

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	I
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	VIII
<b>Tabellenverzeichnis</b>	XI
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	XII
<b>Notation und physikalische Größen</b>	XIV
<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	3
<b>2 Robotereinsatz und -programmierung.....</b>	7
2.1 Robotertypen.....	7
2.1.1 Klassifizierung von Robotern .....	7
2.1.2 Einteilung von Industrierobotern .....	8
2.2 Applikationen und Randbedingungen .....	9
2.2.1 Roboteranwendungen.....	9
2.2.2 Einsatzumfeld.....	10
2.3 Programmierung von Industrierobotern.....	12
2.3.1 Online-Programmierung .....	14
2.3.1.1 Teach-In-Programmierung .....	15
2.3.1.2 Playback-Programmierung .....	16
2.3.1.3 Sensorunterstützte Programmierung .....	17
2.3.2 Offline-Programmierung.....	18

## **Inhaltsverzeichnis**

2.3.2.1	Simulationsgestützte Programmierung.....	18
2.3.2.2	Textuelle Programmierung.....	21
2.3.2.3	Grafische Programmierung .....	22
2.3.3	Verfahren mit künstlicher Intelligenz .....	23
2.3.3.1	Programmierung durch Vormachen (PbD) .....	23
2.3.3.2	Implizite, aufgabenorientierte Programmierung .....	24
2.3.3.3	Instruktiv-dialogorientierte Programmierung.....	25
2.4	Situationsanalyse und Fazit.....	26
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>29</b>
3.1	Augmented Reality .....	29
3.1.1	Begriffsklärung .....	29
3.1.2	Funktionsprinzip von AR-Systemen.....	30
3.2	Visualisierungsverfahren .....	32
3.2.1	Monitorbasierte Systeme (MAR).....	35
3.2.2	Head-Mounted Displays (HMD) .....	36
3.2.3	Räumlich erweiterte Realität (Spatial AR) .....	37
3.2.3.1	Projektion auf beliebige Umgebungsoberflächen .....	38
3.2.3.2	Projektionsgeräte .....	40
3.2.3.3	Anwendungen von Projektions-AR.....	41
3.3	Positionserfassung.....	43
3.3.1	Definition .....	43
3.3.2	Einteilung und Charakterisierung .....	43
3.4	Interaktionstechniken .....	45

3.4.1	Definition .....	45
3.4.2	Interaktion in räumlichen Benutzerschnittstellen .....	45
3.5	AR-Anwendungen in der Mensch-Roboter-Interaktion .....	47
3.5.1	Grundprinzip und Überblick .....	47
3.5.2	Telepräsenz und Telemanipulation .....	48
3.5.3	Servicerobotik .....	50
3.5.4	Industrierobotik .....	51
3.5.4.1	Montage- und Anlagenplanung .....	52
3.5.4.2	Bedienung und Schulung .....	53
3.5.4.3	Zusammenarbeit von Werkern und Robotern .....	53
3.5.4.4	Programmierung und Inbetriebnahme .....	54
3.5.5	Übersicht und Bewertung bestehender Ansätze .....	56
3.6	Fazit und Handlungsbedarf .....	59
4	<b>Anforderungsanalyse .....</b>	<b>61</b>
4.1	Zieldimensionen .....	61
4.2	Anforderungsstruktur .....	61
4.3	Konzeptionelle Anforderungen .....	63
4.4	Technische Anforderungen .....	64
4.4.1	Leistungsmerkmale .....	64
4.4.2	Konfigurierbarkeit und Flexibilität .....	65
4.4.3	Integration mit Robotersteuerung und Simulation .....	66
4.4.4	Sicherheit .....	67
4.5	Benutzerorientierte Anforderungen .....	68

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>5 Konzeption und Systementwurf.....</b>	<b>71</b>
5.1 Überblick.....	71
5.2 AR-basierte Roboterprogrammierung und Simulation.....	71
5.2.1 Funktionsprinzip .....	71
5.2.2 Einsatzvorgehen.....	74
5.2.2.1 Konfiguration des AR-Systems .....	75
5.2.2.2 Modellierung .....	75
5.2.2.3 Programmbearbeitung .....	77
5.2.2.4 Simulation und Test.....	80
5.2.2.5 Zusammenfassung des Vorgehens .....	80
5.2.3 Anforderungen an ein Systemkonzept.....	81
5.3 Konzeption der Visualisierung .....	82
5.4 Projektionsgestützte AR-Visualisierung.....	85
5.4.1 Videoprojektoren .....	85
5.4.1.1 Grundlegende Eigenschaften.....	85
5.4.1.2 Mathematisches Modell .....	87
5.4.1.3 Kalibrierung.....	88
5.4.1.4 Bewertung der Anzeigeeigenschaften .....	91
5.4.2 Laserprojektoren .....	91
5.4.2.1 Funktionsweise .....	91
5.4.2.2 Kalibrierung.....	93
5.4.2.3 Bewertung der Anzeigeeigenschaften .....	93
5.4.3 Erweiterung des Arbeitsraumes .....	94

5.4.3.1 Mehrprojektorensystem .....	95
5.4.3.2 Ortsveränderliche Anbringung der Projektoren .....	97
5.5 Automatisierte Geometrieerfassung.....	98
5.5.1 Funktionsprinzip und Verfahren .....	98
5.5.2 Nutzungsszenarien der automatisierten Vermessung .....	100
5.6 Räumliche Eingabe und Interaktion .....	101
5.6.1 Eingabeprinzip .....	101
5.6.2 Manipulation von Trajektorien .....	105
5.6.3 Interaktive Modellierung.....	108
5.6.4 Weitere Interaktionsformen .....	110
5.6.4.1 Anwendungssteuerung und sonstige Eingaben .....	110
5.6.4.2 Umgebungsmodellierung und Kinematisksimulation	111
5.7 Zusammenfassung des Konzepts und der Teilverfahren .....	113
<b>6 Umsetzung und Erprobung .....</b>	<b>117</b>
6.1 Übersicht.....	117
6.2 Systemgestaltung und Implementierung.....	117
6.2.1 Systemaufbau .....	117
6.2.2 Basissystem und graphische Benutzerschnittstelle .....	120
6.2.3 Projektionsanzeige .....	122
6.2.4 Positionserfassung und 3D-Eingabe .....	123
6.2.5 Bildverarbeitung.....	125
6.2.5.1 Bildaufnahme und Kamerakalibrierung .....	125
6.2.5.2 Vorgehen zur Erkennung von Laserpunkten.....	126

## **Inhaltsverzeichnis**

6.2.5.3	Charakterisierung der Messgenauigkeit .....	126
6.2.6	Interaktionssteuerung .....	127
6.2.7	Datenmodell und Simulation .....	128
6.2.7.1	Roboterschnittstelle .....	128
6.2.7.2	Programm- und Aufgabenmodell .....	129
6.2.7.3	Zellenmodell .....	131
6.2.7.4	Berechnung und Simulation .....	132
6.2.8	Kalibrierung und Referenzierung des Gesamtsystems .....	133
6.2.8.1	Interne Kalibrierung der Einzelgeräte .....	133
6.2.8.2	Lokalisierung und Referenzierung der Geräte .....	134
6.3	Systemkonfigurationen und realisierter Aufbau .....	137
6.4	Erprobung und Anwendung des Systems .....	139
6.4.1	Grundlegende Erprobung im Labor .....	139
6.4.2	Programmierung einer robotergestützten Laserhärteanlage ....	141
6.4.3	Programmierung einer Remote-Laserstrahlschweißanlage ....	144
<b>7</b>	<b>Technische und wirtschaftliche Bewertung .....</b>	<b>147</b>
7.1	Technische Bewertung .....	147
7.2	Wirtschaftliche Bewertung .....	149
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>197</b>
10.1	Entwicklung der AR-Forschung .....	197
10.2	Head-Mounted Displays (HMD) .....	198

## **Inhaltsverzeichnis**

10.2.1 Grundlagen und Bauarten .....	198
10.2.2 Bewertung HMD-basierter AR-Ansätze.....	200
10.3 Verfahren der Positionserfassung .....	204