

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Vorwort</b>   | <b>III</b> |
| <b>Nomenklatur</b>   | <b>XI</b>  |
| Lateinische Formelzeichen . . . . .                                      | XI         |
| Griechische Formelzeichen . . . . .                                      | XIV        |
| Indizes . . . . .  | XV         |
| Akronyme . . . . .   | XVI        |
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2. Theoretische und experimentelle Grundlagen</b>                     | <b>3</b>   |
| 2.1. Historischer Überblick . . . . .                                    | 3          |
| 2.2. Phänomenologie elektrochemischer Vorgänge . . . . .                 | 5          |
| 2.2.1. Einteilung des Verfahrens . . . . .                               | 5          |
| 2.2.2. Vorgänge im Bearbeitungsspalt . . . . .                           | 6          |
| 2.2.3. Quantitative Beschreibung der anodischen Metallaufösung . . . . . | 11         |
| 2.2.4. Elektrolytlösungen . . . . .                                      | 15         |
| 2.3. Untersuchungen verschiedener Werkstoffe . . . . .                   | 20         |
| 2.3.1. Eisen, Eisenlegierungen und Stähle . . . . .                      | 20         |
| 2.3.2. Titan und Titanlegierungen . . . . .                              | 21         |
| 2.3.3. Hartmetalle . . . . .   | 22         |
| 2.4. Prozessenergiequellen . . . . .                                     | 23         |
| 2.5. Untersuchungen mikrosystemtechnischer Anwendungen . . . . .         | 25         |
| <b>3. Aufgabenstellung und Zielsetzung</b>                               | <b>27</b>  |
| <b>4. Versuchsbedingungen und Begriffsbestimmungen</b>                   | <b>31</b>  |
| 4.1. Versuchsanlage . . . . .  | 31         |
| 4.1.1. Prozesskenngrößen . . . . .                                       | 32         |
| 4.1.2. Darstellung der Vorgänge im Arbeitsspalt . . . . .                | 33         |
| 4.2. Werkzeugelektrodenwerkstoffe . . . . .                              | 38         |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.2.1. | Strukturierung der Werkzeugelektroden . . . . .  | 40 |
| 4.2.2. | Verwendete Teststrukturen . . . . .  | 41 |
| 4.3.   | Elektrolyte . . . . .  | 42 |
| 4.4.   | Versuchswerkstoffe . . . . .   | 44 |
| 4.4.1. | Kaltarbeitsstähle . . . . .  | 44 |
| 4.4.2. | Warmarbeitsstähle . . . . .  | 45 |
| 4.4.3. | Pulvermetallurgische Stähle . . . . .  | 46 |
| 4.4.4. | Werkstoffe der biomedizinischen Technik . . . . .                                      | 46 |
| 4.4.5. | Titanlegierungen . . . . .   | 47 |
| 4.5.   | Messtechnik . . . . .  | 49 |
| 4.5.1. | Multisensorkoordinatenmessmaschine<br>Werth Videocheck HA 400×400×200 3D CNC . . . . . | 49 |
| 4.5.2. | Rauheitsmessung an Mikrostrukturen . . . . .   | 51 |
| 4.5.3. | Stereo Mikroskop Olympus BX 61 . . . . .   | 62 |
| 4.5.4. | Profilometer Tencor P 11 . . . . .   | 63 |
| 4.5.5. | Korrosionsmessplatz/Potentiostat . . . . .   | 64 |
| 4.5.6. | Lichtstreuung . . . . .  | 67 |

## **5. Funkenerosives Feindrahtschneiden für die Fertigung von Werkzeugelektroden** **69**

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 5.1.   | Physikalisches Prinzip . . . . .                                 | 70 |
| 5.2.   | Prozesskenngößen . . . . .                                       | 76 |
| 5.2.1. | Elektrische Prozesskenngößen . . . . .                           | 76 |
| 5.2.2. | Technologische Prozesskenngößen . . . . .                        | 77 |
| 5.3.   | Verfahrensvarianten . . . . .                                    | 78 |
| 5.3.1. | Funkenerosives Senken . . . . .                                  | 78 |
| 5.3.2. | Funkenerosives Schneiden . . . . .                               | 80 |
| 5.3.3. | Funkenerosives Schleifen . . . . .                               | 83 |
| 5.3.4. | Maschinen für die Mikrofunkenerosion . . . . .                   | 83 |
| 5.4.   | Werkstoffe der Mikrofunkenerosion . . . . .                      | 84 |
| 5.4.1. | Werkzeugelektrodenwerkstoffe für die Mikrosenkerosion . . . . .  | 84 |
| 5.4.2. | Werkzeugelektrodenwerkstoffe für die Mikrodrahterosion . . . . . | 85 |
| 5.5.   | Allgemeiner Maschinenaufbau . . . . .                            | 86 |
| 5.5.1. | Der Generator . . . . .  | 87 |
| 5.5.2. | Das Dielektrikumsaggregat . . . . .                              | 88 |
| 5.6.   | Drahterosionsmaschine Charmilles Robofill 2020SI . . . . .       | 89 |
| 5.6.1. | Maschinenentwicklung . . . . .                                   | 91 |
| 5.7.   | Technologische Untersuchungen . . . . .                          | 99 |

|  |            |
|--|------------|
| 5.7.1. Untersuchungen zum Drahtwerkstoff . . . . .   | 99         |
| 5.7.2. Mikrodrahterodieren unterschiedlicher Werkstoffe . . . . .  | 101        |
| <b>6. Ergebnisse der technologischen Untersuchungen der elektrochemischen<br/>Bearbeitung mit oszillierender Werkzeugelektrode</b> | <b>107</b> |
| 6.1. Untersuchung der Spülbedingungen<br>(Mikrobauteile im Gegensatz zu Makrobauteilen) . . . . .                                  | 107        |
| 6.2. Saurer Elektrolyt . . . . .   | 110        |
| 6.3. Reinigung der Werkzeugelektrodenoberfläche . . . . .  | 118        |
| 6.4. Ermittlung des Energieumsatzes des Verfahrens . . . . .   | 119        |
| 6.4.1. Temperaturmessung . . . . .   | 122        |
| 6.5. Verkleinerung der Höhe der Werkzeugelektroden . . . . .   | 123        |
| 6.6. Beschichtung der Werkzeugelektroden . . . . .   | 127        |
| 6.7. Werkzeugelektrodenwerkstoffe . . . . .  | 130        |
| 6.8. Galvanisch abgeschiedene Werkzeugelektroden . . . . .   | 131        |
| 6.9. Ergebnisse nach Werkstoffen geordnet . . . . .  | 134        |
| 6.9.1. Kaltarbeitsstähle . . . . .   | 134        |
| 6.9.2. Warmarbeitsstähle . . . . .   | 140        |
| 6.9.3. Werkstoffe der biomedizinischen Technik . . . . .   | 145        |
| 6.9.4. Pulvermetallurgische Werkstoffe . . . . .   | 152        |
| 6.9.5. Titanlegierungen . . . . .  | 153        |
| 6.10. Einfluss der Impulsdauer . . . . .   | 156        |
| 6.11. Einfluss der Arbeitsspannung . . . . .   | 157        |
| 6.12. Einfluss der Konzentration des Elektrolyten . . . . .  | 159        |
| 6.13. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit . . . . .  | 160        |
| 6.14. Untersuchung des Wirkungsgrads der elektrochemischen Senkbearbei-<br>tung mit oszillierender Werkzeugelektrode . . . . .     | 164        |
| 6.14.1. Kaltarbeitsstähle . . . . .  | 166        |
| 6.14.2. Warmarbeitsstähle . . . . .  | 167        |
| 6.14.3. Biomedizinische Werkstoffe . . . . .   | 169        |
| 6.15. Untersuchung der Größe der Abtragpartikel . . . . .  | 174        |
| 6.15.1. Kaltarbeitsstähle . . . . .  | 175        |
| 6.15.2. Warmarbeitsstähle . . . . .  | 175        |
| 6.15.3. Biomedizinische Werkstoffe . . . . .   | 176        |
| 6.15.4. Pulvermetallurgische Werkstoffe . . . . .  | 176        |
| 6.15.5. Partikelgröße bei Verwendung von Zitronensäure . . . . .   | 177        |
| 6.15.6. Einfluss der Konzentration des Elektrolyten auf die Größe der<br>Abtragpartikel . . . . .                                  | 178        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 6.16. Untersuchung der Größe des frontalen und lateralen Arbeitsspalt            | 179        |
| 6.17. Ansätze für die Simulation des elektrochemischen Bearbeitungsprozesses     | 183        |
| 6.17.1. Vergleich von analytisch berechneten Werten und gemessenen Werten        | 183        |
| 6.17.2. Potentiostatische Untersuchungen   | 187        |
| <b>7. Elektrochemische Bearbeitungsverfahren in der Mikrosystemtechnik</b>       | <b>191</b> |
| 7.1. Verfahrensvarianten mit hohem Potential für die Mikrosystemtechnik          | 191        |
| 7.1.1. Elektrochemisches Mikrobohren   | 191        |
| 7.1.2. Elektrochemisches Mikrostanzen  | 193        |
| 7.1.3. Elektrochemisches Mikrodrahtschneiden                                     | 195        |
| 7.1.4. Elektrochemisches Mikrofräsen   | 196        |
| 7.1.5. Vorbereitung für Eigenspannungsmessungen                                  | 199        |
| 7.1.6. Weitere Anwendungsbeispiele des Verfahrens in der Mikrosystem-<br>technik | 202        |
| 7.2. Neue Systematik der ECM-Bearbeitungsverfahren                               | 205        |
| 7.3. Anforderungen an ECM-Anlagen für die Mikrosystemtechnik                     | 207        |
| 7.3.1. Abschätzung an der Bearbeitungsstelle auftretender Kräfte                 | 211        |
| <b>8. Umwelttechnische Fragestellungen der elektrochemischen Bearbeitung</b>     | <b>221</b> |
| 8.1. Gesetzliche Grundlagen  | 221        |
| 8.2. Beurteilung von Arbeitsstoffen  | 223        |
| <b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>227</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>231</b> |
| <b>A. Diagramme der Untersuchungen der Reproduzierbarkeit</b>                    | <b>249</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>257</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>267</b> |