

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
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
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung	37
4	Modellbildung	39
4.1	Methode zur Messung von Abweichungen von fünffachsigen 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
5	Untersuchung der Messmethode	59
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
6	Thermische Untersuchung des Bearbeitungszentrums	91
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
7	Übertragung der Erkenntnisse auf eine weitere Werkzeugmaschine	117
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
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
9	Literaturverzeichnis	137
10	Anhang	147