

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	v
<b>Kurzfassung</b> . . . . .	vii
<b>Abstract</b> . . . . .	ix
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	xv
<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	xvii
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	xxiii
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Problembeschreibung und Forschungshypothese . . . . .	4
1.2 Beitrag dieser Arbeit . . . . .	11
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit . . . . .	13
<b>2 Grundlagen</b> . . . . .	15
2.1 Grundlagen der Lasermaterialbearbeitung . . . . .	15
2.2 Aufbau einer konventionellen Laseranlage . . . . .	18
2.3 Vorgehensmodell zur Erstellung von Modellen des maschinellen Lernens . . . . .	23
2.4 Anforderungen an die Steuerung einer Laseranlage . . . . .	29
<b>3 Stand der Technik und Forschung</b> . . . . .	41
3.1 Maschinelles Lernen in der Lasermaterialbearbeitung . . . . .	41
3.2 Steuerungsarchitekturen für die Lasermaterialbearbeitung	50

xi

3.3	Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik und Forschung . . . . .	60
3.4	Architekturen zur Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Ziel der Arbeit . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Konzeption einer durchgängigen Gesamtarchitektur . . . . .</b>	<b>71</b>
5.1	Entwurf der Gesamtarchitektur . . . . .	71
5.2	Auswahl und Beschreibung der Systemkomponenten . . . . .	73
5.2.1	Umsetzung des Vorgehens zur Erstellung und Bereitstellung von Modellen des maschinellen Lernens . . . . .	74
5.2.2	Ausführung echtzeitkritischer Logik . . . . .	77
5.2.3	Gateway-Modul . . . . .	79
5.2.4	Virtuelles Abbild von Maschine und Prozess . . . . .	81
5.3	Auswahl und Beschreibung der Schnittstellen . . . . .	83
5.3.1	Kommunikation zwischen Steuerungssystem und Datenplattform . . . . .	83
5.3.2	Echtzeitfähige Kommunikation zwischen industriellem Steuerungssystem und Gateway-Modul . . . . .	87
5.4	Konkretisiertes Konzept der Gesamtarchitektur . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Umsetzung und Implementierung . . . . .</b>	<b>91</b>
6.1	Cloud Application Layer . . . . .	91
6.1.1	Plattform für die Datenverarbeitung und das Training von Modellen des maschinellen Lernens . . . . .	92
6.1.2	Gesamtarchitektur des Cloud Application Layers . . . . .	94
6.2	Edge Layer . . . . .	99
6.2.1	Industrielles Steuerungssystem . . . . .	99
6.2.2	Gateway-Modul . . . . .	104
6.2.3	Digitaler Zwilling . . . . .	110

6.2.4	Zusätzliche Schnittstellen des industriellen Steuerungssystems . . . . .	111
6.3	Device Layer . . . . .	112
6.4	Exemplarischer Anwendungsfall: Anlassbeschriftung . . . . .	114
6.5	Datenerfassung . . . . .	115
6.5.1	Exemplarischer Anwendungsfall: Erfassung von Farbwerten . . . . .	116
6.6	Datenverarbeitung und Methoden des maschinellen Lernens . . . . .	122
6.6.1	Exemplarischer Anwendungsfall: Künstliches neuronales Netz zur Vorhersage von Prozessparametern . . . . .	124
6.7	Ausführung von Modellen des maschinellen Lernens . . . . .	126
6.7.1	Exemplarischer Anwendungsfall: Ausführung eines künstlichen neuronalen Netzes auf dem industriellen Steuerungssystem . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Validierung und Demonstration . . . . .</b>	<b>131</b>
7.1	Nachweis der Funktionalität der Gesamtarchitektur . . . . .	131
7.2	Demonstration einer lernenden Prozesssteuerung . . . . .	139
7.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	145
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>151</b>
8.1	Weiterführende Fragestellungen . . . . .	153
<b>Literatur</b>	<b>159</b>	
<b>Anhang</b>	<b>195</b>	
A	Gateway-Modul auf Basis eines FPGAs . . . . .	195
B	Ergebnisse der Signalmessungen . . . . .	198
C	Laserbeschriftungsversuche . . . . .	203