

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 Wälzlager 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
8.5.4	Temperaturabhängige Stoffwerte von Luft.....	77
8.5.5	Strömungsgeschwindigkeit.....	78
8.5.6	Unterprogram zur Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizient	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