

FAU Studien aus dem Maschinenbau 357

Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen



Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 357

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen

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

Erlangen FAU University Press 2020 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.

Bitte zitieren als Landgraf, Maximilian. 2020. *Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 357. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-381-6.

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 den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-380-9 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-381-6 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-381-6

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen

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

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Maximilian Landgraf

aus Fürth

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

Tag der mündlichen Prüfung:	20.10.2020
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. DrIng. habil. Andreas
	Paul Fröba
Gutachter:	Prof. DrIng. Jörg Franke Prof. Dr. techn. habil. Stefan Johann Rupitsch

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand überwiegend während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg.

Ein besonderer Dank geht an den Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für das in mich gesetzte Vertrauen, den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum zur Bearbeitung eines komplexen und spannenden Forschungsthemas sowie die Übernahme des Erstgutachtens.

Ich danke ebenfalls Herrn Prof. Dr. techn. habil. Stefan J. Rupitsch für die Übernahme des zweiten Gutachtens, Herrn Prof. Dr. Oliver Amft für das Mitwirken als weiteres Mitglied der Prüfungskommission sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Paul Steinmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Dissertationsschrift beruht zu großen Teilen auf den Ergebnissen des durch das Bayerische Landesamt für Umwelt geförderten Forschungsprojekts *Entwicklung künstlicher Muskeln als Aktoren und Sensoren auf Basis dielektrischer Elastomere* im Rahmen der *Bionicum Forschung*. Ich bedanke mich beim gesamten Bionicum-Team für die schöne Zusammenarbeit rund um die interaktive Ausstellung *Bionicum Ideenreich Natur* im Tiergarten Nürnberg und den regen Austausch auch über den Tellerrand hinaus.

Ein großer Dank gilt außerdem allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS, insbesondere im Forschungsbereich Biomechatronik, für den wertvollen fachlichen Austausch und die tolle Arbeitsatmosphäre. Außerdem ist ebenfalls ein großer Dank an die Verwaltung sowie die Techniker für die tolle Unterstützung in jeglicher Hinsicht zu richten. Ferner bedanke ich mich auch bei allen engagierten Studentinnen und Studenten, die mich im Rahmen ihrer Tätigkeiten am Lehrstuhl unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank gilt jedoch meinen Eltern, die mich mein Leben lang unterstützt und gefördert haben, wodurch ich meinen Bildungsweg einschlagen und abschließen konnte. Ein unendlich großer Dank geht an meine Partnerin Patricia Fuchs, die mir mit größtmöglichem Verständnis während dieser Arbeit eine unvergleichbare Hilfe und Rückhalt war. Liebe Patricia, ich bin sehr glücklich, dich an meiner Seite haben zu dürfen!

Erlangen im Oktober 2020

Maximilian Landgraf

Inhaltsverzeichnis

Bild	ve	rzeicł	nnis	ix
Tab	ell	enver	zeichnis	xvii
Abk	ür	zung	sverzeichnis	xix
Sym	ıbo	olverz	eichnis	xxi
1 E	in	leitui	ng	1
1.1	1	Hinte	ergrund und Motivation	2
1.2	2	Zielst	cellung und Aufbau der Arbeit	4
2 To d	ec] iel	hnolo lektri	ogische Grundlagen und Potenziale Ischer Elastomere	7
2.	1	Grun	dlagen dielektrischer Elastomere	7
		2.1.1	Grundlegende Begrifflichkeiten und Abkürzungen	7
		2.1.2	Werkstofftechnische und physikalische Grundlagen	10
		2.1.3	Aufbau und Funktionsprinzipien dielektrischer Elastomere im aktorischen und sensorischen Betrieb	13
2.	2	Anwe	endungspotenzial dielektrischer Elastomere	20
		2.2.1	Technisches Leistungsvermögen	20
		2.2.2	Applikationspotenziale	22
2.	3	Aktu Leist	eller Stand der Forschung und Technik im Bereich ungselektronik für dielektrische Elastomere	24
		2.3.1	Steuerung dielektrischer Elastomeraktoren im Hochspannungsbereich	25
		2.3.2	Auswerteverfahren dielektrischer Elastomersensoren	34
		2.3.3	Simultane Zustandsauswertung dielektrischer Elastomer- aktoren während des Betriebs	40
		2.3.4	Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik im leistungselektronischen Bereich	47

	2.4	Zusar Vorat	mmenfassung der technologischen Grundlagen und 1swahl geeigneter Verfahren	48
3	Ant unt	forde tersch	rungen und Handlungsfelder iiedlicher Betriebsverfahren	51
	3.1	Hanc Nutz	llungsbedarfe zur optimalen ung des Leistungspotenzials	51
		3.1.1	Allgemeine Handlungsfelder und Anforderungen zur Eta- blierung dielektrischer Elastomeraktor-/ sensorsysteme .	52
		3.1.2	Spezifische Anforderungen an die Leistungselektronik zum aktorischen und sensorischen Betrieb	57
	3.2	Hanc versc	llungsbedarf bei separater Betrachtung hiedener Betriebsmodi	58
		3.2.1	Individueller Betrieb mehrerer Aktoren mit zentraler Energiequelle	58
		3.2.2	Standardisiertes Auswerteverfahren zur Kapazitäts- bestimmung elastischer Sensoren	60
		3.2.3	Simultane Zustandserkennung im Aktorbetrieb mittels Signalüberlagerung	62
4	Ind	lividu	elle variable Ansteuerung mit	
	zer	ntrale	r Energiequelle	65
	4.1	Refer ment	enzsystem zur optischen Kapazitätsauswertung von Ele- araktoren	67
	4.2	Stufe	nlose Ansteuerung mittels Pulsweitenmodulation	69
		4.2.1	Schaltungskonzepte zur dynamischen Ansteuerung von DEA mittels PWM	70
		4.2.2	Auswahl geeigneter Schaltelemente für den PWM-Betrieb unter Hochspannung	72
		4.2.3	Ansteuerung mittels hochdynamischer Schaltsignale durch aktives Laden und Entladen	75

	4.3	Konti Kenn	inuierliche Ansteuerung mittels charakteristischer linien von Halbleiterschaltelementen	77
		4.3.1	Schaltungskonzepte zur Gleichhochspannungssteuerung auf Basis von Halbleiterschaltelementen	78
		4.3.2	Adaption charakteristischer Eingangs-/ Ausgangs- kennlinien von Standardschaltelementen 8	30
		4.3.3	Linearisierung der Widerstandskennlinie und Generierung der Aktorspannung mittels MOSFET	83
	4.4	Zusai	mmenfassung und Fazit	38
5	Die	lektr	ische Elastomere als deformationsabhängige	
	Kaj	pazitä	itssensoren	91
	5.1	Einflu Ausw	uss materialbedingter Eigenschaften auf die kapazitive rertung elastischer Deformationssensoren	92
		5.1.1	Vorgehensweise zur Charakterisierung unter zyklischer Belastung	94
		5.1.2	Ansätze zur Messung elastischer Kapazitäten	00
	5.2	Einsa Wink	itz dielektrischer Elastomersensoren als Längen- und æländerungssensoren	5 8
		5.2.1	Modellierung elastischer Drehwinkelsensoren in Bezug auf deformationsabhängige Kapazität	90
		5.2.2	Körpernahes Sensorsystem zur intuitiven und beliebig erweiterbaren Gestensteuerung von Robotern	.13
	5.3	Zusai	mmenfassung und Fazit	16
6	Fur	nktioi	nsintegration zu einem sensomotorischen	
	Akt	torsys	tem	19
	6.1	Simu auf B	ltane Auswertung während des aktorischen Betriebs asis von Filtereigenschaften	19
		6.1.1	Rahmenbedingungen und Leitfaden zur Auslegung einessensomotorischen Aktorsystems	22
		6.1.2	Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal sowie Auswertung des Aktorzustands	25

Inhaltsverzeichnis

	6.2	Verifi	kation und Validierung der integrierten
		Zusta	ndserkennung
		6.2.1	Erfassung aktiver und passiver Zustandsänderungen \ldots 130
		6.2.2	Erweiterbarkeit des Systems durch Modularisierung
			geeigneter Komponenten
	6.3	Zusar	nmenfassung und Fazit
7	Zus	samm	enfassung, Diskussion und Ausblick
8	Sui	nmar	y, discussion and prospects
Li	itera	turver	zeichnis

Bildverzeichnis

1	Aufbau der Arbeit zur Untersuchung leistungselektronischer Ver- fahren und deren Einsatz zum aktorischen, sensorischen und inte- griert sensomotorischen Betrieb von DE 6
2	Übersicht der in dieser Arbeit definierten Begrifflichkeiten sowie deren Zuordnung
3	Klassifizierung von Polymeren nach dem jeweiligen Wirkprinzip sowie Einordnung von DE als Untergruppe elektrischer EAP
4	Aufbau und Funktionsweise eines einlagigen DEA, auch als Ele- mentaraktor bezeichnet, im inaktiven und aktiven Zustand 14
5	Deformationsverhalten und Funktionsweisen von DES bei Bean- spruchung durch Zug- oder Druckkräfte
6	Einteilung der wesentlichen Aktor-/ Sensorgeometrien nach deren nutzbaren Bewegungsrichtung sowie ihrer Wirkrichtung in Bezug auf das elektrische Feld
7	Vergleich des Leistungsvermögens von DEA zu natürlichen Mus- keln und weiteren Technologien
8	Schematische Darstellung des nutzbaren Frequenzbereich einer pulsweitenmodulierten Ansteuerung von DEA im visuellen, takti- len oder auditiven Anwendungsfall
9	Prinzipschaubild zur Ansteuerung von DEA mittels Gleichspan- nungssignalen durch Variation der elektrischen Spannung und da- mit des elektrischen Felds beziehungsweise des elektrostatischen Drucks
10	Varianten von Steuerungsverfahren auf Basis von DC-HV-Signalen zum aktorischen Betrieb von DE
11	Einfluss von Frequenz des PWM-Signals und der Aktoreigenschaf- ten auf den resultierenden Kurvenverlauf der Aktorspannung 30
12	Prinzipschaubild zur Ansteuerung von DEA mittels pulsweitenmo- dulierten Signalen

13	Prinzipschaubilder zur Ansteuerung von DEA mittels Modellbil- dung sowie deren Herangehensweisen zur Modellabstraktion von	
14	DEA	· 32 · 34
15	Klassifizierung möglicher Auswerteverfahren zur Bestimmung der deformationsabhängigen Kapazität von DES	. 36
16	Typische Verläufe nicht signalverändernder Verfahren zur kapaziti- ven Messung des Sensordehnungszustands sowie zur Betrachtung parasitärer Eigenschaften	. 38
17	Vereinfachte schematische Darstellung zur Auswertung von DES mittels Nutzung inhärenter Dämpfungseigenschaften einer Filter- konfiguration	. 30
18	Einführung der Unterscheidung von in der Literatur als <i>self-sensing</i> bezeichneten Methoden in selbstfühlende und quasi-selbstfühlende Systeme auf DE-Basis	. 40
19	Klassifizierung der Verfahren zur simultanen Zustandserkennung von DEA während des aktorischen Betriebs	. 41
20	Zusammenfassung bekannter Methoden zur simultanen Aus- wertung während des Betriebs von DEA auf Basis von Signalnut- zung im Zeitbereich	• 43
21	Zusammenfassung bekannter Methoden zur simultanen Aus- wertung während des Betriebs von DEA auf Basis von Signalnut- zung im Frequenzbereich	. 46
22	Vorauswahl und Basis geeigneter leistungselektronischer Verfahren als Basis folgender Untersuchungen und Methodenentwicklungen für den sensorischen, aktorischen und kombinierten Betrieb von DE	· 49
23	Handlungsfelder und grundlegende Anforderungen an ein DE-	52
24	Allgemeine Anforderungen an die Leistungselektronik sowie Spe- zifizierung der Anforderungen für den aktorischen, sensorischen	• 53
	und integrierten Betriebsmödus	· 57

25	Abgeleitete Forschungsfragen zum Lösungsansatz erweiterbarer Steuerungsmethoden zahlreicher DEA durch Integration neuarti- ger sowie Anpassung bestehender Methoden unter Berücksichti- gung spezifischer Anforderungen	• 5	59
26	Abgeleitete Forschungsfragen zu Lösungsansätzen einer standardi- sierten Charakterisierung, der Spezifikation weiterer Messgrößen sowie der Konzeptionierung von parasitären Eigenschaften unab- hängigen Auswertungsverfahren durch Untersuchung alternativer sensorischer Auswertungsmethoden unter Berücksichtigung spe- zifischer Anforderungen	. (61
27	Abgeleitete Forschungsfragen zum Lösungsansatz adaptierbarer sensomotorischer Systeme durch Evaluation und Integration ge- eigneter Sensorik- und Aktorikmethoden, deren Überlagerung zur simultanen Auswertung und Ansteuerung von DE sowie einer Un- terscheidung aktiver von passiver Verformungen unter Berücksich- tigung spezifischer Anforderungen	. 6	53
28	Substitution massereicher und vergleichbar teurer HV- Transformatoren durch eine zentrale Energiequelle zur unab- hängigen Ansteuerung unterschiedlicher DEA mittels kompakter und günstiger HLS	. 6	56
29	Zustandsmessung eines Elementaraktors mittles optischer Kapa- zitätsmessung sowie schematisch dargestellter Messablauf begin- nend bei der Kalibrierung des optischen Referenzsystems	. 6	58
30	Kapazitives Verhalten von Elementaraktoren als Antwort auf ein angelegtes elektrisches Feld sowie resultierende Zustands-/ Flä- chenänderung von DEA	. 6	69
31	Varianten zum pulsweitenmodulierten Betrieb von DEA durch unterschiedliche Schalterkonfigurationen	. 7	70
32	Verallgemeinertes Schaltungskonzept zur Generierung einer dyna- mischen Ansteuerung von DEA auf Basis hochdynamischer HV- Schaltvorgänge mit Unterteilung des Systems in Signalbereich (LV _{<} -/ LV-Bereich) und Aktorbereich (HV-Bereich)	. 7	72
33	Unterscheidung zwischen HLS mit galvanischer Trennung (links) und mit gemeinsamen Bezugspunkt (rechts) als individuelle Steu- erelemente	. 7	73

34	Angepasstes Schaltungskonzept zur Generierung einer PWM-HV- Ansteuerung eines DEA auf Basis nicht galvanisch getrennter Schalter am Beispiel des Einsatzes von HV-MOSFET		76
35	Von Frequenz und Maximalspannung abhängiges Verhalten von DEA (Angabe von Mittelwert und doppelter Standardabweichung) basierend auf der vorgestellten PWM-Ansteuerung		77
36	Unterschiedliche Konfigurationen zu Schaltungsmethoden zum reinen Gleichspannungsbetrieb dielektrischer Elastomeraktoren auf Basis interner Widerstandsänderungen über charakteristische Kennlinien von Halbleiterschaltelementen		78
37	Verallgemeinertes Schaltungskonzept zur Generierung einer indi- viduellen DC-basierten Ansteuerung von DEA auf Basis charakte- ristischer Kennlinien von HV-HLS mit Unterteilung des Systems in Signalbereich ($LV_{<}$ -/ LV -Bereich) und Aktorbereich (HV-Bereich)		80
38	Einsatzbereiche von HLS mit standardmäßiger Eingangs-/ Aus- gangscharakteristik mit Eignung vor allem für dynamisch geschal- tete Signale durch hohen Gradienten (oben) und mit adaptierter Eingangs-/ Ausgangscharakteristik für stufenlos steuerbare Signa- le (unten)		81
39	Adaption der charakteristischen Eingangs-/ Ausgangskennlinie von HLS über ein gemeinsames Bezugspotential sowie Erweiterung der Konfiguration mit Widerständen		82
40	Schema zur Generierung eines linearen Zusammenhangs zwi- schen Eingabewert und Steuerspannung des Schalters zur Erzeu- gung einer linear steuerbaren Aktorspannung mittels linearisierter Eingangs-/ Ausgangskennlinie von Halbleiterschaltern		83
41	Vergleich von Datenblattangaben und mittels Erweiterung und Ad- aption von Standardzusammenhängen resultierende charakteristi- sche Kennlinien eines MOSFET am Beispiel des HV-MOSFET IX- TAo2N450HV; der rot markierte Bereich entspricht einem Über- schreiten des maximalen Durchlassstroms, welcher zur Zerstörung des Bautoils führt		86
		•	00

42	Adaptierbare und linear verlaufende HV-Aktorspannung durch Linearisierung und Invertierung einer nicht-linearen HLS- Steuerspannung in Abhängigkeit der Gesamtspannung sowie der Widerstandskombination von R_1, R_2 und deren Verhältnis zueinander; die zur quadratischen Aktorspannung proportional verhaltende Zustandsänderung eines DEA zeigt die Funktionalität der Steuerung auf Basis charakteristischer Kennlinien von HLS über eine zentrale HV-Quelle	7
43	Zusammenhang von Deformation und Kapazität von DES im in- takten und defekten Zustand; Beispielhafte Messungen mit Mess- verfahren basierend auf Oszillation (LC), Filtereigenschaften (HP) sowie einem Benning Multimeter M11 (MM) zeigen durch abwei- chende Messwerte die unterschiedlichen Potenziale der verschie- denen Auswertungsmethoden auf	2
44	Vereinfachte Darstellung eines Sensors mit n gestapelten DE- Einheiten durch ein Ersatzschaltbild unter der Berücksichtigung parasitärer Widerstände (seriell R_{ps} , parallel R_{pp} , Kontakt-/ Über- gangswiderstand R_{K})	5
45	Charakteristische Eigenschaften typischer DES ($C_{DE,1}$ intakt, $C_{DE,2}$ defekt) hinsichtlich Zuverlässigkeit und Verwendbarkeit; der frequenzabhängige Verlauf der Kapazität und des seriellen parasitären Widerstands verdeutlicht die jeweilige Sensorqualität 96	6
46	Vorgehensweise zur Charakterisierung von DES hinsichtlich repro- duzierbarer Messergebnisse über die Lebensdauer hinweg 99	9
47	Vergleich des kapazitiven und parasitären Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Dehnung und der Sensorqualität durch Mes- sung mittels strom- und spannungsabhängigen Auswertungsver- fahren	1
48	Einfluss möglicher parasitärer Widerstände auf die Filtereigen- schaften und den Verlauf von Amplitudendämpfung und Phasen- verschiebung von DES	3
49	Reduzierte Darstellung der Methodenumsetzung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Dämpfungseigenschaften einer Tief- passkonfiguration	3
50	Kapazitätsmessung von DES auf Basis frequenzabhängiger Filter- eigenschaften bezüglich Signalamplitudendämpfung	4

51	Abbildung des linearen Verhaltens von DES mittels Kapazitätsmes- sung auf Basis von signaldämpfenden Filtereigenschaften im Ver- gleich zum Referenzsystem sowie deren Abweichungen von der Li- nearität	04
52	Vereinfachte schematische Darstellung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Phasenverschiebung aufgrund einer Tiefpass- filterkonfiguration.	06
53	Reduzierte Darstellung der Methodenumsetzung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Phasenverschiebung von Wechselsi- gnalen in einer Tiefpasskonfiguration	06
54	Kapazitätsmessung von DES auf Basis frequenzabhängiger Filter- eigenschaften mittels Betrachtung der dehnungsabhängigen Pha- senverschiebung	07
55	Abbildung des linearen Verhaltens von DES mittels Kapazitäts- messung auf Basis von Signalphasen verschiebenden Filtereigen- schaften im Vergleich zum Referenzsystem sowie deren Abwei- chungen von der Linearität	, 07
56	Vergleich von idealem, gemessenem und mit dem Kalibrierungs- faktor ζ adaptierten Verlauf dehnungsabhängiger Kapazitäten ver- schiedener DES	09
57	Zusammenhang zwischen Gelenkwinkeln und Längenänderung eines DES in Abhängigkeit der mechanischen Vorspannung des elastischen Sensors	111
58	Schematische Darstellung einer knotenbasierten Architektur samt Hardwaresetup basierend auf dem Softwareframework ROS und MATLAB zur Kommunikation und Verarbeitung von Sensordaten . 1	114
59	Anordnung dehnungsabhängiger Sensoren für eine Gestenerken- nung in drei Freiheitsgraden mit vier Bewegungsmustern	115
60	Relative Zustandsauswertung von DES in einer Gestenerkennung mit drei Freiheitsgraden (Handgelenk, Ellbogengelenk und Unter- armdrehung)	116
61	Allgemeines Schema zur simultanen Ansteuerung und Auswertung von DE mittels Überlagerung von Aktor- und Sensorsignalen	20

62	Nutzung der Filtereigenschaften von DE zur Zustandsüberwa- chung des Aktors; durch Überlagerung von Aktor- und Sensorsi- gnal und den Eigenschaften eines DE-Elements wirkt dieses simul- tan als Aktor und Sensor
63	Funktionsintegration der Leistungselektronik von Aktorik und Sensorik mit zentraler Energiequelle zur individuellen An- steuerung und Auswertung einzelner sensomotorischer DEA 121
64	Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal im LV-Bereich und Transformation in den HV-Bereich mittels Kombination aus Auf- wärtswandler sowie Linearisierung der abgeflachten charakteristi- schen Kennlinie eines HLS, hier als spannungsabhängiger Wider- stand dargestellt
65	Konstante Sensorsignalamplituden \hat{U}_{S_1} , \hat{U}_{S_2} innerhalb des stufenlos steuerbaren Steuerspannungsbereichs zur zuverlässigen Auswertung von DEA unabhängig von der aktuellen Steuerspannung . 127
66	Auswertung der zustandsabhängigen Kapazität über Amplituden- und/ oder Phasenmessung des HP-gefilterten Sensorsignals vor und nach der Sensorsignaldämpfung/ beziehungsweise -verschiebung durch die zustandsabhängige Aktorkapazität
67	Ergebnisse der gemessenen Absolutwerte und deren relativen Ab- weichungen vom Referenzwert verschiedener Ersatzkapazitäten mittels der umgesetzten Funktionsintegration zur Verifikation des vorgestellten Konzepts eines sensomotorischen Systems auf Basis der Filtereigenschaften von DEA; erfasst wird hierbei die Kapazität mittels unterschiedlicher Sensorfrequenzen und unterschiedlicher Filterkonfigurationen bei einer Aktorspannung von 2 kV
68	Relative Abweichungen der mittels umgesetzter Funktionsintegra- tion eines sensomotorischen Systems gemessenen Ersatzkapazitä- ten C_{1-4} bei unterschiedlichen Tiefpasskonfigurationen über den ausgewählten Frequenzbereich des Sensorsignals hinweg
69	Erweiterung des ORS zur Verifikation und Validierung der Zu- standsmessung eines sensomotorischen Elementaraktorsystems auf Basis der Filtereigenschaften mittels optischer Kapazitätsmes- sung anhand der Aktorflächenänderung
70	Aktive und passive Zustandsänderungen sowie simultane Aus- wertung sensomotorischer DEA als Antwort auf unterschiedliche Ansteuerungsverläufe sowie externen Krafteinflüssen

71	Modulbasierte Erweiterung der Leistungselektronik für eine belie-
	bige Anzahl n (hier: $n = 2$) sensomotorischer Aktoren durch Clus-
	terung zentraler Elemente

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht der wesentlichen Aktor- oder Sensorstrukturen auf Basis von DE
2	Wesentliche Vor- und Nachteile von Ansteuerungsmethoden ba- sierend auf DC-HV-Signalen zum aktorischen Betrieb von DEA 29
3	Wesentliche Vor- und Nachteile von Ansteuerungsmethoden ba- sierend auf PWM-Signalen zum aktorischen Betrieb von DEA 31
4	Wesentliche Vor- und Nachteile modellbasierter Ansteuerungsme- thoden zum aktorischen Betrieb von DEA
5	Exemplarische Applikationsszenarien zum Einsatz von DE in den unterschiedlichen Betriebsarten zur Ableitung wesentlicher Anfor- derungen
6	Entscheidende Parameter repräsentativer HLS zur PWM- Ansteuerung von DEA anhand kommerziell erhältlicher elek- tronischer Bauelemente
7	Gegenüberstellung der wesentlichen sensorischen kapazitiven Auswertungsverfahren von DES als Grundlage zur Evaluation der Verfahren in verschiedenen Einsatzszenarien
8	Übersicht wesentlicher Prüfnormen zur Übertragbarkeit der Ab- läufe und Parameter auf Vorgehensweisen zur Charakterisierung von DE
9	Experimentell ermittelte Werte des Kalibrierungsfaktors ζ zur linearen Approximation an den idealen Kapazitätsverlauf von DES 110
10	Charakterisierende Elemente der Umsetzung der Leistungs- elektronik für ein sensomotorisches System auf Basis von Filter- eigenschaften von DE

Abkürzungsverzeichnis

CES	Consumer Electronics Show
CNT	Kohlenstoff-Nanoröhrchen (engl. carbon nano tubes)
CPU	zentrale Verarbeitungseinheit (engl. Central Processing Unit)
DC	Gleichspannung
DE	dielektrisches Elastomer (<i>Pl.:</i> dielektrische Elastomere)
DEA	dielektrischer Elastomeraktor (<i>Pl.:</i> dielektrische Elastomeraktoren)
DEAP	dielektrisches elektroaktives Polymer (<i>Pl.:</i> dielektrische elektroaktive Polymere)
DEG	dielektrischer Elastomergenerator (<i>Pl.:</i> dielektrische Elastomergeneratoren)
DES	dielektrischer Elastomersensor (<i>Pl.:</i> dielektrische Elastomersensoren)
DET	<pre>dielektrische(r) Elastomerwandler (engl. dielectric elastomer transducer(s))</pre>
EAP	elektroaktives Polymer (<i>Pl.:</i> elektroaktive Polymere)
EAPAD	Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices
EMG	Elektromyographie
ESNAM	European Scientific Network for Artificial Muscles
EU	Europäische Union
EuroEAP	International Conference on Electromechanically Active Poly- mer Transducers and Artificial Muscles
HLS	Halbleiterschalter
HP	Hochpass
HV	Hochspannung (engl. High Voltage)
IC	integrierter Schaltkreis
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (engl. Insulated-
	Gate Bipolar Transistor)
IPMC	ionische Polymer-Metall-Komposite (engl. ionic polymer-metal composites)
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LV	Niederspannung (engl. Low Voltage)
LV<	Kleinspannung (engl. Lower Voltage)

MDR	europäische Medizinprodukte-Verordnung (engl. Medical Device Regulation)
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches System
NASA	Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde (engl. National Aeronautics and Space Administration)
ORS	optisches Referenzsystem
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PWM	Pulsweitenmodulation, pulsweitenmoduliert
ROS	Robot Operating System
SPICE	Simulationsprogramm mit Schwerpunkt auf integrierten Schaltungen (engl. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)
SRI	Stanford Research Institute
ТР	Tiefpass

Symbolverzeichnis

A_0	Elektrodenfläche im Grundzustand
$A_{DE}(U)$	spannungsabhängige Fläche eines dielektrischen Elastomers
$\Delta A_{\rm max}$	maximale absolute Flächenvergrößerung
$A(\sigma)$	verformungsabhängige Elektrodenfläche
β	Gelenkwinkel
Bmax	maximaler Gelenkwinkel
Bmin	minimaler Gelenkwinkel
β'	Drehwinkel um den Gelenkdrehpunkt
C_0	Kapazität im Grundzustand eines DE
	Kapazität eines dielektrischen Elastomers
	Gesamtkapazität
$C(\sigma)$	verformungsabhängige Kapazität eines DE
D	gedämpftes Signal
d_0	Dicke des Dielektrikums im Grundzustand
Δd_{max}	maximale absolute Verringerung der Dielektrikumsdicke
$d(\sigma)$	verformungsabhängiger Elektrodenabstand
δ	Pulsweite, Tastgrad (engl. duty cycle)
ε_0	Dielektrizitätskonstante
$\varepsilon_{\rm r}$	relative Permittivität
F	Kraft
f_{g}	Grenzfrequenz eines Filters
$f_{g,0}$	Grenzfrequenz im Grundzustand eines DE
Δf_{g}	Grenzfrequenzverschiebung
f_{\max}	maximale Frequenz
f_{S}	Sensorsignalfrequenz
$f_{\rm Tol}$	Toleranzfrequenz
h	Höhe eines zylindrischen dielektrischen Elastomeraktors
i,k	Zählervariablen
ID	Durchlassstrom
Ie	Eingangsstrom
<i>I</i> _{max}	maximaler Strom
K	Steilheitskoeffizient eines MOSFET
κ	materialspezifischer und prozessparameterabhängiger Faktor
κ_0	Verschiebungskonstante der linearen Approximation von κ

l_{DES}	Aktuelle Länge eines dielektrischen Elastomersensors
l_0	Länge im ungedehnten Zustand
l_{\perp}	senkrechter Abstand der Drehebenen
$l_{\rm V}$	Länge eines initial vorgedehnten dielektrischen Elastomers
m_{κ}	Gradient der linearen Approximation von κ
m_{lin}	Steigung der Übertragungsfunktionslinearisierung
n	beliebige Anzahl von Einheiten
u	Poissonzahl, Querkontraktionszahl
$p_{\rm el}$	elektrostatischer Druck, MAXWELL-Druck
φ	Phase
$\Delta \varphi$	Phasenverschiebung bezüglich Eingangssignalfrequenz
R	Widerstand
r	Gelenkradius
r_{a}	Radius der äußeren Elektrode eines zylindrischen DEA
r_{i}	Radius der inneren Elektrode eines zylindrischen DEA
R_{K}	Kontakt-, Übergangswiderstand
R_{L}	Lastwiderstand
$R_{\rm opt}$	optional einsetzbarer Widerstand
$R_{\rm pp}$	parasitärer Parallelwiderstand
$R_{\rm pp,ges}$	parasitärer paralleler Gesamtwiderstand
$R_{\rm ps}$	parasitärer Serienwiderstand
$R_{\rm ps,ges}$	parasitärer serieller Gesamtwiderstand
R_{TP}	Widerstand einer Tiefpasskonfiguration
$S_{ m E}$	Entladeschalter
$S_{ m L}$	Ladeschalter
$S_{ m var}$	Schalter mit variablen Widerstand
σ	relative Dehnung
$\sigma_{\rm Z}$	vergrößerter Zustand der Elektrodenflächen
$\sigma_{\rm Z}^{-1}$	kontrahierter Zustand des Dielektrikums
T	Periodendauer
t_0	Referenzzeitpunkt
Δt	zeitliche Differenz
t_{M}	Messzeitpunkt
au	Zeitkonstante
U	elektrische Spannung
U_{a}	Ausgangsspannung
U_{DE}	Spannung über einen dielektrischen Elastomer
$U_{\rm DS}$	Drain-Source-Spannung eines MOSFET
$U_{\mathbf{e}}$	Eingangsspannung

Gate-Source-Spannung eines MOSFET
verfügbare Hochspannung
Steuerspannung des $k\text{-ten}$ Schalters für den $i\text{-ten}$ Aktor
Messsignal
Amplitude des Messsignals
maximale Spannung
Sensoreingangssignal
Amplitude des Sensoreingangssignals
Schwellspannung (engl. threshold)
YOUNGscher Modul, Elastizitätsmodul, E-Modul
material- und aufbaubedingter Kalibrierungsfaktor

1 Einleitung

Etablierte Antriebe wie Servomotoren, hydraulische oder pneumatische Aktoren ermöglichen bis dato variantenreiche, komplexe und hoch genaue Bewegungen von Robotern und mechatronischen Kinematiken. In Kombination mit multimodalen Sensordaten sind beispielsweise selbstständige Fortbewegungen durch unbekanntes, unebenes Terrain oder auch adaptives Greifen verschiedenster Objekte möglich. Die hierfür hauptsächlich eingesetzten Getriebeservomotoren weisen mit einer hohen Verfügbarkeit und der technologischen Ausgereiftheit ideale Voraussetzungen auf. Dadurch wird eine vereinfachte Modellierung und Implementierung in einem weiten Einsatzspektrum von Applikationen mit unterschiedlichen Performanz- und Leistungskategorien ermöglicht. Die Präzision ihrer Bewegungen wird durch hohe Getriebeverhältnisse und die Kopplung starrer Elemente erreicht. Daher sind Präzisionsgetriebe für die Transformation hoher Winkelgeschwindigkeiten mit niedrigem Drehmoment in ein hohes Drehmoment auf Kosten der Winkelgeschwindigkeit für typische Robotikapplikationen essentiell. [P1, P2] Allerdings führen zusätzliche mechanische Elemente zu einer starken Beeinträchtigung der Gesamtdynamik sowie der Rückfahrbarkeit [1].

Nachgiebige, dynamische und weiche Kinematiken mit Getriebeservomotoren sind lediglich durch hoch entwickelte Steuerungsmethoden zu realisieren. Das Hinzufügen seriell elastischer Elemente, wie Federn, Dämpfer, Kabel oder Ketten, bringt dabei zwar Nachgiebigkeit in das System, erhöht aber ebenfalls durch zusätzliche Masse das Leistungsgewicht. [P3] Mit hydraulischen oder pneumatischen Aktoren können zwar höhere dynamische Fähigkeiten sowie eine vergleichbar höhere Energiedichte erreicht werden [2], allerdings sinkt durch den Einsatz zusätzlicher Generatoren zur Energiebereitstellung ebenfalls die Gesamteffizienz. Energieautarkie sowie die Mobilität werden hierdurch erschwert. [3]

Die Entwicklung und der Einsatz weicher Aktoren, welche durch ihre Nachgiebigkeit ebenfalls Energie absorbieren können, ist eine der großen Herausforderungen in der Robotik. [P1] Für Applikationen mit flexiblen und dynamischen Bewegungsmustern treten vor allem sogenannte *Intelligente Materialien (engl. Smart Materials)* in den Vordergrund, welche nach biologischem Vorbild inhärente Eigenschaften wie Weichheit, Nachgiebigkeit und Flexibilität aufweisen und unidirektional wirken können. Klassifiziert werden können intelligente Materialien beispielsweise in intelligente Polymere und Gele, Formgedächtnislegierungen, piezoelektrische, elektro- oder magnetostriktive, elektro- oder magnetorheologische, lichtsensitive, temperaturabhängige oder pH-sensitive Materialien [4]. In Kombination mit ihren sensorischen Fähigkeiten bieten diese ebenfalls die Möglichkeit Aktorik und Sensorik in einem einzelnen Element zu vereinen, wodurch die jeweilige Systemkomplexität und das Gesamtgewicht reduziert werden können.

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Effekt, dass sich bestimmte Materialien durch elektrische Kräfte reversibel verformen können, wurde bereits 1880 von RÖNTGEN vorgestellt. Dabei wird die Elektrisierung eines aufgehängten und mit Gewichten auf die doppelte Länge vorgespannten Kautschukbands mit elektrischen Ladungen beschrieben, wobei eine deutliche Verlängerung dieses Bands beobachtet wird, welche sich nach Entladen des Bands reversibel verhält. [5] Erst 1986 zeigte ANDERSON , dass neben elektrostatischen Effekten ebenfalls elektrostriktive Effekte für die Deformation eines dielektrischen Festkörpers in einem elektrischen Feld ursächlich sein können. Dieser Effekt tritt bei dielektrischen Materialien mit dehnungsabhängigen dielektrischen Eigenschaften auf und kann durch polarisierbare Dipole im elektrischen Feld und deren resultierenden Kräfte beschrieben werden. [6]

Mit Untersuchungen in den 1990er Jahren im Bereich der Polymeraktoren haben vor allem PELRINE und KORNBLUH vom *Stanford Research Institute (SRI) International* richtungsweisende Forschungsergebnisse veröffentlicht [7, 8]. Neben ersten unterschiedlichen Aktorformen oder deren Integration in Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) wurde auch eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit solcher Aktoren erstellt sowie eine bis heute weit verbreitete und anerkannte Gleichung zum elektrostatischen Druck eines Polymeraktors hergeleitet. Es wird ebenfalls gezeigt, dass hauptsächlich der elektrostatische Effekt für die Verformung des Polymers verantwortlich ist, wobei allerdings die Begrifflichkeit der Elektrostriktion als Überbegriff für den zu beobachtenden Effekt verwendet wird.

Ebenfalls beschäftigte sich BAR-COHEN am *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* vom *California Institute of Technology* intensiv mit Polymeraktoren und initiierte 1999 die erste Konferenz zu *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* [9]. Im Rahmen dieser Konferenz wurde 2005 erstmals ein Armdrück-Wettbewerb veranstaltet, in dem ein mit künstlichen Muskeln betriebener Roboter gegen einen Menschen antreten sollte [10]. Allerdings konnte in diesem und auch in den Folgejahren kein Roboter gegen eine 17jährige Schülerin gewinnen.

Auch in Europa bildete sich in den 1990er Jahren eine Forschungsgemeinschaft zu elektroaktiven Polymeren (EAP) als künstliche Muskeln. 2011 initiiert CARPI für die Möglichkeit eines intensiven wissenschaftlichen Austauschs das European Scientific Network for Artificial Muscles (ESNAM). In dessen Rahmen organisiert sich jährlich die International Conference on Electromechanically Active Polymer Transducers and Artificial Muscles (EuroEAP) [11].

Dielektrische Elastomere (DE) bilden eine Untergruppe von EAP und stellen grundsätzlich elektromechanische Wandler dar. Der Fokus fiel daher neben rein aktorisch betriebenen EAP auch auf den Einsatz als Sensoren und Generatoren. Bis heute zeigen zahlreiche Publikationen die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von DE, siehe [12–17] als Beispiele für jeweilige Betriebsarten.

Im Gegensatz zu bestehenden Antriebslösungen wie Servomotoren, welche grundsätzlich nicht nachgiebig und starr mit den kinematischen Komponenten gekoppelt sind, sind DE imstande, Energie absorbieren und auch wieder abgeben zu können. Dies ist bei starren Antrieben nur mit zusätzlichen elastischen Systemkomponenten wie Federn möglich. Durch das zusätzliche Gewicht sinkt allerdings der auf das Gesamtsystem bezogene Wirkungsgrad. Piezoelektrische Aktor- und Sensorsysteme, siehe [18], werden ebenfalls häufig mit DE verglichen. Diese bilden allerdings im Vergleich zu DE wiederum starre Aktor- und Sensorlösungen mit hoher Kraft, aber nur kleinen Stellwegen. Im Vergleich dazu weisen DE allerdings eine bis Faktor 1000 höhere mechanische Flexibilität sowie Dehnbarkeit auf [19, 20]. Dadurch bieten DE eine potenzialreiche Basis vor allem für nachgiebige und weiche Systeme.

Dennoch ist das Ziel eines flexiblen, hochdynamischen und energieeffizienten sowie energiespeichernden Aktorsystems, welches in komplexe Kinematiken integriert werden kann, nur durch Entwicklungen und Untersuchungen in den Bereichen der automatisierten Herstellung, der Modellierung und Simulation sowie der Leistungselektronik zu erreichen. Durch die zugesprochene sehr hohe Leistungsdichte sowie Leistungsfähigkeit ist der Aspekt einer möglichst energieeffizienten und leichtbauenden Leistungselektronik von hoher Bedeutung. Eine Reduzierung des Systemleistungsgewichts sowie des Gesamtwirkungsgrads durch Verwendung ungeeigneter Leistungselektroniken würde die Argumentationskraft der Vorteile dieser Technologie gegenüber beispielsweise Elektromotoren erheblich verringern. Daher sind im aktorischen, sensorischen sowie kombinierten Betrieb unterschiedliche Verfahren zur Ansteuerung und Auswertung zu identifizieren, zu untersuchen, für den Einsatz in leichtbauenden und energieeffizienten Aktorsystemen zu qualifizieren sowie hinsichtlich ihres Einsatzszenarios zu bewerten.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Mit dieser Arbeit wird ein Beitrag zur Erforschung von Methoden als Basis zur Realisierung einer leichtbauenden Leistungselektronik sowohl zum separaten als auch integrierten aktorischen und sensorischen Betrieb von DE geleistet. Hierbei werden vor allem Möglichkeiten zur individuellen, applikationsabhängigen Inbetriebnahme der Leistungselektronik behandelt. Auf Basis von Konzeptionierung und Untersuchungen verschiedener Verfahren werden unter Berücksichtigung allgemeiner und spezifischer Anforderungen Lösungsansätze zur Leistungselektronik aufgezeigt.

Separate Untersuchungen von Aktorik und Sensorik im Hinblick auf eine mögliche Fusionierbarkeit bilden die Basis für ein selbstfühlendes Aktorsystem, welches unabhängig von externen Sensoren während des Betriebs simultan den eigenen aktuellen Kontraktionszustand erfassen kann. Der modulare Aufbau mit einer zentralen Energiequelle sowie weiteren zentralisierten Bausteinen ermöglicht die Erweiterung des Systems mit zusätzlichen Aktoren bei geringeren Kosten und Volumen. Das aufgestellte Konzept kann schließlich applikations- und aktorstrukturabhängig auf andere DE-Systeme übertragen werden.

Als Grundlage der experimentellen Validierungen dienen kommerziell erhältliche Materialien. Darunter fallen Acryl-Klebebänder der Firma $_{3M}$ *Deutschland GmbH* [21] für die Dielektrika sowie Graphit als Elektrodenmaterial zur Herstellung von Aktordemonstratoren, Dehnungssensoren der Firma *LEAP technology A/S* (vormals *Danfoss Polypower A/S*) [22] sowie elektronische Standardbauteile und Standardhalbleiterbauelemente.

In Kapitel 2 werden zunächst grundlegende Begrifflichkeiten in dieser Arbeit definiert. Eine materialspezifische Einordnung, die physikalischen Effekte sowie die Funktionalität und Leistungspotenziale im aktorischen und sensorischen Betrieb werden anschließend erläutert. Dabei wird ebenfalls der aktuelle Stand der Forschung und Technik hinsichtlich aktorischer und sensorischer Leistungselektroniken zusammengefasst und eingeordnet.

Anhand des erstellten Anforderungskatalogs werden in Kapitel 3 der zuvor geclusterte Stand der Forschung und Technik analysiert, bewertet sowie Schwachstellen identifiziert, welche im daraus resultierenden Handlungsbedarf festgehalten werden. Aus den Handlungsfeldern resultieren in dieser Arbeit Lösungskonzepte zum jeweiligen separaten sowie kombiniert integrierten Betrieb von DE.

Die in Kapitel 4 dargestellten Leistungselektronikkonzepte des aktorischen Betriebs basieren auf der Verwendung einer zentralen, konstanten Spannungsquelle, mit welcher unabhängig voneinander verschiedene Aktoren im Hochspannungsbereich individuell betrieben werden sollen. Nach der Auswahl und Charakterisierung geeigneter Halbleiterschaltelemente folgen Lösungsansätze von Ansteuerungsmethoden, deren unterschiedliche Dynamikbereiche den Einsatz in jeweils geeigneten Applikationen ermöglichen. Das jeweilige Aktorverhalten wird mittels Referenzsystem auf Basis optischer Kapazitätsmessung untersucht.

Der Einsatz von Sensoren auf Basis von DE wird in Kapitel 5 untersucht. Hierfür werden kommerziell erhältliche Sensoren als Referenz eingesetzt. Da für DE keine entsprechenden und festgelegten Standards bekannt sind, wird die Relevanz einer an Normen angelehnten Charakterisierung dieser Sensoren deutlich. Des Weiteren werden ausgewählte Methoden zur Auswertung untersucht und für die Adaption für den integrierten Betrieb evaluiert. Zur vielfältigen Einsetzbarkeit werden ebenfalls Methoden zur Messwertverarbeitung vorgestellt. Anhand eines möglichen Anwendungsszenarios bestehend aus einem erweiterbaren Gestenerkennungs- und Gestensteuerungssystem wird ein körpernah angebrachtes Sensorsystem validiert.

Die resultierenden Ergebnisse der vorherigen Kapitel bilden in Kapitel 6 die Basis für die Funktionsintegration von aktorischer und sensorischer Leistungselektronik zu einem selbstfühlenden, integrierten sensomotorischen Aktorsystem, welches aktive und passive Zustandsänderungen des Aktors erfassen kann. Mittels Definition von Rahmenbedingungen ist eine Übertragung des Lösungskonzepts mit anschließender Verifizierung sowie Validierung des Systems über eine optische Kapazitätsmessung möglich. Durch den modularen Aufbau des Systems ist dieses bei Beachtung vorgegebener Richtlinien beliebig erweiterbar.

Abschließend erfolgt in Kapitel 7 mit der Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse eine Diskussion der Beiträge dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf den weiteren Entwicklungs- und Forschungsbedarf innerhalb der Themenfelder der Leistungselektronik und Einsatzszenarien von DE. Eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit ist in Bild 1 zusammenfassend dargestellt.

Einleitung (Kapitel 1)

- Historischer Hintergrund, Motivation und Themenstellung
- Uberblick zum Aufbau der Arbeit

Stand der Forschung und Technik (Kapitel 2)

- Definition von Begriffen sowie physikalische und werkstofftechnische Grundlagen
- Aufbau, Funktionsprinzipien, technisches Potenzial und Applikationspotenzial
- Stand der Forschung und Technik im Bereich der aktorischen und sensorischen Leistungselektronik

Handlungsbedarf und Anforderungen (Kapitel 3)

- Separate und kombinierte Betrachtung der Anforderungen im Bereich der aktorischen und sensorischen Leistungselektronik
- Identifizierung der Handlungsfelder in den drei Betriebsarten Aktorik, Sensorik und deren Kombination zur simultanen Auswertung während der Aktuation

Aktorischer Betrieb (Kapitel 4)

- Charakterisierung verwendeter elektrischer Bauelemente
- Konzeptionierung und Umsetzung von Ansteuerungsvarianten auf Basis
 - von Pulsweitenmodulation
 - charakteristischer Kennlinien
- Untersuchung/ Vergleich mittels optischer Kapazitätsmessung

Sensorischer Betrieb (Kapitel 5)

- Vergleich und Evaluation möglicher Auswertungsverfahren
- Normgerechte Charakterisierung dielektrischer Elastomersensoren
- Konzeptionierung und Umsetzung alternativer Auswertungsverfahren
- Körpernahes Sensorsystem zur Gestenerkennung als Anwendungsszenario

Funktionsintegration zu einem selbstfühlenden System (Kapitel 6)

- Konzeptionierung und Umsetzung einer simultanen Auswertung während der Aktuation unter Berücksichtigung notwendiger Rahmenbedingungen
- Validierung und Verifikation des Systems hinsichtlich aktiver und passiver Zustandsänderungen mittels optischen Referenzsystem
- Bewertung der Erweiterbarkeit des Systems

Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick (Kapitel 7) Summary, discussion and prospects (Kapitel 8)

Bild 1: Aufbau der Arbeit zur Untersuchung leistungselektronischer Verfahren und deren Einsatz zum aktorischen, sensorischen und integriert sensomotorischen Betrieb von DE
2 Technologische Grundlagen und Potenziale dielektrischer Elastomere

Zur erleichterten Einstufung von DE hinsichtlich des aktuellen Stands der Forschung und Technik werden zunächst eingeführte sowie historisch bedingt unterschiedlich genutzte Begrifflichkeiten für den weiteren Verlauf dieser Arbeit eindeutig definiert. Eine aktuelle werkstofftechnische Einordnung sowie die Beschreibung physikalischer Effekte bieten die Grundlage für das Verständnis von Aufbau und Funktionsweise von DE sowie eine Beurteilung des technologischen Leistungsvermögens und des Applikationspotenzials dieser Technologie. Eine detaillierte Erfassung des aktuellen Stands der Technik hinsichtlich separater Verfahren zur Ansteuerung und Auswertung sowie Umsetzungen einer simultanen Auswertung des Aktorzustands während des Betriebs bereitet die Grundlage zur Beurteilung des in dieser Arbeit adressierten Handlungsbedarfs im Bereich der Leistungselektronik.

2.1 Grundlagen dielektrischer Elastomere

In der Literatur werden DE ein sehr hohes Potenzial hinsichtlich Einsatzszenarien und Leistung zugeschrieben [23, 24]. Grundsätzlich beschreiben sie eine Untergruppe von EAP, welche den Smart Materials zuzuordnen sind. Da diese Technologie erst seit den 1990er Jahren Gegenstand intensivierter Forschungsarbeiten ist, führen in der Literatur häufig unterschiedlich interpretierte oder fehlerhaft verwendete Begrifflichkeiten zu Missverständnissen. Durch zunächst fehlende allgemeine Beschreibungen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Herangehensweisen, dem jeweiligen Verständnis sowie häufig adaptierte Definitionen sind derartige Fehlinterpretationen zu begründen. Eine Definition der im weiteren Verlauf konsistent genutzten wesentlichen Begrifflichkeiten und der Funktionalität der Technologie ist daher essentiell.

2.1.1 Grundlegende Begrifflichkeiten und Abkürzungen

Die in dieser Arbeit verwendeten und entscheidenden Begrifflichkeiten beziehen sich auf physikalische Effekte und technologische Funktionalitäten von DE sowie elektrotechnische Termini. Des Weiteren werden Abkürzungen zur erleichterten Lesbarkeit eingeführt. Nach dem Vorschlag für einen ersten Standard [25] von CARPI et al. wird in dieser Arbeit die Bezeichnung **dielektrische Elastomere (DE)** als allgemeiner Überbegriff für **dielektrische Elastomerwandler** *(engl. dielectric elastomer transducer)* (DET) verwendet. Darunter fallen je nach Anwendungsfall **dielektrische Elastomeraktoren (DEA)**, **dielektrische Elastomersensoren (DES)** und **dielektrische Elastomergeneratoren (DEG)**. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass vor allem in älteren Literaturquellen häufig die Bezeichnung als dielektrisches elektroaktives Polymer (DEAP) für die weitere Spezifizierung von EAP verwendet wird. Von dieser Bezeichnung wird in [25] allerdings abgeraten, da sie keine Spezifizierung der benannten Technologie darstellt.

Als **Aktor** wird allgemein ein Element bezeichnet, welches Energie von ihrer ursprünglichen Form in eine andere Form umwandeln kann. Die in der Mechatronik gebräuchliche Verwendung bezieht sich dabei auf die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit, wodurch ein Aktor auch aktiv in Prozesse eingreifen kann. [26] Klassische Antriebselemente sind beispielsweise Elektromotoren oder steuerbare Ventile. Die im Bereich der Aktorik entwickelten elektronischen Schaltungen zum Betrieb von DEA werden im Folgenden als (**An-)Steuerungs-Hardware** bezeichnet. Diese Bezeichnung drückt bereits aus, dass mit diesen Schaltungen die Zielvorgabe einer **Ansteuerung** respektive **Steuerung** der Aktoren realisiert wird.

Für den Betrieb von DEA sind Spannungen im kV-Bereich notwendig. Obwohl in der elektrischen Energietechnik eine eindeutige Definition der unterschiedlichen Spannungsbereiche existiert (Klein-, Nieder-, Mittel-, Hochund Höchstspannung), wird in der Literatur bezüglich DEA stets von den Begriffen Nieder- und Hochspannung (*engl. Low Voltage (LV), High Voltage (HV)*) Gebrauch gemacht. In dieser Arbeit wird angelehnt an diese Vorgehensweise der Spannungsbereich zur Ansteuerung > 1 kV daher als HV und < 1 kV als LV beziehungsweise im Hardware-Software-Schnittstellen-Bereich < 15 V als Kleinspannung (LV_<) bezeichnet.

Die Verwendung der Bezeichnung **Sensor** ist in der Literatur nicht immer einheitlich. Teilweise wird unter einem Sensor noch die bei der Einführung des Begriffs in den 1970er und 1980er Jahren synonyme Bedeutung zu Messwertaufnehmern verstanden. Eine erweiterte Definition besagt, dass ein Sensor eine Kombination aus Sensorelement und Auswerteelektronik darstellt. Dabei erfasst ein Sensorelement Messgrößen auf Basis physikalischer oder chemischer Effekte und wandelt diese in elektrisch auswertbare Größen um. Die Elektronik bereitet die elektrischen Signale für weitere Zwecke wie Auswertungen oder Regelungen auf, wodurch die elektrischen Signale nutzbar werden. [27, 28]

Aufgrund der in dieser Arbeit getrennt fokussierten Inhalte sowie der in der Forschungsgemeinschaft zu EAP gebräuchlichen Bezeichnung wird im Folgenden DES als Bezeichnung für einen Elementarsensor, das heißt Messwertaufnehmer verwendet. Analog zur Steuerungs-Hardware werden im Bereich der Sensorik elektronische Schaltungen zur **Auswertung** von DES als **Auswertungs-Hardware** definiert. Diese Schaltungen werden zur Zustandserkennung der kapazitiven Sensoren sowie zur Datenweitergabe oder -verarbeitung verwendet und unterscheiden sich untereinander nur durch die jeweiligen verwendeten Messprinzipien.

Der Begriff der **Sensomotorik** hat seinen Ursprung in der Physiologie. Dabei bezeichnet er die unmittelbare Übersetzung von Erregungsmustern in Form von Bewegung durch die Muskulatur, wobei die vorliegenden komplexen Erregungsmuster das Ergebnis der Verarbeitung interner oder externer Reize durch spezifische Sinnesorgane sind. [29] Auf technische Systeme übertragen besteht ein **sensomotorisches System** demnach aus sensorischen und aktorischen Elementen. Die Prozesse laufen dabei parallel ab, wodurch über sensorische Rückmeldungen und folgend adaptierte aktorische Bewegungen bestimmte Abläufe gezielt ausgeführt werden können. Die Kombination zur simultanen Verwendung eines DEA auch als Sensor wird im Folgenden als **selbstfühlender** oder **sensomotorischer Aktor** oder kurz **selbstfühlend**



Bild 2: Übersicht der in dieser Arbeit definierten Begrifflichkeiten sowie deren Zuordnung

(engl. self-sensing) bezeichnet. Als Abgrenzung zu den bereits genannten Definitionen und zur Hervorhebung der Erweiterung der Ansteuerungs- sowie Auswertungs-Hardware können die kombiniert integrierten und angepassten Schaltungen als **Leistungselektronik sensomotorischer Aktoren** bezeichnet werden.

In Bild 2 ist eine Übersicht der wichtigsten Begrifflichkeiten und deren Zusammenhänge dargestellt.

2.1.2 Werkstofftechnische und physikalische Grundlagen

Der essentielle Bestandteil eines DE ist ein weitmaschig vernetztes Polymer, welches im Folgenden als Elastomer bezeichnet wird. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Polymere schlägt BAR-COHEN daher in [30] eine Klassifizierung der Polymere nach dem jeweiligen Wirkprinzip vor. Diese Unterteilung ist in der Forschungsgemeinschaft etabliert und bildet zwei Hauptklassen, welche zwischen nicht-elektrisch, mechanisch aktivierten Polymeren und elektrisch aktivierten Polymeren unterscheiden. Dabei werden die EAP wiederum in zwei Unterklassen gegliedert, den ionischen und den elektrischen EAP. In Bild 3 ist eine an diese Klassifizierung angelehnte Übersicht der wesentlichen Wirkprinzipien von Polymeren sowie die Einordnung von DE nach dem aktuellen Stand der Forschung dargestellt.

Nicht-elektrisch (mechanisch) aktivierte Polymere reagieren auf eine Störung des Gleichgewichts zwischen sich anziehenden und entgegengesetzt gerichteten intramolekularen Kräften mit einer Form- oder Volumenänderung. Dabei können Verschiebungen dieses Gleichgewichtszustands durch gezielt eingesetzte Parameter, wie einem externen Magnetfeld, unterschiedlichen pH-Wert-Lösungen, Luft, Temperatur oder Licht, ein Expandieren oder Kontrahieren des Materials bewirken. [30]

EAP hingegen reagieren auf elektrische Anregung. Dabei werden Materialien als ionische EAP bezeichnet, deren Form oder Volumen sich aufgrund von Bewegung und Diffusion von Ionen ändert. Diese benötigen relativ geringe Spannungen in der Größenordnung von 1V und können große Biegeverformungen realisieren. Da die Ionen- oder Molekülbewegung durch ein (meist flüssiges) Elektrolyt vonstatten geht, liegen allerdings die Reaktionszeiten dieser Polymere im Zehntelsekunden- bis Sekundenbereich. Es können ebenfalls nur geringe Aktuationskräfte realisiert werden. Klassische Vertreter dieser Gruppe sind ionische Polymergele [32, 33], ionische Polymer-Metall-Komposite (*engl. ionic polymer–metal composites (IPMC)*)



Bild 3: Klassifizierung von Polymeren nach dem jeweiligen Wirkprinzip sowie Einordnung von DE als Untergruppe elektrischer EAP, in Anlehnung an [31]

[34, 35], leitende Polymere [36, 37], elektrorheologische Fluide [38] sowie Kohlenstoff-Nanoröhrchen *(engl. carbon nano tubes)* (CNT) [39].

Als zu unterscheidendes Prinzip sind durch elektrische Felder und der dadurch resultierenden COULOMB-Kräfte stimulierte Polymere, sogenannte elektrische EAP, zu nennen. Die Stärke der elektrischen Felder wird dabei möglichst nahe an der Durchbruchfeldstärke des Materials gewählt und liegt mit über 100 $\frac{V}{\mu m}$ deutlich höher als bei ionischen EAP. Des Weiteren sind Kompromisse zwischen Vordehnung des Materials und Zug- beziehungsweise Druckkräften notwendig. Generell sind allerdings in Relation auf das Gesamtgewicht große Aktuationskräfte bei sehr kurzen Antwortzeiten möglich. Da diese Polymere oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur betrieben werden müssen, sind derartige Materialien nicht für Anwendungen bei tiefen Temperaturen geeignet. [30]

Die Begrifflichkeit der Elektrostriktion wird in der Literatur bezüglich DE nicht klar von anderen Effekten abgegrenzt und oftmals generell als Wechselwirkung von Deformation eines dielektrischen Mediums und dem angelegten elektrischen Feld verstanden. Aufgrund der elektrischen Polarisation des dielektrischen Mediums ist der elektrostriktive Effekt allerdings als grundlegender Effekt zu verstehen, welcher in den Klassen der EAP weiter unterteilt und spezifiziert werden kann. Dabei ist eine Voraussetzung, dass das Material eine kristalline Struktur besitzt [40]. Vertreter innerhalb dieser Kategorie sind elektrostriktive Polymere [30, 40–43], ferroelektrische Polymere [30, 44], elektro-viskoelastische Elastomere [30, 45] und flüssigkristalline Elastomere [40, 44, 46], wobei die Materialklassen in der Literatur teilweise sogar als eigene Unterkategorien elektrischer EAP beschrieben werden.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf DE gelegt, welche auf flexiblen Materialien, wie Acryl, Silikon, Polyurethan oder Naturkautschuk basieren und deren Verformung vornehmlich auf dem elektrostatischen Effekt beruht. Aufgrund der relativ einfachen Möglichkeit, das Material für erste Demonstratoren kommerziell beschaffen zu können, haben sich vor allem die doppelseitigen Acrylklebebänder der *VHB*-Reihe (4905, 4910) der Firma $3M^{TM}$ bewährt und finden in zahlreichen Literaturquellen Einzug. Eine gute Übersicht zu Silikonen, welche hinsichtlich der Verwendung als DE bereits untersucht sind, ist in [47] zu finden. Weitere für den Einsatz als DE geeignete Materialien sind Polyurethan-Elastomere [48] sowie Naturkautschuk [16]. Auf die zwei letztgenannten Materialklassen wird im Verlauf dieser Arbeit jedoch nicht zurückgegriffen.

Zur Realisierung leitfähiger Schichten wird in [25] eine Metallisierung der Elastomeroberfläche durch Evaporations- beziehungsweise Sputterprozesse oder auch eine Beschichtung mit einem leitfähigen Medium empfohlen, wie beispielsweise Metallpulver. Von leitfähigen Pasten oder Fetten wird aufgrund des möglichen Eindringens der flüssigen Anteile der Elektrode in das Elastomer sowie der geringen Leitfähigkeit und der damit verbundenen Erhöhung des seriellen Widerstands abgeraten, da dies zu erschwerten Bedingungen bei der Wiederholgenauigkeit von Messungen führen kann. Zur Thematik des Einsatzes geeigneter Elektroden ist eine weiterführende Übersicht zu entsprechenden Materialien in [49] zu finden.

Ionisch sowie elektrisch aktivierte EAP weisen zahlreiche Potenziale auf. Hier können sich DEA im Vergleich zu ionischen EAP und den anderen elektrischen EAP allerdings durch ihr geringes Gewicht mit einer hohen relativen Kontraktionskraft und damit hohen Energiedichte abgrenzen. Des Weiteren ist die Antwortzeit im Vergleich zu ionischen EAP im Millisekundenbereich deutlich kürzer. Durch die direkte Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie steigt der elektro-mechanische Kopplungsfaktor, womit DE ebenfalls eine hohe Effizienz erhalten. Des Weiteren benötigen DE im Gegensatz zu ionischen EAP keine flüssigen Medien, sondern können auch in Luft ohne weitere Einschränkungen verwendet werden. [47, 50]

Neben diesen bereits genannten positiven Eigenschaften im Vergleich zu weiteren EAP können sich DE auch zu anderer Technologien abgrenzen. Im Vergleich zu Elektromotoren können DE dort eingesetzt werden, wo unidirektionale Bewegungen notwendig sind und aufgrund von Platzmangel und Gewichtseinsparung auf Getriebe und Bewegungstransformationen verzichtet werden soll. Der geräuschlose Betrieb von DE ist ein weiterer Vorteil gegenüber Elektromotoren sowie hydraulischen oder pneumatischen Aktoren. Als Nachteil sind die benötigten hohen elektrischen Spannungen zu nennen, welche dadurch begründet sind, dass ein DEA am effektivsten nahe an der Durchbruchfeldstärke des verwendeten Materials (ca. 80 - 120 $\frac{V}{\mu m}$ bei Silikon und Acryl, im Einzelfall bis zu 440 $\frac{V}{\mu m}$) betätigt wird [44, 51].

2.1.3 Aufbau und Funktionsprinzipien dielektrischer Elastomere im aktorischen und sensorischen Betrieb

Der grundsätzliche Aufbau eines DE ist sowohl bei einem Aktor als auch einem Sensor durch die Analogie zu einem Plattenkondensator zu beschreiben. Ein DE besteht im Wesentlichen aus einem Dielektrikum, welches zwischen zwei Elektroden eingebettet ist. Als Besonderheit der elektrisch leitenden Elektroden und der dazwischen liegenden isolierenden Schicht sind die elastischen und weichen Eigenschaften der Materialien zu nennen, welche Formänderungen der DE erst ermöglichen. In Bild 4 ist der Aufbau eines DEA-Elements skizziert. Obwohl der Aufbau aus drei einzelnen Schichten besteht, wird aufgrund der resultierenden funktionalen Einheit und im Hinblick auf gestapelte Aktoren auch von einem Elementaraktor oder einlagigen Aktor gesprochen.

Zu erkennen ist der Zustand eines einzelnen DEA-Elements in seiner inaktiven Phase (oben) sowie aktiven Phase (unten). Rein geometrisch betrachtet wird ein solcher Aktor in seiner inaktiven Phase lediglich durch die Elektrodenfläche A_0 und die Dicke des Dielektrikums d_0 definiert. Im aktiven Zustand vergrößert sich die Fläche mit der relativen Dehnung σ , beziehungsweise verringert sich der Abstand der Elektroden reziprok. Da die Elektroden nicht aktiv zur Verformung des Aktors beitragen, wird in [52] auf Basis einer Analyse des Einflusses der Elektrodendicken auf die relative Aktorstapeldeformation eine geeignete Elektrodenstärke < 10 %, idealerweise 1 % der Dielektrikums-Schichtdicke abgeleitet. Des Weiteren wird in



Bild 4: Aufbau und Funktionsweise eines einlagigen DEA, auch als Elementaraktor bezeichnet, im inaktiven und aktiven Zustand

[25] ein Verhältnis zwischen Elektrodenfläche und Dielektrikumsstärke von $\frac{\sqrt{A_0}}{d_0} \ge 100$ empfohlen, um Feldrandeffekte zu minimieren.

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung beziehungsweise eines elektrischen Felds ausreichender Stärke an den Elektroden des Aktors kontrahiert dieser aufgrund elektrostatischer Kräfte entlang der Feldlinien. Unter der Annahme der Inkompressibilität des Dielektrikums [48] kann das Volumen des Dielektrikums als konstant betrachtet werden. Folglich weicht durch die gegenseitige Anziehung unterschiedlich polarisierter Ladungen auf den Elektroden das isolierende Dielektrikum in orthogonaler Richtung aus.

In ersten Veröffentlichungen über die Beschreibung des physikalischen Effekts von DE wird häufig sowohl von elektrostatischen als auch elektrostriktiven Effekten gesprochen. Dabei beruht der elektrostatische Effekt auf Basis der durch COULOMB-Kräften bewirkten gegenseitigen Attraktion unterschiedlicher Polaritäten. Der elektrostriktive Effekt hingegen beschreibt den Zusammenhang zwischen elektrischer Polarisation und mechanischer Verformung von (kristallinen) Materialien. [53] Da es sich bei Elastomeren, vorausgesetzt sie werden oberhalb ihrer Glastemperatur betrieben, um *"vernetzte Flüssigkeiten"* [54] handelt, ist deren Elastizitätsmodul deutlich kleiner als ihr Kompressionsmodul und damit die Poissonzahl ν (Querkontraktionszahl) sehr nahe an $\frac{1}{2}$, was einer Inkompressibilität des Materials entspricht.

Dadurch ist der elektrostriktive Effekt verschwindend gering im Vergleich zum elektrostatischen Effekt. [54]

Dies berücksichtigt auch der in [7, 8] von PELRINE et al. hergeleitete Zusammenhang, dass hauptsächlich der elektrostatische Druck

$$p_{\rm el} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\rm r} \left(\frac{U}{d(\sigma)}\right)^2 \tag{2.1}$$

für die Verformung eines DEA verantwortlich ist. Allerdings wird die Elektrostriktion in ersten Publikationen zunächst weiterhin fälschlicherweise als Überbegriff für den zu beobachtenden Effekt verwendet. In Gleichung (2.1) sind die auf den elektrostatischen Druck beziehungsweise MAXWELL-Druck pel ausschlaggebenden Parameter ersichtlich. Neben der relativen Permittivität ε_r und der Dielektrizitätskonstanten ε_0 gehen die angelegte elektrische Spannung U und der verformungsabhängige Abstand der Elektroden $d(\sigma)$ jeweils quadratisch ein. Ein Vergleich zur Berechnung des elektrostatischen Drucks eines herkömmlichen Plattenkondensator zeigt in Gleichung (2.1) den Faktor 2, welcher durch das Wirken von zwei Effekten zu erklären ist. Einerseits ziehen sich die auf den jeweiligen Elektroden befindlichen unterschiedlichen Ladungen gegenseitig an, was zu einem Druck auf das Dielektrikum führt. Andererseits stoßen sich innerhalb einer Elektrode gleiche Ladungen ab, was (anders als bei rigiden Elektrodenplatten) aufgrund der Flexibilität der Elektrode möglich ist. Beide Effekte sind über die Inkompressibilität des Dielektrikums und der allgemeinen Flexibilität der Materialien verknüpft. [8] Zur Berechnung der relativen Dehnung σ eines DEA kann der Zusammenhang zwischen elektrostatischem Druck und dem YOUNGschen Modul oder Elastizitätsmodul (E-Modul) Y nach [8] mit

$$\sigma = -\frac{p_{\rm el}}{Y} \tag{2.2}$$

beziehungsweise in impliziter Schreibweise nach [55] mit

$$\sigma = -\frac{1}{Y} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{U^2}{d_0^2} \cdot (1+\sigma)^2$$
(2.3)

angegeben werden. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur für kleine Verformungen unter 20% [56].

Mittels genannter Zusammenhänge können hinsichtlich eines geeigneten Aufbaus und Betriebs von DE einfache erste Ableitungen für den Einsatz als Aktoren oder Sensoren getroffen werden. Durch Vordehnungen des Materials

sowie spezielle Herstellungsverfahren dünner Dielektrikumsschichten, wie dem Aerosol-Jet-Druck [P4], Spin-Coating-Verfahren [52] oder Vorspannprozesse des Dielektrikums [57], wird durch Verringerung der Schichtdicke die Verwendung geringerer Spannungen bei gleichbleibend resultierendem elektrostatischem Druck ermöglicht. Da DEA für den größtmöglichen Effekt möglichst nahe an der Durchbruchfeldstärke betrieben werden sollten, ohne dass es zu Spannungsdurchschlägen kommt, gelten die relative Permittivität sowie der E-Modul des Dielektrikums als weitere Parameter, die Performanz eines DEA zu erhöhen. Analog hierzu gelten ähnliche Bedingungen für den Aufbau von Sensoren, wobei keine Rücksicht auf die Spannungsfestigkeit genommen werden muss. Grundsätzlich gelten diese zwei Parameter im Optimierungsprozess als gegenläufig, wodurch die Optimierung des einen Parameters eine Verschlechterung des anderen bewirkt. Aufgrund des deutlich höheren Einflusses der Verformungsabhängigkeit des E-Moduls im Vergleich zur relativen Permittivität wird letztere üblicherweise über die Verformung hinweg als konstant betrachtet [47].

Unter der Annahme, dass das Dielektrikum inkompressibel ist, also

$$A_0 d_0 = A(\sigma) d(\sigma) \tag{2.4}$$

gilt, und bei Betrachtung eines einzelnen DE-Elements können durch die einfache Geometrie die Grundkapazität C_0 mit

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_0}{d_0} \tag{2.5}$$

sowie die verformungsabhängige Kapazität $C(\sigma)$ mit

$$C(\sigma) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A(\sigma)}{d(\sigma)} = C_0 \frac{d_0^2}{d(\sigma)^2} = C_0 \left(1 + \sigma\right)^2$$
(2.6)

bestimmt werden [55]. $A(\sigma)$ bezeichnet hierbei analog die verformungsabhängige Elektrodenfläche.

Die Zusammenhänge aus den Gleichungen (2.5) und (2.6) können dabei näherungsweise ebenfalls für weitere Strukturen, wie beispielsweise zylindrische Strukturen verwendet werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Annäherung $\frac{A}{d} = \frac{2\pi h r_a}{r_a - r_i}$ für einen Aktor der Höhe *h* erst mit einem Verhältnis > 98 % der Radien von innerer Elektrode r_i zu äußerer Elektrode r_a mit einer relativen Abweichung < 1 % gilt.

Aus den Gleichungen (2.5) und (2.6) ist ersichtlich, dass die Kapazität lediglich von geometrischen Größen wie der veränderlichen Elektrodenfläche $A(\sigma)$, des veränderlichen Elektrodenabstands $d(\sigma)$ sowie von materialspezifischen Größen abhängig ist. Mit der Annahme, dass die Materialeigenschaften bei Verformung nahezu konstant bleiben, sind DE als flexible Sensoren geeignet, um vor allem geometrische Veränderungen detektieren und erfassen zu können. In der Literatur bekannte Beispiele kapazitiver Sensorik auf DE-Basis sind stets auf zwei grundlegende Prinzipien, der orthogonalen und longitudinalen Kraftwirkung, zurückzuführen. Weitere Unterteilungen aus [15], wie beispielsweise Scherkräfte, können hier ebenfalls eingeordnet werden. Andere Einteilungen, wie Berührung oder Annäherung [58] beruhen auf dem Prinzip der Kapazitätsmessung gegen Erde und sind daher nicht mit oben genannten Verfahren vergleichbar. Derartige Fälle werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

DES zeichnen sich vor allem durch ihre Elastizität, Weichheit und ihr geringes Gewicht aus, was eine direkte Detektion und Messung großer Geometrieänderungen ermöglicht. In Bild 5 sind zwei Varianten hinsichtlich möglicher Sensoreinsätze abgebildet. Als Beispiel ist in Bild 5a) das Funktionsprinzip eines einlagigen Dehnungssensors im Grundzustand (oben) und in einem durch eine Kraft F gedehnten Zustand (unten) gezeigt. Durch die Dehnung des Sensors und der vergrößerten Elektrodenfläche $A_0(1 + \sigma)$ und der verringerten Dicke $\frac{d_0}{(1+\sigma)}$ des Dielektrikums erhöht sich die Kapazität des Sensors nach Gleichung (2.6). Voraussetzung hierfür ist die Fähigkeit der Elektroden der Dehnung des Dielektrikums folgen zu können. Mit der Annahme der Inkompressibilität des Dielektrikums und dem Zusammenhang aus Gleichung (2.6) ist außerdem hervorzuheben, dass die geometrischen Auswirkungen (Vergrößerung der Fläche und Verringerung des Elektrodenabstands) nicht konträr auf die Kapazität des Sensors wirken, wodurch über die Kapazitätserhöhung eindeutig auf eine Wirkrichtung des Sensors zu schließen ist.

Neben Zugkräften können auch Stauchungen aufgrund von Druckkräften registriert werden. Dabei greift die Kraft wie in Bild 5b) skizziert nicht längs des Sensors an, sondern senkrecht zu den Elektrodenflächen. Der Abstand der Elektrodenflächen wird verringert und aufgrund der Inkompressibilität eine Flächenvergrößerung bewirkt. Durch entsprechende Strukturierung der Elektrodenoberfläche kann in beiden Fällen eine Steigerung der Kapazitätsänderung bei gleicher Krafteinwirkung realisiert werden, was beispielsweise zu einer zuverlässigen Druckmessung beiträgt [59].



a) Formänderung des Sensors durch longitudinal b) Formänderung des Sensors durch orthogonal wirkende Zugkraft

wirkende Druckkraft



Neben dem beschriebenen Fall einer elementaren Einheit sind in Tabelle 1 ergänzend weitere Aktorstrukturen auf DE-Basis mit deren Freiheitsgraden und Beispielen aufgelistet. Diese Strukturen bilden die Basis für beliebige Aktorgeometrien und sind ebenfalls auf Sensorgeometrien übertragbar. Aufgelistete DEA unterliegen dabei dem gleichen Funktionsprinzip basierend auf COULOMB-Kräften, unterscheiden sich aber aufgrund ihrer unterschiedlichen Geometrien und Strukturen hauptsächlich in der jeweiligen Wirkrichtung der nutzbaren Bewegung.

Während bei einem Elementar- und Rollaktor (ohne oder mit Federkern) die Elektrodenflächenänderung senkrecht zu den Feldlinien nutzbar ist, ist bei einem Stapel-, Falt- und Helixaktor die Kontraktion des Aktors parallel zu den anliegenden Feldlinien die ausschlaggebende Wirkrichtung. Bei diesen Aktoren ist allerdings zu beachten, dass bei Zugbeanspruchungen die einzelnen Aktorlagen sich aufgrund mangelnder Adhäsionsfähigkeit voneinander ablösen können.

Uni- und bimorphe Aktorstrukturen weisen dagegen eine Biegebewegung auf, welche in Richtung der steiferen Elektrodenlagen wirkt. Ein ähnliches Prinzip wird auch bei unterschiedlichen Rahmenstrukturen und Membranaktoren ausgenutzt, indem die Rahmenstruktur ungewollte Freiheitsgrade einschränkt und somit beliebige Bewegungen realisiert werden können.

Für weiterführende Literatur der genannten Aktorgeometrien sowie Applikationsbeispiele, welche mögliche Einsatzgebiete der verschiedenen Aktortypen aufzeigen, sei an dieser Stelle auf die Angaben in Tabelle 1 hingewiesen. Tabelle 1: Übersicht der wesentlichen Aktor- oder Sensorstrukturen auf Basis von DE, Aktorgeometrien und Strukturen in Anlehnung an [60, 61]

Bezeichnung	Struktur	Wirkrichtung/ Formänderung	Beispiele in der Literatur
Planar-, Membran- aktor ohne/ mit Rahmen- struktur		Senkrecht zu Feldlinien/ Änderung der Elektrodenfläche	Biaxialer Aktor [25] Antriebswelle [62] Greifer [63] Ventil [64] Lautsprecher [12, 65, 66] optische Linse [67–69] Krabbelroboter [70]
Stapel-/ Falt- aktor		Parallel zu Feldlinien/ Kontraktion längs des Stapels bzw. zwischen den Faltschich- ten	Vibrotaktile Einheit [52] Braille-Display [71] Ventil [72] Künstlicher Muskel [P3] Faltaktor [73] Agonist-Antagonist [74]
Unimorpher/ bimorpher Aktor	unimorph bimorph	Senkrecht zu Feldlinien/ Bie- gung in Richtung Material höheren E-Moduls <i>unimorph:</i> eine Richtung <i>bimorph:</i> ent- gegengesetzte Richtungen	Bimorpher DEA [75] Unimorpher Biegeaktor [76] Unimorpher Greifer [77]
Zylindrischer Aktor: gerollt ohne/ mit Federkern (engl. spring roll)	optional: Federkern	Senkrecht zu Feldlinien/ Aus- dehnung längs der Rotations- achse	Armdrückroboter [10] Krabbelroboter [70] Flugroboter [78]
Helixaktor		Parallel zu Feldlinien/ Kontraktion längs der Helix- spirale	Helixaktor [79]
Legende	→ Wirkrichtung de → nutzbare Formä	er Feldlinien nderung	

In Bild 6 sind die in Tabelle 1 gelisteten grundlegenden DE-Geometrien hinsichtlich ihrer wesentlich nutzbaren Bewegungsrichtung sowie ihrer Wirkrichtung in Bezug auf das elektrische Feld untergliedert. Dadurch wird deutlich, dass beliebige Bewegungen durch entsprechende Wahl der DE-Geometrie realisiert werden können.



Bild 6: Einteilung der wesentlichen Aktor-/ Sensorgeometrien nach deren nutzbaren Bewegungsrichtung sowie ihrer Wirkrichtung in Bezug auf das elektrische Feld

Im Verlauf dieser Arbeit werden die Versuchsergebnisse vornehmlich unter Verwendung von Aktoren und Sensoren in planarer Bauweise vorgestellt. Durch die einheitliche Funktionsweise der Aktoren und Sensoren sind die in dieser Arbeit entwickelten Methoden jedoch auch auf andere DEA-Strukturen übertragbar.

2.2 Anwendungspotenzial dielektrischer Elastomere

Durch ihre inhärenten positiven Eigenschaften, wie geringes Leistungsgewicht, lautloser Betrieb, multidirektionale Kraftwirkung, geringe Kosten, Skalierbarkeit sowie mögliche Parallelisierung und Bündelung mehrerer Aktorstränge, stellen DE wichtige Voraussetzungen zur Verfügung, neuartige flexible und dynamische Applikationen entwickeln zu können. Aus dem hohen technologische Potenzial resultiert folglich auch ein hohes Applikationspotenzial, welches DE erreichen können.

2.2.1 Technisches Leistungsvermögen

Nicht zuletzt die in der Literatur sehr häufig zu findende Bezeichnung *künstlicher Muskel* zeigt einerseits die hohen Erwartungen an die Technologie, dynamische und adaptive Anwendungen realisieren zu können. Andererseits macht dieser Vergleich zum natürlichen Skelettmuskel auch deutlich, dass DE mit ihren ähnlichen material-mechanischen Eigenschaften, der Fähigkeit der elastischen Energiespeicherung und dem daraus resultierenden guten Wirkungsgrad bei geringem Gewicht mindestens im gleichen Leistungsbereich wie natürliche Muskeln vorzufinden sind, siehe Bild 7.



Bild 7: Vergleich des Leistungsvermögens von DEA zu natürlichen Muskeln und weiteren Technologien, in Anlehnung an [80, 81]

Wie auch ein natürlicher Muskel stellen DEA nachgiebige, viskoelastische Aktoren dar, welche neben linearen kontraktilen Kräften auch isometrische sowie exzentrische Aktuationen realisieren können. Des Weiteren ist durch die steuerbare Kraft ebenfalls eine feine Bewegungs- und Positionskontrolle möglich. [82] Allerdings sind quantitative Angaben für einen Vergleich häufig nicht verwendbar. Durch unterschiedliche Messmethoden, nicht beschriebener Vorgehensweisen sowie unterschiedliche Fasertypen und Materialien weichen Angaben in der Literatur stark voneinander ab.

Gleiches gilt für Angaben hinsichtlich des Wirkungsgrads. Hierzu sind entscheidende Parameter und Vorgehensweisen oftmals nicht angegeben, wodurch eine falsche Erwartungshaltung resultieren kann. Zu unterscheiden ist vor allem die Effektivität des Aktors im Hinblick auf den rein aktorischen Betrieb oder die zusätzliche Nutzung von Energierekuperation vorangegangener Bewegung. Realistische typische Angaben belaufen sich zu Ersterem bei ca. 18 - 26 %, obwohl bei Betrieb mit einer konstanten Ladung theoretisch ein idealer Wirkungsgrad und bei konstanter Spannungsversorgung ein theoretisch maximaler Wirkungsgrad von 50 % ohne Rekuperation erreicht werden kann [83, 84]. Bei häufig beschriebenen Angaben zwischen 60 % - 80 % ist daher von rekuperierenden Verfahren und einer idealen Leistungselektronik auszugehen [84, 85].

Neben ihren aktorischen Potenzialen stellen DE ebenfalls eine geeignete Technologie für äußerst flexible, leichte und weiche Sensoren dar, welche in unterschiedlichen Formen verschiedene Messgrößen aufnehmen können. Dabei können diese wie in Bild 5 bereits angedeutet als Druck- [86, 87] oder Dehnungssensoren [15], [P5–P7] sowie in weiteren Konfigurationen und Kombinationen auch als Näherungsschalter [58] verwendet werden. Als Kraftaufnehmer respektive Dehnungssensoren können DES mit einer maximalen Verformung um 80-300 % im Vergleich zu Piezosensoren (ca. 0,1-0,2 %) eine deutlich größere Verformung ohne jeglichen Schaden des Sensors ertragen.

Der Vollständigkeit halber sei die Verwendung von DE als Generatoren genannt. Erste Versuche und Abschätzungen zeigen eine Energiewandlung mit acrylbasierten Generatoren bis zu $0,4 \frac{J}{g}$ und mit silikonbasierten Generatoren von $1,5 \frac{J}{g}$ und mehr [P8], [88]. Im Vergleich zur spezifischen Energiewandlung von elektromagnetischen Generatoren und piezoelektrischen Keramiken liegen DEG daher mindestens eine Größenordnung höher. Als Beispiele können eine Schuheinlage mit $0,3 \frac{J}{g}$ und ein Wellengenerator mit $0,109 \frac{J}{g}$ elektrischer Energiewandlung genannt werden. [17, 88, 89] Da die Nutzung von DE als Generator in dieser Arbeit nicht vorgesehen ist, wird im Laufe dieser Arbeit nicht weiter auf diese Nutzungsart eingegangen.

2.2.2 Applikationspotenziale

Mit den genannten technischen Potenzialen ist ein hohes Applikationspotenzial durch diese Technologie zu erwarten. Dabei können verschiedene Bereiche, wie der Medizintechnik-, der Industrie-, oder auch der Automobilsektor sowie der private Unterhaltungsbereich von Applikationen auf DE-Basis profitieren.

Medizintechnik: Erste Applikationen, welche im weiteren Verlauf ebenfalls im medizintechnischen Bereich Einzug finden können, sind vor allem auf rein sensorischer Basis von DE umgesetzt. Beispielsweise können DES-Matten für Untersuchungen von Druckstellen hervorgerufen durch das Tragen von Prothesen [86] oder für Druckmessungen am Fuß zur Behandlung eines diabetischen Fußes [90, 91] verwendet werden. Auch eine Bewegungsund Trainingsüberwachung bei Rehapatienten mit am Körper angebrachten Sensoren ist möglich [P7]. Für die Überführung der Systeme in die medizinische Anwendung gilt für derartige medizintechnische Produkte beziehungsweise Medizinprodukte seit 2017 die von der Europäischen Union (EU) erstellte Verordnung (EU) 2017/745 über Medizinprodukte (*engl. Medical Device Regulation (MDR)*). Aufgrund der hohen Anforderungen an medizintechnisch eingesetzte Systeme und der höchsten Einstufung *Klasse 3* für aktive Medizinprodukte existieren aktuell keine Anwendungen auf Basis von DE. Allerdings zeigt auch in diesem Bereich die Technologie zahlreiche Applikationsmöglichkeiten, welche bisher nur in der Konzeptphase und daher noch nicht umgesetzt sind. Dabei werden Anwendungen als steuerbares Endoskop [92], dynamische Braille-Displays [93], künstliche Muskeln in Prothesen [82] oder als Herzunterstützungssystem [94] untersucht.

Industrie, Automobil und Robotik: Zu Beginn der intensiveren Forschung an DE wurde vor allem in den 1990er Jahren durch BAR-COHEN bei der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) diese Technologie herangezogen, um Applikationen für die Raumfahrt zu entwickeln. Dabei wurden mögliche Anwendungen auf Basis von DE untersucht, welche den Anforderungen wie Leichtbau, Flexibilität und Robustheit unterliegen. Als Beispiele seien ein Scheibenwischer für Staub oder ein flexibler Greifer für Gestein genannt [30], welche allerdings bisher in der realen Umsetzung noch keinen Einsatz gefunden haben.

Aufgrund ihrer Eigenschaften sind künstliche Muskeln ebenfalls für Anwendungen in der Robotik von großem Interesse, um natürliche Bewegungsmuster nachbilden zu können, welche durch Adaptionsfähigkeit, Flexibilität und Dynamik charakterisiert sind. Erste Umsetzungen makroskopischer robotischer Fortbewegung auf Basis von DEA sind in [70, 78, 95, 96] zu finden. Für den Einsatz in der Schnittstelle zwischen Mensch und Roboter können auch bereits kleine Aktorbewegungen genutzt werden, welche in einem vibrotaktilen Display Rückmeldungen an den Nutzer geben können [97]. Diese Anwendung könnte auch Einzug im Interieur des Automobils beziehungsweise der Steuerung im Cockpit halten. Großflächige Sensoren in Autositzen verhindern beispielsweise anhand der Sitzposition ein lebensbedrohliches Auslösen des Airbags [59]. Zur intuitiven und berührungslosen Gestensteuerung von Robotern mittels körpernaher Erfassung von Bewegungen der Extremitäten sind DES durch ihre Flexibilität und ihrem extrem geringen Gewicht ebenfalls geeignet [P5]. Ein weiterer sensorischer Einsatzbereich liegt in der pneumatischen Druckmessung [98]. In der Optik werden DE als abstimmbare Linse mit Fokusänderung [68, 99] oder auch hochdynamisch als Laser-Speckle-Reduzierer (engl. Laser speckle reducer) [100] verwendet. DEA bilden in verschiedenen Bauformen Ventile, welche stufenlos Gas- oder Flüssigkeitsströme steuern können [64, 72]. Auch an Windturbinenblättern sind DEA zum Einstellen einer optimalen Windlage für eine zuverlässige, leichtbauende und steuerbare Effizienzmaximierung und eine erhöhte Energieausbeute einsetzbar [101]. Weitere mögliche Applikationen liegen im Bereich der Robotik beziehungsweise Mensch-Roboter-Kollaboration als künstliche Haut, um Berührungen und Annäherungen über eine flexible Oberfläche zu registrieren und aufzulösen oder auch als adaptive Schwingungsdämpfer, welche zugleich Energie aus den Vibrationen gewinnen können.

Freizeit- und Unterhaltungsbranche: Die Flexibilität und der leichte sowie einfache Aufbau machen DE ebenfalls für Applikationen in der Spieleund Unterhaltungsbranche interessant, wobei sich zahlreiche Anwendungen aus dem industriellen oder medizintechnischen Bereich übertragen lassen und umgekehrt. Körpernah angebrachte, kaum spürbare Sensoren können genutzt werden, um Bewegungen zu erkennen, mit deren Analyse und Interpretation sportliche Bewegungsabläufe trainiert und optimiert werden, wie beispielsweise die Erfassung von Flossenschlägen eines Tauchers [102]. Des Weiteren eröffnen sie auch neuartige Möglichkeiten im Unterhaltungsbereich durch gezieltes haptisches Feedback von Smartphones oder eines Controllers in Kombination mit einer virtuellen Realität [103] sowie durch spürbaren Sound in Autositzen (avisiertes Produkt der Firma iFeel [104]) oder in Kopfhörern (vorgestellt von der Firma ViviTouch auf der Consumer Electronics Show (CES) 2014). Als Beispiel zur Generierung neuartiger Anwendungen sei die Vorstellung eines Sensor-Handschuhs zum Luftgitarrespielen von der Firma StretchSense Ltd. bei der CES 2016 genannt. Im aktorischen Bereich können leichtbauende und kompakte Kamera-Linsen für Smartphones [67] oder aufgrund der extrem dynamischen Eigenschaften auch Lautsprecher auf DE-Basis realisiert werden, wodurch leichte und großflächige Lautsprecher möglich werden [12, 105].

2.3 Aktueller Stand der Forschung und Technik im Bereich Leistungselektronik für dielektrische Elastomere

Aufgrund ihres beschriebenen technologischen Potenzials wird der Einsatz von DE für ein breites Spektrum an Applikationen angestrebt. Für einen solchen Einsatz ist neben einer fokussierten Applikationsentwicklung und der Entwicklung geeigneter Herstellungsverfahren von Aktoren, Sensoren oder auch Generatoren außerdem eine umfängliche und vielfältig einsetzbare Leistungselektronik notwendig. Die Untersuchung unterschiedlicher leistungselektronischer Methoden dient dabei zur Evaluation und Qualifizierung unterschiedlicher Herstellungsverfahren sowie der daraus resultierenden Aktoren und Sensoren. Dabei kann die für DE benötigte Leistungselektronik in drei Teilbereiche untergliedert werden:

- Ansteuerung von DEA
- Auswertung von DES
- simultane Ansteuerung und Auswertung von DE

Anhand dieser Untergliederung wird im Folgenden der Stand der Technik sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile dargelegt, um anschließend den wesentlichen Handlungsbedarf identifizieren zu können.

2.3.1 Steuerung dielektrischer Elastomeraktoren im Hochspannungsbereich

Generell wirken einzelne Zustandsveränderungen und Bewegungen für das menschliche Auge für Frequenzen ab ca. 25 Hz flüssig. Für das Auge sichtbare Zustandsänderungen liegen dagegen im Bereich bis ca. 25 Hz. Falls keine alternierenden und sichtbaren Zustandsänderungen gefordert sind, ist folglich entweder ein gleichgerichtetes Signal oder ein höher frequentiertes Ansteuerungssignal via Pulsweitenmodulation (PWM) oder pulsweitenmodulierten Signalen geeignet, um DEA anzusteuern.

Aufgrund der Reaktionszeit von DEA sind diese im Bereich > 25 Hz bis in den kHz-Bereich für taktiles Feedback [97] oder auch für den Aufbau von Lautsprechern geeignet [12, 66]. Dabei sind für den Menschen über seine Nervenzellen (beispielsweise über die sogenannten *Vater-Pacini-Körperchen* [106]) Vibrationen mit Stellwegen bis zu 0,1 µm und Bewegungsfrequenzen bis zu 300 Hz spürbar. Zusammenfassend sind zur Ansteuerung eines DEA nutzbare Frequenzen in Bild 8 dargestellt. Ebenfalls abgegrenzt sind die nutzbaren Frequenzbereiche für visuelle, taktile und auditive Anwendungsfälle, für welche DEA implementiert werden können.

Um DEA zu betreiben, werden grundsätzlich angepasste Leistungselektroniken im HV-Bereich benötigt, wobei neben den hohen Spannungen zwischen 1 - 10 kV lediglich geringe Ströme im niedrigen µA-Bereich für einen Betrieb ausreichend sind. Bei einer reinen Steuerung *(engl. feedforward/open loop control)* wird dabei nicht auf sensorbasierte Messwerte des aktuellen Aktorzustands zurückgegriffen.

Aufgrund des bisherigen Forschungsfokus bei der Entwicklung von DEA auf Materialwissenschaften, Herstellungsprozessen und Modellierungen wer-



Bild 8: Schematische Darstellung des nutzbaren Frequenzbereich einer pulsweitenmodulierten Ansteuerung von DEA im visuellen, taktilen oder auditiven Anwendungsfall

den zur Verifikation der Ergebnisse häufig Laborverstärker für HV verwendet. Diese decken zwar einen großen Bereich einer einstellbaren Gleichspannung (DC) ab, sind allerdings mit einer hohen Masse, einem großen Volumen und mit dementsprechend hohen Kosten nicht für zukünftige Applikationen aufgrund fehlender Flexibilität und Mobilität verwendbar. Der Aspekt einer deutlich leichtbauenderen Hardware hinsichtlich der Ansteuerung von DEA und die Anpassung an die jeweiligen Aktoranwendungen ist bisher in nur wenigen Publikationen (zum Beispiel [107]) zu finden.

Für die Ansteuerung von DEA je nach Applikationsanforderung sind in aktuellen Forschungsprojekten unterschiedliche Verfahren zu finden. Diese können hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Funktionsweisen und Teilaspekte der einzelnen Ansteuerungsverfahren geclustert und charakterisiert werden. Die Funktionsweisen bilden dabei die Grundlage für die unterschiedlichen Einsatzszenarien, welche in Bild 8 angedeutet sind.

Es wird zwischen Steuerungsmethoden mittels

- Gleichspannungssignalen,
- pulsweitenmodulierten Signalen sowie
- Modellbildung

unterschieden. Dabei ist zu beachten, dass erst bei der modellbasierten Ansteuerung eine positionsgezielte Steuerung berücksichtigt wird.

Ansteuerung mittels Gleichspannungssignalen: Unterschiedliche DEA-Zustände können mittels Steuerung des elektrischen Felds nach Gleichung (2.1) erzielt werden. Durch Erhöhen und Verringern der angelegten elektrischen Spannung resultieren folglich unterschiedliche elektrostatische

Drücke, welche zu entsprechenden Kontraktionen des DEA führen, siehe Bild 9.



Bild 9: Prinzipschaubild zur Ansteuerung von DEA mittels Gleichspannungssignalen durch Variation der elektrischen Spannung und damit des elektrischen Felds beziehungsweise des elektrostatischen Drucks

Die Bereitstellung der DC-HV-Signale kann über die in Bild 10 gezeigten Methoden realisiert werden. Diese werden im Folgenden aufgeführt und hinsichtlich ihrer Potenziale und Einsetzbarkeit zur Ansteuerung von DEA bewertet.



Bild 10: Varianten von Steuerungsverfahren auf Basis von DC-HV-Signalen zum aktorischen Betrieb von DE

Zur Spannungsumwandlung einer Steuerspannung in den HV-Bereich sind aus der Leistungselektronik verschiedene Umsetzerverfahren bekannt, siehe Bild 10a). Dabei können diese Verfahren für unterschiedliche Einsatzgebiete und Anforderungen verwendet werden. Hierbei haben sich im Bereich DEA beispielsweise für Akustikapplikationen mit einer benötigten hohen Linearität sogenannte *Multilevel Buck-Konverter* und generell für Anwendungen mit hoher Effizienz sogenannte *bidirektionale Buck-Boost-Konverter* als geeignet erwiesen [108]. Eine weitere hinsichtlich Größe, Gewicht und Sicherheit geeignete Variante stellt der sogenannte *Flyback-Konverter* dar [108]. Dieses Verfahren wird ebenfalls als unidirektionale Variante in [101] vorgestellt. Des Weiteren ist bei der Entwicklung neben der Reduzierung des Gewichts und der Größe auch die Effizienz ein entscheidender Faktor. So kann als Erweiterung des zuvor genannten Prinzips ein kaskadierter und optimierter bidirektionaler Flyback-Umsetzer die in einem DEA gespeicherte Energie beim Entladen des Aktors zurückgewinnen [109, 110]. Die Effizienz der Ansteuerung liegt hier beim Laden bei 89 % und beim Entladen bei 84 % [110].

Andere Verfahren gehen von einer bereits bestehenden HV-Versorgung aus, die als Quelle zahlreicher Aktoren dienen soll. Um dem Prinzip des Leichtbaus zu folgen, wird hier auf kleine, leichte und materialintegrierte Schaltverfahren zurückgegriffen, wodurch die HV individuell auf einzelne Aktoren zugeschaltet wird, siehe Bild 10b). Hier werden piezoresistive Eigenschaften von Ionen-implantierten Elektroden oder flexibler Leiterbahnen auf einem DEA-Substrat integriert als dehnungsabhängige Widerstände genutzt. Diese können dann als Schalter zur individuellen HV-Versorgung der jeweiligen Aktoren dienen [11]. Durch eine derartige Integration können durch die inhärente Verbindung zum Aktor sowie gleiche Herstellungsverfahren und Materialien hohe Kosten- und Gewichtseinsparungen erzielt werden. Aufgrund der Materialeigenschaften ist dieses System allerdings unpräzise, dynamisch limitiert, nicht miniaturisierbar und hat eine im Vergleich zu herkömmlichen elektronischen Bauelementen kurze Lebensdauer. [111]

Eine weitere Möglichkeit zur individuellen Versorgung der Aktoren durch eine HV-Quelle kann mit angepassten Halbleiterschaltern erreicht werden, siehe Bild 10c). In [112] werden beispielsweise Schalter aus flexiblen HV-Dünnfilm-Transistoren vorgestellt, welche bei einer maximal Spannung von 1,4 kV eine lineare Abhängigkeit zwischen der Steuerspannung (Gate-Spannung) und dem Sättigungsstrom (Drain-Strom) aufweisen [112]. Der Transistor leitet spannungsgesteuert den Strom linear durch den Aktor, ist allerdings kein Standardelement. Durch die standardmäßig steilen Eingangs-Ausgangs-Kennlinien von herkömmlichen Halbleiterschaltelementen sind steuerbare Ausgangsspannungen lediglich in einem schmalen Eingangsspannungsband möglich, was zu Ungenauigkeiten oder Sprüngen am Ausgang herkömmlicher Schalter führen kann.

Vor- und Nachteile der Methoden zur Ansteuerung von DEA auf Basis von DC-HV-Signalen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Methode	Vorteile	Nachteile	Beispiele
Umsetzer- verfahren	 Energierück- gewinnung teilweise möglich hohe Effizienz 	 jeweils separate Spannungsversorgung pro Aktor verschiedene Verfah- ren für unterschied- liche Anwendungen notwendig 	[101, 108–110]
material- basierte integrierte Schaltver- fahren	 zentrale Gleich- spannungsquelle Kosten-/ Gewichts- einsparung 	 nicht miniaturisierbar fertigungsbedingte geringe Präzision materialbedingt kurze Lebensdauer 	[111]
angepasste Halbleiter- schalt- elemente	 zentrale Gleich- spannungsquelle lineare Ansteuerung 	 keine Standardbau- elemente kleiner Ansteuerungs- bereich 	[112]

Tabelle 2: Wesentliche Vor- und Nachteile von Ansteuerungsmethoden basierend auf DC-HV-Signalen zum aktorischen Betrieb von DEA

Ansteuerung mittels pulsweitenmodulierten Signalen: DEA zeigen gegenüber frequentierten Steuersignalen eine mechanische Trägheit. Dies wird beispielsweise in [66] über die frequenzabhängige Dämpfung ab einer Grenzfrequenz von ca. 900 Hz deutlich. Das Verhalten beruht zum einen auf ihren Materialeigenschaften und zum anderen auf der resultierenden Ladeund Entladekurven in Abhängigkeit der Kapazität sowie parasitären resistiven Effekte, siehe Bild 11. Auf Basis dessen kann mit dem Prinzip der PWM eine nahezu stufenlose Ansteuerung von DEA erreicht werden.

Bei einem PWM-Signal sehr niedriger Frequenz wird der Aktor im Idealfall in jeder Periode vollständig ge- und wieder entladen. Eine starke Erhöhung der Signalfrequenz resultiert in einer Abflachung der Lade- und Entladekurve, wobei die Spannung um einen Wert größer 0 und kleiner der maximalen Spannung U_{max} pendelt. Die Differenz sinkt mit steigender Frequenz.

Verschiedene Zustände des Aktors können durch Variation des Tastgrads (engl. duty cycle) δ bei konstanter Signalfrequenz und Periodendauer T erreicht werden. Durch Erhöhung der Pulsweite beziehungsweise der Dauer des aktiven Zustands verlängert sich innerhalb einer Periode die Ladezeit (reziprok Entladezeit) des Kondensators. Ein DEA reagiert dabei mit einer stär-



Bild 11: Einfluss von Frequenz des PWM-Signals und der Aktoreigenschaften auf den resultierenden Kurvenverlauf der Aktorspannung

keren (reziprok schwächeren) Kontraktion, da im Mittel eines Zyklus eine höhere (reziprok niedrigere) Spannung anliegt, siehe Bild 12. Um für einen stufenlosen Antrieb ein komplettes Laden und Entladen des DEA zu vermeiden, ist die Periodendauer des PWM-Signals kleiner im Vergleich eines vollständigen Lade- und Entladezyklus des DEA zu wählen. In Abhängigkeit der Kapazität und der für den Betrieb notwendigen Spannung variiert der Spannungsverlauf über dem Aktor ebenfalls. Parasitäre Effekte verstärken hierbei nicht-ideale Verläufe.

Zur Untersuchung von Verhaltensweisen von DEA in unterschiedlichen (vibrierenden) Applikationen auf Basis von PWM-HV-Signalen werden bisher überwiegend Laborgeräte wie HV- und Frequenzgeneratoren zur Signalgenerierung verwendet (zum Beispiel in [66]). Derartige Systeme bieten zwar eine hohe Robustheit, Genauigkeit und Leistungsfähigkeit, sind aufgrund ihrer Größe, ihres Gewichts sowie ihrer häufig eingeschränkten Ansteuerung allerdings ungeeignet für den Einsatz in späteren kommerziellen Applikationen. Dagegen ist in [107] ein handgehaltenes, batteriebetriebenes Eingabegerät zum höherfrequenten individuellen Betrieb von DEA auf Basis von Halbleiterrelais mit einer maximalen Spannung von 1,1 kV, einer Frequenz



Bild 12: Prinzipschaubild zur Ansteuerung von DEA mittels pulsweitenmodulierten Signalen

von 250 Hz sowie einem variablen Tastgrad vorgestellt. Allerdings ist das System vor allem hinsichtlich der maximalen Spannung und der Auswahl verwendeter Aktoren beschränkt.

Vor- und Nachteile der Umsetzungen zur Ansteuerung von DEA auf Basis von DC-HV-Signalen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Wesentliche Vor- und Nachteile von Ansteuerungsmethoden basierend auf PWM-Signalen zum aktorischen Betrieb von DEA

Methode	Vorteile	Nachteile	Beispiele
PWM- Signal- erzeugung mittels Laborgeräte	RobustheitGenauigkeitLeistungsfähigkeit	 relativ hohes Gewicht und Volumen lokale Beschränkung 	[66, 113, 114]
PWM- Signal- erzeugung mittels HV-Schalter	 mobiler Einsatz zentrale Energie- quelle 	 leistungselektronische Einschränkungen Betrieb kleinskaliger Aktoren 	[107]

Ansteuerung mittels Modellbildung: Für eine positionsgezielte Trajektoriensteuerung können anhand modellbasierter Abbildungen des vollständigen mechatronischen Systems das Verhalten vorhergesagt und die hierzu notwendigen Steuerungsparameter über Inversion berechnet werden. Im Allgemeinen existieren zwei unterschiedliche Ansätze für die Modellbildung. Auf der einen Seite wird die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften sowie Materialeigenschaften vorausgesetzt und auf der anderen Seite sind empirische und phänomenologische Erkenntnisse notwendig. Beide Vorgehensweisen sind zudem kombinierbar, siehe Bild 13.



Bild 13: Prinzipschaubilder zur Ansteuerung von DEA mittels Modellbildung sowie deren Herangehensweisen zur Modellabstraktion von DEA

Ein vergleichsweise einfaches elektromechanisches Modell eines DEA betrachtet zunächst unabhängig voneinander ein elektrisches und mechanisches Modell [55]. Anhand der Ersatzschaltbilder des zu einem Kondensator analogen Aufbaus und einem mechanischen Parametermodell entsteht ein elektromechanisches Modell, welches als Eingangsparameter die elektrische (Hoch-)Spannung und als Ausgangswert die mechanische Verformung unter Berücksichtigung verschiedener (zum Beispiel viskoelastischer) Effekte enthält. Als Bindeglied zwischen elektrischem und mechanischem Modell wird dabei Gleichung (2.1) herangezogen.

In Abhängigkeit der Komplexität sowie der gewählten Parameter des physikalischen Modells sind notwendige Kennwerte über quasi-statische und dynamische Experimente zu identifizieren. Trotz Außerachtlassung nichtlinearer Materialeigenschaften und der elektromechanischen Kopplung ist eine Verwendung für kleine Dehnungen des Materials zulässig. In [115] wird beispielsweise gezeigt, dass ein vibrierendes System, bestehend aus einer mit einem DEA verbundenen Masse, mit einem nichtlinearen dynamischen Modell präzise gesteuert und gewünschte Trajektorien verfolgt werden können. Für größere Bewegungen sind Berücksichtigung der viskoelastischen Eigenschaften und der elektromechanischen Kopplung notwendig. [115]

Allerdings sind für eine genauere Abbildung des Systems in derartigen Modellen detaillierte Kenntnisse über den Aufbau hinsichtlich Material und Physik notwendig, um ein System möglichst exakt abbilden zu können. Beispielhaft kann zur Modellierung viskoelastischer Effekte auf [116, 117] verwiesen werden. Hier liegt die Betrachtung auf simulativer Basis.

Als Alternative zu oben genannten komplexen Modellen sind phänomenologische, respektive auf empirischen Ergebnissen basierte Modelle zu nennen. Mittels empirischen Ansätzen der Modellbildung kann die Komplexität der physikalisch basierten Abstraktion umgangen werden. Ebenfalls ist eine detailärmere Kenntnis über das physikalische Verhalten von DEA ausreichend. Das Fließverhalten des Materials sowie eine Überschwingkompensation der Antwort des DEA auf einen Sprung der Steuerspannung können bereits in einem Modell berücksichtigt werden, das lediglich auf den mittels Eingangsund Ausgangsdaten durchgeführten Messungen beruht [118].

Methode	Vorteile	Nachteile	Beispiele
theoretische Betrachtung elektrischer/ mechanischer Modelle	 Verwendung einfa- cher Modelle möglich Übertragbarkeit auf unterschiedliche Strukturen 	Genauigkeit abhän- gig von Detailgrad des Modells	[55]
empirisch/ phänome- nologisch basiertes Modell	 geringere Komplexität kein Detailwissen notwendig 	Notwendigkeit der Berechnung des In- versionsmodells	[118–120]
Kombination theoretischer/ empirischer Modelle	∎ präzise	 Notwendigkeit eines Modells einschließ- lich Messungen Einschränkung auf Applikation 	[115]

 Tabelle 4: Wesentliche Vor- und Nachteile modellbasierter Ansteuerungsmethoden zum aktorischen Betrieb von DEA

In [119] werden für eine sensorfreie Positionskontrolle eines Parallelmechanismus für abgegrenzte Bereiche der HV-Ansteuerung ebenfalls Transferfunktionen auf experimenteller Basis ermittelt, wobei auch hier die inversionsbasierte Steuerung viskoelastische Effekte mit berücksichtigt werden. Neuartige Ansätze der empirischen Modellbildung basieren auf maschinellem Lernen und nutzen künstliche neuronale Netze. Die generische Herangehensweise der Modellbildung mittels Deep Learning wird dabei als robust gegenüber unterschiedlichen Konfigurationen, Vordehnungen und viskoelastischen Effekten beschrieben. [120]

Vor- und Nachteile der Methoden zur modellbasierten Ansteuerung von DEA sind in Tabelle 4 aufgeführt.

2.3.2 Auswerteverfahren dielektrischer Elastomersensoren

Zur Auswertung einwirkender Kräfte auf einen DES, wie beispielsweise Druck- oder Zugkräfte, sind unterschiedliche Verfahren möglich. Dabei kann zum einen die Widerstandsänderung der Elektroden aufgrund ihrer verformungsabhängigen Resistivität zur Bestimmung der Längen- oder Flächenänderung des Sensors verwendet werden. Zum anderen sind zur Auswertung von DES durch ihren analogen Aufbau zu einem Kondensator etablierte Verfahren zur Messung von Kapazitäten verfügbar. Ansätze zur Zustandsauswertung eines kapazitiven elastischen Deformationssensors basieren auf den unterschiedlichen Einflussbetrachtungen der Kapazität CDF. Abhängig von den verwendeten Materialien und der DE-Struktur sind unterschiedliche Modellierungen eines DES anwendbar. Dafür werden in der Literatur häufig unterschiedliche, teils vereinfachte Ersatzschaltungen genutzt, welche parasitäre Effekte durch zusätzliche serielle und/ oder parallele Widerstände R_{ps} , R_{pp} beschreiben, siehe Bild 14.



zität

Effekte (seriell oder parallel)

a) ideale Kapa- b) Berücksichtigung der parasitären c) Berücksichtigung aller parasitären Effekte (Zusammenfassung rechts)

Bild 14: In der Literatur häufig genutzte Ersatzschaltbilder zur einfachen elektrotechnischen Modellierung von DE zur sensorischen Auswertung mit und ohne Berücksichtigung parasitärer Effekte

Zur Unterscheidung der unterschiedlichen Verfahren im weiteren Verlauf werden die folgenden charakterisierenden Bezeichnungen der Zustandsauswertung eingeführt:

- Resistives Verhalten der Elektroden (Messung der Elektrodenwiderstandsänderung - nicht kapazitiv)
- Lade- und Entladeverhalten der Kapazität (Messung der Kapazität über die Zeitkonstante)
- Strom- und Spannungsabhängigkeit der Kapazität (Messung der Kapazität über Strom und Spannung)
- Oszillierende Eigenschaften der Kapazität (Messung der Kapazität mittels Oszillator)
- Filter- und Dämpfungseigenschaften der Kapazität (Messung der Kapazität mittels RC-Glied)

Dehnfähige Elektroden, welche aus nicht-leitenden, elastischen Materialien mit eingebrachten leitfähigen Partikeln bestehen, besitzen einen endlichen Leitwert, welcher vom Abstand der leitfähigen Partikel zueinander und somit von der Dehnung abhängig ist. Erste Vorversuche zeigen einen dehnungsabhängigen Widerstand von Graphitfett von ca. $20 \text{ k}\Omega - 2 \text{ M}\Omega$ [121]. Daher kann bei einem DES der piezoresistive Effekt genutzt werden, bei dem sich durch äußere Krafteinwirkung und der dadurch resultierenden Dehnung des Materials die leitfähigen Partikel innerhalb des Elektrodenmaterials voneinander entfernen. Somit wird die Leitfähigkeit der Elektrode reduziert beziehungsweise der Elektrodenwiderstand erhöht. [122] Auf Basis dieses Effekts können flexible Sensoren aufgebaut werden [123], welche beispielsweise auch als integrierte Schalter [124, 125] fungieren.

Die Methoden auf Basis der kapazitiven Auswertung von DES haben gemeinsam, dass sie nur durch ein Wechselsignal imstande sind, wiederkehrend den Zustand des kapazitiven dehnungsabhängigen Sensors zu bestimmen. Die Verfahren lassen sich in die zwei Kategorien der *nicht signalverändernden* und *signalverändernden* Verfahren gliedern, siehe Bild 15.

Nicht signalverändernde Verfahren zur Kapazitätsmessung

Zur kontinuierlichen Auswertung der kapazitiven Sensoren sind periodische Signale notwendig, welche genutzt werden, um über direkt messbare Parameter, wie Strom, Spannung, Zeit etc. die Kapazität des Sensors zu berechnen. Bei Verfahren wie der Messung der Zeitkonstanten oder von Strom und Spannung wird dabei kein Vergleich zwischen Ausgangsspannung und Eingangsspannung vollzogen, sondern lediglich die resultierenden Werte zur Bestimmung der Kapazität verwendet.

2 Technologische Grundlagen und Potenziale dielektrischer Elastomere



Bild 15: Klassifizierung möglicher Auswerteverfahren zur Bestimmung der deformationsabhängigen Kapazität von DES

Messung der Kapazität über die Zeitkonstante: Über die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Sprungantwort eines unbekannten Kondensators in Serie zu einem definierten Widerstand kann durch Bestimmung der Zeitkonstanten τ auf den Wert der Kapazität zurückgeschlossen werden. Durch Zeit- und Spannungsmessung können definierte Ladungszustände des Kondensators über den resultierenden Spannungsverlauf sowie die Zeitkonstante und deren Vielfache zugeordnet werden. Lade- und Entladevorgang verhalten sich dabei reziprok. Ebenfalls kann auch ein PWM-Signal genutzt werden, mit dem die Entladespannung zu Beginn sowie zu einem bekannten Zeitpunkt des Entladevorgangs gemessen wird, wobei der Elektrodenwiderstand als konstant anzunehmen ist [113].

In Bild 16a) sind die resultierenden, charakteristischen Spannungsverläufe $U_{\rm DE}$ idealer und nicht-idealer DE als Antwort auf ein Rechtecksignal als Eingangsspannung $U_{\rm e}$ dargestellt. Durch die simulative Betrachtung anhand idealer Parameter wird die prinzipielle Eignung gezeigt, DES über Lade- und Entladevorgänge auf Basis der Zeitkonstanten auszuwerten. Auch lassen sich theoretisch parasitäre Widerstände durch Spannungsmessung zu Vielfachen von τ bestimmen. Aufgrund der niedrigen Kapazitäten im hohen Piko- bis niedrigen Nanofaradbereich und der resultierenden sehr kleinen Zeitkonstanten bestehen allerdings hohe Anforderungen an die Zeitmessung bis zum vier- bis fünffachen von τ . Je nach Materialbeschaffenheit und einem nicht prädiktiven Materialverhalten erschweren teilweise hohe Abweichungen vom simulierten Verlauf die Kapazitätsauswertung.

Messung der Kapazität über Strom und Spannung: Alternativen zur Bestimmung der Zeitkonstanten bilden bei gleichem Aufbau Verfahren über Strom- und Spannungsmessung. Zum einen kann mittels Integration des resultierenden Stromverlaufs beim Laden des Kondensators die resultierende Ladung der Kapazität eines DE bestimmt werden [107]. Zum anderen sind darüber hinaus Regressionsalgorithmen basierend auf Spannungs- und Strommessung möglich, welche beispielsweise eine reduzierte Flankensteilheit des PWM-Signals [114] oder eine Änderung des Eingangssignals [126] voraussetzen. In Abhängigkeit der Berechnungen können ebenfalls resistive Effekte der nicht-idealen flexiblen Elektroden und Verbindungen berücksichtigt werden.

Des Weiteren sind zur Messung von DES-Kapazitäten und deren Änderungen ebenfalls Wechselstrom-Messbrücken wie beispielsweise in [131] geeignet. Wechselstrom-Ausschlagbrücken wie beispielsweise die Viertelbrücke mit nur einer veränderlichen Brückenreaktanz detektieren Kapazitätsänderungen und setzen verlustlose Kondensatoren voraus. Dagegen sind Abgleichbrücken wie die sogenannte WIEN- oder SCHERING -Brücke zur Bestimmung verlustbehafteter (Fest-)Kapazitäten geeignet. Vor allem letztere ist zur Bestimmung von HV-Kondensatoren geeignet. Aufgrund der Abgleichbedingungen sind hierbei allerdings zwei abgleichbare Elemente notwendig, wodurch die Komplexität steigt. [132] Aufgrund der bisher teilweise ausgeprägten parasitären Eigenschaften von DE oder auch der notwendigen Erfüllung von Abgleichbedingungen sind Brückenschaltungen in der Auswertung von DE bisher noch nicht weit verbreitet.

Ein weiteres Verfahren eines algorithmusbasierten Ansatzes nutzt ein periodisches Rechteckstromsignal I_e , beispielsweise durch Umpolung einer konstanten Stromquelle, das anhand der resultierenden Spannungskurven Aussagen über weitere Parameter neben der Kapazität ermöglicht, siehe Bild 16b) nach [127]. Mit diesem von der Firma *LEAP technology A/S* bereits kommerziell vertriebenen Verfahren lassen sich DES in Bezug auf Kapazität und seriellen Widerstand zuverlässig auswerten. In einem weiteren Beispiel eines kommerziellen Bausteins resultieren Dreiecksspannungssignale unterschiedlicher Frequenzen bei gleichbleibender Spannungsamplitude durch Laden und Entladen der jeweiligen Kapazität des DES mittels konstanter Stromzufuhr durch einen Messoszillator [130]. Dieser wird beispielsweise in [P3] zur Erfassung mehrerer DES eingesetzt.



a) Messung der Kapazität über die Zeitkonstante

b) Messung der Kapazität über Strom und Spannung (beispielhaft nach [127])

Bild 16: Typische Verläufe nicht signalverändernder Verfahren zur kapazitiven Messung des Sensordehnungszustands sowie zur Betrachtung parasitärer Eigenschaften

Signalverändernde Verfahren zur Kapazitätsmessung

Die Zustandsauswertung anhand *signalverändernder* Eigenschaften der deformationsabhängigen Kapazität des Sensors basiert auf Vergleich des Eingangs- mit dem Ausgangssignal. Beispiele hierfür sind Verfahren, welche zum einen die Filter- und Dämpfungseigenschaften einer Kapazität in Kombination mit einem Widerstand und zum anderen das Schwingkreisverhalten, beziehungsweise generell die frequenzverändernden Eigenschaften eines Oszillators, nutzen.

Messung der Kapazität mittels Oszillator: Kapazitäten haben frequenzverändernde Eigenschaften, wenn eine Oszillation des Sensoreingangssignals möglich ist. Durch Kombination des zu charakterisierenden DES mit einer bekannten Induktivität kann über den resultierenden Schwingkreis mittels Frequenzmessung ebenfalls eine Kapazitätsauswertung durchgeführt werden, siehe [128]. Hierbei oszilliert aufgrund ihrer Energiespeicherfähigkeit die Energie zwischen Spule und Kondensator, wobei die Frequenz der Oszillation von den Werten der Induktivität und Kapazität abhängig ist. Auftretende Widerstandsverluste sind durch wiederholtes Zuführen der Initialspannung auszugleichen.

Messung der Kapazität mittels RC-Glied: Das notwendige RC-Glied besteht aus einem bekannten definierten Widerstand R und dem zu vermessenden kapazitiven Sensor C_{DE} , wodurch ein elektrisches Filter entsteht. Mit einem solchen Filter ist es möglich, eintreffende Wechsel- beziehungsweise Sensoreingangssignale U_{S} mit bekannter Amplitude \hat{U}_{S} und unterschiedlicher Frequenzen in Abhängigkeit der Grenzfrequenz des RC-Gliedes zu filtern und zu dämpfen. Über das Verhältnis des Eingangssignals und der gemessenen Spannung $U_{\rm M}$ beziehungsweise deren Amplitude $\hat{U}_{\rm M}$ wird die Dämpfung des Systems berechnet. Dabei hängt es von der Verschaltung ab, ob es sich um ein *Tiefpass- (TP)* [91] oder *Hochpassfilter (HP)* [98] handelt. Durch unterschiedliche Betrachtungsweisen sind ebenfalls kombinierte Varianten möglich, siehe [P9]. In Bild 17 sind wesentliche Bestandteile sowie Parameter für dieses Verfahren beispielhaft für eine Tiefpasskonfiguration zusammengefasst.



Bild 17: Vereinfachte schematische Darstellung zur Auswertung von DES mittels Nutzung inhärenter Dämpfungseigenschaften einer Filterkonfiguration

Die Berechnung der Kapazität ist dabei abhängig von der schaltungstechnischen Betrachtung des Sensors, wobei sich die Übertragungsfunktionen in ihrer Komplexität unterscheiden. Die in Abhängigkeit der Grenzfrequenz auftretende Signaldämpfung wird beispielsweise über den Spitzen- oder Effektivwert erfasst.

Aufgrund der teils hohen Elektrodenwiderstände großflächigerer Sensoren ist eine Unterteilung in mehrere parallel geschaltete RC-Glieder möglich, wodurch eine Reihe von Tiefpässen entsteht [129]. Durch Untersuchung der Frequenzantwort auf verschiedene Sensoreingangssignalfrequenzen ist auf Basis einer Hyperebenen-Methode die Detektion und Lokalisierung der Kapazitätsänderung auf der Sensorfläche möglich. Dies ist durch die Zunahme der Dämpfung des Sensoreingangssignals mit steigender Frequenz sowie mit Erhöhung der Kapazität durch Addition weiterer Elemente zu beschreiben [87].

2.3.3 Simultane Zustandsauswertung dielektrischer Elastomeraktoren während des Betriebs

Nach der separaten Betrachtung von Ansteuerung und Auswertung von DE werden im Folgenden bekannte Methoden einer simultanen aktorischen und sensorischen Verwendung in einem DE-Element als selbstfühlendes System betrachtet. Die in internationaler Literatur verwendete Bezeichnung *selfsensing* wird für jegliche Form eines gleichzeitigen Einsatzes von DEA und DES verwendet. Allerdings ist zur näheren Betrachtung eine differenzierte Abgrenzung zwischen zwei Varianten sinnvoll, welche in dieser Arbeit durch die Begrifflichkeiten *selbstfühlend* und *quasi-selbstfühlend* unterschieden werden. Gemeinsam haben beide den Ansatz, keine externen Sensoren auf Basis anderer Technologien sowie zusätzlichen Leitungen zu benötigen. Allerdings unterscheiden sie sich im Verständnis eines selbstfühlenden Systems und somit im strukturellen Aufbau, siehe Bild 18.



Bild 18: Einführung der Unterscheidung von in der Literatur als *self-sensing* bezeichneten Methoden in selbstfühlende und quasi-selbstfühlende Systeme auf DE-Basis

Während selbstfühlende Aktoren die sensorischen und aktorischen Eigenschaften eines DE in einem einzigen Element vereinen, bestehen quasisebstfühlende Systeme aus zwei getrennten Elementen, welche lediglich eine sensorische oder aktorische Funktion besitzen. Die Dielektrika dieser Elemente bestehen dabei aus demselben Substrat, womit sie mechanisch verbunden sind, wodurch integrierte Schalter realisierbar sind [124]. Ebenfalls können Sensoren und Aktoren auch übereinander gelegt werden, um so beispielsweise eine Variante des unimorphen Aktors mit aufgelegten Sensormatrizen zu realisieren [76]. Dabei ist zu beachten, dass DES und DEA ein Verbundsystem bilden, da ansonsten auftretende Scherkräfte die Auswertung verfälschen können. Analog zu den Verfahren aus dem rein sensorischen Betrieb werden folgend die Methoden nach Bild 19 in die Hauptkategorien der Aktorzustandserkennung durch Messung des Elektrodenwiderstands, der Impedanz sowie Kapazität gegliedert und im Folgenden beschrieben.



Bild 19: Klassifizierung der Verfahren zur simultanen Zustandserkennung von DEA während des aktorischen Betriebs

Messung des Elektrodenwiderstands: Der E-Modul der Elektroden eines Aktors sollte deutlich kleiner oder maximal so groß sein, wie der des Dielektrikums. Dadurch wird sichergestellt, dass die Elektroden durch ihre mechanische Verbindung der aktorischen Verformung mechanisch nicht entgegenwirken. Ist diese Anforderung erfüllt, geben Messungen dehnungsabhängiger Elektrodenwiderstände Rückschlüsse auf die Verformung des Aktors. Ein solches Verfahren stellt [133] vor, welches mittels zwei Messpunkten an der Masse-Elektrode den Elektrodenwiderstand über Spannungsmessung bestimmt, wobei ein symmetrischer Stromfluss durch den Aktor sowie durch die Elektrode angenommen wird. Die tatsächliche Beziehung zwischen Widerstandsänderung und Aktorverformung wird dabei empirisch mit zahlreichen Trainingsdaten über Regression gefunden und unterschiedliche Modelle werden verglichen. Obwohl die Funktionalität sowie die Wiederholbarkeit dieses Verfahrens gezeigt werden können, hat diese Methode vor allem den Nachteil, dass aufgrund von Materialfließen eine relativ hohe Ansprechzeit (0,2 Hz) resultiert und die Messgenauigkeit mit der Zeit ebenfalls abnimmt. [133]

Messung der Impedanz: Weitere Verfahren beruhen auf der Messung der Impedanz und der rein von der Geometrie abhängigen Kapazität eines Aktors, wobei die Permittivität als konstant beziehungsweise nicht als Funktion der Verformung betrachtet wird. Die material- und fertigungsbedingte

Widerstandsänderung der Elektroden wird bei den Verfahren teilweise gänzlich vernachlässigt oder herausgerechnet. Ein DEA bildet aufgrund der nichtidealen elektrischen Materialeigenschaften und durch seine Struktur einen komplexen Widerstand (Impedanz). Die Impedanz eines DEA kann durch Ersatzschaltbilder in Form einer Parallelschaltung [121, 134], einer seriellen Schaltung [97] oder gar komplexeren Ersatzschaltungen [135] durch parasitäre Widerstände und der Aktorkapazität beschrieben werden. Die jeweiligen herangezogenen Ersatzschaltbilder sowie unterschiedliche Messverfahren der Impedanz ermöglichen die Registrierung von Formveränderungen des Aktors durch elektrostatische Kräfte oder durch externe Belastung.

In Reihe zu einem Messwiderstand bekannter Größe kann der Zusammenhang eines komplexen Spannungsteilers genutzt werden, um über die Transferfunktion und der resultierenden gemessenen Ausgangsspannung auf die aktuelle Impedanz über einen Spannungsteiler [136] oder einer Wechselstrombrücke [97] Rückschlüsse zu ziehen. Mittels Impedanzänderungen eines belasteten Aktors werden aufgrund seiner Verformung ebenfalls extern einwirkende Kräfte registriert. Die Verwendung unterschiedlicher Wechsel-HV-Signale konstanter Amplitude bis zu 100 Hz zeigen, dass das Produkt von Kapazität und parasitärem Parallelwiderstand konstant ist. [134]

Messung der Kapazität: Durch die zuvor getroffene Annahme der Inkompressibilität aus Gleichung (2.4) und mit dem Zusammenhang aus Gleichung (2.1) lässt sich nach [121] der elektrostatische Druck ebenfalls in Abhängigkeit der Kapazität durch

$$p_{\rm el} = \frac{U^2}{A_0 d_0} \cdot C(\sigma) \tag{2.7}$$

ausdrücken, wodurch ein Maß der Kontraktion beschrieben wird. Verschiedene Möglichkeiten zur Messung der Kapazität sind bereits in Abschnitt 2.3.2 vorgestellt, wobei sich die Verfahren auf die rein sensorische Funktion von DE beziehen. Folgend werden Ansätze genannt, welche die zusätzliche Anforderung der simultanen Ansteuerung im HV-Bereich berücksichtigen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Methoden ist eine Clusterung auf Basis grundlegender Gemeinsamkeiten sinnvoll. Diese lassen sich folgend als Ansätze im

Zeit- und

Frequenzbereich

unterscheiden und beschreiben.
Messung der Kapazität im Zeitbereich

Die folgend betrachteten Verfahren beziehen sich auf zeitlich ändernde Parameter während des Betriebs von DEA. Dabei kann die Kapazität durch direkte Messung von Strom- und Spannungsverläufen oder die daraus resultierende Ladung bestimmt werden. In der Literatur wird in diesen Fällen häufig von algorithmusbasierten Ansätzen gesprochen, da zur Bestimmung der aktuellen Kapazität stets ein formelmäßiger Zusammenhang physikalischer, elektrischer und materialspezifischer Effekte notwendig ist. Eine Übersicht und Zusammenfassung bekannter und folgend knapp erläuterter Verfahren ist in Bild 20 dargestellt.



Bild 20: Zusammenfassung bekannter Methoden zur simultanen Auswertung während des Betriebs von DEA auf Basis von Signalnutzung im Zeitbereich

Es können definierte Zeitpunkte und auch wiederkehrende Spannungssprünge zur Überwachung des Aktorzustands, beispielsweise zur Detektion externer Kräfte, eingesetzt werden. Dabei wird die Zustands- beziehungsweise Kapazitätsbestimmung über Berechnung der fließenden Ladungen durch Integration über den Stromverlauf nach einem definierten Sprungsignal als Eingangsspannung für den DEA realisiert [107]. Kontinuierliche Zustandsauswertungen sind ebenfalls durch Nutzung höherfrequenter Signale möglich. Dabei setzt die simultane Ansteuerung und Auswertung der Kapazität voraus, dass die gewählte Frequenz deutlich über der maximal möglichen mechanischen Antwortfrequenz des DEA liegt. Somit wird die Kapazität als konstant angenommen. Auf dieser Basis kann beispielsweise die abfallende Flanke des Steuersignals zur Bestimmung der Kapazität über die Entladekurve verwendet werden, indem zu zwei bekannten Zeitpunkten Spannungsmessungen durchgeführt werden [113]. Solche zeitabhängige Verfahren, welche beispielsweise die Flanken des Ansteuerungssignals ablesen, sind allerdings auf ein PWM-Signal angewiesen. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass diese Art von Ansteuerung mit hochfrequenten Ansteuersignalen arbeitet, was zu unerwünschten Vibrationen des Aktors führen kann.

Mittels einer reduzierten Flankensteilheit eines PWM-Signals über einen stromgesteuerten Schalter kann der Verlauf des Aktorstroms gemessen werden. Gezielte Annahmen und Berechnungen ermöglichen die Bestimmung von Parametern, wie der serielle Widerstand der Elektroden, der Leckstrom sowie die Kapazität. [114]

Bei der Verwendung von HV-DC/DC-Wandler können ebenfalls die parasitären Schaltfrequenzen im kHz-Bereich als Sensorsignal genutzt werden, wodurch eine zusätzliche Überlagerung von Aktor- und Sensoreingangssignal nicht mehr notwendig ist. Ein DC/DC-Wandler mit Dual Active Bridge generiert bereits Schaltfrequenzen von 100 kHz. Mittels eines für hohe Sensorsignalfrequenzen geeigneten DEA-Modells kann vor allem der Elektrodenwiderstand genau ausgewertet werden. Die zuverlässige Auswertung der Kapazität hängt allerdings stark von den Frequenzeigenschaften des Materials ab. [139]

Neben PWM-Signalen sind auch überlagerte Sinussignale als Sensoreingangssignal möglich. Mittels überlagerter Signale bestehend aus einem niederfrequenten HV-Signal und einem hochfrequenten LV-Signal resultieren trotz der frequenzfilternden Eigenschaften eines DEA messbare Ströme [137]. Dabei kann neben Messung der Spannungsamplituden des vom Aktor beeinflussten Sensoreingangssignals durch entsprechenden Messaufbau auch die Amplitudenmessung des komplexen Stroms herangezogen werden. Hier wird die Zusammensetzung des Stroms aus reellem und komplexem Anteil genutzt und mit der Kapazität und dem parasitären Elektrodenwiderstand über entsprechende Proportionalitäten in Verbindung gebracht [136]. Komplexere Algorithmen basieren auf Ladungsbestimmung über Stromund Spannungsmessung und einer multidimensionalen linearen Regression. Sie ermöglichen die Bestimmung der Kapazität eines Aktors mit einer gewissen Robustheit gegenüber parasitären Einflüssen des Aktors. Zur Ansteuerung können hier beliebige oszillierende Signale verwendet werden, wie verschiedene Spannungsrampen oder -sprünge. [126]

Weitere algorithmusbasierte Ansätze verwenden dabei die Diskretisierung von vereinfachten DEA-Modellen wie in Bild 14. Mittels linearer Regressionsalgorithmen, wie dem Least-Mean-Squares-Algorithmus [137], dem Recursive-Least-Squares-Algorithmus [135, 137] oder dem Recursive-Extended-Least-Squares-Algorithmus [138], können über diskretisierte und gefilterte Strom- und Spannungsverläufe sowohl die Kapazität als auch parasitäre Serienwiderstände berechnet werden. Auf Basis dieser Ansätze kann durch weitere Vereinfachungen und Annahmen von einem stark simplifizierten reinen Kapazitätsmodell ausgegangen werden, was eine Berechnung des Widerstands obsolet macht [135]. Mittels einer Nachschlagetabelle oder einer polynomialen Interpolation wird anschließend auf den Zustand des Aktors zurückgeschlossen [137].

Messung der Kapazität im Frequenzbereich

Neben den Ansätzen im Zeitbereich sind ebenfalls frequenzbasierte Methoden geeignet, um die Kapazität und damit den Zustand eines DEA während des aktorischen Betriebs bestimmen zu können. Bei diesen Verfahren ist zur Identifikation der Veränderung dehnungsabhängiger Parameter eine Überlagerung des Sensorsignals mit dem Aktorsignal notwendig. Dabei ist die Amplitude des Sensorsignals deutlich kleiner als die Amplitude des Aktorsignals, damit ersteres nicht zu ungewollten Aktorbewegungen beiträgt. Eine Übersicht und Zusammenfassung bekannter und folgend kurz erläuterter Verfahren ist in Bild 21 dargestellt.

Einer der ersten Ansätze einer Überlagerung wird in [121] beschrieben. Dabei wird die Sensorspannung durch einen Tongenerator erzeugt, welcher an den Ausgang des HV-Generators angeschlossen ist. Begrenzte mögliche Maximalfrequenzen werden bei diesem Verfahren durch den Einsatz von Graphitfett-Elektroden begründet. Zur Zustandsbestimmung wird ein komplexer Spannungsteiler bestehend aus dem DEA und einer Parallelschaltung aus Messwiderstand und -kapazität gebildet. Der DEA wird durch eine Reihenschaltung der dehnungsabhängigen Aktorkapazität und eines dehnungsabhängigen parasitären Elektrodenwiderstands modelliert. Komplexe Span-



Bild 21: Zusammenfassung bekannter Methoden zur simultanen Auswertung während des Betriebs von DEA auf Basis von Signalnutzung im Frequenzbereich

nungsteiler weisen dabei zwar eine hohe Dynamik auf, sind allerdings gegenüber Rauschen anfällig. [121]

Im Gegensatz zu einem Spannungsteiler kann der Aktor als Bestandteil eines RC-Glieds ebenfalls als Filter genutzt werden, um über die geometrieabhängige und damit variable Sensorsignaldämpfung auf den Zustand des Aktors rückschließen zu können. In [140] wird die Überlagerung über einen Labor-HV-Verstärker realisiert, wobei die Amplituden des durch die Filterkonfiguration gedämpften Sinussignals über einen Spitzenwertdetektor gemessen werden. Das verwendete Aktormodell besteht aus einer beliebigen Anzahln identischer Aktorelemente mit je einem parasitären Widerstand parallel zur Kapazität und bildet mit einer Parallelschaltung aus Messwiderstand und Messkapazität einen komplexen Spannungsteiler mit Hochpassfunktion [140]. In diesem Fall ist keine weitere explizite Kapazitätsmessung beschrieben, wird aufgrund der ähnlichen Herangehensweise hier dennoch aufgeführt, um die Möglichkeit einer unterschiedlichen Modellierung aufzuzeigen.

Um zukünftig die Verwendung von Frequenzgeneratoren im Labormaßstab umgehen zu können und im Hinblick auf die Entwicklung eines sensomotorischen Systems mit einer zentralen Energiequelle, wird in [P9] eine alternative Methode zur Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal vorgeschlagen. Hierbei wird das Sensoreingangssignal zwischen der negativen Elektrode des Aktors und der Masse des Eingangssignals gekoppelt, wodurch ein System mit zwei unterschiedlichen Frequenzfiltern aus Sicht der Messkontakte entsteht. Folglich stellt der Aktor für das Sensoreingangssignal ein Hochpass- und für das HV-Steuersignal ein Tiefpassfilter dar, wodurch eine zusätzliche Filterung der Hochspannung bei entsprechender Grenzfrequenz des Aktors und geeigneter Wahl der Sensorsignalfrequenz für einfache Messungen nicht mehr notwendig ist. [P9]

2.3.4 Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik im leistungselektronischen Bereich

Anhand der Untersuchung zahlreicher unterschiedlicher leistungselektronischer Methoden und Verfahren zum aktorischen, sensorischen und kombinierten Betrieb lassen sich aufgrund der jeweiligen diversen Applikationsanforderungen zum einen die Variantenvielfalt von DE und zum anderen die resultierende notwendige Adaption der Leistungselektronik ablesen.

Ansteuerungsverfahren im aktorischen Betrieb

Bereits mittels einfacher mathematischer Inversionsmodelle und deren Berechnungen können für eine stufenlose Ansteuerung von DEA gute Ergebnisse erzielt werden. Dazu sind experimentelle Untersuchungen notwendig, welche das vollständige Aktorsystem berücksichtigen. Ein derartiges Verfahren kann somit vor allem für vereinzelte Applikationen in der Testphase dienlich sein, um relativ schnell eine Ansteuerung zu ermöglichen. Rein modellbasierte Verfahren beziehungsweise die Kombination mit diesen ist dagegen für Systeme über die Entwicklungsphase hinaus geeignet.

Die Realisierung einer nahezu stufenlosen Ansteuerung mittels PWM Signalen setzt hohe Frequenzen und eine hohe Materialdämpfungseigenschaft des Aktors voraus. Daher ist eine solche Ansteuerung vor allem für vibrierende Applikationen wie ein haptisches Feedback oder Lautsprecher geeignet. Zur Ansteuerung mehrerer DEA zeigt sich das Konzept einer zentralen Energiequelle als geeignet, welches grundsätzlich zum einen bei Wechselsignalen und zum anderen bei stufenlosen Gleichspannungssignalen verwendet werden kann.

Auswertungsverfahren im sensorischen Betrieb

Im Vergleich eines auf Widerstands- oder Kapazitätsänderung basierenden Systems weist ersteres eine höhere Komplexität auf, da die Resistivität des Elektrodenwiderstands von Dehnung und Dicke des Materials abhängt. Dagegen ist die Verwendung der Kapazitätsänderung aufgrund der reinen Geometrieabhängigkeit, unter der Annahme, dass die Permittivität keine Funktion der Verformung darstellt, vorteilhafter. [141]

Zur Auswertung von DES existieren daher zahlreiche Verfahren, welche vornehmlich den Zustand über die Kapazitätsänderung erfassen. Für den rein sensorischen Fall erweisen sich zum derzeitigen Stand überwiegend algorithmusbasierte beziehungsweise auf Strom- und Spannungsmessung basierte Verfahren zur kapazitiven Auswertung von DES als hinreichend genau. Die Nutzung der Filtereigenschaften zur kapazitiven Auswertung beruht bis dato überwiegend auf dem Dämpfungseffekt.

Simultaner aktorischer und sensorischer Betrieb

Aktuelle Materialentwicklungen von Elektroden sowie Untersuchungen neuartiger automatisierter Fertigungsprozesse von DE respektive Elektroden zielen auf ideale dehnungsunabhängige und verlustfreie Aktorelektroden ab [49], [P2, P4]. Daher ist auch im kombinierten Betrieb ein Verfahren basierend auf Messung des elektrischen Widerstands zukünftig nur begrenzt einsetzbar. Des Weiteren zeigt ebenfalls die Anzahl aktueller Veröffentlichungen zur simultanen Auswertung eines aktiven Aktors, dass Verfahren auf Basis der Impedanz- oder Kapazitätsmessung zur integrierten Zustandserfassung ein deutlich höheres Anwendungspotenzial besitzen.

Die Unterscheidung der Verfahren im Zeit- oder Frequenzbereich lässt eine Kategorisierung der Methoden zu, wodurch eine bessere Vergleichbarkeit entsteht. Essentiell ist bei jedem Verfahren, dass das Sensorsignal unabhängig vom Aktorsignal betrachtet werden kann und umgekehrt. Dies wird entweder durch Überlagerung der Signale oder durch entsprechende Frequenzwahl erreicht, indem die Kapazität des Aktors innerhalb einer Periode als konstant betrachtet werden kann.

2.4 Zusammenfassung der technologischen Grundlagen und Vorauswahl geeigneter Verfahren

Da Forschung und Entwicklung im Bereich von DE noch relativ jung sind, existieren nur wenige Standardwerke zu dieser Technologie wie beispielsweise [23] und [24]. Auch der erst kürzlich veröffentlichte Ansatz eines generellen Standards [25] hinsichtlich einer einheitlichen Nomenklatur ist noch nicht in allen wissenschaftlichen Veröffentlichungen durchgehend umgesetzt, wodurch Konfusionen entstehen können. Folglich sind für das allgemeine Verständnis sowie zur richtigen Einordnung die hierfür benötigten Begrifflichkeiten eindeutig definiert und DE hinsichtlich ihres physikalischen Prinzips eingeordnet. Mit dem Verständnis des funktionellen aktorischen und sensorischen Aufbaus eines elementaren DE sind unterschiedliche Aktor- und Sensorstrukturen realisierbar, wobei im Verlauf dieser Arbeit die Versuchsergebnisse vornehmlich unter Verwendung von Strukturen in planarer beziehungsweise gestapelter Bauweise vorgestellt werden. Des Weiteren zeigt eine umfassende Übersicht in Abschnitt 2.2 zum technologischen Leistungsvermögen die vergleichbaren und sehr potenzialreichen Eigenschaften der aus diesem Grund oft als künstliche Muskeln bezeichneten Technologie. Trotz des daraus resultierenden hohen wirtschaftlichen Potenzials in Bereichen wie Medizintechnik, Automobil- und Robotikindustrie, Luft- und Raumfahrt sowie in der Freizeit- und Unterhaltungsbranche konnten sich derartige Aktoren und Sensoren noch nicht etablieren. Begründet werden kann dies durch die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen und Entwicklungen, welche hauptsächlich die Bereiche Materialforschung. automatisierte Herstellung der Strukturen sowie Leistungselektronik adressiert. Dabei liegen erhöhte Anforderungen vor allem bei der Performanz und Zuverlässigkeit von Aktoren und Sensoren, wohingegen Themen wie Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad sowie Sicherheit und Akzeptanz vor allem in der Leistungselektronik zu erforschen sind. Aufgrund der Fokussierung in dieser Arbeit auf die Leistungselektronik werden Elementaraktoren als Demonstratoren im aktuierten Fall verwendet. Wesentliche Verfahren, welche den aktuellen Stand der Technik aufzeigen, werden in Abschnitt 2.3 hinsichtlich der drei Bereiche Ansteuerung, Auswertung und simultane Zustandserfassung während des Betriebs beschrieben und eingeordnet. Daraus resultiert die in Bild 22 dargestellte zusammenfassende Übersicht zu den im Folgenden berücksichtigten leistungselektronischen Verfahren. Diese Verfahren stellen dabei bereits die Vorauswahl und Basis der folgenden Untersuchungen und Methodenentwicklungen dar.



Bild 22: Vorauswahl und Basis geeigneter leistungselektronischer Verfahren als Basis folgender Untersuchungen und Methodenentwicklungen für den sensorischen, aktorischen und kombinierten Betrieb von DE

3 Anforderungen und Handlungsfelder unterschiedlicher Betriebsverfahren

DE erfüllen aufgrund ihres Aufbaus, ihrer Funktion sowie ihrer Leistungsfähigkeit in Kombination mit ihren positiven inhärenten Eigenschaften bereits einige allgemeine Anforderungen an eine neuartige Aktortechnologie [82]. Besonders unterscheidet sich diese Technologie durch ihre Elastizität und Flexibilität von bisherigen etablierten Technologien. Dabei haben DE durch Eigenschaften wie

- uni- und multidirektionale Kraftwirkung,
- Elastizität des Werkstoffes,
- Geräuschlosigkeit,
- Leichtbau,
- Skalierbarkeit und Modularisierbarkeit,
- geringe Kosten sowie
- mögliche Biokompatibilität des Materials

für flexible und dynamische Applikationen in zahlreichen Sektoren im Vergleich zu herkömmlichen Aktoren wie Elektromotoren, pneumatischen oder hydraulischen Aktoren einen Vorteil, siehe Abschnitt 2.2.2.

Der anwendungsorientierte Einsatz von DE ist derzeit allerdings noch nicht vollständig etabliert. Dies liegt vor allem darin begründet, dass seit rund zwei Dekaden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hauptsächlich seitens der Materialwissenschaften hinsichtlich optimaler Materialparameter und Funktionsweise durchgeführt werden. Die Erforschung geeigneter Herstellungsverfahren, gezielter Anwendungen und angepasster Leistungselektronik erfolgt erst seit den letzten Jahren. Dabei setzt die erfolgreiche Applikation vor allem im letztgenannten Bereich die Erfüllung zahlreicher Anforderungen voraus. Nur dann können DE mit bereits etablierten Aktorsystemen konkurrieren.

3.1 Handlungsbedarfe zur optimalen Nutzung des Leistungspotenzials

Die Nutzung des beschriebenen potenzialreichen technischen Leistungsvermögens von DE hängt vor allem von der weiteren Entwicklung in den Bereichen Material, automatisierte Herstellungsverfahren sowie Leistungselektronik ab. Im Folgenden sind die derzeitigen Limitationen sowie weitere Anforderungen und Handlungsbedarfe aufgestellt [82, 133], welche für ein Nutzbarmachen des gesamten Leistungsvermögens von DE zu erfüllen sind. Dabei werden zur Aufstellung der allgemeinen Anforderungen an aktorisch oder sensorisch betriebene DE-Systeme zunächst mögliche Anwendungsszenarien definiert. Mit dieser Aufstellung wird anschließend der Aspekt der Leistungselektronik für unterschiedliche Betriebsmodi fokussiert und detaillierter betrachtet.

3.1.1 Allgemeine Handlungsfelder und Anforderungen zur Etablierung dielektrischer Elastomeraktor-/ sensorsysteme

Für die unterschiedlichen Betriebsmodi definieren mögliche Anwendungsszenarien die spezifischen Anforderungen an das jeweilige aktorische oder sensorische DE-System. In Tabelle 5 werden hierfür mögliche Beispiele potenzieller Systeme anhand der konsistent weitergeführten Unterteilung in die drei Betriebsarten *aktorisch*, *sensorisch* und *sensomotorisch* genannt. Flexible Applikationen erwirken dabei erhöhte Ansprüche an die genutzte Technologie, siehe [82]. Im weiteren Verlauf werden die spezifischen Anforderungen anhand der definierten exemplarischen Applikationsbeispiele abgeleitet.

Betriebsmodus	Applikationsbeispiele	in Anlehnung an
aktorischer Betrieb	Lautsprecher Ventil aktives Implantat	[12, 65, 142] [64, 66] [94]
sensorischer Betrieb	Wearables Bewegungsanalysen	[143-145] [146], [P5, P7]
sensomotorischer Betrieb	Soft Robots/ künstliche Muskeln haptisches Display Prothesen	[147], [P1, P10] [52, 71] [82]

Tabelle 5: Exemplarische Applikationsszenarien zum Einsatz von DE in den unterschiedlichen Betriebsarten zur Ableitung wesentlicher Anforderungen

Handlungsfelder

Insbesondere durch das frühe Entwicklungs- und Forschungsstadium von DE bestehen erweiterte, sich gegenseitig beeinflussende Handlungsfelder.

Diese lassen sich durch die Etablierung von Methoden und Verfahren, wie Leistungselektronik, Materialentwicklung oder automatisierte Herstellungsverfahren noch weiter spezifizieren, siehe Bild 23.



Bild 23: Handlungsfelder und grundlegende Anforderungen an ein DE-System für eine erfolgreiche Systemintegration

Materialentwicklung: In Forschungslaboren am häufigsten zur Realisierung von DE verwendete Materialien sind Silikone, Polyurethane und Acrylate. Gezielte Materialentwicklungen hinsichtlich einer erhöhten Permittivität, eines niedrigen Elastizitätsmoduls und der maximalen Durchbruchfeldstärke des Dielektrikums sowie einer hohen Leitfähigkeit und Elastizität der Elektrodenmaterialien sind weiterhin notwendig und versprechen einen stetigen Anstieg der Leistungsfähigkeit der Aktoren. Aufgrund ihres entscheidenden Einflusses auf zahlreiche Anforderungsaspekte zur Applikationsentwicklung ist die Materialentwicklung hinsichtlich der Anforderungsverkettung in Bild 23 als ein grundlegendes Handlungsfeld zu betrachten.

Automatisierte Herstellungsverfahren: Ebenfalls als grundlegendes Handlungsfeld zu betrachten sind automatisierte Herstellungsverfahren

von DEA oder DES. Solche Verfahren ermöglichen reproduzierbare DE-Elemente, welche in Abhängigkeit gegebener Performanzanforderungen gefertigt werden können. Des Weiteren sind Herstellungsverfahren abhängig vom verwendeten Material beziehungsweise auf Materialparameter wie zum Beispiel Viskosität anzupassen. Im Idealfall ermöglicht ein einzelnes Verfahren durch die entsprechende Verarbeitung von Isolations- und Elektrodenmaterial die Herstellung unterschiedlicher Aktorstrukturen. Bisherige (teilweise semi-) automatisierte Herstellungsverfahren zeigen erfolgversprechende Ansätze, welche die Produktion reproduzierbarer DEA in verschiedenen Skalierungen und Formen ermöglichen können. Dafür sind als Beispiel die bereits kommerziell vertriebenen Aktoren der Firma CTsystems GmbH [148] zu nennen. Verfahren wie das sogenannte Spin-Coating-Verfahren für kleinskalige Stapelaktoren [149, 150] sowie das sogenannte Aerosol-Jet-Druckverfahren als additives Fertigungsverfahren für unterschiedliche Strukturen und Formen [P2, P4] sind bisher lediglich im Forschungsumfeld untersucht. Letzteres Verfahren verspricht dabei die automatisierte Herstellung eines auf Zug beanspruchbaren Stapelaktors.

Leistungselektronik: Als drittes grundlegendes Handlungsfeld ist die Leistungselektronik zu nennen. Durch die maximale Effizienz von DEA an ihrem elektromechanischem Limit sind zum Betrieb elektrische Felder im Bereich von $80 - 120 \frac{V}{\mu m}$ notwendig. Durch zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von DEA ist daher ein großes Spektrum von Ansteuermöglichkeiten im HV-Bereich erforderlich. Mittels der Leistungselektronik sind zahlreiche Aktoren individuell und dynamisch zu betreiben, wobei die in den Bildern 7 und 8 dargestellte Frequenzabhängigkeit ebenfalls berücksichtigt werden sollte, um anwendungsabhängige Optima zu erhalten. Da DEA für sich gesehen im Vergleich zu weiteren Aktortechnologien einen relative hohen Wirkungsgrad besitzen, dürfen erhöhte Schaltungsverluste in der Leistungselektronik nicht zu einer Reduzierung des Wirkungsgrads des Gesamtsystems führen. Folglich sind verlustarme Schaltungen für einen effizienten Betrieb von DEA notwendig.

Detaillierte und auf Basis exemplarischer Anwendungsszenarien werden Anforderungen hinsichtlich der Funktionalität und der Eigenschaften der Leistungselektronik in Abschnitt 3.1.2 für die genannten Betriebsarten separat dargestellt.

Grundlegende Anforderungen

Neben den Handlungsfeldern sind in Bild 23 ebenfalls wesentliche Anforderungen für eine erfolgreiche Systemintegration von DE dargestellt. Anhand der exemplarisch genannten potenziellen Applikationen können diese Anforderungen abgeleitet werden.

Funktionalität: Unabhängig von der Betriebsart unterliegen die jeweiligen DE-Systeme in ihrer anvisierten Applikation einem bestimmten Zweck. Für die zum Betrieb notwendigen Teilsysteme sind entsprechende Eigenschaften festzulegen, wodurch die einzelnen Funktionen definiert sind. Applikationsunabhängig betrachtet sind zwei wesentlichen Funktionsblöcke zum einen das Verbundmaterial und zum anderen die Leistungselektronik. Diese Blöcke sind je nach Anwendung weiter zu spezifizieren, beispielsweise welche Art von flexibler Bewegung erzeugt oder erfasst werden soll oder ob die Ansteuerung oder Auswertung mehrerer DE-Elemente notwendig ist.

Performanz: Das verwendete Material sowie die Struktur und Geometrie haben einen erheblichen Einfluss auf das Leistungspotenzial. Vor allem im aktorischen Betrieb sind diese Parameter in Abhängigkeit von den maximal zu erzielenden Kräften und Bewegungen zu spezifizieren. Im sensorischen Betrieb sind hauptsächlich Verformungen sowie geometrische Gegebenheiten ausschlaggebend. Aus der geforderten Funktionalität des DE-Systems folgen zusammen mit der notwendigen Leistungsfähigkeit erweiterte Anforderungen an das Material, Herstellungsverfahren und an die Auslegung der Leistungselektronik.

Zuverlässigkeit/ Robustheit: Für den tatsächlichen Einsatz in bestimmten Applikationen müssen die Materialien und Leistungselektronik ebenfalls robust gegenüber unterschiedlichen Umweltbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sein. Des Weiteren sollten Materialien keine oder nur geringe Hysterese- oder Materialfluss-Effekte besitzen. [133] DEA-Systeme werden im Idealfall an ihrer maximalen Durchbruchfeldstärke betrieben. Hierfür sind zum einen an die DE-Struktur angepasste Leistungselektroniken notwendig, um weder eine unzureichende Funktionalität oder die Zerstörung des Aktors zu bewirken. Dazu sind ebenfalls vollständig automatisierte Prozesse notwendig, welche gleichmäßige Schichtdicken erzeugen können. Des Weiteren ist ein fester Verbund zwischen Elektroden und Dielektrikum essentiell, um auch bei häufiger Belastung im aktorischen wie auch sensorischen Fall nicht zu einem Versagen des Systems zu führen.

Leichtbau: Die Leistungsfähigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht von DE sind für flexible und weiche Systeme ein wichtiger Vorteil. Daher sind Strukturen sowie weitere Systemkomponenten wie die Leistungselektronik derart auszulegen, dass der Wirkungsgrad nicht oder nur gering reduziert wird. Folglich sind schaltungstechnische Konzepte notwendig, welche eine Reduzierung von Bauelementen bei gleichbleibender Funktionalität gewährleisten.

(Energie-)Effizienz: DE besitzen im Idealfall bei der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie nur wenige Verluste, wodurch ein hoher Wirkungsgrad resultiert. Um dies sicherstellen zu können, sind für Elektroden hohe Leitfähigkeiten und für das jeweilige Dielektrikum geringe Leckströme notwendige Materialeigenschaften. Schaltungselektronische Verluste sind durch entsprechend optimierte Verfahren quantitativ und qualitativ minimieren.

Nachhaltigkeit/ Umweltverträglichkeit: Zum einen ist durch Leichtbauweise verschiedener Systemkomponenten sowie der Leistungselektronik eine möglichst hohe Ressourceneffizienz zu erzielen. Des Weiteren sind seitens der Materialentwicklung auf Kompatibilität mit der Umgebung während des Einsatz und auf umweltverträgliche Recyclebarkeit des Materialverbunds zu achten.

Wirtschaftlichkeit: Hinsichtlich der Effizienz ist das Verhältnis von Nutzungs- und Herstellungsdauer ein entscheidender Faktor. Dafür sind neben bereits etablierten Herstellungsverfahren von Materialien auch Fertigungsprozesse von DE-Systemen zu entwickeln, welche eine hohe Stückzahl in kurzer Zeit simultan fertigen können. Die resultierende Lebensdauer und Anzahl der Zyklen von DE-Systemen sind für die Effizienz ausschlaggebende Parameter und hängen von Material, Fertigungsverfahren sowie der angepassten Leistungselektronik ab. Der Einsatz kostengünstiger, herkömmlicher elektrischer Bauelemente ist dabei zu bevorzugen.

Adaptierbarkeit/ Integrierbarkeit: Unabhängig vom Betriebsmodus sollten DEA und DES in einem breiten Anwendungsspektrum einsetzbar sein. Dazu sind elementare DE-Strukturen sowie eine an die jeweils notwendige Applikation anpassbare Leistungselektronik notwendig. Eine große Dynamik- sowie Leistungsbandbreite der Ansteuerungs- und Auswertungshardware unterstützen dabei die Adaptierbarkeit von DE-Systemen auf unterschiedliche Aufgabenstellungen [133].

Sicherheit/ **Akzeptanz:** Im Vergleich zu herkömmlichen Applikationen im LV-Bereich werden aufgrund des notwendigen Betriebs im niederen HV-Bereich vor allem zu berührende oder körpernah getragene Applikationen noch mit Argwohn betrachtet. Der Aspekt der Sicherheit, die unter anderem Berührungsschutz oder auch sicheres Verhalten im Fehlerfall betrifft, ist durch entsprechende Kapselung der Leistungselektronik in einem Gehäuse und durch intelligente Schaltungselektronik zu bewerkstelligen [82]. Die Akzeptanz solcher mit HV betriebener Systeme ist durch Adressierung und Hervorheben sicherheitsrelevanter Aspekte, wie beispielsweise Berührschutz und einer sicheren Leistungselektronik weiter zu erhöhen.

3.1.2 Spezifische Anforderungen an die Leistungselektronik zum aktorischen und sensorischen Betrieb

Bisherige Entwicklungen im Bereich der Leistungselektronik sind überwiegend an spezielle Anwendungsfälle beziehungsweise Aktoren oder Sensoren angepasst. Universell einsetzbare Ansteuerungen von DEA, auch mit simultaner Auswertung, erfordern Definitionen von Anforderungen, um den Einsatz für unterschiedliche aktorische und sensorische Applikationen mit beispielsweise variablen Dynamikumfängen zu ermöglichen. Eine separate Betrachtung des aktorischen und sensorischen Betriebs resultiert dabei in den wesentlichen Anforderungen der jeweiligen Betriebsmodi. Diese werden anschließend auf den kombinierten Betrieb übertragen. Allgemeine Anforderungen betreffen dabei alle separaten Betriebsmodi sowie deren Kombination nach Bild 22.



Bild 24: Allgemeine Anforderungen an die Leistungselektronik sowie Spezifizierung der Anforderungen für den aktorischen, sensorischen und integrierten Betriebsmodus

Hinsichtlich der simultanen Auswertung während des aktorischen Betriebs ergeben sich zusätzliche Anforderungen [133], wie die Sensorsignalverarbeitung im HV-Umfeld, die HV-Spannungsfestigkeit sowie die Auswertung unabhängig vom Betriebszustand, siehe Bild 24. Folglich sind Verfahren notwendig, welche unabhängig von der Höhe der Betriebsspannung sind sowie keine gegenseitigen Quereinflüsse der überlagerten Sensor- und Aktorsignale zur Folge haben.

3.2 Handlungsbedarf bei separater Betrachtung verschiedener Betriebsmodi

Die in Abschnitt 2.3 genannten Verfahren und Methoden zu leistungselektronischen Umsetzungen können in den verschiedenen Betriebsmodi noch wesentlich erweitert werden. Aktuelle Handlungsbedarfe in den drei Bereichen Aktorik, Sensorik und sensomotorischen Systemen werden mittels Analyse aktueller Lösungsansätze hinsichtlich zuvor genannter Anforderungen ersichtlich.

3.2.1 Individueller Betrieb mehrerer Aktoren mit zentraler Energiequelle

Die gut verstandenen und beherrschten Steuerungsverfahren für konventionelle Industrieroboter sind nur bedingt auf den Einsatz von weichen Kinematiken und im Speziellen auf den Einsatz von DEA übertragbar. Durch die Komplexität des nicht-linearen Verhaltens von DE und den daraus resultierenden zahlreichen, den jeweiligen Anwendungen entsprechend angepassten Aktormodellen, betrachten bisherige Lösungsansätze zur Steuerung überwiegend den Einsatz eines einzelnen Aktors im Laborbetrieb. Der Fokus liegt dabei häufig auf der Funktionalität des Aktors, wobei die Ansteuerung häufig mit massereichen Transformatoren (zum Beispiel in [101, 108, 139]) sowie HV-Generatoren im Labormaßstab (zum Beispiel in [115, 118, 119, 136, 140, 151–154]) realisiert werden. Für den Einsatz zahlreicher Aktoren beispielsweise in mobilen Systemen bestehen allerdings Anforderungen vor allem hinsichtlich des Leichtbaus. Der Aspekt der Verwendung eines kleinen, leichtbauenden HV-Generators wird nur in wenigen Veröffentlichungen ersichtlich, welche überwiegend nur einzelne Aktoren betrachten (zum Beispiel in [115, 119, 121]). Bei bisherigen Ansätzen mit mehreren Aktoren ist ebenfalls der kontinuierliche Betrieb vom dynamischen Betrieb zu unterscheiden und zu beachten, dass materialintegrierte Schalter [111], individuell angepasste Transistoren [112] sowie allgemein HLS mit geringerer Spannungsfestigkeit [107] bisher vor allem auf kleinskalige Aktoren und deren vorgesehenen Anwendungen beschränkt sind. Um eine lange Lebenszeit von einzelnen Aktoren zu

ermöglichen, werden DEA häufig deutlich unter ihren elektromechanischen Grenzen betrieben. Dadurch wird eine Zerstörung des Aktors aufgrund von Überbeanspruchung oder Spannungsüberschlägen durch Materialfehlstellen weitestgehend verhindert. Eine Versagensprognose von Aktoren ist bisher kaum möglich. Individuell anpassbare Ansteuerungsmethoden ermöglichen den Betrieb einzelner Aktoren in ihrem jeweiligen Leistungsmaximum. Für einen solchen Betrieb ist ein Ansteuerungssystem notwendig, das DE mit einer Durchbruchfeldstärke von $80 - 120 \frac{V}{\mu m}$ bei einer realistischen Dielektrikumsstärke von $20 - 100 \mu m$ individuell und abhängig von der Anwendung an ihrem Leistungsmaximum betreiben kann. Eine Erweiterung des Spektrums der Ansteuerungsdynamik ermöglicht des Weiteren Applikationen in einem großen Frequenzbereich, wie in Bild 8 dargestellt. Auch die in Bild 7 dargestellte Frequenzabhängigkeit der Energiedichte kann steuerungsseitig noch weiter ausgenutzt werden.



Bild 25: Abgeleitete Forschungsfragen zum Lösungsansatz erweiterbarer Steuerungsmethoden zahlreicher DEA durch Integration neuartiger sowie Anpassung bestehender Methoden unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen Durch die einfache Skalierbarkeit der DEA sind mit entsprechenden Fertigungsverfahren Aktoren mit einer deutlich höheren Anfangskapazität bei gleichbleibender Dielektrikumsschichtdicke zum Beispiel durch Stapelung der einzelnen DE-Elemente möglich. Damit diese Aktoren ebenfalls mit einer hohen Dynamik und einem optimalen Wirkungsgrad möglichst an ihrem Leistungsmaximum betrieben werden können, sind entsprechende Leistungen in Form von schaltbaren Strömen und Spannungen notwendig. Weitere essentielle Merkmale sind die Schaltdynamik sowie das Gewicht möglicher leistungselektronischer Standardelemente im geforderten Leistungsbereich. Zusammenhänge und Verhalten solcher Elemente unter Verwendung einer PWM-Steuerung oder einer kontinuierlichen DC-Steuerung von DEA sind zu untersuchen und in der Leistungselektronik anzupassen. Erhöhte Schaltungsverluste in der Leistungselektronik sollen dabei nicht dem für sich gesehenen guten Wirkungsgrad von DEA entgegenwirken, wodurch verlustarme Schaltungen für einen effizienten Betrieb essentiell sind.

Folglich sind, wie in Bild 25 dargestellt, nach entsprechenden Anforderungen und Gegebenheiten erweiterbare Steuerungsmethoden zu entwickeln und zu untersuchen, welche eine zuverlässige und universell einsetzbare Ansteuerung für verschiedene Strukturen und Größen von DE in einem hohen Dynamikspektrum erlauben.

Nicht außer Acht zu lassen ist für spätere Anwendungen die Konformität der Leistungselektronik zu festgelegten Anforderungen wie beispielsweise der DIN EN 60204-11, welche die Anforderungen an HV-Ausrüstung im entsprechenden HV-Bereich betrifft. Solche Normen sind aufgrund der Nutzung von PWM-Signalen und DC-Signalen im HV-Bereich relevant.

3.2.2 Standardisiertes Auswerteverfahren zur Kapazitätsbestimmung elastischer Sensoren

Bisherige Einsatzszenarien von DES setzen bereits an dem Punkt an, zukünftig überwiegend weiche und flexible Materialien in verschiedenen Anwendungen sensorisch einzusetzen. Aufgrund der Materialeigenschaften werden hierbei vor allem Einsatzbereiche betrachtet, welche im direkten Umfeld mit dem Menschen sind, wie beispielsweise durch Berührungen [86, 87] oder zur Erfassung von Körperbewegungen [15], [P5, P7]. Bisher liegt dabei der Fokus der Untersuchungen nicht bei höchstmöglicher Genauigkeit der Messungen. Vielmehr wird der Aspekt der mobilen, flexiblen und leichten Anwendungsmöglichkeit aufgezeigt. Kommerziell erhältliche Produkte von Sensoren und deren angepassten Auswertungseinheiten, zum Beispiel der Firma LEAP Technology A/S (Dänemark)¹ oder der Firma StretchSense Ltd. (Neuseeland)², sind keiner definierten und speziellen Anwendung zugeordnet und verhältnismäßig kostenintensiv. Die geringe Anzahl an Firmen zeigt allerdings auch den aktuell sehr beschränkten Markt auf. Mit den bereits zahlreichen genannten Anwendungsmöglichkeiten der primär als Dehnungssensoren verwendeten DES stellen detaillierte Spezifikationen und Modellierungen zum Beispiel als Winkel- oder Kraftmesser eine Möglichkeit zur Erweiterung des Einsatzspektrums dar. Dabei kann die Einführung einer standardisierten Charakterisierung und Evaluation als Kalibrierung beziehungsweise als Vergleich für



Bild 26: Abgeleitete Forschungsfragen zu Lösungsansätzen einer standardisierten Charakterisierung, der Spezifikation weiterer Messgrößen sowie der Konzeptionierung von parasitären Eigenschaften unabhängigen Auswertungsverfahren durch Untersuchung alternativer sensorischer Auswertungsmethoden unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen

¹ https://www.leaptechnology.com/

² https://www.stretchsense.com/

Sensoren sowie möglicher Auswerteverfahren dienen. Eine an existierenden Standards angelehnte einheitliche Testbasis bringt ebenfalls wertvolle Bewertungsmöglichkeiten hinsichtlich geeigneter Fertigungsprozesse, Anwendungen und Auswerteverfahren mit.

Im Hinblick auf die Leistungselektronik sind vor allem zu letzterem Punkt geeignete Verfahren zu analysieren und zu bewerten, da aufgrund der inhärenten (elektrischen) Materialeigenschaften von Dielektrikum und Elektroden bei der Kapazitätsmessung parasitäre Eigenschaften eine große Rolle spielen. Dies bildet die Basis für erweiterte Funktionalitäten im sensorischen wie auch sensomotorischen Betrieb, siehe Bild 26. Für den simultanen aktorischen Betrieb sind daher geeignete Auswerteverfahren zu identifizieren und hinsichtlich der Eignung einer simultane HV-Ansteuerung zu untersuchen.

3.2.3 Simultane Zustandserkennung im Aktorbetrieb mittels Signalüberlagerung

Ein selbstfühlender Aktor beziehungsweise die Möglichkeit der simultanen sensorischen Verwendung von DEA ist ein essentieller Baustein für die Umsetzung intelligenter Systeme auf Basis von DE. Durch die separate Betrachtung von Aktorik und Sensorik können Lösungsansätze an den jeweiligen Betriebsmodus angepasst werden. Dabei kann insbesondere im rein sensorischen Fall die Auswertung im Niederspannungsbereich erfolgen, wodurch spezielle Vorkehrungen wie Bauteilauslegung und -sicherheit im Bezug auf hohe Feldstärken nicht notwendig sind. Zur Realisierung selbstfühlender Aktoren sind allerdings Konzepte notwendig, welche eine simultane Auswertung während des HV-Betriebs ermöglichen sowie unabhängig von sich verändernden parasitären Eigenschaften sind.

Unterschiedliche Ansätze zeigen bereits die Funktionalitäten verschiedener Methoden selbstfühlender Systeme. Diese werden allerdings häufig mit externen und massereichen Geräten unter Laborbedingungen realisiert. Maximale Absolutfehler der simultanen Auswertung werden beispielsweise unter 1,89 % [135] beziehungsweise unter 3 % [137] für modellbasierte Ansätze erreicht. Mit diesen Ansätzen wird zwar eine verhältnismäßige gute Genauigkeit erreicht, allerdings weisen die Lösungen eine hohe Komplexität auf und sind häufig auf den Betrieb eines Aktors beschränkt (zum Beispiel in [135]). Die allgemein gebräuchliche Verwendung von Labor-HV-Generatoren ist bereits in Abschnitt 3.2.1 aufgezeigt. Für die simultane sensorische Funktion werden zusätzlich häufig Funktionsgeneratoren (zum Beispiel in [121, 155]), Oszilloskope (zum Beispiel in [121, 140, 151, 152]) oder Computer mit Datenerfassungskarten (zum Beispiel in [114, 121, 134, 155]) verwendet. Für den mobilen Einsatz selbstfühlender Aktoren sind daher Verfahren notwendig, welche mit gleichbleibender Genauigkeit eine geringere Komplexität aufweisen, somit kostengünstig sind und die Möglichkeit der Miniaturisierung besteht.

Bisherige Umsetzungen zum simultanen aktorischen und sensorischen Betrieb mehrerer DEA auf Basis einer möglichst leichtbauenden Schaltungselektronik weisen Nachteile auf, wie eine bauteil- und schaltungsbedingte geringe Spannung (zum Beispiel in [107]), belastungsabhängige Bauteilparameter oder eine überlagerungsbedingte schwingenden Masse (zum Beispiel in [P9]). Überwiegend sind elektrische Bauelemente für einen Betrieb unter 1 kV ausgelegt, was häufig unzureichend für nicht angepasste Aktoren ist.



Bild 27: Abgeleitete Forschungsfragen zum Lösungsansatz adaptierbarer sensomotorischer Systeme durch Evaluation und Integration geeigneter Sensorik- und Aktorikmethoden, deren Überlagerung zur simultanen Auswertung und Ansteuerung von DE sowie einer Unterscheidung aktiver von passiver Verformungen unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen Folglich sind für ein breites Anwendungsspektrum Methoden für selbstfühlende Aktorsysteme notwendig, welche unabhängig von Aktorstruktur und -größe einen zuverlässigen Betrieb ermöglichen. Auf Basis einer Evaluation und Auswahl entsprechend geeigneter Verfahren zum aktorischen und sensorischen Betrieb wird ein Lösungsansatz gesucht, welcher von Struktur, Aufbau sowie den Elektroden- oder Dielektrikumsmaterialeigenschaften des Aktors unabhängig ist. Ein rückwirkungsloses Nebeneinander von HV-Aktorsignal und der von parasitären Einflüssen unabhängigen Sensorik muss gewährleistet sein. Neben der Toleranz gegenüber elektrischer Spannungen, wie zum Beispiel hoher Ansteuerspannungen oder auch einer ungewollten Aktivierungsspannung, ist die Auswertungselektronik für die simultane Auswertung selbstfühlender Aktoren in die Leistungselektronik entsprechend zu integrieren, siehe ebenfalls weitere Anforderungen aus [133].

Durch Nutzung überlagerter Aktor- und Sensorsignale sind ebenfalls Unterscheidungen von Zustandsänderungen eines aktiven und inaktiven DEA möglich. Dadurch wird eine Unterscheidung aktiver von passiven Verformungen realisierbar und Änderungen der Randbedingungen des Aktorsystems können dynamisch genutzt oder ausgeglichen werden.

Der Forschungsbedarf im Bereich der simultanen Auswertung während des aktorischen Betriebs beläuft sich auf die Notwendigkeit von Methoden und Verfahren, welche die Aktorik und Sensorik in der Leistungselektronik verknüpfen. Damit ist eine allgemeine Nutzung unterschiedlicher DEA als zuverlässige sensomotorische Systeme möglich, siehe Bild 27.

4 Individuelle variable Ansteuerung mit zentraler Energiequelle

Für einfache mechatronische Anwendungen ist ein rein aktorischer Betrieb eines Aktors häufig ausreichend, da oftmals externe Sensoren das aktuierte System sowie den Zustand des Aktors überwachen. Die Anforderungen und Handlungsbedarfe derartiger Fälle sind in Kapitel 3 auf den jeweiligen Betriebsmodus reduziert. Durch die separate Betrachtung der Betriebsmodi ist einerseits eine anwendungsabhängige Untersuchung verschiedener Ansteuerungskonzepte und andererseits eine Qualifizierung der Konzepte für den kombinierten Betrieb möglich.

Um den Aspekt des Leichtbaus sowie der mobilen Verwendungsmöglichkeit der Leistungselektronik berücksichtigen zu können, sind möglichst leichtbauende Standardelemente sowie Energiequellen notwendig. Für den optimalen Betrieb am Leistungsmaximum muss die Energiequelle ein elektrisches Feld im Bereich von ca. $80 - 120 \frac{V}{\mu m}$ generieren können. Bei Schichtdicken von ca. $20 - 100 \mu m$ resultiert dies in einer theoretischen maximalen Spannung bis ca. 12 kV. Zahlreiche Methoden fokussieren sich dabei auf die Ansteuerung eines einzelnen DEA, dessen Leistungselektronik auf die Struktur und Größe des Aktors angepasst ist. Zur Bereitstellung dieser Spannung werden häufig DC-HV-Transformatoren verwendet, deren Ausgangsspannung linear zur Eingangsspannung im LV-Bereich einstellbar ist. Neben großen und schweren Labornetzteilen existieren auch universell einsetzbare kleinere HV-Transformatoren, wie zum Beispiel der Firma *EMCO High Voltage Corporation*¹, welche im Vergleich zu Laborgeräten allerdings eine deutlich geringere Leistung vorweisen.

Gerade hinsichtlich autarker, mobiler und leichtbauender Systeme bestehend aus zahlreichen Aktoren sind Konzepte mit einzelnen HV-Quellen für jeden Aktor nur bedingt geeignet. Abhilfe schaffen dabei Konzepte, welche eine zentralen Energiequelle sowie Schaltelemente zur individuellen Ansteuerung einzelner Aktoren beinhalten, siehe Bild 28.

Das Grundkonzept besteht dabei aus der Substitution zahlreicher massereicher und vergleichbar kostenintensiver HV-Transformatoren durch leichtbauende Halbleiterschaltelemente (HLS) angelehnt an die Verfahren aus [107, 111, 112]. Somit existiert nur noch eine (massereiche) zentrale HV-

¹ https://www.emcohighvoltage.com/



Bild 28: Substitution massereicher und vergleichbar teurer HV-Transformatoren durch eine zentrale Energiequelle zur unabhängigen Ansteuerung unterschiedlicher DEA mittels kompakter und günstiger HLS nach den Verfahren aus [107, 111, 112]

Versorgung, wodurch bei Systemen mit zahlreichen Aktoren Einsparungen in Bauraum, Bauteilanzahl und -kosten erzielt werden können. Über HLS ist dabei jeder Aktor individuell und annähernd stufenlos bis zum Leistungsmaximum ansteuerbar. Aufgrund des großen möglichen Spannungsbereichs sind bisherige Verfahren allerdings nicht ausreichend, um auch großskalige Aktoren betreiben zu können. Die Anordnung der HLS sowie die dadurch resultierende notwendige Ansteuerung dieser Elemente sind ebenfalls anwendungsabhängig auszulegen. Im Folgenden wird daher zwischen (hoch-)dynamischen und kontinuierlichen Steuerungen unterschieden und entsprechende Schaltungstopologien für den jeweiligen Einsatz konzipiert und evaluiert, um das Konzept der zentralen Energiequelle umzusetzen. Mit den im Folgenden beschriebenen Methoden werden zum einen eine hochdynamische Ansteuerung von DEA und im weiteren Verlauf ebenfalls eine stufenlose Ansteuerung von DEA ermöglicht. Durch den Einsatz von Standard-HLS wird die Übertragbarkeit der Ansteuerung für den variablen Einsatz für unterschiedliche Aktorstrukturen und Aktorgrößen auch im höheren HV-Bereich gewährleistet. Aspekte wie HV-Festigkeit, Energieeffizienz sowie die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen sind je nach Applikationsanforderung und Schaltungskonzept anzupassen.

Abschnitte der im Folgenden dargestellten Untersuchungen sind teilweise bereits in [P1, P4, P11–P13] publiziert oder an vom Autor angewiesene, betreute und am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik durchgeführte studentische Arbeiten [S1–S7] angelehnt.

4.1 Referenzsystem zur optischen Kapazitätsauswertung von Elementaraktoren

Da kein kommerzielles Messsystem zur direkten Kapazitätsbestimmung von DE simultan zum aktorischen Betrieb erhältlich ist, wird ähnlich zu [114, 152] ein adaptiertes optisches Referenzsystem (ORS) verwendet. Mit diesem kann die Kapazität eines flächigen DEA-Elements während des Betriebs hinreichend genau bestimmt werden. Dieser Ansatz schließt über geometrische Verhältnisse auf die Kapazität und damit den Zustand des Aktors zurück. Dabei sind bestimmte Annahmen notwendig, welche eine Kapazitätsbestimmung anhand der Elektrodenflächenänderung näherungsweise ermöglichen:

- Ausreichende Flexibilität der Elektrode,
- Inkompressibilität des Dielektrikums sowie
- **konstante relative Permittivität** ε_{r}

Die Berechnung der aktuellen Kapazität kann analog zu Gleichung (2.6) ebenfalls über das Flächenverhältnis mittels

$$C(\sigma) = C_0 \left(\frac{A(\sigma)}{A_0}\right)^2 \tag{4.1}$$

angegeben werden. Der dazugehörige Versuchsaufbau sowie der Ablauf zur optischen Auswertung eines DEA mittels ORS ist samt Kalibrierungsvorgang schematisch in Bild 29 skizziert.

Das ORS ist in dieser Konfiguration aufgrund der optischen Gegebenheiten nur im Zweidimensionalen, das heißt für ebene Elementaraktoren applizierbar. Damit sind aktive Verformungen eines planaren Aktors messbar, welche durch Anlegen eines ausreichenden elektrischen Felds erfolgen und sich somit in einer planaren Flächenvergrößerung der Elektroden äußern. Da das ORS eine optisches Vermessung beinhaltet, kann das System nur in Applikationen integriert werden, welche freie Sicht auf den Aktor zulassen. Im Folgenden hat das ORS daher nicht den Anspruch der Integrierbarkeit, sondern dient der Evaluierung der in dieser Arbeit entwickelten Schaltungskon-



Bild 29: Zustandsmessung eines Elementaraktors mittles optischer Kapazitätsmessung (angelehnt an [114, 152]) sowie schematisch dargestellter Messablauf beginnend bei der Kalibrierung des optischen Referenzsystems

zepte und -topologien. Des Weiteren kann das ORS ebenfalls als Vermessungssystem verwendet werden, um Aktoren direkt nach deren Herstellung zu prüfen. Dabei ist für andere Strukturen aus Tabelle 1, deren Hauptbewegungsrichtung die Kontraktion des Aktors ist, die Dickenmessung analog zur Flächenmessung zu verwenden.

Zur Kalibrierung wird zunächst eine definierte Referenzfläche im gleichen Abstand zur Kamera wie der spätere Aktor vermessen. Des Weiteren wird ein Aktor nach entsprechenden Vorgaben hergestellt, dessen unbelastete Ausgangskapazität aufgrund der bekannten Abmaße und des bekannten Materials zu berechnen ist. Eine zusätzliche direkte Kapazitätsmessung im inaktiven Zustand dient der Absicherung der Ergebnisse. Folglich ist ebenfalls eine Verifikation und Validierung der gemessenen Daten mit den Parametern aus der Herstellung möglich. Auf Basis dieses Aufbaus wird die durch ein angelegtes elektrisches Felds hervorgerufene Aktorflächenänderung erfasst und deren Messwerte mit den Zeitstempeln der angelegten Aktorspannung synchronisiert. Eine Korrelation zwischen Aktorspannung und der jeweiligen Aktorfläche $A_{DE}(U)$ ist möglich. Bild 30 zeigt das grundsätzliche Verhalten von Elementaraktoren nach Anlegen einer HV.



a) Kapazitives Verhalten und Antwort eines DEA auf unterschiedliche HV-Sprünge analog zu Ladevorgängen von Kondensatoren

b) Mittlere Zustands-/ Flächenänderung mit doppelter Standardabweichung in Abhängigkeit der angelegten HV

Bild 30: Kapazitives Verhalten von Elementaraktoren als Antwort auf ein angelegtes elektrisches Feld sowie resultierende Zustands-/ Flächenänderung von DEA

Bei Betrachtung des Spannungsverlaufs über dem Aktor wird der kapazitive Aufbau der Struktur deutlich, siehe Bild 30a). Der Verlauf der Spannung und die Vergrößerung der Elektrodenfläche deutet aufgrund des strukturellen Aufbaus sowie inhärenter parasitärer und werkstofftechnischer Eigenschaften des Aktors auf die Analogie des Ladevorgangs eines Kondensators hin. Ein leichtes Fließverhalten des Materials führt hier allerdings zu einem steten Anwachsen der Elektrodenfläche und folglich auch der Aktorkapazität. Anhand des spannungsabhängigen Elektrodenflächenverlaufs $A_{\rm DE}(U)$ kann grundsätzlich dennoch der Zusammenhang

 $A_{\rm DE}(U) \propto U^2 \tag{4.2}$

mittels der Gleichungen (2.1) und (2.2) sowie der bereits getroffenen Annahme der Inkompressibilität des Dielektrikums gezeigt werden, siehe Bild 30b).

4.2 Stufenlose Ansteuerung mittels Pulsweitenmodulation

Hinsichtlich der sehr niedrigen Antwortzeit von DEA sind insbesondere für dynamische Applikationen PWM-HV-Signale geeignet. Da DEA im HV-Bereich betrieben werden, ist eine angepasste Leistungselektronik notwen-

dig, welche mit hohen Frequenzen Spannungen im niedrigen kV-Bereich schalten kann sowie über Modulation des Tastgrads eine Steuerung der Kontraktionsstärke bewirkt.

4.2.1 Schaltungskonzepte zur dynamischen Ansteuerung von **DEA mittels PWM**

Generell gibt es zur Realisierung einer PWM-Ansteuerung auf Basis von Schaltern unterschiedliche Methoden, siehe Bild 31. Dabei kann vor allem zwischen aktivem und passivem Laden beziehungsweise Entladen differenziert werden. Diese Bezeichnungen beziehen sich auf die Ladungsbewegung zum oder weg vom Aktor. Es wird unterschieden, ob der Aktor aktiv über einen Schalter (und damit einem nahezu vernachlässigbaren Widerstand) oder passiv über einen nicht vernachlässigbaren externen Widerstand beziehungsweise dem internen Isolationswiderstand geladen oder entladen wird.

Die Konfiguration aus Bild 31a) wird mit HV-MOSFET bereits in [P11] zur individuellen Steuerung mehrerer Aktoren mit einer zentralen Energiequelle genutzt. Dabei wird der Aktor über das Schließen des Schalters aktiv geladen, wobei ein Öffnen des Schalters das Entladen des Aktors über den Widerstand R bewirkt. Dies ermöglicht ein sehr dynamisches Laden des Aktors. Aufgrund des hochohmigen Widerstands, welcher dafür sorgt, dass die Ladungen bei Aktuation nicht um den Aktor herum fließen, ist das Entladen des Aktors allerdings verlangsamt.



a) Aktives Laden und passives b) Aktives Entladen angelehnt an c) Aktives Laden und Entladen Entladen, verwendet in [P11]

[112]

nach [107]

Bild 31: Varianten zum pulsweitenmodulierten Betrieb von DEA durch unterschiedliche Schalterkonfigurationen

In Bild 31b) ist eine Verschaltung zum aktiven Entladen nach [112] dargestellt. Dabei wird der Aktor durch den geringen Schalterwiderstand vollständig und schnell entladen, wobei durch einen niedrigen Widerstand R ein hoher Ladungsfluss bei Aktuation ermöglicht wird. Dieser Widerstand wirkt allerdings auch beschränkend auf den Verluststrom bei Nichtaktivität des Aktors und sollte daher diesbezüglich relativ hoch gewählt werden, was wiederum eine Verlangsamung des Aktorladevorgangs bewirkt. Durch die zeitliche Verlängerung sind nur niedrige PWM-Frequenzen möglich.

Bild 31c) zeigt den grundlegenden Aufbau und das Prinzip des aktiven Ladens und Entladens. Dabei wird in Bild 31b) eingesetzte Parallelwiderstand durch den Schalter S_1 ersetzt, um das Entladen steuern und deutlich beschleunigen zu können. Bei Nichtbetrieb des Aktors tritt ideal betrachtet kein Verluststrom auf. Ist der Steuerungseingang des Schalters nicht galvanisch vom Durchlassbereich getrennt, wie beispielsweise bei Transistoren, sind allerdings Methoden zur Gewährleistung des benötigten Potentialunterschieds notwendig.

Zur Realisierung hoher Schaltfrequenzen sind aufgrund der Abhängigkeit von der Ladungsbewegungsgeschwindigkeit zusätzliche Widerstände möglichst zu vermeiden, wodurch das Verfahren aus Bild 31C) aufgrund der niedrigen Schaltwiderstände für eine hochfrequente PWM-Ansteuerung von DEA qualifiziert ist. Mit dieser Konfiguration ist die Bereitstellung eines PWM sowie frequenzvariablen Rechtecksignals möglich, bei dem die Flankensteilheit ausreichend hoch für hochfrequente PWM-Signale ist. Des Weiteren ist für den Tastgrad des Signals ein nahezu stufenloses Einstellen möglich, das lediglich von der Auflösung des schaltenden Logiksystems und der Dynamik des Schalters abhängig ist.

In Bild 32 ist das verallgemeinerte Schaltungskonzept mit den wesentlichen Bausteinen dargestellt. Dabei wird das Konzept aus Bild 31c) erweitert sowie die Unterteilung in Signal-/ ($LV_{<}$ -/ LV_{-}) und Aktor-/ (HV-)Bereich spezifiziert.

Generell werden zur Generierung eines optimalen PWM-Signals die Schalter stets invertiert zueinander geschaltet, wodurch bei leitendem Ladeschalter S_L der Entladeschalter S_E nichtleitend ist, und umgekehrt. Ist S_L geschlossen, wird der Aktor geladen. Ist S_E geschlossen, fließen die Ladungen des Aktors wieder ab. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften sowie Funktionsweisen von Halbleiterbauelementen sind zunächst geeignete HLS zu identifizieren und angepasste Schaltungskonzepte zu untersuchen, welche die Besonderheiten der elektrischen Bauelemente berücksichtigen.



Bild 32: Verallgemeinertes Schaltungskonzept zur Generierung einer dynamischen Ansteuerung von DEA auf Basis hochdynamischer HV-Schaltvorgänge mit Unterteilung des Systems in Signalbereich ($LV_{<-}/LV$ -Bereich) und Aktorbereich (HV-Bereich)

4.2.2 Auswahl geeigneter Schaltelemente für den PWM-Betrieb unter Hochspannung

Um DEA mit PWM in entsprechenden Frequenzbereichen optimal ansteuern zu können, ist abhängig von Material und Schichtdicke des Dielektrikums eine elektrische Spannung bis in den niedrigen HV-Bereich notwendig. Für einen PWM-Betrieb von DEA sind folglich angepasste Schaltungen mit HV-festen Schaltelementen notwendig, welche die Anforderungen im Hinblick auf leichtbauende Hardware erfüllen sollten. Abhängig von deren Größe und damit der Kapazität weisen DEA unterschiedliche Leistungsaufnahmewerte vor, welche durch Ladespitzenströme und der hohen Spannungen resultieren. Aufgrund der eingeschränkten Auswahl kommerziell erhältlicher Bauelemente mit genannten Anforderungen [156] finden in einem Bereich bis 10 kV bisher nur einige wenige kommerziell erhältliche halbleiterbasierte Schaltelemente Anwendung. Die Implementierung von HLS ist dabei abhängig von deren Bauweise.

Abhängig von Art und Funktionsweise des verwendeten HLS folgt der Einfluss des Eingangs auf den Ausgang unterschiedlichen physikalischen Zusammenhängen, wie beispielsweise bei Optokopplern, Halbleiterrelais, Bipolartransistoren oder Metall-Oxid-Feldeffekt-Transistoren. Bei der Auswahl ist zwischen Strukturen mit galvanischer Trennung (mit je einem Tor für Steuerung und zu steuerndem Widerstand) sowie Strukturen mit gemeinsamen Bezugspunkt (Masse) und je einem einzelnen Steuer- sowie Widerstandsanschluss zu unterscheiden, siehe Bild 33. Mit Bezug auf den Einsatz im HV-Bereich besitzen galvanisch getrennte Elemente den Vorteil, dass zum einen der Signalbereich vom HV-Bereich isoliert ist und zum anderen die Eingangsspannung unabhängig von der zu beeinflussenden HV ist.



Bild 33: Unterscheidung zwischen HLS mit galvanischer Trennung (links) und mit gemeinsamen Bezugspunkt (rechts) als individuelle Steuerelemente

In Tabelle 6 sind die wesentlichen Elementtypen mit jeweiligen repräsentativen Beispielen aufgelistet.

Schaltelement	Bezeichnung	U_{\max}	I _{max}	f_{max}	Vol., Masse	Lit.
Optokoppler	OC100HG (Voltage Mul- tipliers Inc.)	10 kV	300 µA	415 Hz	$\begin{array}{c} 11.4\mathrm{mm}\times\\ 25.4\mathrm{mm}\times\\ 8.1\mathrm{mm},4\mathrm{g}\end{array}$	[P4] [113, 157]
Halbleiterrelais (PhotoMOS)	AVQ258 (Panasonic Corp.)	1,5 kV	6 mA	$\sim 1 \mathrm{kHz}$	$\begin{array}{l} 8,8\mathrm{mm}\times\\ 6,4\mathrm{mm}\times\\ 3,9\mathrm{mm},1\mathrm{g}\end{array}$	[156, 158]
IGBT	IXGF30N400 (IXYS Corp.)	4 kV	30 A	630 Hz	$\begin{array}{l} 20,\!3{\rm mm}\times\\ 21,\!3{\rm mm}\times\\ 5,\!2{\rm mm},5{\rm g} \end{array}$	[P4] [159]
N-Kanal- MOSFET	BUZ50A (Siemens)	1 kV	2,5 A	2,49 kHz	$\begin{array}{c} 9{,}9\mathrm{mm}\times\\ 17{,}5\mathrm{mm}\times\\ 4{,}4\mathrm{mm},2\mathrm{g} \end{array}$	[P4] [160]
N-Kanal- MOSFET	IXTA- 02N450HV (IXYS Corp.)	4,5 kV	200 mA	>1 kHz	$\begin{array}{c} 16{,}1{\rm mm}\times\\ 19{,}1{\rm mm}\times\\ 5{,}1{\rm mm},2{,}5{\rm g}\end{array}$	[P11] [161]

 Tabelle 6: Entscheidende Parameter repräsentativer HLS zur PWM-Ansteuerung von DEA anhand kommerziell erhältlicher elektronischer Bauelemente

Abhängig von spezifizierten und detaillierten Anforderungen sind unterschiedliche Schaltelemente geeignet. Deutlich höhere Spannungen (bis $U_{\text{max}} = 10 \text{ kV}$) können beispielsweise mit dem Optokoppler *OC100HG* (Voltage Multipliers Inc.) geschaltet werden, wobei ebenfalls stromgesteuerte DEA realisierbar sind [113]. Durch die Notwendigkeit strombegrenzender hoher Widerstände auf einen Maximalstrom von $I_{\text{max}} = 300 \,\mu\text{A}$ ist allerdings die daraus resultierende maximal schaltbare Frequenz $f_{\text{max}} = 415 \,\text{Hz}$ sowie die maximale Spannung im Vergleich gering. [P4]

Geringe Maximalspannungen bis zu 1,5 kV können bei einer kleinen Baugröße von PhotoMOS-Schaltelementen (*AVQ258*, Panasonic Corp.) mit einer höheren Frequenz (\sim 1 kHz) geschaltet werden [156]. Allerdings kann auch hier der relativ geringe verträgliche Strom von 6 mA beschränkend auf das Aktorsystem wirken.

Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (engl. Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)) (IXGF30N400, IXYS Corp.) weisen bei einer deutlich ausreichenden Stromfestigkeit eine komfortable Möglichkeit auf, bis zu 4 kV schalten zu können. Frequenzen bis zu 630 Hz sind möglich, wobei eine Eingangsspannung am Gate von mindestens 15 V notwendig ist. [P4]

Die geringe Maximalspannung von 1 kV herkömmlicher Hochleistungs-MOSFET (*BUZ*50A, Siemens) kann in komplexeren Kaskadenschaltungen mit mehreren MOSFET auf 4 kV erhöht werden. Durch die Dynamik der Transistoren sind Frequenzen bis zu 2,49 kHz möglich. Nachteilig ist die notwendige Verschaltung mehrerer Transistoren zur Erhöhung der maximalen schaltbaren Spannung, was im Vergleich zu Einzelschaltelementen zu einer erhöhten Komplexität sowie größeren Bauraum führt. [P4]

Der HV-MOSFET (*IXTA-02N450HV*, IXYS Corp.) benötigt lediglich ca. 6-8V als Eingangsspannung und kann mit einer Spannungsfestigkeit von 4,5 kV und einer ausreichenden Stromverträglichkeit von 200 mA HV-PWM-Signale mit Frequenzen \gg 1 kHz schalten.

Die Auswahl jeweils geeigneter Schaltelemente erfolgt durch Vergleich der in Tabelle 6 bereits aufgeführten Kriterien wie

- schaltbare Maximalspannung,
- Stromtragfähigkeit,
- maximale Schaltfrequenz und
- Gewicht/ Volumen,

aber auch erweitert durch

- Schaltungsaufwand, wie Komplexität, Anzahl der Bauelemente und funktionalen Baugruppen etc., und
- Anwendungsbereich, zum Beispiel reine Aktorik oder kombinierter sensorischer Betrieb.

Durch eine anforderungsspezifische Gewichtung sind die jeweiligen geeigneten HV-Elemente ermittelbar.

Aufgrund der relativ niedrigen Maximalspannung von 1-1,5 kV sind der Standard-MOSFET BUZ50A sowie der PhotoMOS AVQ258 häufig nicht ausreichend für die benötigten Ansteuerspannungen einer Vielzahl verwendeter Aktoren. Diesbezüglich können sowohl der Optokoppler OC100HG als auch der IGBT IXGF30N400 die geforderte Spannungsfestigkeit von ca. 4 kV vorweisen, decken allerdings mit maximal 415-630 Hz nur einen eingeschränkten Frequenzbereich ab. Mit einer Stromtragfähigkeit von 200 mA, einer schaltbaren maximalen Spannung von 4,5 kV sowie einem Frequenzband weit über 1 kHz erfüllt daher der HV-MOSFET IXTA-02N450HV alle geforderten Kriterien. Des Weiteren weist dieses HLS im Vergleich zu HV-Wandlern nur einen Bruchteil des Gewichts auf. Bei steigender Anzahl von Aktoren wirkt sich das positiv auf das Gesamtgewicht des Systems aus. Dieses Bauteil wird in dieser Arbeit stellvertretend für HLS, im Speziellen für MOSFET verwendet. Folgend beschriebene Methoden und Untersuchungen sind mit jeweiligen Adaptionen auf andere Elemente übertragbar.

4.2.3 Ansteuerung mittels hochdynamischer Schaltsignale durch aktives Laden und Entladen

Im LV-Bereich sind aufgrund sehr kurzer Ladezeiten bereits mit herkömmlichen Schaltelementen hohe Frequenzen generierbar. Je höher die Spannung sowie Kapazität der zu ladenden Kondensatoren, desto stärker sind die Einflüsse von Zeitkonstanten, internen und externen Widerständen, maximalen Ladeströmen sowie Signalfrequenzen. DE weisen dabei einen nicht unendlichen Isolationswiderstand auf, wodurch sich ein Aktor selbstständig wieder entlädt, wenn das elektrische Feld durch die Energiequelle keine weiteren Ladungen erhält. Ein dynamisches Schalten des Aktors ist folglich nicht ohne zusätzlichen Schalter möglich, siehe Bild 31. Da jegliche passive Entladevorgänge entweder zu höheren Verlusten führt oder nur eine geringe Dynamik zulässt, sind aktive Lade- und Entladevorgänge für eine hochdynamische Ansteuerung von DE notwendig, siehe Bild 31c).

Das hier dargestellte verallgemeinerte Konzept ist für unterschiedliche HLS adaptierbar. Vor allem aufgrund des resultierenden Aktorsteuerspannung $U_{\rm DE}$ sind Schalter mit galvanischer Trennung von Steuer- und Ausgangssignal, wie zum Beispiel Optokoppler, schaltungstechnisch im Vorteil, da das HV-Potential den Schaltereingang nicht beeinflusst. Für Schaltelemente mit

galvanischer Trennung sind entsprechende Vorkehrungen für den essentiellen Potentialunterschied am Schaltereingang notwendig, siehe Bild 34.



Bild 34: Angepasstes Schaltungskonzept zur Generierung einer PWM-HV-Ansteuerung eines DEA auf Basis nicht galvanisch getrennter Schalter am Beispiel des Einsatzes von HV-MOSFET

Im leitenden Zustand sollte der Innenwiderstand des Schalters im Vergleich zu den parasitären Widerständen des Aktors vernachlässigbar sein. Somit wird ein dynamisches Entladen des DEA ermöglicht und durch die zyklisch invertierten Schaltvorgänge keine unnötige Energie in Wärme gewandelt. Die Steuereingänge von S_L und S_E erhalten das PWM-Signal sowie dessen Invertierung über einen PWM-Generator-IC, welcher integriert in ein Chip-Board oder extern betrieben wird. Das über einen Verstärker verstärkte Signal liegt über der Schwellspannung des jeweiligen Schalters, um ein vollständiges Durchschalten zu gewährleisten.

Ab dem zweiten PWM-Zyklus liegt bei geschlossenem S_L am Aktor und damit auch am unteren Anschluss von S_L eine von Null ungleiche Spannung an. Bei nicht galvanisch getrennten Schaltern ist der benötigte Potentialunterschied zwischen Steuereingang und dem gemeinsamen Bezugspotential für das invertierte PWM-Signal beispielsweise mittels eines Photovoltaikbausteins zu generieren.

Mit der beschriebenen Konfiguration sind schaltbare Frequenzen im kHz-Bereich für eine PWM-Ansteuerung realisierbar. Über Mikrocontroller sowie Programmbibliotheken können Frequenz und Pulsweite, lediglich durch die Bit-Auflösung begrenzt, nahezu stufenlos angesteuert werden. Bei konstanter Frequenz kann somit die Pulsweite zur stufenlosen Ansteuerung des Aktors verwendet werden. Die resultierende Kontraktion von DEA beziehungsweise deren Flächenausdehnung gemessen mit dem ORS durch Ansteuerung mittels PWM ist in Bild 35 dargestellt.



a) Einfluss durch schrittweise Erhöhung der Pulsweite bei unterschiedlichen Frequenzen



Bild 35: Von Frequenz und Maximalspannung abhängiges Verhalten von DEA (Angabe von Mittelwert und doppelter Standardabweichung) basierend auf der vorgestellten PWM-Ansteuerung

Zu beachten ist, dass aufgrund vollständiger Lade- und Entladezyklen der Aktor mit entsprechender Frequenz aktuiert, was für das menschliche Auge ab ca. 25 Hz zwar nicht mehr sichtbar ist, allerdings in spürbaren Vibrationen resultiert. Sind Vibrationen unerwünscht, können diese über einen zusätzlichen optionalen Widerstand R_{opt} unterdrückt werden, siehe Bild 34. Bild 35a) zeigt die Zustandsänderung eines Elementaraktors in Abhängigkeit der Pulsweite bei konstanter Ansteuerungsfrequenz. Die Reaktion des Aktors weist hier ebenfalls den quadratischen Zusammenhang zwischen Aktorspannung und der resultierenden Kontraktion beziehungsweise Elektrodenflächenausdehnung aus Gleichung (4.2) auf.

Dagegen zeigt Bild 35b) über die Flächenausdehnung des DEA die Frequenzabhängigkeit der PWM Ansteuerung bei konstanter Pulsweite von 50 %. Aufgrund des kapazitiven Aufbaus und der dadurch resultierenden Zeitkonstante sinkt mit steigender Frequenz die am Aktor resultiernde Spannung leicht. Der Effekt wird durch höhere Maximalspannungen der HV-Quelle verstärkt, was auf eine höhere Anstiegszeit im Vergleich zur Entladezeit hindeutet.

4.3 Kontinuierliche Ansteuerung mittels charakteristischer Kennlinien von Halbleiterschaltelementen

PWM-basierte Ansteuerungsmethoden sind vor allem für dynamische Anwendungsfälle geeignet, in denen schnelle Auf- und Entladevorgänge notwendig sind. Sind dagegen pulsierende Ansteuerungen für bestimmte Applikationen nicht zweckmäßig, wird eine kontinuierliche Aktorspannung notwendig.

Zur variablen DC-HV-Versorgung eines DEA werden für einzelne Aktoren häufig Transformatoren für die notwendige HV genutzt, welche durch stufenlose Kontrolle der eingangsseitigen LV gesteuert wird. Mittels herkömmlicher HLS kann dagegen das Konzept aus Bild 28 aufgegriffen werden, um mittels individueller Anpassung charakteristischer Kennlinien der Schaltelemente aus einer zentralen Energieversorgung eine individuelle DC-Aktorspannung im HV-Bereich für den jeweiligen Aktor zur Verfügung zu stellen.

4.3.1 Schaltungskonzepte zur Gleichhochspannungssteuerung auf Basis von Halbleiterschaltelementen

Die Verwendung von HLS zur kontinuierlichen beziehungsweise stufenlosen Steuerung der Ausgangsspannung ist auf die eingangsspannungsabhängige interne Widerstandsänderung des jeweiligen Schaltelements zurückzuführen. Unterschiedliche Konfigurationen lassen sich somit realisieren, welche exemplarisch in Bild 36 skizziert und grundsätzlich für den Einsatz zur stufenlosen Ansteuerung von DEA geeignet sind. Trotz ihrer Ähnlichkeit zueinander weisen die dargestellten Anordnungen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf.



a) Stromquelle oder variabler b) Variabler Spannungsteiler c) Erhöhung der Variabilität der Spannungsteiler (optional mit durch variablen (Entlade-) Wi- Ansteuerung eines DEA durch konstantem Parallelwiderstand), derstandsbereich des Schalters Kombination von a) und b) angelehnt an [112]

Bild 36: Unterschiedliche Konfigurationen zu Schaltungsmethoden zum reinen Gleichspannungsbetrieb dielektrischer Elastomeraktoren auf Basis interner Widerstandsänderungen über charakteristische Kennlinien von Halbleiterschaltelementen
Je nach Betrachtungsweise nutzt die Anordnung in Bild 36a) den HLS entweder als spannungsgesteuerte Stromquelle [114] oder als variablen Spannungsteiler. Dabei wird der Ladestrom für den Aktor durch die Widerstandsänderung des Schalters S_{var} gesteuert. Da sich der Aktor von selbst über den isolationswiderstandsabhängigen parasitären Leckstrom nur langsam entladen würde, ist für einen schnellen Ladungsausgleich die optionale Einführung eines Parallelwiderstands R_{opt} sinnvoll, über den sich der Aktor im Nichtbetrieb entladen kann. Je geringer dieser Widerstand ist, desto schneller wird der Aktor entladen, wobei bei Betrieb ein hoher Verluststrom durch diesen Widerstand entsteht. Aufgrund der benötigten Potentialdifferenz am Eingang des HLS sind vor allem Schaltelemente mit galvanischer Trennung von Ein- und Ausgang schaltungstechnisch vorteilhaft. In anderen Fällen sind wiederum zusätzliche potentialfreie Schaltereingangssignale vonnöten.

Eine Alternative für den variablen Spannungsteiler ist in Bild 36b) in Anlehnung an [112] dargestellt. Durch einen Tausch von S_{var} mit R kann sich der Aktor bei Durchschalten des Schalters zwar schnell entladen, führt allerdings zu einer deutlichen Erhöhung des Verluststroms beim Nichtbetrieb des Aktors, da der Schalterwiderstand in diesem Fall minimal ist und der Maximalstrom fließen kann.

Durch die Kombination von zwei variablen Widerständen können die jeweiligen Vorteile der genannten Methoden vereint werden, wodurch die jeweiligen Nachteile verdrängt werden. Die Verschaltung ist zunächst analog zur PWMbasierten Ansteuerung in Bild 31c). Allerdings sind durch die standardmäßig steilen Eingangs-Ausgangs-Kennlinien herkömmlicher Halbleiterschaltelemente die Ausgangsspannungen aller Konfigurationen in Bild 36 lediglich in einem schmalen Eingangsspannungsband steuerbar. Dies führt zu Ungenauigkeiten oder Sprüngen am Ausgang herkömmlicher Schalter.

Anknüpfend daran werden im Folgenden Lösungskonzepte vorgestellt, welche nicht von speziell angefertigten HLS (wie zum Beispiel in [112]), abhängig sind, sondern möglichst kostengünstige und bereits etablierte Bauelemente verwenden. Dadurch werden kommerziell erhältliche und auf dem Markt verfügbare Schaltelemente für den Einsatz zur stufenlosen Ansteuerung von DEA qualifiziert. Für dynamische Ansteuerungen auf Basis einer PWM-Ansteuerung wird die Auswahl bereits in Abschnitt 4.2.2 diskutiert. Die grundlegenden Parameter hinsichtlich Spannungs- und Stromverträglichkeit, Größe und Gewicht etc. treffen ebenfalls für den Einsatz in kennlinienbasierten Methoden zu. Zur Ansteuerung eines DEA über charakteristische Kennlinien von HLS sind die Eingangs-Ausgangs-Kennlinienverläufe deutlich abzuflachen und zu linearisieren, um eine präzise Ansteuerung der HV bis zum angegebenen Maximum des HLS erreichen zu können. Durch die Kombinationskonfiguration der Schalter kann die Verlustleistung vor allem im Nichtbetrieb des Aktors minimiert werden. Das verallgemeinerte Schaltungskonzept ist in Bild 37 dargestellt.



Bild 37: Verallgemeinertes Schaltungskonzept zur Generierung einer individuellen DCbasierten Ansteuerung von DEA auf Basis charakteristischer Kennlinien von HV-HLS mit Unterteilung des Systems in Signalbereich (LV_<-/LV-Bereich) und Aktorbereich (HV-Bereich)

Die Aktorspannung am DEA resultiert nach der Konfiguration aus Bild 37 in

$$U_{\text{DEA},i} = U_{\text{HV}} \cdot \frac{R(U_{i,\text{in},2})}{R(U_{i,\text{in},1}) + R(U_{i,\text{in},2})},$$
(4.3)

wobei U_{HV} die verfügbare HV bezeichnet und $U_{i,\text{in},k}$ die Steuerspannungen der jeweiligen ($k \in \{1,2\}$) Schalterwiderstände des *i*-ten Aktors sind. Die variablen Widerstände bilden dabei den variablen Spannungsteiler.

4.3.2 Adaption charakteristischer Eingangs-/ Ausgangskennlinien von Standardschaltelementen

Mittels charakteristischer Kennlinien von HLS werden die physikalischen Zusammenhänge beschrieben, welche das bauteilspezifische Verhalten während des Betriebs bestimmen. Für Schalter sind dabei vor allem zwei Zustände, sperrend und leitend, entscheidend. Um möglichst dynamisch vollständige und verlustarme Schaltvorgänge realisieren zu können, sind grundsätzlich ab definierten Schwellspannungen in den meisten Fällen daher hohe Gradienten der Übertragungskennlinie gefordert. Dabei sind die Zusammenhänge zwischen Steuereingang und dem Ausgangswiderstand respektive dem durch den Schalter geleiteten Strom ausschlaggebend.

Unter der Voraussetzung steiler Kennlinien sind durch den schmalen Eingangssteuerspannungsbereich hauptsächlich individuell geschaltete DC-HV möglich. Der in Bild 38 oben dargestellte Verlauf ist demnach für reine Schaltkonzepte geeignet, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben. Für individuell angepasste und aufgelöste DC-HV ist dies allerdings nur bedingt anwendbar. Daher wird für individuelle und aufgelöste DC-HV ein adaptierter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang erforderlich, welcher ebenfalls durch einen erweiterten Bereich der Eingangssteuerspannung charakterisiert ist, siehe Bild 38 unten.



Bild 38: Einsatzbereiche von HLS mit standardmäßiger Eingangs-/ Ausgangscharakteristik mit Eignung vor allem für dynamisch geschaltete Signale durch hohen Gradienten (oben) und mit adaptierter Eingangs-/ Ausgangscharakteristik für stufenlos steuerbare Signale (unten)

Durch einen gemeinsamen Bezugspunkt und durch geeignete Erweiterung der Schaltung, siehe Bild 39a), kann eine vom Ausgang ausgehende rückwirkende Beeinflussung des Eingangs genutzt werden, um den Gradienten der Eingangs-/ Ausgangskennlinie zu erniedrigen. Bei Elementen ohne galvanische Trennung ist dies lediglich unter der Voraussetzung eines gemeinsamen Massepotentials gegeben. Exemplarisch ist der qualitative Verlauf einer abgeflachten Ausgangskennlinie in Bild 39b) dargestellt. Nach dem prinzipiellen Schema aus Bild 39a) wird dies durch einen spannungsbezogenen Gleichgewichtszustand erreicht, welcher durch die zusätzlichen Widerstände erzwungen wird. Der daraus resultierende Widerstand R_{var} ist durch

$$R_{\rm var} = f\left(U_{\rm in}, I_{\rm D}\right) = f\left(U_{\rm in'} - \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{\rm var}} \cdot U_{\rm HV}, I_{\rm D}\right)$$
(4.4)

zu beschreiben, wobei die Abhängigkeit der variablen und bekannten Widerstandswerte eine Adaption an die jeweilige Anwendung sowie unterschiedliche Aktorsysteme ermöglicht. Durch die implizite Schreibweise in Gleichung (4.4) wird vor allem der auf die Eingangsspannung des Schalters rückwirkende Einfluss des Widerstands R_2 deutlich, welcher den Gradienten der Übertragungskennlinie verringert, siehe Bild 39b).





 a) Verallgemeinerte Erweiterung zum Einsatz von HLS f
ür eine adaptierte Kennliniencharakteristik

b) Qualitativer Verlauf einer adaptierten Eingangs-Ausgangskennlinie eines HLS (exemplarisch: MOSFET)

Bild 39: Adaption der charakteristischen Eingangs-/ Ausgangskennlinie von HLS über ein gemeinsames Bezugspotential sowie Erweiterung der Konfiguration mit Widerständen

Die ursprüngliche Übertragungsfunktion des HLS ist dabei entscheidend, in welchem Maße und mit welcher Auflösung die Eingangssteuerspannung auf den variablen spannungsgesteuerten Widerstand wirkt. Der Verlauf kann für den verwendeten HLS entweder aus grundlegenden physikalischen Gegebenheiten oder dem jeweiligen Datenblatt entnommen werden. Durch erhöhte Spannungsbereiche sowie Stromverläufe weisen die Widerstandsverläufe einen höheren Gradienten auf als für herkömmliche HLS im LV_<-Bereich. Etwaige Adaptionen der theoretischen Übertragungsgleichungen sind daher abhängig vom verwendeten Bauteil zu berücksichtigen.

4.3.3 Linearisierung der Widerstandskennlinie und Generierung der Aktorspannung mittels MOSFET

Eine Abflachung respektive Linearisierung der Eingangs-/ Ausgangskennlinie wird durch die bereits beschriebene Schaltungserweiterung mit dem Einsatz der zusätzlichen Widerstände R_1, R_2 bewirkt. Durch die daraus resultierende Rückwirkung ist eine Erhöhung der Eingangsspannung erforderlich, welche im Idealfall einen linearen Zusammenhang zwischen der Nutzereingabe und der Steuereingangsspannung aufweist. Ist dieser Zusammenhang nicht linear, ist eine Linearisierung in Abhängigkeit der Auflösung des Nutzereingabebereichs notwendig. Das allgemeine Schema zur Generierung einer linearen Eingangssteuerspannung zum Betrieb eines HLS mit abgeflachter linearer Eingangs-/ Ausgangskennlinie ist in Bild 40 dargestellt.



Bild 40: Schema zur Generierung eines linearen Zusammenhangs zwischen Eingabewert und Steuerspannung des Schalters zur Erzeugung einer linear steuerbaren Aktorspannung mittels linearisierter Eingangs-/ Ausgangskennlinie von Halbleiterschaltern

Für den Fall eines nicht-verzerrenden und somit linearen Zusammenhangs zwischen Eingabewerten und Steuerspannung ist die Nutzung des Sollwerts als direkte Eingabe zur Erzeugung der Steuerspannung möglich. Im Falle eines nicht-linearen Verlaufs wird die Linearisierung durch Invertierung des funktionalen Zusammenhangs von Steuergrad und der resultierenden Schaltereingangsspannung unter Berücksichtigung der Auflösung durchgeführt. Die resultierende Spannungsänderung am Aktor verläuft antiproportional zum Schalterwiderstand. Da beispielsweise bei selbstsperrenden HLS die Verringerung des Schaltwiderstands durch Erhöhung der Eingangssteuerspannung bewirkt wird, ermöglicht eine Invertierung des Eingangssteuersignals eine intuitive Ansteuerung des Aktors. Dadurch resultiert die Nutzereingabe eines höheren Eingabewertes in einer höheren Aktorspannung.

Das im Folgenden verwendete Modell für die Berechnung der Aktorspannung ist nach Bild 39 beziehungsweise Bild 40 durch

$$U_{\rm DEA} = \frac{U_{\rm HV} \cdot R_{\rm L}}{R_1 + R_{\rm L}} - I_{\rm D} \cdot \frac{R_1 R_{\rm L}}{R_1 + R_{\rm L}}$$
(4.5)

zu beschreiben. $R_{\rm L}$ bezeichnet dabei den Lastwiderstand und $I_{\rm D}$ den Durchlassstrom. Anhand des Modells können Ansteuerungen auf Basis charakterisierender HLS-Kennlinien in Abhängigkeit der Applikation näherungsweise ausgelegt werden.

Die für das Modell notwendige Analyse von HLS (vor allem der Verlauf des steuerbaren Widerstands beziehungsweise Durchlassstroms) wird über eine formelmäßige Abbildung der physikalischen Eigenschaften und somit der charakteristischen Kennlinien ermöglicht. Aufgrund häufig unbekannter physikalischer und materialtechnischer Gegebenheiten erleichtern Approximationen sowie Anpassungen die Nutzung herkömmlicher bekannter Zusammenhänge. Diese sind insbesondere für HLS im HV-Bereich notwendig, da bekannte und etablierte Zusammenhänge aus der Literatur mit experimentell ermittelten Werten nicht übereinstimmen. Im Folgenden werden hierfür HV-MOSFET-Schalter beispielhaft betrachtet.

Mittels Erweiterung der herkömmlichen Übertragungsfunktion für MOSFET kann für HV-MOSFET durch einen zusätzlichen Faktor κ die Übertragungsfunktion angepasst werden. Dabei bezeichnen K den Steilheitskoeffizienten und κ einen eingeführten materialspezifischen und prozessparameterabhängigen Faktor zur Adaption herkömmlicher MOSFET-Gleichungen in den HV-Bereich. Diese Faktoren werden in einer erweiterten Darstellung der Übertragungsgleichungen eingesetzt:

Sperrbereich:
$$(U_{GS} \le U_{th})$$

$$I_{\rm D} = 0 \tag{4.6}$$

■ Triodenbereich: $(U_{GS} > U_{th}, 0 \le U_{DS} \le (U_{GS} - U_{th}) \cdot \kappa)$

$$I_{\rm D} = 2K \cdot \left[\kappa \cdot (U_{\rm GS} - U_{\rm th}) \cdot U_{\rm DS} - \frac{1}{2} U_{\rm DS}^2 \right]$$
(4.7)

■ Sättigungsbereich: $(U_{\text{GS}} > U_{\text{th}}, U_{\text{DS}} > (U_{\text{GS}} - U_{\text{th}}) \cdot \kappa)$

$$I_{\rm D} = K \left(U_{\rm GS} - U_{\rm th} \right)^2 \cdot \kappa^2 \tag{4.8}$$

Für diese Zusammenhänge sind weitere Parameter die benötigte Schwellspannung (engl. threshold) des Schalters $U_{\rm th}$, die Gate-Source-Spannung $U_{\rm GS}$ und die Drain-Source-Spannung $U_{\rm DS}$. Durch die Einführung des Faktors κ ist zum einem kein Wissen über physikalische und materialtechnische Gegebenheiten notwendig und zum anderen wird trotz unbekannter Material-, Geometrie- und Halbleitereigenschaften eine Adaption der etablierten Standardgleichungen und Unterteilung auch für den HV-Bereich ermöglicht.

Aufgrund der unbekannten Prozessparameter sowie großer Spannungsunterschiede von zwei bis drei Potenzen zwischen Ein- und Ausgangsspannung ist in den Zusammenhängen der Gleichungen (4.7) und (4.8) neben dem Übertragungsfaktor κ auch der Faktor 2 notwendig. In Abhängigkeit prozessbedingter Beschaffenheit sowie der genauen Transistorkonfiguration kann κ dabei als eine Funktion in Abhängigkeit der Eingangsspannung dargestellt werden, wobei eine lineare Approximation

$$\kappa = m_{\kappa} \cdot U_{\rm GS} + \kappa_0 \tag{4.9}$$

mit der Steigung m_{κ} sowie der eingeführten Verschiebungskonstante κ_0 möglich ist. Mittels den Gleichungen (4.6) bis (4.9) resultieren die adaptierten Verläufe, welche in Bild 41 dargestellt sind. Folglich wird eine Anpassung des spannungsabhängigen Durchlassstroms, siehe Bild 41a) sowie der Schaltwiderstandsverläufe in Abhängigkeit der Eingangssteuerspannung, siehe Bild 41b) für einen HV-MOSFET basierend auf den theoretischen Gleichungen herkömmlicher MOSFET erreicht. Die in Gleichung (4.3) angedeutete Modellierung des Schaltwiderstands in Abhängigkeit der Eingangsspannung wird somit möglich.

Mit Kenntnis des Eingangs-Ausgangsverhaltens ist die Adaption beziehungsweise Linearisierung dieser Kennlinie möglich. Die Steigung der Übertragungsfunktionslinearisierung $m_{\rm lin}$ kann mit Bild 39 aus

$$I_{\rm D} = \frac{m_{\rm lin} \cdot (U_{\rm in'} - U_{\rm th})}{1 + m_{\rm lin} R_2}$$
(4.10)



a) Übertragungskennlinie aufgetragen mittels durchgeleiteten Strom (Drainstrom) $I_{\rm D}$ über der Eingangssteuerspannung (Gate-Source) $U_{\rm GS}$

b) (Abschnür-)grenze zwischen Widerstandsbereich und Sättigungsbereich in Abhängigkeit der Eingangssteuerspannung U_{GS}

Bild 41: Vergleich von Datenblattangaben und mittels Erweiterung und Adaption von Standardzusammenhängen resultierende charakteristische Kennlinien eines MOSFET am Beispiel des HV-MOSFET IXTA02N450HV [161]; der rot markierte Bereich entspricht einem Überschreiten des maximalen Durchlassstroms, welcher zur Zerstörung des Bauteils führt.

abgeleitet werden. Für den Fall des im Vergleich zum Maximalstrom geringen Stromflusses und den durch die Spannungsquellen bedingten notwendigen leistungsbegrenzenden Widerständen kann m_{lin} aufgrund $m_{\text{lin}}R_2 \gg 1$ als vernachlässigbar angenommen werden.

Mit der in Bild 40 erwähnten Linearisierung sowie Invertierung resultiert die Nutzereingabe eines höheren Eingabewertes in einer höheren Aktorspannung, siehe Bild 42a). Die am Aktor resultierende Spannung ist durch die beschriebenen Zusammenhänge des Konzepts zur Kennliniensteuerung ebenfalls prognostizierbar, siehe Bild 42b). Dabei wird durch ein niedrigeres Verhältnis von $\frac{R_2}{R_1}$ ein steilerer Anstieg der Spannung am Aktor erreicht, und umgekehrt. Der Verlauf ist zum einen von der bereitgestellten HV und zum anderen durch die Widerstandskombination (R_1 im M Ω - und R_2 im k Ω -Bereich) respektive deren Verhältnis zueinander abhängig.

In Bild 42c) ist die Zustandsänderung eines DEA auf Basis charakteristischer Kennlinien von Halbleiterschaltern sowie die jeweilig anliegende HV gezeigt. Um einen unnötigen Energieverlust bei Nichtbetrieb des Aktors zu vermeiden, ist die umgesetzte Konfiguration nach Bild 36c) mit einem zusätzlichen Schalter erweitert. Das aktorische Verhalten des Aktors ist erwartungsgemäß und folgt dem bereits beschriebenen nicht-linearen Zusammenhang zwischen Flächenvergrößerung und anliegender Spannung aus Gleichung (4.2). Damit kann die Funktionalität der kennlinienbasierten Ansteuerung als DC-HV-Betrieb eines DEA gezeigt werden.



a) Notwendige Linearisierung des Zusammenhangs zwischen Eingabewerten und Steuerspannung sowie deren Invertierung

b) Vergleich der Simulations- und Messergebnisse der kennlinienbasierten Steuerung der Aktorspannung



c) Zustandsänderung eines DEA (Mittelwerte mit Angabe der doppelten Standardabweichung) auf Basis der Ansteuerung mittels charakteristischer Kennlinien von HLS

Bild 42: Adaptierbare und linear verlaufende HV-Aktorspannung durch Linearisierung und Invertierung einer nicht-linearen HLS-Steuerspannung in Abhängigkeit der Gesamtspannung sowie der Widerstandskombination von R_1 , R_2 und deren Verhältnis zueinander; die zur quadratischen Aktorspannung proportional verhaltende Zustandsänderung eines DEA zeigt die Funktionalität der Steuerung auf Basis charakteristischer Kennlinien von HLS über eine zentrale HV-Quelle.

4.4 Zusammenfassung und Fazit

Aufgrund der potenzialreichen Eigenschaften von DE als flexible und elastische Aktoren mit einer allgemein zugesprochenen hohen Leistungsdichte und hohem Wirkungsgrad sind platz- und volumensparende Leistungselektroniken für einen effizienten Ansteuerungseinsatz notwendig. Die Anzahl möglicher Applikationen ist bei DEA zukünftig als sehr groß anzusehen. Das Spektrum reicht von einfachen Aktoranwendungen über dynamische, einstellbare Schaltvorgänge bis hin zu hochfrequenten Applikationen. Für dieses breite Spektrum werden geeignete schaltungstechnische Methoden vorgestellt und im Bezug auf den Betrieb von DEA untersucht. Dabei wird als Grundkonzept die Zentralisierung der Energieversorgung verwendet, mit der die Substitution zahlreicher und massereicher HV-Transformatoren durch leichtbauende Halbleiterschaltelemente mit entsprechender Hochspannungsfestigkeit erreicht wird. Dadurch wird eine deutliche Reduzierung von Gewicht und Volumen der Leistungselektronik ermöglicht.

Im Vergleich zu anderen Smart Materials sind bei DEA aufgrund ihrer materialphysikalischen Eigenschaften herkömmliche Spannungen im LV_<- und LV-Bereich nicht ausreichend. Dies schränkt die Auswahl standardisierter und kostengünstiger elektrischer Bauelemente deutlich ein. Verwendbare kommerziell erhältliche Bauelemente sind bis dato nicht für den Betrieb von DEA ausgelegt und daher schaltungstechnisch zunächst zu charakterisieren und für den Betrieb zu adaptieren.

Eine Analyse des beschränkten Angebots an möglichen Bauelementen im zutreffenden Spannungsbereich anhand geeigneter Kriterien ermöglicht die Auswahl geeigneter HLS für unterschiedliche Einsätze. Dynamische Steuerungsmethoden basieren dabei auf PWM, stufenlose Steuerungen dagegen auf Nutzung charakteristischer Übertragungs- und Widerstandskennlinien der HLS.

Vorgestellte Methoden ermöglichen eine dem jeweiligen Anwendungsfall sowie in Abhängigkeit der Aktorgeometrien und -eigenschaften angepasste Ansteuerung, welche durch Miniaturisierung und Adaption eine leichtbauende Leistungselektronik ermöglicht. Die Funktionalitäten der Konzepte zur PWM-basierten Ansteuerung sowie der kennlinienbasierten Ansteuerung sind analog zum DC-HV-Betrieb eines DEA nutzbar. Im Vergleich zu bisherigen bekannten Ansteuerungssystemen können die vorgestellten Ansätze folgende Kriterien erfüllen und erweitern somit das Einsatzspektrum von Ansteuerungshardware für DEA:

- Unabhängigkeit von Laborequipment
- kostengünstige Erweiterbarkeit des Systems mit weiteren Aktoren durch Nutzung einer zentralen Energiequelle
- Möglichkeit einer diskreten dynamischen sowie einer kontinuierlichen Ansteuerung von DEA
- Übertragbarkeit auf ein sensomotorisches DE-System zur simultanen sensorischen Nutzung des Aktors

Vor allem die Methode mittels Nutzung charakteristischer Übertragungsund Widerstandskennlinien ist zur Überlagerung von Aktor- und Sensorsignalen für eine simultane Auswertung während des aktorischen Betriebs geeignet. Durch die stufenlose Ansteuerung sind Einsatzbereiche möglich, wie beispielsweise in aktorisch betriebenen Kinematiken oder als einfache Stellaktoren. Die mittels pulsweitenmodulierter Ansteuerung in Abhängigkeit der Frequenz auftretenden spür- und je nach Applikation hörbaren Vibrationen sind für den Einsatz bei Kinematiken zwar unerwünscht, jedoch beispielsweise für vibrotaktile oder auch akustische Anwendungen geeignet.

5 Dielektrische Elastomere als deformationsabhängige Kapazitätssensoren

Neben dem Fall des aktorischen Betriebs von DE wird im Folgenden ebenfalls die Untersuchung unterschiedlicher Ansätze der Leistungselektronik im sensorischen Betrieb betrachtet. Damit können für material- und herstellungsbedingte nicht-ideale DE geeignete Lösungen für den rein sensorischen Betrieb sowie die mögliche Fusionierbarkeit mit der Aktorik im weiteren Verlauf identifiziert werden.

Da für DE, hier im Speziellen DES, bisher keine spezifischen Normen existieren, wird neben leistungselektronischen Methoden ebenfalls ein Vorgehen zur Charakterisierung von DES mit Bezug auf das Verhältnis zwischen Dehnung, Kapazität und weiteren Messgrößen vorgestellt. In Anlehnung an Verfahren aus [87, 91, 129] wird anschließend eine Auswertungsmethode auf Basis von Tiefpass-Filtereigenschaften eines DES in Kombination mit einem definierten Widerstand vorgestellt. Dabei wird die in bisherigen Verfahren umgesetzte Kapazitätsauswertung auf Basis der Amplitudenänderung durch die Erfassung der Phasenverschiebung des Sensorsignals erweitert und hinsichtlich der Genauigkeit und Robustheit gegenüber parasitärer Eigenschaften verglichen. Mit der vorgestellten Methode wird eine Umsetzung mittels kostengünstiger Bauelemente sowie unabhängig von sperrigem Laborequipment möglich. Als kapazitives Referenzmesssystem für DES dient zur Evaluation des entwickelten Konzepts ein im rein sensorischen Betrieb bereits etabliertes und kommerziell erhältliches Auswertungssystem der Firma LEAP Technology A/S [162].

Der sensorische Anwendungsfall fokussiert sich mit verallgemeinert dargestellten Beziehungen zwischen Kapazität und der in diesem Fall angestrebten Winkeländerung als Messgröße auf ein körpernah getragenes Gestenerkennungssystem zur intuitiven Gestensteuerung beliebiger Roboter.

Abschnitte der im Folgenden dargestellten Untersuchungen sind teilweise bereits in [P₃, P₅–P₇] publiziert oder an vom Autor angewiesene, betreute und am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik durchgeführte studentische Arbeiten [S8–S19] angelehnt.

5.1 Einfluss materialbedingter Eigenschaften auf die kapazitive Auswertung elastischer Deformationssensoren

Im Vergleich zu herkömmlichen Kondensatoren wie Keramik-, Folien-, oder Papierkondensatoren besitzen DES eine stärkere Ausprägung hinsichtlich parasitärer Eigenschaften. Diese entstehen vor allem durch die flexiblen und elastischen Materialeigenschaften, wodurch wesentlich schlechter leitfähige Elektroden und schlechter isolierende Dielektrika resultieren. Die negativen Auswirkungen auf die Leit- sowie Isolationsfähigkeit sind bei der Schaltungstopologie zur Auswertung von DES zu berücksichtigen.

Voruntersuchungen zeigen, dass DES sich in ihrem Verhalten stark hinsichtlich Linearität und Hysterese verändern. Hierfür können die bisherige Einsatzzeit sowie eine Beanspruchung außerhalb der zulässigen Grenzen der DES verantwortlich sein. [P5–P7] Bild 43 zeigt zum Vergleich beispielhaft einerseits das lineare Verhalten neuwertiger, intakter Sensoren, siehe Bild 43a) und andererseits ein stark ausgeprägtes Hystereseverhalten von defekten Sensoren, siehe Bild 43b). Folgend werden DES als defekt bezeichnet, deren parasitäre Eigenschaften aufgrund von Alterung, Materialermüdung und/ oder Überbeanspruchung des Materials beziehungsweise der Kontakte zwischen rigiden und elastischen Zuleitungen durch externe Kräfte einen starken negativen Einfluss auf die zuverlässige Funktionsfähigkeit des Sen-



a) Lineares Verhalten eines intakten Sensors vs. nichtlineares Verhalten eines defekten Sensors

b) Lineares Verhalten eines intakten Sensors vs. Hystereseverhalten eines defekten Sensors

Bild 43: Zusammenhang von Deformation und Kapazität von DES im intakten und defekten Zustand nach [P5, P7]; beispielhafte Messungen mit Messverfahren basierend auf Oszillation (LC), Filtereigenschaften (HP) sowie einem Benning Multimeter M11 (MM) zeigen durch abweichende Messwerte die unterschiedlichen Potenziale der verschiedenen Auswertungsmethoden auf. sors besitzen. Ein Sensor wird dabei als defekt bezeichnet, wenn die relative Abweichung zum linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Kapazität und/ oder die relative Abweichung durch Hysterese-Effekte > 5% ist. Abhängig vom Messverfahren können die Kapazitäten und damit das sensorische Verhalten von DES teilweise weder quantitativ noch qualitativ übereinstimmend oder aufgrund parasitärer Einflüsse gar nicht abgebildet werden [P6]. Daher sind speziell im Hinblick auf die Verwendung von DES leistungselektronische Verfahren zu untersuchen und im Hinblick auf eine zuverlässige Auswertung der Kapazität und damit der Deformation zu evaluieren.

Die in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Klassifizierung kapazitiver Verfahren ermöglicht eine Bewertungsgrundlage zur Evaluation sensorischer Auswertungsverfahren von DES. Je nach Anwendungsfall sind daraus geeignete Verfahren ableitbar, wie beispielsweise eine reine sensorische Nutzung von DES oder die simultane Nutzung eines Aktors als Sensor. In Tabelle 7 sind die wesentlichen kapazitiven Verfahren für die genannten Einsatzszenarien gegenübergestellt.

Verfahren	Funktionalität/ Genauigkeit	Robustheit/ par. Effekte	Kombination/ Ansteuerung
Laden/ Entladen	×	~	×
Strom-/ Spannung	1	1	×
Oszillator	~	×	×
Filter	~	1	1
	🗸 erfüllt	\sim teilweise erfüllt	🗡 nicht erfüllt

 Tabelle 7: Gegenüberstellung der wesentlichen sensorischen kapazitiven Auswertungsverfahren von DES als Grundlage zur Evaluation der Verfahren in verschiedenen Einsatzszenarien

Die kapazitive Auswertung von DES mittels Lade- und Entladevorgängen ist aufgrund der materialbedingten parasitären resistiven Eigenschaften der Sensoren nur mit einer hohen Abweichung vom idealen Verlauf möglich. Dadurch werden mindestens zwei Messungen in einem Zyklus notwendig, welche hohe zeitliche Anforderungen und hohe Flankensteilheiten des Eingangssignals erfordern, um parasitäre Serien- und Parallelwiderstände berücksichtigen zu können. Die Berücksichtigung parasitärer Parameter ist allerdings zur korrekten Auswertung essentiell. Zur Auswertung von DES haben sich dabei Verfahren etabliert, welche algorithmusbasiert auf Messung von Strom und Spannung beruhen, zum Beispiel in [127]. Durch unterschiedliche Herangehensweisen sind Berechnungen des Sensorzustands über Kapazitätsauswertung möglich, wobei ebenfalls parasitäre Effekte berechnet, berücksichtigt und herausgerechnet werden können. Diese Verfahren sind spezifisch auf DES angepasst und bilden eine zuverlässige Messgrundlage. Standardmäßige kommerziell erhältliche Bausteine zur Kapazitätsmessung sind dagegen für ideale Kondensatoren ausgelegt.

In [P6] ist die grundsätzliche Einsetzbarkeit des LC-Schwingkreisverfahrens zur kapazitiven Auswertung vor allem intakter DES gezeigt. Durch den starken Einfluss parasitärer resistiver Effekte auf dieses Verfahren sind kommerziell erhältliche und hinsichtlich Kapazitätsmessung etablierte integrierte Schaltkreise (IC) für den allgemeinen Einsatz an DES allerdings nicht geeignet.

Bei den bisher genannten Prinzipien ist eine Integration des Auswerteverfahrens mit einer Ansteuerung im HV-Bereich äußerst komplex oder nicht realisierbar. Dagegen bietet sich eine Integration der Auswertung in die Ansteuerung über die Nutzung der Filter- und Dämpfungseigenschaften an. Bei Ausnutzung der Dämpfung von Sensorwechselsignalen haben parasitäre Eigenschaften keinen negativen Einfluss auf die Auswertung der Kapazität und können unter bestimmten Voraussetzungen gar unberücksichtigt bleiben. Auf diese Zusammenhänge sowie Erweiterungsmöglichkeiten wird im Folgenden näher eingegangen.

5.1.1 Vorgehensweise zur Charakterisierung unter zyklischer Belastung

Material- und herstellungsbedingt weisen DES aufgrund der geringen Fläche nur geringe Grundkapazitäten auf. Häufig sind die Kapazitäten der Sensoren bereits durch mechanische Aneinanderreihung und gleichzeitiger elektrischer Parallelschaltung von zwei DE-Lagen verdoppelt, siehe Bild 44. Durch Hinzufügen mehrerer Lagen ist eine weitere Erhöhung der Kapazität möglich.

In Bild 44 sind neben der Kapazitätserhöhung zusätzliche parasitäre Effekte dargestellt, welche einerseits durch ein nicht-ideales Dielektrikum und andererseits durch Kontaktwiderstände zwischen Elektrode und elektrischer Zuleitung sowie nicht-idealer Elektroden entstehen. Dabei stellt $R_{\rm K}$ den Kontakt- oder Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Zuleitung und n die Anzahl der gestapelten DE-Einheiten dar. $R_{\rm ps,ges}$ bezeichnet den pa-



Bild 44: Vereinfachte Darstellung eines Sensors mit *n* gestapelten DE-Einheiten durch ein Ersatzschaltbild unter der Berücksichtigung parasitärer Widerstände (seriell R_{ps} , parallel R_{pp} , Kontakt-/ Übergangswiderstand R_{K})

rasitären seriellen Gesamtwiderstand, $R_{pp,ges}$ den parasitären parallelen Gesamtwiderstand und $C_{DE,ges}$ die Gesamtkapazität.

Die charakterisierenden Parameter werden zu

$$R_{\rm ps,ges} = \frac{1}{n} \left(2R_{\rm ps} + 2R_{\rm K} \right)$$

$$R_{\rm pp,ges} = \frac{1}{n} R_{\rm pp}$$

$$C_{\rm DE,ges} = nC_{\rm DE}$$
(5.1)

zusammengefasst.

Wesentliche charakteristische Merkmale von DES

Als Basis für die anschließende Auslegung einer anpassbaren Auswertungshardware werden wesentliche Merkmale kommerziell erhältlicher DES charakterisiert. Bei Betrachtung des verformungs- und frequenzabhängigen Verlaufs der Kapazität und des seriellen parasitären Widerstands in Abhängigkeit der Sensorqualität, weisen intakte Sensoren im Rahmen der Charakterisierung hinsichtlich Fließverhalten, Zyklusverhalten sowie Linearitätsund Hystereseverhalten keine auffälligen Abweichungen auf, siehe $C_{DE,1}$ in Bild 45. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die maximale Beanspruchungsgrenze auf 80 % Längendehnung festgelegt ist. Das erkennbare frequenzabhängige Verhalten durch die Verformung lässt auf eine verformungsabhängige Verringerung des (parasitären) Parallelwiderstands schließen.

Dagegen fällt insbesondere bei defekten Sensoren ein stark frequenzabhängiges Verhalten auf, welches durch Abnahme der Kapazität und des seriellen parasitären Widerstands deutlich wird, siehe $C_{\rm DE,2}$ in Bild 45. Dies ist auf unsachgemäße Beanspruchung und Überdehnung, Ablösen der Verbindungsstellen zwischen elastischer Elektrode und rigider Zuleitung, Materialermüdung durch extreme Temperatureinwirkung etc. zurückzuführen. Durch das deutlich ausgeprägtere frequenzabhängige Verhalten auch bereits im Grundzustand kann eine deutliche Unterschätzung der zustandsabhängigen Kapazität hervorgerufen werden. Dies kann allerdings durch Verwendung niedriger Messfrequenzen vermieden werden.



Bild 45: Charakteristische Eigenschaften typischer DES (*C*_{DE,1} intakt, *C*_{DE,2} defekt) hinsichtlich Zuverlässigkeit und Verwendbarkeit; der frequenzabhängige Verlauf der Kapazität und des seriellen parasitären Widerstands verdeutlicht die jeweilige Sensorqualität.

Aufgrund unterschiedlicher Herstellungsverfahren und möglicher Materialien für DES resultieren unterschiedliche charakteristische Eigenschaften für den jeweiligen Sensor. Eine individuell angepasste Herstellung von DES ist mit verschiedenen Verfahren zwar möglich, allerdings fehlen anschließende Methodiken zur Charakterisierung, Validierung und Verifizierung der Funktionalität der Sensoren sowie eine Vergleichsbasis dieser untereinander. Mit ihrer Struktur und Funktionsweise werden DE bisher nicht in existierenden Normen abgebildet, beziehungsweise ist keine Standardnorm zur Charakterisierung von DE bekannt. Lediglich in [25] wird von der wissenschaftlichen Gemeinschaft ein erster Versuch unternommen, einen Standard hinsichtlich Definitionen und Prüfverfahren zu definieren. Dabei werden im Bereich der sensorischen Verwendung folgende charakterisierende Aspekte von DE aufgezählt und verallgemeinert beschrieben, welche für eine gute Sensorperformanz berücksichtigt werden sollten:

- Drift
- Empfindlichkeit
- Bandbreite
- Rauschen
- Linearität und Hysterese

Die Untersuchung des Funktions- und Leistungsverhaltens der Sensoren ist dabei auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen [25]. Um allerdings einen Vergleich von Sensoren, beispielsweise mit variierender Größe oder basierend auf unterschiedlichen Herstellungsverfahren des jeweiligen Herstellers, nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ durchführen zu können, ist ein reproduzierbares Verfahren zur Charakterisierung von DES notwendig.

Im Folgenden wird eine Vorgehensweise zur Charakterisierung vorgestellt, anhand dieser mittels systematischer Tests während der Entwicklung von Materialien und Sensorherstellungsprozessen eine Reduzierung der Funktionalität durch Materialermüdungserscheinungen und -alterung ausgeschlossen werden. Des Weiteren kann die Wiederholgenauigkeit und Beständigkeit des Sensors im Dauerbetrieb verifiziert werden können. Ebenfalls wird eine Vorhersage des Verhaltens eines Sensors als Antwort auf externe Deformationen sowie eine Vorhersage der notwendigen Kraft für definierte Dehnungszustände möglich, wodurch der elastische Dehnungssensor auch als Kraftsensor verwendet werden kann.

Um einen bewährten und sinnvollen Ablauf zur Charakterisierung zu gewährleisten, werden existierende, standardisierte Prüfverfahren herangezogen. Bekannte Standards behandeln allerdings vornehmlich die Prüfung weicher Materialien mit werkstoffwissenschaftlichem Fokus auf das Material als solches. Funktionelle Materialien beziehungsweise Materialkombinationen werden nicht abgedeckt.

Vorgehensweise zur Verbundmaterialcharakterisierung

Allgemeine Rahmenbedingungen und Toleranzen zum Ablauf der Charakterisierung können aus unterschiedlichen Normen abgeleitet werden. Die Rahmenbedingungen sind allerdings in ihren Parametern an DE anzupassen. Eine Übersicht herangezogener Normen zur Prüfung von weichen Materialien ist in Tabelle 8 dargestellt. Hier wird gleichzeitig die Adaption der Prüfkriterien zur Charakterisierung von DES durchgeführt.

Nr. und Art der Prüfung	Prüfkriterien	Bedingungen	angelehnt an Norm/ Quelle
-	Prüflingsvorbereitung, Zeiträume zwischen Her- stellung/ Prüfung	allg. Prüf- bedingungen	ISO 23529:2016-11 [163]
-	Standardklima physikali- scher Prüfversuche	$23 \degree C \pm 1 \degree C$ $50 \% \pm 5 \%$ rel. Luftfeuchte	DIN EN ISO 291:2008-08 [164]
allgemeine/ zyklische Zugversuche	Verfahrgeschwindigkeit für Dehnungen unterhalb Versagensgrenze	max. 180 % Dehnung $50 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \pm 5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	ISO 5893:2002-07 ISO 527-1:2012-02 [165, 166]
1) Impedanz- messung	elektrische (parasitäre) Eigenschaften	-	[25]
2) dauerhafter statischer Zug- versuch	Fließverhalten thermo- plastischer Materialien, Driftverhalten, Rauschen	$24 \mathrm{h}$ 150 % Dehnung	DIN EN ISO 899-1:2018-03 [167]
3) dauerhafter zyklischer Zugversuch	Linearität, Hysterese, Empfindlichkeit	200 × 100 bis 150 % Dehnung	DIN 53535:1982-03 [168]
4) zyklischer Zugversuch	Funktionstest (Linearität, Hysterese, Empfindlich- keit)	10×100 bis 150 % Dehnung	DIN 53535:1982-03 [168]
5) thermische Auslagerung	künstliche Material- alterung, Lebenszeit	3×24 h 120 °C 50 % rel. Luftfeuchte	ISO 188:2011-10 DIN 53508:2000-03 ISO 6914:2013-12 [169–171]

Tabelle 8: Übersicht wesentlicher Prüfnormen zur Übertragbarkeit der Abläufe und Parameter auf Vorgehensweisen zur Charakterisierung von DE

Allgemeine Prüfbedingungen wie beispielsweise Prüflingsvorbereitung oder die Zeiträume zwischen Herstellung und Prüfung sind je nach Applikation zu definieren und die Reproduzierbarkeit durch das definierte Standardklima zu beachten. Ideal ist dabei eine separate, von der Applikation unabhängige Prüfung des DES. Parallel zu den durchzuführenden Prüfungen sollte die Untersuchung des Impedanzspektrums zur Registrierung von Änderungen der elektrischen Eigenschaften, insbesondere parasitäre Eigenschaften, zyklisch wiederholt werden. Vor allem für eine fehlerfreie und zuverlässige dauerhafte Anwendbarkeit der Sensoren und zur korrekten Auslegung der Auswertungshardware spielt dieser Aspekt eine wichtige Rolle. Zusätzlich geben statische und zyklische Zugversuche Aufschluss über Funktionalität, Linearität, Empfindlichkeit, Genauigkeit und Rauschen. Diese Eigenschaften werden zu Beginn der Charakterisierung und während der thermischen Auslagerung geprüft. Mittels dieser kann die Materialalterung von DES simuliert werden, welche ebenfalls negativen Einfluss auf parasitäre Eigenschaften haben können.

Die berücksichtigten Prüfkriterien ermöglichen somit eine umfassende Charakterisierung des untersuchten deformationsabhängigen kapazitiven Sensors. Dabei werden wesentliche Aspekte untersucht:

- nutzbare und parasitäre Eigenschaften über den gesamten Charakterisierungsprozess durch Impedanzmessung
- sensorische Genauigkeit durch dauerhaften statischen Zugversuch
- Wiederholgenauigkeit durch zyklische Zugversuche
- sensorische Eigenschaften über die Lebenszeit hinweg durch thermische Auslagerung
- Linearität zwischen Deformation und Kapazität über die Lebenszeit hinweg durch zyklisch wiederholte Funktionstests

1) Impedanzmess	ung			— …	T	 <u> </u>	
2) dauerhafter stat. Zugversuch						 	
3) dauerhafter zyl	d. Zugversuch					 	
	4) zykl. Zugversuch				1[
kunsti. Alterung	5) therm. Auslagerung						
		Prüfa	bfolge				

Bild 46: Vorgehensweise zur Charakterisierung von DES hinsichtlich reproduzierbarer Messergebnisse über die Lebensdauer hinweg In Bild 46 ist das Konzept für den Ablauf der Charakterisierung von DES basierend auf geeigneten Normen zusammengefasst. Dabei werden die in Tabelle 8 genannten Normen spezifisch herangezogen, deren entscheidende Parameter an die Verwendung von DES angepasst sind. Die Reihenfolge der Prüfungsschritte mit ansteigender Dauer lässt eine Bewertung der charakteristischen Eigenschaften über die Lebensdauer hinweg zu.

5.1.2 Ansätze zur Messung elastischer Kapazitäten

Die in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Unterteilung wird im Folgenden aufgegriffen und der hier ausgewählte Ansatz hinsichtlich der prinzipiellen Eignung zur Zustandsauswertung von DES evaluiert. Dabei werden die Berechnungen mit der Simulationssoftware *LTspice* für digitale, analoge sowie kombinierte elektrische Schaltungen basierend auf dem *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* (SPICE) durchgeführt. Als Referenzsystem für den verfolgten Lösungsansatz dient ein Verfahren zur Kapazitätsbestimmung über Strom- und Spannungsmessung.

Kapazitätsbestimmung mittels Referenzauswerteschaltung auf Basis von Strom- und Spannungsmessung

Aufgrund der materialbedingten, resistiven Effekte sind zur Bestimmung des Sensorzustands Verfahren notwendig, welche unabhängig von parasitären Widerständen den aktuellen Kapazitätswert ermitteln können beziehungsweise diese Effekte in der Kapazitätsbestimmung berücksichtigen. Ein solches Verfahren bietet die kommerziell erhältliche Auswerteschaltung der Firma LEAP technology ApS [162], welche im weiteren Verlauf als Referenz genutzt wird. Dabei wird ein periodisches Lade- und Entladestromsignal verwendet, welches bei einem idealen Kondensator zu einem linearen Anstieg der Kondensatorspannung führt. Mittels Analyse der Spannungsminima und -maxima kann die Kapazität berechnet werden. Für den Fall eines parasitären Serienwiderstands R_{ps} , welcher durch nicht-ideale Elektroden resultieren kann, gibt es bei jeder Umpolung des Stromsignals einen Sprung in der Spannung, dessen Amplitude von der Größe des Serienwiderstands abhängt. [127] Eine Bestimmung des parasitären Parallelwiderstands ist bei vorliegender Auswertungshard- und -software nicht vorgesehen.

Für die folgenden Untersuchungen unterschiedlicher Verfahren dienen DES im intakten Zustand. Um ausschließen zu können, dass defekte DES eine richtige Evaluierung der Auswertungskonzepte verhindern, werden in weiteren Voruntersuchungen die Effekte einer unsachgemäßen Verwendung wie Dehnungen über der maximalen Belastungsgrenze aufgezeigt, siehe Bild 47. Dabei sind vor allem hinsichtlich der Kapazitätsänderung sowie der parasitären Widerstandsänderung stark nicht-lineare Verhaltensweisen mit Hysterese-Effekten zu erkennen, siehe Bild 47a). Des Weiteren werden bei dynamischer Belastung defekter DES Messabweichungen durch einen ausgeprägten Materialfluss deutlich, siehe Bild 47b). Diese Effekte sind einerseits auf erhöhte parasitäre Eigenschaften durch Materialveränderung und andererseits auf nicht reversible Defekte zwischen leitenden und nichtleitenden Lagen zurückzuführen. Dagegen sind intakte DES durch maximale relative Abweichungen von 5 % von der Linearität beispielsweise durch Hysterese-Effekte oder Drift gekennzeichnet.



a) Wiederholgenauigkeit (Mittelwert mit Angabe der doppelten Standardabweichung) und Hysterese der Kapazitäts- und parasitären Widerstandsmessung bis 80 % der maximalen Dehnung

b) Dynamischer Vergleich mit wechselnden Dehnungszuständen in Bezug auf die maximal erreichbare Kapazität bei 80 % der maximalen Dehnung

Bild 47: Vergleich des kapazitiven und parasitären Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Dehnung und der Sensorqualität durch Messung mittels strom- und spannungsabhängigen Auswertungsverfahren aus [162]

Kapazitätsbestimmung über Filter- und Dämpfungseigenschaften

Basierend auf dem Aufbau in Bild 17 können DES ebenfalls auf Basis der Filter- und Dämpfungseigenschaften von DES ausgewertet werden. Dabei wird die kapazitätsabhängige Grenzfrequenzverschiebung

$$\Delta f_{\rm g} = \frac{1}{2\pi R \Delta C} \tag{5.2}$$

des Filters genutzt, wodurch das System im Gegensatz zur genutzten Konfiguration in Bild 16a) im Frequenzbereich betrieben wird, das heißt anstelle eines Gleichspannungssignal wird ein Wechselsignal angelegt. Je nach Konfiguration von Widerstand und Sensor wird entweder ein Tief- oder Hochpassfilter realisiert, durch welchen Signale entsprechend in Abhängigkeit der Filterordnung und Grenzfrequenz gedämpft werden. Für den Wert der Grenzfrequenz ist es dabei unerheblich, um welche Art von Filter es sich handelt, da hier lediglich die Reihenfolge der Bauelemente getauscht wird.

Mit der entsprechenden Übertragungsfunktion eines Tiefpassfilters sowie mit Gleichung (5.2) ist die Kapazität für einen DES über

$$C = \frac{1}{2\pi fR} \cdot \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{U_a}{U_e}\right)^2}{\left(\frac{U_a}{U_e}\right)^2}} = \frac{1}{2\pi fR} \cdot \sqrt{\frac{1 - D^2}{D^2}}$$
(5.3)

in Abhängigkeit des durch den Filter gedämpften Signals $D = \frac{U_a}{U_e}$ zu berechnen, welche über das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung definiert ist.

Neben der Dämpfung der Amplitude verschiebt sich bei einem idealen Tiefpassfilter 1. Ordnung an der Grenzfrequenz f_g auch die Phase φ des angelegten Signals um -45° und schließlich um -90° bei $f >> f_g$. Eine Phase $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$ bei höheren Frequenzen zeigt dabei die Existenz eines parasitären seriellen Widerstands (zum Beispiel Elektrodenwiderstand) auf, wohingegen ein parasitärer Parallelwiderstand durch zusätzliche Dämpfung der Amplitude unterhalb der Grenzfrequenz aufgezeigt werden kann. Zur Veranschaulichung dieser Zusammenhänge dient Bild 48. Für einen Hochpass gelten analoge Bedingungen im umgedrehten Fall. Unter Verwendung einer konstanten Sensoreingangssignalfrequenz $f_S > f_g$ kann die Änderung der Sensorkapazität daher über die Dämpfung des Sinussignals aufgrund der Grenzfrequenzverschiebung bestimmt werden. Zu erkennen ist, dass in definierten Frequenzbändern in Abhängigkeit der Material- und Struktureigenschaften die Signaldämpfung unabhängig von jeglichen parasitären Einflüssen ist. Dadurch ist die Annahme der idealen Bedingungen in Gleichung (5.3) gültig.

In Bild 49 ist die Methode zur Auswertung der Zustandsänderung eines DES mittels resultierender amplitudendämpfender Filtereigenschaften einer variablen Sensorkapazität schaltungstechnisch dargestellt. Dabei wird die Frequenz des Sinussignalgenerators mit bekannter Amplitude definiert und gegebenenfalls verstärkt. Die Spitzenwertdetektion erfolgt nach einem Spannungsfolger zur Minimierung der Einflüsse der Messschaltung auf das Sinuseingangssignal. Dies ermöglicht zusätzlich eine dynamische Erkennung einer folgend niedrigeren Kapazität durch Verringerung der Sensordehnung.



Bild 48: Einfluss möglicher parasitärer Widerstände auf die Filtereigenschaften und den Verlauf von Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung von DES



Bild 49: Reduzierte Darstellung der Methodenumsetzung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Dämpfungseigenschaften einer Tiefpasskonfiguration

Das Konzept ermöglicht eine einfache Adaption der Sensorfrequenzen zur Kapazitätsmessung basierend auf Amplitudendämpfung eines kapazitiven Dehnungssensors, siehe Bild 50.

5 Dielektrische Elastomere als deformationsabhängige Kapazitätssensoren



Kapazität von der Signalfrequenz



Bild 50: Kapazitätsmessung von DES auf Basis frequenzabhängiger Filtereigenschaften bezüglich Signalamplitudendämpfung

In Bild 50a) ist hierfür die Abhängigkeit der Signaldämpfung von der Signalfrequenz mit den dazugehörigen mittels Gleichung (5.3) berechneten Kapazitätswerten dargestellt. Erkennbar ist eine Erhöhung der Dämpfung durch die Tiefpasskonfiguration sowie die resultierende nahezu konstante Kapazität, welche die frequenzunabhängige Kapazitätsbestimmung für $f_{\rm S} > f_{\rm g}$ veranschaulicht. Daneben zeigt Bild 50b) den dämpfungs- und frequenzabhängigen Verlauf der Kapazität nach Gleichung (5.3). Neben dem idealen, durch die kalkulierten Dämpfungswerte der Referenzkapazität definiertem Verlauf sind die Kapazitätswerte des DES mit unterschiedlichen Dehnungszuständen aus Bild 51 dargestellt.



a) Dehnungsabhängige Kapazitätsänderung bei b) Mittlere relative Abweichung vom Referenzververschiedenen Sensorfrequenzen

lauf bezüglich Linearität und Gradienten

Bild 51: Abbildung des linearen Verhaltens von DES mittels Kapazitätsmessung auf Basis von signaldämpfenden Filtereigenschaften im Vergleich zum Referenzsystem sowie deren Abweichungen von der Linearität

Bild 51a) zeigt zum einen das lineare Verhalten der Kapazität eines DES in Abhängigkeit der Dehnung gemessen mit dem Referenzsystem und zum anderen die Messung mit dem vorgestellten Ansatz basierend auf Amplitudendämpfung. Es ist zu erkennen, dass die Linearität mittels Filtereigenschaften unabhängig von der Sensorfrequenz $f_{\rm S} > f_{\rm g}$ abgebildet wird.

In Bild 51b) sind die mittleren relativen Abweichungen des vorgestellten Ansatzes von der Linearität beziehungsweise des Gradienten des Referenzverlaufs abgebildet. Hierfür werden als Bezugspunkte der ursprüngliche sowie auf 60 % gedehnte Zustand verwendet. Dabei ist bereits eine Abweichung der Linearität des Referenzsystems zu beobachten. Dies ist auf Ungenauigkeiten der DES zurückzuführen. Da die jeweiligen frequenzabhängigen Kurven von Referenz und Messung in Bild 50b) übereinander liegen, sind die Differenzen der gemessenen Kapazitätswerte von den Referenzwerten durch Messungenauigkeiten und -abweichungen des Verhältnisses von Ausgangs- zu Eingangsspannung sowie Ungenauigkeiten in den numerischen Berechnungen mit Gleichung (5.3) begründet.

Sind zusätzlich Sensorsignalfrequenzen nahe an der Grenzfrequenz oder gar $f_{\rm S} < f_{\rm g}$ zu verwenden, ist die Betrachtung der Grenzfrequenzverschiebung über die Phasenänderung geeignet. Die Kapazität wird mittels

$$C = \frac{\tan\left(\Delta\varphi\right)}{2\pi f_{\rm S}R} \tag{5.4}$$

mit der Phasenverschiebung $\Delta \varphi$ bezüglich der Eingangssignalfrequenz bestimmt. Dabei ist die Phasenverschiebung über die zeitliche Differenz $\Delta t = t_{\rm M} - t_0$ zwischen den Nulldurchgängen der Wechselsignale durch

$$\Delta \varphi = 2\pi f_{\rm S} \Delta t \tag{5.5}$$

definiert. Dabei bezeichnen t_0 den Referenzzeitpunkt des Phasennulldurchgangs des Sensoreingangssignals und t_M den Zeitpunkt des Phasennulldurchgangs des phasenverschobenen Signals. Eine schematische Darstellung der Methodik ist vereinfacht in Bild 52 dargestellt.

Die benötigte Zeitmessung ist über einen Exklusiv-Oder-Baustein möglich, welcher mittels Referenzwertvergleich die zeitliche Verschiebung der Signalnulldurchgänge als digitalen Wert ausgibt, siehe Bild 53. Die zeitliche Länge des An-Zustands wird zur Auswertung herangezogen.

Bild 54a) zeigt eine Simulation des unterschiedlichen Phasenverlauf des dehnungsabhängigen kapazitiven Sensors in den verschiedenen Dehnungszu-



Bild 52: Vereinfachte schematische Darstellung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Phasenverschiebung aufgrund einer Tiefpassfilterkonfiguration.



Bild 53: Reduzierte Darstellung der Methodenumsetzung zur Auswertung von DES mittels Nutzung der Phasenverschiebung von Wechselsignalen in einer Tiefpasskonfiguration

ständen. Dabei sind neben den idealen Verläufen ebenfalls die Phasenverläufe resultierend aus der Einbeziehung parasitärer Eigenschaften angedeutet. Bei Auswertung der Phasenverschiebung eines DES, welcher wie im letzteren Fall parasitäre Widerstände vorweist, ist daher eine Unterschätzung der Kapazität zu erwarten. Die resultierende Phasenverschiebung wird über Zeitmessung der Signalnulldurchgänge bei konstanter Sensorfrequenz erfasst. Daneben zeigt Bild 54b) den von der Phasenverschiebung abhängigen tatsächlichen Verlauf der Kapazität eines DES nach Gleichung (5.4). Neben dem idealen Verlauf, welcher durch berechnete Phasenverschiebungen anhand der Referenzkapazitätswerte definiert wird, sind die mit der Umsetzung des vorgestellten Ansatzes resultierenden Kapazitätswerte des DES mit unterschiedlichen Dehnungszuständen aus Bild 55 dargestellt.

Aufgrund der punktsymmetrischen Phasenverschiebung um die Grenzfrequenz resultierenden Tiefpasses erhöhen Sensorfrequenzen vor allem nahe an der Grenzfrequenz der Tiefpasskonfiguration des jeweiligen Zustands



a) Dehnungs- und frequenzabhängige Phasenverschiebung

b) Kapazitätsbestimmung mittels Phasenverschiebung bei verschiedenen Sensorfrequenzen



die Genauigkeit der Auswertung. Dies wird durch die jeweiligen Schnittpunkte der Verläufe mit dem Referenzkapazitätsverlauf hervorgehoben, siehe Bild 55a). Dennoch wird eine im Vergleich zur Amplitudendämpfung stärkere Frequenzabhängigkeit der Kapazitätsberechnung nach Gleichung (5.4) sowie höhere Abweichung von der Linearität der Referenzgeraden ersichtlich, siehe Bilder 55a) und 55b). Es zeigt sich dabei eine deutliche Zunahme der mittleren relativen Abweichung von der Linearität beziehungsweise vom Referenzgradienten bei $f_{\rm S} > f_{\rm g}$. Abweichungen bei diesen Sensorsignalfrequenzen sind dabei neben numerischen Ungenauigkeiten ebenfalls auf Un-



a) Dehnungsabhängige Kapazität bei verschiedenen Sensorfrequenzen

b) Mittlere relative Abweichung vom Referenzverlauf bezüglich Linearität und Gradienten

Bild 55: Abbildung des linearen Verhaltens von DES mittels Kapazitätsmessung auf Basis von Signalphasen verschiebenden Filtereigenschaften im Vergleich zum Referenzsystem sowie deren Abweichungen von der Linearität genauigkeiten und Abweichungen hinsichtlich der zu messenden Zeitdifferenzen sowie stärker ins Gewicht fallende parasitäre Eigenschaften der DES zurückzuführen.

Ein parasitärer Parallelwiderstand wie beispielsweise in Bild 48b) kann mit dieser Messmethode nicht berücksichtigt werden. Dies ist bei der alleinigen Bestimmung der relativen Kapazitätsänderung allerdings nicht von Bedeutung. Eine Charakterisierung der parasitären Eigenschaften ist dagegen auf Basis der beschriebenen Zusammenhänge aus Bild 44, dem Verhalten der frequenzabhängigen Impedanz einer Kapazität sowie Bild 48 möglich. Die parasitären Widerstände sind dabei über die Amplitudendämpfung mit

$$R_{\rm ps} =$$

$$R_{\rm pp} =$$

$$\begin{array}{c} D \\ 1 - D \\ \end{array} \cdot R \qquad \text{bei} \begin{cases} f >> f_{\rm g} \\ f << f_{\rm g} \end{cases}$$

$$(5.6)$$

zu bestimmen.

5.2 Einsatz dielektrischer Elastomersensoren als Längenund Winkeländerungssensoren

Vorangegangene Ergebnisse der Untersuchungen zur Erfassung des Zustands von DES bieten die Basis für Methoden der Messwertinterpretation sowie folgend ein breites Anwendungsspektrum. Dabei sind vor allem durch die potenziell sehr leichten Aufbauten und die Elastizität von DES tragbare und flexible sensorische Systeme denkbar.

Aufgrund ihrer Eigenschaften sind DES insbesondere als Verformungssensoren geeignet, welche im Gegensatz zu herkömmlichen Dehnungsmessstreifen deutlich höheren Dehnungen und Verformungen standhalten und registrieren können. Durch die Elastizität des Materials sowie durch herstellungsbedingte Ungenauigkeiten und Abweichungen unterschiedlicher Chargen können sich die Kapazitätsänderungsverläufe der Sensoren unterscheiden. Daher ist zunächst eine Abbildung der verformungsabhängigen Kapazität auf die jeweilige Längenänderung der einzelnen Sensoren notwendig. Mittels dieser auf unterschiedliche Sensorstrukturen übertragbaren Modellierung werden DES außerdem nicht nur als Längenänderungssensoren sondern auch als Winkelsensoren einsetzbar, wie beispielsweise für ein beliebig erweiterbares Gestensteuerungssystem auf Basis von DES.

5.2.1 Modellierung elastischer Drehwinkelsensoren in Bezug auf deformationsabhängige Kapazität

Um DES als elastische Deformationssensoren beispielsweise als Längenoder Drehwinkelsensoren auf Oberflächen einsetzen zu können, sind entsprechende Zusammenhänge zwischen Längenänderung, Kapazität und Winkel zu bestimmen. Bei Drehwinkelsensoren sind die genannten Parameter durch die jeweilige Gelenkposition sowie deren Änderungen definiert, welche vom jeweiligen Sensor zu registrieren sind. Die in Bild 43 bereits gezeigte Linearität zwischen der Dehnung des Sensors und der Kapazität führt mit der Annahme der Inkompressibilität mit Bezug auf eine eindimensionale Längenänderung des Sensors zu

$$C(\sigma) = C_0 \left(1 + \sigma \cdot \zeta\right) \,. \tag{5.7}$$

Dabei wird ein Kalibrierungsfaktor ζ eingeführt, welcher aufgrund von Materialeigenschaften und Aufbau für Sensoren einer Charge zu bestimmen ist. Für unterschiedliche Chargen und Längenbereiche werden daher unterschiedliche Kalibrierungsfaktoren ermittelt. In Bild 56 sind neben dem idealen Dehnungs-Kapazitätsverlauf der Sensoren ebenfalls der gemessene Verlauf sowie der mit Gleichung (5.7) adaptierte Verlauf abgebildet.



Bild 56: Vergleich von idealem, gemessenem und mit dem Kalibrierungsfaktor ζ adaptierten Verlauf dehnungsabhängiger Kapazitäten verschiedener DES

Dabei sind beispielhaft experimentell ermittelte Werte für kommerziell erhältliche Sensoren in Tabelle 9 aufgelistet. Die Unterschiede der eingeteilten Sensorgruppen sind auf Abweichungen und Ungenauigkeiten in Fertigungsprozessen zurückzuführen. Vor allem verschiedene Chargen und Sensorlängen sind betroffen, wie an den Beispielen der Sensoren aus Charge 1 und dem Sensor aus Charge 2 sowie den unterschiedlichen Sensorlängen (k für kurz, l für lang) erkennbar ist.

Charge	l_0 in cm	Faktor ζ	Abweichung in %	Referenzpunkt Dehnung in %
ı-k	3, 5, 7	0,7120	$1{,}34\%$	
ı-l	15	$0,\!8319$	1,02%	
2	3	0,5399	0,99%	60 %
Ø			$1,\!12\%$	

Tabelle 9: Experimentell ermittelte Werte des Kalibrierungsfaktors ζ zur linearen Approximation an den idealen Kapazitätsverlauf von DES

Die Approximation des an den theoretischen Verlauf adaptierten linearen Zusammenhangs zwischen Dehnung und der tatsächlich resultierenden Kapazität ist als mathematischer Zusammenhang zwischen der absoluten Kapazität und der absoluten Länge des Sensors darstellbar. Der Faktor ζ ist mittels Referenzpunkt zu bestimmen, welcher durch einen ausgewählten Dehnungszustand definiert ist. Die in Bild 56 und Tabelle 9 resultierende relative Genauigkeit vom rechnerisch, approximierten zum gemessenen Verlauf beträgt > 98%. Für diese Genauigkeit kann der Zusammenhang $C_{\text{DES}} \propto l_{\text{DES}}$ als gültig angenommen werden.

Eindimensionale Winkelmessung

Indem ein Längen-(änderungs-)sensor an einem Gelenk angebracht wird, können über Längenänderungen auch Winkeländerungen erfasst werden. Wird ein elastischer Deformationssensor direkt am zu vermessenden Gelenk angebracht, sind drei Varianten zu betrachten:

- Der Sensor ist ohne Vorspannung über die Außenseite des Gelenks geführt und an zwei Punkten befestigt, siehe Bild 57a).
- Der Sensor ist *mit Vorspannung* über die Innenseite des Gelenks geführt, siehe Bild 57b), und
 - an zwei Punkten befestigt oder
 - stets eng an der Kinematik anliegend.
- Der Sensor ist längs einer Drehachse an einem Referenzpunkt und einem relativ dazu beweglichen Punkt befestigt, siehe Bild 57c).

5.2 Einsatz dielektrischer Elastomersensoren als Längen- und Winkeländerungssensoren



a) DES ohne Vorspannung zur Mes- b) DES mit Vorspannung zur Mes- c) DES mit Vorspannung sung des Innenwinkels

sung des Innen- und Außenwinkels

zur Messung der Rotation um eine Längsachse

Bild 57: Zusammenhang zwischen Gelenkwinkeln und Längenänderung eines DES in Abhängigkeit der mechanischen Vorspannung des elastischen Sensors

Der in Bild 57a) dargestellte erste Fall berücksichtigt den gegenüberliegenden Winkel im Bereich zwischen 0 - β_{max} und stellt mit dem Zusammenhang

$$\beta = 180^{\circ} \cdot \left(1 + \frac{l_{\text{DES}} - l_0}{r\pi}\right) \tag{5.8}$$

zwischen Innenwinkel β des Gelenks und der Dehnung die einfachste Variante dar. l_0 bezeichnet hierbei die Länge des Sensors im ungedehnten Zustand, l_{DES} die aktuelle Länge des Sensors und r den Radius des Gelenks. β_{max} ist dabei der maximale Gelenkwinkel, der mit dem Sensor oder der Kinematik mechanisch erreicht werden kann.

Für die in Bild 57b) dargestellte zweite Variante kann im ersten Fall der Winkel durch Skalierung des Drehwinkels β' direkt um den Gelenkdrehpunkt angegeben werden. $l_{\rm V}$ bezeichnet dabei die Länge des initial vorgedehnten DES. Folglich ist der minimal messbare Winkel durch den Zustand des Sensors bestimmt, in dem keine Vorspannung des Sensors mehr existiert und sich die Kapazität durch weitere Entlastung nicht mehr ändert.

Für den Drehwinkel resultiert durch diese Betrachtung folgende Fallunterscheidung:

für den minimal messbaren Winkel β_{\min} :

$$\beta_{\min}' = \arccos\left(\frac{2r^2 - l_1^2 + l_2^2 - l_0^2}{2\sqrt{r^2 + l_1^2}\sqrt{r^2 + l_2^2}}\right) \stackrel{\wedge}{=} \beta_{\min}$$
(5.9)

$$f \ddot{u}r \beta_{\min} < \beta < 180^{\circ}:$$

$$\beta' = \arccos\left(\frac{2r^2 + l_1^2 + l_2^2 - l_{\text{DES}}^2}{2\sqrt{r^2 + l_1^2}\sqrt{r^2 + l_2^2}}\right)$$

$$(5.10)$$

für $\beta = 180^\circ$:

$$\beta_{\max}' = \arccos\left(\frac{r^2 - l_1 l_2}{\sqrt{r^2 + l_1^2}\sqrt{r^2 + l_2^2}}\right) \stackrel{\wedge}{=} \beta = 180^{\circ}$$
(5.11)

 $\ \ \, \blacksquare \ \, {\rm für}\ \beta>180^\circ {:}$

$$\beta = 180^{\circ} \cdot \left(1 + \frac{l_{\text{DES}} - l_{\text{V}}}{r\pi}\right)$$
(5.12)

Verläuft der Sensor eng am Gelenk, das heißt der Sensor ist zwischen l_1 und l_2 im Knickwinkel ebenfalls fixiert, vereinfacht sich die Fallunterscheidung:

u für den minimal messbaren Winkel β_{\min} :

$$\beta_{\min} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{2r}{l_{\rm V} - l_0}\right) \tag{5.13}$$

■ für
$$\beta_{\min} < \beta < 180^{\circ}$$
:
 $\beta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{2r}{l_{\rm V} - l_{\rm DES}}\right)$
(5.14)

$$f \ddot{\mathbf{u}} \mathbf{r} \beta > 180^{\circ}:$$

$$\beta = 180^{\circ} \cdot \left(1 + \frac{l_{\text{DES}} - l_{\text{V}}}{r\pi}\right)$$

$$(5.15)$$

Mit der dritten Variante aus Bild 57c) ergibt sich für rotatorische Bewegungen um eine Längsachse der Drehwinkel durch

$$\beta = \frac{180^{\circ}}{r\pi} \cdot \left(\sqrt{l_1^2 - l_{\perp}^2} - \sqrt{l_{\rm V}^2 - l_{\perp}^2}\right) \,, \tag{5.16}$$

wobei l_{\perp} den Abstand der Drehebenen bezeichnet.

5.2.2 Körpernahes Sensorsystem zur intuitiven und beliebig erweiterbaren Gestensteuerung von Robotern

Aufgrund ihres sehr geringen Gewichts und ihrer hohen Flexibilität können DES derart am Menschen angebracht werden, dass die Sensoren nicht als störend empfunden werden. Folgend wird ein auf verschiedene Applikationen übertragbares Gestenerkennungssystem auf Basis deformationsabhängiger Sensoren umgesetzt. Eine Geste ist dabei eine definierte Bewegung der Arme und Hände, welche für den Kommunikationspartner eine meist intuitiv verständliche Information beinhaltet. Im Gegensatz dazu werden willkürliche, unbeabsichtigte Bewegungen aufgrund fehlender Information nicht als aussagekräftig und somit nicht als Kommunikationsmittel angesehen. [172–174] Die auf Gesten basierende Steuerung von Robotern basiert daher auf dem Erkennen und der Identifikation von Bewegungen, welche durch definierte Bewegungsspannen und -muster charaktierisiert sind. Die durch Gesten übertragene Information kann anschließend zur Steuerung genutzt werden, bietet aber auch die Basis für weitere Applikationen beispielsweise im Rehabilitationstraining oder im Konsumerbereich. [P5, P7]

Bei der Erkennung von Gesten ist eine Unterscheidung zwischen statischen Posen und dynamischen Gesten sinnvoll. Der Umfang von Posen und Gesten ist potenziell sehr groß, wobei eine dynamische Anpassung an die jeweilige Applikation ermöglicht werden soll. Dafür sind knotenbasierte Strukturen geeignet, um erforderliche Sensoren einfach hinzufügen und nutzen zu können. In Bild 58 ist für den Einsatz von DES zur Gestenerkennung ein solches System auf Basis des Robot Operating Systems (ROS) [175] dargestellt. Das Schema des Systems ist an die in [P5, P7] bereits veröffentlichten Darstellungen angelehnt.

Stark vereinfacht kann das System als modulbasierte Architektur beschrieben werden, in dem einzelne Softwaremodule Daten über definierbare Formate austauschen. Der gesamte Programmablauf wird über eine übergeordnete Instanz gesteuert, welcher alle Knoten bekannt sind.

Ein großer Vorteil in dieser Struktur liegt in der Hardwareabstraktion. Dabei ist ein einfacher Austausch oder die Ergänzung der hardwareseitigen Komponenten auf der einen Seite und der Applikation auf der anderen Seite möglich, ohne die grundlegende Funktionalität des Systems anpassen zu müssen. Dies ist durch die Verwendung definierter Datentypen der einzelnen auszutauschenden Softwaremodule gewährleistet.

Die verwendete Hardware wird über Hardware-Software-Schnittstellen implementiert, welche als Knoten im Softwareframework ROS mit entspre-



Bild 58: Schematische Darstellung einer knotenbasierten Architektur samt Hardwaresetup basierend auf dem Softwareframework ROS und MATLAB zur Kommunikation und Verarbeitung von Sensordaten, in Anlehnung an [P5, P7]

chendem Datenaustausch definiert werden. Dazu stellt die Hardware-Software-Schnittstelle der Auswertungshardware ebenfalls einen Softwareknoten dar. Dieser stellt die Werte bereit, welche beispielsweise über drahtlose Kommunikation übertragen werden können.

Des Weiteren werden die in MATLAB definierten Funktionen ebenfalls in einem Knoten zusammengefasst. Hier sind dabei zum einen Posen und Gesten aus Bild 59 vordefiniert. Als Basis zur Programmierung oder dem Steuern unterschiedlicher Roboter auf Basis von Gesten wird die Anordnung der Sensoren für eine Gestenerkennung nach [P7] in drei Freiheitsgraden mit vier Bewegungsmustern genutzt. Zum anderen werden in Datenverarbeitungsfunktionen, wie der Kalibrierung, der Gestenerkennung und weiteren applikationsabhängigen Funktionen, die Sensordaten verarbeitet. In Abhängigkeit der gewünschten Applikation sind auch hier zusätzliche Funktionen (zum Beispiel zur Visualisierung) oder Hardware-Software-Schnittstellen, wie beispielsweise zur Generierung entsprechender Robotersteuerungsbefehle, nur einmalig zu erstellen.


Bild 59: Anordnung dehnungsabhängiger Sensoren für eine Gestenerkennung in drei Freiheitsgraden mit vier Bewegungsmustern, in Anlehnung an [P₇]

Mit Hilfe entsprechender Anordnungen von DES können bestimmte Bewegungen und Stellungen, in diesem Fall der oberen Extremität, erkannt werden. Diese verlaufen stufenlos von minimal bis maximal einnehmbarer Gelenkwinkel. Die Bestimmung des exakten Winkels ist aufgrund nicht zuverlässig repetitiver und einheitlicher Anbringung der Sensoren sowie unterschiedlicher Anatomien des Nutzers lediglich mit einem hohen Fehler möglich. Vor allem bei sich stets verändernden Tragebedingungen sind nur relativ zueinander befindliche Bewegungsmuster sinnvoll zu detektieren. Auch sind Beurteilungen des Ursprungs der Bewegung, ob diese aktiv oder passiv ausgeführt wird, in dieser Art nicht möglich. Hierzu sind weitere Sensoriken notwendig, welche beispielsweise basierend auf Muskelaktivitätserkennung, sogenannte Elektromyographie (EMG), beruhen. Ein solcher Ansatz ist beispielhaft in [P7] beschrieben.

Für die Konfiguration aus Bild 59 ist die relative Zustandsauswertung der Sensoren bei unterschiedlichen Bewegungen einzelner Gelenke und auch kombinierte Bewegungen in Bild 60a) dargestellt. Bei der manuellen Anbringung der DES kann nicht nur die Position variieren, sondern auch die Vorspannung der einzelnen Sensoren. Gerade bei Gelenken, die ausgehend von der Neutralstellung Bewegungen im negativen und positiven Winkelbereich ermöglichen (zum Beispiel Handgelenk), können somit Sensoren eingespart werden oder eine überprüfende Funktion erhalten, siehe Bild 60b).

Bild 60a) zeigt den Ablauf verschiedener Bewegungen, wie die Palmar- (1) und Dorsalflexion (2) des Handgelenks, die Unterarmdrehung (3) und Ellbogenflexion (4) sowie eine kombinierte Bewegung bestehend aus Ellbogenflexion und Palmarflexion des Handgelenks (5). Eintretende Quereinflüsse sind durch situationsabhängige Positionierung begründet. Im Vergleich dazu ist in Bild 60b) die Detektion positiver und negativer Gelenkwinkel zu erkennen, wobei der jeweils entgegen gerichtete Sensorausschlag durch Relaxation der vorgedehnten Sensoren deutlich erkennbar ist. Dabei ist die Positionierung sowie die mechanische Vordehnung der Sensoren ausschlaggebend für die genullte Ruhelage und die davon abhängigen maximal möglichen Ausschläge in den unterschiedlichen Dehnungsrichtungen.



a) Gestenerkennung mittels Sensoren ohne Vorspannung; Palmar- (1), Dorsalflexion (2) des Handgelenks, Unterarmdrehung (3), Ellbogenflexion (4), kombinierte Bewegung mit Ellbogenflexion und Palmarflexion des Handgelenks (5)

b) Registrierung positiver und negativer Gelenkwinkelstellungen mittels vorgespannter Sensoren

Bild 60: Relative Zustandsauswertung von DES in einer Gestenerkennung mit drei Freiheitsgraden (Handgelenk, Ellbogengelenk und Unterarmdrehung), in Anlehnung an [P5, P7]

5.3 Zusammenfassung und Fazit

Da die Technologie der DE beziehungsweise deren sensorischer Einsatz bisher in keiner standardisierten Norm festgehalten ist, bildet ein an standardisierte Prüfverfahren angelehntes Verfahren die Basis zur Charakterisierung der Sensoren als flexible und elastische Dehnungssensoren über ihre Lebensdauer hinweg. Dieses Verfahren kann die applikationsabhängige zukünftige Auswahl der Sensorgeometrie und Herstellungsverfahren unterstützen. In dieser Arbeit dient sie der Auswahl der Sensoren zur zuverlässigen Evaluierung der konzipierten Auswertungshardware. Erste Untersuchungen zeigen ein sehr robustes und repetitives Verhalten der Sensoren unter der Voraussetzung der strikten Einhaltung von Maximalgrenzen hinsichtlich einer möglichen Überdehnung. Über die Grenzen hinaus applizierte Längenveränderungen sowie unsachgemäßer Gebrauch führen zu unvorhersehbaren und nicht spezifizierbaren Verhalten der Kapazität als Antwort auf die Längenänderung. Gründe können hierfür Delaminierung der einzelnen leitfähigen und isolierenden Schichten, dehnungsabhängige interne Einrisse der Dielektrika oder Elektroden sowie unzuverlässige Kontaktierung zwischen starrer Leitung und elastischer Elektrode sein.

Auf Basis der Charakterisierung der Sensoren wird ein geeignetes Konzept für ein Auswerteverfahren auf Basis der Filtereigenschaften eines DES entwickelt. Im Vergleich zu einem kommerziellen Referenzsystem ergänzt und erfüllt der vorgestellte Ansatz folgende Kriterien und erweitert somit das Einsatzspektrum von sensorischer Auswertungshardware:

- Kapazitätsmessung unabhängig von parasitären Eigenschaften
- Möglichkeit der kontinuierlichen Messung
- Unabhängigkeit von Laborequipment
- Erweiterbarkeit zur simultanen Messung mehrerer Sensoren
- Ubertragbarkeit des Verfahrens auf ein sensomotorisches DE-System

Das konzipierte und umgesetzte System nutzt die Potenziale von DE für den sensorischen Einsatz und bildet die Basis für diverse Applikationen in der Robotik, der Medizintechnik oder im Konsumerbereich. Dabei können mittels der elastischen Sensoren sowohl Längen- als auch Winkeländerungen gemessen werden. Die Basis hierfür bietet eine Modellierung der deformationsund längenabhängigen Kapazität in einen linearen Zusammenhang, wobei ein eingeführter Kalibrierungsfaktor zur Genauigkeitssteigerung beiträgt. Die Übertragung des Verfahrens ist auf weitere Messgrößen, wie beispielsweise Kraft, ebenfalls möglich.

Bei einheitlicher Definition der Ausgangslänge und der Positionierung an zu vermessenden Gelenken sind Winkelbestimmungen einzelner Kinematikelemente in axialer sowie radialer Richtung mittels DES möglich. Ungenauigkeiten der Systemimplementierung der Sensoren sowie inhärente herstellungsabhängige Ungenauigkeiten erschweren allerdings einen Einsatz der Sensoren als Absolutwertsensoren. Aufgrund ihres geringen Gewichts und ihrer Flexibilität sind DES daher generell für den Einsatz in körpernahen Systemen vor allem als Relativwertsensoren geeignet, wobei beispielsweise eine direkte Integration in eng anliegender Kleidung die Genauigkeit erheblich steigern kann. Hierfür bildet das konzipierte und umgesetzte Erfassungssystem die Basis, relativ zueinander befindliche Bewegungen des Menschen mittels körpernah angebrachter Sensoren und ohne externe Sensoren zuverlässig erfassen zu können.

Weitere Applikationen von DES, wie beispielsweise als Display oder künstliche Haut aus einer Matrix zahlreicher DES zur Befähigung von Robotern zur Mensch-Roboter-Kollaboration [P14], sind ebenfalls denkbar. Die Verformung und damit die Kapazitätsänderung einer solchen Sensorhaut resultiert vornehmlich durch Druck, wodurch eine sensitive Oberfläche auf unterschiedlichen Geometrien ermöglicht wird.

6 Funktionsintegration zu einem sensomotorischen Aktorsystem

Die jeweilige separate aktorische und sensorische Betrachtung von DE bildet die Basis für die Untersuchung des kombinierten Falls zur simultanen Zustandsauswertung während des aktorischen Betriebs. Unterschiedliche Verfahren und Methoden selbstfühlender Systeme auf Basis von Widerstandsoder Kapazitätsänderungen sind bereits in Abschnitt 2.3.3 dargestellt. Im Vergleich zu Methoden auf Basis einer Widerstandsänderung weisen Methoden auf Basis einer Kapazitätsänderung aufgrund der annähernd reinen Geometrieabhängigkeit und der geringeren Komplexität ein höheres Eignungspotenzial auf. Analog zu den vorherigen Kapiteln wird im Folgenden ebenfalls die Annahme getroffen, dass die Permittivität keine Funktion der Verformung darstellt und das Dielektrikum inkompressibel ist. [141] Somit werden die Materialparameter während des sensorischen und auch aktorischen Betriebs als konstant betrachtet. Folglich ist die Verwendung eines DEA simultan zum aktorischen Betrieb als einfacher kapazitiver Sensor möglich. Die positiven Eigenschaften eines Aktors und Sensors sind dadurch in einem DE-Element vereint, sodass neben aktiven Zustandsänderungen, welche durch Aktuierung des Aktors durch eine elektrische Spannung erfolgen, ebenfalls passive Zustandsänderungen in Folge von extern wirkenden Kräften detektierbar sind.

Abschnitte der im Folgenden dargestellten Untersuchungen sind teilweise bereits in [P9, P10] publiziert oder an vom Autor angewiesene, betreute und am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik durchgeführte studentischen Arbeiten [S20–S26] angelehnt.

6.1 Simultane Auswertung während des aktorischen Betriebs auf Basis von Filtereigenschaften

Eine leistungselektronische Umsetzung des kombinierten Betriebs von DE zur Realisierung eines sensomotorischen Systems ist an bestehende Anforderungen aus Kapitel 3 gebunden. Dabei handelt es sich hervorgehoben um den Leichtbau, die universelle Einsetzbarkeit für verschiedene Aktorstrukturen sowie die unabhängige Ansteuerung und Auswertung eines Aktors. Dafür sind geeignete Verfahren der aktorischen und sensorischen Leistungselektronik zu integrieren. Die separate Betrachtung aktorischer und sensorischer Aspekte in den vorangehenden Kapiteln vereinfacht die Auswahl der für den kombinierten Betrieb geeigneten notwendigen Verfahren. Grundsätzlich ist stets eine Form einer Signalüberlagerung von Aktor- und Sensorsignal notwendig, siehe Bild 61, wobei ein gegenseitiger Einfluss durch geeignete Wahl der jeweiligen Signalform minimal zu halten ist.



Bild 61: Allgemeines Schema zur simultanen Ansteuerung und Auswertung von DE mittels Überlagerung von Aktor- und Sensorsignalen

Aus den Ergebnissen vorgehender Untersuchungen kristallisiert sich vor allem die Nutzung der Filtereigenschaften eines DE heraus. Mit diesen Eigenschaften können die von geometrischen Veränderungen abhängigen Zustandsänderungen über Sensorsignaländerungen erfasst werden. Zur Ansteuerung wird dabei ein entsprechendes DC-HV-Aktorsignal, zur Auswertung ein Wechselsignal geringerer Spannung verwendet. Trotz Überlagerung zu einem Signal bewirken die Teilsignale (Aktor- und Sensorsignal) lediglich ihren jeweiligen Einsatzzweck, wobei das DE-Element für das HV-Signal einen Aktor und simultan für das LV-Wechselsignal einen Sensor darstellt, siehe Bild 62.



Bild 62: Nutzung der Filtereigenschaften von DE zur Zustandsüberwachung des Aktors; durch Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal und den Eigenschaften eines DE-Elements wirkt dieses simultan als Aktor und Sensor.

Die Überlagerung des Ansteuerungssignals und des Sensorsignals erfolgt zunächst im LV-Bereich. Wie in Bild 63 zur Funktionsintegration dargestellt, wird das Aktor- und Sensorsignal jeweils über eine Hardware-Software-Schnittstelle bereitgestellt, welche applikationsabhängig zentral oder dezentral angesprochen werden kann. Eine zentrale Verarbeitungseinheit (CPU) kann dann beispielsweise die zentrale Kommunikationsschnittstelle zur Leistungselektronik beziehungsweise weiteren Aktorsystemen darstellen. Die Energiebereitstellung sowohl von Aktorik, Sensorik als auch Datenverarbeitung wird über eine zentrale Energiequelle realisiert.



Bild 63: Funktionsintegration der Leistungselektronik von Aktorik und Sensorik mit zentraler Energiequelle zur individuellen Ansteuerung und Auswertung einzelner sensomotorischer DEA

Das Sensoreingangssignal besteht aus einem frequenzvariablen Sinussignal, dessen Frequenz in Abhängigkeit der Filterkonfiguration aus Aktor und Widerstand $R_{\rm TP}$ gewählt wird, siehe Abschnitt 5.1.2. Damit können Filtereigenschaften der veränderlichen Kapazität im Zusammenhang mit einem definierten Widerstand optimal genutzt werden. Um eine Adaption der sensorischen Auswertung verschiedener Aktorgeometrien und -strukturen zu ermöglichen, können sowohl die Sensorsignalfrequenz an das Aktorsystem als auch die Resonanzfrequenz des Filters an die Sensorsignalfrequenz angepasst werden. Ersteres wird softwaretechnisch über die zentrale Sensorsignalerzeugung vorgegeben, wobei bei Zweitem eine Nachjustierung individuell über den externen definierten Widerstand $R_{\rm TP}$ der Tiefpasskonfiguration erfolgen kann.

Für die Bereitstellung des Aktorsignals wird das Konzept aus Abschnitt 4.3 herangezogen, in dem mittels Abflachung charakteristischer Kennlinien von HLS sowie deren Linearisierung eine stufenlose Aktorsignalerzeugung ermöglicht wird. Grundsätzlich können mit dieser Konfiguration sämtliche Signalformen mit geringfügigen Anpassungen übertragen werden. Die Form des Aktorsignals ist somit beliebig wählbar. Lediglich im Falle eines Aktorwechselsignals ist die Frequenz des Aktorsignals im Vergleich zum Sensorsignal um Größenordnungen kleiner zu wählen, um den Zustand mittels Filtereigenschaften auswerten zu können.

Das auf Niederspannungsseite überlagerte Signal wird basierend auf Signalübertragung mittels HLS in den HV-Bereich transformiert und zur Verfügung gestellt. Dadurch wird eine individuelle Bereitstellung der entsprechenden Signale zu den jeweiligen Aktoren sichergestellt. Die HV wird über einen in Relation zu einem einzelnen HLS massereicheren DC-HV-Wandler bereitgestellt, welcher mehrere Aktoren versorgen kann und durch die zentrale Energiequelle gespeist werden kann. Durch einen modularen Aufbau können derartige Systeme mit zusätzlichen unabhängig betriebenen Aktoren platzund kostengünstig erweitert werden.

6.1.1 Rahmenbedingungen und Leitfaden zur Auslegung eines sensomotorischen Aktorsystems

Die Funktionsintegration aus Bild 63 erfordert hinsichtlich der Leistungselektronik einen entsprechenden Leitfaden, um einen breiten Einsatz zum Betrieb verschiedener Aktorstrukturen zu ermöglichen. Durch Definition von Rahmenbedingungen und dem folgend aufgeführten Leitfaden wird eine Übertragbarkeit des vorgestellten Leistungselektronikkonzepts gewährleistet.

Aufbau der Leistungselektronik: Damit die positiven Eigenschaften von DE hinsichtlich eines niedrigen Leistungsgewichts erhalten bleiben, ist die Leistungselektronik möglichst leichtbauend zu realisieren, wobei ein reduzierter Schaltungsaufwand, eine kompakte Bauweise sowie Unabhängigkeit von externen Geräten gefordert ist. Allerdings ist die Berücksichtigung der Mindestabstände aufgrund von Luft- und Kriechstrecken gerade bei höheren Spannungen besonders relevant. Durch das Einhalten der Abstände und/ oder durch zusätzliche Isolierung können Fehlerlichtbögen (in Luft ab ca. 1 $\frac{kV}{mm}$) aufgrund hoher Potentialunterschiede zwischen Leiterbahnen oder Bauelementen vermieden werden.

Des Weiteren wird in späteren Entwicklungsphasen der Kostenfaktor der Leistungselektronik entscheidend. Durch einen modularen Aufbau wird eine Reduzierung und die Einsparung kostspieliger Elemente wie DC-HV-Transformatoren gewährleistet. Dabei ist die Nutzung von Standardelementen hierfür vor allem in frühen Entwicklungsphasen essentiell und begünstigt oben genannte Forderungen wie Leichtbau und einen reduzierten Schaltungsaufwand. Bei der applikationsabhängigen Auswahl entsprechender elektronischer Elemente ist auf ausreichende Robustheit im Hinblick auf die geforderte Leistung der DEA zu achten.

Betriebsspannung und Überlagerung: Grundsätzlich ist die Methode der Aktor- und Sensorsignalüberlagerung unabhängig vom benötigten Spannungsbereich. Das erforderliche elektrische Feld zur maximalen Kontraktion der Dielektrikumsschicht ist nahe an der Durchbruchfeldstärke, welche die Versagensgrenze definiert. Die anzulegende Spannung ist folglich abhängig von der Schichtdicke des Dielektrikums. In Abhängigkeit der maximalen kontrahierten Schichtdicke und damit der maximal anzulegenden elektrischen Spannung sind daher Schaltelemente mit ausreichendem Spannungsbereich zu wählen. Der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich Materialien mit einer maximalen Durchbruchfeldstärke von $80 - 120 \frac{V}{\mu m}$ und Fertigungsprozessen mit einer minimalen Schichtdicke von $20 - 50 \,\mu m$ erfordert allerdings überwiegend Betriebsspannungen im Nieder- und Mittelspannungsbereich von $1 - 6 \,kV$.

Auswirkungen auf die Aktuation durch weitere Aktorsignale sowie das überlagerte Signal sind nicht zulässig, da ansonsten ein schwingendes Verhalten der Aktoren auftreten kann. Bei der Verwendung maximaler Amplituden < 10% der maximalen Aktorspannung kann davon ausgegangen werden, dass eine überlagerte Wechselspannung keine zusätzliche, merklich störende Kontraktion des Aktors bewirkt. Zur zuverlässigen Zustandsauswertung sind des Weiteren über den gesamten Aktorspannungsbereich konstante Sensorsignalamplituden sowie eine lineare Übertragung des überlagerten LV-Signals in den HV-Bereich essentiell.

Aktorgröße: DEA können unterschiedlichste Geometrien aufweisen, welche bereits in Tabelle 1 dargestellt sind. Die Leistungselektronik sollte daher eine ausreichende Breite an verschiedenen Aktoren abdecken. Durch den grundlegend gleichen strukturellen Aufbau ist die Übertragbarkeit, Skalierung sowie applikationsabhängige Adaption grundsätzlich möglich.

Die materialbedingt zu erwartende Kontraktion eines Aktors von $\frac{\Delta d_{\max}}{d_0} = 5 - 10\%$ entspricht dabei einer Erhöhung der Kapazität auf die Maximalkapazität

$$C_{\max} = C_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta d_{\max}}{d_0}\right)^2} \,. \tag{6.1}$$

Analog hierzu kann auch die maximale Ausdehnung der Elektrodenfläche ΔA_{\max} mit

$$C_{\max} = C_0 \left(1 + \frac{\Delta A_{\max}}{A_0} \right)^2 \tag{6.2}$$

zur Berechnung herangezogen werden. Die Minimal- und Maximalkapazität eines Aktors sind bei Auslegung der Auswertung hinsichtlich der Wahl der Frequenz des Sensorsignals zu berücksichtigen, um das gesamte Aktionspotenzial des Aktors auch sensorisch aufnehmen zu können.

Frequenzadaption: Die Grenzfrequenz der Grundkapazität $f_{g,0}$ eines Aktors ist bei verwendeter Tiefpasskonfiguration stets größer als die eines betätigten Aktors. Folglich ist aufgrund der Filterkonfiguration die Sensorfrequenz in Abhängigkeit von $f_{g,0}$ mit

$$f_{\rm S} = f_{\rm g,0} + f_{\rm Tol}$$
 (6.3)

anzugeben, wobei f_{Tol} eine optionale Toleranzfrequenz darstellt, welche zum einen den konstanten Dämpfungsanstieg pro Dekade sicherstellen und zum anderen die Unterscheidbarkeit und Messbarkeit der Amplitudendämpfung oder Phasenverschiebung erhöhen kann. Ebenfalls kann bei Annahme einer konstanten, nicht änderbaren Sensorsignalfrequenz die Resonanzfrequenz über den Filterwiderstand

$$R = \frac{1}{C_0 \left(f_{\rm S} \pm f_{\rm Tol} \right)} \tag{6.4}$$

individuell angepasst werden, wobei das Vorzeichen abhängig von der Filterkonfiguration (Tief- oder Hochpass) ist.

Berechnung des Aktorzustands: Die Auswertung des Zustands eines DEA erfolgt mit den bereits beschriebenen Zusammenhängen aus den Glei-

chungen (2.6) und (2.7). Daraus resultieren der kontrahierte Zustand $\sigma_{\rm Z}^{-1}$ des DEA

$$\sigma_{\rm Z}^{-1} = \frac{1}{1+\sigma} = \frac{d\left(\sigma\right)}{d_0} = \sqrt{\frac{C_0}{C\left(\sigma\right)}} \tag{6.5}$$

sowie reziprok hierzu der vergrößerte Elektrodenflächenzustand $\sigma_{\rm Z}$

$$\sigma_{\rm Z} = 1 + \sigma = \frac{A(\sigma)}{A_0} = \sqrt{\frac{C(\sigma)}{C_0}}.$$
(6.6)

Anhand des Verhältnisses zwischen gedämpfter und ungedämpfter Sensorsignalamplitude ist ebenfalls der resultierende elektrostatische Druck zwischen den Elektrodenschichten mit

$$p_{\rm el} = \frac{U_{\rm HV}^2}{A_0 d_0} \cdot \frac{1}{2\pi f R} \cdot \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{U_{\rm a}}{U_{\rm e}}\right)^2}{\left(\frac{U_{\rm a}}{U_{\rm e}}\right)^2}} \tag{6.7}$$

für eine Tiefpasskonfiguration zu berechnen. Die Berechnung basierend auf einer Hochpasskonfiguration ist analog, wobei auch hier stets $\frac{U_a}{U_e} \leq 1$ gilt.

6.1.2 Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal sowie Auswertung des Aktorzustands

Die für das vorgestellte sensomotorische System notwendige Überlagerung des Aktor- und Sensorsignals nach Bild 62 kann mittels HV-HLS realisiert werden. Durch die in Abschnitt 4.3.3 erläuterte Abflachung und Linearisierung der charakteristischen Kennlinien der Schaltelemente ist die Überlagerung im LV-Bereich sowie die Übertragung in den HV-Bereich realisierbar, siehe Bild 64.

Um rückwirkende Einflüsse des Sensorsignals sowie weiterer Aktorsignale auf die jeweiligen überlagerten Signale zu vermeiden, sind entsprechende Vorkehrungen durch den Einsatz von Diode beziehungsweise Spannungsfolger getroffen. Dadurch können einzelne Aktoren individuell angesteuert und von einer zentralen HV-Quelle versorgt werden. Des Weiteren sind die in Abschnitt 6.1.1 vorgegebenen Rahmenbedingungen bei einer leistungselektronischen Umsetzung in Abhängigkeit der Aktorgrößenordnung zu beachten. Das heißt, dass insbesondere Parameter wie Kapazität, Materialeigen-



Bild 64: Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal im LV-Bereich und Transformation in den HV-Bereich mittels Kombination aus Aufwärtswandler sowie Linearisierung der abgeflachten charakteristischen Kennlinie eines HLS, hier als spannungsabhängiger Widerstand dargestellt

schaften sowie geometrische Abmessungen hinsichtlich maximaler Aktorspannung und Sensorsignalamplitude maßgeblich sind.

Die maximale Sensoramplitude ist dabei durch zwei Aspekte beschränkt. Zum einen darf die Amplitude des Wechselsignals nicht für eine Änderung des Aktorzustands verantwortlich sein und zum anderen sinkt der Spannungsbereich der Ansteuerung, in der eine zuverlässige Zustandsauswertung möglich ist, siehe Bild 65. Letzteres liegt in der Kombination von Signalüberlagerung und Linearisierung des HLS sowie dem Schwellwert und dem Sättigungsverhalten begründet. Dadurch ist vor allem an den Bereichsrändern keine vollständige Übertragung der Sensoramplitude sichergestellt, was zu hohen Messungenauigkeiten führt. Im Idealfall liegt die Höhe der Sensoramplitude niedriger als die minimal benötigte Steuerspannung sowie niedriger als die Differenz zwischen maximal erwarteter und maximal möglicher Steuerspannung.

Die Auswertung des Sensorsignals respektive der Amplitude oder Phase des Sinussignals bildet die Grundlage zur Zustandserkennung. Aufgrund der überlagerten HV ist zunächst mittels Hochpass der Gleichspannungsanteil herauszufiltern, da ansonsten die potenzielle Zerstörung der Messeinrichtung durch Anliegen zu hoher Spannungen erfolgt. In Bild 66 ist das grundsätzliche Schema zur Auswertung der zustandsabhängigen Kapazität des Aktors dargestellt. Hierbei wird die Amplitudenänderung und/ oder Phasenverschiebung des Sensorsignals durch Messungen am Eingang und am Ausgang des Filters erfasst. Letzteres entspricht einer direkten Messung des Wechselsignals über dem Aktor. Aufgrund der spannungsdämpfenden Filter-



a) Sensoramplituden in Abhängigkeit der Aktorsteuerspannung und der maximalen verfügbaren grads und der maximal verfügbaren Spannung Spannung

b) Sensoramplituden in Abhängigkeit des Steuer-

Bild 65: Konstante Sensorsignalamplituden \hat{U}_{S_1} , \hat{U}_{S_2} innerhalb des stufenlos steuerbaren Steuerspannungsbereichs zur zuverlässigen Auswertung von DEA unabhängig von der aktuellen Steuerspannung

eigenschaften gilt stets $U_a < U_e$, wobei die Amplitudenmessung auf unterschiedliche Weise, wie beispielsweise über Effektivwert- oder Spitzenwerterfassung, durchgeführt werden kann.



Bild 66: Auswertung der zustandsabhängigen Kapazität über Amplituden- und/ oder Phasenmessung des HP-gefilterten Sensorsignals vor und nach der Sensorsignaldämpfung/ beziehungsweise -verschiebung durch die zustandsabhängige Aktorkapazität

6.2 Verifikation und Validierung der integrierten Zustandserkennung

Die beispielhafte Umsetzung des in Bild 64 dargestellten Konzepts zeigt folgend die Funktionalität der integrierten Zustandserkennung sensomotorischer DEA auf Basis ihrer Filtereigenschaften. Dabei wird weiterhin als spannungsabhängiger Widerstand ein herkömmlicher HV-MOSFET ge-

nutzt, welcher bauteilbedingt Spannungen bis maximal 4.5 kV überträgt. Das im LV-Bereich überlagerte Sensorsignal bewirkt auf Aktorseite ein adaptierbares Sinuswechselsignal mit Frequenzen von ca. 100 - 1000 Hz und einer definierbaren Amplitude, welches um das DC-HV-Potential schwingt. Dabei ist die Spannungsamplitude deutlich kleiner als die erforderliche Spannung für eine merk- und messbare Zustandsänderung des Aktors. Bei Bedarf kann ebenfalls die Resonanzfrequenz des entstehenden Filters durch Anpassung von R_{TP} an die Sensorsignalfrequenz adaptiert werden.

Die Funktionalität der Integration und Kombination ausgewählter sensorischer und aktorischer Methoden zu einem sensomotorischen System auf Basis der Filtereigenschaften von DE ist in Bild 67 gezeigt. Dabei werden zunächst herkömmliche, für HV geeignete Kondensatoren mit bekannter Kapazität als Referenz verwendet, welche durch ihre Spannungsunabhängigkeit keine Kapazitätsänderung aufgrund einer anliegenden Ansteuerungsspannung vorweisen.



a) Gemessene Absolutwerte in Abhängigkeit der b) Relative Abweichung des gemessenen Kapazi-Sensorfrequenz und Filterkonfiguration

tätswerts zur Referenz

Bild 67: Ergebnisse der gemessenen Absolutwerte und deren relativen Abweichungen vom Referenzwert verschiedener Ersatzkapazitäten mittels der umgesetzten Funktionsintegration zur Verifikation des vorgestellten Konzepts eines sensomotorischen Systems auf Basis der Filtereigenschaften von DEA; erfasst wird hierbei die Kapazität mittels unterschiedlicher Sensorfrequenzen und unterschiedlicher Filterkonfigurationen bei einer Aktorspannung von 2 kV.

In Bild 67a) zeigen hierfür Messreihen mit jeweils unterschiedlichen Festkapazitäten die weitläufige Unabhängigkeit des Konzepts von Sensorfrequenz und Filtergrenzfrequenz respektive -widerstand in einem Frequenzbereich von 200 - 700 Hz. Die mittlere Genauigkeit zur jeweiligen Sensorfrequenz ist über die gewählten Tiefpasskonfigurationen hinweg in diesem Bereich überwiegend > 95% bezüglich der relativen Abweichung, siehe Bild 67b). Im dargestellten Frequenzbereich ist ersichtlich, dass die Sensorsignalfrequenz einiges größer als die Filtergrenzfrequenz des jeweiligen Tiefpasses zu wählen ist. Des Weiteren sind durch eine obere Begrenzung des Frequenzbereichs die Ausgangssignale durch die resultierende Dämpfung noch unterscheidbar beziehungsweise nicht vollständig unterdrückt. Außerhalb des Frequenzbereichs ist ein deutlicher Anstieg der Messungenauigkeit erkennbar.

Bild 68 zeigt die relativen Abweichungen der gemessenen Kapazitäten bei den in Bild 67a) dargestellten Tiefpasskonfigurationen über den beschränkten Frequenzbereich von 300 - 700 Hz hinweg. Die mittlere relative Abweichung kann ebenfalls < 5 % angesiedelt werden, wodurch die grundsätzliche Einsetzbarkeit einer Tiefpasskonfiguration mit konstantem Widerstand und der variablen Kapazität des DEA gezeigt werden kann. Hierbei ist allerdings der Widerstand in Abhängigkeit der Aktorkapazität im Grundzustand nicht zu klein zu wählen. Anderenfalls entstehen erhöhte Abweichung wie bei C_4 in Bild 68 zu erkennen ist.



Bild 68: Relative Abweichungen der mittels umgesetzter Funktionsintegration eines sensomotorischen Systems gemessenen Ersatzkapazitäten C_{1-4} bei unterschiedlichen Tiefpasskonfigurationen über den ausgewählten Frequenzbereich des Sensorsignals hinweg

Die Überprüfung der Funktionalität und der Genauigkeit der integrierten Zustandserkennung auf Basis von Filtereigenschaften und einem überlagerten Aktor- und Sensorsignal wird folgend mittels des bereits genutzten ORS durchgeführt. Dabei wird der Versuchsaufbau aus Bild 29 um das selbstfühlende System erweitert, so dass die Validierung der integrierten Zustandserkennung optisch erfolgen kann, siehe Bild 69. Durch aktive Ansteuerung sowie durch vorherige Referenzmessung in der Ebene über die Flächenvergrößerung der Elektrode und damit des Aktors wird auf den aktuellen Zustand geschlossen.



Bild 69: Erweiterung des ORS zur Verifikation und Validierung der Zustandsmessung eines sensomotorischen Elementaraktorsystems auf Basis der Filtereigenschaften mittels optischer Kapazitätsmessung anhand der Aktorflächenänderung

Nicht planare Verformungen, welche durch spezielle Rahmenstrukturen oder einwirkende externe Kräfte resultieren können, sind mit zweidimensionalen optischen Messmethoden allerdings nicht quantifizierbar. Folglich dient das ORS zur Verifikation und Validierung der Funktionalität bei Betrieb eines planaren Aktors. Diese Verifikation ermöglicht im Allgemeinen eine Quantifizierung von Zustandsänderungen mittels integrierter Zustandserkennung auch von komplexeren Strukturen sowie die Erfassung der Einwirkung externer Kräfte auf die Aktoren. Dabei ist die Quantifizierung unabhängig von der Wirkrichtung der externen Kräfte auf den Aktor, das heißt ob externe Kräfte orthogonal oder parallel zur Aktorfläche wirken.

6.2.1 Erfassung aktiver und passiver Zustandsänderungen

Unter aktiven Zustandsänderungen wird die Verformung des Aktors durch Anlegen eines elektrischen Felds verstanden. Dagegen stellen passive Zustandsänderungen Verformungen des Aktors durch äußere Einflüsse wie beispielsweise Krafteinwirkung dar. Mit der Kenntnis der angelegten Aktorspannung kann mittels der auftretenden Kapazitätsänderung auf die absolute Zustandsänderung rückgeschlossen werden. Extern einwirkende Kräfte resultieren dann in einer relativ zur Ausgangskapazität höheren oder geringeren positiven Kapazitätssteigerung. Der Kontraktions- und Verformungszustand kann folglich unabhängig von der Kenntnis der externen Kraft bestimmt werden.

Die Durchführung verschiedener Experimente dient im Folgenden zur Verifikation und Validierung des sensomotorischen Systems mithilfe des in Kapitel 4 eingeführten ORS. Dabei werden die jeweils gemessenen Kapazitäten verglichen und deren Übereinstimmung bewertet. In Bild 70 sind hierfür unterschiedliche Ansteuerungs- sowie die resultierenden Kapazitätsverläufe dargestellt, welche über das ORS und das sensomotorische System erfasst werden.



a) Aktive Zustandsveränderung durch linear ansteigende Ansteuerung

b) Aktive Zustandsveränderung durch schrittweise erhöhte Ansteuerung



c) Aktive Zustandsveränderung durch beliebige Ansteuerung

d) Passive Zustandserkennung aufgrund externer Krafteinwirkung

In Bild 70a) ist das Verhalten eines DEA auf eine einfache linear ansteigende Ansteuerung abgebildet. Das zu erwartende Verhalten des Aktors als Antwort auf eine überlagerte Aktor-/ Sensorspannung ist analog zu den Ergebnissen in Abschnitt 4.3.2 erkennbar. Aufgrund des in Abschnitt 6.1.2 bereits be-

Bild 70: Aktive und passive Zustandsänderungen sowie simultane Auswertung selbstfühlender dielektrischer Elastomeraktoren als Antwort auf unterschiedliche Ansteuerungsverläufe sowie externen Krafteinflüssen [P10]

schriebenen charakteristischen Aufbaus zur Linearisierung der Ansteuerung des sensomotorischen Systems resultiert die zur Auswertung notwendige minimale Aktorspannung bei 0% in keinerlei Reaktion des Aktors hinsichtlich einer sichtbaren Aktivierung. Ein aktorischer Einfluss besteht in diesem Fall erst ab ca. 20% des maximalen Ansteuerungsgrads.

Zur Untersuchung des Verhaltens unter dynamischeren Bedingungen sind in den Bildern 70b) und 70c) Spannungsverläufe mit stufenweisen sowie sprunghaften beziehungsweise schneller wechselnden Ansteuerungsgraden abgebildet, welche Zustandssprünge des Aktors initiieren. Dabei werden in Bild 70c) neben ansteigenden Flanken auch fallende Flanken unterschiedlicher Dynamiken betrachtet. Mit einer mittleren relativen Abweichung von 1,09 - 1,26 % beträgt die Übereinstimmung der gemessenen Kapazitäten von ORS und dem sensomotorischen System > 98 %. Dadurch kann die Funktionalität sowie die Einsetzbarkeit des sensomotorischen Systems zur simultanen Zustandsänderungserfassung auf Basis von Filtereigenschaften während des aktorischen Betriebs gezeigt werden. Mit der Annahme, dass die Materialparameter während des Betriebs nahezu konstant bleiben, kann der vorgestellte Ansatz unabhängig von Struktur und Geometrie des Aktors als sensomotorisches System verwendet werden, um den jeweiligen aktiven Zustand der Aktordehnung und -kontraktion auf Basis der gemessenen Kapazität zu bestimmen.

Die Detektion passiver Verformungen ist in Bild 7od) dargestellt. Aufgrund der orthogonal zur Aktorfläche wirkenden Kraft ist keine Auswertung mit dem ORS möglich. Dennoch ist eine deutliche Kapazitäts- und damit Zustandsänderung bei Einwirken der Kraft von ca. 0,8 N mittels dem vorgestellten Ansatz für ein sensomotorischen System detektierbar. In Bild 7od) lässt beispielhaft anhand der erfassten Kapazitätsänderung von 0,25 nF auf eine Änderung des Dehnungszustands von 6,9 % im aktivierten Zustand auf 11,2 % Dehnung im aktivierten Zustand in Kombination mit der extern einwirkenden Kraft zurückschließen. Diese Geometrieveränderung ist reversibel, sodass der Aktor bei Entlastung wieder den ursprünglichen (steuerspannungsabhängigen) Zustand einnimmt.

6.2.2 Erweiterbarkeit des Systems durch Modularisierung geeigneter Komponenten

Das in dieser Arbeit beschriebene Konzept lässt eine Erweiterung von einem sensomotorischen Aktor zu einem sensomotorischen Aktorsystem bestehend aus zahlreichen Aktoren zu. Durch eine Modularisierung der einzelnen Funktionseinheiten können zum einen Bausteine einfach ausgetauscht sowie zum anderen redundante Elemente reduziert werden.

In Tabelle 10 sind die für die Konzeptumsetzung eingesetzten Modulbausteine anhand ihrer charakterisierenden Hauptfunktion sowie einer möglichen Realisierung aufgelistet, wie sie vorausgehend umgesetzt sind.

Tabelle 10: Charakterisierende Elemente der Umsetzung der Leistungselektronik für ein sensomotorisches System auf Basis von Filtereigenschaften von DE

Modulfunktion	Umsetzung	zentralisiert	individuell
zentrale Energie- versorgung	Spannungsquelle	X	
HV-Versorgung	DC/HVDC-Wandler	X	
Aktorsignalerzeugung	Aufwärtswandler		X
Sensorsignal- erzeugung	Sinusgenerator	X	
Überlagerung Aktor-/ Sensorsignal	addierender Verstärker		X
Signalübertragung LV-HV	Halbleiterschalter		X
Amplituden-/ Phasen- messung	Spitzenwert-/ Effek- tivwertmessung, Phasenverschiebung		X
Datenverarbeitung, Hardware-Software- Schnittstelle	CPU, Mikrocontroller	X	

Das in Bild 63 dargestellte Konzept kann folglich derart erweitert werden, dass durch sinnvolle Verschaltung eine unnötige Vervielfachung redundanter Elemente vermieden wird, siehe Bild 71 sowie die Bezeichnung *zentralisiert* oder *individuell* in Tabelle 10. Hier ist die Erweiterung des leistungselektronischen Konzepts zum sensomotorischen System für einen Aktor exemplarisch auf eine Versorgung und Auswertung von zwei Aktoren dargestellt. Eine zusätzliche Erweiterung ist auf analoge Weise möglich.

Zu erkennen ist, dass vor allem zentrale Elemente, wie

- die Energieversorgung des gesamten Systems,
- die Erzeugung der HV,

- die Kommunikationsschnittstelle mit ihrer Datenverarbeitung sowie
- die Erzeugung stets konstanter Signale, wie dem Sensorsignal,

für weitere Aktoren ebenfalls weiterverwendet werden können und bei einer Systemerweiterung keiner Vervielfachung bedürfen. Hinsichtlich der Auswertung der Sensorsignale ist ebenfalls eine Zentralisierung des Auswertungsmoduls ein logischer Schritt. Allerdings ist aufgrund der geforderten kontinuierlichen Auswertung teils stark unterschiedlicher Signale zu beachten, dass die Dynamik von Demultiplexern oder ähnlichen Schaltern einen hohen Einfluss auf die Gesamtdynamik hat.



Bild 71: Modulbasierte Erweiterung der Leistungselektronik für eine beliebige Anzahl n (*hier:* n = 2) sensomotorischer Aktoren durch Clusterung zentraler Elemente

Aufgrund der Weiterentwicklung elektronischer Komponenten hinsichtlich Preis und Baugröße ist lediglich eine Momentaufnahme der absoluten Gesamtkosten eines sensomotorischen Systems auf Basis von DEA möglich. Die Entwicklungen in Richtung Miniaturisierung und Leistungsvermögen elektronischer Bauelemente schreitet stets voran, wobei die Nachfrage und Stückzahlen über den Preis entscheiden. Zukünftig könnte die Funktionalität sowie das gesamte Leistungsgewicht durch speziell entworfene Bauelemente bezüglich angepasster Parameter und Baugröße daher noch weiter optimiert werden.

6.3 Zusammenfassung und Fazit

Die in den Kapiteln 4 und 5 gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die sensorische und aktorische Funktionsintegration zu einem sensomotorischen DE-System. Dadurch wird eine simultane Auswertung des Aktorzustands während des aktorischen Betriebs möglich. Eine Systemüberwachung wird damit ohne zusätzliche, externe Sensoren möglich. Geeignete Ansteuerungs- beziehungsweise Auswertungsmethoden werden für die Funktionsintegration aus den vorangehenden Untersuchungen der separaten Betrachtung von Aktorik und Sensorik extrahiert, wobei die Überlagerung von Aktor- und Sensorsignal sowie deren Transmission in den HV-Bereich die Grundlage für das vorliegende Konzept bilden. Um den Zustand von DE während des HV-Betriebs basierend auf deren inhärenten Filtereigenschaften auswerten zu können, werden linearisierte Kennlinien herkömmlicher HLS zur Überlagerung eines höherfrequenten Sensoreingangssignals mit einem (niederfrequenten oder DC-) Steuerungssignal genutzt. Dabei sind Sensorsignalfrequenzen in einem großen Frequenzbereich in Abhängigkeit von Aktorgröße und der jeweiligen Filterkonfiguration möglich. Weitere vorherrschende Rahmenbedingungen sowie die Erweiterung der jeweiligen Lösungsansätze sind durch entsprechende Richtlinien erfasst. Diese ermöglichen bei Auslegung adaptierbarer Systeme unterschiedlicher Aktorstrukturen die Übertragung der vorgestellten Ergebnisse in höhere oder niedrigere Aktorspannungsbereiche.

Neben aktiven Zustandsänderungen selbstfühlender Aktoren, welche durch eine entsprechende Ansteuerungsspannung resultieren, können mit dem vorgestellten Lösungsansatz ebenfalls passive Zustandsänderungen dieser Aktoren erfasst werden. Diese sind durch von außen einwirkende Einflüsse unabhängig von der Steuerspannung definiert. Die Umsetzung eines sensomotorischen Demonstratoraktorsystems auf Basis des vorgestellten Lösungsansatzes zeigt im Vergleich zu dem Referenzsystem einer visuellen, zweidimensionalen Kapazitätsauswertung mit resultierenden Übereinstimmungen von > 98% das innewohnende Potenzial sowie die Funktionalität der vorgestellten Methode. Durch weitere Optimierung der Messsignalgenerierung sowie -erfassung kann die Abweichung in einem breiteren Frequenzbereich noch weiter verringert werden. Durch die Fähigkeit, sowohl aktive als auch passive Verformungen registrieren zu können, sind auf Basis des vorgestellten sensomotorischen Systems leichtbauende, flexible und weiche mechatronische Systeme möglich, in denen die aktorischen Einheiten simultan auch sensorisch wirken können. Dadurch sind Einsparungen von beispielsweise zusätzlichen sensorischen Komponenten möglich. Des Weiteren bietet das modulbasierte System weitere Einsparungspotenziale hinsichtlich des Aufbaus komplexer Aktorsysteme. Durch den Einsatz zentraler Modulbausteine können bereits bei zwei Aktoren 25 % der leistungselektronischen Module im Vergleich zur herkömmlichen Ansteuerung eingespart werden. Bei höherer Anzahl von Aktoren steigt das Einsparungspotenzial weiter an.

7 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden die Potenziale von dielektrischen Elastomeren (DE) aufgezeigt sowie Leistungselektronikkonzepte für den aktorischen, sensorischen sowie kombinierten Betrieb von DE hergeleitet, entworfen und deren Realisierung an dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) und –sensoren (DES) erprobt sowie evaluiert. Dabei umfassen die Zielstellungen die Bereitstellung skalierbarer, universell einsetzbarer leistungselektronischer Methoden sowie das lösungsorientierte Aufzeigen technologiebedingter Herausforderungen hinsichtlich der Applikationsintegration von DES und DEA in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Die Befähigung zur grundsätzlichen Nutzung der positiven inhärenten Merkmale von DE, wie beispielsweise hohe Leistungsdichte, geräuscharmer Betrieb, geringes Gewicht, Flexibilität und Elastizität, erweitert hierbei das variantenreiche, technologische Einsatzpotenzial von DE.

Die vorgestellten leistungselektronischen Methoden im aktorischen Betrieb ermöglichen die Ansteuerung von zahlreichen Aktoren im Hochspannungs-(HV-)Bereich mit einer zentralen Energiequelle sowie den dynamischen Betrieb in einem weiten Frequenzband. Dadurch sind kompakte und leichtbauende Aktorsysteme für variantenreiche Applikationen realisierbar. Bisherige Konzepte und Systeme auf Basis zentraler Energiequellen nutzen dagegen lediglich den Einsatz speziell angepasster Halbleiterschalter (HLS) oder HLS geringerer Leistungsfähigkeit, was lediglich den Betrieb kleinskaliger Aktoren ermöglicht. Systeme mit höherer Leistungsfähigkeit bestehen dagegen aus sperrigem Laborequipment. In der vorliegenden Arbeit werden zwei Alternativen vorgestellt, welche zum einen auf einer frequentierten HV-Ansteuerung sowie zum anderen auf einer stufenlosen Gleichhochspannungs-(DC-HV-)Ansteuerung basieren. In beiden Fällen ermöglichen die vorgestellten Methoden die Nutzung kommerziell erhältlicher HLS, welche entsprechend definierter Anforderungen auszuwählen sind.

Die (höher-)frequentierte Ansteuerung wird über Pulsweitenmodulation (PWM) realisiert, wobei aufgrund des kapazitiven Verhaltens von DE neben aktiven Lade- auch aktive Entladevorgänge für eine hohe Dynamik notwendig sind. Gezeigt wird die Möglichkeit der Integration nicht galvanischgetrennter HLS, deren Bezugspotential des Niederspannungs-(LV-)Schaltereingangs ebenfalls im HV-Potential liegt. Es wird eine vom Steuergrad und

der maximal bereitgestellten HV abhängige Zustandsänderung des DEA erzielt, welche quadratisch mit der anliegenden Aktorspannung steigt. Die resultierende Aktorspannung ist dabei abhängig von der Pulsweite des Signals. Für die mittels PWM angesteuerten Aktoren bedeutet dies bei steigendem Steuergrad eine Erhöhung der Intensität der (für das Auge nicht mehr verfolgbaren) Vibration des DEA. Folglich sind Aktuationen bis in den hohen Frequenzbereich realisierbar, wodurch ein großes Applikationsspektrum mit höherer Frequenz, wie bei einem taktilen Feedback oder Lautsprecher, bedient werden kann.

Die gleichspannungsgerichtete Ansteuerung basiert auf der Nutzung charakteristischer Kennlinien von HLS. Hierfür wird ein Lösungsansatz entwickelt, welcher zum einen die Anpassung steiler Übertragungskennlinien und zum anderen die Prognostizierbarkeit der Steuerung anhand der Betrachtung erweiterter physikalischer Modelle von HLS ermöglicht. Auch hier wird eine vom Steuergrad und der maximal bereitgestellten HV abhängige Zustandsänderung des Aktors erzielt, welche quadratisch mit der anliegenden Aktorspannung steigt. Dabei resultiert ein höherer Steuergrad bei der DC-HV-Ansteuerung in einer höheren Kontraktion des DEA. Mit dieser Art von Steuerung können Aktorbewegungen zeitlich beliebig und bedarfsgesteuert, beispielsweise bei künstlichen Muskeln, erzeugt werden.

Materialbedingt weisen DE hohe parasitäre resistive Eigenschaften von Elektroden und Dielektrika auf, welche bisher herstellungsbedingt nicht ideal konstant sind. Ein Standard zu Prüfverfahren für DE als Verbundmaterialien existiert bis dato nicht. Folglich dient eine an existierende Normen für flexible Materialien angelehnte Prüfvorschrift zur Charakterisierung von DE sowie zu Integrationsmethoden der linearen Sensorverläufe auf ein einheitliches Sensormodell. Hierfür wird als Anwendungs- und Integrationsbeispiel eine auf DES basierte Gestensteuerung von Robotern umgesetzt. Der rein sensorische Einsatz von DE erfordert neben einer Vorgehensweise zur einheitlichen Charakterisierung außerdem den Einsatz angepasster Auswertungsverfahren, welche durch parasitäre Einflüsse nur geringe oder keine Messabweichungen aufweisen. Hierfür wird ein Lösungsansatz auf Basis der Filtereigenschaften von DE, welche amplitudendämpfende und phasenverschiebende Effekte auf ein Sensoreingangswechselsignal haben, entwickelt. Bei dieser Methode besitzen parasitäre Effekte in einem ausreichenden Frequenzbereich keine Einflüsse auf die Kapazitätsauswertung. Im Vergleich zu bisherigen etablierten Auswertungsverfahren wird unter Nutzung dieses Verfahrens auch eine simultane Zustandsauswertung während des aktorischen HV-Betriebs von DE realisierbar.

Mit der Kombination der rein aktorischen und rein sensorischen Betriebsweise auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen wird ein Lösungsansatz zur Erweiterung der einzelnen Betriebsarten vorgestellt, umgesetzt, verifiziert sowie validiert. Schaltungstechnische Adaptionen der vorherigen Konzepte ermöglichen den Einsatz von Standardbauelementen, wodurch keine an den Betrieb von DE angepasste elektronische Bauelemente notwendig sind sowie die Übertragbarkeit bei unterschiedlichen Anforderungen gewährleistet ist. Die Überlagerung von Aktorsteuerungs- und Sensoreingangssignal im LV-Bereich, deren Transformation in den zum Aktorbetrieb notwendigen HV-Bereich sowie die Auswertung der Zustandsänderung im LV-Bereich erlauben die Verwendung von DEA als sensomotorischen Aktor. Dadurch sind die flexiblen, elastischen Aktoren auch als Sensoren nutzbar. Mit diesen können von außen wirkende Krafteinflüsse registriert und der Aktor- oder gar Systemzustand ohne externe Sensoren erfasst werden. Umgekehrt ist auch die Realisierung von primär genutzten Sensoren mit beispielsweise aktivem Feedback denkbar. Durch den modulartigen Aufbau des Konzepts ist der vorgestellte Lösungsansatz ebenfalls auf den Betrieb zahlreicher Aktoren übertragbar, wobei eine zentrale Energieversorgung sowie zentrale Funktionsbausteine eine Reduzierung des Schaltungsaufwands, des Gewichts und Volumens sowie der Kosten ermöglichen. Individuelle Bausteine gewährleisten dagegen den separaten und unabhängigen Betrieb.

Vorgestellte Lösungsansätze im aktorischen, sensorischen und kombinierten Betrieb von DE ermöglichen vielfältige Applikationen auf Basis leichtbauender, flexibler, elastischer und potenziell leistungsstarker Aktoren. Durch die inhärenten Materialeigenschaften sowie dem Leichtbau sind ebenfalls mobile Anwendungen oder Anwendungen direkt am Menschen denkbar. Für den Einsatz in diversen Applikationen auf Basis von DE sowie der vorgestellten Lösungsansätze in den unterschiedlichen Betriebsszenarien bedarf es jedoch noch weitere Entwicklungen und Erforschung in unterschiedlichen Bereichen. Zum einen sind automatisierte Fertigungsverfahren essentiell für eine zuverlässige Reproduzierbarkeit und Haltbarkeit von DEA und DES. Hierfür bietet der Aerosol-Jet-Druck ein geeignetes Verfahren, gestapelte Sensoren und Aktoren zu generieren, deren quervernetzte Schichten ebenfalls Zugbelastungen in Stapelrichtung erlauben. Mittels reproduzierbaren Aktoren können die vorgestellten Lösungsansatze damit ebenfalls hinsichtlich komplexer Aktorstrukturen verifiziert und validiert werden. Zum anderen sind die beschriebenen Verfahren zur Ansteuerung und Auswertung sowie zum kombinierten Betrieb aufgrund ihrer Skalierbarkeit ebenfalls für eine Miniaturisierung der Leistungselektronik qualifiziert. Genauigkeitssteigerungen

sind durch den Einsatz höherwertiger oder auch angepasster Bauelemente möglich. Die vorgestellten Lösungsansätze für ein breites Anwendungsspektrum können dabei auf einzelne Anwendungsszenarien übertragen und noch weiter spezifiziert werden. Zuletzt bildet der vorgestellte Lösungsansatz für sensomotorische Aktoren die Grundlage, geschlossene Regelkreise ohne externe Überwachung der System-Istwerte zu bilden. Ein modernerer Ansatz wäre die Steuerung über künstliche neuronale Netze, welche einen Zweig des maschinellen Lernens darstellen. Auch hierfür bilden selbstfühlende Aktoren die Grundlage, komplexe Bewegungsmuster unter undefinierten Bedingungen und Störeinflüssen ausführen zu können. Erst durch die Unterscheidung der Ursache passiv oder aktiv bewirkter Zustandsänderung kann ein Aktorsystem korrekt auf die unterschiedlichen Umwelteinflüsse reagieren. Durch die integrierte Fähigkeit einer Art Selbstwahrnehmung sind DE neben künstlichen Muskeln in flexiblen, dynamischen Kinematiken auch als sensomotorische Einheiten in einem breiten Anwendungsspektrum qualifiziert.

8 Summary, discussion and prospects

In this thesis, the potentials of dielectric elastomers (DE) are shown and concepts of power electronics for actuation, sensing and the combined operation of DE are derived and designed. The realization is tested and evaluated on dielectric elastomer actuators (DEA) and sensors (DES). The objectives contain the deployment of scalable, universal usable methods of power electronics as well as the solution-oriented demonstration of technology depending challenges regarding the integration of the application of DES and DEA in varying application areas. The qualification for the elementary utilization of the positive inherent characteristics of DE, for example high power density, noise-reduced operation, less weight, flexibility and elasticity, enhance the multi-variant and technological potential of DE.

The presented methods of power electronics for the actuation mode allow the open-loop control of numerous actuators within the high voltage (HV) range with a central energy source as well as the dynamic operation in a wide frequency band. Therefore, compact and lightweight actuator systems for multi-variant applications are possible. Up to now, concepts and systems based on central energy sources are using only specially adapted semiconductor switches (HLS) or HLS with less power capability, which enables the use of small-scaled actuators only. In contrast, systems with higher power capability are consisting of bulky laboratory equipment. In this thesis, the focus lies on two cases, firstly, on a frequented HV activation, and secondly, a continuous smooth direct current high voltage (DC-HV) open-loop control. In both cases, the presented methods enable the usage of commercially available HLS, which have to be chosen appropriately regarding the defined requirements.

The (higher-)frequented activation is realized with pulse width modulation (PWM), however, due to the capacitive behavior of DE, active charging processes as well as discharging processes are necessary for a high dynamic. The possibility of the integration of not galvanic separated HLS is shown, which reference potential of the low voltage (LV) switch input is also lying within the HV potential. Depending on the percentage and the maximum provided HV, a state change of the DEA is achieved, which increases squarely with the applied actuator voltage. The resulting actuator voltage is depending on the pulse width of the signal. For the PWM controlled actuators this means that a higher duty cycle leads to an increasing of intensity of the DEAs' vibration

(not perceptible for the human eyes). Thus, within a high frequency range actuations up to high frequencies are realizable, resulting in a broad spectrum of applications like e.g. haptic feedback or loudspeakers.

The direct current (DC) open-loop control is based on the utilization on characteristic curves of HLS. For this purpose, a solution approach is developed, which enables, on the one hand, the adaption of steep transfer characteristics, and on the other hand, the predictability of the open-loop control based on extendable physical models of HLS. Like mentioned above, in this case also a state change of the actuators is achieved, which increases squarely with the applied actuator voltage. With the DC-HV open-loop control, a higher percentage of the maximum provided HV leads to a higher contraction of the DEA. With this kind of control, movements can be realized timely random and on demand, e.g. for artificial muscles.

Due to the material properties, DE show high parasitic resistant characteristics of electrodes and the dielectric medium, which are not ideally constant due to production reasons. Until now, a standard for testing procedures for DE as composite material does not exist. Consequently, existing norms of test methods regarding flexible materials for the characterization of DE as well as integration methods of linear senor characteristics serve as a basis for a uniform sensor model. As application and integration example, a gesture control of robots based on DES is realized. The use of DE as sensors requires, next to a regulation for standardization of characterization, the use of adapted evaluation methods, which have little or no measuring deviations due to parasitic influences. For this purpose, a solution approach based on the filter characteristics of DE is developed, which have amplitude damping and phase shifting effects on a sensor input change signal. Parasitic effects have no influence on capacity measurement using this method in a sufficient frequency range. Compared to previous established evaluation techniques, using this method, a simultaneous state evaluation during HV actuation of DE can be realized.

Based on the previous investigations, with the combination of an actuation and sensing mode, a solution approach to the complementation of the individual operating modes is presented, implemented, verified and validated. Circuitry adaptions of previous concepts enable the use of standard components, by which electronic components have not to be adapted to DE as well as the transferability to different requirements, is guaranteed. The superposition within the LV of actuation open-loop control input and sensor input signal, its transformation to the HV actuation voltage, as well as the evaluation of the state change within the LV allows the usage of DEA as sensorimotor actuator. As a result, the flexible and elastic actuators are also utilizable as sensors. With those, it is possible to register external forces and the actuator or even system state can be captured without external sensors. Vice versa, the realization of primarily used sensors with active feedback are conceivable. Due to the modular structure of the concept, the presented solution approach can also be transferred to the operation of further actuators, whereas a central energy source as well as central functional components result in a reduction of circuit expenses, weight and volume. In contrast, individual components guarantee a separate and independent operation.

The presented solution approached within the actuation and sensing mode as well as the combined operation of DE enable various applications based on lightweight, flexible, elastic and potentially powerful actuators. Due to the inherent material properties and lightweight, mobile applications or applications close to human are conceivable. For the utilization in various applications based on DE and the presented solution approaches of different operation modes, further research and development in different areas are still necessary. On the one hand, automated manufacturing processes are essential for a reliable reproducibility and durability of DEA and DES. For this, the Aerosol-Jet-Printing process describes a suitable method to generate stacked sensors and actuators, which cross-linked lavers allow tensile loads in the stacking direction. With reproducible actuators the presented solution approaches can be evaluated and validated regarding more complex actuator structures. On the other hand, the presented methods for the open-loop control and evaluation as well as the combined operation, gualify the miniaturization of the power electronics due to its scalability. Accuracy increasing is possible with the usage of adapted or higher quality components. The solution approaches presented for a broad spectrum of applications can be transferred and further specified to individual application scenarios. Finally, the proposed solution approach for sensorimotor actuators forms the basis for generation of closed-loop control circuits without external monitoring of the actual system values. A more modern approach is the control by artificial neural networks, which are a branch of artificial intelligence. Here, also sensorimotor actuators form the basis, to perform more complex movement patterns at undefined requirements and disturbances. Only by distinguishing the source of passively or actively effected state changes, such a system can react correctly to different environmental influences. Due to the integrated ability of some kind of self-perception, DE are not only qualified as artificial muscles in flexible, dynamic kinematics, but also as sensorimotor units in a broad spectrum of applications.

Literaturverzeichnis

- SEOK, S., A. WANG, D. OTTEN und S. KIM. Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion. In: IEEE, Hg. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE, 2012, S. 1970–1975.
- [2] CALDWELL, D. G., G. A. MEDRANO-CERDA und M. GOODWIN. Control of pneumatic muscle actuators. *IEEE Control Systems*, 1995, 15(1), 40– 48.
- [3] RAIBERT, M., K. BLANKESPOOR, G. NELSON und R. PLAYTER. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, **41**(2), 10822–10825.
- [4] HARVEY, J. A. Smart Materials. In: M. KUTZ, Hg. Handbook of Materials Selection. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc, 2002, S. 401– 418.
- [5] RÖNTGEN, W. C. Ueber die durch Electricität bewirkten Form- und Volumenänderungen von dielectrischen Körpern. *Annalen der Physik und Chemie*, 1880, **247**(13), 771–786.
- [6] ANDERSON, R. A. Mechanical stress in a dielectric solid from a uniform electric field. *Physical Review B*, 1986, **33**(2), 1302–1307.
- [7] PELRINE, R. E., R. KORNBLUH, J. JOSEPH und S. CHIBA. Electrostriction of polymer films for microactuators. In: IEEE, Hg. IEEE The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots: IEEE, 1997, S. 238–243.
- [8] PELRINE, R. E., R. D. KORNBLUH und J. P. JOSEPH. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, **64**(1), 77–85.
- [9] BAR-COHEN, Y., Hg. Smart structures and materials 1999 Electroactive polymer actuators and devices. Newport Beach, California: SPIE, 1999.
- [10] KOVACS, G., P. LOCHMATTER und M. WISSLER. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2), S306–S317.

- [11] CARPI, F. The European Scientific Network for Artificial Muscles and the EuroEAP conference. *Bulletin of Micro and Nanotechnologies*, 2011, 2(2), 5–9.
- [12] HOCHRADEL, K., S. J. RUPITSCH, A. SUTOR, R. LERCH, D.-K. VU und P. STEINMANN. Dynamic Performance of Dielectric Elastomers Utilized as Acoustic Actuators. *Applied Physics A*, 2012, 107(3), 531–538.
- [13] HAU, S., G. RIZZELLO und S. SEELECKE. A novel dielectric elastomer membrane actuator concept for high-force applications. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 23, 24–28.
- BÖSE, H. und E. FUß. Novel dielectric elastomer sensors for compression load detection. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2014, S. 905614.1–13.
- O'BRIEN, B., T. GISBY und I. A. ANDERSON. Stretch sensors for human body motion. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2014, S. 905618.1–9.
- [16] KOH, S. J. A., C. KEPLINGER, T. LI, S. BAUER und Z. SUO. Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted? *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(1), 33–41.
- [17] KORNBLUH, R. D., R. PELRINE, H. PRAHLAD, A. WONG-FOY, B. MCCOY, S. KIM, J. ECKERLE und T. LOW. Dielectric elastomers: Stretching the capabilities of energy harvesting. *MRS Bulletin*, 2012, 37(03), 246–253.
- [18] RUPITSCH, S. J. *Piezoelectric Sensors and Actuators*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019.
- [19] YUAN, X., S. CHANGGENG, G. YAN und Z. ZHENGHONG. Application review of dielectric electroactive polymers (DEAPs) and piezoelectric materials for vibration energy harvesting. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 744, 012077.1–11.
- [20] JEAN-MISTRAL, C., S. BASROUR und J. CHAILLOUT. Comparison of electroactive polymers for energy scavenging applications. *Smart Materials and Structures*, 2010, **19**(8), 085012.1–14.
- [21] 3M Deutschland. 3M[™] VHB[™] Klebebänder.
 URL: www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/vhb-tapes-de/, abgerufen am 18. 1. 2020.

- [22] LEAP technology. *Individual stretch sensors*. URL: www.leaptechnology.com/product/individual-stretch-sensors /, abgerufen am 18.1. 2020.
- [23] BAR-COHEN, Y. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: Reality, potential, and challenges. Bellingham (Wash., USA): SPIE Press, 2004.
- [24] CARPI, F., ROSSI, D. DE, KORNBLUH, R., PELRINE, R. und SOMMER-LARSEN, P. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008.
- [25] CARPI, F., I. ANDERSON, S. BAUER, G. FREDIANI, G. GALLONE, M. GEI, C. GRAAF, C. JEAN-MISTRAL, W. KAAL, G. KOFOD, M. KOLLOSCHE, 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. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(10), 105025.1–25.
- [26] JANOCHA, H. Actuators: Basics and Applications. Berlin: Springer, 2004.
- [27] SCHIESSLE, E. Industriesensorik: Sensortechnik und Messwertaufnahme. Würzburg: Vogel Business Media, 2016.
- [28] HERING, E. und G. SCHÖNFELDER. Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [29] LAUBE, W. Physiologie, Leistungsphysiologie, Pathophysiologie. In: A. HÜTER-BECKER und D. KLEIN, Hg. Biomechanik, Bewegungslehre, Leistungsphysiologie, Trainingslehre. Stuttgart: Thieme, 2011, S. 129– 308.
- [30] BAR-COHEN, Y. Electroactive Polymers as Artificial Muscles: A Review. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, **39**(6), 822–827.
- [31] LOTZ, P. Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt: Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2009.
- [32] TANAKA, T., I. NISHIO, S. T. SUN und S. UENO-NISHIO. Collapse of gels in an electric field. *Science*, 1982, **218**(4571), 467–469.

- [33] MAEDA, S., T. KATO, Y. OTSUKA, N. HOSOYA, M. CIANCHETTI und C. LASCHI. Large deformation of self-oscillating polymer gel. *Physical review. E*, 2016, **93**(1), 010501.1–5.
- [34] FENG, G.-H. und J.-W. TSAI. Three-dimensional multielectrodecontrolled two orthogonal direction bendable IPMC actuator with an active clasp. *Polymer Engineering & Science*, 2013, **53**(9), 2004–2017.
- [35] SHAHINPOOR, M. *Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs)*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015.
- [36] BAUGHMAN, R. H. Conducting polymer artificial muscles. *Synthetic Metals*, 1996, **78**(3), 339–353.
- [37] ALICI, G., V. DEVAUD, P. RENAUD und G. SPINKS. Conducting polymer microactuators operating in air. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, **19**(2), 025017.1–9.
- [38] BLOCK, H. und J. P. KELLY. Electro-rheology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988, **21**(12), 1661–1677.
- [39] BAUGHMAN, R. H. Carbon Nanotube Actuators. *Science*, 1999, **284**(5418), 1340–1344.
- [40] O'HALLORAN, A., F. O'MALLEY und P. MCHUGH. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(7), 071101.1–10.
- [41] CARPI, F., R. KORNBLUH, P. SOMMER-LARSEN und G. ALICI. Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration & biomimetics*, 2011, **6**(4), 045006.1–10.
- [42] SU, J., J. S. HARRISON, T. L. CLAIR, Y. BAR-COHEN und S. LEARY. Electrostrictive Graft Elastomers and Applications. In: Q. M. ZHANG, T. FURUKAWA, Y. BAR-COHEN und J. SCHEINBEIM, Hg. *Electroactive polymers (EAP)*: Materials Research Society, 1999, S. 131–136.
- [43] KIM, J. und Y. B. SEO. Electro-active paper actuators. *Smart Materials and Structures*, 2002, **11**(3), 355–360.
- [44] MADDEN, J. D., N. A. VANDESTEEG, P. A. ANQUETIL, P. G. MADDEN, A. TAKSHI, R. Z. PYTEL, S. R. LAFONTAINE, P. A. WIERINGA und I. W. HUNTER. Artificial Muscle Technology: Physical Principles and Naval Prospects. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(3), 706–728.

- [45] AN, Y. und M. T. SHAW. Actuating properties of soft gels with ordered iron particles: Basis for a shear actuator. *Smart Materials and Structures*, 2003, **12**(2), 157–163.
- [46] OHM, C., M. BREHMER und R. ZENTEL. Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors. *Advanced materials*, 2010, **22**(31), 3366–3387.
- [47] MADSEN, F. B., A. E. DAUGAARD, S. HVILSTED und A. L. SKOV. The Current State of Silicone-Based Dielectric Elastomer Transducers. *Macromolecular rapid communications*, 2016, 37(5), 378–413.
- [48] PELRINE, R., R. KORNBLUH, J. JOSEPH, R. HEYDT, Q. PEI und S. CHIBA. High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. *Materials Science and Engineering: C*, 2000, **11**(2), 89–100.
- [49] ROSSET, S. und H. R. SHEA. Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators. *Applied Physics A*, 2013, 110(2), 281– 307.
- [50] JANOCHA, H. *Adaptronics and Smart Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [51] BIGGS, J., K. DANIELMEIER, J. HITZBLECK, J. KRAUSE, T. KRIDL, S. NOWAK, E. ORSELLI, X. QUAN, D. SCHAPELER, W. SUTHERLAND und J. WAGNER. Elektroaktive Polymere: Entwicklungen und Perspektiven dielektrischer Elastomere. *Angewandte Chemie*, 2013, 125(36), 9581–9595.
- [52] MATYSEK, M. Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt: Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2009.
- [53] DIACONU, I., D.-O. DOROHOI und F. TOPOLICEANU. Electrostriction of a Polyurethane Elastomer-Based Polyester. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(4), 876–880.
- [54] KRAKOVSKÝ, I., T. ROMIJN und A. POSTHUMA DE BOER. A few remarks on the electrostriction of elastomers. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(1), 628–629.
- [55] THUMMALA, P., L. HUANG, Z. ZHANG und M. A. E. ANDERSEN. Analysis of Dielectric Electro Active Polymer actuator and its high voltage driving circuits. In: IEEE, Hg. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*: IEEE, 2012, S. 458–461.

- [56] SHANKAR, R., T. K. GHOSH und R. J. SPONTAK. Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators. *Soft matter*, 2007, 3(9), 1116– 1129.
- [57] ROSSET, S., O. A. ARAROMI, S. SCHLATTER und H. R. SHEA. Fabrication Process of Silicone-based Dielectric Elastomer Actuators. *Journal of visualized experiments : JoVE*, 2016, J. Vis. Exp.(108), e53423.1–13.
- [58] MERK, J., J. EHRLICH, A. BARROIS, H. BÖSE und B. BRUNNER. Kombinierte Dehnungs- und Näherungssensoren für multifunktionale Oberflächen. In: VDI/VDE, Hg. Sensoren und Messsysteme 2014 - Beiträge der 17. ITG/GMA-Fachtagung: VDE Verlag GmbH, 2014, S. 1–6.
- [59] 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. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943029.1–12.
- [60] KORNBLUH, R., R. PELRINE, Q. PEI, R. HEYDT, S. STANFORD und J. ECKERLE. Electroelastomers: applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials: SPIE, 2002, S. 254–270.
- [61] KORNBLUH, R. Fundamental Configurations for Dielectric Elastomer Actuators. In: F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN, Hg. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008, S. 79–90.
- [62] ROSSET, S. und H. R. SHEA. Towards fast, reliable, and manufacturable DEAs: miniaturized motor and Rupert the rolling robot. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943009.1–11.
- [63] KOFOD, G., W. WIRGES, M. PAAJANEN und S. BAUER. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(8), 081916.1–3.
- [64] HILL, M., G. RIZZELLO und S. SEELECKE. Development and experimental characterization of a pneumatic valve actuated by a dielectric elastomer membrane. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(8), 085023.1–11.
- [65] HEYDT, R., R. KORNBLUH, J. ECKERLE und R. PELRINE. Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers, 2006, 61681M.1–8.
- [66] RUSTIGHI, E., W. KAAL, S. HEROLD und A. KUBBARA. Experimental Characterisation of a Flat Dielectric Elastomer Loudspeaker. *Actuators*, 2018, **7**(2), 28.
- [67] HUBERT, A. R., D. S. BRODIE, I. A. MCALLISTER und J. N. GLEA-SON. Artificial Muscle Camera Lens Actuator. Apple Inc. Patent-Nr. US2014/0168799 A1, veröffentlicht am 19.06.2014.
- [68] SHIAN, S., R. M. DIEBOLD und D. R. CLARKE. High-speed, compact, adaptive lenses using in-line transparent dielectric elastomer actuator membranes. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2013, S. 86872D.1–7.
- [69] SHIAN, S., R. M. DIEBOLD und D. R. CLARKE. Tunable lenses using transparent dielectric elastomer actuators. *Optics express*, 2013, 21(7), 8669–8676.
- [70] 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. SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials: SPIE, 2002, S. 126–137.
- SCHLAAK, H. F., M. JUNGMANN, M. MATYSEK und P. LOTZ. Novel multilayer electrostatic solid state actuators with elastic dielectric. In: Y. BAR-COHEN, Hg. Smart Structures and Materials: SPIE, 2005, S. 121– 133.
- [72] GIOUSOUF, M. und G. KOVACS. Dielectric elastomer actuators used for pneumatic valve technology. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(10), 104010.1–6.
- [73] CARPI, F., C. SALARIS und D. DE ROSSI. Folded dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and Structures*, 2007, **16**(2), S300–S305.
- [74] CARPI, F. und D. DE ROSSI. Bioinspired actuation of the eyeballs of an android robotic face: concept and preliminary investigations. *Bioinspiration & biomimetics*, 2007, 2(2), S50–S63.

- [75] GOH, S. C.-K. und G.-K. LAU. Dielectric elastomeric bimorphs using electrolessly deposited silver electrodes. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2010, S. 764215.1–12.
- [76] KADOOKA, K., H. IMAMURA und M. TAYA. Tactile sensor integrated dielectric elastomer actuator for simultaneous actuation and sensing. In: Y. BAR-COHEN und F. VIDAL, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2016, 97982H.1–10.
- [77] IMAMURA, H., K. KADOOKA und M. TAYA. A variable stiffness dielectric elastomer actuator based on electrostatic chucking. *Soft matter*, 2017, **13**(18), 3440–3448.
- [78] LAU, G.-K., H.-T. LIM, J.-Y. TEO und Y.-W. CHIN. Lightweight mechanical amplifiers for rolled dielectric elastomer actuators and their integration with bio-inspired wing flappers. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(2), 025021.1–13.
- [79] CARPI, F., A. MIGLIORE, G. SERRA und D. DE ROSSI. Helical dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(6), 1210–1216.
- [80] WAX, S. G. und R. R. SANDS. Electroactive Polymer Actuators and Devices. In: Y. BAR-COHEN, Hg. Smart structures and materials 1999 *Electroactive polymer actuators and devices*: SPIE, 1999, S. 2–10.
- [81] PREUMONT, A. *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*. Amsterdam (NL): Springer Netherlands, 2006.
- [82] MULGAONKAR, A. P., R. KORNBLUH und H. HERR. A New Frontier for Orthotics and Prosthetics: Application of Dielectric Elastomer Actuators to Bionics. In: F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN, Hg. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008, S. 193–206.
- [83] PELRINE, R. und R. KORNBLUH. Electromechanical Transduction Effects in Dielectric Elastomers: Actuation, Sensing, Stiffness Modulation and Electric Energy Generation. In: F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN, Hg. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008, S. 3–12.

- [84] BIGUÉ, J.-P. L. und J.-S. PLANTE. Experimental Study of Dielectric Elastomer Actuator Energy Conversion Efficiency. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**(1), 169–177.
- [85] KORNBLUH, R. und R. PELRINE. High-Performance Acrylic and Silicone Elastomers. In: F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN, Hg. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008, S. 33–42.
- [86] BÖSE, H., E. FUß und J. EHRLICH. Capacitive Sensor Mats for Pressure Detection with High Sensitivity. In: AMA ASSOCIATION FOR SENSORS AND MEASUREMENT, Hg. Proceedings SENSOR 2015, AMA Conferences 2015: AMA, 2015, S. 55–60.
- [87] 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. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943025.1–8.
- [88] PELRINE, R., R. D. KORNBLUH, J. ECKERLE, P. JEUCK, S. OH, Q. PEI und S. STANFORD. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials: SPIE, 2001, S. 148–156.
- [89] VERTECHY, R. und M. FONTANA. Dielectric elastomers for wave energy harvesting. *SPIE Newsroom*, 2015, 1–3.
- [90] BRUNNER, B., J. ZIEGLER und V. HAGENGUTH. *Textilmaterial mit eingearbeiteten Elastomersensoren*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Patent-Nr. DE102015105004 B3, veröffentlicht am 01.09.2016.
- [91] YU, F., A. BILBERG, L. XIAO und K. B. YDERSTRAEDE. Foot edema simulation and monitoring using dielectric electro-active polymer sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **225**, 33–40.
- [92] ARAROMI, O. A. und S. C. BURGESS. A finite element approach for modelling multilayer unimorph dielectric elastomer actuators with inhomogeneous layer geometry. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(3), 032001.1–11.
- [93] BAR-COHEN, Y. Electroactive polymers for refreshable Braille displays. *SPIE Newsroom*, 2009, 1–3.

- [94] ALKASSAR. *Blutkreislauf-Unterstützungsvorrichtung*. Universitätsklinikum Erlangen. Patent-Nr. DE102016115940A, veröffentlicht am 03.01.2018.
- [95] PEI, Q., M. ROSENTHAL, S. STANFORD, H. PRAHLAD und R. PELRINE. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators. *Smart Materials and Structures*, 2004, **13**(5), N86–N92.
- [96] NGUYEN, C. T., H. PHUNG, T. D. NGUYEN, C. LEE, U. KIM, D. LEE, H. MOON, J. KOO, J.-d. NAM und H. R. CHOI. A small biomimetic quadruped robot driven by multistacked dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(6), 065005.1–12.
- [97] MATYSEK, M., P. LOTZ, T. WINTERSTEIN und H. F. SCHLAAK. Dielectric elastomer actuators for tactile displays. In: IEEE, Hg. *World Haptics Conference (WHC)*: IEEE, 2009, S. 290–295.
- [98] YORK, A., J. DUNN und S. SEELECKE. Systematic approach to development of pressure sensors using dielectric electro-active polymer membranes. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9), 094015.1– 10.
- [99] CARPI, F., G. FREDIANI, S. TURCO und D. DE ROSSI. Bioinspired Tunable Lens with Muscle-Like Electroactive Elastomers. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(21), 4152–4158.
- [100] GRAETZEL, C., M. SUTER und M. ASCHWANDEN. Reducing laser speckle with electroactive polymer actuators. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943004.1–8.
- [101] THUMMALA, P., Z. ZHANG, M. A. E. ANDERSEN und O. C. THOMSEN. A high voltage DC-DC converter driving a Dielectric Electro Active Polymer actuator for wind turbine flaps. In: IEEE, Hg. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC): IEEE, 2012, S. 1–7.
- [102] WALKER, C. R. und I. A. ANDERSON. Monitoring diver kinematics with dielectric elastomer sensors. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2017, S. 1016307.1–11.
- BOLZMACHER, C., M. HAFEZ, M. BENALI KHOUDJA, P. BERNARDONI und S. DUBOWSKY. Polymer-based actuators for virtual reality devices. In: Y. BAR-COHEN, Hg. Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD): SPIE, 2004, S. 281–289.

- [104] iFeel Tactile systems. Our future vibration and sensoring engine: based on Dielectrical Polymer (DEA) Technology. URL: www.ifeelsystems.com/smart-vibration-engine/, abgerufen am 18. 1. 2020.
- [105] HEYDT, R., R. KORNBLUH, R. PELRINE und V. MASON. Design and Performance of an Electrostrictive-Polymer-Film Acoustic Actuator. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 215(2), 297–311.
- [106] CHOI, S. und K. J. KUCHENBECKER. Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(9), 2093–2104.
- [107] MATYSEK, M., H. HAUS, H. MÖßINGER, 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. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2011, S. 797612.1–11.
- [108] ZHANG, Z. und M. A. E. ANDERSEN. Electronics drivers for high voltage dielectric electro active polymer (DEAP) applications. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943008.1–10.
- [109] EITZEN, L., C. GRAF und J. MAAS. Cascaded bidirectional flyback converter driving DEAP transducers. In: IEEE, Hg. 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON): IEEE, 2011, S. 1226–1231.
- [110] THUMMALA, P., H. SCHNEIDER, Z. ZHANG, M. A. E. ANDERSEN und R. SARBAN. New Incremental Actuators Based on Electroactive Polymer: Conceptual, Control, and Driver Design Considerations. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3), 1496–1508.
- [11] O'BRIEN, B. M., S. ROSSET, I. A. ANDERSON und H. R. SHEA. Ion implanted dielectric elastomer circuits. *Applied Physics A*, 2013, 111(3), 943–950.
- [112] MARETTE, A., A. POULIN, N. BESSE, S. ROSSET, D. BRIAND und H. SHEA. Flexible Zinc-Tin Oxide Thin Film Transistors Operating at 1 kV for Integrated Switching of Dielectric Elastomer Actuators Arrays. Advanced materials, 2017, 29(30), 1700880.1–6.

- [113] GISBY, T. A., E. P. CALIUS, S. XIE und I. A. ANDERSON. An adaptive control method for dielectric elastomer devices. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*: SPIE, 2008, S. 69271C.1–8.
- [114] GISBY, T. A., B. M. O'BRIEN, S. Q. XIE, E. P. CALIUS und I. A. ANDER-SON. Closed loop control of dielectric elastomer actuators. In: Y. BAR-COHEN und F. CARPI, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2011, S. 797620.1– 9.
- [115] GU, G.-Y., U. GUPTA, J. ZHU, L.-M. ZHU und X.-Y. ZHU. Feedforward deformation control of a dielectric elastomer actuator based on a non-linear dynamic model. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(4), 042907.1–5.
- [116] SCHLÖGL, T. und S. LEYENDECKER. Electrostatic–viscoelastic finite element model of dielectric actuators. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, **299**, 421–439.
- [117] PARK, H. S. und T. D. NGUYEN. Viscoelastic effects on electromechanical instabilities in dielectric elastomers. Soft matter, 2013, 9(4), 1031– 1042.
- [118] ZOU, J., G.-Y. GU und L.-M. ZHU. Open-Loop Control of Creep and Vibration in Dielectric Elastomer Actuators With Phenomenological Models. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1), 51–58.
- [119] NGUYEN, C. H., G. ALICI und R. MUTLU. A Compliant Translational Mechanism Based on Dielectric Elastomer Actuators. *Journal of Mechanical Design*, 2014, **136**(6), 061009.1–9.
- [120] LI, L., J. LI, L. QIN, J. CAO, M. S. KANKANHALLI und J. ZHU. Deep Reinforcement Learning in Soft Viscoelastic Actuator of Dielectric Elastomer. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2), 2094– 2100.
- [121] TOTH, L. A. und A. A. GOLDENBERG. Control system design for a dielectric elastomer actuator: the sensory subsystem. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials: SPIE, 2002, S. 323–334.
- [122] TAYA, M., W. J. KIM und K. ONO. Piezoresistivity of a short fiber/elastomer matrix composite. *Mechanics of Materials*, 1998, 28(1-4), 53-59.

- [123] CARPI, F., G. FANTONI, G. FREDIANI und D. DE ROSSI. Buckling Actuators with Integrated Displacement Sensor. In: F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN, Hg. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*. Oxford (UK), Amsterdam (NL) und Boston (Mass., USA): Elsevier, 2008, S. 132–140.
- [124] O'BRIEN, B. M., E. P. CALIUS, T. INAMURA, S. Q. XIE und I. A. ANDER-SON. Dielectric elastomer switches for smart artificial muscles. *Applied Physics A*, 2010, **100**(2), 385–389.
- [125] HENKE, E.-F. M., K. E. WILSON und I. A. ANDERSON. Entirely soft dielectric elastomer robots. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2017, 101631N.1–11.
- [126] GISBY, T. A., B. M. O'BRIEN und I. A. ANDERSON. Self sensing feedback for dielectric elastomer actuators. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(19), 193703.1–4.
- [127] Datenblatt. *LEAP Wireless Sensor Electronic Embedded Software Design Specification V1.0.* THOMSEN, B. LEAP technology, 2016.
- [128] Datenblatt. FDC2212, FDC2214, FDC2112, FDC2114. Texas Instruments, 2015.
- [129] XU, D., S. MICHEL, T. MCKAY, B. O'BRIEN, T. GISBY und I. ANDERSON. Sensing frequency design for capacitance feedback of dielectric elastomers. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 232, 195–201.
- [130] Datenblatt. *CAV444 Linear C/V-Converter for capacitive input signals*. Analog Microelectronics GmbH, 2014.
- [131] ZHANG, R. Dielectric elastomer actuation performance enhancement, higher order modelling and self-sensing control. PhD-Thesis, University of Bath, Bath: Department of Mechanical Engineering, 2017.
- [132] LERCH, R. *Elektrische Messtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- 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. *The 14th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*: SPIE, 2007, S. 652415.1–11.

- [134] NGUYEN, C. H., D. V. THUY, J. PARK, D. KIM, J. KOO, Y. LEE, J.-d. NAM und H. R. CHOI. A dielectric elastomer actuator with self-sensing capability. In: Y. BAR-COHEN, Hg. *The 15th International Symposium* on: Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2008, S. 69270V.1–8.
- [135] RIZZELLO, G., D. NASO, A. YORK und S. SEELECKE. A Self-Sensing Approach for Dielectric Elastomer Actuators Based on Online Estimation Algorithms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(2), 728–738.
- [136] KEPLINGER, C., M. KALTENBRUNNER, N. ARNOLD und S. BAUER. Capacitive extensometry for transient strain analysis of dielectric elastomer actuators. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19), 192903.1–3.
- [137] RIZZELLO, G., D. NASO, A. YORK und S. SEELECKE. Self-sensing in dielectric electro-active polymer actuator using linear-in-parametes online estimation. In: IEEE, Hg. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM): IEEE, 2015, S. 300–306.
- [138] HOFFSTADT, T. und J. MAAS. Self-sensing Algorithms for Dielectric Elastomer Multilayer Stack-Transducers. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(21), 373–379.
- [139] HOFFSTADT, T., M. GRIESE und J. MAAS. Online identification algorithms for integrated dielectric electroactive polymer sensors and self-sensing concepts. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(10), 104007.1–13.
- [140] JUNG, K., K. J. KIM und H. R. CHOI. Self-sensing of dielectric elastomer actuator. In: Y. BAR-COHEN, Hg. The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2008, 69271S.1–10.
- [141] ROSSET, S., B. M. O'BRIEN, T. GISBY, D. XU, H. R. SHEA und I. A. ANDER-SON. Self-sensing dielectric elastomer actuators in closed-loop operation. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(10), 104018.1–16.
- [142] Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme. EuroEAP Society Challenge 2018 - MeldoDEA: A Dielectric Elastomer Actuator based Loudspeaker.
 UDL survey imel ude not/mediathely abgerufer am so a conserve

URL: www.imsl-uds.net/mediathek, abgerufen am 10. 2. 2020.

[143] ZHANG, R. und O. AMFT. Monitoring chewing and eating in free-living using smart eyeglasses. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2018, 22(1), 23–32.

- StretchSense Limited. Smart Glove (Pair).
 URL: https://stretchsense.com/product/smart-glove/, abgerufen am 10. 2. 2020.
- [145] BÖSE, H., M. THUY und S. STIER. Wearable operation device with different types of dielectric elastomer sensors. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2018, S. 105940X.1–12.
- [146] DERUNGS, A., C. SCHUSTER-AMFT und O. AMFT. Physical Activity Comparison Between Body Sides in Hemiparetic Patients Using Wearable Motion Sensors in Free-Living and Therapy: A Case Series. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2018, 6(136), 1–13.
- [147] VERL, A., A. ALBU-SCHÄFFER, O. BROCK und A. RAATZ. Soft Robotics
 Transferring Theory to Application. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [148] Datenblatt. *Manual CT25.2 Polymer Actuator*. Compliant Transducer Systems GmbH, 2018.
- [149] JUNGMANN, M. und H. F. SCHLAAK. Miniaturised electrostatic tactile display with high structural compliance. In: S. A. WALL, Hg. Conference Proceedings - Eurohaptics International Conference 2002, 2002, S. 12–18.
- [150] LOTZ, P., M. MATYSEK und H. F. SCHLAAK. Fabrication and Application of Miniaturized Dielectric Elastomer Stack Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(1), 58–66.
- [151] JUNG, K., K. J. KIM und H. R. CHOI. A self-sensing dielectric elastomer actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **143**(2), 343–351.
- [152] LLOVERA-SEGOVIA, P., V. FUSTER, D. LETIHON und R. VORIAS. Self sensing of elastomer actuation by means of AC superimposed current. In: IEEE, Hg. IEEE SENSORS 2014 Proceedings: IEEE, 2014, S. 2101–2103.
- [153] RIZZELLO, G., D. NASO, A. YORK und S. SEELECKE. Model-based PID control of a Dielectric Electro-Active Polymer Positioning System. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3), 10926–10933.
- [154] RIZZELLO, G., D. NASO, A. YORK und S. SEELECKE. Closed loop control of dielectric elastomer actuators based on self-sensing displacement feedback. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(3), 035034.1–13.

- XIE, S. Q., P. F. RAMSON, D. D. GRAAF, E. P. CALIUS und I. A. ANDERSON. An Adaptive Control System for Dielectric Elastomers. In: IEEE, Hg. 2005 IEEE International Conference on Industrial Technology: IEEE, 2005, S. 335–340.
- [156] MÖßINGER, H. Demonstrating the application of dielectric polymer actuators for tactile feedback in a mobile consumer device. Technischer Bericht, Philips Research Eindhoven, PR-TN-2010-00361, 2010.
- [157] Datenblatt. OC100G, OC100HG. Voltage Multiplyers Inc., 2017.
- [158] Datenblatt. *PhotoMOS AQV25x, AQV25xH HE1 Form A*. Panasonic Corporation, 2017.
- [159] Datenblatt. *High Voltage IGBT IXGF*30N400. IXYS Corporation, 2009.
- [160] Datenblatt. *SIPMOS Power Transistor BUZ* 50 A. Siemens Semiconductor Group, 1996.
- [161] Datenblatt. *High Voltage Power MOSFETs IXTA*02N450HV, *IXTT*02N450HV. IXYS Corporation, 2012.
- [162] Datenblatt. *Wireless Sensor Electronics V1*.0. THOMSEN, B. LEAP technology, 2018.
- [163] ISO. 23529:2016-11. Elastomere Allgemeine Bedingungen für die Vorbereitung und Konditionierung von Prüfkörpern für physikalische Prüfverfahren. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 11.2016.
- [164] DIN EN ISO. 291:2008-08. *Kunststoffe Normalklimate für Konditionierung und Prüfung*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 8.2008.
- [165] ISO. 5893:2002-07. Prüfeinrichtungen für Elastomere und Kunststoffe
 Zug-, Biege- und Druckprüfmaschinen mit konstanter Geschwindigkeit - Beschreibung. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 7.2002.
- [166] ISO. 527-1:2012-02. *Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2.2012.
- [167] DIN EN ISO. 899-1:2018-03. Kunststoffe Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 3.2018.
- [168] DIN. 53535:1982-03. Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Grundlagen für dynamische Prüfverfahren. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 3.1982.
- [169] ISO. 188:2011-10. Elastomere oder thermoplastische Elastomere Prüfung zur Bestimmung der beschleunigten Alterung und der Hitzebeständigkeit. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 10.2011.

- [170] DIN. 53508:2000-03. *Prüfung von Kautschuk und Elastomeren Künstliche Alterung*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 3.2.
- [171] ISO. 6914:2013-12. Elastomere oder thermoplastische Elastomere Bestimmung der Alterungseigenschaften durch Messung der Spannungsrelaxation. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 12.2013.
- [172] MITRA, S. und T. ACHARYA. Gesture Recognition: A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2007, **37**(3), 311–324.
- [173] WIGDOR, D. und D. WIXON. Brave NUI world: Designing natural user interfaces for touch and gesture. Amsterdam: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2011.
- [174] PAVLOVIC, V. I., R. SHARMA und T. S. HUANG. Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: a review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(7), 677–695.
- [175] QUIGLEY, M., B. GERKEY, K. CONLEY, J. FAUST, T. FOOTE, J. LEIBS, E. BERGER, R. WHEELER und A. NG. ROS: an open-source Robot Operating System. In: IEEE, Hg. ICRA Workshop on Open Source Software: IEEE, 2009.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] YOO, I. S., S. REITELSHÖFER, M. LANDGRAF und J. FRANKE. Artificial muscles, made of dielectric elastomer actuators - A promising solution for inherently compliant future robots. In: A. VERL, A. ALBU-SCHÄFFER, O. BROCK und A. RAATZ, Hg. Soft Robotics. Berlin und Heidelberg: Springer, 2015, S. 33–41.
- [P2] 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. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2016, S. 97981Y.1–9.
- [P3] REITELSHÖFER, S., M. LANDGRAF, D. GRÄF, L. BUGERT und J. FRANKE. A New Production Process for Soft Actuators and Sensors Based on Dielectric Elastomers Intended for Safe Human Robot Interaction. In: IEEE, Hg. 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII): IEEE, 2015, S. 51–56.
- [P4] LANDGRAF, M., M. HEDGES, S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Aerosol Jet Printing and Lightweight Power Electronics for Dielectric Elastomer Actuators. In: J. FRANKE, Hg. 3rd International Electric Drives Production Conference (E|DPC): IEEE, 2013, S. 1–7.
- [P5] LANDGRAF, M., S. REITELSHÖFER, V. HOFMANN, F. ZIMBER, I. S. YOO und J. FRANKE. Intuitive Gesture Control of Robots with a Sensor Arm Sleeve Based on Dielectric Elastomer Sensors. In: IEEE RAS & EMBS, Hg. 6th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2016, S. 114–119.
- [P6] LANDGRAF, M., S. REITELSHÖFER, I. S. YOO und J. FRANKE. Challenges in gesture control of robots based on multi-degree of freedom movement recognition with dielectric elastomer sensors. In: EUROEAP SOCIETY, Hg. 6th International Conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) - Transducers & Artificial Muscles (EuroEAP), 2016, S. 54.
- [P7] LANDGRAF, M., I. S. YOO, J. SESSNER, M. MOOSER, D. KAUFMANN, D. MATTEJAT, S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Gesture Recognition with Sensor Data Fusion of Two Complementary Sensing Methods. In: IEEE, Hg. 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob): IEEE, 2018, S. 795–800.

- [P8] SCHOLZ, M., A. KÜHL, A. HÖFT, M. LANDGRAF, M. SCHNEIDER, R. BÖHM, G. BADEL, G. LOTHES, K. ANGERER, A. HOHMANN, P. SIMON, F. KONWITSCHNY, V. SCHARMER, T. DESS, G. MEHLMANN und K. VEERASHEKAR. StroMiS - Studie zur technisch-wirtschaftlichen Analyse der Stromerzeugung aus Mikrokraftwerken in Serienfertigung. 2019.
- [P9] LANDGRAF, M., U. ZORELL, T. WETZEL, S. REITELSHÖFER, I. S. YOO und J. FRANKE. Dielectric elastomer actuators as self-sensing devices: a new method of superimposing actuating and sensing signals. In: Y. BAR-COHEN, Hg. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2015, S. 943014.1–9.
- [P10] LANDGRAF, M., J. OLLECH, T. KLEMM, J. SCHAUDE, S. REITELSHÖFER und J. FRANKE. Lightweight Control Method for Dielectric Elastomer Actuators as Self-Sensing Artificial Muscles. In: IEEE, Hg. 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS): IEEE, 2018, S. 65–70.
- [P11] LANDGRAF, M., S. REITELSHÖFER, I. S. YOO und J. FRANKE. Development of a lightweight hardware for controlling multiple dielectric elastomer actuators. In: EUROEAP SOCIETY, Hg. 4th International Conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) - Transducers & Artificial Muscles (EuroEAP), 2014, S. 43–44.
- [P12] REITELSHÖFER, S., M. LANDGRAF, I. S. YOO, J. HÖRBER, 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: IEEE RAS & EMBS, Hg. 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob): IEEE, 2014, S. 803–808.
- [P13] YOO, I. S., M. LANDGRAF, C. RAMER, S. REITELSHÖFER, C. ZIEGLER und J. FRANKE. My new colleague has artificial muscles: A DEA based approach for inherently compliant robotic systems. *Production Engineering Research and Development*, 2014, 8(6), 711–717.
- [P14] LANDGRAF, M. Sensortechnik: Sensoren zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung (externe Sensoren): Kapazitive Sensoren. In: R. MÜLLER, J. FRANKE, D. HENRICH, B. KUHLENKÖTTER, A. RAATZ und A. VERL, Hg. Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. München: Hanser, 2019, S. 79–82.

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten*

- [S1] GRUBER, C., M. LANDGRAF und J. FRANKE. *Identifizierung und Entwicklung von pulsweitenmodulierten Ansteuerschaltungen für den Betrieb künstlicher Muskeln*. Studienarbeit. Erlangen, 2013.
- [S2] LIERET, M., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Konzeption und Realisierung eines Messaufbaus zur Bestimmung des elektromechanischen Wirkungsgrads künstlicher Muskeln. Bachelorarbeit. Erlangen, 2014.
- [S₃] FEHRLE, A., M. LANDGRAF und J. FRANKE. *Optimierung der Funktion und des Wirkungsgrads künstlicher Muskeln bezogen auf die Steuerungshardware*. Masterarbeit. Erlangen, 2015.
- [S4] BETZ, M., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Entwicklung einer frequenzund pulsweitenvariablen Ansteuerung für dielektrische Elastomeraktoren im Mehr-Quadrantenbetrieb. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016.
- [S5] LÖHNIG, C., M. LANDGRAF und J. FRANKE. *Aufbau eines optischen Messplatzes zur Bestimmung der Kontraktionsfähigkeit dielektrischer Elastomeraktoren*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016.
- [S6] SCHAUDE, J., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Evaluierung alternativer Ansteuerungsverfahren für einen stufenlosen Betrieb dielektrischer Elastomeraktoren. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017.
- [S7] WENZEL, L., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Entwicklung eines Demonstrators zur Veranschaulichung des Potenzials dielektrischer Elastomeraktoren anhand eines taktilen, haptischen Displays. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018.
- [S8] WIELAND, B., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Entwicklung eines auf dielektrischen Elastomersensoren basierenden sensorischen Armstrumpfs und Implementierung in ROS. Diplomarbeit. Erlangen, 2014.
- [S9] ZIMBER, F., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Entwicklung einer intuitiven Ansteuerung von Robotern mithilfe körpernaher Befestigung dielektrischer Elastomersensoren. Masterarbeit. Erlangen, 2015.
- [S10] EITH, F., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Optimierung eines körpernahen Sensorsystems zur Erkennung von Armbewegungen mittels dielektrischer Elastomersensoren. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015.

^{*} Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den beziehungsweise die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S11] DIEßL, A., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Evaluierung verschiedener Auswerteverfahren dielektrischer Elastomersensortechnologie in sensorischen Oberflächen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015.
- [S12] HOFMANN, V., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Weiterentwicklung einer Gestensteuerung mittels dielektrischer Elastomersensoren an einem Armstrumpf zum geschwindigkeitsabhängigen Verfahren eines Roboters. Masterarbeit. Erlangen, 2015.
- [S13] BENKER, A., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Weiterentwicklung eines tragbaren Sensorsystems mit mehreren Freiheitsgraden zu einer intuitiven, drahtlosen Gestensteuerung von Robotern. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016.
- [S14] MATTEJAT, D., M. LANDGRAF und J. FRANKE. *Analyse und Optimierung zeitkritischer softwareseitiger Programmabläufe zur Gestensteuerung eines Roboters mit ROS*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016.
- [S15] MOOSER, M., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Implementierung erweiterter Bewegungsmöglichkeiten verschiedener Robotersysteme für eine intuitive Gestensteuerung. Projektarbeit. Erlangen, 2017.
- [S16] KAISER, D., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Alternative Auswerteverfahren mehrerer dielektrischer Elastomersensoren in einem flexiblen Gestenerfassungssystem. Masterarbeit. Erlangen, 2017.
- [S17] MOOSER, M., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Untersuchung alternativer Auswerteverfahren dielektrischer Elastomersensoren zur ROSbasierten Gestensteuerung von Robotern. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S18] WEIß, A., M. LANDGRAF, V. VIEROW und J. FRANKE. Erweiterung erkennbarer Freiheitsgrade und Modellbildung zur Visualisierung einer auf dielektrischen Elastomersensoren basierenden Gestenerkennung. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018.
- [S19] HARNECKER, L., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Entwicklung einer alternativen Auswerteschaltung auf Basis inhärenter Filtereigenschaften dielektrischer Elastomersensoren. Projektarbeit. Erlangen, 2018.
- [S20] ZORELL, U., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Konzeptionierung und Realisierung der simultanen Verwendung dielektrischer Elastomere als Aktoren und Sensoren. Masterarbeit. Erlangen, 2014.
- [S21] WETZEL, T., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Simultane Kapazitätsauswertung von dielektrischen Elastomeraktoren während des pulsweitenmodulierten Aktorbetriebs. Masterarbeit. Erlangen, 2015.

- [S22] CHEN, C., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Reduzierung der Schaltungskomplexität und Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche zur simultanen Ansteuerung und Auswertung dielektrischer Elastomeraktoren. Masterarbeit. Erlangen, 2016.
- [S23] ARMBRUSTER, M., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Filterbasierte Auswertung selbst-fühlender künstlicher Muskeln auf Basis hochspannungsgesteuerter dielektrischer Elastomeraktoren. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017.
- [S24] OLLECH, J., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Überlagerung von Sensorund Steuersignalen auf Basis nichtlinearer MOSFET-Kennlinien zur simultanen Auswertung und Ansteuerung dielektrischer Elastomeraktoren. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S25] MÜLLER, S., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Aktorischer Betrieb und simultane Auswertung mehrerer mit zentraler Energiequelle versorgter selbstfühlender künstlicher Muskeln. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018.
- [S26] PHAM, D. H., M. LANDGRAF und J. FRANKE. Evaluierung der Leistungselektronik und unterstützte manuelle Herstellung selbstfühlender Aktoren auf Basis dielektrischer Elastomere. Masterarbeit. Erlangen, 2019.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020): 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:

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Lehrstuhl für Photonische Technologien

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 Projektierung 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 Flexibilitätssteigerung 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 Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid Beitrag zum automatisierten Bearbeiten 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 Steuerungssoftware 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 mit kooperierenden 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 Fokusparameter 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 Spulenwickeln 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 Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth 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 Lebensdauervorhersage 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, o 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 Negendanck 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, o 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, o 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 Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter 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, o 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 Prechtl 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, o 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 bleifreie 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 Mikrojustiertechnik 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 Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer 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 Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6. Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit 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 prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen 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 wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen 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 verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen 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 Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme 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 Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen 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 Rührreibschweißen 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, o 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 Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen 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 Rührreibschweißen 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 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 215: Christian Matzner Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung 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 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 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-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 222: Thomas Rechtenwald Quasi-isothermes Laserstrahlsintern 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 Feuser 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 Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung 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 Laserstrahllöten 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 Laserstrahlschweißen 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 Schneidclinchverfahrens 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 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 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 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 Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage 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 Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition 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 aushärtbarer 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 Presshärtprozess 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 Zöller 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 energieflexibelen 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 Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl 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, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis 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 montageführender 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, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten 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 Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

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 Zöller 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 330: Stephan Rapp Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.

Band 331: Michael Scholz Intralogistics Execution System mit

2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Modellbasierte Prozesskettenabbildung

rührreibgeschweißter Aluminium-

halbzeuge zur umformtechnischen

Herstellung höchstfester Leichtbau-

Band 326: Tobias Gnibl

strukturteile

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. in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Strategien der Produktindividualisierung

Band 332: Eva Bogner

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 Heißcrimpprozesses 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 Umformund 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, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle 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 ausscheidungshärtbaren 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 Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile 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

Abstract

Due to their inherent properties, dielectric elastomers depict a promising technology with high potential for the use in elastic as well as soft mechatronic applications. To establish this technology as a new generation of actuators and sensors, next to research work in material science and suitable manufacturing processes, also novel adaptive power electronics concepts are necessary, which enable the integration of dielectric elastomers in different applications. Therefore, the main research content of this dissertation is the investigation of scalable, universally applicable power electronic methods as well as the solution oriented pointing out of technology related challenges. Thereby, the challanges are regarding the application integration of dielectric elastomer actuators and sensors in different application areas. The addressed research focus in this work is divided into the three operating modes, the actuatory, sensory and the sensorimotor usage of dielectric elastomers. Power electronics concepts are derived and designed for each operation mode. Furthermore, their implementation on dielectric elastomer actuators and sensors is tested and evaluated. The results show that different application cases are addressable with the presented power electronics concepts of separated and combined operation modes. With the established power electronics, actuators can be simultaneously used as sensors, with which external forces can be registered and the actuators' or in future even the system's state can be determined without external sensors. Conversely, the realization of active feedback for dielekctric elastomers primarily used as sensors is also conceivable.

Dielektrischen Elastomeren werden aufgrund ihrer inhärenten Eigenschaften für den Einsatz in elastischen sowie weichen mechatronischen Applikationen ein hohes Potenzial zugesprochen. Um diese Technologie als eine neuartige Generation von Aktoren und Sensoren etablieren zu können, sind neben Forschungsarbeiten in Materialwissenschaften und zu geeigneten Herstellungsprozessen ebenfalls neuartige adaptive Leistungselektronikkonzepte notwendig, welche eine Applikationsintegration dielektrischer Elastomere ermöglichen. Der übergeordnete Forschungsinhalt der Dissertationsschrift ist daher die Erforschung skalierbarer, universell einsetzbarer leistungselektronischer Methoden sowie das lösungsorientierte Aufzeigen technologiebedingter Herausforderungen hinsichtlich der Applikationsintegration von dielektrischen Elastomeraktoren und -sensoren in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Die in dieser Arbeit adressierten Forschungsschwerpunkte teilen sich auf die drei Betriebsmodi der aktorischen, sensorischen sowie sensomotorischen Nutzung von dielektrischen Elastomeren auf. Leistungselektronikkonzepte werden für den jeweiligen Betrieb hergeleitet, entworfen sowie deren Realisierung an dielektrischen Elastomeraktoren und -sensoren erprobt sowie evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den vorgestellten leistungselektronischen Konzepten für den separaten und kombinierten Betrieb unterschiedliche Anwendungsfälle adressierbar sind. Dabei werden Aktoren simultan auch als Sensoren nutzbar, mit denen von außen wirkende Krafteinflüsse registriert werden können. Somit ist es möglich, den Aktor- oder in Zukunft gar den Systemzustand ohne externe Sensoren zu erfassen. Umgekehrt ist auch die Realisierung von primär als Sensoren genutzten dielektrischen Elastomeren mit aktivem Feedback denkbar.

