

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Rahmenbedingungen der Flugzeugbauteilfertigung .....	5
2.2 Definition und Einsatz von Industrierobotern .....	7
2.3 Systemaufbau eines 6-Achs-Industrieroboters .....	10
2.4 Definition von Leistungskenngrößen bei Industrierobotern .....	11
2.4.1 Posekenngrößen nach ISO 9283 .....	12
2.4.2 Bahnkenngrößen nach ISO 9283 .....	15
2.4.3 Statische Nachgiebigkeit von Industrierobotern .....	18
2.4.4 Praktisches Vorgehen bei Anwendung der Norm .....	19
2.5 Einflussfaktoren auf die Robotergenauigkeit .....	20
2.5.1 Steuerungs- und Regelungstechnische Einflüsse .....	22
2.5.2 Mechanische Einflüsse .....	26
2.5.3 Prozesstechnische Einflüsse .....	29
2.5.4 Umgebungs- und Temperatureinflüsse .....	31
2.5.5 Zusammenfassung der Einflussfaktoren und Auswirkungen auf die Leistungskenngrößen .....	35
2.6 Identifikation von Optimierungsansätzen .....	36
2.6.1 Kalibrations- und Softwareoptimierung .....	37
2.6.2 Kompensationsstrategien .....	38
2.6.3 Prozessoptimierung .....	40
2.6.4 Strukturowptimierung .....	41
<b>3 Rahmenbedingung und Vorgehensweise .....</b>	<b>43</b>
3.1 <i>MABI MAX-150-CNC-Roboter</i> .....	43
3.2 <i>Siemens Sinumerik 840D sl</i> CNC-Steuerung .....	44
3.3 Vorgehensweise und Umsetzung .....	46
<b>4 Einsatz abtriebsseitiger Messsysteme .....</b>	<b>49</b>
4.1 Rotatorische Winkelmesssysteme .....	51
4.1.1 Magnetische Messsysteme .....	51
4.1.2 Induktive Messsysteme .....	52
4.1.3 Optische Messsysteme .....	53
4.1.4 Vergleich und Auswahlkriterium .....	54
4.2 Auslegung und Spezifikationen des Messsystems .....	55
4.2.1 Integration in den IR .....	56
4.2.2 Untersuchung auf Exzentrizitäten und Rundlauftest .....	57
4.3 Erweiterte Regelungsstrategie .....	58
4.4 Genauigkeitsuntersuchung mit direkten Messsystemen .....	69
4.4.1 Untersuchung der Positionierunsicherheit .....	69
4.4.2 Kreisformtests .....	71
4.5 Virtuelle Versteifung .....	75

4.5.1	Versuchsgestaltung und untersuchte Achsstellungen .....	76
4.5.2	Ergebnisse der achsindividuellen Steifigkeitsanalyse .....	78
4.6	Zusammenfassung und Einsatzfähigkeit.....	82
<b>5</b>	<b>Externe Regelung mithilfe eines Stereo-Kameramesssystems .....</b>	<b>85</b>
5.1	Grundlagen der Stereo-Kameramesstechnik.....	87
5.2	Messmarken für Stereo-Kamerasyteme.....	90
5.3	Stereo-Kamerasytem MoveInspect HF .....	91
5.4	AICON MoveInspect DPA-System .....	92
5.5	Sichtbarkeitsanalyse und Markenhalter-Entwicklung.....	93
5.6	Roboter-TCP-Einmessung und statische Genauigkeit .....	97
5.6.1	Einmessung des Markenhalters zum Roboter-TCP .....	97
5.6.2	Einmessung des Stereo-Kamerasytems zum Lasertracker .....	98
5.6.3	Genauigkeitsanalyse des Stereo-Kameramesssystems im Arbeitsraum .....	99
5.7	Statische Roboterposeregelung .....	101
5.8	Dynamische Roboterbahnregelung .....	105
5.8.1	Ansatz der externen achsbasierten Regelung eines Industrieroboters .....	108
5.8.2	Untersuchung der Bahngenaugkeit.....	111
5.9	Versuche zur Abdrängung unter externem Krafteinfluss.....	114
5.10	Analyse der praktischen Einsatzfähigkeit .....	117
<b>6</b>	<b>Externe Regelung mithilfe eines Lasertracker-Systems .....</b>	<b>119</b>
6.1	Grundlagen der Lasertracker-Messtechnik .....	119
6.2	Lasertracker-Systeme .....	123
6.3	Versuchsanordnung und Endeffektor-Design .....	125
6.3.1	Eingesetzte Bus-Systeme und Kommunikationsschnittstellen .....	127
6.4	Reglersynthese für die externe Führung in drei und sechs Freiheitsgraden.....	130
6.4.1	Aufbau einer Positionsregelung.....	130
6.4.2	Aufbau der achsbasierten Poseregelung .....	131
6.5	Untersuchung statischer und dynamischer Genauigkeit .....	131
6.5.1	Statische Absolutgenauigkeit am Punkteraster .....	132
6.5.2	Dynamische Bahngenaugkeit .....	135
6.6	Bahngenaugkeitsuntersuchung unter externen Krafteinflüssen .....	138
6.6.1	Sprungantwort auf einen externen Kraftsprung .....	138
6.6.2	Fräsvorsch zur Ermittlung der prozesskraftbedingten Abdrängung .....	139
6.7	Genauigkeitsuntersuchung bei Erwärmung der Kinematik .....	141
6.7.1	Statische Abweichung durch Erwärmung des IR .....	145
6.7.2	Einfluss auf dynamische Kenngrößen .....	146
6.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	148
<b>7</b>	<b>Analyse und Vergleich der Messsysteme .....</b>	<b>151</b>
7.1	Untersuchung der kompensierbaren Fehlereinflüsse .....	151
7.2	Betrachtung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit.....	154

<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>161</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>173</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis.....</b>	<b>175</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>181</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>185</b>
<b>A Anhang: Mathematische Grundlagen und Konventionen.....</b>	<b>187</b>
A.1 Rotation und Translation.....	187
A.2 Homogene Transformation .....	188
A.3 Posedefinition.....	189