

Inhaltsverzeichnis

0	Formel- und Kurzzeichen.....	IV
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung	3
2.1	Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	3
2.2	Entwicklung der Forschungsschwerpunkte	4
2.2.1	Experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen.....	4
2.2.2	Modellentwicklung zur Erklärung und Vorhersage des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen	6
2.2.3	Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen.....	8
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	14
4	Grundlagen der thermischen Modellbildung.....	16
4.1	Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung.....	16
4.1.1	Wärmeleitung	16
4.1.2	Konvektiver Wärmeübergang	18
4.1.3	Strahlung.....	19
4.2	Thermoelastische Verformungsmechanismen	20
4.3	Finite-Elemente-Methode	22
4.3.1	Berechnung des Temperaturfeldes	22
4.3.2	Berechnung der Verformung	25
4.4	Allgemeiner Ablauf der FEM-Berechnung des thermischen Verhaltens	26
5	Untersuchungsmaschine	29
6	Erstellung des FEM-Modells	31
6.1	Strategie zur Erstellung des FEM-Modells	31
6.2	Maschinengestell.....	34
6.3	Motoren.....	35
6.4	Linearführungen und Lager	37
6.5	Wegmesssystem.....	39
6.6	Spindel	40
6.7	Rundschwenktisch.....	44
6.8	Gesamtmodell	46
7	Wärmeentstehung in Werkzeugmaschinen.....	49
7.1	Orte der Wärmeentstehung	49
7.2	Elektrische Verluste in Motoren	49
7.2.1	Kupferverluste	50
7.2.2	Eisenverluste	51
7.2.3	Zusatzverluste	52
7.3	Reibungsverluste in Linearführungen	52
7.4	Reibungsverluste in Wälzlagern	53
7.5	Verzahnungsverluste in Schneckengetriebe	55
7.6	Zerspanungswärme	58
8	Wärmeübertragung in Werkzeugmaschinen	60
8.1	Materialeigenschaften	60

8.2	Wärmeleitung	60
8.2.1	Wärmeleitung in den Blechpaketen von Motoren	61
8.2.2	Wärmeleitfähigkeit von Motorwicklungen.....	62
8.3	Wärmeübertragung in Fugen zwischen Bauteilen.....	63
8.4	Wärmeübertragung in Wälzlagern und Wälzführung.....	68
8.5	Konvektion mit umgebender Luft	70
8.5.1	Freie Konvektion	70
8.5.2	Erzwungene Konvektion.....	73
8.5.3	Konvektive Randbedingungen an der untersuchten Werkzeugmaschine ..75	75
8.5.4	Temperaturabhängige Stoffwerte von Luft.....	77
8.5.5	Strömungsgeschwindigkeit.....	78
8.5.6	Unterprogramm zur Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizient ..80	80
8.6	Kühlung.....	81
8.7	Wärmeübertragung zwischen konzentrischen rotierenden Zylindern	85
8.8	Strahlung.....	86
9	Simulation des thermischen Verhaltens.....	88
9.1	Koordinatensysteme für die Verlagerungssimulation.....	88
9.2	Thermisches Verhalten bei Vorschubbewegungen.....	89
9.2.1	Y-Achse	90
9.2.2	X-Achse	96
9.2.3	Z-Achse	100
9.2.4	Einfluss des Messsystems	103
9.3	Thermisches Verhalten bei Spindelrotation	105
9.4	Thermisches Verhalten bei Tischrotation.....	112
9.4.1	A-Achse	113
9.4.2	C-Achse.....	115
9.5	Thermisches Verhalten bei Umgebungseinfluss	118
10	Experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens.....	124
10.1	Versuchsaufbau	124
10.1.1	Temperaturmessung	124
10.1.2	Verlagerungsmessung	125
10.2	Gegenüberstellung des gemessenen und berechneten thermischen Verhaltens der Linearachsen.....	127
10.2.1	Y-Achse	127
10.2.2	X-Achse	128
10.2.3	Z-Achse	129
10.3	Gegenüberstellung des gemessenen und berechneten thermischen Verhaltens der Spindel	131
10.4	Gegenüberstellung des gemessenen und berechneten thermischen Verhaltens der Drehachsen	134
10.4.1	A-Achse	134
10.4.2	C-Achse	134
10.5	Gegenüberstellung des gemessenen und berechneten thermischen Verhaltens unter Berücksichtigung des Umgebungseinflusses.....	137
10.6	Fazit der experimentellen Untersuchungen	139
11	Entwicklung eines Kompensationsverfahrens.....	140

12 Zusammenfassung	143
13 Literaturverzeichnis	145