

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
Christian Brecher und Gritt Ott	
1 Problemstellung	1
2 Ganzheitliche Problemlösestrategie	4
2.1 Weiterentwicklung von Modellgrundlagen	6
2.2 Gestaltungsintegrierte Kompensation	9
2.3 Steuerungsintegrierte Korrektur	9
2.4 Messtechnisch basierte Korrektur	10
2.5 Bewertung	11
3 Charakteristik der Versuchsanlagen	11
Literatur	16
Strukturmodelle von Werkzeugmaschinen	19
Holger Rudolph, Stefan Sauerzapf, Xaver Thiem, Andreas Naumann und Michael Beitelschmidt	
1 Einleitung	19
2 Anwendungsszenarien und Anforderungen	20
3 Theoretische Grundlagen	21
3.1 Kontinuierliche Modelle in Raum und Zeit	22
3.2 Konkretisierung zur Anwendung an Werkzeugmaschinen	25
3.3 Gekoppeltes Zustandsraummodell	25
4 Systemmodellierung	28
4.1 Schnittstellenbasierte Modellierung	28
4.2 Problemspezifische Modellimplementierung	31
4.3 Vergleich der Modellierungsansätze	34
5 Anwendungsbeispiel vereinfachte WZM	37
6 Anwendungsbeispiel MAX	39
7 Zusammenfassung	43
Literatur	44

Effiziente Verhaltensanalyse von Strukturbauteilen	47
Lars Penter und Steffen Schroeder	
1 Einführung	47
2 Analysen des thermo-elastischen Verhaltens.	48
3 Modelle für die thermische Analyse	49
3.1 FE-basiertes Modell für Strukturbauteile	50
3.2 Teilschritte zur FE-basierten Modellerstellung	51
3.2.1 Vereinfachung der Geometrie	52
3.2.2 Erstellung der Gleichungssysteme	53
3.3 Automatisierung der Modellerstellung mit robustem Vernetzungswerkzeug.	55
3.4 Modularisierung durch offene Schnittstellen	56
3.5 Verifikation der MOR-FEM Simulation.	58
4 Zusammenfassung	59
Literatur.	59
Untersuchung von Maschinenkomponenten	61
Stephan Neus, Alexander Steinert, Florian Kneer und Christian Brecher	
1 Maschinenkomponenten im Kontext der thermo-energetischen Wirkungskette	61
1.1 Ausgangssituation.	61
1.2 Zielsetzung	62
1.3 Methodischer Ansatz	62
2 Modellierung des Komponentenverhaltens.	63
3 Untersuchung von Profilschienenführungen	64
4 Untersuchung von Kugelgewindetrieben	66
5 Anwendungsmöglichkeiten der Untersuchungsergebnisse.	69
Literatur.	70
Fluidische Kühlung	71
Christoph Steiert, Juliane Weber und Jürgen Weber	
1 Einleitung	71
2 Prozessaktuelles Simulationsmodell	72
2.1 Modellierungskonzept	72
2.2 Modell der Werkzeugmaschinenkühlung	77
2.3 Modellvalidierung	81
2.4 Integration in das Gesamtmaschinenmodell.	83
3 Einsatzmöglichkeiten des Kühlsystemmodells.	85
4 Zusammenfassung.	85
Literatur.	86
Prozessmodellierung des Fräs- und Schleifprozesses	87
Marc Bredthauer, Hui Liu, Patrick Mattfeld, Thomas Berghs, Sebastian Barth, Markus Meurer, Christian Wrobel und Thorsten Augspurger	
1 Einleitung	87
2 Prozessmodellierung von Temperaturen und Wärmeströmen im Fräsprozess	88

Inhaltsverzeichnis	VII
2.1 Empirische Untersuchungen zur Bestimmung von Temperaturen und Wärmeströmen im Fräsprozess	89
2.2 Modellierung von Wärmeströmen und Temperaturfeldern	90
3 Prozessmodellierung des Schleifprozesses	94
3.1 Modellierung der Wärmequelle	94
3.1.1 Empirische Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmequelle im Schleifprozess	94
3.1.2 Modellierung der Wärmequelle im Schleifprozess	96
3.2 Modellierung der Wärmestromaufteilung	97
3.2.1 Konzept zur empirischen Untersuchung der Wärmestromaufteilung	97
3.2.2 Empirisch-analytische Modellierung der Wärmestromaufteilung	98
3.2.3 Ausblick auf die Modellierung der verschleißbedingten Schleifscheibentopographieänderung	100
4 Zusammenfassung	102
Literatur	103
Der Elektroantrieb als thermo-energetische Blackbox	105
Stefan Winkler und Ralf Werner	
1 Einführung	105
2 Grundlagen des Motormodells	106
3 Parametrierung des Motormodells	107
3.1 Motorabmessungen	107
3.2 Materialkennwerte	110
3.3 Verlustverteilung	111
3.4 Vergleich von Simulation und Messung	112
4 Zusammenfassung	114
Literatur	115
Modellierung von Kühlschmierstoffwirkung im Zerspanprozess	117
Marc Bredthauer, Hui Liu, Thorsten Helmig, Lukas Topinka, Steffen Brier, Joachim Regel, Patrick Mattfeld, Thomas Bergs, Sebastian Barth, Markus Meurer und Reinhold Kneer	
1 Einleitung	118
2 Prozessmodellierung unter Berücksichtigung des Kühlschmierstoffeffekts	119
2.1 Versuchsanordnung	119
2.2 Spanbildungssimulation unter Berücksichtigung der Kühlschmierstoffwirkung	121
3 Thermische Modellierung der Kühlschmierstoffströmung in der Zerpanzone	123
3.1 Generierung des Rechengitters und Modellannahmen	124
3.2 Exemplarische Ergebnisse der Strömungssimulation	125
4 Modellierung des Wärmeflusses in den Werkzeughalter	126

4.1	Simulationsmodellbeschreibung.	127
4.2	Kühlmittelströmung um das Werkzeug	128
5	Zusammenfassung.	129
	Literatur.	129
	Thermische Modellierung von Verbindungsstellen	131
	Thorsten Helmig, Faruk Al-Sibai und Reinhold Kneer	
1	Einleitung	131
2	Grundlagenphänomene	132
3	Analytisch-theoretische Beschreibung der Kontaktwärmeübergänge.	132
4	Experimentelle Bestimmung von Kontaktwärmeübergangskoeffizienten	134
5	Numerische Bestimmung von Kontaktwärmeübergangskoeffizienten	136
6	Vorstellung exemplarischer Ergebnisse und Diskussion.	138
6.1	Einfluss von Rauheit und Oberflächenausrichtung.	138
6.2	Einfluss von Zwischenmedien	140
6.3	Einfluss von makroskopischer Krümmung.	141
7	Zusammenfassung und Ausblick.	142
	Literatur.	143
	Modellierung von Umgebungseinflüssen	145
	Tharun Suresh Kumar, Christian Naumann, Alexander Geist und Janine Glänzel	
1	Einleitung	145
2	Parametrierung von Umwelteinflüssen	146
2.1	Problembeschreibung	146
2.2	Entkopplungsansatz bei der Parametrierung	146
2.2.1	Vorgehensweise bei der Entkopplung.	147
2.2.2	Optimale Clusterung mit genetischem Algorithmus.	148
2.3	Validierung des Entkopplungsansatzes anhand gekoppelter Simulationen.	150
2.4	Parallelisierung bei der Automatisierung der Entkopplung	151
2.5	Experimentelle Validierung des Entkopplungsansatzes	153
3	Lastfallunabhängige Clusterung der Wärmeübergangskoeffizienten	156
4	Modifizierter Entkopplungsansatz für interne und externe Umgebungseinflüssen	158
4.1	Abbildung von internen und externen Umwelteinflüssen mithilfe künstlicher neuronaler Netze	160
4.2	Trainingsdatenmodell	161
4.3	Validierung des CFD-Simulationsmodells (interne Umgebung)	162
4.3.1	Validierung mit Thermografiekamera.	164
4.3.2	Validierung mit berührenden Temperatursensoren.	166
4.3.3	Validierung der KNN-basierten Entkopplung mit experimentellen Messwerten	167
5	Zusammenfassung.	169
	Literatur.	171

Aufwandsarmer Abgleich parametrischer Maschinenmodelle: Parameterabgleich im Betrieb	173
Hajo Wiemer, Manfred Benesch und Jens Müller	
1 Einführung	173
2 Abstrakte Maschinenmodellbeschreibung	174
3 Strukturiertes Vorgehensmodell	176
4 Parameterabgleich während der Inbetriebnahme und im Betrieb von WZM	185
5 Zusammenfassung	187
Literatur	187
Datenassimilation und optimale Sensorplatzierung	189
Andreas Naumann, Ilka Riedel und Roland Herzog	
1 Einleitung	189
2 Datenassimilation	190
3 Optimale Sensorplatzierung	193
4 Zusammenfassung	196
Literatur	197
Rechenzeitsparende Modellierung	199
Julia Vettermann, Quirin Aumann, Jens Saak und Peter Benner	
1 Einleitung	199
2 Grundlagen	200
3 MOR für Netzwerkmodelle	203
3.1 Behandlung gekoppelter thermo-elastischer Modelle	206
3.2 Berücksichtigung inhomogener Anfangsbedingungen	207
3.3 Strategien der MOR für relativ bewegte Baugruppen	207
4 Praktische Hinweise zur Auswahl geeigneter MOR-Strategien	208
5 Zusammenfassung	210
Literatur	210
Sicherheitsmechanismen des Cloud-Computings zur Verwendung in Korrekturverfahren	213
Robert Krahn und Christof Fetzer	
1 Einleitung	213
2 Grundlegende Begriffe	214
2.1 Verteiltes Rechnen	214
2.2 Virtualisierung mittels Container	214
2.3 On-Premise/Off-Premise	215
2.4 Verschlüsselung	216
3 Confidential Computing	216
3.1 Schutz von Software	217
3.2 Trusted Execution Environment (TEE)	218
3.2.1 TEE von Intel	219
3.3 Attestierung von Software	220
3.4 Gesichertes Ausführen von Software mit SCONE	221

3.5	Verwaltung vertraulicher Daten mit Palaemon	223
3.5.1	Verwaltung von Geheimnissen	224
3.5.2	Geheimhaltung, Datenintegrität und Datenfrische	224
3.6	Leistungsanalyse in verschiedenen Umgebungen	225
4	Sicheres und Automatisiertes Starten von Verteilten Anwendungen.	227
4.1	Deployment mit Kubernetes und SCONE	228
4.2	Verwendung existierender Helm-Charts zum Deployment sicherer Anwendungen	229
5	Anwendungsbeispiel	230
6	Zusammenfassung	231
	Literatur.	232
Effiziente transiente thermo-elastische Simulation von Werkzeugmaschinen		235
Andreas Naumann		
1	Einleitung	235
2	Thermo-mechanisches Modell einer WZM.	237
3	Effiziente Zeitintegration.	239
3.1	Defect corrected averaging (DCA).	240
3.2	Parallele Zeitintegrationsverfahren (PARAeXP)	241
3.3	Laufzeitvergleiche	242
4	Zusammenfassung	243
	Literatur.	244
Energieeffiziente Systeme zur aktiven Steuerung von Wärmeflüssen		245
Immanuel Voigt und Welf-Guntram Drossel		
1	Einleitung	245
2	Zeitliche Beeinflussung von Wärmeströmen.	246
2.1	Latentwärmespeicherung	246
2.2	Anwendung in Vorschubachsen	248
2.2.1	Szenario Lineardirektantrieb	248
2.2.2	Szenario Kugelgewindetrieb.	249
2.3	Thermische Schalter	249
3	Örtliche Beeinflussung von Wärmeströmen	251
3.1	Funktionsweise von Heatpipes	251
3.2	Charakterisierung von Heatpipes	252
3.3	Einsatz von Kühlkörpern	253
4	Kombination der Einzelkomponenten zu Kompensationsnetzwerken	254
4.1	Auslegung mittels gemischt-dimensionaler FE-Modellierung.	255
4.2	Exemplarisches Kompensationsszenario	257
4.3	Richtlinien für die Integration von Kompensationskomponenten in Werkzeugmaschinen	258
5	Zusammenfassung	259
	Literatur.	260

Kompensationslösung fluidische Kühlung	263
Juliane Weber, Christoph Steiert und Jürgen Weber	
1 Einleitung	263
2 Kühlsysteme in Werkzeugmaschinen	265
2.1 Stand der Technik	265
2.2 Kühlsystemstrukturen	265
2.2.1 Ableitung regelbarer Kühlsystemstrukturen	266
2.2.2 Regelungskonzepte für die vorgeschlagenen Kühlsystemstrukturen	267
2.2.3 Volumenstromregelung	268
2.2.4 Temperaturregelung	269
2.3 Bewertung der Kühlstrukturen	270
3 Komponentenoptimierung am Beispiel der Kühlhülse einer Motorspindel	271
3.1 Konstruktionstechnische Details	271
3.1.1 Konstruktiver Aufbau von Motorspindeln	271
3.1.2 Experimenteller Versuchsaufbau zur Untersuchung von Statorkühlhülsen	272
3.2 Modellbildung und Simulation	273
3.2.1 Grundlegende Betrachtungen	273
3.2.2 Berücksichtigung temperaturabhängiger Werkstoffeigenschaften	275
3.2.3 Hochauflösende Simulation mithilfe numerischer Strömungsmechanik	276
3.2.4 Schnelle Berechnung mithilfe abstrahierter Netzwerkmodelle	279
3.3 Optimierung des thermo-energetischen Verhaltens	281
4 Zusammenfassung	285
Literatur	286
Optimierte Temperierung von Maschinengestellen für unsymmetrische Lasteinträge	289
Christoph Steiert, Juliane Weber, Arvid Hellmich, Alexander Geist, Sarah Mater, Janine Glänzel, Jürgen Weber und Steffen Ihlenfeldt	
1 Einführung	289
2 Methodik zur thermischen und energetischen Optimierung von Maschinengestellen	290
2.1 Parametrisches Simulationsmodell	290
2.2 Anwendung der Methodik zur Optimierung eines Maschinengestells aus Mineralbeton	295
3 Umsetzung der Temperaturregelung	301
3.1 Entwicklung von geeigneten Regelungsstrategien	301
3.2 Vergleichsmessung und Ergebnisbeurteilung	301
4 Zusammenfassung	302
Literatur	302

Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur	305
Robert Spierling, Mathias Dehn, Franziska Plum und Christian Brecher	
1 Einleitung	305
2 Grundlagen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur	307
3 Anwendung der Korrektur	309
3.1 Korrektur einer Drehachse	310
3.2 Korrektur einer 3-Achs Kinematik	312
4 Zusammenfassung	313
Literatur	314
Strukturmodellbasierte Korrektur	315
Jens Müller, Xaver Thiem und Steffen Ihlenfeldt	
1 Einleitung	315
2 Grundlagen	316
2.1 Strukturmodell als Abbildung der Wirkungskette	316
2.2 Anforderungen an die Umsetzung	317
3 Lösung	318
3.1 Echtzeitbereiche und modularisierter Korrekturansatz	318
3.2 Eingangsdatenverarbeitung	319
3.3 Strukturmodelle für die Korrektur	321
3.4 Volumetrische Korrektur	323
4 Untersuchung der Varianten für volumetrische Korrektur am Beispiel	328
4.1 Kinematisches Modell	329
4.2 Abschätzung der Korrekturgenauigkeit	329
5 Umsetzung der Korrektur für Hexapoden	332
5.1 Steuerungsanbindung	332
5.2 Strukturmodell	333
5.3 Validierung	335
5.3.1 Versuchsaufbau	335
5.3.2 Versuchsdurchführung	335
5.3.3 Ergebnisse	337
6 Zusammenfassung	338
Literatur	338
Kennfeldbasierte Korrektur	341
Christian Naumann, Martin Naumann, Alexander Geist, Tharun Suresh Kumar und Janine Glänzel	
1 Einleitung	341
2 Erstellung der KennfeldKorrektur	342
2.1 Kennfelder und Korrekturprinzip	342
2.2 Wahl der Eingangsvariablen	343
2.3 Kennfeldberechnung	344
2.4 Kennfeld-Validierung und -Optimierung	348
3 Steuerungsintegration	349
4 Praxisbeispiel DMU 80 eVo	351
5 Korrektur von Umgebungsschwankungen	357

6	Lastfallspezifische Kennfeld-Updates	357
	Literatur	358
	Thermische Vorsteuerung	361
	Eric Wenkler und Steffen Ihlenfeldt	
1	Einleitung	361
2	Bearbeitungsspezifische Verlustprognose	362
2.1	Interpretation der Bearbeitungsaufgabe mittels einer virtuellen Steuerung	362
2.2	Applikation von Verlustmodellen	363
2.2.1	Lagerverluste	364
2.2.2	Kugelgewindetriebverlust	365
2.2.3	Motorverlust	365
2.3	Prototypische Implementierung der bearbeitungsspezifischen Verlustprognose	366
2.4	Exemplarische Anwendung: Applikation und Analyse prognostizierter Verluste für eine realistische Bearbeitung	367
2.4.1	Exemplarische Anwendung: Applikation der Verlustprognose in der Planungsphase zur Reduktion thermischer Änderungen.	369
3	Aufgabenspezifische Prognose des thermischen Maschinenverhaltens	371
3.1	FE-Modellerstellung	372
3.2	Parameterabgleich	373
3.3	Bearbeitungsspezifische thermische Prognose	377
3.3.1	Verlusttransformation	380
3.3.2	Exemplarische Applikation und Vergleich von Messung und Simulation	381
4	Bedarfsgerechte Temperierung am Beispiel des Maschinenbettes	383
4.1	Bestimmung der Zieltemperaturen	385
4.2	Applikation: Dauerkühlung und bedarfsgerechte Kühlung	386
4.3	Vergleich: Dauerkühlung und bedarfsgerechte Kühlung	387
5	Zusammenfassung und Ausblick	391
	Literatur	392
	Effiziente Parametrierung von Korrekturmodellen	395
	Stephan Neus, Alexander Steinert, Robert Spierling und Christian Brecher	
1	Einleitung	395
1.1	Ausgangslage	395
1.2	Lösungsansatz	396
2	Aufbau eines Korrekturmodells	397
2.1	Modellierung von Spindelsystemen	397
2.2	Modellbasierte Parametrierung von Spindelkorrekturmodellen.	399
2.3	Empirische Parametrierung von Korrekturmodellen für Linearachsen	402
2.4	Synthese der Korrekturmodelle	404

3	Bewertung	405
	Literatur	407
Online-Korrektur thermisch bedingter Verformungen mithilfe von integralen Verformungssensoren		409
Nico Bertaggia, Filippas Tzanetos, Daniel Zontar und Christian Brecher		
1	Einleitung	409
2	Lösungsansatz	412
2.1	Konstruktion der IDS	412
2.2	Messprinzip der IDS	415
2.3	Datenvorverarbeitung zur Trennung mechanisch bedingter von thermischen Verformungen	417
2.4	Mechanisches Übertragungsmodell	418
2.5	Anwendung für eine ONLINE-Korrekturwert-Aufschaltung	423
2.6	Optimale IDS-Platzierung	425
3	Vorstellung exemplarischer Ergebnisse und Diskussion	426
4	Zusammenfassung	426
	Literatur	427
Photogrammetrisches Messmodell zur Erfassung thermisch bedingter Fehler an WZM		429
Jens Müller, Jessica Deutsch und Siddharth Murali		
1	Kontext	429
2	Konzept Photogrammetrie	430
2.1	Klassische Photogrammetrie	430
2.2	Erweitertes Photogrammetrisches Messmodell	431
2.2.1	Parametrierbare Objekte	432
2.2.2	Abbildung der Kinematischen Kette	433
3	Versuchsaufbau und Durchführung am Demonstrator MAX	433
3.1	Versuchsaufbau	433
3.2	Versuchsplanung	434
4	Ergebnisse – Geometrisch-kinematische Fehler	434
5	Ergebnisse – Thermischer Fehler am Demonstrator MAX	436
6	Zusammenfassung und Ausblick	437
	Literatur	437
Korrektur der thermischen Verlagerung rotierender Werkzeuge unter dem Einfluss verschiedener Kühlstrategien		439
Steffen Brier, Lukas Topinka und Joachim Regel		
1	Einleitung	439
2	Kühlungsprinzipien	440
2.1	Aufbau des experimentellen Versuchstandes für die Werkzeugenerwärmung	440
2.2	Luftkühlung	441
2.2.1	Numerische Simulation der Luftkühlung	442
2.2.2	Kühlwirkung der Luftkühlung	442

Inhaltsverzeichnis	XV
2.3 Vollstrahlkühlung	444
2.3.1 Numerische Simulation der Vollstrahlkühlung	444
2.3.2 Kühlwirkung der Vollstrahlkühlung	445
3 Kennfelderstellung	446
4 Zusammenfassung und Ausblick	448
Literatur	449
Demonstrator Motorspindel	451
Stephan Neus, Alexander Steinert und Christian Brecher	
1 Problemstellung	451
2 Einleitung	451
2.1 Ausgangslage	451
2.2 Lösungsansatz	452
3 Aufbau des thermischen Solvers	452
4 Modellierung thermischer Randbedingungen	454
4.1 Hintergrund	454
4.2 Reibverluste in Spindellagern	455
4.3 Motorverluste	458
4.4 Aktive Kühlsysteme	460
4.5 Festkörperkontakte	462
4.6 Konvektion und Strahlung	463
4.7 Zusammenfassung	463
5 White-Box-Modelle im prozessparallelen Einsatz	464
5.1 Berechnungsablauf	464
5.2 Prüfstand	465
5.3 Validierung	466
5.4 Zusammenfassung	468
Literatur	468
Bewertungsmethodik	471
Hajo Wiemer, Axel Fickert und Carola Gißke	
1 Einführung/Motivation	471
2 Bewertungsmetrik	472
2.1 Analyse der Lösungsverfahren	473
3 Kriterium Lösungsumsetzungsgrad	474
3.1 Ermittlung des Nutzens der Lösungen	475
3.1.1 Messung der Effektivität der Lösungsverfahren	475
3.1.2 Untersuchungsszenarien	477
3.2 Auswertung	478
4 Vergleichende Bewertung	481
4.1 Kriterienausprägung	481
4.2 Festlegung der Kriteriengewichte	481
4.3 Aggregation der ermittelten Werte	482
5 Zusammenfassung	485
Literatur	486

Anwendungsbeispiel DMU 80 eVo.	489
Christian Naumann, Alexander Geist, Tharun Suresh Kumar, Juliane Weber, Christoph Steiert, Immanuel Voigt, Franziska Plum, Xaver Thiem, Nico Bertaggia, Janine Glänzel, Jürgen Weber, Daniel Zontar, Christian Brecher und Steffen Ihlenfeldt	
1 Einleitung	489
2 Iststand-Analyse des thermischen Verhaltes	493
2.1 Messtechnische Analyse.....	493
2.2 Simulative Analyse.....	500
2.3 Optimierungsziele der Korrektur/Kompensation	502
3 Methodenauswahl für die Optimierung.....	504
3.1 Kompensationsmethoden	505
3.1.1 Optimierung der Kühlsysteme am Beispiel der DMU 80 eVo.....	505
3.1.2 Einsatz thermischer Tilger und Heatpipes an der DMU 80 eVo	506
3.2 Korrekturverfahren	508
3.2.1 Kennfeldbasierte Korrektur	508
3.2.2 Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur	509
3.2.3 Strukturmodellbasierte Korrektur.....	510
3.2.4 Messtechnikbasierte Korrektur.....	512
3.3 Bewertungsmatrix und finale Methodenauswahl	513
4 Beispielhafte Implementierung von Maßnahmen	515
5 Bewertung der Optimierung	517
6 Zusammenfassung.....	518
Literatur.....	519
SFB/TR 96 Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen – Eine systemische Lösung des Zielkonflikts von Energieeinsatz, Genauigkeit und Produktivität am Beispiel der spanenden Fertigung	519