

# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik in Forschung und Industrie .....</b>	<b>5</b>
2.1 Geometrische Abweichungen in Werkzeugmaschinen .....	7
2.2 Thermo-elastisches Verhalten von Werkzeugmaschinen .....	10
2.3 Methode zur Messung thermo-elastischer Abweichungen .....	12
2.3.1 Direkte Messmethode .....	14
2.3.2 Indirekte Messmethode .....	14
2.3.3 Zusammenfassung .....	26
2.4 Modellierungsmethode der thermo-elastischen Abweichungen .....	28
2.5 Forschungsbedarf .....	29
2.6 Mathematische Grundlagen .....	30
2.6.1 Kinematische Modellierung .....	30
2.6.2 B-Spline .....	32
2.6.3 Lösungsverfahren linearer Gleichungssysteme .....	32
2.6.4 Levenberg-Marquardt .....	34
<b>3 Zielsetzung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>37</b>
<b>4 Modellbildung .....</b>	<b>39</b>
4.1 Methode zur Messung von Abweichungen von fünfachsigen Werkzeugmaschinen .....	39
4.1.1 Messsystem .....	39
4.1.2 Dynamischer R-Test .....	40
4.1.3 Geometrisch-kinematische Modellierung der Werkzeugmaschine .....	44
4.1.4 Messung von thermo-elastischen Abweichungen .....	50
4.2 Modellierung des thermo-elastischen Verhaltens .....	51
4.2.1 Eingangsgrößen für die Modellierung .....	51
4.2.2 Modellierung der thermo-elastischen Abweichungen .....	52
4.3 Bestimmung der thermischen Modellparameter .....	53
4.3.1 Berechnung mit Levenberg-Marquardt-Methode .....	53
4.3.2 Zuordnung der Temperatursensoren .....	55
4.3.3 Zuordnung der steuerungsinternen Daten .....	57
4.4 Fazit .....	57
<b>5 Untersuchung der Messmethode .....</b>	<b>59</b>
5.1 Demonstratormaschine .....	59
5.2 Entwicklung des Messprozesses .....	60
5.3 Monte Carlo Methode .....	67
5.3.1 Quelle der Messunsicherheit .....	68
5.3.2 Methode zur Messunsicherheitsanalyse .....	70

---

5.4	Analyse der Messunsicherheit für thermo-elastische Abweichungen.	71
5.4.1	Variation der Modellparameter für die Messmethode.....	71
5.4.2	Quantifizierung der Messunsicherheit .....	73
5.4.3	Methode zur Validierung der Ergebnisse .....	79
5.4.4	Ergebnisse der Monte Carlo Methode.....	80
5.4.5	Experimentelle Validierung der Ergebnisse .....	83
5.5	Fazit .....	88
<b>6</b>	<b>Thermische Untersuchung des Bearbeitungszentrums .....</b>	<b>91</b>
6.1	Versuchsaufbau .....	91
6.1.1	Versuchsmethode .....	91
6.1.2	Integration der Messtechnik .....	92
6.2	Charakterisierung des thermo-elastischen Verhaltens .....	94
6.2.1	Thermo-elastisches Verhalten durch Belastungen von Linearachsen.....	95
6.2.2	Thermo-elastisches Verhalten durch Belastungen von Rotationsachsen .....	100
6.2.3	Analyse der steuerungsinternen Daten .....	102
6.2.4	Zwischenfazit .....	103
6.3	Modellierung des thermo-elastischen Verhaltens.....	104
6.3.1	Analyse unter Einzelachsbelastungen .....	107
6.3.2	Analyse unter kombinierten Belastungen .....	110
6.3.3	Analyse der Ergebnisse .....	112
6.3.4	Fazit .....	114
<b>7</b>	<b>Übertragung der Erkenntnisse auf eine weitere Werkzeugmaschine</b>	<b>117</b>
7.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus .....	117
7.2	Analyse der Messunsicherheit .....	118
7.3	Thermische Untersuchung .....	123
7.3.1	Analyse des thermo-elastischen Verhaltens .....	123
7.3.2	Modellierung des thermo-elastischen Verhaltens.....	125
7.4	Fazit .....	128
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>147</b>