

**Inhaltsverzeichnis**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Einleitung .....   | 1  |
| 2     | Stand der Technik.....   | 3  |
| 2.1   | Herstellung ringförmiger Produkte .....                              | 3  |
| 2.1.1 | Der Radial-Axial Ringwalzprozess .....                               | 6  |
| 2.1.2 | Regelung des Radial-Axial Ringwalzprozesses .....                    | 11 |
| 2.1.3 | Finite-Elemente-Simulation des Radial-Axial Ringwalzprozesses .....  | 14 |
| 2.2   | Formänderungsvermögen und Werkstoffschädigung von Metallen .....     | 18 |
| 2.2.1 | Einflüsse auf Formänderungsvermögen und Werkstoffschädigung .....    | 18 |
| 2.2.2 | Modellierung der Werkstoffschädigung in der Umformtechnik.....       | 21 |
| 2.2.3 | Anwendung von Schädigungskriterien und -modellen .....               | 28 |
| 2.3   | Mikrostrukturberechnung in der Warmmassivumformung .....             | 33 |
| 2.3.1 | Mikrostrukturberechnung bei Ringwalzprozessen .....                  | 37 |
| 2.4   | Fazit aus dem Stand der Technik .....                                | 38 |
| 3     | Problemstellung und Zielsetzung .....                                | 40 |
| 4     | Datenaufnahme in industriellen Prozessen.....                        | 42 |
| 4.1   | Darstellung der betrachteten Unternehmen .....                       | 42 |
| 4.2   | Vorgehensweise bei der Datenaufnahme .....                           | 43 |
| 4.3   | Aufnahme und Vergleich von Transferzeiten .....                      | 45 |
| 4.4   | Identifizierung von Schwankungen in der Prozesstemperatur .....      | 46 |
| 4.5   | Ermittlung von Schwankungen in Anlagenkinematiken und -kräften ..... | 52 |
| 4.5.1 | Auswirkungen von Prozessschwankungen auf die Anlagenkinematik .....  | 55 |
| 4.6   | Fazit zur Datenaufnahme .....  | 58 |
| 5     | Methoden und Versuchsdurchführung .....                              | 59 |
| 5.1   | Auswahl von Geometrie, Werkstoff und Variationsbereich .....         | 59 |
| 5.2   | Ringwalzanlage für Validierungs- und Bewertungswalzungen .....       | 65 |
| 5.3   | Struktur des genutzten FE-Simulationsmodells mit Subroutine .....    | 66 |
| 5.3.1 | Aufbau und Randwerte des CAE-Modells .....                           | 67 |
| 5.4   | Berechnung der Mikrostruktur im Postprocessing über StrucSim .....   | 69 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.5   | Schädigungsberechnung in der Simulation .....                             | 71  |
| 5.5.1 | Implementierung des Oyane Kriteriums über eine Subroutine .....           | 71  |
| 5.5.2 | Schädigungsberechnung über das Porous Plasticity Modell .....             | 73  |
| 5.6   | Kalibrierung der Schädigungsmodelle und Referenzversuche .....            | 73  |
| 5.6.1 | Kalibrierung des Oyane Kriteriums .....                                   | 74  |
| 5.6.2 | Kalibrierung des Porous Plasticity Modells .....                          | 76  |
| 5.7   | Fazit zu den gewählten Methoden sowie der Versuchsplanung .....           | 79  |
| 6     | Untersuchung von Einflussgrößen auf die Mikrostrukturentwicklung .....    | 81  |
| 6.1   | Validierung des Mikrostrukturmodells .....                                | 81  |
| 6.1.1 | Anwendung des Mikrostrukturmodells für 1.4301 Stahl .....                 | 81  |
| 6.1.2 | Anwendung des Mikrostrukturmodells für 1.7225 Stahl .....                 | 84  |
| 6.2   | DOE basierte Simulationsstudie zur Mikrostrukturentwicklung .....         | 87  |
| 6.2.1 | Einflussuntersuchung auf die Korngröße des 1.4301 Stahl .....             | 87  |
| 6.2.2 | Einflussuntersuchung auf die Korngröße des 1.7225 Stahl .....             | 91  |
| 6.3   | Fazit zur Untersuchung der Mikrostruktur .....                            | 95  |
| 7     | Untersuchung von Einflüssen auf Schädigungswerte .....                    | 97  |
| 7.1   | Simulative Einflussuntersuchung auf Schädigungswerte .....                | 98  |
| 7.1.1 | Untersuchung von Einflüssen auf Schädigungswerte nach Oyane .....         | 99  |
| 7.1.2 | Untersuchung von Einflüssen auf Werte des Porous Plasticity Modells ..... | 103 |
| 7.1.3 | Zwischenfazit zur Schädigungsmodellierung .....                           | 106 |
| 7.2   | Experimentelle Bewertung der Simulationserkenntnisse .....                | 108 |
| 7.2.1 | Vorbereitung und Durchführung der Bewertungsversuche .....                | 108 |
| 7.2.2 | Ultraschall- und Nanofocus Untersuchungen der gewalzten Ringe .....       | 111 |
| 7.3   | Fazit zur Untersuchung von Einflüssen auf die Werkstoffschädigung .....   | 114 |
| 8     | Zusammenfassung und Fazit .....   | 116 |
| 9     | Literaturverzeichnis .....  | 120 |
| 10    | Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....                                   | 137 |
| 11    | Anhang .....  | 142 |