

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                              | <b>1</b>  |
| 1.1      | Kontinuierliche Anlagen für die Wärmebehandlung und Verzinkung von Stahlbändern                | 2         |
| 1.2      | Schwebebandöfen für Aluminium- und Kupferbänder                                                | 4         |
| 1.2.1    | Kontinuierliche Wärmebehandlung von Aluminiumbändern für die Luftfahrt- und Automobilindustrie | 5         |
| 1.2.2    | Kontinuierliche Wärmebehandlung von Kupferbändern                                              | 7         |
| 1.3      | Einflussgrößen auf die Prozessstabilität der Bandkühlung                                       | 7         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik</b>                                                                       | <b>11</b> |
| 2.1      | Prallströmung                                                                                  | 11        |
| 2.2      | Wärmeübergang in Düsenfeldern                                                                  | 12        |
| 2.2.1    | Einsatz von Wasserstoff                                                                        | 19        |
| 2.2.2    | Einfluss der Fluidtemperatur auf den Wärmeübergang                                             | 21        |
| 2.3      | Bandschwingungen in der Kühlstrecke                                                            | 22        |
| 2.3.1    | Schwingungssystem Kühlstrecke                                                                  | 22        |
| 2.3.2    | Abschätzung mechanischer Einflüsse auf die Bandschwingungen                                    | 25        |
| 2.4      | Schwebeverhalten des Bandes im Schwebebandofen                                                 | 28        |
| 2.5      | Düsensysteme                                                                                   | 31        |
| 2.5.1    | Düsensysteme in der Kühlstrecke                                                                | 31        |
| 2.5.2    | Düsensysteme in Schwebebandöfen                                                                | 33        |
| 2.5.2.1  | Düsensysteme für Schwebebandöfen zur Wärmebehandlung von Aluminiumbändern                      | 34        |
| 2.5.2.2  | Düsensysteme für Schwebebandöfen für die Wärmebehandlung von Kupferbändern                     | 37        |
| <b>3</b> | <b>Methodik der Untersuchungen</b>                                                             | <b>41</b> |
| 3.1      | Experimenteller Versuchsaufbau                                                                 | 41        |
| 3.1.1    | Experimenteller Aufbau zur Bestimmung von Wärmeübergängen                                      | 41        |
| 3.1.2    | Versuchsstand zur Charakterisierung von Bandschwingungen in Kühlstrecken                       | 45        |
| 3.1.3    | Versuchsstand Schwebebandofen                                                                  | 49        |
| 3.2      | Numerisches Strömungsmodell                                                                    | 51        |
| 3.2.1    | Rechengebiet                                                                                   | 51        |
| 3.2.2    | Beschreibung der turbulenten Strömung                                                          | 52        |
| 3.2.2.1  | k- $\Omega$ Modell                                                                             | 53        |

|          |                                                                                                          |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.2.2  | SST-Transition Modell .....                                                                              | 53         |
| 3.2.2.3  | k- $\Omega$ SST Modell .....                                                                             | 53         |
| 3.3      | Lösungsverfahren .....                                                                                   | 53         |
| <b>4</b> | <b>Wärmeübergang .....</b>                                                                               | <b>55</b>  |
| 4.1      | Wärmeübergänge für Schlitzdüsen .....                                                                    | 55         |
| 4.2      | Wärmeübergänge für Runddüsen .....                                                                       | 62         |
| 4.3      | Wärmeübergänge für Düsen mit Druckpolsterbildung .....                                                   | 67         |
| 4.3.1    | 4-Schlitzdüsensystem .....                                                                               | 67         |
| 4.3.2    | Düsensystem mit Schlitz und Lochanteil .....                                                             | 69         |
| 4.3.3    | Wärmeübergangsmessungen für Bandbreiten bis 2.4 m .....                                                  | 72         |
| <b>5</b> | <b>Bandschwingungen .....</b>                                                                            | <b>75</b>  |
| 5.1      | Untersuchungen von Bandschwingungen des Schlitzdüsensystems S01 .....                                    | 75         |
| 5.1.1    | Phänomenologische Betrachtungen der Schwingungen .....                                                   | 75         |
| 5.1.2    | Strömungsuntersuchungen .....                                                                            | 77         |
| 5.1.2.1  | Einfluss des Glühzustandes .....                                                                         | 84         |
| 5.1.2.2  | Einfluss des Düsenkastendrucks .....                                                                     | 85         |
| 5.1.3    | Quantifizierung der Einflussgrößen .....                                                                 | 85         |
| 5.1.3.1  | Einfluss der Bandspannung .....                                                                          | 87         |
| 5.1.3.2  | Einfluss der Schlitzbreite .....                                                                         | 88         |
| 5.1.3.3  | Einfluss der freien Länge .....                                                                          | 89         |
| 5.1.3.4  | Einfluss der Banddicke .....                                                                             | 91         |
| 5.1.4    | Einfluss der aerodynamischen Verspannungen auf die Bandstabilität .....                                  | 92         |
| 5.2      | Einfluss der Rückstellkraft der Strömung auf die Bandinstabilität am Beispiel<br>der 4-Schlitzdüse ..... | 95         |
| 5.2.1    | Strömungsuntersuchungen für die 4-Schlitzdüse .....                                                      | 96         |
| 5.2.2    | Einfluss der Schlitzbreite .....                                                                         | 99         |
| 5.2.3    | Einfluss des Abstandes zwischen Düsen und Band .....                                                     | 99         |
| <b>6</b> | <b>Interaktion zwischen Bandschwingungen und Wärmeübergang .....</b>                                     | <b>103</b> |
| 6.1      | Vergleich der untersuchten Düsensysteme .....                                                            | 103        |
| 6.2      | Bewertung der Einflussgrößen .....                                                                       | 104        |
| 6.3      | Einsatz von Wasserstoff .....                                                                            | 107        |
| <b>7</b> | <b>Schwebetransport .....</b>                                                                            | <b>111</b> |
| 7.1      | Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit eines Düsensystems .....                                            | 111        |
| 7.1.1    | Vergleich numerischer und experimenteller Ergebnisse .....                                               | 111        |

|           |                                                                        |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.2     | Parameterstudie zur Bestimmung der Einflussgrößen .....                | 113        |
| 7.2       | Bandschwingungen bei Schwebedüsen .....                                | 118        |
| 7.3       | Zusammenfassung der Einflussgrößen bei Schwebedüsen .....              | 124        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung</b> .....                                           | <b>127</b> |
| <b>9</b>  | <b>Summary</b> .....                                                   | <b>131</b> |
| <b>10</b> | <b>Literatur</b> .....                                                 | <b>135</b> |
| <b>11</b> | <b>Anhang</b> .....                                                    | <b>141</b> |
| 11.1      | Literaturangaben zu Kapitel 2.1: Wärmeübergang von Runddüsenfeldern .. | 141        |
| 11.2      | Literaturangaben zu Kapitel 2.1: Wärmeübergang von Schlitzdüsenfeldern | 143        |
| 11.3      | Teilfaktorieller Versuchsplan Bandbreite $b = 500$ mm .....            | 144        |
| 11.4      | Teilfaktorieller Versuchsplan Bandbreite $b = 800$ mm .....            | 145        |