

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	5
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 Robotergerauigkeit	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	Strukturoptimierung	41
3	Rahmenbedingung und Vorgehensweise	43
3.1	<i>MABI MAX-150-CNC-Roboter</i>	43
3.2	Siemens <i>Sinumerik 840D sl</i> CNC-Steuerung	44
3.3	Vorgehensweise und Umsetzung	46
4	Einsatz abtriebsseitiger Messsysteme	49
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 Rundlaufstest	57
4.3	Erweiterte Regelungsstrategie	58
4.4	Genauigkeitsuntersuchung mit direkten Messsystemen	69
4.4.1	Untersuchung der Positionierungsunsicherheit	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
5	Externe Regelung mithilfe eines Stereo-Kameramesssystems	85
5.1	Grundlagen der Stereo-Kameramesstechnik.....	87
5.2	Messmarken für Stereo-Kerasysteme.....	90
5.3	Stereo-Kerasystem 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-Kerasystems zum Lasertracker	98
5.6.3	Genauigkeitsanalyse des Stereo-Kameramesssystems im Arbeitsraum	99
5.7	Statische Roboterposeregulation	101
5.8	Dynamische Roboterbahnregelung	105
5.8.1	Ansatz der externen achsbasierten Regelung eines Industrieroboters	108
5.8.2	Untersuchung der Bahnngenauigkeit.....	111
5.9	Versuche zur Abdrängung unter externem Krafteinfluss.....	114
5.10	Analyse der praktischen Einsatzfähigkeit	117
6	Externe Regelung mithilfe eines Lasertracker-Systems	119
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 Poseregulation	131
6.5	Untersuchung statischer und dynamischer Genauigkeit	131
6.5.1	Statische Absolutngenauigkeit am Punkteraster	132
6.5.2	Dynamische Bahnngenauigkeit	135
6.6	Bahnngenauigkeitsuntersuchung unter externen Krafteinflüssen	138
6.6.1	Sprungantwort auf einen externen Kraftsprung.....	138
6.6.2	Fräsversuch 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
7	Analyse und Vergleich der Messsysteme.....	151
7.1	Untersuchung der kompensierbaren Fehlereinflüsse	151
7.2	Betrachtung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit.....	154

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