

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Aufbau von Motorspindeln	4
2.2 Thermische Modellierung	5
2.2.1 Wärmeübertragungsmechanismen	5
2.2.2 Spindelmodelle	9
2.3 Umgang mit thermischer Verlagerung	13
2.3.1 Vermeidung der Verlagerung	14
2.3.2 Vermindern der Verlagerung	14
2.3.3 Kompensation der Verlagerung	16
3 Aufgabenstellung und hybrider Lösungsansatz	23
4 Thermische Modellierung von schnelldrehenden Motorspindeln	27
4.1 Wärmetransfersysteme	27
4.1.1 Lagergeometrien	27
4.1.2 Spalt zwischen Welle und Gehäuse	28
4.1.3 Festkörperkontaktstellen	30
4.2 Wärmesenken	32
4.2.1 Fluidkühlung	32
4.2.2 Umgebungsluft	34
4.2.3 Spindelstock	40
4.2.4 Außenkühlzuführung, Lagerkühlung, Absaugung und Sperrluftdichtung ..	43
4.2.5 Wärmestrahlung	44
4.3 Wärmequellen	44
4.3.1 Motorverluste	44
4.3.2 Wälzlagerreibungsverluste	47
4.3.3 Luftreibungsverluste	50
4.4 Wellenrotation	55
5 Physikalische Modellbildung	59
5.1 Motorspindel	59
5.1.1 Vorstellung der modellierten Motorspindel	59
5.1.2 Simulationsmodell der Motorspindel	60
5.2 Spindelprüfstand	67
5.2.1 Vorstellung des Spindelprüfstandes	67
5.2.2 Simulationsmodell des Spindelprüfstandes	68
6 Vermeiden der Radialverlagerung durch thermosymmetrische Konstruktion	69
6.1 Datenbasis und Diskretisierung	69

6.2 Quantifizierung thermischer Asymmetrie entlang der drei Raumachsen	71
6.2.1 Geometrische Beschreibung entlang der Achsen	71
6.2.2 Thermische Beschreibung entlang der Achsen	74
6.2.3 Berechnen der thermischen Asymmetrie entlang der Achsen	78
6.2.4 Zusammenfassende Betrachtungen entlang der Achsen	79
6.3 Dreidimensionale Gesamtbetrachtung thermoasymmetrischer Komponenten . .	81
6.3.1 Geometrische Beschreibung einer Komponente	82
6.3.2 Thermische Beschreibung einer Komponente	83
6.3.3 Berechnen der thermischen Asymmetrie einer Komponente	85
6.3.4 Quantifizierung des Gesamtthermoasymmetrievektors	85
7 Kompensation der Axialverlagerung durch steuerungsseitigen Offset	87
7.1 Aufbau des Prozessverständnisses	88
7.2 Aufbau des Datenverständnisses	89
7.3 Analyse der Datengrundlage	92
7.4 Datenbasierte Ersatzmodellierung	98
7.4.1 Entscheidungsbaum	98
7.4.2 Random Forest Regression	99
8 Validierung	101
8.1 Thermische Modellierung	101
8.1.1 Erfassung der Kühlleistung des Prüfstandes	101
8.1.2 Leistungsbilanzbetrachtung und Bestimmung der Lagerverluste	103
8.1.3 Modellabgleich der Motorspindel	104
8.2 Ansatz zur Quantifizierung thermoasymmetrischer Temperaturfelder	106
8.2.1 Einfache Scheibenbetrachtung	107
8.2.2 Simulativer Nachweis des Zusammenhanges	109
8.2.3 Messtechnischer Nachweis des Zusammenhanges	114
8.2.4 Reduktion der Radialverlagerung von Motorspindeln	116
8.3 Steuerungsseitige Kompensation mittels künstlicher Intelligenz	119
8.3.1 Untersuchung der Trainingsläufe	119
8.3.2 Betrachtung der Testläufe	124
9 Zusammenfassung und Ausblick	129
10 Summary and outlook	133
11 Abkürzungsverzeichnis	137
12 Symbolverzeichnis	139
13 Abbildungsverzeichnis	153
14 Tabellenverzeichnis	155
15 Literaturverzeichnis	157

A Anhang	171
A.1 Verzeichnis studentischer Zuarbeit	171
A.2 Eigene Veröffentlichungen	172
A.3 Lebenslauf	173