenüberstellung der Funktionsweise konventioneller DES mit den Wirkmechanismen der anisotropen Aufbauformen unter uniaxialer Zugbeanspruchung (blau)

Für die Interpretation erfolgt eine kombinierte Signalerfassung der Messgrößen. Der Amplitudenunterschied der resistiven Anteile zweier Elektroden mit 90° versetzter Fertigungsstrategie gibt Aufschluss über die Richtung der applizierten Kraft und ermöglicht somit die Unterscheidung der Belastungsart. Zudem kann die Amplitude in Abhängigkeit des Widerstandsverhaltens erfasst und durch die Messung der Kapazität überprüft werden.

Die Elektrodenanpassung mittels AJP hat den Vorteil, dass kein Zusammenschalten mehrerer DES oder Werkzeuge benötigt wird. Zudem ermöglicht das Verfahren die Einstellung des Verhaltens der Sensoren über die Fertigungsstrategie für den jeweiligen Anwendungsfall. Dem gegenüber steht nach Bild 30 die Reduktion der Kapazität durch die geringere Besetzungsdichte der Elektrodenfläche. Daher ist eine optimierte Auslegung des Systemaufbaus essenziell, um die Messsignale nicht negativ über die heterogene Mikrostruktur zu beeinflussen. Dafür werden im Folgenden die Prozessparameter betrachtet, die einen signifikanten Einfluss auf die Elektrodeneneigenschaften haben.

6.1.2 Wechselwirkung des belasteten Perkolationsclusters mit dem Systemverhalten

Die Grundlage für die resistiven Signalanteile stellt die lastabhängige Verschiebung des Elektrodengefüges dar. Während sich das Substrat elastisch deformiert, behalten die Partikel ihre ursprüngliche Form bei. Durch die Adhäsion auf der Oberfläche werden die Partikel stärker voneinander separiert, wodurch die Besetzungsdichte bei steigender Dehnung abnimmt. Für die modellbasierte Betrachtung wird die Annahme getroffen, dass die Fläche der Partikel konstant bleibt, während die Gesamtfläche deformiert wird.

Mathematisch lässt sich die Besetzungsdichte anhand der Perkolationstheorie über Gleichung (16) an das Young'sche Modul koppeln. Die absolut besetzte Fläche auf der Oberfläche wird als konstant angenommen. Dadurch verändert sich der relativ besetzte Flächenanteil in Abhängigkeit der Dehnung, der über folgenden Zusammenhang beschrieben werden kann

$$p(\lambda) = p(0) / \left(1 + \left(\frac{\sigma(p(\lambda))}{Y} \right) \right) \quad (30)$$

Durch Einsetzen der Zusammenhänge der richtungsabhängigen Widerstände aus Gleichung (21) und (22) kann anhand der modellierten Besetzungsdichte der jeweilige Schichtwiderstand berechnet werden. Somit lässt sich die Besetzungsdichte in Abhängigkeit der Dehnung, die in Kapitel 3.2.3 empirisch ermittelt ist, mathematisch abbilden.

Das anisotrope Verhalten basiert auf der lokal unterschiedlich starken Besetzungsdichte, welche sich mathematisch über verschiedene Werte von p abbilden lässt. Die Betrachtung der Prozesseigenschaften des AJP erfolgt über definierte Zonen, die annähernd homogene Besetzungsdichten aufweisen. Praktisch lässt sich die Mikrostruktur der Elektroden über die Parameter des AJP-Prozesses einstellen, wodurch die anisotropen Eigenschaften bestimmt werden. Sind die Abstände zwischen den Bahnen zu groß gewählt, steigt der Widerstand unter mechanischer Last sprunghaft an. Dies führt zu einer Limitierung des Messbereichs. Bei einer starken Überlappung der gedruckten Linien ist die Anisotropie weniger ausgeprägt, da sich die Partikel stärker überdecken und die mittlere Besetzungsdichte ansteigt. Durch eine gekreuzte Druckstrategie lassen sich die richtungsabhängigen Effekte sogar vollständig kompensieren. [P3] Zusätzlich ist die

elektrische Leitfähigkeit eine wichtige Kenngröße, die mit größer werdenden Bahnabständen geringer wird. Die konstruktiven Anpassungen sind schematisch in Bild 62 dargestellt.

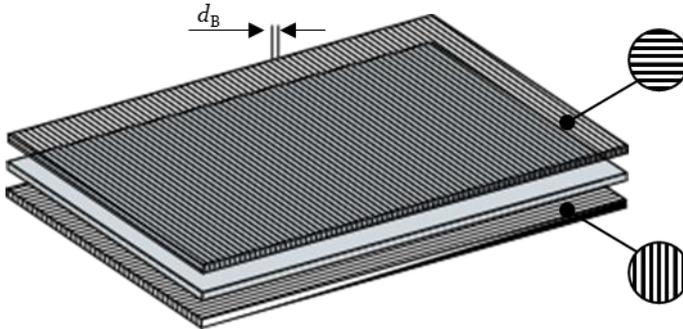


Bild 62: Konstruktive Anpassungsmöglichkeiten durch Bahnabstand d_B sowie Bahnrichtung und schematische Darstellung des resultierenden Mikrogefüges der Partikelelektroden

Der elektrische Widerstand der Elektroden sinkt mit dichterem Partikelaufrag und nähert sich oberhalb der Perkolationsgrenze p_c einem Grenzwert an. Dieser Zusammenhang kann Bild 29 (Kapitel 3.1.2) entnommen werden. Während das statische Verhalten oberhalb der Perkolationsgrenze p_c mit Hilfe der linearen Regression aus Gleichung (19) beschreibbar ist, finden komplexere Analysen für die Bestimmung der Clustereigenschaften unter Last Anwendung.

Eine modellhafte Beschreibung ermöglicht es, das spezifische Systemverhalten über eine Monte-Carlo-Simulation abzubilden. Wobei das Partikelcluster der Elektroden in Zonen mit unterschiedlichen Besetzungsdichten eingeteilt wird. Durch die Simulation verschiedener zufälliger Besetzungsdichten sollen die Grenzwerte angenähert werden. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage, um ein optimiertes anisotropes Verhalten der DES zu erzielen und geeignete Konfigurationen der Parameter auszuwählen. Dafür wird im Folgenden eine Methodik anhand der statistischen Betrachtung perkolierender Partikelsysteme aufgezeigt und Designregeln abgeleitet.

6.2 Modellbasierte Betrachtung der anisotropen Systemanpassungen

Die in Kapitel 6.1 konzipierten Elektroden weisen heterogene Zusammensetzungen auf, deren elektrische Eigenschaften sich entlang der x- und y-Richtung unterscheiden. Daher variiert die Wahrscheinlichkeit, eine

elektrisch leitende Verbindung zum benachbarten Partikel herstellen zu können, lokal. Um diese inhomogene Verteilung in die Betrachtung einzu-
beziehen, wird die Besetzungsdichte des Perkolationsclusters der Elektroden statistisch betrachtet und ein geeigneter Ansatz zur Ermittlung der Perkolationswahrscheinlichkeit aufgestellt.

6.2.1 Erweitertes Perkolationsmodell für Systeme mit elektrischer Anisotropie

Basierend auf der fertigungsbedingten Heterogenität muss die Beschreibung der Perkolationswahrscheinlichkeit angepasst werden. Deshalb wird der Ansatz aus Kapitel 2.2.2 erweitert, da der homogene Fall die gesamte Elektrode über eine gemittelte Wahrscheinlichkeit abbildet und einzelne Besetzungsbereiche nicht beachtet. Außerdem ist die Relation zwischen benachbarten Partikeln bei homogenen Perkolationsclustern nicht relevant. Daher stellt die Beschreibung der homogenen Perkolations ein mathematisches Problem erster Ordnung dar, während die Punkte eines heterogenen Gitters m unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten besitzen können, die schematisch in Bild 63 dargestellt sind. Um den heterogenen Aufbau einzubeziehen, müssen die Beziehungen zwischen den einzelnen Gitterpunkten oder den Segmenten anteilig in die Berechnung einfließen.

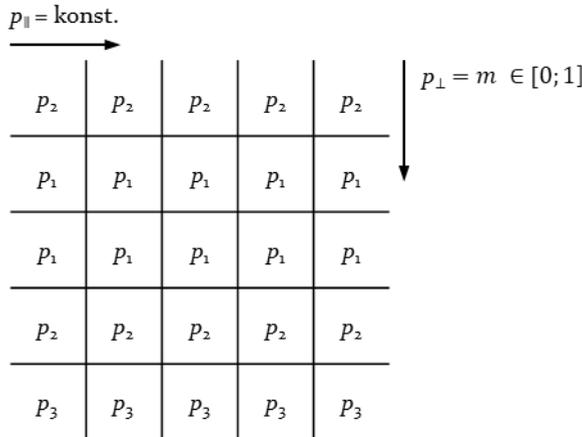


Bild 63: Schematische Darstellung der Gewichtung der Gitterpositionen im statischen anisotropen Perkolationscluster

Aufgrund des in [140] beschriebenen Konsistenzproblems gibt es für die inhomogene Perkolations im zweidimensionalen Fall keine analytische Lösung. Daher werden numerische Verfahren genutzt, um eine angenäherte Beschreibung des Systemverhaltens zu erhalten. Eine Möglichkeit besteht

darin, Vektoren in Perkolationsrichtung einzusetzen, wobei die parallel verlaufenden Kanten des Graphs eine höhere Besetzungsdichte besitzen [141]. Da im vorliegenden Fall Bereiche mit homogenen Besetzungsdichten vereinfacht werden können, werden Gitterbereiche definiert und Prozessparameter abhängige Besetzungsdichte für diese festgelegt. Durch die lokale Anpassung wird die Mikrostruktur in die Modellbetrachtung einbezogen. Die Segmente, deren Intervallbreite von den Prozessparametern des AJP abhängen, werden wiederum mit homogenen Eigenschaften angenähert.

Zusätzlich zu der statischen, heterogenen Besetzungsdichte muss das Dehnungsverhalten in die Betrachtung einbezogen werden. Daher sind die Besetzungsdichten in jedem Segment als dynamisch zu betrachten, wobei der Zusammenhang aus Gleichung (30) Anwendung findet. Durch die mechanische Belastung verschieben sich die Bereiche der Besetzungsdichte. Diese lassen sich empirisch mittels Mikroskopaufnahmen im Grundzustand und unter Last ermitteln. Anhand der in der Prozessuntersuchung in Kapitel 3 gemessenen Partikelverteilung erfolgt eine unterschiedliche Gewichtung der Zonen des Gitters und die anisotrope Simulation der Perkolation. Neben der Perkulationsgrenze und der Auswirkung auf den elektrischen Widerstand wird die Zusammenhangslänge des perkolierenden Clusters k_z für die Auswertung erfasst, die je nach Orientierung der gedruckten Bahn variiert.

Um eine numerische Betrachtung mit entsprechendem Stichprobenumfang zu ermöglichen, wird der Zusammenhang mittels einer Monte-Carlo-Simulation nachgebildet und im Folgenden untersucht. Für die Aufstellung des Perkulationsmodells der heterogen gestalteten Elektroden wird mittels „MATLAB (2019 a)“ von MathWorks (2019) die zufällige Besetzung unterschiedlicher Systemkonfigurationen simuliert.

Herleitung des Perkulationsmodells anhand empirischer Analysen

In der Perkolationstheorie hat die Gitterstruktur einen signifikanten Einfluss auf die Perkulationsgrenze. Da die genutzten Graphenpartikel jedoch geometrisch unbestimmt sind, wird die Struktur angenähert. Die modellierte Geometrie nutzt daher ein quadratisches Gitter mit Kantenlänge $L = 100$. Der Zusammenhang der mittleren Besetzungsdichte in Abhängigkeit des Bahnabstands und der mechanischen Dehnung geht aus der Prozessstudie in Kapitel 3.2.3 hervor und ist in Bild 38 gezeigt. Anhand von Bildern, die mit dem Durchlichtmikroskop (Kern OBE 114) aufgenommen sind, wird für jeden Abschnitt eine gemittelte Partikeldichte festgelegt. Diese wird als Gewichtung in das Modell übernommen. Die Datenpunkte

werden den Zonen des heterogenen Perkolationsgitters zugeordnet, für die zufällige Besetzungen simuliert werden.

Die Gewichtung der einzelnen Gitterpositionen wird in der vorliegenden Simulation in Abhängigkeit von Bereich, Dehnungszustand, Nachbarn und Richtung der Nachbarn betrachtet. Die Bereiche stellen Zonen auf oder zwischen den Linien dar, weshalb Nachbarn, die in parallel zum Druckmuster verlaufender Richtung liegen, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit besetzt sind als senkrecht dazu liegende. Basierend auf der Streuung der empirisch ermittelten Besetzungsdichten werden in der vorliegenden Dissertationsschrift in Abhängigkeit des Bahnabstands bis zu drei Zonen unterschieden. Die in Bild 64 dargestellten Wahrscheinlichkeiten bilden den unbelasteten Zustand ab, der über Gleichung (30) mit der Deformation verknüpft werden kann.

Der Vergleich der Mikroskopaufnahme mit dem nachgebildeten anisotropen Gitter zeigt die Richtungsabhängigkeit der sich ausbildenden leitfähigen Pfade. Die Gegenüberstellung ist in Bild 64 gezeigt, wobei die einzelnen Cluster der Simulation in unterschiedlichen Farben dargestellt sind. Durch die hohe Partikeldichte in der Mitte der gedruckten Bahn folgt die Zusammenhangslänge entlang der Druckrichtung: $k_{\xi\parallel} = L$. Wohingegen sich $k_{\xi\perp}$ in Abhängigkeit des Bahnabstandes verändert. In Bild 64 liegt die mittlere Zusammenhangslänge $k_{\xi\perp}$ bei $40,25 \pm 17,48$ und zeigt durch die zufällige Besetzung große Schwankungen.

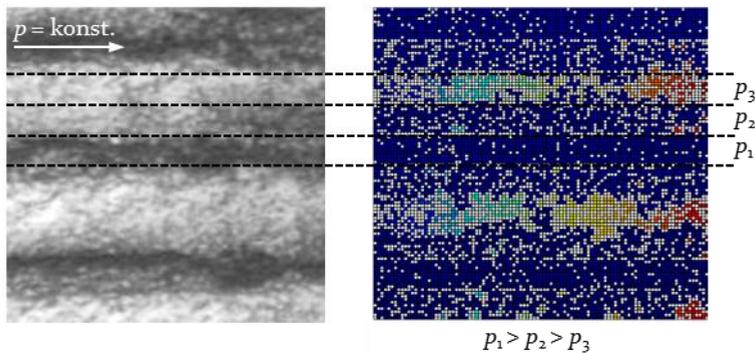


Bild 64: Gegenüberstellung einer Mikroskopaufnahme einer gedruckten Graphenelektrode (links) mit der abgeleiteten Gewichtung für die Simulation des perkolierenden Clusters (rechts) ($d_B = 250 \mu\text{m}$, $n_L = 4$; $L = 100$)

6.2.2 Zielgrößenoptimierung für gerichtete Perkulationscluster

Für die Nutzung der anisotropen DES sind der lineare Messbereich und die Ausprägung der messbaren elektrischen Signalunterschiede in Abhängigkeit der Besetzungsdichte ausschlaggebend. Daher erfolgt die Zielgrößenoptimierung im Hinblick auf diese Kenngrößen anhand der in Kapitel 6.2.1 konzipierten Monte-Carlo-Simulation für anisotrope Perkulationsgitter.

Die Simulation in Bild 65 (links) zeigt, dass sich für den Betrachtungsfall unter uniaxialer Dehnung ein Zusammenhang zwischen der Clustergröße und der Besetzungsdichte ergibt. Dabei wird der Phasenübergang bei einer Besetzungsdichte von rund 0,50 sichtbar, der ebenfalls in der Prozessstudie für uniaxial gedehnte Proben in Bild 37 auftritt. Für Werte oberhalb von 0,50 zeigt sich ein nahezu linearer Anstieg der Clustergröße. Unterhalb der Perkulationsgrenze von 0,20 entstehen kein perkolierendes Cluster mehr. Dies entspricht der empirisch ermittelten Perkolationsschwelle p_C von 0,20.

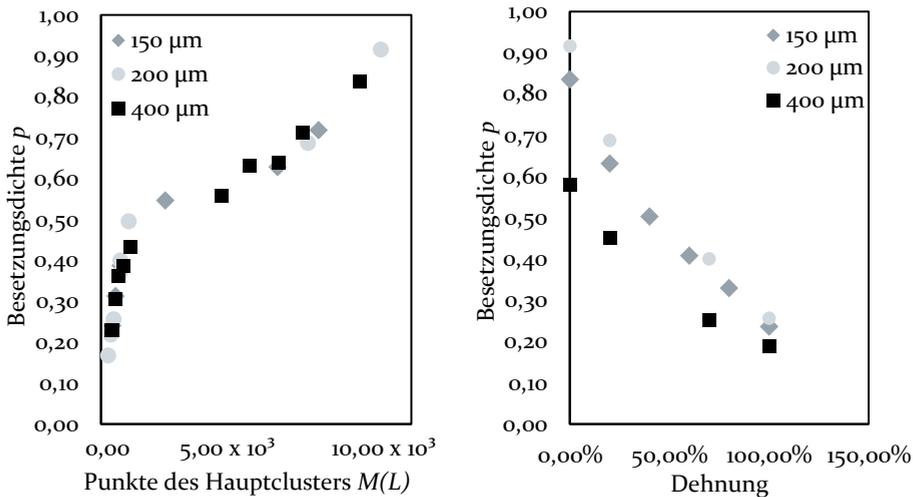


Bild 65: Modellierter Zusammenhang der absoluten Besetzungsdichten gegenüber dem funktional verbundenen Gitterpunkten, die über die Clustergröße dargestellt sind (links), Monte-Carlo-Simulation der mittleren Besetzungsdichte p in Abhängigkeit der Dehnung unter Annäherung an die Perkulationsgrenze p_C (rechts) ($L = 100$, $n = 30$)

Die Annäherung an die Perkulationsgrenze wird auch unter mechanischer Last durch die Betrachtung der simulierten Besetzungsdichte gegenüber der applizierten Dehnung ersichtlich und ist in Bild 65 (rechts) gezeigt. Die

Simulationsdaten zeigen höhere erreichbare Perkolationsdichten für geringere Bahnabstände und spiegeln das Verhalten aus der Prozessstudie in Kapitel 3.2.2 (vgl. Bild 38 (links)) wider. Mathematisch lassen sich die Zusammenhänge über die Gleichungen (21) und (22) abbilden, aus denen die Leitfähigkeiten für verschiedene Lastrichtungen hervorgehen. Die Krümmung des beschreibenden Zusammenhangs wächst mit steigender Dehnung und ist stärker ausgeprägt bei größeren Bahnabständen. Für geringe Dehnungen können die Abhängigkeiten vereinfachend über lineares Verhalten angenähert werden.

Zudem können bei den anisotropen Elektroden richtungsabhängige Zusammenhangslängen der entstehenden Cluster bestimmt werden. Diese korrelieren mit dem Verhalten des elektrischen Widerstands unter uniaxialer Belastung. Die Abhängigkeit der senkrecht (\perp) und parallel (\parallel) zur Druckstrategie verlaufenden Clusterausdehnung von der mittleren Besetzungsdichte ist für verschieden Bahnabstände in Bild 66 (links) dargestellt. Dabei zeigt sich die Kausalität zwischen der Besetzungsdichte und den elektrischen Systemeigenschaften. Entlang der Ausrichtung parallel zur gedruckten Bahn, die eine konstante Besetzungsdichte p besitzt, ergeben sich höhere Zusammenhangslängen bei geringerer mittlerer Besetzungsdichte. Demnach korreliert die Zusammenhangslänge mit der elektrischen Leitfähigkeit. Die Unterschiede zwischen den räumlich orientierten Zusammenhangslängen bilden die Richtungsabhängigkeit der elektrischen Signale unter uniaxialer Zugbelastung nach.

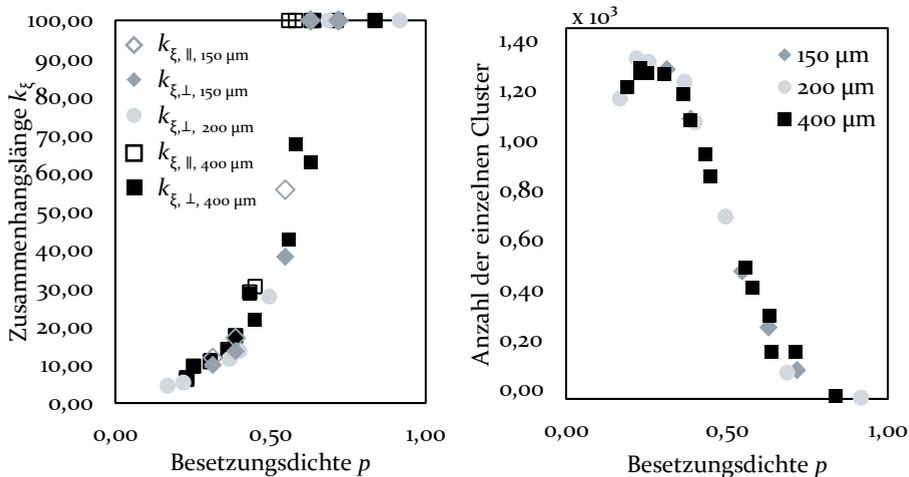


Bild 66: Simulative Betrachtung der gerichteten Zusammenhangslängen der Cluster von anisotropen Partikelelektroden mit unterschiedlichen Bahnabständen (links), Anzahl der separaten Partikelcluster bei steigender Besetzungsdichte (rechts) ($L = 100, n = 30$)

Da die gemittelte Besetzungsdichte bei heterogenen Clustern keinen eindeutigen Aufschluss über die tatsächliche Leitfähigkeit gibt [142], muss die Richtung ebenfalls in die mathematische Beschreibung einbezogen werden. Die in Kapitel 3.2.3 empirisch ermittelten richtungsabhängigen kritischen Exponenten stellen dabei eine Mittelung dar, die unter Betrachtung der jeweiligen Fertigungsparameter spezifisch angepasst werden können.

Zudem kann mit dem Modell die funktionale Fläche der Elektroden abgeschätzt werden. Die Dehnung führt zur Separierung der Cluster, wodurch diese einzelnen Partikelagglomerate bilden. Dadurch besteht teils keine Verbindung zwischen einzelnen Clustern und der Versorgungsspannung. Diese separierten Anteile der Elektrode erfüllen somit keine ladungsspeichernde Funktion. Bild 66 (rechts) stellt die Anzahl an separaten Clustern in Abhängigkeit der mittleren Besetzung und des Bahnabstands dar. Dabei zeigt sich kein signifikanter Einfluss durch die Fertigungsstrategie im Ruhezustand.

Die steigende Anzahl kleinerer Cluster bei geringerer Besetzungsdichte bestätigt das Verhalten der Kapazität aus Kapitel 3. Die tatsächliche Elektrodenfläche weicht von der Geometrie ab, da die Cluster nicht zwangsläufig elektrisch leitfähige Verbindungen ausbilden. Dadurch zeigt sich die Abhängigkeit von den funktionalen Anteilen des Partikelgefüges. Der Vergleich von Bild 65 (links) und Bild 66 (rechts) zeigt, dass die Besetzungsdichte und die Zusammenhangslänge der Hauptcluster sowie der Anzahl sich bildender Cluster nicht linear sind, sondern durch Potenzfunktionen angenähert werden können.

Die Simulation bestätigt die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 6.1. Durch die Monte-Carlo-Simulation kann die anisotrope Besetzungsdichte simulativ anhand zufälliger Besetzungsdichten der Perkolationscluster evaluiert werden. Die erfassten Kennlinien stellen die Grundlage zur Betrachtung des Systemverhaltens dar und ermöglichen die Gegenüberstellung mit den praktischen Versuchsdaten in Kapitel 7. Zur Beantwortung der Forschungsfrage nach geeigneten Designrichtlinien werden die Erkenntnisse im folgenden Kapitel 6.3 zusammengefasst.

6.3 Gestaltungsrichtlinien für optimierte anisotrope Sensoren

Das Ladungsspeicherverhalten der Elektroden ist vom Partikelgefüge abhängig und bestimmt die Nutzbarkeit der Sensoren. Durch die modifi-

zierte Monte-Carlo-Simulation kann die dehnungsabhängige Besetzungsdichte simuliert werden, um anisotrope DES für verschiedene Fälle auslegen zu können. Die Simulation stimmt mit den Zusammenhängen aus Gleichung (21) und (22) überein, die die Besetzungsdichte mit dem elektrischen Widerstand verknüpfen. Mit Hilfe der richtungsabhängigen kritischen Exponenten werden Lastrichtung und Fertigungsparameter in der mathematischen Beschreibung berücksichtigt.

Der lineare Messbereich eignet sich vornehmlich für die zuverlässige Auswertung der elektrischen Kennwerte. Zur Nutzung des anisotropen Verhaltens des heterogenen Perkulationsclusters müssen die Werte deshalb hinsichtlich einer hohen Besetzungsdichte optimiert werden. Die Simulation zeigt einen weiteren Phasenübergang bei einer Besetzungsdichte von 0,50, weshalb Werte $\gg 0,50$ eingestellt werden müssen, um einen möglichst großen linearen Messbereich zu erhalten. Die Größe des linearen Bereichs ergibt sich aus der Simulation in Abhängigkeit der Besetzungsdichte der unbelasteten Elektrode. Der Bereich kann durch den Wendepunkt der beschreibenden Funktion angenähert werden. Eine Abschätzung des linearen Bereichs kann durch Gleichung (31) erfolgen. Dieser liegt für Elektroden mit einem Bahnabstand von 150,00 μm und einer parallel belasteten Druckstrategie beispielsweise bei rund 80,00 % Dehnung.

$$\frac{p(0,2) - p(0)}{0,5} = \lambda \quad (31)$$

Signifikant unterschiedliche Messsignale lassen sich über unterschiedliche Druckrichtungen und Bahnabstände einstellen. Die anisotrope Auslegung der DES über die Bahnabstände führt zu richtungsabhängigen Effekten, die sich in den Zusammenhangslängen k_{ξ} der Perkulationscluster widerspiegeln. Die Clusterdimension parallel zum gedruckten Muster bildet dadurch bereits bei geringeren Besetzungsdichten p einen perkolierenden Pfad. Dieser steilere Anstieg der Zusammenhangslänge $k_{\xi,\parallel}$ ist in Bild 66 gezeigt. Daraus folgen die unterschiedlichen elektrischen Messwerte in Abhängigkeit der Lastrichtung, die in den anisotropen DES genutzt werden sollen. In die Gleichungen (21) und (22) fließen diese über die richtungsabhängigen kritischen Exponenten ein. Die größten Signalunterschiede werden bei großen Bahnabständen und 90° versetzten Druckstrategien erzeugt.

Die Bahnabstände müssen jedoch das erste Designparadigma für Besetzungsdichten $\gg 0,50$ erfüllen, da die Deformation von DES unterhalb dieser Besetzungsdichte zu einer frühzeitigen Isolation von Partikelclustern führt. Diese ist durch die steigende Anzahl an Einzelclustern nachweisbar. Dadurch wird wiederum die Ladungsspeicherung beeinflusst. Auch hier

bestätigt sich der nicht lineare Zusammenhang für die dehnungsabhängige Kapazität aus Gleichung (23). Die Simulationswerte in 6.2 verdeutlichen den Einfluss der prozessabhängigen Besetzungsdichte. Für die Betrachtung der Kapazität kann die heterogene Struktur der Besetzungsdichte über eine homogene Besetzung gemittelt und somit die modellhafte Betrachtung vereinfacht werden. Dies bestätigt die Zusammenhänge aus der Parameterstudie. Die Kapazität ist daher in den vorliegenden DES vom elektrischen Widerstand der Elektrode abhängig, der indirekt durch Material oder Fertigung bestimmt wird.

Die modellhafte Beschreibung zeigt die Perkulationswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Dehnungszustands auf, womit sich die Forschungsfrage nach den Zusammenhängen der richtungsabhängigen Signale vom jeweiligen Designparadigma modellbasiert beantworten lässt. Die theoretischen Überlegungen lassen sich durch die Simulation bestätigen, wodurch sich aus der Kombination der Systemparameter ein anisotropes Sensorkonzept erstellen lässt. Im folgenden Abschnitt werden Proben unter Verwendung der Fertigungsparameter aus Kapitel 3.2 hergestellt. Anschließend werden diese Proben unter mechanischer Last analysiert und empirisch charakterisiert, um die Kausalitäten im realen System bestimmen zu können.

7 Experimentelle Charakterisierung anisotroper dielektrischer Elastomersensoren

Der neuartige Ansatz basierend auf morphologischer Intelligenz kann zur Parallelisierung der Messsignalauswertung genutzt werden. Im Gegensatz zum sequenziellen Aufbau typischer Algorithmen geht die Information dadurch simultan aus den Messsignalen hervor. Dazu wird die in Kapitel 6.1 ermittelte Abhängigkeit der resistiven Signalanteile von der gewählten Druckstrategie genutzt. Die heterogene Struktur steigert die Informationsdichte innerhalb einer Sensorlage. Daraus folgen unterschiedlich ausgeprägte Signale in Abhängigkeit der Druckrichtung, die Richtung und Amplitude der Last charakterisieren. Die gleichzeitige Betrachtung und der Vergleich mehrerer Signale ermöglicht die Identifikation zusätzlicher Systemgrößen, die bei herkömmlichen dielektrischen Elastomersensoren (DES) nur durch die Kombination mehrerer Systeme erfasst werden können.

7.1 Evaluierung der anisotropen Sensorsignale

Um den Zusammenhang der simulierten Abhängigkeiten des Flächenwiderstands und der Kapazität von der Besetzungsdichte zu verifizieren, werden Proben mittels Aerosol-Jet-Druck (AJP) gefertigt und analysiert. Die Prozessparameter zur heterogenen Gestaltung der Elektroden der DES, der Bahnabstand und die Druckstrategie, werden variiert und die elektrischen Signale anschließend charakterisiert. Zunächst erfolgt die Betrachtung der kapazitiven und resistiven Signalanteile unter Zugbeanspruchung und die Untersuchung charakteristischer Merkmale für Amplitude und Richtung der Last. Anschließend werden die Signale für eine erhöhte Informationsdichte auch unter verschiedenen Belastungsarten untersucht und die erzielbaren Eigenschaften bewertet. Abschließen erfolgt die Übertragung des Messprinzips auf den praktischen Anwendungsfall zur Detektion unterschiedlicher Handgelenksorientierungen.

Die untersuchten Systeme bestehen aus zwei kongruenten Elektroden und weisen eine 90° versetzte Druckstrategie auf, die mit unterschiedlichen Belastungsarten und Belastungsgrößen beaufschlagt werden. Um verschiedene Signale zu erzeugen, wird das System uniaxialen Zugversuchen unterzogen. Dabei erfolgt Erfassung der Größe der mechanischen Deformation parallel über kapazitive und richtungsabhängige resistive Signalanteile.

Dafür wird das LCR-Meter (Rhode & Schwarz HM8118) über Aluminiumkontakte an die Partikelelektroden angeschlossen. Zur Adhäsion auf der Oberfläche und der elektrischen Verbindung dient eine Zwischenschicht aus Grafitfett. Die Aluminiumkontakte werden so platziert, dass diese mechanisch durch die Einspannklemmen fixiert sind, um bewegungsbedingte Messartefakte zu vermeiden. Weiterhin sind die Kontaktstellen mit $5,00 \times 10^3 \mu\text{m}$ auf $5,00 \times 10^3 \mu\text{m}$ so großflächig gewählt, dass mehrere der gedruckten Bahnen unabhängig von der Druckstrategie miteinander verbunden werden. Der Messaufbau ist schematisch in Bild 67 dargestellt.

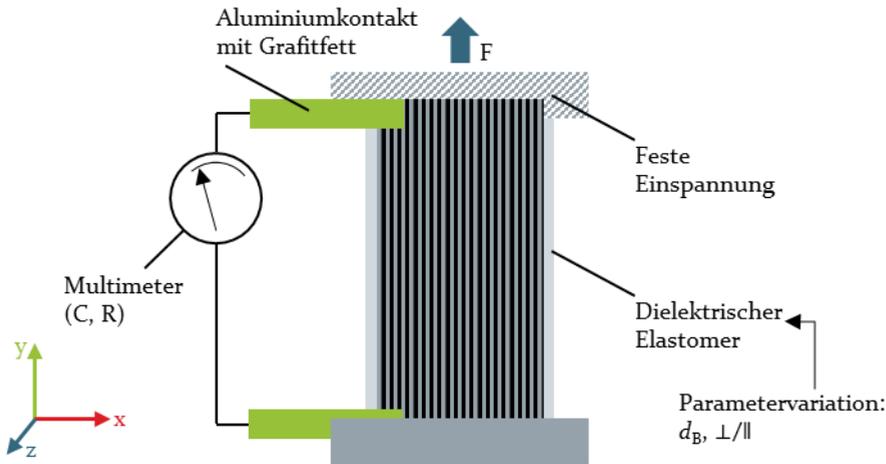


Bild 67: Schematische Darstellung des Messaufbaus für anisotrope DES unter uniaxialer mechanischer Belastung

7.1.1 Funktionsüberlagerte Sensorelemente für gesteigerte Informationsdichten

Aus der Simulation in Kapitel 6.2 geht hervor, dass der lineare Messbereich für geringe Dehnungen von der initialen Besetzungsdichte der Elektroden abhängig ist. Bei $150,00 \mu\text{m}$ Bahnabstand zeigt sich nach Gleichung (31) nahezu lineares Verhalten bis rund $80,00 \%$ Dehnung, wobei der richtungsabhängige Effekt durch die großen Überlappungsbereiche der gedruckten Bahnen kompensiert wird. Der nicht lineare Bereich der DES beginnt, sobald die gemittelte Besetzungsdichte $p < 0,60$ ist und die Steigung der Kurve zunimmt. Die Verzerrung des Perkolationsclusters in Abhängigkeit der Dehnung ist in Kapitel 3.2.3 (vgl. Bild 38 (links)) empirisch ermittelt. Das Verhalten der Elektroden mit $150,00 \mu\text{m}$ Bahnabstand ist in Bild 68 gezeigt.

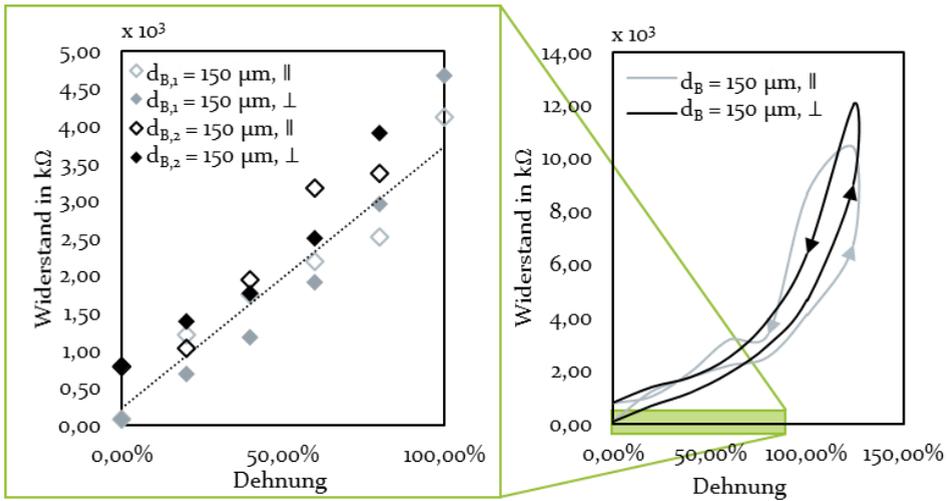


Bild 68: Resistive Messsignale für große Deformationsbereiche mit 150 μm Bahnabstand der Elektroden, wobei links für einen Dehnungsbereich bis 80 % lineares Verhalten zu beobachten ist ($n_L = 4, n = 4$)

Die Sensitivität des DES wird durch die Steigung der Messsignale bestimmt, die durch geringere initiale Besetzungsdichten zunimmt. Daher können die Fertigungsparameter genutzt werden, um die Signale in kleinen Messbereichen zu vergrößern. Der Zusammenhang der Simulation wird durch Bild 69 bestätigt. Darin erfolgt der Vergleich unterschiedlicher Bahnabstände. Diese werden mit den berechneten Werten aus Gleichung (21) und (22) verglichen. In Bild 69 zeigt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,65 zwischen den rechnerischen Werten und den Messwerten. Die Abweichungen können auf die kritischen Exponenten zurückgeführt werden, die über verschiedene Bahnabstände gemittelt sind.

Elektroden mit großen Bahnabständen von 400,00 μm besitzen kleinere Bereiche linearen Verhaltens, zeigen jedoch bereits bei kleinen Deformationen eine größere Steigung. Dies ermöglicht die eindeutige Zuordnung der Messsignale ohne zusätzliche Bauteile zur Signalverstärkung oder notwendiger Signalfilterung. Nach Gleichung (31) ergibt sich für die in Bild 70 gezeigten Daten ein linearer Messbereich bis rund 15,00 % Dehnung. Die Annäherung über ein lineares Verhalten erzielt dabei ein Bestimmtheitsmaß von 0,97.

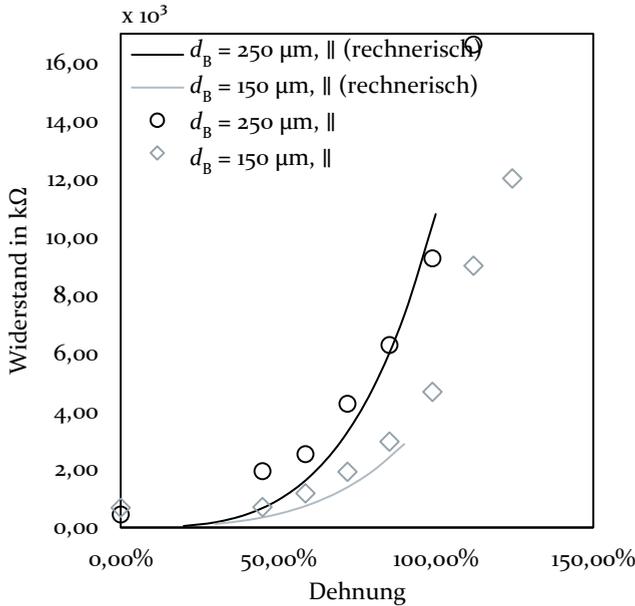


Bild 69: Zusammenhang der richtungsabhängigen Steigung der resistiven Messsignale im Vergleich zur berechneten Vorhersage ($n_L = 4$, $n = 4$)

Die Simulation der richtungsabhängigen Perkolationscluster in Kapitel 6.2.2 zeigt die richtungsabhängigen Clusterdimensionen. Aus den Zusammenhangslängen senkrecht zueinander orientierter Raumrichtungen resultieren die unterschiedlichen Steigungen. Für die Raumrichtung entlang (||) der gedruckten Bahnen zeigt der Graph in Bild 70 einen weniger steilen Anstieg. Dabei verringern sich die Zusammenhangslängen in geringerem Maße, wodurch das durchgängige Perkolationscluster, welches für den Ladungstransport verantwortlich ist, erhalten bleibt. Die Simulation zeigt für den linearen Bereich ein Verhältnis der senkrecht und parallel orientierten Zusammenhangslängen von $\frac{k_{\xi,\perp}}{k_{\xi,\parallel}} \sim 0,70$. Die Richtungsabhängigkeit wird über die kritischen Exponenten in die analytische Betrachtung einbezogen.

Für die kapazitiven Signalanteile zeigt sich in Kapitel 3.2.1 keine direkte Richtungsabhängigkeit der Signale. Dies wird durch die Simulation bestätigt. Jedoch hängt die Kapazität von der Besetzungsdichte der Elektroden ab. Durch die Verteilung der Cluster in Abhängigkeit des Dehnungszustands analog zu Gleichung (23), kommt es zu einem inversen Verhalten, bei dem die Kapazität bei steigender Fläche aufgrund des Elektrodenwiderstands abnimmt. Die Separation leitender Pfade führt zu einer reduzierten

Leitfähigkeit und zum Wegfall einzelner Cluster, die der Ladungsspeicherung dienen. Die Kapazität wird dabei durch den höchsten Elektrodenwiderstand beeinflusst, der wiederum einer Richtungsabhängigkeit unterliegt. Da die Elektroden bei Druckbelastungen einen anderen Spannungszustand erfahren als unter uniaxialem Zug, verhalten sich die messbaren Elektrodenwiderstände ebenfalls abweichend je nach wirkender Lastart. Im Folgenden wird daher die Kapazität als Entscheidungskriterium für die Unterscheidung von unterschiedlichen Lastarten herangezogen.

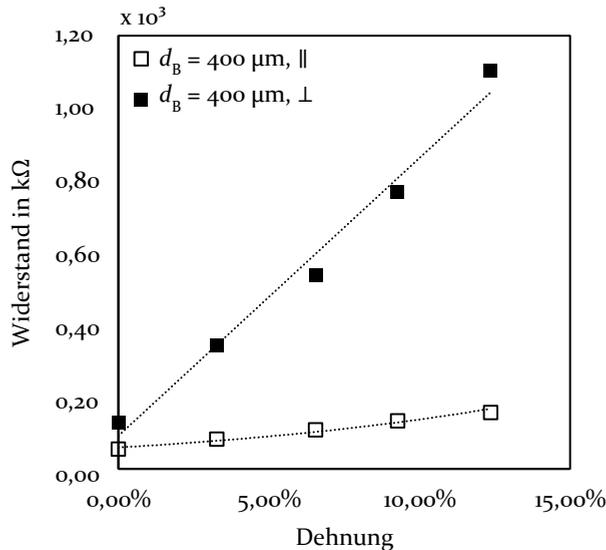


Bild 70: Abhängigkeit der richtungsabhängigen Steigung der resistiven Messsignale im linearen Wertebereich ($n_L = 4$, $n = 4$)

7.1.2 Charakterisierung von unterschiedlichen Lastrichtungen

Zusätzlich zur Detektion von Amplitude und Richtung der mechanischen Kraft, die in Kapitel 7.1.1 anhand der elektrischen Widerstände erfolgt, können biaxiale Lastzustände unterschieden werden. Basierend auf der Charakterisierung der Signalverhältnissen und charakteristischen Mustern. Während beim bisher betrachteten uniaxialen Zugversuch große Differenzen zwischen den unterschiedlichen Druckmustern auftreten, sind diese für biaxiale Kräfte und Drücke geringer. Dieser Effekt ist auf die gleichmäßige biaxiale Deformation beider Elektroden zurückzuführen. Jedoch besitzen die Kombinationen der einzelnen Signalanteile charakteristische

Muster, die auf die Eigenschaften der applizierten Last abbildbar sind. Dadurch sind Rückschlüsse auf Art und Richtung der Deformation möglich. Die qualitative Untersuchung in Bild 72 zeigen das richtungsabhängige Verhalten der DES unter Einwirkung verschiedener Lastrichtungen.

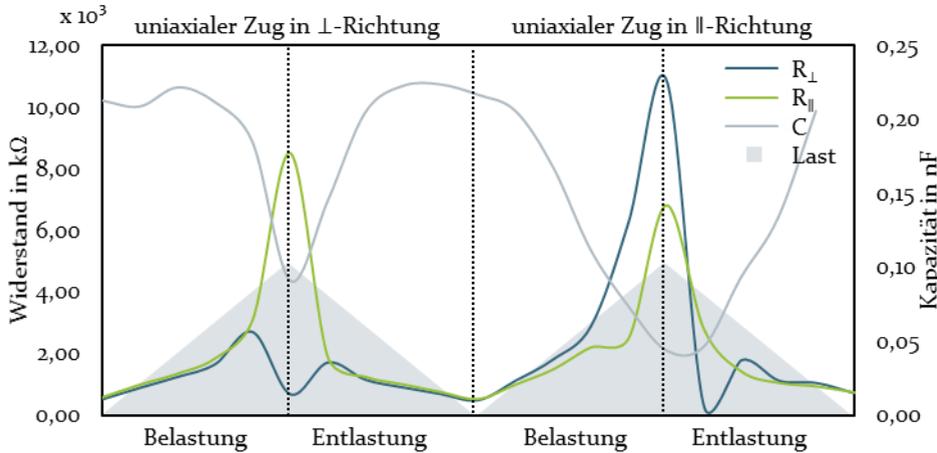


Bild 71: Vergleich der Signale für die kapazitive Erfassung der mechanischen Dehnung im Vergleich zu richtungsabhängigen resistiven Signalanteilen ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$)

Für die qualitative Betrachtung der Belastungsrichtung kann neben den linearen Messbereichen insbesondere auf die nicht linearen Bereiche zurückgegriffen werden. In Bild 71 werden die Signalamplituden zweier 90° orientierter Elektroden analysiert, die uniaxiale Dehnungen um $100,00\%$ erfahren. Dabei zeigt sich, dass die Unterscheidung zweier uniaxialer Kräfte bei geringen Dehnungen nicht zweifelsfrei detektiert werden kann. Bei den vorliegenden Proben ist dies erst ab rund $10,00\%$ Dehnung möglich. Daher bietet eine Kombination aus verschiedenen Elektroden das Potenzial, eine größere Heterogenität und eine vielfältigere Signalerfassung zu ermöglichen. Durch die Beobachtungen wird gezeigt, dass die Sensorsignale für unterschiedliche Zugrichtungen variieren und somit zusätzlich zur Dehnungsamplitude Informationen über die Richtung der anliegenden Kraft liefern. Die in Gleichung (21) und (22) beschriebenen Zusammenhänge charakterisieren die Wechselwirkungen im DES und beantworten den ersten Teil der fünften Forschungsfrage zur Unterscheidung der richtungsabhängigen Sensorsignale.

Die Kapazität zeigt einen Zusammenhang mit dem Anstieg des Elektrodenwiderstands. Für größere Widerstandsveränderungen können größere

Verluste in der gemessenen Kapazität detektiert werden. Bild 71 veranschaulicht die negative Proportionalität der Signalamplituden. Das Verhalten kann durch das in Kapitel 2.1.2 beschriebene Ersatzschaltbild für DES begründet werden, welches den Elektrodenwiderstand in Serie zur Kapazität zeigt.

Der biaxiale Zugversuch unterscheidet sich durch einen Anstieg des Widerstands beider Elektroden vom Uniaxialen (vgl. Bild 72). Der Graph zeigt eine stufenartige Struktur, die sich auch in der Kapazität widerspiegelt. Dieser Effekt ist durch den sprunghaften Anstieg des Elektrodenwiderstands oberhalb von 0,50, der in beiden Elektroden gleichzeitig auftritt, begründbar. Dem gegenüber führt eine gleich große Druckbelastung kaum zu einer Veränderung des elektrischen Widerstands. Dies ist auf die geringe Dicke des Dielektrikums und folglich auf die geringe Elektrodendeformation zurückzuführen [99]. Unabhängig von der Lastamplitude kommt es unter Drucklasten zu einer geringeren Deformation der zufälligen Partikelverteilung. Dadurch bleiben die Cluster in Verbindung, wodurch der Elektrodenwiderstand und die Kapazitäten nahezu unverändert bleiben.

Das Steigungsverhältnis der Signale ist auch ein Maß für diagonal applizierte Kräfte. Für diese Unterscheidung eignen sich insbesondere Elektroden mit möglichst identischem Eingangswiderstand, um andere Einflüsse auf das Verhalten der Elektrode auszuschließen. Als allgemeingültige Zusammenhänge können die Steigungsverhältnisse über Gleichung (21) und (22) berechnet werden.

Zusätzlich gibt der zeitliche Verlauf der Signale Aufschluss über die applizierte Belastungsart. In Bild 71 zeigen sich überhöhte Spitzenwert, die in der Literatur als „shoulder“-Phänomen bezeichnet werden. Der Effekt ist auf die viskoelastischen Materialeigenschaften bei mechanischer Deformation zurückzuführen. [143] Diese überhöhten Messwerte werden insbesondere während statischer Lastphasen sichtbar. Bei einer Veränderung des Lastzustandes resultieren demnach individuelle Kurvenverläufe, die jede Belastungsart charakterisieren.

Die Analysen zeigen, dass eine Anpassung des DES auf den Anwendungsfall erfolgen muss, um eine optimale Signalqualität zu erhalten. Durch heterogene DES mit multiplen Elektroden kann eine gesteigerte Signaldichte erreicht werden, durch die sich mechanischen Lasten ganzheitlich charakterisieren lassen. Die Funktionalisierung wird dabei über unterschiedliche

Leitfähigkeiten und Orientierungen in das System eingebracht. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse mit den Simulationsdaten verglichen und auf konkrete Designparameter für heterogene Systeme abgebildet.

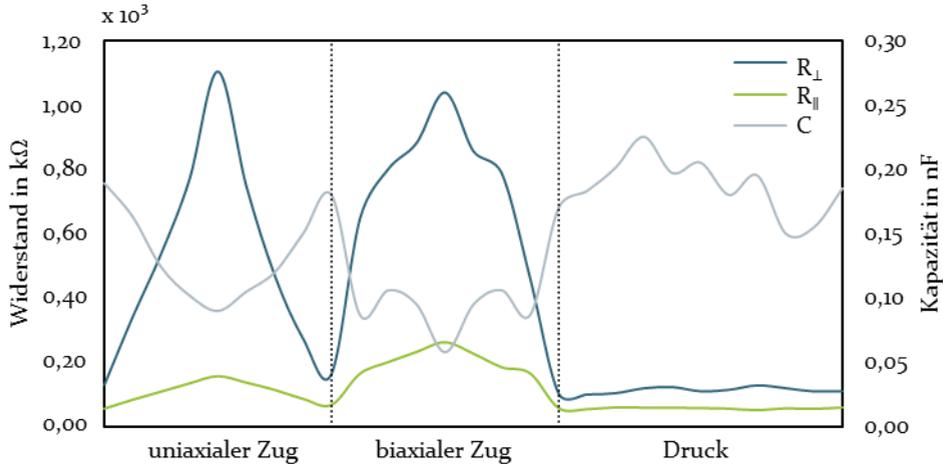


Bild 72: Qualitative Gegenüberstellung von uniaxialen, biaxialen Zug- und Druckkräften zur Unterscheidung verschiedener Belastungsarten ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$)

Die fünfte Forschungsfrage kann durch die Unterscheidung verschiedener Lastzustände über die Kombination mehrerer Messsignale vollständig beantwortet werden. Es kann gezeigt werden, dass mit den anisotropen DES eine applizierte Kraft ganzheitlich über ein einzelnes anisotropes Sensorelement charakterisiert werden kann. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst. Anhand der theoretischen und praktischen Daten lassen sich Designrichtlinien für die anisotropen DES aufstellen.

7.1.3 Schlussfolgerung für optimierte anisotrope Sensoren

In der vorliegenden Dissertationsschrift können erstmals gezielte Anisotropien in AJP gedruckte Elektroden eingebracht werden. Die Betrachtung der richtungsabhängigen Signale bestätigt die Simulation der heterogenen Perkolationscluster. Im linearen Bereich lässt sich die Amplitude der mechanischen Dehnung über die positive Korrelation zwischen Besetzungsdichte und Dehnung herleiten. Die Steigung der Funktion steigt mit größer werdendem Bahnabstand und größerem initialen Elektrodenwiderstand. Jedoch verhält sich der lineare Messbereich invers zum Bahnabstand, wodurch der Wendepunkt der Potenzfunktion bei großen Bahnabständen

bereits bei geringeren Dehnungen auftritt. Die Größe des linearen Messbereichs lässt sich über Gleichung (31) annähern. Dabei decken sich die Beobachtungen der praktischen Versuche mit den Simulationsergebnissen aus dem vorherigen Kapitel 6.2.

Die beste Unterscheidbarkeit der Messsignale ermöglichen senkrecht zueinander ausgerichtete Bahnstrukturen. Sowohl die praktischen Tests als auch die Simulation bestätigen eine eindeutige Unterscheidung zwischen Beanspruchungsart, Richtungen und Amplituden. Die erfasste Kapazität ermöglicht dabei die Unterscheidung zwischen Zug- und Drucklasten, da die Separierung der Partikel unter Druck einen geringeren Effekt auf den elektrischen Widerstand hat.

Je nach Höhe der Belastung kann zudem der Bahnabstand variiert werden. Dieser ermöglicht eine hohe Sensitivität für kleine Geometrieänderungen und beeinflusst das Verhalten der Kapazität. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, müssen die Elektroden möglichst identische Eingangswiderstände besitzen. Hohe Widerstandswerte nahe der Perkolationsgrenze zeigen einen steileren Signalverlauf. Durch die Separierung der Partikelagglomerate wird die verfügbare Fläche zur Ladungsspeicherung reduziert, wodurch die Kapazität verringert wird. Daraus folgt eine material- und prozessseitige Abhängigkeit, die zu Messfehlern führen kann. Die Zusammenhänge für uniaxiale Lasten können dabei anhand von Gleichung (21) und (22) bestimmt werden. Dabei stellen die empirisch ermittelten kritischen Exponenten einen richtungsabhängigen Mittelwert zwischen verschiedenen Bahnabständen dar. Eine genauere Betrachtung kann durch die Ermittlung prozessspezifischer, richtungsabhängiger kritischer Exponenten erfolgen.

Abschließend kann die fünfte Forschungsfrage positiv beantwortet werden, da aus der Untersuchung der simulierten Systeme hervorgeht, dass durch die heterogenen Elektroden die Auswertung der Größe und der Richtung der Last möglich ist. Dieser Zusammenhang kann durch die praktischen Versuche bestätigt werden. Dabei kann durch eine rein qualitative Bewertung eine Aussage über die Richtung einer angreifenden mechanischen Kraft erfolgen. Dadurch wird der Stand der Technik um eine Methode zur gezielten Herstellung und Auswertung anisotropen Verhaltens erweitert.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse auf das praktische Anwendungsbeispiel der Analyse der Handgelenksbewegung übertragen. Auch hier wird die Signalamplitude quantitativ genutzt, um die Höhe der Kraft auszuwerten. Durch die qualitative Signalanalyse wird zusätzlich die Richtung der Gelenksbewegung bestimmt.

7.2 Praktische Evaluierung anisotroper dielektrischer Elastomersensoren

Zu Beginn der Arbeit ist dargestellt, dass sich DES gut eignen, um die Bewegung des menschlichen Körpers abzubilden, da sie sich der dehnbaren Haut und den runden Konturen anpassen. In Analogie zur menschlichen Haut sind anisotrope DES nicht nur dehnbar, sondern besitzen durch ihren strukturellen Aufbau ebenfalls die Eigenschaft, mehr Informationen über eine Sensorlage zu detektieren. Dafür werden in Kapitel 7.1.1 und Kapitel 7.1.2 bereits die Abhängigkeit des Dehnverhaltens der elektrischen Eigenschaften von der Druckstrategie gezeigt. Um die Nutzbarkeit der anisotropen Systeme für die Bewegungserfassung zu evaluieren, erfolgt eine praktische Evaluation der mittels AJP gefertigten Sensorelemente. Damit werden sowohl die Gelenkwinkel als auch Berührung sowie die Amplitude der applizierten Kraft detektiert und unterschieden. Für eine optimierte Auslegung des DES wird die Bewegungsamplitude in Kapitel 7.2.1 anhand des menschlichen Bewegungsapparates hergeleitet. Daraus ergibt sich der Systemaufbau, der in Kapitel 7.2.2 praktisch evaluiert und in Kapitel 7.2.3 mit bestehenden Systemen verglichen wird.

7.2.1 Körpergetragene anisotrope Sensoren für die ganzheitliche Bewegungsdetektion

Durch einen einzelnen anisotropen DES wird zunächst die Unterscheidung verschiedener Belastungsarten ermöglicht. Von diesen werden die Zuglasten, die durch die Gelenkwinkelbewegung auftreten, näher betrachtet und Höhe sowie Richtung der Kraft charakterisiert. Um die Sensoren auf die Anforderungen eines Systems zur Bewegungserfassung anzupassen, werden die Gelenkwinkel des Bewegungsapparates herangezogen. Diese bedingen die maximale Auslenkung durch die Zuglast. Um mehrere Streckrichtungen gleichzeitig mit einem DES evaluieren zu können, wird der Bewegungsumfang des Handgelenks untersucht. Dabei ist die Charakterisierung von Winkel und Art der Bewegung in Flexion, Ulnarabduktion oder Radialabduktion mit einem einzelnen Sensor möglich. Der anatomische Bewegungsumfang beträgt maximal $-76,00^\circ$ bei der Flexion und reicht für die seitlichen Abduktionsbewegungen von $-22,00^\circ$ bis $36,00^\circ$ [144]. Durch die Bewegung der Haut kann die Längenänderung Δl nach [145] über die Winkel θ und γ und den Radius r des Rotationsgelenks bestimmt werden. Der Zusammenhang und die Berechnung sind in

Bild 73 veranschaulicht. Mit einem Radius von $2,39 \times 10^4 \mu\text{m}$ ergibt sich über die Gleichung (32) eine maximale Längenänderung des DES von $3,17 \times 10^4 \mu\text{m}$. Dies entspricht im vorliegenden Beispiel mit einer Ursprungslänge des Sensors von $6,00 \times 10^4 \mu\text{m}$ einer Streckung um 52,75 %.

$$\Delta l = r\theta \quad (32)$$

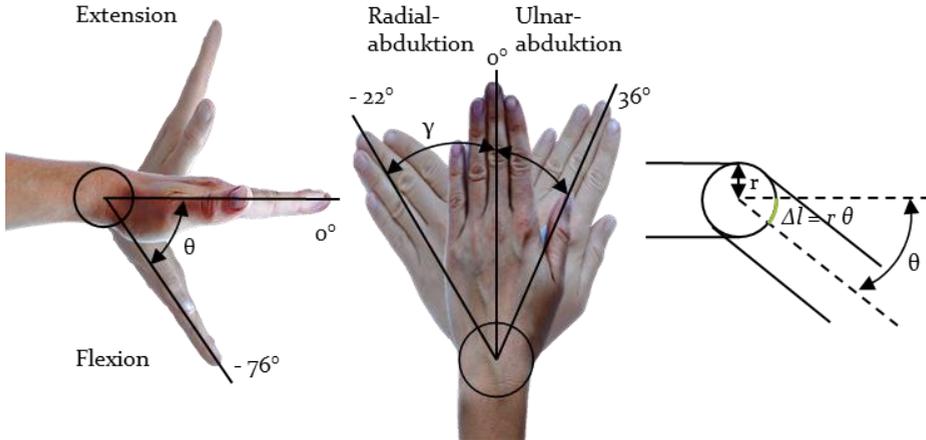


Bild 73: Bewegungsradius und Berechnung der resultierenden Deformation von rotatorischen Bewegungen des Handgelenks zur Evaluation der anisotropen DES

Die Flexion und die seitlichen Bewegungen führen zu unterschiedlich starken Deformationen der heterogenen Schichten des Sensors. Dadurch kann die Bewegungsart anhand der charakteristischen Signale ausgewertet werden. Die resistiven Signalanteile zeigen basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 7.1 die Richtung der Deformation an. Die Kombination mit kapazitiven Signalanteilen ermöglicht außerdem die Unterscheidung nach Art und Größe der Bewegung. Für die Auswertung der Signalamplituden können die Zusammenhänge aus den Gleichungen (21) und (22) herangezogen werden.

Aufgrund der eingeschränkten Bewegungsradien eignen sich Elektroden mit höherem initialen elektrischen Widerstand aus Kapitel 3.2.1, um signifikante Unterschiede der Signalamplituden bei Dehnungen unter 50,00 % zu ermöglichen. Die 90° versetzten Muster der Elektroden werden parallel und senkrecht zur langen Kante des Sensors angeordnet. Bei einem Bahnabstand von $400,00 \mu\text{m}$ beginnt der nicht lineare Bereich bereits ab rund 20,00 % Dehnung. Daher ist der richtungsabhängige Effekt eindeutig den resistiven Signalanteilen zuzuordnen. Die Größe der Dehnung kann in den Bereichen $< 20,00 \%$ Dehnung über eine lineare Annäherung erfolgen. Für

größere Deformationen erfolgt die Berechnung anhand von Gleichung (21) und (22). Die Auswertung von Größe und Richtung angreifender Kräfte mittels anisotroper DES ist ebenfalls in [P9] beschrieben.

7.2.2 Evaluierung der anisotropen Sensorsignale

Für die Evaluierung des anisotropen DES werden die Messungen mit einem LCR-Meter (Benning MM11) erfasst und die Gelenkwinkelpositionen optisch aufgezeichnet. Ein einzelner DES ist zur Signalerfassung in paralleler Ausrichtung auf der Oberseite des Handgelenks befestigt. Die Anbringung ist in Bild 75 gezeigt. Der DES besteht aus zwei Elektroden, deren Druckpfade um 90° versetzt gedruckt sind. Die mechanische Last wird über die Befestigung am Körper auf den Sensor übertragen. Die Auswertung der Lastrichtung erfolgt durch den Vergleich der Messsignale der anisotropen Elektroden. Der parallelisierte Informationsgewinn basiert auf dem Verhalten des Partikelgefüges, wodurch ein morphologisch intelligentes System entsteht.

Zunächst wird die Art der mechanischen Belastung anhand der charakteristischen resistiven Signalanteile identifiziert. Dafür kann der zeitliche Verlauf des Messsignals herangezogen werden. Druckbeanspruchungen führen durch das dünne Dielektrikum zu kleinen Deformationen und folglich geringen Signalamplituden, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben ist. Somit muss die Unterscheidung zwischen Zug- und Druckkräften unabhängig von der Höhe der applizierten Kraft erfolgen. Die Signalverläufe sind in Bild 74 gegenübergestellt.

Der charakteristische Zeitverlauf der resistiven Signalanteile zeigt einen sofortigen Anstieg des Elektrodenwiderstands bei Belastung. Bei einer Drucklast kommt es zu einem sprunghaften Anstieg und darauffolgend zum Angleichen an den statischen Deformationszustand. Die Sprungantwort überschreitet dabei die Signalamplitude der statischen Phase um bis zu 20,00 %. Bei Entlastung kehrt das System mit einer signifikanten Zeitverzögerung von $> 5,00$ s wegen der viskoelastischen Materialeigenschaften in den Ausgangszustand zurück. Durch eine uniaxiale Zugbeanspruchung wird das Perkolationscluster auf dem Elastomer stärker deformiert, wodurch die Signalamplitude den rechnerischen Wert signifikant übersteigt. Bei der uniaxialen Beanspruchung sind zwei Peaks zu erkennen, die durch die Überlagerung der viskoelastischen Materialeigenschaften und der Kompression des Perkolationsclusters auftreten. [146] Die elastische Rückkehr in den Ausgangszustand zeigt aufgrund der viskosen Anteile der mechanischen Eigenschaften ebenfalls eine Zeitverzögerung im Vergleich

zur Belastung, ist jedoch aufgrund des höheren Rückstellimpulses schneller als bei Druckkräften.

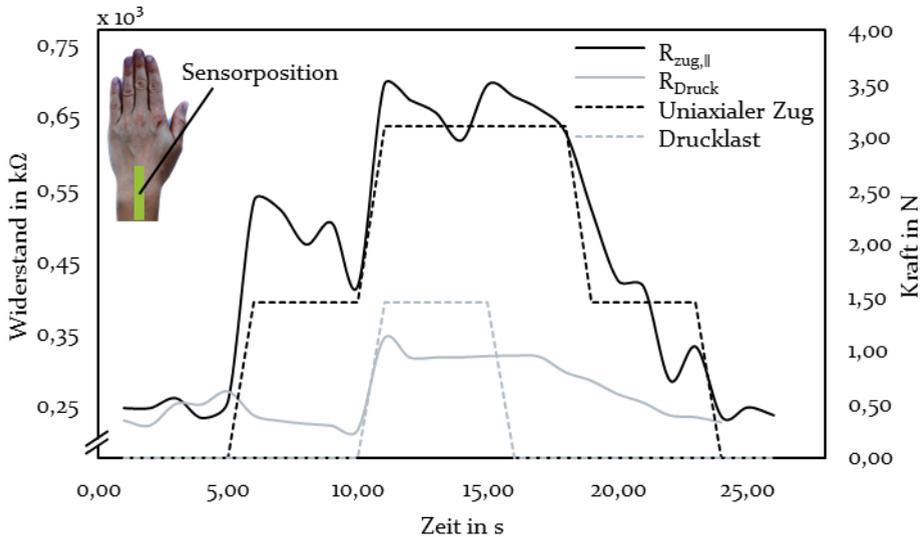


Bild 74: Zustandsauswertung unterschiedlicher Belastungsformen eines anisotropen DES durch resistive Signaleanteile ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $||$, $n = 2$)

Das Phänomen der auftretenden Signalspitzen ist in der Literatur beschrieben und von Mersch et al. [143, 146] für kohlenstoffgefüllte Werkstoffe simulativ betrachtet. Unter Zug folgt der resistive Signalanteil einem steilen Anstieg und einer zeitverzögerten Reduktion der Signalamplitude. Das Modell kombiniert die mechanischen Eigenschaften des Elastomers mit der auf das Perkolationscluster wirkenden Kompression, die aus der Inkompressibilität herrührt. Die experimentelle Untersuchung wird durch das Modell bestätigt, da sich der erste und zweite Hochpunkt mit steigender Dehnung angleichen (vgl. Bild 74).

Die Bewegungsrichtung einer uniaxialen Zuglast geht aus dem Vergleich der Signalamplituden hervor. Die Differenz der Elektrodenwiderstände nimmt dabei die größten Werte an, wenn eine Elektrode entlang und die andere senkrecht zur Bahnrichtung deformiert wird. Im vorliegenden Beispiel trifft dies auf die Flexion zu, was in Bild 76 grafisch dargestellt ist. Während der Abduktion in Bild 75 werden beide Elektroden in annähernd 45° versetzter Richtung deformiert, wodurch die linearen Zusammenhänge zwischen Dehnung und Elektrodenwiderstand identisch sind.

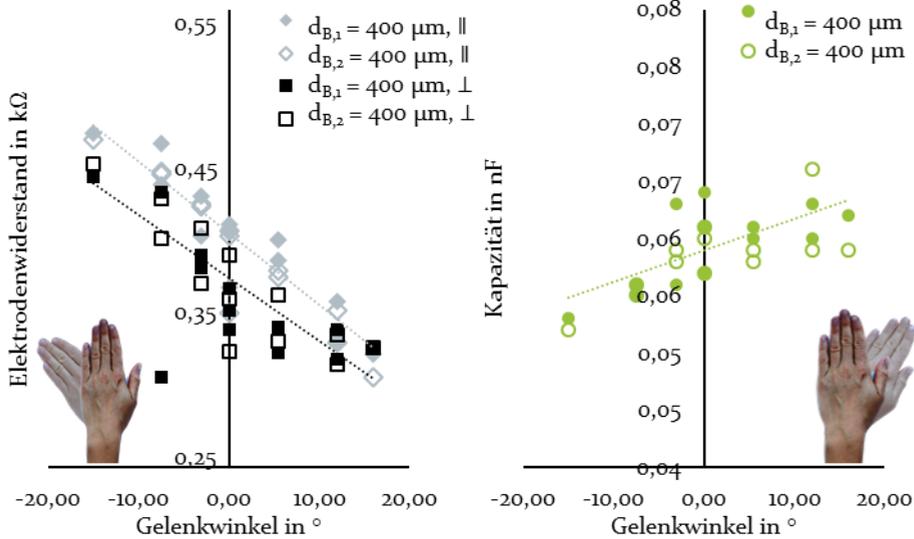


Bild 75: Richtungsabhängige Veränderung des Elektrodenwiderstands gegenüber der Kapazität bei Abduktionsbewegungen mit linearen Trendlinien ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$, $n = 6$)

Für die eindeutige Charakterisierung der Bewegungsrichtung wird daher die Kapazität herangezogen, die für die Ulnarabduktion höhere Werte aufzeigt. Die Reduktion der Kapazität bei der Radialabduktion ist auf das Ansteigen des elektrischen Widerstands zurückzuführen, das mit dem Separieren der Perkolationscluster einhergeht. Dies bedingt wiederum die Reduktion der zur Ladungsspeicherung verfügbaren Fläche. Die beschriebenen Zusammenhänge werden in Bild 75 veranschaulicht. Durch die in [61] gezeigte Wiederholgenauigkeit der mittels AJP gefertigten DES lässt sich die Genauigkeit anhand der Abweichungen zu den theoretischen Referenzwerten abschätzen. Die Messwerte der Ulnarabduktion zeigen dabei eine Abweichung von den theoretischen Werten von 4,65 %.

Für die geringen Deformationsbereiche der Abduktionen ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Widerstand und prozentualer Dehnung. Die Höhe der applizierten Kraft in nicht linearen Bereichen lässt sich für uniaxiale Zugbeanspruchungen aus Gleichung (21) und (22) berechnen. Für die gemessene Flexion ergibt sich über den Zusammenhang eine Abweichung von 3,99 % zwischen den rechnerischen und den gemessenen Werten, die auf die Materialeigenschaften der Elektroden zurückzuführen sind. Die Messkurven sind in Bild 76 dargestellt. Die Kapazität spiegelt das

Verhalten der simulierten Besetzungsdichte aus Bild 65 (links) wider. Dabei wird die sprunghafte Reduktion bei $25,00^\circ$, was rund 39,00 % Dehnung entspricht, ersichtlich.

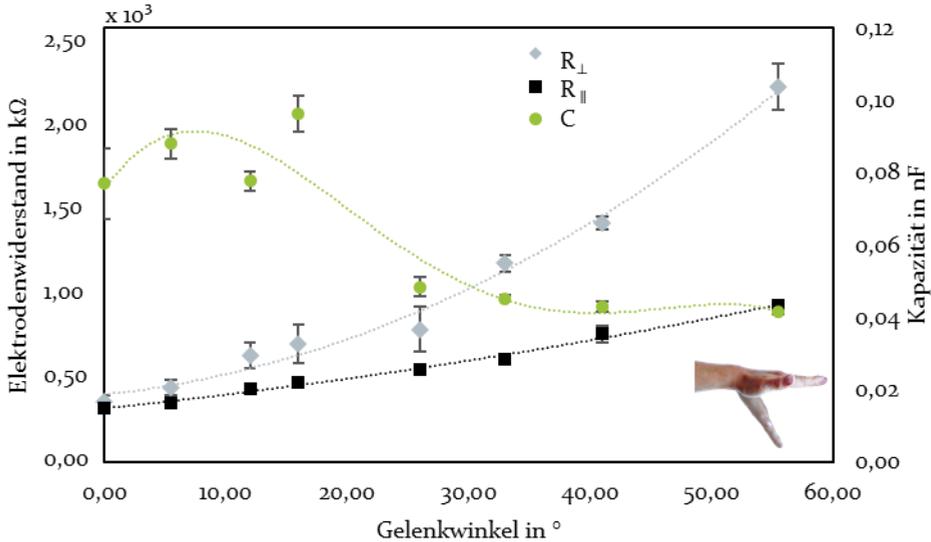


Bild 76: Signalverläufe für die Bewegungsrichtungen radiale und ulnare Abduktion sowie Flexion des Handgelenks inklusive der polynomischen Trendlinien ($n_L = 4$, $d_B = 400 \mu\text{m}$, $A = 1,20 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, $d = 100 \mu\text{m}$, $n = 6$)

Die Untersuchungen zeigen, dass mit nur einem anisotropen Sensorelement die vollständige Charakterisierung einer mechanischen Last möglich ist. Durch den Vergleich mit den theoretischen Werten der Regressionsanalyse kann die Genauigkeit zur Beurteilung der anisotropen DES evaluiert werden. Durch die experimentelle Charakterisierung wird gezeigt, dass die realen Systeme die simulierten Werte aus Kapitel 6.2.1 widerspiegeln. Die anisotropen DES werden im Folgenden mit anderen Technologien zur Gelenkwinkelbestimmung verglichen und die Potenziale diskutiert.

7.2.3 Validierung der resultierenden Systemeigenschaften

Die Erfassung von Bewegungen des menschlichen Körpers wird häufig in der Medizintechnik zur Detektion von Gelenkwinkeln oder der Gangüberwachung genutzt. [147] Dabei können verschiedene Technologien eingesetzt werden, wobei sich optische Systeme meist auf einen definierten Raum beschränken, innerhalb dessen die Bewegung erfasst wird. Deshalb geht der Trend hin zu körpergetragenen, flexiblen Systemen. Im Folgenden wird auf vergleichbare tragbare Systeme eingegangen, die unter anderem

auf piezoresistiven oder kapazitiven Messprinzipien beruhen. Die Genauigkeit verschiedener Messprinzipien wird in [148] gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen Genauigkeiten zwischen 92,00 % und 98,00 % mit einer Standardabweichung von 19,00 % bis 28,00 %, wobei als Referenz die Messung mit einem Goniometer herangezogen wird.

Im Vergleich zu kamerabasierten Systemen zeigt sich für körpergetragene Technologien eine verringerte Genauigkeit. Nakamoto et al. [149] haben dafür die Erfassung der Gelenkwinkel über dehnungsbasierte kapazitive Sensoren mit optischen Systemen zur Bewegungsdetektion verglichen. Dabei zeigt sich eine verringerte Genauigkeit der Dehnungssensoren im Vergleich zu kamerabasierten Messsystemen, die nach der Einschätzung der Autoren über mehrdimensionale Sensoren verbessert werden kann.

Eine solche Mehrdimensionalität kann durch den Einsatz der vorgestellten anisotropen DES erzeugt werden. Der praktische Nutzen wird anhand des Eigenschaftenprofils der anisotropen DES mit Beispielen aus der Literatur verglichen. Die körpernahe Detektion von Handgelenksbewegungen wird von Li et al. mit optischen Fasern realisiert. Die strukturierten Lichtwellenleiter erfahren durch die Bewegung unterschiedliche Biegungen, die zu einer Streuung des Lichts führen. Das detektierte Spektrum kann anschließend den entsprechenden Gelenkwinkeln zugeordnet werden. Dabei treten maximale Fehler bis $4,29^\circ$ auf. [145] Daneben befinden sich textile Sensoren für die Erfassung von Gelenkwinkelbewegungen im Einsatz. Hierfür eignen sich piezoelektrische Matrixwerkstoffe aus TPU und CNT, die ebenfalls als Garne einsetzbar sind. Für diese Ansätze sind Messabweichung von rund 6,00 % angegeben. [150] Zudem weisen die meisten dehnungsbasierten Sensoren lineare Messbereiche von rund 10,00 % uniaxialer Dehnung auf [151]. Dem gegenüber besitzen DES mit Bahnabständen von 150,00 μm lineare Bereiche bis zu 80,00 % uniaxialer Zugbeanspruchung. Somit erweitert der neuartige Ansatz anisotroper DES den Stand der Technik, indem die linearen Messbereiche signifikant gesteigert werden können.

Die beschriebenen Ansätze nutzen für die Detektion verschiedener Bewegungen meist mehrere Sensoren, die an unterschiedlichen Stellen des Gelenks angebracht sind. Die sequenzielle Informationsverarbeitung ermöglicht Aussagen über Richtung und Art der Bewegung. Der in dieser Dissertationsschrift gezeigte neuartige Ansatz ermöglicht die ganzheitliche Charakterisierung der Bewegung mit nur einem einzelnen Sensorelement. Dies verringert die Komplexität der Aufbauten und erleichtert die Applikation im Gegensatz zu den in der Literatur beschriebenen Ansätzen. Im Vergleich erreichen die Messungen der anisotropen DES Genauigkeiten von

$\pm 2,21^\circ$, dies entspricht einer absoluten Abweichung von 3,99 %. Dabei werden mit einem einzelnen Sensorelement mehrere Bewegungsrichtungen erfasst. Die anisotropen DES besitzen daher einen erweiterten Funktionsumfang und ermöglichen eine höhere Auflösung der Gelenkwinkel im Vergleich zu andern körpergetragenen Systemen.

Die notwendige Kalibrierung zur Detektion des Ausgangswiderstands der DES erfolgt automatisiert über den Herstellungsprozess. Dafür kann bei der Erfassung durch eine Messbrückenschaltung der benötigte Vergleichswiderstand im Herstellungsprozess angepasst werden. Dieser wird über die Druckparameter zur Einstellbarkeit des Widerstands, die in Kapitel 3.1 gezeigt sind, für den automatisierten Abgleich ausgelegt. Die Schaltung und der Ansatz des gedruckten Vergleichswiderstands sind in [P2, S1] beschrieben.

Durch das Anwendungsbeispiel der vollständigen Bewegungscharakterisierung mittels eines einzelnen anisotropen DES können die erforschten Zusammenhänge in die Praxis überführt werden. Die Sensoren zeigen ein verbessertes Leistungsspektrum wie Ansätze mit mehreren Sensorelementen und besitzen einen stark vereinfachten Aufbau. Somit bestätigt sich auch die letzte Forschungsfrage nach der Eignung anisotroper DES zur richtungsabhängigen Bewegungsdetektion, die die Einsatzfähigkeit des erforschten Ansatzes beweist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dielektrische Elastomere (DE) stellen einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Realisierung bionisch optimierter Aktor- und Sensorsysteme dar. Dazu werden in der vorliegenden Arbeit Möglichkeiten zur Erzeugung von Anisotropie in DE für den Einsatz als richtungsabhängige Sensoren und Aktoren untersucht. Ziel ist es, die uniaxiale Ausdehnung von dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) einstellen und ausrichten zu können. Dadurch wird ein anisotropes Bewegungsmuster erzeugt und die umgewandelte Energie richtungsabhängig verteilt. Die Systemanpassungen sind außerdem geeignet, dielektrische Elastomersensoren (DES) anisotrop auszulegen. Durch die Auswertung richtungsabhängiger Signale wird die Datendichte pro Sensorlage erhöht. Durch die parallele Informationsverarbeitung aufgrund des richtungsabhängigen Systemaufbaus können anisotrope DES als morphologisch intelligente Systeme betrachtet werden.

Zur Umsetzung dieser Ziele werden im ersten Schritt der Arbeit Ansätze zur Einstellung des Systemverhaltens abgeleitet und auf die Materialisierung der Systeme abgebildet. Durch neue komplexe Konfigurationen zur Einstellung der Elektroden ergibt sich die Notwendigkeit einer angepassten Fertigungsstrategie. Die auf den Elektroden basierende Systemmanipulation ist bisher wenig erforscht und erfordert daher eine detaillierte Betrachtung des Systemverhaltens. Die anisotropen Eigenschaften beruhen auf physikalischen Prinzipien wie heterogenen elektrischen Feldern, mechanischen Eigenspannungen des Materials und dem Verhalten des Perkolationsclusters der leitfähigen Partikel. Für die Erzeugung anisotroper Eigenschaften durch Anpassung der Elektroden hat sich das Aerosol-Jet-Druckverfahren als besonders geeignet erwiesen, weshalb es für die praktischen Versuche eingesetzt wird. Dazu wird der bisherige Stand der Forschung um die Anbindung an die digitale Prozesskette erweitert. Diese ermöglicht die Herstellung komplexer Elektrodenstrukturen und erleichtert die Variation des Materialauftrags.

Um die durch den Prozess einstellbaren Parameter auf die Systemeigenschaften abzubilden, werden die Eigenschaften der Elektroden mittels Regressionsanalysen untersucht und die Haupteffekte identifiziert. Ein intensiver Untersuchungsgegenstand ist dabei die Perkolations-theorie, die das Verhalten der Partikelelektroden beschreibt. Durch diese theoretische Betrachtung können die dehnungsabhängigen Phänomene des Perkolationsclusters beschrieben und vorhergesagt werden. Die Ergebnisse erweitern

nicht nur den Stand der DE-Forschung, sondern liefern auch eine umfassende Betrachtung graphenbasierter Partikelelektroden. Während der Untersuchung der einstellbaren Prozessparameter werden drei wesentliche Haupteinflussfaktoren identifiziert, die für die Modifikation der dielektrischen Elastomere geeignet sind: der Bahnabstand, die Anzahl der Lagen und die Bahnrichtung. Durch die Identifikation und Untersuchung dieser Haupteinflüsse wird die erste Forschungsfrage beantwortet. Die ersten beiden haben einen direkten Einfluss auf die Besetzungsdichte des Perkulationsclusters. Die Bahnrichtung führt zu einer heterogenen Struktur der Elektrode, wodurch die mechanische Beanspruchung zu einer richtungsabhängigen Separation der leitfähigen Partikel führt. Die mathematische Beschreibung des nicht linearen Verhaltens unter Belastung stellt die Antwort auf die zweite Forschungsfrage dar.

Das anisotrope Aktorkonzept ermöglicht eine richtungsabhängige Einstellbarkeit der Bewegungsamplitude und weist damit ein dem menschlichen Muskel ähnlicheres Verhalten auf. Dazu werden die Parameter auf verschiedene geometrische Parameter abgebildet und deren anisotropes Verhalten untersucht. Die inverse Beziehung zwischen passiven und aktiven Anteilen wird in dieser Arbeit modellbasiert beschrieben, wodurch die dritte Forschungsfrage beantwortet wird. Die modifizierten Systeme erreichen in praktischen Versuchen maximale Anisotropieraten a_{DEA} von 2,03, was einer Verdopplung der Deformation entlang der Vorzugsrichtung entspricht. Die verringerte Flächenbedeckung der Elektroden führt zu einer Verringerung der flächigen Verformung der dielektrischen Elastomeraktoren, die jedoch in Richtung der Vorzugsrichtung verstärkt wird. Somit kann mit einer geringeren Flächenbedeckung der Elektroden ein erhöhtes Aktionspotenzial erreicht und die Auslenkung entlang der anderen Wirkrichtungen reduziert werden. Die erstmalige Beschreibung der elektromechanischen Kopplung segmentierter Elektroden legt damit den Grundstein für weitere Forschungsfelder. Da Membranaktoren die Basis vieler dielektrischer Elastomerstrukturen bilden, kann die Anisotropie der vorgestellten Systeme die des Gesamtsystems verstärken.

Der neuartige Ansatz heterogener Elektrodenstrukturen erweitert die bisherige Funktion dielektrischer Elastomersensoren um morphologische Intelligenz. Unterschiedlich orientierte Druckmuster führen zu verschiedenen Sensorsignalen, die in Kombination Rückschlüsse auf die Verformung der Elektroden zulassen. Die modellbasierte Beschreibung der belastungsabhängigen Perkolation heterogener Partikelelektroden ermöglicht die Vorhersage des Besetzungsdichteverhaltens. Mit dem Modell kann erst-

mals eine Abhängigkeit der Zusammenhangslängen und der richtungsabhängigen Signale beschrieben werden. Damit kann die einwirkende mechanische Kraft hinsichtlich Richtung und Amplitude mit einem einzigen anisotropen DES charakterisiert und somit die fünfte Forschungsfrage beantwortet werden. Dies vereinfacht den Messaufbau und ermöglicht eine kompakte Systemintegration.

Abschließend wird die Bewertung anhand von Anwendungsbeispielen aus der Medizintechnik praktisch evaluiert. Die anisotropen Systemkonfigurationen werden anhand der bionischen Anwendungsfälle eines funktionalen Irisimplantats und eines hautähnlichen flexiblen Sensors verifiziert. Die Aktorstruktur ergibt sich aus der Betrachtung der segmentierten Elektroden und orientiert sich am biologischen Vorbild. Mit der gefundenen Konfiguration kann die Bewegung des Aktors nach innen fokussiert und nach außen reduziert werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Funktion des Aktors im Vergleich zu konventionellen ringförmigen Aktoren und bietet das Potenzial, die Grundlage für ein funktionelles Irisimplantat zu bilden. Durch die Evaluierung in einem funktionsfähigen Irisimplantat kann die Anwendung der anisotropen Aktoren bestätigt und die vierte Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Der anisotrope Sensoraufbau zeigt das Potenzial der heterogenen Elektroden auf, wodurch ein morphologisch intelligentes System entsteht. Mit nur einem Sensor auf der Oberseite des Handgelenks kann die gesamte Bewegung charakterisiert werden. Dabei werden die Daten innerhalb der Struktur parallel verarbeitet und nicht sequenziell durch einen Algorithmus identifiziert. Die in dieser Dissertation entwickelte Struktur hat maximale Messabweichungen von 3,99 % für die Detektion der Belastungsintensität. Dies ist vergleichbar mit in der Literatur beschriebenen, am Körper getragenen Systemen. Die praktische Anwendung der anisotropen Sensoren bestätigt die letzte Forschungsfrage und zeigt den praktischen Nutzen der neuartigen Systemadaption.

Durch das selektive Druckverfahren entstehen keine zusätzlichen Herstellungskosten. Die Fertigung ist derzeit teilautomatisiert, die Kontaktierung der Systeme erfolgt noch manuell. Für die Weiterentwicklung der Systeme bietet sich eine voll automatisierte Fertigung an, wobei die elektrischen Kontakte ein großes Optimierungspotenzial bieten. Bisherige Möglichkeiten über Kohlefasern oder Aluminiumkontakte, die über Grafitfett mit den Elektroden verbunden sind, zeigen mechanische und elektrische Instabilitäten.

Mit der voll automatisierten Fertigung können weiterhin größere Probenmengen untersucht werden. Dadurch wird es möglich, die statistische Prozessbetrachtung zu erweitern und durch Ansätze des maschinellen Lernens zu unterstützen. Damit kann der hier beschriebene Gültigkeitsbereich erweitert und die mathematischen Zusammenhänge optimiert werden. Die Berücksichtigung zusätzlicher Einflussgrößen und des Verhaltens des Perkolationsnetzwerkes ermöglicht eine weitere Steigerung der Genauigkeit.

Das Perkolationsnetz stellt eine weitere Optimierungsmöglichkeit für Partikelelektroden dar. Durch den Auftrag mittels Aerosol-Jetting treffen die Partikel ungeordnet auf die Oberfläche und sind dort zufällig angeordnet. Dies führt zu Abweichungen in den Elektrodeneigenschaften und zu Einflüssen auf das Verhalten der dielektrischen Elastomere. Dazu gehört eine hohe Elektrodenrauheit, die den Einsatz dickerer Dielektrika erforderlich macht, wodurch die Leistungsfähigkeit des Systems sinkt und die erforderliche Betriebsspannung steigt.

Zusammenfassend stellen anisotrope Systemkonfigurationen eine Erweiterung des Funktionsspektrums dielektrischer Elastomere dar. Durch die Herstellung mittels eines selektiven Druckverfahrens ist eine flexible Einstellung der Eigenschaften möglich. Basierend auf der durchgeführten Prozessanalyse können die Eigenschaften der Elektroden an den Anwendungsfall angepasst und optimiert werden. Dabei zeigen die anisotropen Systeme in praktischen Versuchen ein optimiertes Bewegungsverhalten und morphologische Intelligenz.

9 Summary and outlook

Dielectric elastomers (DE) represent a promising solution approach for the realization of bionically optimized actuator and sensor systems. To this end, the present work investigates possibilities for generating anisotropy in DE for use as direction-dependent sensors and actuators. The aim is to be able to adjust and align the uniaxial expansion of dielectric elastomer actuators (DEA). This creates an anisotropic motion pattern and distributes the converted energy in a direction-dependent manner. The system adjustments are also suitable for anisotropic design of dielectric elastomer sensors (DES). The evaluation of direction-dependent signals increases the data density per sensor layer. Due to the parallel information processing resulting from the direction-dependent system design, anisotropic DES can be regarded as morphologically intelligent systems.

To realize these goals, approaches for tuning the system behavior are derived in the first step of the thesis and mapped to the materialization of the systems. New complex configurations for setting the electrodes result in the need for an adapted manufacturing strategy. The system manipulation based on the electrodes has been little explored so far and therefore requires a detailed consideration of the system behavior. The anisotropic properties are based on physical principles such as heterogeneous electric fields, mechanical residual stresses of the material, and the behavior of the percolation cluster of the conductive particles. The aerosol jet printing process has proven to be particularly suitable for generating anisotropic properties by adapting the electrodes, which is why it is used for the practical experiments. To this end, the current state of research is being extended to include connection to the digital process chain. This enables the production of complex electrode structures and facilitates the variation of the material application.

In order to map the parameters that can be adjusted by the process onto the system properties, the properties of the electrodes are investigated by means of regression analyses and the main effects are identified. An intensive object of investigation is the percolation theory, which describes the behavior of the particle electrodes. Through this theoretical consideration, the strain-dependent phenomena of the percolation cluster can be described and predicted. The results not only extend the state of DE research, but also provide a comprehensive view of graphene-based particle electrodes. While investigating the tunable process parameters, three main influencing factors are identified to modify the dielectric elastomers: the line

spacing, the number of layers, and the line direction. By identifying and investigating these main influences, the first research question is answered. The first two have a direct influence on the occupation density of the percolation cluster. The web direction leads to a heterogeneous structure of the electrode, whereby the mechanical stress leads to a direction-dependent separation of the conductive particles. The mathematical description of the nonlinear behavior under loading represents the answer to the second research question.

The anisotropic actuator concept allows a direction-dependent adjustability of the motion amplitude and thus exhibits a behavior more similar to the human muscle. For this purpose, the parameters are mapped to different geometric parameters and their anisotropic behavior is investigated. The inverse relationship between passive and active components is described in this work in a model-based manner, answering the third research question. In practical experiments, the modified systems achieve maximum anisotropy rates a_{DEA} of 2.03, which corresponds to a doubling of the deformation along the preferred direction. The reduced area coverage of the electrodes leads to a reduction of the areal deformation of the dielectric elastomer actuators, which, however, is enhanced in the direction of the preferred direction. Thus, with a lower area coverage of the electrodes, an increased action potential can be achieved and the deflection along the other effective directions can be reduced. The first description of the electromechanical coupling of segmented electrodes thus lays the foundation for further research fields. Since membrane actuators form the basis of many dielectric elastomer structures, the anisotropy of the presented systems can enhance that of the overall system.

The novel approach of heterogeneous electrode structures adds morphological intelligence to the previous function of dielectric elastomer sensors. Differently oriented pressure patterns lead to different sensor signals, which in combination allow conclusions to be drawn about the deformation of the electrodes. The model-based description of the load-dependent percolation of heterogeneous particle electrodes allows the occupation density behavior to be predicted. With the model, a dependence of the bond lengths and the strain-dependent signals can be described for the first time. Thus, the acting mechanical force can be characterized with respect to direction and amplitude with a single anisotropic DES and thus the fifth research question can be answered. This simplifies the measurement setup and allows compact system integration.

Finally, the assessment is practically evaluated by means of application examples from medical technology. The anisotropic system configurations are verified using the bionic use cases of a functional iris implant and a skin-like flexible sensor. The actuator structure results from the consideration of the segmented electrodes and is based on the biological model. With the configuration found, the motion of the actuator can be focused inward and reduced outward. This allows for improved functioning of the actuator compared to conventional ring-shaped actuators and offers the potential to form the basis for a functional iris implant. By evaluating this in a functional iris implant, the application of the anisotropic actuators can be confirmed and the fourth research question can be answered positively. The anisotropic sensor setup demonstrates the potential of heterogeneous electrodes, creating a morphologically intelligent system. With only one sensor on the upper side of the wrist, the entire movement can be characterized. The data within the structure is processed in parallel and not sequentially identified by an algorithm. The structure developed in this dissertation has an accuracy of 3.99% for the detection of strain intensity. This is comparable to body-worn systems described in the literature. Practical application of the anisotropic sensors confirms the last research question and demonstrates the practical utility of the novel system adaptation.

The selective printing process means that no additional manufacturing costs are incurred. Production is currently partially automated, with the systems still being contacted manually. Fully automated production is an option for the further development of the systems, with the electrical contacts offering great potential for optimization. Previous possibilities using carbon fibers or aluminum contacts connected to the electrodes via graphite grease show mechanical and electrical instabilities.

With fully automated production, larger sample quantities can still be investigated. This makes it possible to extend the statistical process analysis and to support it with machine learning approaches. In this way, the range of validity described here can be extended and the mathematical relationships optimized. The consideration of additional influencing variables and the behavior of the percolation network allows a further increase of the accuracy.

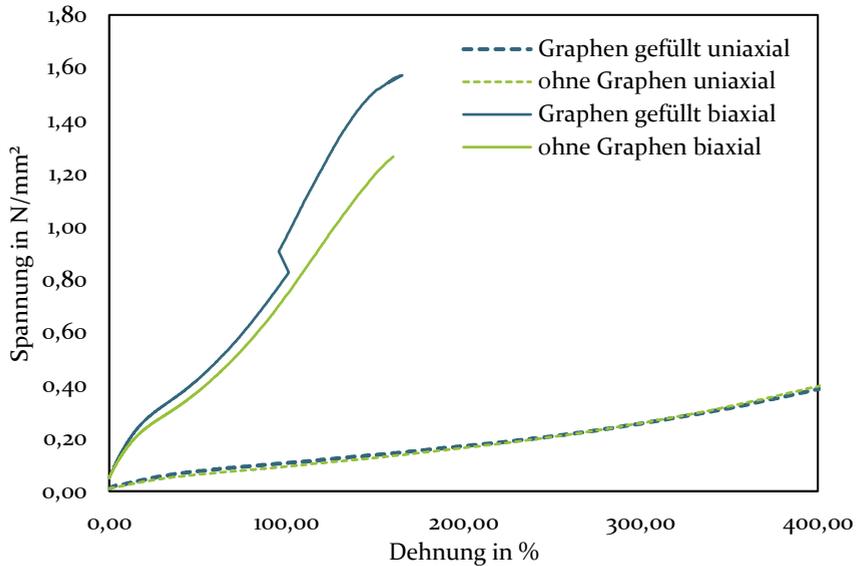
The percolation network represents a further optimization possibility for particle electrodes. Due to the application by aerosol jetting, the particles hit the surface in a disordered manner and are randomly arranged there. This leads to deviations in the electrode properties and to influences on the

behavior of the dielectric elastomers. This includes high electrode roughness, which necessitates the use of thicker dielectric layers, reducing system performance and increasing the required operating voltage.

In summary, anisotropic system configurations represent an extension of the functional spectrum of dielectric elastomers. Production by means of a selective printing process allows flexible adjustment of the properties. Based on the process analysis, the properties of the electrodes can be adapted to the application and optimized. In practical tests, the anisotropic systems show optimized motion behavior and morphological intelligence.

Anhang

Ergebnisse der mechanischen Testung dielektrischer Elastomere



Uniaxiale und biaxiale Zugprüfung von geschichteten Silikonproben mit und ohne Graphenzwischenschicht ($n_L = 4$, $d_B = 200 \mu\text{m}$ \parallel und \perp)

Literaturverzeichnis

- [1] VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V., *VDI 6221-6226 Bionik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: www.vdi.de/bionik
- [2] WAWERS, W. *Bionik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-31872-7
- [3] GRECO, F. und V. MATTOLI. Introduction to Active Smart Materials for Biomedical Applications. In: G. CIOFANI und A. MENCICASSI, Hg. *Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 1-27. ISBN 978-3-642-28043-6
- [4] HOLMAN, H., M.N. KAVARANA und T.K. RAJAB. Smart materials in cardiovascular implants: Shape memory alloys and shape memory polymers [online]. *Artificial organs*, 2021, **45**(5), S. 454-463. Verfügbar unter: [doi:10.1111/aor.13851](https://doi.org/10.1111/aor.13851)
- [5] CARPI, F., D. de ROSSI, R. KORNBLUH, R.E. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. *Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology*: Elsevier, 2011
- [6] REITELSHOFER, S., M. LANDGRAF, I.S. YOO, J. HORBER, C. RAMER, C. ZIEGLER und J. FRANKE. Dielectric elastomer actuators — On the way to new actuation-systems driving future assistive, compliant and safe robots and prostheses. In: *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*: IEEE, 2014, S. 803-808. ISBN 978-1-4799-3128-6
- [7] LANG, F. *Basiswissen Physiologie*. 2., vollst. neu bearb. und aktualisierte Aufl. Heidelberg: Springer, 2007. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3540714019
- [8] PELRINE, R., R.D. KORNBLUH, Q. PEI, S. STANFORD, S. OH, J. ECKERLE, R.J. FULL, M.A. ROSENTHAL und K. MEIJER. Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*: SPIE, 2002, S. 126-137

- [9] BRUSCHI, A., D.M. DONATI, P. CHOONG, E. LUCARELLI und G. WALLACE. Dielectric Elastomer Actuators, Neuromuscular Interfaces, and Foreign Body Response in Artificial Neuromuscular Prostheses: A Review of the Literature for an In Vivo Application [online]. *Advanced healthcare materials*, 2021, **10**(13), S. e2100041. Verfügbar unter: doi:10.1002/adhm.202100041
- [10] PELRINE, R. und R. KORNBLUH. High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. *Material Science and Engineering*, 2000, S. 89-100
- [11] CARPI, F., D. de ROSSI, R. KORNBLUH, R.E. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. *Dielectric elastomers as electromechanical transducers. Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emergin Electroactive Polymer Technology*. Oxford, UK: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-047488-5
- [12] PELRINE, R., R. KORNBLUH, Q. PEI und J. JOSEPH. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [online]. *Science (New York, N.Y.)*, 2000, **287**(5454), S. 836-839. Verfügbar unter: doi:10.1126/science.287.5454.836
- [13] MEIJER, K., M.S. ROSENTHAL und R.J. FULL. Muscle-like actuators? A comparison between three electroactive polymers. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*: SPIE, 2001, S. 7
- [14] PELRINE, R. und R. KORNBLUH. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, **1998**(64), S. 77-85. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/S092486.4247(97)01657-9
- [15] XIAO, Y., J. MAO, Y. SHAN, T. YANG, Z. CHEN, F. ZHOU, J. HE, Y. SHEN, J. ZHAO, T. LI und Y. LUO. Anisotropic electroactive elastomer for highly maneuverable soft robotics [online]. *Nanoscale*, 2020, **12**(14), S. 7514-7521. Verfügbar unter: doi:10.1039/d0nr00924e
- [16] LÜLLMANN-RAUCH, R. *Taschenlehrbuch Histologie. 10 Tabellen.* 2., komplett überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2006. ISBN 3-131-29242-3
- [17] HUGHES, D., C. HECKMAN und N. CORRELL. Materials that make robots smart [online]. *The International Journal of Robotics*

- Research*, 2019, **38**(12-13), S. 1338-1351. ISSN 0278-3649.
Verfügbar unter: doi:10.1177/0278364919856099
- [18] MCGLONE, F., J. WESSBERG und H. OLAUSSON. Discriminative and affective touch: sensing and feeling [online]. *Neuron*, 2014, **82**(4), S. 737-755. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.neuron.2014.05.001
- [19] MEYER, A., S. LENZ, S. GRATZ-KELLY, P. MOTZKI, S. NALBACH, S.S. SEELECKE und G. RIZZELLO. Experimental characterization of a smart dielectric elastomer multi-sensor grid. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 1. Mai 2020, S. 75. ISBN 9781510635272
- [20] O'BRIEN, B., T. GISBY und I.A. ANDERSON. Stretch sensors for human body motion. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*: SPIE, 2014, S. 905618
- [21] GHAZI-ZAHEDI, K. *Morphological Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2019. ISBN 978-3-030-20620-8
- [22] FUNG, Y.C. *Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues*. New York, NY: Springer, 1981. ISBN 978-1-4757-1752-5
- [23] BAR-COHEN, Y., S. SHERRIT und S.-S. LIH. Characterization of the electromechanical properties of EAP materials. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*: SPIE, 2001, S. 319
- [24] ZHAO, Y., L.-J. YIN, S.-L. ZHONG, J.-W. ZHA und Z.-M. DANG. Review of dielectric elastomers for actuators, generators and sensors [online]. *IET Nanodielectrics*, 2020, **3**(4), S. 99-106. ISSN 2514-3255. Verfügbar unter: doi:10.1049/iet-nde.2019.0045
- [25] ROMASANTA, L.J., M.A. LOPEZ-MANCHADO und R. VERDEJO. Increasing the performance of dielectric elastomer actuators: A review from the materials perspective [online]. *Progress in Polymer Science*, 2015, **51**, S. 188-211. ISSN 00796700. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.progpolymsci.2015.08.002
- [26] SPURA, C. *Technische Mechanik 2. Elastostatik. Nach fest kommt ab*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. 2. ISBN 978-3-658-19978-4
- [27] ZHANG, J., L. LIU und H. CHEN. Electromechanical properties of soft dissipative dielectric elastomer actuators influenced by elec-

- trode thickness and conductivity [online]. *Journal of Applied Physics*, 2020, **127**(18), S. 184902. ISSN 0021-8979. Verfügbar unter: doi:10.1063/5.0001580
- [28] KOFOD, G., P. SOMMER-LARSEN, R. KORNBLUH und R. PELRINE. Actuation Response of Polyacrylate Dielectric Elastomers [online]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, **14**(12), S. 787-793. ISSN 1045-389X. Verfügbar unter: doi:10.1177/104538903039260
- [29] ROSSET, S., O.A. ARAROMI und H.R. SHEA. Maximizing the displacement of compact planar dielectric elastomer actuators [online]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, **3**, S. 72-81. ISSN 23524316. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eml.2015.04.001
- [30] MERSCH, J., M. KOENIGSDORFF, A. NOCKE, C. CHERIF und G. GERLACH. High-Speed, Helical and Self-Coiled Dielectric Polymer Actuator [online]. *Actuators*, 2021, **10**(1), S. 15. Verfügbar unter: doi:10.3390/act10010015
- [31] CARPI, F., A. MIGLIORE, G. SERRA und D. de ROSSI. Helical dielectric elastomer actuators [online]. *Smart Materials and Structures*, 2005, **14**(6), S. 1210-1216. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/0964-1726/14/6/014
- [32] HAU, S., D. BRUCH, G. RIZZELLO, P. MOTZKI und S. SEELECKE. Silicone based dielectric elastomer strip actuators coupled with nonlinear biasing elements for large actuation strains [online]. *Smart Materials and Structures*, 2018, **27**(7), S. 74003. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-665X/aab7d8
- [33] O'HALLORAN, A., F. O'MALLEY und P. MCHUGH. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges [online]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(7), S. 71101. ISSN 0021-8979. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.2981642
- [34] SHINTAKE, J., D. ICHIGE, R. KANNO, T. NAGAI und K. SHIMIZU. Monolithic Stacked Dielectric Elastomer Actuators [online]. *Frontiers in robotics and AI*, 2021, **8**, S. 714332. Verfügbar unter: doi:10.3389/frobt.2021.714332
- [35] MAAS, J., D. TEPEL und T. HOFFSTADT. Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators [online]. *Meccanica*, 2015, **50**(11), S. 2839-2854. ISSN 0025-6455. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11012-015-0273-2

- [36] PELRINE, R. und R.D. KORNBLUH. High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. *Materials Science and Engineering*, 2000, S. 89-100
- [37] O'BRIEN, B., J. THODE, I. ANDERSON, E. CALIUS, E. HAEMMERLE und S. XIE. Integrated extension sensor based on resistance and voltage measurement for a dielectric elastomer. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2007*: SPIE, 2007, S. 652415
- [38] MATYSEK, M., H. HAUS, H. MOESSINGER, D. BROKKEN, P. LOTZ und H.F. SCHLAAK. Combined driving and sensing circuitry for dielectric elastomer actuators in mobile applications. In: Y. BAR-COHEN und F. CARPI, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*: SPIE, 2011, S. 797612
- [39] BÖSE, H. und E. FUß. Novel dielectric elastomer sensors for compression load detection. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*: SPIE, 2014, S. 905614
- [40] ZHU, Y. und A. TAIRYCH. Using a flexible substrate to enhance the sensitivity of dielectric elastomer force sensors [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332, S. 113167. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2021.113167
- [41] XU, D., T.G. MCKAY, S. MICHEL und I.A. ANDERSON. Enabling large scale capacitive sensing for dielectric elastomers. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*: SPIE, 2014, 90561A
- [42] MATYSEK, M., P. LOTZ, T. WINTERSTEIN und H.F. SCHLAAK. Dielectric elastomer actuators for tactile displays. In: *World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*: IEEE, 18. März 2009 - 20. März 2009, S. 290-295. ISBN 978-1-4244-3858-7
- [43] WINTERFELD, P.H., L.E. SCRIVEN und H.T. DAVIS. Percolation and conductivity of random two-dimensional composites. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1981(14), S. 2361-2376
- [44] KOFOD, G. *Dielectric elastomer actuators. Ph. D. thesis*. Roskilde: Risø National Laboratory; Available from: Risø National Laboratory, Information Service Department, 2001. Risø-R. 1286 (EN). ISBN 87-550-2924-8

- [45] MICHEL, S., X.Q. ZHANG, M. WISSLER, C. LÖWE und G. KOVACS. A comparison between silicone and acrylic elastomers as dielectric materials in electroactive polymer actuators [online]. *Polymer International*, 2010, **59**(3), S. 391-399. ISSN 09598103. Verfügbar unter: doi:10.1002/pi.2751
- [46] MEHNERT, M., M. HOSSAIN und P. STEINMANN. A complete thermo-electro-viscoelastic characterization of dielectric elastomers, Part II: Continuum modeling approach [online]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, **157**, S. 104625. ISSN 00225096. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmps.2021.104625
- [47] MEHNERT, M., M. HOSSAIN und P. STEINMANN. A complete thermo-electro-viscoelastic characterization of dielectric elastomers, Part I: Experimental investigations [online]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, **157**, S. 104603. ISSN 00225096. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmps.2021.104603
- [48] STOMMEL, M. *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2018. ISBN 978-3-446-45283-1
- [49] MOONEY, M. A Theory of Large Elastic Deformation [online]. *Journal of Applied Physics*, 1940, **11**(9), S. 582-592. ISSN 0021-8979. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.1712836
- [50] RIVLIN, R.S. Large elastic deformations of isotropic materials. IV. Further Developments of the General Theory [online]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, **240**(822), S. 459-490. ISSN 0080-4614. Verfügbar unter: doi:10.1098/rsta.1948.0002
- [51] SHAHZAD, M., A. KAMRAN, M.Z. SIDDIQUI und M. FARHAN. Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material [online]. *Materials Research*, 2015, **18**(5), S. 918-924. Verfügbar unter: doi:10.1590/1516-1439-320414
- [52] Deutsches Institut für Normung e.V. 53504: 03.2017, *Testing of rubber - Determination of tensile strength at break, tensile stress at yield, elongation at break and stress values in a tensile test*: Beuth Verlag GmbH
- [53] CARPI, F., P. CHIARELLI, A. MAZZOLDI und D. de ROSSI. Electromechanical characterisation of dielectric elastomer planar actuators: comparative evaluation of different electrode materials

- and different counterloads [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **107**(1), S. 85-95. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0924-4247(03)00257-7
- [54] LE C., J. LI, P. LUAN, H. DONG, D. ZHAO, Q. ZHANG, X. ZHANG, M. TU, Q. ZENG, W. ZHOU und S. XIE. Highly Transparent and Conductive Stretchable Conductors Based on Hierarchical Reticulate Single-Walled Carbon Nanotube Architecture [online]. *Advanced Functional Materials*, 2012, **22**(24), S. 5238-5244. ISSN 1616301X. Verfügbar unter: doi:10.1002/adfm.201201013
- [55] CHEN, X. und H.J. SCHLUESENER. Nanosilver: a nanoparticle in medical application [online]. *Toxicology letters*, 2008, **176**(1), S. 1-12. ISSN 0378-4274. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tox-let.2007.10.004
- [56] VERMA, N.K., J. CONROY, P.E. LYONS, J. COLEMAN, M.P. O'SULLIVAN, H. KORNFELD, D. KELLEHER und Y. VOLKOV. Autophagy induction by silver nanowires: a new aspect in the biocompatibility assessment of nanocomposite thin films [online]. *Toxicology and applied pharmacology*, 2012, **264**(3), S. 451-461. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.taap.2012.08.023
- [57] BÖSE, H. und D. UHL. Dielectric elastomers with novel highly-conducting electrodes. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2013*: SPIE, 2013, 86872O
- [58] MORETTI, G., G.P.R. PAPINI, M. RIGHI, D. FOREHAND, D. INGRAM, R. VERTECHY und M. FONTANA. Resonant wave energy harvester based on dielectric elastomer generator [online]. *Smart Materials and Structures*, 2018, **27**(3), S. 35015. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-665X/aaab1e
- [59] AKBARI, S., S. ROSSET und H.R. SHEA. Improved electromechanical behavior in castable dielectric elastomer actuators [online]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(7), S. 71906. ISSN 0003-6951. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.4793420
- [60] REITELSHÖFER, S. *Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten*. Dissertation. Erlangen, 2022
- [61] STAUFFER, D. *Perkolationstheorie*. Weinheim [u.a.]: VCH, 1995. ISBN 3527293345

- [62] SIERADZKI, K., K. BAILEY und T.L. ALFORD. Agglomeration and percolation conductivity [online]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(21), S. 3401-3403. ISSN 0003-6951. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.1419043
- [63] VOJTA, G. und M. VOJTA. *Teubner-Taschenbuch der statistischen Physik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2000. ISBN 978-3-322-80010-7
- [64] LEE, B.M. und K.J. LOH. A 2D percolation-based model for characterizing the piezoresistivity of carbon nanotube-based films [online]. *Journal of Materials Science*, 2015, **50**(7), S. 2973-2983. ISSN 0022-2461. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10853-015-8862-y
- [65] RUST, W. *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen mit ANSYS Workbench. Strukturmechanik: Kontakt, Material, große Verformungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. ISBN 978-3-658-31420-0
- [66] FLITTNER, K. *Dielektrische Elastomerstapelaktoren für Mikroventile*. Dissertation. Darmstadt, 2015
- [67] TIMOSHENKO, S. und GOODIER J.N. *Theory of elasticity*. 2. Auflage. New York, NY: McGraw-Hill Book Company Inc., 1951
- [68] SAHIMI, M. Relation between the critical exponent of elastic percolation networks and the conductivity and geometrical exponents. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **1986**(19), S. 79-83
- [69] ROUX, S. Relation between elastic and scalar transport exponent in percolation. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **1986**, (19), S. 351-356
- [70] CARPI, F. und D. de ROSSI. Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modelling and experimental evaluation [online]. *Materials Science and Engineering: C*, 2004, **24**(4), S. 555-502. ISSN 09284931. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.msec.2004.02.005
- [71] WISSLER, M. und E. MAZZA. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators [online]. *Smart Materials and Structures*, 2005, **14**(6), S. 1396-1402. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/0964-1726/14/6/032

- [72] PLANTE, J.-S. und S. DUBOWSKY. On the performance mechanisms of Dielectric Elastomer Actuators [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **137**(1), S. 96-109. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2007.01.017
- [73] LI, T., G. LI, Y. LIANG, T. CHENG, J. DAI, X. YANG, B. LIU, Z. ZENG, Z. HUANG, Y. LUO, T. XIE und W. YANG. Fast-moving soft electronic fish [online]. *Science advances*, 2017, **3**(4), S. e1602045. Verfügbar unter: doi:10.1126/sciadv.1602045
- [74] FENG, Y., Y. LI, D. MCCOUL, S. QIN, T. JIN, B. HUANG und J. ZHAO. Dynamic Measurement of Legs Motion in Sagittal Plane Based on Soft Wearable Sensors [online]. *Journal of Sensors*, 2020, **2020**, S. 1-10. ISSN 1687-725X. Verfügbar unter: doi:10.1155/2020/9231571
- [75] SINGH, N.K., K. TAKASHIMA und T. SHIBATA. Dielectric elastomer based stretchable textile sensor for capturing motion. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 8. Mai 2020, S. 90. ISBN 9781510635272
- [76] STÜWE, H.P. Einleitung: Anisotropie und Ihre Strukturellen Ursachen. In: H.P. STÜWE, Hg. *Mechanische Anisotropie*. Vienna: Springer Vienna, 1974, S. 1-13. ISBN 978-3-211-81226-6
- [77] JIN, Y., X. GAO und Y. LUO. Dielectric elastomer film with anisotropic actuation deformation on film plane [online]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, **137**(23), S. 48795. ISSN 0021-8995. Verfügbar unter: doi:10.1002/app.48795
- [78] PRABHAKAR, O.P. und R.K. SAHU. Effect of filler on anisotropic behavior of dielectric elastomer composite [online]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, **44**, S. 3172-3176. ISSN 22147853. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.827
- [79] CAKMAK, E., X. FANG, O. YILDIZ, P.D. BRADFORD und T.K. GHOSH. Carbon nanotube sheet electrodes for anisotropic actuation of dielectric elastomers [online]. *Carbon*, 2015, **89**, S. 113-120. ISSN 00086223. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.carbon.2015.03.011
- [80] GUPTA, U., L. QIN, Y. WANG, H. GODABA und J. ZHU. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: a review [online]. *Smart Materials and Structures*, 2019, **28**(10), S. 103002. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-665X/ab3a77

- [81] CHEN, L., J.J.C. BUSFIELD und F. CARPI. Electrically tunable directional light scattering from soft thin membranes [online]. *Optics express*, 2020, **28**(14), S. 20669-20685. Verfügbar unter: doi:10.1364/OE.392015
- [82] PRABHAKAR, O.P., D. SAHU und R.K. SAHU. Modified Electro-mechanical Model for Dielectric Elastomer Cylindrical Actuators. In: H.K. VORUGANTI, K.K. KUMAR, P.V. KRISHNA und X. JIN, Hg. *Advances in Applied Mechanical Engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2020, S. 397-404. ISBN 978-981-15-1200-1
- [83] LU, T., J. HUANG, C. JORDI, G. KOVACS, R. HUANG, D.R. CLARKE und Z. SUO. Dielectric elastomer actuators under equal-biaxial forces, uniaxial forces, and uniaxial constraint of stiff fibers [online]. *Soft Matter*, 2012, **8**(22), S. 6167. ISSN 1744-683X. Verfügbar unter: doi:10.1039/c2sm25692d
- [84] AKBARI, S. und H.R. SHEA. An array of $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ dielectric elastomer actuators with 80% strain for tissue engineering applications [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, **186**, S. 236-241. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2012.01.030
- [85] KUNZE, J., J. PRECHTL, D. BRUCH, S. NALBACH, P. MOTZKI, S.S. SEELECKE und G. RIZZELLO. Design and fabrication of silicone-based dielectric elastomer rolled actuators for soft robotic applications. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 1. Mai 2020, S. 80. ISBN 9781510635272
- [86] O'BRIEN, B., T. MCKAY, E. CALIUS, S. XIE und I. ANDERSON. Finite element modelling of dielectric elastomer minimum energy structures [online]. *Applied Physics A*, 2009, **94**(3), S. 507-514. ISSN 0947-8396. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00339-008-4946-8
- [87] LIU, K., S. CHEN, F. CHEN und X. ZHU. A Unidirectional Soft Dielectric Elastomer Actuator Enabled by Built-In Honeycomb Metastructures [online]. *Polymers*, 2020, **12**(3). Verfügbar unter: doi:10.3390/polym12030619
- [88] TRYSON, M., H.-E. KIIL und M. BENSLIMANE. Powerful tubular core free dielectric electro activate polymer (DEAP) push actuator. In: Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*: SPIE, 2009, 72871F

- [89] POOLE, A. und J.D. BOOKER. Classification and selection of actuator technologies with consideration of stimuli generation. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*: SPIE, 2008, S. 692728
- [90] ORTIGOSA, R. und J. MARTÍNEZ-FRUTOS. Topology optimisation of stiffeners layout for shape-morphing of dielectric elastomers [online]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, **64**(6), S. 3681-3703. ISSN 1615-147X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00158-021-03047-2
- [91] MERSCH, J., M. KOENIGSDORFF, A. NOCKE, C. CHERIF und G. GERLACH. High-Speed, Helical and Self-Coiled Dielectric Polymer Actuator [online]. *Actuators*, 2021, **10**(1), S. 15. Verfügbar unter: doi:10.3390/act10010015
- [92] KOENIGSDORFF, M., J. MERSCH, S. PFEIL und G. GERLACH. High-strain helical dielectric elastomer actuators. In: J.D. MADDEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIV*: SPIE, 6. März 2022 - 11. April 2022, S. 64. ISBN 9781510649590
- [93] ZHANG, H. und M.Y. WANG. Multi-Axis Soft Sensors Based on Dielectric Elastomer [online]. *Soft Robotics*, 2016, **3**(1), S. 3-12. ISSN 2169-5172. Verfügbar unter: doi:10.1089/soro.2015.0017
- [94] ANDERSON, I.A., Y. ZHU und S. ROSSET. Multi-touch capacitive sensor with new sensor arrangement. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XX*: SPIE, 4. März 2018 - 8. März 2018, S. 91. ISBN 9781510616844
- [95] CARVILL, J. Engineering measurements. In: *Mechanical Engineer's Data Handbook*: Elsevier, 1993, S. 267-287. ISBN 9780080511351
- [96] MOUSAVI, S., D. HOWARD, F. ZHANG, J. LENG und C.H. WANG. Direct 3D Printing of Highly Anisotropic, Flexible, Constriction-Resistive Sensors for Multidirectional Proprioception in Soft Robots [online]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, **12**(13), S. 15631-15643. Verfügbar unter: doi:10.1021/acsami.9b21816
- [97] BÖSE, H., E. FUß und P. LUX. Influence of design and material properties on the performance of dielectric elastomer compression sensors. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2015*: SPIE, 2015

- [98] ZHU, Y., A. TAIRYCH, S. ROSSET und I.A. ANDERSON. An approach to validate the design and fabrication of dielectric elastomer tactile sensor. In: Y. BAR-COHEN und I.A. ANDERSON, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI*: SPIE, 3. März 2019 - 7. März 2019, S. 70. ISBN 9781510625877
- [99] YU, F., A. BILBERG, L. XIAO und K.B. YDERSTRAEDE. Foot edema simulation and monitoring using dielectric electro-active polymer sensors [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **225**, S. 33-40. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2015.02.005
- [100] BERNAT, J. und J. KOŁOTA. DEAP Actuator Composed of a Soft Pneumatic Spring Bias with Pressure Signal Sensing [online]. *Energies*, 2021, **14**(4), S. 1189. Verfügbar unter: doi:10.3390/en14041189
- [101] XU, D., A. TAIRYCH und I.A. ANDERSON. Localised strain sensing of dielectric elastomers in a stretchable soft-touch musical keyboard. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2015*: SPIE, 2015, S. 943025
- [102] GRATZ-KELLY, S., A. MEYER, P. MOTZKI, S. NALBACH, G. RIZZELLO und S.S. SEELECKE. Force measurement based on dielectric elastomers for an intelligent glove providing worker assessment in the digital production. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 8. Mai 2020, S. 71. ISBN 9781510635272
- [103] ZHU, Y., T. GIFFNEY und K. AW. A Dielectric Elastomer-Based Multimodal Capacitive Sensor [online]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, **22**(2). Verfügbar unter: doi:10.3390/s22020622
- [104] CABUK, O., M. WEGENER, B. GRUBER, S.-O. SEIDEL und J. MAAS. Inkjet printing and characterization of applied electrodes for dielectric elastomer transducer. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 8. Mai 2020, S. 60. ISBN 9781510635272
- [105] MCCOUL, D., S. ROSSET, S. SCHLATTER und H. SHEA. Inkjet 3D printing of UV and thermal cure silicone elastomers for dielectric elastomer actuators [online]. *Smart Materials and Structures*, 2017,

- 26(12), S. 125022. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-665X/aa9695
- [106] JUNGSMANN, M. *Entwicklung elektrostatischer Festkörperaktoren mit elastischen Dielektrika für den Einsatz in taktilen Anzeigefeldern*. Dissertation. Darmstadt, 2004
- [107] LANDGRAF, M., S. REITELSHOFER, J. FRANKE und M. HEDGES. Aerosol jet printing and lightweight power electronics for dielectric elastomer actuators. In: *2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 2013, S. 1-7. ISBN 978-1-4799-1105-9
- [108] ROSSET, S., O.A. ARAROMI, S. SCHLATTER und H.R. SHEA. Fabrication Process of Silicone-based Dielectric Elastomer Actuators [online]. *Journal of visualized experiments : JoVE*, 2016, (108), S. e53423. Verfügbar unter: doi:10.3791/53423
- [109] FASOLT, B., M. HODGINS und S. SEELECKE. Characterization of screen-printed electrodes for dielectric elastomer (DE) membranes: influence of screen dimensions and electrode thickness on actuator performance. In: Y. BAR-COHEN und F. VIDAL, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016*: SPIE, 2016, 97983E
- [110] CHORTOS, A., E. HAJIESMAILI, J. MORALES, D.R. CLARKE und J.A. LEWIS. 3D Printing of Interdigitated Dielectric Elastomer Actuators [online]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(1), S. 1907375. ISSN 1616301X. Verfügbar unter: doi:10.1002/adfm.201907375
- [111] KLUG, F., S. SOLANO-ARANA, H. MÖßINGER, F. FÖRSTER-ZÜGEL und H.F. SCHLAAK. Fabrication of dielectric elastomer stack transducers (DEST) by liquid deposition modeling. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2017*: SPIE, 2017
- [112] FANG, X., A. LI, O. YILDIZ, H. SHAO, P.D. BRADFORD und T.K. GHOSH. Enhanced anisotropic response of dielectric elastomer actuators with microcombed and etched carbon nanotube sheet electrodes [online]. *Carbon*, 2017, 120, S. 366-373. ISSN 00086223. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.carbon.2017.05.067
- [113] SCHLATTER, S., S. ROSSET und H. SHEA. Inkjet printing of carbon black electrodes for dielectric elastomer actuators. In: Y. BAR-

- COHEN, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2017*: SPIE, 2017, S. 1016311
- [114] REITELSHÖFER, S., M. GÖTTLER, P. SCHMIDT, P. TREFFER, M. LANDGRAF und J. FRANKE. Aerosol-Jet-Printing silicone layers and electrodes for stacked dielectric elastomer actuators in one processing device. In: Y. BAR-COHEN und F. VIDAL, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016*: SPIE, 2016, 97981Y
- [115] RIEDLE, H., K. BRAUNIAS, B. MUKAI und J. FRANKE. Experimental Mechanical Examination of Artificial 3D Printed and Post Processed Vascular Silicone Models *. In: *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*: IEEE, 23. Juli 2019 - 27. Juli 2019, S. 2860-2866. ISBN 978-1-5386-1311-5
- [116] GEBHARDT, A., J. KESSLER und L. THURN. *3D printing. Understanding additive manufacturing*. 2nd edition. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019. ISBN 978-1-56990-702-3
- [117] CARPI, F., I. ANDERSON, S. BAUER, G. FREDIANI, G. GALLONE, M. GEI, C. GRAAF, C. JEAN-MISTRAL, W. KAAL, G. KOFOD, M. KOLLOSCH, R. KORNBLUH, B. LASSEN, M. MATYSEK, S. MICHEL, S. NOWAK, B. O'BRIEN, Q. PEI, R. PELRINE, B. RECHENBACH, S. ROSSET und H. SHEA. Standards for dielectric elastomer transducers [online]. *Smart Materials and Structures*, 2015, **24**(10), S. 105025. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/0964-1726/24/10/105025
- [118] SYSKA, A. Ishikawa-Diagramm. In: SYSKA, A., Hg. *Produktionsmanagement*. Wiesbaden: Gabler, 2006. S 63- 65 ISBN 978-3-8349-0235-1
- [119] LEE, Y.R., H. KWON, D.H. LEE und B.Y. LEE. Highly flexible and transparent dielectric elastomer actuators using silver nanowire and carbon nanotube hybrid electrodes [online]. *Soft Matter*, 2017, **13**(37), S. 6390-6395. ISSN 1744-683X. Verfügbar unter: doi:10.1039/c7sm01329a
- [120] WEICHERT, N. *Messtechnik und Messdatenerfassung*. München [u.a.]: Oldenbourg, 2000. Oldenbourg-Lehrbücher für Ingenieure. ISBN 3-486-25102-3

- [121] MORITA, J., T. GOTO, S. KANEHASHI und T. SHIMOMURA. Electrical Double Percolation of Polybutadiene/Polyethylene Glycol Blends Loaded with Conducting Polymer Nanofibers [online]. *Polymers*, 2020, **12**(11). Verfügbar unter: doi:10.3390/polym12112658
- [122] SUMITA, M., K. SAKATA, S. ASAI, K. MIYASAKA und H. NAKAGAWA. Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black [online]. *Polymer Bulletin*, 1991, **25**(2), S. 265-271. ISSN 0170-0839. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF00310802
- [123] FAHRMEIR, L., T. KNEIB und S. LANG. *Regression*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-01836-7
- [124] LANDGRAF, M. *Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen*, 2021. ISBN 978-3-96147-381-6
- [125] WISSLER, M. und E. MAZZA. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, (138), S. 384-393. ISSN 09244247. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2007.05.029
- [126] CROCE, S., J. NEU, G. MORETTI, J. HUBERTUS, G. SCHULTES und G. RIZZELLO. Finite element modeling and validation of a soft array of spatially coupled dielectric elastomer transducers [online]. *Smart Materials and Structures*, 2022, **31**(8), S. 84001. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-665X/ac78ad
- [127] NEU, J., S. CROCE, T. WILLIAN, J. HUBERTUS, G. SCHULTES, S. SEELECKE und G. RIZZELLO. Distributed Electro-Mechanical Coupling Effects in a Dielectric Elastomer Membrane Array [online]. *Experimental Mechanics*, 2022. ISSN 0014-4851. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11340-022-00892-0
- [128] KAAL, W. *Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden für strukturdynamische Anwendungen*. Dissertation. Darmstadt, 25. Februar 2014
- [129] STOMMEL, M. *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. München: Hanser, 2011. ISBN 978-3-446-42124-0

- [130] LEUNG, V., E. FATTORINI, M. KARAPETKOVA, B. OSMANI, T. TÖPPER, F. WEISS und B. MÜLLER. Biomimetic artificial sphincter muscles: status and challenges. In: R.J. MARTÍN-PALMA, A. LAKHTAKIA und M. KNEZ, Hg. *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication 2016*: SPIE, 2016, 97970M
- [131] LIM, H.T., D.H. KIM und H. KIM. PAX6 aniridia syndrome: clinics, genetics, and therapeutics [online]. *Current opinion in ophthalmology*, 2017, 28(5), S. 436-447. Verfügbar unter: doi:10.1097/ICU.0000000000000405
- [132] FRANÇOIS, J. und F. HOLLWICH. *Augenheilkunde in Klinik und Praxis. Band 2*. Stuttgart [u.a.]: Thieme, 1981. 2. ISBN 3135377016
- [133] FRANÇOIS, J. und F. HOLLWICH. *Augenheilkunde in Klinik und Praxis. Band 1*. Stuttgart [u.a.]: Thieme, 1977. 1. ISBN 313537601X
- [134] AXENFELD, T., H. PAU und A. BIALASIEWICZ. *Lehrbuch der Augenheilkunde*. 13., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Fischer, 1992. ISBN 9783437005046
- [135] TSAI, C.G. und J.A. YEH. Circular dielectric liquid iris [online]. *Optics letters*, 2010, 35(14), S. 2484-2486. Verfügbar unter: doi:10.1364/OL.35.002484
- [136] NAM, S., S. YUN, J.W. YOON, S. PARK, S.K. PARK, S. MUN, B. PARK und K.-U. KYUNG. A Robust Soft Lens for Tunable Camera Application Using Dielectric Elastomer Actuators [online]. *Soft Robotics*, 2018, 5(6), S. 777-782. ISSN 2169-5172. Verfügbar unter: doi:10.1089/soro.2017.0146
- [137] YIN, X., P. ZHOU, S. WEN und J. ZHANG. Origami Improved Dielectric Elastomer Actuation for Tunable Lens [online]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71, S. 1-9. ISSN 0018-9456. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIM.2022.3168942
- [138] GRIMMETT, G. What is Percolation? In: S.S. CHERN, B. ECKMANN, P. de LA HARPE, H. HIRONAKA, F. HIRZEBRUCH, N. HITCHIN, L. HÖRMANDER, M.-A. KNUS, A. KUPIAINEN, J. LANNES, G. LEBEAU, M. RATNER, D. SERRE, Y.G. SINAI, N.J.A. SLOANE, J. TITS, M. WALDSCHMIDT, S. WATANABE, M. BERGER, J. COATES, S.R.S. VARADHAN und G. GRIMMETT, Hg. *Percolation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, S. 1-31. ISBN 978-3-642-08442-3

- [139] GRIMMETT, G.R. und I. MANOLESCU. Inhomogeneous bond percolation on square, triangular and hexagonal lattices [online]. *The Annals of Probability*, 2013, **41**(4). ISSN 0091-1798. Verfügbar unter: doi:10.1214/11-AOP729
- [140] BOHR, T., M.H. JENSEN, G. PALADIN und A. VULPIANI, Hg. *Dynamical Systems Approach to Turbulence*: Cambridge University Press, 2009. ISBN 9780521475143
- [141] MERSCH, J., H. PROBST, A. NOCKE, C. CHERIF und G. GERLACH. Non-Monotonic Sensor Behavior of Carbon Particle-Filled Textile Strain Sensors. In: *The 8th International Symposium on Sensor Science*. Basel Switzerland: MDPI, 2021, S. 13
- [142] BOONE, D.C. und S.P. AZEN. Normal range of motion of joints in male subjects. [online]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 1979, (61), S. 756-759. Verfügbar unter: https://journals.lww.com/jbjs/journal/Abstract/1979/61050/Normal_range_of_motion_of_joints_in_male_subjects_.17.aspx
- [143] LI, J., J. LIU, C. LI, H. ZHANG und Y. LI. Wearable Wrist Movement Monitoring Using Dual Surface-Treated Plastic Optical Fibers [online]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, **13**(15). ISSN 1996-1944. Verfügbar unter: doi:10.3390/ma13153291
- [144] MERSCH, J., H. WINGER, A. NOCKE, C. CHERIF und G. GERLACH. Experimental Investigation and Modeling of the Dynamic Resistance Response of Carbon Particle-Filled Polymers [online]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, **305**(10), S. 2000361. ISSN 1438-7492. Verfügbar unter: doi:10.1002/mame.202000361
- [145] GAO, S., J. CHEN, Y. DAI und B. HU. *Wearable Systems Based Gait Monitoring and Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2022. ISBN 978-3-030-97331-5
- [146] FAISAL, A.I., S. MAJUMDER, T. MONDAL, D. COWAN, S. NASEH und M.J. DEEN. Monitoring Methods of Human Body Joints: State-of-the-Art and Research Challenges [online]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, **19**(11). Verfügbar unter: doi:10.3390/s19112629
- [147] NAKAMOTO, H., T. YAMAJI, I. HIRATA, H. OOTAKA und F. KOBAYASHI. Joint angle measurement by stretchable strain

- sensor [online]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2018. ISSN 1868-5137. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12652-018-0915-z
- [148] LI, S., R. LI, O.G. GONZÁLEZ, T. CHEN und X. XIAO. Highly sensitive and flexible piezoresistive sensor based on c-MWCNTs decorated TPU electrospun fibrous network for human motion detection [online]. *Composites Science and Technology*, 2021, **203**, S. 108617. ISSN 02663538. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.comp-scitech.2020.108617
- [149] MERSCH, J., C.A.G. CUARAN, A. VASILEV, A. NOCKE, C. CHERIF und G. GERLACH. Stretchable and Compliant Textile Strain Sensors [online]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(22), S. 25632-25640. ISSN 1530-437X. Verfügbar unter: doi:10.1109/JSEN.2021.3115973

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] MARTIN, S., J. SCHWAB, P.C. LOPEZ, E. BENKE, S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Mechanical modifications of soft actuators for the use as a dynamic iris implant [online]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2021, 2021*, S. 4709-4712. Verfügbar unter: doi:10.1109/EMBC46164.2021.9629906
- [P2] MARTIN, S., M. SCHIEBER, S. REITELSHÖFER, D. PHAM und J. FRANKE. Novel measurement setup for dielectric elastomer sensors enabling the detection of multiple load scenarios with integrated adjustment for scalable sensor sizes. In: J.D. MADDEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIII*: SPIE, 22. März 2021 - 27. März 2021, S. 40. ISBN 9781510640030
- [P3] REITELSHÖFER, S., S. MARTIN, F. NENDEL, T. SCHÄFER, D. PHAM und J. FRANKE. Accelerated aerosol-jet-printing of stretchable rGO-electrodes for stacked dielectric elastomers by using a new hybrid atomizer. In: Y. BAR-COHEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXII*: SPIE, 27. April 2020 - 1. Mai 2020, S. 61. ISBN 9781510635272
- [P4] MARTIN, S., J. RIETHMÜLLER, C. WEIGAND, S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Induction of anisotropic motions in dielectric elastomer actuators by additive manufacturing. In: J.D. MADDEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIV*: SPIE, 6. März 2022 - 11. April 2022, S. 61. ISBN 9781510649590
- [P5] MARTIN, S. BRUNS, A. SCHÄRFE, P. PETERSEN, M. FRANKE, J. REITELSHÖFER, S. Fully automated additive manufacturing of stacked dielectric elastomers. Part I: Manufacturing process and Material characterization - under review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023
- [P6] MARTIN, S., M. HIMMLER, A. BRUNS, S. REITELSHÖFER, D. PHAM, D.W. SCHUBERT und J. FRANKE. Electrical and mechanical characterization of medical grade silicones as dielectric layers

- in aerosol jet printed dielectric elastomers. In: J.D. MADDEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIII*: SPIE, 22. März 2021 - 27. März 2021, S. 58. ISBN 9781510640030
- [P7] MARTIN S., S. KAßNER, A. BRUNS, SCHÄRFE P., REITELSHÖFER S., FRANKE J. Automated electrical characterization setup for aerosol-jet-printed dielectric elastomer transducers. In: *Online international conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers & artificial muscles (Online)*, Verfügbar unter: http://win.euroeap.eu/proceedings/ProceedingsShow?Event_ID=19
- [P8] MARTIN, S., A. BRUNS und J. FRANKE. Dynamic Light Control Using Bionic Dielectric Elastomer Iris Actuators [online]. *Advanced Functional Materials*, 2022, S. 2112260. ISSN 1616301X. Verfügbar unter: [doi:10.1002/adfm.202112260](https://doi.org/10.1002/adfm.202112260)
- [P9] MARTIN, S., S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Morphologically intelligent dielectric elastomer sensors based on micro-structured electrodes as resistive strain elements. In: J.D. MADDEN, I.A. ANDERSON und H.R. SHEA, Hg. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXV*: SPIE, 12. März 2023 - 17. März 2023, S. 52. ISBN 9781510660717

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S₁] SCHIEBER, M. *Konzeptionierung und Design eines portablen Kraftmesssystems zur Detektion variabler Lastzustände auf der Basis von Dielektrischen Elastomeren*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₂] SEUFERT, M. *Numerische Simulation des Expansionsverhaltens dielektrischer Elastomeraktoren und Auswertung im Vergleich zu realen*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₃] SEUFERT, M. *Prozessoptimierung für den Druck von Silikonwerkstoffen anhand rheologischer Daten und deren Charakterisierung*. Projektarbeit. Erlangen
- [S₄] OSTERMEIER, N. *Optimierung von leitfähigen Tinten zur Herstellung dehnbare Elektroden*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₅] VOGELGSANG, P. *Implementierung einer automatisierten digitalen Prozesskette zur Modellerstellung für den Aerosol-Jet-Druckprozess*. Bachelorarbeit. Erlangen
- [S₆] MARTIN, S. *Aerosol-Jet-Druck und Charakterisierung flexibler Graphen-Elektroden zur Herstellung künstlicher Muskeln mittels eines neuartigen Hybrid-Atomizers*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₇] RIETHMÜLLER, J. *Gestaltung und Analyse von geometriebasierter Anisotropie in so genannten künstlichen Muskeln mittels 3D-Vermessung*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₈] WEIGAND, C. *Einfluss anisotroper Elektroden auf das Expansionsverhalten additiv gefertigter künstlicher Muskeln*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₉] DORN, A. *Funktionelle Charakterisierung von mechatronischen Iriden auf Basis von additiv gefertigten dielektrischen Elastomeren für den Einsatz im optischen Apparat*. Projektarbeit. Erlangen
- [S₁₀] BRUNS, A. *Entwicklung additiv gefertigter bionischer Iriden auf Basis künstlicher Muskeln einschließlich mechatronischem Charakterisierungsteststandes*. Masterarbeit. Erlangen
- [S₁₁] CABALLERO LÓPEZ, P. *Design and evaluation of additively manufactured artificial muscles with inhomogeneous driving behavior*. Bachelorarbeit. Erlangen

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zur automatisierten Bearbeitung von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokuspaparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab.

2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab.

2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab.

2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahl-schweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidlinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampfackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montagegeführter Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

- Band 306: Sebastian Suttner**
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.
- Band 307: Bhargav Potdar**
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.
- Band 308: Maria Löffler**
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.
- Band 309: Martin Müller**
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.
- Band 310: Christopher Kästle**
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.
- Band 311: Daniel Vipavc**
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.
- Band 312: Christina Ramer**
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.
- Band 313: Miriam Rauer**
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.
- Band 314: Felix Tenner**
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.
- Band 315: Aarief Syed-Khaja**
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.
- Band 316: Adam Schaub**
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.
- Band 317: Daniel Gröbel**
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.
- Band 318: Philipp Hildenbrand**
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.
- Band 319: Tobias Konrad**
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.
- Band 320: David Meinel**
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.
- Band 321: Andrea Zimmermann**
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.
- Band 322: Christoph Amann**
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.
- Band 323: Jennifer Tenner**
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.
- Band 324: Susan Zöllner**
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.
- Band 325: Stefan Lutz**
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.
- Band 326: Tobias Gnibl**
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißschmelzprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausschheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian

Fechter Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethode zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Gestauchte Werkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage
menschlichen Interaktionsverhal-
tens zur Analyse der Mensch-
Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder,
10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlen-
stoffschichten zur Anpassung der
Reibungsbedingungen und zur
Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder,
9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbeglei-
tendes Toleranzmanagement
KTmfk, xv u. 276 Seiten, 127 Bilder,
13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der
Rotationsschneidtechnologie in
der Verarbeitung von metallischen
Funktionsfolien für
mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder,
7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und
Erarbeitung einer Methodik zur
Herstellung maßgeschneiderter
Halbzeuge auf Basis eines neuarti-
gen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder,
11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenana-
lyse alternativer Antriebskonzepte
für die individuelle Langstrecken-
mobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder,
38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engi-
neering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder,
13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation
taktiler, intelligenter und
kollaborativer Roboterfähigkeiten
in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder,
3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion
produktinduzierter Nutzerstigma-
tisierung durch Förderung einer
gleichermaßen gebrauchstaugli-
chen wie emotionalen
Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder,
44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System
Development for Complex Manu-
facturing Applying Blockchain and
Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder,
10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengen-
felder**
Remote photoacoustic sensing us-
ing speckle-analysis for biomedical
imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder,
10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwi-
schen dem tribochemischen Auf-
bau von Grenzschichten und der
Ausbildung von White Etching
Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder,
10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147- 621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Be-
schleunigung von Qualifizierungs-
untersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder,
7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kup-
fer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bil-
der, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and
Process Zone Formation as a Basis
for Sensing Approaches within
PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder,
0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spec-
troscopy (LIBS) as a diagnostics
tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12
Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen
und Verstemmen von Stahlwerk-
stoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6
Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasier-
ten, strukturierten Metallisierung
thermoaktiver Oberflächen im in-
dustriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder,
11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des
Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder,
23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcha-
rakterisierung für die numerische
Auslegung von Blechumformpro-
zessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13
Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebe-
handlungsmethoden zur Verbesse-
rung des Umformverhaltens und
der Bauteileigenschaften von Alu-
miniumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1
Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtige Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel

Lutz
Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmflk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmflk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsi- cherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmflk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth

Assessment of microcirculation by shifted position-diffuse reflectance imaging (SP-DRI) LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-
teile LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm

Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer

Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller

Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin

Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-789-0.

Abstract

Modern mechatronic systems often try to mimic biological principles to improve functionality. As a result, soft components are becoming increasingly important, but are lacking in terms of performance or portability. In this thesis, the isotropic motion of dielectric elastomers is adapted to an anisotropic behaviour, following a bionic design approach. To achieve this, an additive manufacturing technology is used that allows a defined and heterogeneous distribution of electrically conductive particles. A segmented electrode design is being tested for the actuators, while the sensors are based on heterogeneous particle clusters. As a result, the electromechanical coupling of the electrode segments of dielectric elastomer actuators leads to anisotropic motion, revealing an inverse correlation between the anisotropy ratio and the maximum uniaxial displacement. In particular, the special case where all the electrodes are rim electrodes shows advantageous anisotropic properties. For dielectric elastomer sensors, the heterogeneous particle distribution allowed the detection of force amplitude and direction. A linear correlation between electrode resistance and applied strain can be found for small deformations. Whereas the magnitude of the linear range depends on the path distance.

The relevance of the results is demonstrated by two practical examples. As a functional iris implant, the diaphragm expansion can be increased due to the anisotropic design of the electrode segments. Furthermore, the defined heterogeneity of an anisotropic sensor allows the complete characterisation of wrist movements. In this first description printed anisotropic electrodes in dielectric elastomers are used as conventional membrane actuators. Further improvements are expected by implementing alternative designs or pre-stretching.

Moderne mechatronische Systeme nutzen biologische Prinzipien, um die Funktionalität zu verbessern. Daher wird in dieser Arbeit das isotrope Verhalten von dielektrischen Elastomeren über einen bionischen Designansatz zu einem anisotropen Verhalten angepasst. Um dies zu erreichen, wird eine additive Fertigungstechnologie eingesetzt, die eine definierte und heterogene Verteilung von elektrisch leitfähigen Partikeln ermöglicht. Für die Aktoren wird ein segmentiertes Elektrodendesign getestet, während die Sensoren auf heterogenen Partikelclustern basieren. Die elektromechanische Kopplung der Elektrodensegmente dielektrischer Elastomeraktoren zeigt, dass zwischen dem Anisotropieverhältnis und der maximalen uniaxialen Auslenkung eine inverse Korrelation besteht. Bei dielektrischen Elastomersensoren ermöglicht die heterogene Verteilung der Partikel die Erfassung der Amplitude und Richtung einer Kraft. Bei geringen Verformungen lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Elektrodenwiderstand und der aufgetragenen Dehnung erkennen.

Die Bedeutung der Ergebnisse wird anhand von zwei praktischen Beispielen verdeutlicht. Als funktionelles Irisimplantat kann die Ausdehnung durch die anisotrope Gestaltung erhöht werden. Weiterhin ermöglicht ein anisotroper Sensor die vollständige Charakterisierung von Handgelenksbewegungen. In dieser Dissertationsschrift werden gedruckte anisotrope Elektroden als konventionelle Membranaktoren verwendet, wobei weitere Verbesserungen durch alternative Aufbauformen oder Vordehnung erwartet werden.

