

# Inhaltsverzeichnis

## Content

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik</b> .....  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Anforderungen im Mikroformenbau .....   | 5         |
| 2.1.1    | Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikrobauteilen .....                  | 5         |
| 2.1.2    | Ableitung von Fertigungsanforderungen aus dem Mikroformenbau .....            | 9         |
| 2.1.3    | Prozesscharakteristika und abgeleitete Maschinenanforderungen .....           | 11        |
| 2.2      | Marktverfügbarkeit hochpräziser 5-Achs-Werkzeugmaschinen .....                | 14        |
| 2.3      | Stand der Forschung im Bereich Miniaturmaschinen .....                        | 21        |
| 2.4      | Fazit zum Stand der Technik.....  | 23        |
| <b>3</b> | <b>Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....                                 | <b>25</b> |
| <b>4</b> | <b>Konstruktive Aspekte zur Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit</b> .....  | <b>27</b> |
| 4.1      | Einflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit von Präzisionsmaschinen .....            | 27        |
| 4.2      | Bilanzierung und Budgetierung des Maschinenfehlers.....                       | 29        |
| 4.2.1    | Fehlerfortpflanzung in einer Werkzeugmaschine .....                           | 29        |
| 4.2.2    | Berechnung der skalaren Fehlereinträge .....                                  | 35        |
| 4.2.3    | Programmtechnische Konzeption .....   | 37        |
| 4.3      | Kompakt- und Integralbauweise zur Steigerung der Arbeitsgenauigkeit .....     | 38        |
| 4.4      | Fazit für den Maschinenaufbau .....   | 42        |
| <b>5</b> | <b>Konzeption einer fünfachsiggen Kompaktmaschine</b> .....                   | <b>43</b> |
| 5.1      | Lastenheft einer kompakten, fünfachsiggen Werkzeugmaschine .....              | 43        |
| 5.2      | Herleitung und Bewertung alternativer Achskonfigurationen.....                | 44        |
| 5.2.1    | Restriktionen zur Bereitstellung maschinenseitiger Freiheitsgrade .....       | 45        |
| 5.2.2    | Konstruktive Konzeptbewertung.....  | 48        |
| 5.3      | Konzeptdetaillierung.....   | 52        |
| 5.3.1    | Aufstellen eines Fehlerbudgets .....  | 52        |
| 5.3.2    | Dimensionierung der Maschinenkomponenten .....                                | 55        |
| 5.4      | Pflichtenheft einer fünfachsiggen Kompaktwerkzeugmaschine.....                | 62        |
| <b>6</b> | <b>Konstruktion, Aufbau und Charakterisierung einer Kompaktmaschine</b> ..... | <b>65</b> |
| 6.1      | Maschinenkonstruktion.....  | 65        |
| 6.1.1    | Konstruktion der Rundachsen .....   | 66        |
| 6.1.2    | Konstruktion der Linearachsen.....  | 70        |
| 6.2      | Aufbau und Inbetriebnahme .....   | 76        |
| 6.3      | Maschinencharakterisierung .....  | 77        |
| 6.3.1    | Geometrische Maschinenfehler.....   | 77        |
| 6.3.2    | Quasi-statisches und dynamisches Maschinenverhalten .....                     | 84        |
| 6.3.3    | Thermisches Maschinenverhalten.....   | 90        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>7</b>  | <b>Grundlagen einer integralen Dreheinheit</b> .....                  | <b>95</b>  |
| 7.1       | Idee und Konzeption eines integralen Achssystems .....                | 95         |
| 7.1.1     | Anforderungen und resultierende Idee der Lagerintegration .....       | 95         |
| 7.1.2     | Integration eines hydrostatischen Radiallagers in einen Antrieb ..... | 97         |
| 7.1.3     | Integration von Axiallager und Messsystem .....                       | 100        |
| 7.2       | Konstruktion einer integralen Dreheinheit .....                       | 102        |
| 7.2.1     | Auslegung der feststehenden Radiallagermechanik .....                 | 102        |
| 7.2.2     | Auslegung der rotierenden Radiallagermechanik.....                    | 104        |
| 7.2.3     | Auslegung der Axiallagermechanik .....                                | 106        |
| 7.2.4     | Gesamtkonstruktion der integralen Dreheinheit .....                   | 108        |
| 7.3       | Fertigung und Montage der integralen Dreheinheit .....                | 110        |
| 7.3.1     | Fertigung und Integration der Lagerhülse in den Stator .....          | 110        |
| 7.3.2     | Abformung des Magnetüberzugs (Rotor) .....                            | 111        |
| 7.3.3     | Fertigung und Montage der Gesamtachse.....                            | 112        |
| 7.4       | Charakterisierung des integralen Achssystems .....                    | 114        |
| 7.4.1     | Geometrische Eigenschaften .....                                      | 114        |
| 7.4.2     | Dynamische Eigenschaften.....   | 115        |
| 7.4.3     | Thermische Eigenschaften.....   | 117        |
| <b>8</b>  | <b>Optimierung einer Dreh-Schwenkeinheit</b> .....                    | <b>119</b> |
| 8.1       | Vergleich zwischen kompakter und integraler Drehachse.....            | 119        |
| 8.1.1     | Geometrische, statische und dynamische Eigenschaften .....            | 119        |
| 8.1.2     | Auswirkungen auf das Gesamtmaschinensystem.....                       | 120        |
| 8.2       | Integration und Implementierung der Integraleinheit .....             | 122        |
| 8.3       | Vergleichsuntersuchung zum Antrieb der Schwenkachse.....              | 123        |
| 8.3.1     | Mechanische Eigenschaften der Antriebsvarianten .....                 | 123        |
| 8.3.2     | Dynamisches Übertragungsverhalten der Antriebsregelkreise.....        | 124        |
| 8.3.3     | Experimentelle Ermittlung des Übertragungsverhaltens .....            | 128        |
| <b>9</b>  | <b>Bewertung von Kompakt- und Integralbauweise</b> .....              | <b>131</b> |
| 9.1       | Bewertung der Optimierungsziele .....                                 | 131        |
| 9.2       | Einsatzpotential der Kompaktbauweise.....                             | 132        |
| 9.3       | Einsatzpotential der Integralbauweise.....                            | 132        |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....                             | <b>133</b> |
| <b>11</b> | <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                     | <b>141</b> |