

Inhaltsverzeichnis

I	Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis.....	V
1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1	Beschreibung des industriellen Laserstrahlschweißprozesses	3
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
2.2	Sensorik zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	15
2.2.1	Allgemeiner Überblick zur Online-Qualitätssicherung	15
2.2.2	In-Prozess-Messverfahren.....	17
2.3	Maschinelles Lernen zur Bilddatenauswertung	24
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
2.4	Hybride Modellierung in der Lasermaterialbearbeitung	33
2.5	Regelung der Einschweißtiefe beim Laserstrahlschweißen	35
2.6	Fazit zum Stand der Technik.....	39
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	43
3.1	Forschungsfragen.....	44
3.2	Vorgehensweise & Gliederung.....	44
4	Bildbasierte Prädiktion der Schweißnahtqualität	45
4.1	Aufbau des bildgebenden Prozessbeobachtungssystems	45
4.1.1	Koaxial integriertes Thermografie-System.....	45
4.1.2	Laterale Prozessüberwachungskamera mit Fremdbeleuchtung	47
4.1.3	Ortsaufgelöste Erfassung der thermischen Metaldampffackelemission.	48
4.1.4	Abschätzung der erforderlichen Bildrate	48
4.1.5	Benötigter Dynamikbereich für die Prozessüberwachung	49
4.1.6	Gesamtsystemübersicht	51
4.2	Werkstoffe und Probenvorbereitung	53
4.3	Voruntersuchungen zur multiperspektivischen Diagnostik.....	56
4.3.1	Strahlungsbasierte Temperaturmessung in der Prozesszone	58
4.3.2	Auswirkungen der Metaldampffackel auf das thermische Messsignal ...	59
4.3.3	Messtechnischer Vergleich von Nahtfehlern und Prozessabweichungen	61
4.4	Implementierung der KI-basierten Bildauswertung	67
4.4.1	Beschreibung der RCNN-Architektur für multiple Detektionsaufgaben ...	67

4.4.2	Datenannotation und -aufbereitung	73
4.5	Einflussgrößenanalyse und Modelloptimierungen	77
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
4.6	Ergebnisse der KI-basierten Prozessüberwachung.....	84
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
4.7	Abschätzung der Modellunsicherheit.....	103
4.8	Zwischenfazit zur bildbasierten Prädiktion der Nahtqualität	109
5	Berechnung der Einschweißtiefe.....	111
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
6	Prozessregelung mittels Reinforcement Learning.....	125
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
7	Zusammenfassung und Ausblick	155
7.1.1	Fazit und Einordnung.....	158
7.1.2	Ausblick	159

8	Anhang	161
8.1	Strahlkaustik der Bearbeitungsoptik.....	161
8.2	Grundlagen zu neuronalen Netzen	162
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
8.3	Details zu den verwendeten Modell-Architekturen.....	167
8.3.1	CNN-Modell	167
8.3.2	RNN-Modell	168
8.4	Datensätze für KI-basierte Prozessüberwachung	168
8.5	Technische Details zum Aufbau der NIR-Optik	171
8.6	Extraktion geometrischer Merkmale.....	172
8.6.1	Definition unterschiedlicher Prozesszonen	172
8.6.2	Definition und Berechnungsvorschriften für einzelne Bildmerkmale	174
8.7	Temperaturkalibration	175
8.7.1	Grundlagen der strahlungsbasierten Temperaturmessung.....	175
8.7.2	Kalibration des Kamerasystems am schwarzen Strahler.....	176
II	Quellenverzeichnis	179