



# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>   | <b>xix</b>  |
| <b>Symbolverzeichnis</b>   | <b>xxi</b>  |
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1. Elektrische Bauelemente aus Nanopartikeln . . . . .                     | 1           |
| 1.2. Zielsetzung dieser Arbeit . . . . .                                     | 3           |
| <b>2. Grundlagen</b>   | <b>7</b>    |
| 2.1. Silizium . . . . .  | 7           |
| 2.2. Kompaktierung von Nanopartikelensembles . . . . .                       | 9           |
| 2.2.1. Mechanische Eigenschaften . . . . .                                   | 9           |
| 2.2.2. Elektrische Eigenschaften . . . . .                                   | 13          |
| 2.3. Verfahren zur Herstellung von Nanopartikeln . . . . .                   | 17          |
| 2.3.1. Chemische Gasphasensynthese . . . . .                                 | 17          |
| 2.4. Partikelgrößenbestimmung mit einem Partikelmassenspektrometer . . . . . | 19          |
| 2.4.1. Bestimmung der kinetischen Energie . . . . .                          | 20          |
| 2.4.2. Bestimmung von Partikelgeschwindigkeit und -masse . . . . .           | 20          |
| 2.4.3. Bestimmung der Partikelgröße . . . . .                                | 21          |
| 2.4.4. Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion . . . . .            | 21          |
| 2.5. Partikelgrößenbestimmung mit einem Strahlumlenkungssystem . . . . .     | 22          |
| 2.5.1. Bestimmung von kinetischer Energie und Partikelmasse . . . . .        | 22          |
| 2.6. Log-Normalverteilung . . . . .  | 24          |



|  |           |
|--|-----------|
| 2.7. Vergleich der kinetischen Energien von Ionen und Nanopartikeln . . . . .  | 26        |
| <b>3. Experimentelle Methoden der Kompaktierung von Nanopartikel-Pulvern</b>   | <b>29</b> |
| 3.1. Experimenteller Aufbau des Kompaktierungsprüfstandes . . . . .  | 30        |
| 3.1.1. Messzelle . . . . .   | 31        |
| 3.1.2. Piezoelektrischer Kraftsensor . . . . .   | 32        |
| 3.1.3. Hydraulische Presse . . . . .   | 33        |
| 3.1.4. Michelson-Interferometer . . . . .  | 33        |
| 3.1.5. Anlagen-Steuerung des Kompaktierungsprüfstandes mittels LabVIEW . . . . .                                     | 35        |
| 3.2. Kompaktierungsexperimente . . . . .   | 37        |
| 3.3. Das Probenmaterial für die Kompaktierungsexperimente . . . . .  | 38        |
| <b>4. Experimentelle Methoden der Nanopartikel-Synthese, in line Größenselektion, Strahlumlenkung und Deposition</b> | <b>39</b> |
| 4.1. Experimenteller Aufbau . . . . .  | 39        |
| 4.1.1. Nanopartikel-Reaktor . . . . .  | 39        |
| 4.1.2. Partikelmassenspektrometer . . . . .  | 41        |
| 4.1.3. Anlagen-Steuerung von Nanopartikel-Reaktor und PMS mittels LabVIEW . . . . .                                  | 43        |
| 4.1.4. Strahlumlenkungssystem . . . . .  | 44        |
| 4.1.5. Depositionskammer . . . . .   | 46        |
| 4.2. Experimente . . . . .   | 47        |
| 4.2.1. Synthese von Silizium-Nanopartikeln im Nanopartikel-Reaktor . . . . .   | 47        |
| 4.2.2. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und Größenselektion im PMS . . . . .                                  | 48        |
| 4.2.3. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels Strahlumlenkungssystem und EM . . . . .                       | 48        |
| 4.2.4. Direkte Deposition von Nanopartikeln im PMS . . . . .   | 49        |
| 4.2.5. Test der Depositionskammer . . . . .  | 49        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>5. Untersuchung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Nanopartikel-Pulvern</b> | <b>51</b>  |
| 5.1. Zeitlicher Verlauf des Probenwiderstandes . . . . .  | 52         |
| 5.1.1. Vergleich von Silizium-Pulvern mit unterschiedlicher Partikelgröße                       | 53         |
| 5.2. Porositätsmessungen beim Kompaktieren . . . . .  | 55         |
| 5.3. Ex situ Porositätsmessungen . . . . .  | 59         |
| 5.4. Quantifizierung der zeitlichen Änderung des elektrischen Widerstands . .                   | 64         |
| 5.5. Untersuchung auf kapazitives Verhalten . . . . .   | 66         |
| 5.6. Strom-Spannungskennlinien . . . . .  | 72         |
| 5.7. Einfluss des Pulveralters auf die elektrische Leitfähigkeit . . . . .                      | 76         |
| 5.8. Einfluss der Lagerung des Pulvers und der Atmosphäre beim Pressen . . .                    | 79         |
| 5.9. Pulverwiderstand in Abhängigkeit des mittleren Partikeldurchmessers . .                    | 80         |
| <b>6. Nanopartikelsynthese und Charakterisierung des Syntheseprodukts</b>                       | <b>85</b>  |
| 6.1. Einfluss der Syntheseparameter auf die Partikelgröße . . . . .                             | 85         |
| 6.2. Ex situ Charakterisierung des Syntheseprodukts . . . . .                                   | 91         |
| 6.2.1. BET . . . . .  | 91         |
| 6.2.2. Photolumineszenz . . . . .   | 91         |
| 6.2.3. TEM . . . . .  | 92         |
| 6.2.4. Interpretation der verschiedenen Partikelgrößen . . . . .                                | 94         |
| 6.3. Test des Strahlumlenkungssystems . . . . .   | 95         |
| <b>7. Ionen- und Nanopartikeldeposition</b>   | <b>105</b> |
| 7.1. Test der Depositionskammer . . . . .   | 105        |
| 7.2. Deposition durch vorstrukturierte Membranen . . . . .                                      | 108        |
| <b>8. Zusammenfassung</b>   | <b>117</b> |
| <b>A. Anhang</b>  | <b>123</b> |
| A.1. Geometrie des Partikelmassenspektrometers . . . . .  | 123        |
| A.2. Abschätzung der Längenänderung des Pressenaufbaus . . . . .                                | 123        |
| <b>Literatur</b>  | <b>125</b> |
| <b>Eigene Publikationen</b>   | <b>133</b> |
| <b>Danksagungen</b>   | <b>137</b> |