

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis.....</b>                         | <b>V</b>  |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik.....</b>                                | <b>3</b>  |
| <b>2.1 Beschreibung des industriellen Laserstrahlschweißprozesses .....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1.1 Laserstrahlschweißen im Karosseriebau .....                             | 4         |
| 2.1.2 Einflussgrößen auf die Nahtqualität beim Schweißen verzinkter Bleche .. | 6         |
| 2.1.3 Untersuchte Nahtunregelmäßigkeiten .....                                | 8         |
| <b>2.2 Sensorik zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen .....</b>    | <b>15</b> |
| 2.2.1 Allgemeiner Überblick zur Online-Qualitätssicherung .....               | 15        |
| 2.2.2 In-Prozess-Messverfahren.....                                           | 17        |
| <b>2.3 Maschinelles Lernen zur Bilddatenauswertung .....</b>                  | <b>24</b> |
| 2.3.1 Objekterkennung und Klassifizierung von Nahtunregelmäßigkeiten.....     | 25        |
| 2.3.2 Bestimmung der Einschweißtiefe.....                                     | 29        |
| 2.3.3 Modellunsicherheit und Erkennung neuartiger Prozesssituationen .....    | 30        |
| <b>2.4 Hybride Modellierung in der Lasermaterialbearbeitung .....</b>         | <b>33</b> |
| <b>2.5 Regelung der Einschweißtiefe beim Laserstrahlschweißen .....</b>       | <b>35</b> |
| <b>2.6 Fazit zum Stand der Technik.....</b>                                   | <b>39</b> |
| <b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>                                  | <b>43</b> |
| <b>3.1 Forschungsfragen.....</b>                                              | <b>44</b> |
| <b>3.2 Vorgehensweise &amp; Gliederung.....</b>                               | <b>44</b> |
| <b>4 Bildbasierte Prädiktion der Schweißnahtqualität .....</b>                | <b>45</b> |
| <b>4.1 Aufbau des bildgebenden Prozessbeobachtungssystems .....</b>           | <b>45</b> |
| 4.1.1 Koaxial integriertes Thermografie-System.....                           | 45        |
| 4.1.2 Laterale Prozessüberwachungskamera mit Fremdbeleuchtung .....           | 47        |
| 4.1.3 Ortsaufgelöste Erfassung der thermischen Metalldampffackelemission.     | 48        |
| 4.1.4 Abschätzung der erforderlichen Bildrate .....                           | 48        |
| 4.1.5 Benötigter Dynamikbereich für die Prozessüberwachung .....              | 49        |
| 4.1.6 Gesamtsystemübersicht .....                                             | 51        |
| <b>4.2 Werkstoffe und Probenvorbereitung .....</b>                            | <b>53</b> |
| <b>4.3 Voruntersuchungen zur multiperspektivischen Diagnostik .....</b>       | <b>56</b> |
| 4.3.1 Strahlungsbasierte Temperaturmessung in der Prozesszone .....           | 58        |
| 4.3.2 Auswirkungen der Metalldampffackel auf das thermische Messsignal ...    | 59        |
| 4.3.3 Messtechnischer Vergleich von Nahtfehlern und Prozessabweichungen       | 61        |
| <b>4.4 Implementierung der KI-basierten Bildauswertung .....</b>              | <b>67</b> |
| 4.4.1 Beschreibung der RCNN-Architektur für multiple Detektionsaufgaben...    | 67        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.2 Datenannotation und -aufbereitung .....                                | 73         |
| <b>4.5 Einflussgrößenanalyse und Modelloptimierungen .....</b>               | <b>77</b>  |
| 4.5.1 Einfluss der Bildgröße und des Sensortyps .....                        | 77         |
| 4.5.2 Einfluss der Trainingsdatenmenge .....                                 | 78         |
| 4.5.3 Rastersuche zur Hyperparameteroptimierung .....                        | 79         |
| 4.5.4 Vergleich unterschiedlicher Modellarchitekturen.....                   | 83         |
| <b>4.6 Ergebnisse der KI-basierten Prozessüberwachung.....</b>               | <b>84</b>  |
| 4.6.1 Klassifikations- und Regressionsergebnisse .....                       | 84         |
| 4.6.2 Genauigkeit prädizierter geometrischer Parameter .....                 | 89         |
| 4.6.3 Beurteilung der Wichtigkeit einzelner Bildmerkmale .....               | 91         |
| 4.6.4 Fehlererkennung an ausgewählten Beispielen .....                       | 96         |
| <b>4.7 Abschätzung der Modellunsicherheit.....</b>                           | <b>103</b> |
| <b>4.8 Zwischenfazit zur bildbasierten Prädiktion der Nahtqualität .....</b> | <b>109</b> |
| <b>5 Berechnung der Einschweißtiefe.....</b>                                 | <b>111</b> |
| 5.1 Bestimmung der Einschweißtiefe mittels hybrider Modellierung .....       | 111        |
| 5.2 Kalibration des hybriden EST-Modells.....                                | 113        |
| 5.2.1 Kalibrierung anhand bestimmter Durchschweißlochcharakteristika.....    | 115        |
| 5.2.2 Überprüfung des Ansatzes zur Berechnung der Einschweißtiefe .....      | 118        |
| 5.3 Konsequenzen für die Prozessregelung .....                               | 123        |
| <b>6 Prozessregelung mittels Reinforcement Learning.....</b>                 | <b>125</b> |
| 6.1 Entwicklung eines Regelkonzeptes.....                                    | 125        |
| 6.1.1 Modellbasiertes RL .....                                               | 129        |
| 6.1.2 Belohnungsfunktion .....                                               | 132        |
| 6.1.3 Datenbasiertes Dynamikmodell für Laserfügeprozesse.....                | 133        |
| 6.2 Quantitative Analyse zum bestärkenden Lernen.....                        | 135        |
| 6.2.1 Vergleich unterschiedlicher RL-Algorithmen .....                       | 135        |
| 6.2.2 Einfluss unterschiedlicher Hyperparameter .....                        | 138        |
| 6.3 Umsetzung einer KI-basierten Prozessregelung .....                       | 139        |
| 6.3.1 Hardware- und softwareseitige Implementierung.....                     | 139        |
| 6.3.2 Echtzeitfähigkeit, Latenz und Durchsatz der Regeleinrichtung .....     | 141        |
| 6.4 Evaluierung in der Praxis .....                                          | 146        |
| 6.4.1 Kompensation der Fokusposition .....                                   | 146        |
| 6.4.2 Kompensation von Schwankungen der Laserleistung .....                  | 150        |
| 6.4.3 Zwischenfazit zur KI-basierten Prozessregelung .....                   | 153        |
| <b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                  | <b>155</b> |
| 7.1.1 Fazit und Einordnung.....                                              | 158        |
| 7.1.2 Ausblick .....                                                         | 159        |

---

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8 Anhang .....</b>                                                       | <b>161</b> |
| <b>8.1 Strahlkaustik der Bearbeitungsoptik.....</b>                         | <b>161</b> |
| <b>8.2 Grundlagen zu neuronalen Netzen .....</b>                            | <b>162</b> |
| 8.2.1 Grundlagen zu faltungsbasierten neuronalen Netzen.....                | 162        |
| 8.2.2 Rekurrente neuronale Netze (RNNs).....                                | 164        |
| 8.2.3 Metriken zu Bewertung der Klassifikationsleistung.....                | 165        |
| <b>8.3 Details zu den verwendeten Modell-Architekturen.....</b>             | <b>167</b> |
| 8.3.1 CNN-Modell .....                                                      | 167        |
| 8.3.2 RNN-Modell .....                                                      | 168        |
| <b>8.4 Datensätze für KI-basierte Prozessüberwachung .....</b>              | <b>168</b> |
| <b>8.5 Technische Details zum Aufbau der NIR-Optik .....</b>                | <b>171</b> |
| <b>8.6 Extraktion geometrischer Merkmale.....</b>                           | <b>172</b> |
| 8.6.1 Definition unterschiedlicher Prozesszonen .....                       | 172        |
| 8.6.2 Definition und Berechnungsvorschriften für einzelne Bildmerkmale .... | 174        |
| <b>8.7 Temperaturkalibration .....</b>                                      | <b>175</b> |
| 8.7.1 Grundlagen der strahlungsbasierten Temperaturmessung.....             | 175        |
| 8.7.2 Kalibration des Kamerasystems am schwarzen Strahler.....              | 176        |
| <b>II Quellenverzeichnis.....</b>                                           | <b>179</b> |