

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik in Forschung und Industrie</b> . . . . .	<b>5</b>
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
<b>3 Zielsetzung, methodischer Ansatz und Demonstrationsobjekt</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1 Zielsetzung . . . . .	29
3.2 Methodischer Ansatz . . . . .	29
3.3 Demonstrationsobjekt . . . . .	30
<b>4 Modellierung des thermischen Verhaltens</b> . . . . .	<b>35</b>
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
<b>5</b>	<b>Prozessbegleitende Berechnung des thermischen Verhaltens . . . . .</b>	<b>67</b>
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
<b>6</b>	<b>Modellprädiktive Regelung des aktiven Kühlsystems . . . . .</b>	<b>81</b>
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
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>117</b>