

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1 Grundlagen des thermo-energetischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen	5
2.1.1 Energetische Bilanzierung	6
2.1.2 Wärmeübertragung	9
2.1.3 Thermo-elastische Verlagerungen	11
2.2 Messtechnische Erfassung des thermo-energetischen Übertragungsverhaltens	12
2.3 Modellierung des thermo-energetischen Übertragungsverhaltens	16
2.3.1 Black-Box-Modelle	18
2.3.2 Grey-Box-Modelle	19
2.3.3 White-Box-Modelle	19
2.4 Maßnahmen zur Reduktion thermo-elastisch induzierter Werkstückfehler	21
2.4.1 Korrekturverfahren	22
2.4.2 Kompensationsverfahren	23
2.5 Bewertung des Forschungsbedarfs	27
3 Zielsetzung, methodischer Ansatz und Demonstrationsobjekt	29
3.1 Zielsetzung	29
3.2 Methodischer Ansatz	29
3.3 Demonstrationsobjekt	30
4 Modellierung des thermischen Verhaltens	35
4.1 Aufbau der thermischen Simulationsumgebung	36
4.1.1 Modellierung von Strukturbauteilen	36
4.1.2 Struktur des Finite-Elemente-Solvers	40
4.1.3 Modellordnungsreduktion	42
4.1.4 Strukturvariabilität	43
4.2 Modellierung thermischer Randbedingungen	46
4.2.1 Maschinenkomponenten	46
4.2.2 Elektrische Antriebe	48
4.2.3 Aktive Kühlsysteme	57

4.2.4	Sonstige Randbedingungen	58
4.3	Validierung und Diskussion	62
5	Prozessbegleitende Berechnung des thermischen Verhaltens	67
5.1	Zusammenstellen der hybriden Trainingsdaten	68
5.1.1	Eingangs- und Ausgangsdaten des Black-Box-Modells	68
5.1.2	Kombination von Mess- und Simulationsdaten	71
5.2	Black-Box-Modellierung des Systemverhaltens	73
5.2.1	Grundlagen und Funktionsweise künstlicher neuronaler Netze	73
5.2.2	Modellaufbau	75
6	Modellprädiktive Regelung des aktiven Kühlsystems	81
6.1	Grundlagen und Funktionsweise der modellprädiktiven Regelung	81
6.2	Hard- und softwareseitige Erweiterung des Demonstrators	83
6.2.1	Kühlaggregat und Sensorik	83
6.2.2	Datenerfassung und -verarbeitung	86
6.2.3	Volumenstrom- und Vorlauftemperaturregelung	87
6.3	Modellprädiktive Regelungsarchitektur	91
6.3.1	Funktionsweise des Optimierers	91
6.3.2	Parametrierung des Optimierers	95
6.4	Validierung	99
6.5	Abschlussbewertung	104
6.5.1	Potenziale	105
6.5.2	Herausforderungen und Grenzen	106
6.5.3	Forschungsbedarf	109
7	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Literaturverzeichnis	117