

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Bildverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xxiv
1 Einleitung	1
1.1 Nachgiebige Robotik erleichtert die effiziente, robuste und sichere Interaktion und Bewegung.....	1
1.2 Der Bedarf an einem effizienten Herstellungsverfahren zur Realisierung Dielektrischer-Elastomer-Aktoren und -Sensoren	4
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	6
2 Stand der Technik und Wissenschaft zu Dielektrischen Elastomeren als flexible Aktoren und Sensoren	7
2.1 Dielektrische Elastomere als Smart Materials mit einem herausragenden Merkmalsprofil.....	7
2.1.1 Funktionsprinzipien Dielektrischer-Elastomer-Aktoren und - Sensoren	8
2.1.2 Einordnung Dielektrischer-Elastomer-Aktoren als künstliche Muskeln	11
2.1.3 Nutzungsprinzipien Dielektrischer-Elastomer-Sensoren	14
2.2 Materialsysteme zur Herstellung Dielektrischer Elastomere als künstliche Muskeln und flexible Sensoren.....	15
2.2.1 Elastomere für dielektrische Schichten	16
2.2.2 Elastische Elektrodenysteme	19
2.2.3 Aufbautopologien Dielektrischer Elastomere	21
2.3 Fertigungsverfahren für Dielektrische-Elastomer-Aktoren und - Sensoren	25
2.3.1 Herstellungsverfahren für dielektrische Schichten	26
2.3.2 Ansätze zur Realisierung von elastischen Elektrodenstrukturen	29
2.3.3 Integrierte Prozesse zur Herstellung Dielektrischer Elastomere	31
3 Konzeption eines effizienten Herstellungsverfahrens für gestapelte Dielektrische Elastomere	35
3.1 Kriterien und Zielgrößen bei der Herstellung Dielektrischer Elastomere für nachgiebige mechatronische Systeme	36
3.1.1 Leichtbauende Aktoren für den Einsatz in antagonistischen Systemen.....	37

3.1.2	Integrierte Dielektrische-Elastomer-Sensoren mit verringertem Bauraum	38
3.1.3	Evaluation von Herstellungsverfahren für Dielektrische Elastomere.....	41
3.2	Relevante Komponenten zur Qualifizierung des Aerosol-Jet-Drucks als additives Fertigungsverfahren.....	45
3.2.1	Ansätze zur Aerosol-Erzeugung	46
3.2.2	Einrichtungen zur Verdichtung und Homogenisierung von Aerosolströmen.....	48
3.2.3	Druckdüsen und Systeme zur temporären Prozessunterbrechung	49
3.3	Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zum Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere.....	51
3.3.1	Integration von Prozessschritten zur Erzeugung der notwendigen Strukturelemente Dielektrischer Elastomere	52
3.3.2	Konzept einer Versuchsanlage für den maskenlosen und frei programmierbaren 2,5D-Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere.....	54
4	Aerosol-Jet-Druck von RTV2-Silikonstrukturen mit homogenen Schichten geringer Dicke	57
4.1	Konzept eines Aerosol-Jet-Drucksystems für RTV2-Silikone	58
4.1.1	Aerosol-Erzeugung bei hochviskosen Materialien mittels thermisch geregelter Prozesskammern.....	59
4.1.2	Wechselwirkungen von zwei Aerosol-Erzeugungen bei der Zusammenführung reaktiver Aerosolströme.....	61
4.1.3	Integration einer Strahlungsheizung zur Unterstützung der Vernetzungsreaktion von RTV2-Systemen	64
4.2	Modellierung des Einflusses relevanter Prozessparameter auf den Aerosol-Jet-Druck von Komponenten eines RTV2-Silikons	66
4.2.1	Entwicklung eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans	67
4.2.2	Ableitung eines Prognosemodells für den Aerosol-Jet-Druck von Einzelkomponenten eines spezifischen RTV2-Silikons	70
4.2.3	Konturdiagramme der Prozessmodelle für ausgewählte Wechselwirkungen	73
4.3	Erzeugung dielektrischer Silikonschichten für gestapelte Systeme....	75
4.3.1	Steuerung des resultierenden Profils gedruckter Silikonbahnen	75
4.3.2	Angepasste Trajektorien zur Realisierung homogener Schichtdicken.....	79

4.3.3	Phänomene bei der Stapelung von aerosol-jet-gedruckten Silikonlagen	84
4.4	Elektromechanische Charakterisierung aerosol-jet-gedruckter Silikonstrukturen	90
4.4.1	Nachweis der Eignung des Aerosol-Jet-Drucks zur Herstellung vernetzter Silikonlagen	91
4.4.2	Untersuchungen zur Durchschlagfestigkeit und Permittivität aerosol-jet-gedruckter Silikonlagen	92
5	Hybridatomizer zur Herstellung elastischer Elektrodenstrukturen	95
5.1	Nutzung eines maskenlosen Druckprozesses zur Erzeugung definierter flächiger Elektroden- und Leiterstrukturen	96
5.1.1	Untersuchungen zur Herstellung von Partikeltinten auf der Basis von Silikonölen	96
5.1.2	Integration eines Ultraschall-Aerosol-Jet-Drucksystems	98
5.1.3	Periphere Einrichtungen zur Herstellung von Elektrodenstrukturen	99
5.2	Entwicklung niedrigviskoser Partikeltinten für die Herstellung leitfähiger und flexibler Strukturen	101
5.2.1	Stabilisierung von organischen Partikeltinten für den sequentiellen Druck auf vernetzende Elastomere	102
5.2.2	Graphen und Carbon Nano Tubes als leitfähige Partikel für Tintensysteme im Aerosol-Jet-Druck	104
5.2.3	Lösungsmittel, Additive und Prozessparameter zur Erzeugung definierter Druckbilder mit Graphentinten	106
5.3	Beschleunigte Herstellung flächiger Graphenelektroden	108
5.3.1	Konzept und Realisierung eines Hybridatomizers	109
5.3.2	Angepasste Partikeltintensysteme für die Nutzung eines Hybridatomizers im Aerosol-Jet-Druck	111
5.3.3	Parametrisierung eines Hybridatomizers in einem Drucksystem für elastische Elektroden	113
5.4	Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften von aerosol-jet-gedruckten rGO-Elektroden	115
5.4.1	Einflüsse der Bahngeschwindigkeit und der Druckstrategie auf den elektrischen Widerstand	116
5.4.2	Veränderung der Leitfähigkeit bei elastischer Deformation	118
5.4.3	Alterung gedruckter Elektrodenstrukturen	120
6	Dreistrom-Aerosol-Jet-Druck zur Erzeugung von Schicht- und Matrix-Kompositssystemen	123

6.1	Wechselwirkungen an der Schnittstelle von Silikonlagen zu leitfähigen rGO-Schichten	123
6.1.1	Sequentieller Aerosol-Jet-Druck von Schicht-Multimaterialsystemen für elastische mechatronische Komponenten	124
6.1.2	Schichthaftung bei Multimaterialsystemen.....	127
6.2	Kombination von drei Aerosolströmen zum Direktdruck von Matrix-Kompositssystemen	129
6.2.1	Anlagenkonzept für die dynamische Kopplung von drei Aerosolströmen.....	130
6.2.2	Parameterraum zum Direktdruck von Elastomer-rGO-Kompositmaterialien.....	132
6.2.3	Resultierende Leitwerte gedruckter Komposite in Abhängigkeit ausgewählter Prozessparameter	134
6.3	Charakterisierung direktgedruckter rGO-Polymerkomposite	135
6.3.1	Struktureller Aufbau in Abhängigkeit von Prozessparametern des Aerosol-Jet-Drucks.....	136
6.3.2	Bestimmung der Leitfähigkeit bei elastischer Deformation....	138
7	Herstellung von elastischen mechatronischen Komponenten in einem integrierten Aerosol-Jet-Drucksystem.....	141
7.1	Aerosol-Jet-Druck von Strukturen für elektroadhäsive Greifer	142
7.1.1	Untersuchungen zu Elektrodengeometrien	143
7.1.2	Aufbau eines elektroadhäsiven Greifsystems mit aerosol-jet-gedruckten rGO-Elektroden	144
7.2	Additive Fertigung von Dielektrischen-Elastomer-Sensoren mittels Aerosol-Jet-Druck.....	145
7.2.1	Herstellung einer Sensorgeometrie zur Dehnungsmessung ..	146
7.2.2	Messung von Deformationen mit additiv gefertigten Dielektrischen-Elastomer-Sensoren.....	147
7.3	Herstellung gestapelter Dielektrischer-Elastomer-Aktoren in einem Prozessgerät	149
7.3.1	Aufbauprinzip eines prototypischen aerosol-jet-gedruckten Stapelaktors.....	150
7.3.2	Herstellung und Aktivierung gestapelter Aktorstrukturen ..	151
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
9	Summary and outlook	159
	Literaturverzeichnis	163
	Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen	201
	Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten.....	203
	Abstract	207