

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 Elektrodensysteme | 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 RTV ₂ -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 RTV ₂ -Systemen | 64 |
| 4.2 | Modellierung des Einflusses relevanter Prozessparameter auf den Aerosol-Jet-Druck von Komponenten eines RTV ₂ -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 RTV ₂ -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-Kompositsystemen | 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-Kompositsystemen | 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 |