

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten Beschreibung  
des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen**

**Tobias Maier**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

2. Univ.-Prof. Wolfgang Polifke, Ph. D.

Die Dissertation wurde am 23.09.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.02.2015 angenommen.

Tobias Maier

**Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten  
Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens  
von Werkzeugmaschinen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 317

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2016

ISBN 978-3-8316-4561-9

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis   | V         |
| Abkürzungsverzeichnis   | XIII      |
| Symbolverzeichnis   | XV        |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Werkzeugmaschinen – zwischen Leistung und Genauigkeit   | 1         |
| 1.2 Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen . . . .   | 2         |
| 1.3 Begriffsklärung und Simulation in der Entwicklung . .   | 4         |
| 1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .   | 6         |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik</b>  | <b>9</b>  |
| 2.1 Grundlagen der Wärmeübertragung und des thermoelastischen Strukturverhaltens . . . . .                        | 9         |
| 2.1.1 Wärmeübertragung . . . . .  | 9         |
| 2.1.2 Thermoelastisches Strukturverhalten . . . .   | 13        |
| 2.2 Thermoelastisches Verhalten spanender Werkzeugmaschinen . . . . .   | 14        |
| 2.3 Simulation des thermoelastischen Maschinenverhaltens  | 17        |
| 2.3.1 Begriffsklärung und Übersicht über Simulationsverfahren . . . . .   | 17        |
| 2.3.2 Simulation auf Basis der FDM . . . . .  | 18        |
| 2.3.3 Simulation auf Basis der FEM . . . . .  | 22        |
| 2.4 Handlungsbedarf . . . . .   | 34        |
| <b>3 Konzipierung einer aufgabenbasierten Modellierung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen</b> | <b>37</b> |
| 3.1 Anforderungen an die Modellierungssystematik und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes . . . . .              | 37        |
| 3.2 Systematik zur Modellierung . . . . .   | 38        |
| <b>4 Erstellung thermischer Modelle auf Basis mechanischer Modelle in der FEM</b>                                 | <b>41</b> |
| 4.1 Vorgehen zur Abbildung von Wärmeleitungsvorgängen auf Basis mechanischer FE-Modelle . . . . .                 | 41        |
| 4.2 Aufbau mechanischer FEM-Modelle . . . . .   | 43        |

|          |       |   |           |
|----------|-------|---|-----------|
|          | 4.2.1 | Aufbau von Strukturbauteilen . . . . .  | 43        |
|          | 4.2.2 | Abbildung von Verbindungen im Modell . .  | 45        |
| 4.3      |       | Grundlagen zur Berechnung von Umgebungsrandbedingun-<br>gen . . . . .   | 48        |
|          | 4.3.1 | Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs   | 48        |
|          | 4.3.2 | Berechnung der erzwungenen Konvektion .   | 49        |
|          | 4.3.3 | Berechnung der freien Konvektion . . . . .  | 51        |
|          | 4.3.4 | Strahlung . . . . .   | 56        |
| 4.4      |       | Vorgehen zur Transformation <sup>1</sup> der strukturellen Eigenschaf-<br>ten . . . . .   | 57        |
|          | 4.4.1 | Transformation <sup>1</sup> der im FE-Netz abgebildeten<br>Komponenten . . . . .  | 57        |
|          | 4.4.2 | Transformation der Verbindungselemente .  | 60        |
| 4.5      |       | Vorgehen zur Ermittlung der Umgebungsrandbedingun-<br>gen . . . . .   | 60        |
|          | 4.5.1 | Außenflächenerkennung des Modells . . . . .   | 60        |
|          | 4.5.2 | Definition des Wärmeübergangs aus Strahlung   | 71        |
|          | 4.5.3 | Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten<br>für die Konvektion . . . . .  | 71        |
| 4.6      |       | Umsetzung des Transformationsvorgehens in einer Schnitt-<br>stelle . . . . .  | 73        |
|          | 4.6.1 | Allgemeines . . . . .   | 73        |
|          | 4.6.2 | Import des Modells . . . . .  | 74        |
|          | 4.6.3 | Transformation des Modells . . . . .  | 75        |
|          | 4.6.4 | Export des Modells . . . . .  | 76        |
|          | 4.6.5 | Nicht in der Schnittstelle berücksichtigte Eigen-<br>schaften des Modells . . . . .   | 77        |
| 4.7      |       | Verifikation der Außenflächenerkennung und der Berech-<br>nung der Wärmeübergangskoeffizienten aus freier Konvek-<br>tion . . . . . | 78        |
| 4.8      |       | Fazit . . . . .   | 81        |
| <b>5</b> |       | <b>Aufgabenbasierte Ermittlung von Wärmequellen</b>   | <b>83</b> |
|          | 5.1   | Vorgehen zur Bestimmung von Wärmequellen . . . . .  | 83        |
|          | 5.2   | Innere Wärmequellen in Werkzeugmaschinen . . . . .  | 85        |
|          | 5.3   | Thermische Wirkkette aufgabenabhängiger Wärmequellen  | 91        |
|          | 5.4   | Ableitung der Bewegungsprofile für die einzelnen Achsen   | 92        |
|          | 5.4.1 | Ableitung achsspezifischer Bewegungen . . . . .   | 92        |
|          | 5.4.2 | Berechnung der zustandsaktuellen Maschinen-<br>struktur . . . . .   | 95        |
|          | 5.5   | Aufbau des Prozessmoduls . . . . .  | 98        |
|          | 5.5.1 | Berechnung der Zerspankräfte . . . . .  | 98        |
|          | 5.5.2 | Berechnung der Prozesswärme . . . . .   | 100       |
|          | 5.6   | Aufbau des Vorschubachs-Moduls . . . . .  | 102       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.6.1    | Modul zur Lastberechnung . . . . .  | 102        |
| 5.6.2    | Führungs-Modul . . . . .  | 104        |
| 5.6.3    | Kugelgewindetriebs-Modul . . . . .  | 109        |
| 5.6.4    | Lager- und Dichtungs-Modul . . . . .  | 110        |
| 5.6.5    | Motor-Modul . . . . .   | 111        |
| 5.7      | Aufbau des Hauptantriebs-Moduls . . . . .   | 113        |
| 5.7.1    | Modul zur Lastberechnung . . . . .  | 113        |
| 5.7.2    | Lager-Modul . . . . .   | 116        |
| 5.7.3    | Motor-Modul . . . . .   | 117        |
| 5.8      | Übersicht über die Ein- und Ausgangsgrößen des Wärmequellenmodells . . . . .          | 118        |
| 5.9      | Applikation von Wärmequellen im Maschinenmodell . . . . .                             | 121        |
| 5.9.1    | Allgemeines . . . . .   | 121        |
| 5.9.2    | Modellierungskonzept für bewegte Wärmequellen . . . . .                               | 123        |
| 5.9.3    | Untersuchungen zur Gültigkeit von Wärmequellenverteilungen . . . . .                  | 128        |
| 5.9.4    | Fazit . . . . .   | 141        |
| <b>6</b> | <b>Anwendung der Modellierungssystematik</b>  | <b>145</b> |
| 6.1      | Beschreibung des Untersuchungsgegenstands: Universaldrehzentrum . . . . .             | 145        |
| 6.2      | Transformationsvorgehen vom strukturmechanischen in den thermischen Bereich . . . . . | 147        |
| 6.3      | Wärmequellenmodell . . . . .  | 150        |
| 6.3.1    | Aufbau des Wärmequellenmodells für das Universaldrehzentrum . . . . .                 | 150        |
| 6.3.2    | Versuchsaufbau für die Messung von Zerspankräften und Motorleistungen . . . . .       | 151        |
| 6.3.3    | Gegenüberstellung von Simulation und Messung . . . . .                                | 157        |
| 6.3.4    | Sensitivitäten . . . . .  | 169        |
| 6.4      | Versuchsaufbau für die Messung des thermoelastischen Maschinenverhaltens . . . . .    | 172        |
| 6.5      | Umgebungsrandbedingungen und Wärmequellen der thermoelastischen Simulation . . . . .  | 177        |
| 6.6      | Gegenüberstellung von Simulation und Messung . . . . .                                | 180        |
| 6.7      | Technische und wirtschaftliche Bewertung der Modellierungssystematik . . . . .        | 184        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>193</b> |
| 7.1      | Zusammenfassung . . . . .   | 193        |
| 7.2      | Ausblick . . . . .  | 195        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>197</b> |
| <b>A Vorschubachsen-Module der Randbedingungsmodellierung</b>                            | <b>211</b> |
| A.1 Allgemeines . . . . .  | 211        |
| A.2 Modul zur Lastberechnung . . . . .   | 211        |
| A.3 Führungs-Modul . . . . .   | 213        |
| A.4 Kugelgewindetriebs-Modul, Lager- und Dichtungs-Modul<br>und Motor-Modul . . . . .    | 214        |
| <b>B Angaben zum Anwendungsbeispiel Drehmaschine</b>                                     | <b>215</b> |
| B.1 NC-Programm zum Bauteil <i>Antriebswelle</i> . . . . .                               | 215        |
| B.2 Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation für<br>die Verlagerung . . . . . | 219        |
| <b>C Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>   | <b>223</b> |

# 1 Einleitung

## 1.1 Werkzeugmaschinen – zwischen Leistung und Genauigkeit

Werkzeugmaschinen zählen zu den wichtigsten Produktionsmitteln in der metallverarbeitenden Industrie. Mit der fortschreitenden Erholung nach der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 trägt die Werkzeugmaschinenindustrie wieder mit ca. 14,1 Mrd. €<sup>1</sup> zum Bruttoinlandsprodukt der Bundesrepublik Deutschland bei. Allein 7,8 Mrd. € entfallen dabei auf den Bereich der spanenden Werkzeugmaschinen (VDW 2013).

Moderne Werkzeugmaschinen unterliegen dabei vielfältigen Rahmenbedingungen hinsichtlich ihrer Leistung und Wirtschaftlichkeit. Als spezifische Anforderungen sind u. a. hohe Mengenleistungen, große Flexibilität, niedrige Fertigungskosten, Automatisierungsmöglichkeiten von Maschinenfunktionen sowie vermehrt auch Umweltverträglichkeit und Ressourceneffizienz zu nennen. Eine essentielle, oftmals mit anderen Aspekten konkurrierende Randbedingung stellt darüber hinaus die erreichbare Arbeitsgenauigkeit der Maschine dar. Zu fertigende Produkte erfordern steigende Oberflächengüten bei niedrigen Form- und Lagetoleranzen. Die Gewährleistung höchster Genauigkeiten wird somit zu einem maßgeblichem Wettbewerbsvorteil für die Hersteller. Moderne, konventionelle Werkzeugmaschinen dringen dabei durchaus in den Bereich weniger Mikrometer vor, Ultrapräzisionsmaschinen können sogar noch höhere Genauigkeiten erreichen (MILBERG 1992; WECK & BRECHER 2005).

Maschinenbedingte Abweichungen in der Bearbeitung sind dabei grundsätzlich auf den kinematischen Aufbau, die Festigkeitseigenschaften sowie das statische, das dynamische und das thermische<sup>2</sup> Verhalten der Maschine zurückzuführen (WECK & BRECHER 2006b). Aufgrund der zunehmenden Beherrschung des statischen und des mechanischen Systems steigt die Bedeutung der thermisch induzierten Werkstückfehler. Verstärkt wird dies durch die Installation immer größerer Antriebsleistungen und den Trend zur Minimalmengen Kühlschmierung bzw. zur Trockenbearbeitung. Das Verständnis und die Kontrolle der thermischen Struktureigenschaften kann dabei neben der Beherrschung des Ratterns

---

<sup>1</sup> Zahlen für das Jahr 2012, teilweise geschätzt

<sup>2</sup> In diesem Kontext: das thermoelastische Verhalten



als größte Herausforderung der Werkzeugmaschinenentwicklung bezeichnet werden (ITO 2010).

## 1.2 Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen

Das thermische Verhalten spanender Werkzeugmaschinen ist insbesondere in Hinsicht auf die thermisch bedingten Wirkpunktverlagerungen von Interesse. Diese sind Folge der thermoelastischen Verformungen von Strukturbauteilen, die durch die Positionsmesssysteme nicht erfasst und damit nicht ausgeregelt werden können. Die Werkzeugmaschine unterliegt aus thermischer Sicht einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie sie u. a. WECK & BRECHER (2006b) auflisten. Abbildung 1.1 zeigt die thermischen Zusammenhänge in der Werkzeugmaschine.

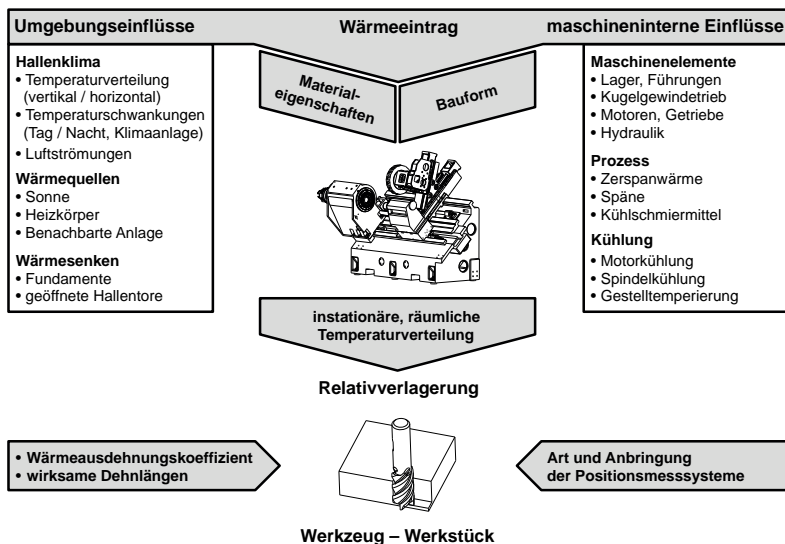


Abb. 1.1: Übersicht der Einflussgrößen auf die thermisch bedingte Wirkpunktverlagerung an spanenden Werkzeugmaschinen, in Anlehnung an WECK & BRECHER (2006b)

Die Wärmeeinbringung wird dabei durch Umgebungs- und maschineninterne Einflüsse bestimmt und führt in Verbindung mit der Bauform und den

Materialeigenschaften (v. a. der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität) zu einem instationären Temperaturfeld in der Maschinenstruktur. Aufgrund der Wärmeausdehnungskoeffizienten und der freien Dehnlängen kommt es daraufhin zur thermoelastischen Verformung der Strukturbauteile. Die Relativverlagerung und -neigung von Werkstück und Werkzeug, und damit der Bearbeitungsfehler, wird darüber hinaus durch die Maschinenkinematik sowie die Art und Anbringung der Positionsmesssysteme beeinflusst. Die Größenordnung der thermisch bedingten Verlagerungen lässt sich anhand der Wärmeausdehnungskoeffizienten häufig verwendeter Konstruktionswerkstoffe abschätzen (siehe Tabelle 1.1). In Verbindung mit typischen Abmessungen in Werkzeugmaschinen in der Dimension von einem Meter ergeben sich bereits bei einer homogenen Temperaturerhöhung von  $1\text{ K}$  Längendehnungen im zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich und damit weit oberhalb der geforderten Bearbeitungsgenauigkeit. Darüber hinaus können thermische Biegungen über die Hebelverhältnisse zu noch größeren Wirkpunktverlagerungen führen.

**Tabelle 1.1:** Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\beta$  von Gestellwerkstoffen im Werkzeugmaschinenbau (in Anlehnung an WECK & BRECHER (2006a))

| Werkstoff                          | $\beta$ in $10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ |
|------------------------------------|---|
| Stahl                              | 11,1                                    |
| Grauguss mit Lamellengraphit (GJL) | 9                                       |
| Grauguss mit Kugelgraphit (GJS)    | 9,5                                     |
| Aluminium                          | 21 – 24                                 |
| Reaktionsharzbeton                 | 2                                       |

Der Beschreibung, und darauf aufbauend der Beherrschung, des thermischen Maschinenverhalten ist daher eine große Bedeutung zuzumessen. Dabei gilt es, im allgemeinen Fall ein instationäres, dreidimensionales Problem zu lösen, dem das Temperaturfeld und damit die thermoelastische Verlagerung zugrunde liegt. Für die Erfassung des thermischen Verhaltens sind demnach sowohl räumliche wie auch zeitliche Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Das räumliche Temperaturfeld ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Geometrie, Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe, Wirkort und Stärke von Umgebungs- und maschineninternen Einflüssen. Die Wirkpunktverlagerung resultiert damit aus der Kombination vieler Verlagerungen einzelner Komponenten und ist dadurch nur bedingt prognostizierbar. Erschwert wird dies durch die zeitliche Veränderung des Temperaturfeldes. Nur in Ausnahmefällen kann von einem stationären Zustand ausgegangen werden. Die Veränderung der Umgebungsbedingungen oder eine Variation des Bearbeitungsprogramms können neben vielen anderen

Faktoren zu einem instationären Verhalten führen.

Aufgrund der geringen Prognostizierbarkeit des thermischen Verhaltens können meist nur sehr begrenzte Maßnahmen bei der Maschinenentwicklung und im Betrieb umgesetzt werden. Diese reichen von der Auslagerung dominierender Wärmequellen über den Einsatz thermisch stabilerer Werkstoff bis hin zur aktiven Temperierung zur Gewährleistung homogener Temperaturverteilungen. Dennoch sind für viele Anwendungen kompensatorische Maßnahmen obligatorisch, wobei gerade die indirekten Kompensationsverfahren ein tiefes Verständnis des thermischen Maschinenverhaltens erfordern. Durch geeignete Modelle kann die Simulationstechnik helfen, das fehlende Systemverständnis aufzubauen und bereits in der Entwurfsphase die thermisch bedingte Wirkpunktverlagerung zu prognostizieren.

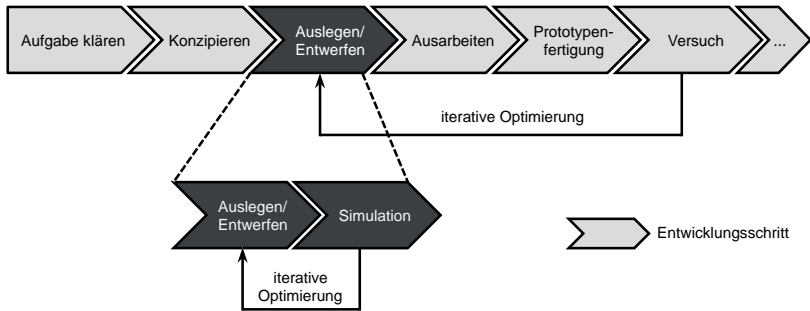
### 1.3 Begriffsklärung und Simulation in der Entwicklung

Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Einflüsse auf die Maschinenstruktur in die beiden folgenden Klassen eingeteilt. Die beiden Kategorien entsprechen im Wesentlichen der Einteilung aus WECK & BRECHER (2006b) in *Umgebungseinflüsse* und *maschineninterne Einflüsse*. Sie stellen die thermischen Randbedingungen des Systems dar. Der im Rahmen der Simulation übliche Begriff der *Randbedingung* bleibt davon unberührt, er umfasst im Wesentlichen beide Kategorien.

**Umgebungsrandbedingungen:** Darunter sind alle Einflüsse zusammengefasst, die über die Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion und Strahlung von außen auf die Maschinenstruktur einwirken. Hierbei ist es unerheblich, ob diese zu einem Wärmefluss in die Struktur hinein oder aus der Struktur heraus führen.

**Wärmequellen:** Unter diesem Begriff sind alle maschineninternen Einflüsse zusammengefasst, die als Wärmestromrandbedingung direkt auf die Struktur einwirken. Eine Wärmesenke wird als negative Wärmequelle verstanden. Wärmequellen werden entweder als Wärmestromdichten  $[\frac{W}{m^2}]$  oder als Wärmeströme  $[W]$  abgebildet.

Eine Verbesserung dieses Maschinenverhaltens, und damit einhergehend die Erhöhung der erreichbaren Genauigkeit, steht dabei schon in der Entwicklungsphase im Mittelpunkt. In der Entwurfs- bzw. Ausarbeitungsphase werden bereits die grundlegenden Eigenschaften der späteren Maschine festgelegt. Um die Erreichung der geforderten Fähigkeiten zu gewährleisten, sind meist Untersuchungen an realen Prototypen mit mehreren Iterationsschleifen nötig. Abbildung 1.2 zeigt das mehrstufige Vorgehen in der Entwicklungsphase.

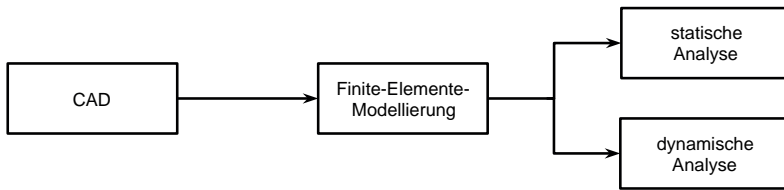


**Abb. 1.2:** Verkürzung der Optimierungsphase durch den Einsatz virtueller Prototypen in der Entwicklung (in Anlehnung an SCHNEIDER (2000))

Der Einsatz virtueller Prototypen kann dabei die Anzahl an nötigen Iterationsschritten mit realen Prototypen reduzieren. Die Iteration wird statt dessen am Modell, also dem virtuellen Prototyp, vorgenommen. Dadurch sind Variationen in deutlich kürzeren Zeiten möglich und die Beobachtbarkeit der Auswirkungen von bestimmten Konstruktionsänderungen wird verbessert. Daraus ergibt sich neben der Einsparung von Prototypen und der damit verbundenen Kosten vor allem eine erhebliche Zeitersparnis, da nicht auf die Prototypenfertigung und die daran durchgeführten Versuche gewartet werden muss.

Die stärkere Einbindung der Simulationstechnik ist deshalb auch ein aktueller Trend im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen. ALTINTAS ET AL. (2005) präsentieren in ihrer Abhandlung zum Thema *Virtual Machinetool* den integrierten Entwicklungsprozess für Werkzeugmaschinen unter Zuhilfenahme virtueller Prototypen. Vom Konzept bis zur Realisierung werden dabei die folgenden Schritte dargestellt: CAD-Modellierung der Maschine und Kinematikauslegung, rechnerische Untersuchung von Einzelkomponenten, Finite-Elemente-Simulation der Gesamtmaschine, mit den Antrieben gekoppelte flexible Mehrkörpersimulation sowie der Abgleich von Simulation und Messung. Für die Finite-Elemente-Simulation der Maschine wird die in Abbildung 1.3 illustrierte Kette digitaler Werkzeuge dargestellt.

Darüber hinaus zeigt HENNAUER (2012), dass auf Basis der dynamischen Analyse auch eine Mechatronik-Simulation der Maschine durchgeführt werden kann. Die Ausführungen von ALTINTAS ET AL. (2005) erläutern zusätzlich die Möglichkeit, das thermische Maschinenverhalten auf diese Art und Weise zu beschreiben, es wird jedoch klar, dass diese Modellierung im Vergleich zu der



**Abb. 1.3:** Abfolge der Anwendung digitaler Werkzeuge bei der Finite-Elemente-Simulation von Werkzeugmaschinen (in Anlehnung an ALTINTAS ET AL. (2005))

des statischen und des dynamischen Verhaltens noch nicht so stark in den Entwicklungsprozess eingebunden ist.

## 1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das thermische Verhalten ist auch aufgrund des hohen Modellierungsaufwands noch nicht umfassend in den Entwicklungsprozess eingebunden. Die steigenden Genauigkeitsanforderungen bedingen aber zukünftig ein verbessertes thermisches Verhalten. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Einbindung der Modellierung des thermoelastischen Verhaltens in die digitale Werkzeugkette bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen. Basis und Kernidee ist die weitere Verwendung bestehender strukturmechanischer Modelle sowie die automatisierte Bestimmung der Randbedingungen. Mit der stringenten Fokussierung auf das Bearbeitungsprogramm können in Verbindung mit Daten des Maschinenentwurfs alle Wärmequellen und Umgebungsrandbedingungen (also die thermischen Randbedingungen des Systems) berechnet werden. Ein Kernpunkt ist dabei der Bearbeitungsprozess, der auch in seiner indirekten Wirkung als Last für die Antriebssysteme und Übertragungselemente berücksichtigt werden soll.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden in *Kapitel 2* zunächst die notwendigen Grundlagen zum thermoelastischen Verhalten spanender Werkzeugmaschinen und zu dessen Simulation dargelegt. Neben den Grundlagen der Wärmeübertragung stehen die Simulationsmethoden im Fokus. Darüber hinaus wird der aktuelle Stand der Technik zur thermischen Simulation von Komponenten und Werkzeugmaschinen beschrieben. Dieser bildet die Basis für die Ableitung des Handlungsbedarfs.

In *Kapitel 3* wird die Modellierungssystematik konzipiert, die die relevanten Aspekte des Handlungsbedarfs adressiert. Hierfür werden zunächst die An-

forderungen an die Modellierungssystematik abgeklärt und anschließend die einzelnen Umsetzungsschritte präsentiert.

Den ersten Schritt stellt die Transformation der Struktur und die Ermittlung der Umgebungsrandbedingungen dar, wie sie in *Kapitel 4* thematisiert wird. Hierbei wird zunächst auf den Aufbau mechanischer Modelle, die der Transformation zugrunde liegen, und auf die Grundlagen zur Beschreibung von Umgebungsrandbedingungen in der Simulation eingegangen. Kernpunkt dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Vorgehens zur Ermittlung der Umgebungsrandbedingungen, das auch einen aus acht Schritten bestehenden Algorithmus zur Erkennung der Modellaußenflächen beinhaltet. Am Ende dieses Abschnitts soll ein mit Umgebungsrandbedingungen versehenes berechnungsfähiges thermisches Maschinenmodell zur Verfügung stehen.

Dieses Modell muss in einem weiteren Schritt mit Wärmequellen versehen werden. *Kapitel 5* beschreibt das Konzept eines aufgabenbasierten Wärmequellenmodells für die Ermittlung der für die Simulation benötigten Größen. Auf Basis der Darstellung grundlegender Berechnungen zu den internen Wärmequellen in Werkzeugmaschinen werden Module für die einzelnen Komponenten entwickelt und miteinander verknüpft. Die Applikation bewegter Wärmequellen auf einem unbewegten Modell wird in einem weiteren Abschnitt betrachtet. An einem Ersatzmodell wird aufgezeigt, in welchen Fällen sich rechenzeitsparende Vereinfachungen erheblich auf das Berechnungsergebnis auswirken.

Die Anwendung der Modellierungssystematik wird in *Kapitel 6* anhand eines Universaldrehzentrums beschrieben und umfassenden messtechnischen Untersuchungen gegenübergestellt. Es erfolgt eine detaillierte Validierung des Wärmequellenmodells und der gesamten Modellierungssystematik. Anhand des Anwendungsbeispiels wird das entwickelte Vorgehen vor dem Hintergrund technischer und wirtschaftlicher Faktoren bewertet.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf in *Kapitel 7*.

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen  
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfof, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen  
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernold Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden  
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heltmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinenaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3



- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schilp:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0663-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsen- ten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlicknieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würnsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigi:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteilabgabestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Fockerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens  
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4519-0
- 305 **Yi Shen:** System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4520-6
- 306 **Thomas Bonin:** Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten - ISBN 978-3-8316-4522-0
- 307 **Jan Daniel Musiol:** Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden  
168 Seiten - ISBN 978-3-8316-4523-7
- 308 **Emin Genc:** Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 **Mirko Langhorst:** Beherrschung von Schweißverzug und Schweißteigenspannungen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 **Markus Schweiße:** Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation  
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 **Florian Geiger:** System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4537-4
- 312 **Peter Schnellbach:** Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-4540-4
- 313 **Stefan Schwarz:** Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von Werkzeugmaschinenstrukturen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4542-8
- 314 **Markus Pröpster:** Methodik zur kurzfristigen Ausrüstung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4547-3
- 315 **Dominik David Simon:** Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4548-0
- 316 **Stefan Maurer:** Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4554-1

317 *Tobias Maier*: Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten  
Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens von  
Werkzeugmaschinen  
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4561-9