

# Inhaltsverzeichnis

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

- 3.3 Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik und  
Forschung . . . . . 60
- 3.4 Architekturen zur Anwendung von Methoden des maschi-  
nellen Lernens . . . . . 63
- 4 Ziel der Arbeit . . . . . 67**
- 5 Konzeption einer durchgängigen Gesamtarchitektur . . . . . 71**
  - 5.1 Entwurf der Gesamtarchitektur . . . . . 71
  - 5.2 Auswahl und Beschreibung der Systemkomponenten . . . 73
    - 5.2.1 Umsetzung des Vorgehens zur Erstellung und Bereit-  
stellung 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 Da-  
tenplattform . . . . . 83
    - 5.3.2 Echtzeitfähige Kommunikation zwischen industri-  
ellem Steuerungssystem und Gateway-Modul . . . . 87
  - 5.4 Konkretisiertes Konzept der Gesamtarchitektur . . . . . 88
- 6 Umsetzung und Implementierung . . . . . 91**
  - 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
7	<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
8	<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