

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Fräsbearbeitung mit Industrierobotern</b>	<b>5</b>
2.1 Das Fräsen . . . . .	5
2.1.1 Kinematik und Kinetik . . . . .	5
2.1.2 Schräger Schnitt . . . . .	7
2.1.3 Dynamik des Schnittprozesses . . . . .	8
2.2 Kinematischer und mechatronischer Aufbau von Industrierobotern . . . . .	11
2.3 Genauigkeitskenngrößen . . . . .	15
2.4 Anwendungsgebiete und Grenzen . . . . .	16
2.5 Einflussfaktoren auf die Arbeitsgenauigkeit . . . . .	18
2.6 Modellierung von Antriebs- und Getriebeeinfluss . . . . .	21
2.7 Kompensation bei unzureichender Arbeitsgenauigkeit . . . . .	23
2.8 Passive Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Arbeitsgenauigkeit . . . . .	26
2.9 Zusammenfassung der Problemlage und Zielsetzung . . . . .	27
<b>3 Geometrisches und kinematisches Verhalten von IR</b>	<b>31</b>
3.1 Versuchsumgebung . . . . .	31
3.1.1 Industrieroboter mit Peripherie . . . . .	31
3.1.2 Werkzeugmaschinen . . . . .	33
3.2 Verhalten des äußerlich unbelasteten Systems . . . . .	34
3.2.1 Positioniergenauigkeit und Umkehrspanne bei linearer Bewegung . . . . .	34
3.2.2 Bahngenauigkeit bei kreisförmiger Bewegung . . . . .	37
3.3 Statische Nachgiebigkeit der Maschinenstruktur . . . . .	41
3.3.1 Grundlagen der Lagebeschreibung . . . . .	41
3.3.2 Identifikation des Kraft-Verformungs-Verhaltens am TCP . . . . .	43
3.4 Dynamische Nachgiebigkeit der Maschinenstruktur . . . . .	50
3.4.1 Nichtparametrische Identifikation der dynamischen Nachgiebigkeitsfrequenzmatrix . . . . .	50
3.4.2 Analyse von Schwingungen beim Fräsen . . . . .	57
3.4.3 Einfluss des Bearbeitungssystems auf den Werkzeugverschleiß . . . . .	62

<b>4</b>	<b>Anforderungen an die Modellierung</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Dual-mechanistisches Fräskraftmodell</b>	<b>71</b>
5.1	Geometrische Beschreibung der Schaftfräser . . . . .	73
5.2	Fräskraftberechnung . . . . .	74
5.3	Mechanistische Identifikation der Zerspankraftkoeffizienten . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Modellierung statischer Bahnabweichungen</b>	<b>81</b>
6.1	Kinematischer Aufbau . . . . .	81
6.1.1	Eigenschaften der Hybridkinematik . . . . .	81
6.1.2	Kinematisches Modell . . . . .	82
6.2	Abdrängverhalten des TCPs unter statischer Last . . . . .	86
6.2.1	Prinzip der virtuellen Arbeit und äquivalente Gelenkmomente . . . . .	87
6.2.2	Steifigkeitsformulierung . . . . .	88
6.2.3	Globale Identifikation der Gelenksteifigkeitsmatrix . . . . .	89
6.2.4	Validierung des Modells . . . . .	91
6.3	Verlagerung aufgrund von Umkehrspannen . . . . .	93
6.3.1	Modellierung der Umkehrspanne im Gelenkraum . . . . .	93
6.3.2	Parameteridentifikation einzelner Gelenke . . . . .	94
6.4	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	98
6.5	Experimentelle Erprobung . . . . .	100
6.5.1	Lastfreie Kreisbewegung . . . . .	100
6.5.2	Analyse der Hysteresekurve von Achse 1 . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Simulation und Kompensation statischer Bahnabweichungen</b>	<b>105</b>
7.1	Kartesische Nachgiebigkeit im Arbeitsraum . . . . .	105
7.2	Bahnabweichungen beim Zirkularfräsen von Aluminium . . . . .	106
7.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	107
7.2.2	Vorhersage der Zerspankräfte . . . . .	108
7.2.3	Analyse der Bahnabweichungen . . . . .	110
7.3	Modellbasierte Kompensation im Gelenkraum . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Dynamische Stabilität des Fräsprozesses</b>	<b>115</b>
8.1	Strukturdynamisches Modell . . . . .	117
8.1.1	Modale Transformation . . . . .	119
8.1.2	Kurvenanpassung . . . . .	121
8.2	Vorhersage der Prozessstabilität . . . . .	125
8.2.1	Semi-Diskretisierungsmethode (SDm) . . . . .	127
8.2.2	Dreidimensionale Approximation 0-ter Ordnung (3D-ZOA) . . . . .	131
8.2.3	Fallbeispiele . . . . .	134

---

8.3	Experimentelle Validierung . . . . .	139
8.3.1	Fräsen von Aluminium mit hohen Schnittgeschwindigkeiten . . . . .	140
8.3.2	Fräsen von Titan mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten . . . . .	146
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
	<b>Anhang</b>	<b>167</b>
1	Geometrische Beschreibung der Schaftfräser . . . . .	167
2	Achskonfiguration der Kraft-Verformungs-Messungen am TCP . . . . .	168
	<b>Lebenslauf</b>	<b>169</b>