

## Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Vorwort .....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>                                 | <b>III</b> |
| <b>Kurzfassung .....</b>                                       | <b>1</b>   |
| <b>Abstract .....</b>  | <b>3</b>   |
| <b>1 Einleitung und Motivation.....</b>                        | <b>5</b>   |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik.....</b>                 | <b>11</b>  |
| <b>2.1 Rührreibschweißen.....</b>                              | <b>11</b>  |
| 2.1.1 Verfahrensprinzip und Fügenahtausbildung .....           | 13         |
| 2.1.2 Einflussgrößen auf den Schweißprozess.....               | 17         |
| 2.1.3 Schweißwerkzeuge .....                                   | 18         |
| 2.1.4 Prozessparameter.....                                    | 24         |
| 2.1.5 Prozessrückwirkungen.....                                | 27         |
| 2.1.6 Schweißnahtunregelmäßigkeiten.....                       | 28         |
| <b>2.2 Störgrößen beim Rührreibschweißen.....</b>              | <b>33</b>  |
| 2.2.1 Fügespalte .....   | 33         |
| 2.2.2 Falsch eingestellter oder verschlissener Schweißstift .. | 35         |
| 2.2.3 Seitlicher Versatz des Werkzeugs .....                   | 35         |
| <b>3 Problemstellung und Ziel der Arbeit.....</b>              | <b>37</b>  |
| <b>4 Versuchsaufbau und -durchführung .....</b>                | <b>39</b>  |
| <b>4.1 Fügeworkstoffe.....</b>                                 | <b>39</b>  |
| 4.1.1 Aluminiumlegierung EN AW 5083 H111 .....                 | 40         |
| 4.1.2 Aluminiumlegierung EN AW 7020 T651 .....                 | 42         |
| <b>4.2 Verwendete Rührreibschweißanlage .....</b>              | <b>44</b>  |
| 4.2.1 Kraftmessung .....                                       | 47         |
| 4.2.2 Temperaturmessung .....                                  | 49         |
| 4.2.3 Spannvorrichtung .....                                   | 50         |
| 4.2.4 Einstellung des Fügespalts .....                         | 52         |
| 4.2.5 Variation der Schweißstiftlänge .....                    | 53         |
| 4.2.6 Einstellung eines Spaltversatzes .....                   | 53         |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.3</b> | <b>Charakterisierung von Schweißverbindungen .....</b>                                      | <b>53</b> |
| 4.3.1      | Sichtprüfung .....  | 53        |
| 4.3.2      | Probenentnahme.....   | 54        |
| 4.3.3      | Zugprüfung.....   | 54        |
| 4.3.4      | Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie .....   | 55        |
| 4.3.5      | Härteprüfung .....  | 56        |
| 4.3.6      | Dreipunkt-Biegeprüfung .....  | 57        |
| 4.3.7      | Computertomographie .....   | 57        |
| 4.3.8      | Bohrlochmethode .....   | 58        |
| <b>4.4</b> | <b>Schweißwerkzeuge und deren Schweißparameter.....</b>                                     | <b>58</b> |
| 4.4.1      | Aufbau und geometrische Größen der Werkzeuge .....  | 59        |
| 4.4.2      | Parametereinstellung der Mehrstiftwerkzeuge.....  | 61        |
| 4.4.3      | Schweißparameter .....  | 65        |
| <b>5</b>   | <b>Untersuchung der veränderten Temperaturverteilung .....</b>                              | <b>67</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Untersuchung der vertikalen und horizontalen<br/>Temperaturverteilung .....</b>          | <b>67</b> |
| 5.1.1      | Vertikale Temperaturverteilung im Fügeworkstoff .....                                       | 67        |
| 5.1.2      | Temperatur an Werkzeugschulter und -stift.....  | 72        |
| 5.1.3      | Horizontale Temperaturverteilung im Fügeworkstoff ....                                      | 74        |
| <b>5.2</b> | <b>Fazit und Diskussion der Untersuchung der veränderten<br/>Temperaturverteilung .....</b> | <b>77</b> |
| <b>6</b>   | <b>Erhöhung des Materialflusses.....</b>  | <b>79</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Veränderung der Durchmischung.....</b>   | <b>79</b> |
| 6.1.1      | Veränderung der Kräfte und Momente .....  | 79        |
| 6.1.2      | Untersuchung der feineren Materialdurchmischung .....                                       | 83        |
| 6.1.3      | Eigenspannungsmessungen.....  | 86        |
| <b>6.2</b> | <b>Vergleich des horizontalen und vertikalen Wirkbereichs .</b>                             | <b>88</b> |
| 6.2.1      | Analyse des Wirkbereichs anhand von Schliffbildern ...                                      | 88        |
| 6.2.2      | Härtemappings an Stumpfstoßschweißungen .....   | 90        |
| 6.2.3      | EBSD Analyse.....   | 91        |

|            |   |             |
|------------|---|-------------|
| <b>6.3</b> | <b>Vergleich der mechanischen Eigenschaften.....</b>                            | <b>92</b>   |
| 6.3.1      | Zugfestigkeiten, Biegefestigkeiten und Querschlitze .....                       | 92          |
| <b>6.4</b> | <b>Fazit und Diskussion der Erhöhung des Materialflusses .</b>                  | <b>97</b>   |
| <b>7</b>   | <b>Verbesserung der FSW Prozessrobustheit.....</b>                              | <b>101</b>  |
| <b>7.1</b> | <b>Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit .....</b>                             | <b>101</b>  |
| 7.1.1      | Schweißungen EN AW 5083 H111 mit Spalten.....                                   | 101         |
| 7.1.2      | Schweißungen EN AW 7020 T651 mit Spalten .....                                  | 104         |
| <b>7.2</b> | <b>Einsatz des Mehrstiftwerkzeugs als Mehrbereichswerkzeug<br/>.....</b>        | <b>106</b>  |
| 7.2.1      | Mehrbereichsschweißungen an EN AW 5083 H111...                                  | 107         |
| 7.2.2      | Mehrbereichsschweißungen an EN AW 7020 T651 ...                                 | 108         |
| <b>7.3</b> | <b>Einfluss des seitlichen Versatzes des Werkzeugs zum<br/>Fügestoß .....</b>   | <b>111</b>  |
| 7.3.1      | Zugfestigkeiten und Dehnungen .....   | 112         |
| 7.3.2      | Schliffbilder und Bruchproben .....   | 113         |
| <b>7.4</b> | <b>Fazit und Diskussion der Verbesserung der FSW<br/>Prozessrobustheit.....</b> | <b>116</b>  |
| <b>8</b>   | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                       | <b>119</b>  |
| 8.1        | Zusammenfassung .....   | 119         |
| 8.2        | Ausblick .....  | 125         |
|            | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>  | <b>VII</b>  |
|            | <b>Symbolverzeichnis .....</b>  | <b>IX</b>   |
|            | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>  | <b>XI</b>   |
|            | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>   | <b>XV</b>   |
|            | <b>Liste der Veröffentlichungen über Teilgebiete der Dissertation....</b>       | <b>XVII</b> |
|            | <b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>                                     | <b>XIX</b>  |
|            | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>XXI</b>  |