

Matthias Waibel

**Aktive Zusatzsysteme zur  
Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 273

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2012

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 · 2013

ISBN 978-3-8316-4250-2

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Die Werkzeugmaschinenbranche im Aufbruch .....	1
1.2 Leistungsgrenzen von Werkzeugmaschinen .....	2
1.3 Schwingungsarten und deren Ursachen .....	3
1.3.1 Selbsterregte Schwingungen .....	3
1.3.2 Fremderregte Schwingungen.....	4
1.3.3 Zusammenfassung .....	6
1.4 Möglichkeiten zur Schwingungsreduktion .....	7
1.4.1 Modellvorstellung .....	7
1.4.2 Veränderung der Systemeigenschaften .....	9
1.4.3 Störgrößenvariation .....	11
1.4.4 Passive und aktive Zusatzsysteme.....	12
1.4.5 Zusammenfassung .....	15
1.5 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	17
<b>2 Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion .....</b>	<b>19</b>
2.1 Inhalt des Kapitels.....	19
2.2 Adaptronik und adaptronische Systeme .....	19
2.3 Analyse bestehender aktiver Zusatzsysteme für Werkzeugmaschinen.....	23
2.3.1 Allgemeines.....	23

2.3.2	Piezoaktoren.....	24
2.3.3	Elektrodynamische Aktoren.....	28
2.4	Zusammenfassung.....	29
<b>3</b>	<b>Entwicklung aktiver Zusatzsysteme .....</b>	<b>31</b>
3.1	Vorgehen bei der Entwicklung aktiver Zusatzsysteme.....	31
3.2	Anforderungen an aktive Zusatzsysteme .....	33
<b>4</b>	<b>Mechanische Integration aktiver Zusatzsysteme .....</b>	<b>35</b>
4.1	Ansätze zur Integration aktiver Zusatzsysteme .....	35
4.2	Modellbildung mechanischer Strukturen .....	36
4.2.1	Allgemeines .....	36
4.2.2	Nodale Darstellung .....	37
4.2.3	Modale Darstellung.....	41
4.2.4	Zusammenfassung.....	44
4.3	Bewertungsmethode zur mechanischen Integration .....	44
4.3.1	Allgemeines .....	44
4.3.2	Generierung der Ein- und Ausgangsmatrizen.....	45
4.3.3	Modellbildung der Maschinenstruktur.....	48
4.3.4	Identifikation relevanter Knotenpunkte .....	52
4.3.5	Vorschrift zur Bewertung aktiver Zusatzsysteme.....	54
4.3.6	Vorgehensweise bei der mechanischen Integration.....	60
4.4	Zusammenfassung.....	62

<b>5 Entwicklung einer Regelstrategie.....</b>	<b>63</b>
5.1 Allgemeines und Inhalt des Kapitels.....	63
5.2 Anforderungen an eine Regelung zur aktiven Schwingungsreduktion.....	65
5.3 Regelstrategien zur aktiven Schwingungsreduktion .....	66
5.3.1 Allgemeines.....	66
5.3.2 Kollokale Regelstrategien .....	66
5.3.3 Modellbasierte Regelstrategien .....	67
5.3.4 Zusammenfassung .....	71
5.4 Adaptive Steuerung .....	72
5.4.1 Allgemeines.....	72
5.4.2 LMS-Algorithmus .....	73
5.4.3 FxLMS-Algorithmus.....	76
5.5 Adaptive Regelung.....	79
5.6 Zusammenfassung.....	82
<b>6 Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>85</b>
6.1 Inhalt des Kapitels .....	85
6.2 Portalfräsmaschine .....	85
6.3 Mechanische Integration .....	92
6.3.1 Allgemeines.....	92
6.3.2 Berechnung der Platzierungsindizes .....	93
6.3.3 Visualisierung der Ergebnisse .....	95
6.3.4 Praktische Umsetzung .....	97
6.3.5 Zusammenfassung.....	100

6.4 Adaptive Regelung.....	101
6.4.1 Allgemeines .....	101
6.4.2 Identifikation der Sekundärstrecken .....	102
6.4.3 Vorversuch mit adaptiver Regelung .....	104
6.4.4 Zerspanversuche.....	107
6.5 Fazit des Kapitels.....	112
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
7.1 Zusammenfassung.....	113
7.2 Ausblick .....	115
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>117</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Werkzeugmaschinenbranche im Aufbruch

„Die Zeiten sind schwierig wie lange nicht mehr. Das Erfolgsrezept der Branche in der Vergangenheit war ihre Fähigkeit, sich immer wieder Neuem zu öffnen.“ So lautete das Vorwort zum 4. Deutschen Maschinenbaugipfel, der unter anderem vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) sowie vom Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) ausgerichtet wurde. Nach Angaben des VDMA lag der Auftragseingang im deutschen Maschinen- und Anlagenbau im Mai 2009 um 48 % unter dem Ergebnis des Vorjahres (BÖHLER 2009).

Die Antwort auf die Frage, wie diese wirtschaftliche Entwicklung zu stoppen ist, liefert Kai Engel von A.T. Kearney (FRAUNHOFER IIS 2009): „Rohstoffarme Hochlohnstandorte wie Deutschland sind auf Innovationen angewiesen, um ihre Wirtschaft nachhaltig weiterentwickeln und einem Abbau des Wohlstandes entgegen wirken zu können. So kann Deutschland von der Produktion wenig innovativer Produkte und Dienstleistungen nur selten bzw. kaum profitieren, da konkurrierende Standorte mit weniger Know-how diese Leistungen fast gleichwertig, aber deutlich günstiger herstellen können.“

Dieser Sachverhalt lässt sich mit dem Leitsatz des Produktionskongresses, der 2008 im Rahmen des *münchner kolloquiums* stattfand, zusammenfassen (HOFFMANN ET AL. 2008): „Innovationen sind die Bodenschätze Deutschlands! Daher sind innovative Ideen eine Grundvoraussetzung, um den langfristigen Erfolg unseres Standortes zu sichern.“

Im engeren Sinne resultieren Innovationen erst dann aus Ideen, wenn diese in neue Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren umgesetzt werden, die tatsächlich erfolgreiche Anwendung finden und den Markt durchdringen (MÜLLER-PROTHMANN ET AL. 2009).

Wo liegen also Potenziale, um die Produktionstechnik durch Innovationen schneller voranzutreiben als die Konkurrenz? Für welche Herausforderungen müssen jetzt Lösungen gefunden werden, weil sie marktwirtschaftlich den größten Stellhebel aufweisen?

Werkzeugmaschinen repräsentieren die bedeutendsten Produktionsmittel der metallverarbeitenden Industrie. In der Bundesrepublik Deutschland fallen ca. 8 % des Produktionsvolumens der gesamten Maschinenbaubranche auf den Bereich der Werkzeugmaschinen (WECK ET AL. 2006). Der Auftragseingang der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie betrug im Jahr 2011 ca. 16,7 Mrd. EUR. Davon kommen 5,5 Mrd. EUR Auftragsvolumen aus dem Inland und 11,2 Mrd. EUR aus dem Ausland<sup>4</sup>. Um auf diesen absatzstarken Wachstumsmärkten Schritt halten zu können, ist es erforderlich, wettbewerbsfähige Premium-Produkte auf den Markt zu bringen. Diese müssen sich in den Kriterien Leistungsfähigkeit, Produktivität und Genauigkeit von Konkurrenzprodukten abheben. Dazu sind zunächst die einschränkenden Faktoren für diese Kriterien zu identifizieren. Im Folgenden werden die heute vorherrschenden Leistungsgrenzen von Werkzeugmaschinen aufgezeigt, die in dieser Arbeit durch den Einsatz neuer innovativer Verfahren und Technologien überwunden werden sollen.

### **1.2 Leistungsgrenzen von Werkzeugmaschinen**

Die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen wird neben den eingesetzten Antrieben durch das Nachgiebigkeitsverhalten infolge statischer und dynamischer Kraftanregung begrenzt. Thermische oder mechanische Einflussgrößen können von den vorgegebenen Arbeitsbewegungen abweichende Verlagerungen von Werkzeug und Werkstück während der Bearbeitung verursachen. Mechanische Einflussgrößen rufen beispielsweise durch die statischen und dynamischen Zerspankraftanteile Verformungen der im Kraftfluss liegenden Komponenten hervor, die zu einer Relativverlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück führen. Der statische Anteil dieser Verlagerung führt zu geometrischen Formfehlern des Werkstücks und kann heute bereits kompensiert werden. Dynamische, sich zeitlich verändernde Belastungen regen dagegen Schwingungsformen an, die die Zerspanleistung erheblich einschränken (WECK ET AL. 2006). Bei ungünstigen Schnittbedingungen spanender Werkzeugmaschinen wird dadurch der Prozess instabil und es entstehen so genannte Ratterschwingungen, die neben Qualitätsverlusten beim Bearbeitungsergebnis (Abbildung 1.1) in erhöhtem Verschleiß von Maschinenkomponenten resultieren.

---

<sup>4</sup> Statistisches Bundesamt, Ifo-Institut, VDMA, VDW, 09.02.2012



*Abbildung 1.1: Schematische Darstellung leistungsbegrenzender Faktoren spanender Werkzeugmaschinen (in Anlehnung an MILBERG 1971)*

Eine statistische Analyse der dynamischen Schwachstellen von Konsolfräsmaschinen zeigt auf, dass 60 % der Störfälle durch Ratterschwingungen verursacht werden (MILBERG 1992). Der Markt fordert aber immer größere Zerspanleistungen bei gleicher Maschinengröße sowie die Bearbeitung neuartiger, schwer zerspanbarer Werkstoffe. Nur durch eine Reduktion auftretender Schwingungen kann die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen diesen Herausforderungen gerecht werden. Dies zu realisieren, setzt ein Verständnis bezüglich der Schwingungen von Werkzeugmaschinen voraus. Der folgende Abschnitt beschreibt daher existierende Schwingungsarten sowie deren Ursachen und Ausprägungen.

### **1.3 Schwingungsarten und deren Ursachen**

#### **1.3.1 Selbsterregte Schwingungen**

Werkzeugmaschinen können selbst- und fremderregten Schwingungen unterliegen. Selbsterregte Schwingungen sind durch eine oder mehrere Eigenfrequenzen charakterisiert, in denen die Maschine schwingt, wobei selbsterregte Schwingungen nicht von äußeren Störkräften verursacht werden. Vielmehr kann z. B. die Rückwirkung des Zerspanprozesses auf die nachgiebige Maschinenstruktur zu einem instabilen Bearbeitungsfall führen. Als häufigste Ursachen für das Entstehen dieser Instabilität sind folgende Mechanismen zu nennen:

1. Eine stoßartige Störung führt zu einer Eigenschwingungsbewegung der Maschine, die sich als Bearbeitungsergebnis auf der Oberfläche des Werkstücks abbildet. Durch wiederholtes Einschneiden des Werkzeugs, bspw. nach einer Umdrehung des Werkstücks beim Drehen, entsteht durch die wellige Oberfläche des Werkstücks eine periodische Kraftanregung mit einer oder mehreren Eigenfrequenzen der Maschinenstruktur. Dieser Effekt wird als regeneratives Rattern bezeichnet.
2. Die Lagekopplung wird durch zwei nahe beieinanderliegenden Eigenfrequenzen eines Systems charakterisiert, deren Eigenschwingungsformen durch einen Zerspanprozess angeregt werden. Die resultierenden Schwingwege überlagern sich und die Werkzeugschneide beschreibt eine Ellipsenbahn. Da sich während dieses Prozesses ständig die Spannungsdicke ändert, kann dieses Phänomen ebenfalls zu Ratterschwingungen führen.
3. Die fallende Kraft-Geschwindigkeit-Charakteristik beschreibt den Effekt, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Schnittkraft abnimmt. Die daraus resultierende Schwingung ist vergleichbar mit dem Stick-Slip-Effekt bei Gleitführungen. Bei sehr niedrigen Schnittgeschwindigkeiten kann dieser Effekt zu unregelmäßigen Anregungsformen führen und so Instabilitäten verursachen.
4. Bei der Bearbeitung mit kleinen Schnittgeschwindigkeiten und hohen Vorschüben kann es zur Aufbauschneidenbildung kommen. Ein Lösen der Aufbauschneide während der Zerspanung hat schwankende Kräfte zur Folge, deren verursachte Strukturverlagerung sich auf der bearbeiteten Oberfläche abbildet.

Da die letzten beiden Phänomene nur bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten auftreten, sind sie heute kaum mehr von Bedeutung (WECK ET AL. 2006).

### 1.3.2 Fremderregte Schwingungen

#### Freie Schwingungen

Fremderregte Schwingungen sind freie oder erzwungene Schwingungen. Freie Schwingungen treten auf, wenn eine Kraft stoß- oder sprungartig auf eine mechanische Struktur einwirkt, diese verformt und das System anschließend frei ausschlagen kann (MILBERG 1992). Die dabei entstehende Schwingungsform setzt sich aus allen im System enthaltenen Eigenschwingungsformen zusammen. Nur die auftretenden Dämpfungskräfte lassen diese Form der Schwingung nach

einer bestimmten Abklingzeit zur Ruhe kommen. Ursachen derartiger freier Schwingungen können äußere Kräfte sein, die bspw. über das Fundament eingeleitet werden. Weiterhin lösen z. B. ruckartiges Anfahren und Abbremsen von Achsen sowie Wechselwirkungen von Bearbeitungsachsen bei Mehrspindelautomaten diese Schwingungen aus.

### **Erzwungene Schwingungen**

Erzwungene Schwingungen sind das Ergebnis periodischer Anregungsformen, wie infolge von Unwuchten von Wellen, Lagerfehlern und wechselnden Schnittkräften bei unterbrochenem Schnitt. Dabei wirkt eine Kraftanregung mit konstanter Frequenz auf die Maschinenstruktur ein, deren dynamische Nachgiebigkeit den resultierenden Schwingweg jedes Strukturpunkts des Systems bestimmt. Die mechanische Struktur schwingt bei erzwungenen Schwingungen mit der Frequenz der Anregung. Dabei kommt es zu umso größeren Amplituden, je näher diese Frequenz in Richtung einer Eigenfrequenz des Systems rückt (WECK ET AL. 2006).

### **1.3.3 Zusammenfassung**

Abbildung 1.2 fasst die Schwingungsarten sowie deren Ursachen und Ausprägungen zusammen und zeigt einige Beispiele für Anregungsursachen von Werkzeugmaschinen.

*Abbildung 1.2: Schwingungsarten und deren Ursachen an spanenden Werkzeugmaschinen (in Anlehnung an SIMNOFSKE 2009 und WECK ET AL. 2006)*

Nachdem die Ursachen und Ausprägungen von Schwingungen spanender Werkzeugmaschinen bekannt sind, stellt sich die Frage, wie die unerwünschten Ratterschwingungen reduziert oder vermieden werden können. Der folgende Abschnitt zeigt die heutigen Möglichkeiten zur Schwingungsreduktion auf.

## 1.4 Möglichkeiten zur Schwingungsreduktion

### 1.4.1 Modellvorstellung

Eine geeignete Modellvorstellung ist die Grundlage für das Verständnis der Möglichkeiten zur Beeinflussung des dynamischen Verhaltens mechanischer Strukturen. Dazu ist eine systemtheoretische Betrachtung sinnvoll, die Ein- und Ausgangsgrößen eines Prozesses oder eines Gebildes zueinander in Beziehung setzt und so eine abstrakte Beschreibung des betrachteten Systems darstellt (Abbildung 1.3).



Abbildung 1.3: *Systemtheoretische Betrachtung der Ein- und Ausgänge allgemeiner dynamischer Systeme und Werkzeugmaschinen*

Die Übertragung dieser Modellvorstellung auf das System einer Werkzeugmaschine zeigt, dass dem Eingangsvektor  $\mathbf{u}$  ein Kraftvektor  $\mathbf{f}_a$  entspricht. Das dynamische System selbst ist durch eine Massenmatrix, eine Dämpfungsmatrix sowie eine Steifigkeitsmatrix charakterisiert und die Ausgänge  $\mathbf{y}$  bilden die Verlagerungen  $\mathbf{q}$  ab. Das System kann mit Hilfe der Schwingungsdifferentialgleichung 2. Ordnung vollständig beschrieben werden:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}_a \quad (1.1)$$

Eine in serieller Kinematik aufgebaute Werkzeugmaschine besteht aus Gestell-Komponenten, wie einem Maschinenbett und mehreren Schlittenkörpern, die über Führungsbahnen miteinander gekoppelt sind. Für eine Abstraktion eines derartigen mechanischen Systems eignet sich ein Mehr-Massen-Schwinger (Abbildung 1.4). Für grundlegende Betrachtungen wird im weiteren Verlauf auch der Ein-Massen-Schwinger (EMS) als stark abstrahierte Beschreibung der Maschinenstruktur herangezogen.

*Abbildung 1.4: Schematische Darstellung einer Werkzeugmaschine mit verschiedenen Abstraktionsgraden*

Speziell Schwingungen, die eine relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück hervorrufen, sind unerwünscht. Schwingungen von Maschinenkomponenten dagegen sind zulässig, solange diese nicht negativ auf das Bearbeitungsergebnis einwirken und keine mechanischen Schäden oder Lärm verursachen.

Aus der Bewegungsdifferentialgleichung 2. Ordnung (Gleichung (1.1)) wird deutlich, dass auftretende Kräfte in innere und äußere Kräfte gegliedert werden können. Die inneren Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitskräfte resultieren aus den Systemeigenschaften, die durch die Systemmatrizen charakterisiert sind. Die auf die mechanische Struktur wirkenden Kräfte werden durch die so genannten Störgrößen wie bspw. den Zerspanprozess oder Achsbeschleunigungen verursacht und führen zu selbst- oder fremderregten Schwingungen. Weiterhin können durch zusätzliche Systeme gezielt äußere Kräfte aufgeprägt werden, um nach dem Vorbild der Schwingungsauslöschung schädliche Schwingungen zu reduzieren oder ganz zu vermeiden.

Folglich existieren drei Maßnahmen zur Einflussnahme auf das dynamische Verhalten einer Maschine. Es können

- die Systemeigenschaften verändert,
- die Störgrößen variiert oder
- Kräfte verursachende Zusatzsysteme integriert werden.

Nach dieser Einteilung werden im Folgenden die heute zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Schwingungsreduktion detailliert erläutert.

### 1.4.2 Veränderung der Systemeigenschaften

Eine Veränderung der Systemeigenschaften der Werkzeugmaschinenstruktur kann durch Masseumverteilung, durch Dämpfungs- oder durch Steifigkeitsvariation erreicht werden. Dazu wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl von Methoden entwickelt, mit dem Ziel, die Maßnahmen mit dem größten Potenzial zu identifizieren. OERTLI 2008 erstellte ein Finite-Elemente-(FE)-Modell einer Werkzeugmaschine, ermittelte Strukturantworten infolge verschiedenster Anregungsformen und analysierte die vorliegenden, dominanten Schwachstellen. Mit Hilfe eines derartigen Modells lassen sich durch Steifigkeitsvariationen von Verbindungskomponenten oder durch geometrische Veränderungen von Strukturkomponenten die Veränderungen von Systemeigenschaften untersuchen. Weitere Beschreibungsformen basieren auf Starrkörpersystemen, auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) und auf elastischen Mehrkörpersystemen (MKS). Zur Anwendung dieser Methoden auf den Bereich der Werkzeugmaschinenentwicklung mit dem Ziel der Verbesserung der Systemeigenschaften existiert eine Vielzahl von Forschungsarbeiten (ALBERTZ 1995, SCHNEIDER 2000, BAUDISCH 2003, BERKEMER 2003, WEIßENBERGER 2007, HOFFMANN 2008 und SIEDL 2008).

In weiteren Arbeiten wird die Betrachtung der integrierten Modellbildung von Werkzeugmaschinenstrukturen und deren Antrieben um den Teilbereich der Zerspanprozesse erweitert (BROOS ET AL. 2006, WITT 2007, HOFFMANN 2008, SIEDL 2008 und BRECHER ET AL. 2009). Damit existieren heute Werkzeuge zur Berechnung der Prozessstabilität und der erreichbaren Fertigungstoleranzen über den gesamten Arbeitsraum. Dazu wird in den meisten Arbeiten der Arbeitsraum in diskrete Punkte unterteilt und jeweils ein Maschinenmodell erstellt. Mit diesem Vorgehen lässt sich die Variation der Nachgiebigkeit einer Maschine an verschiedenen Positionen im Arbeitsraum annähern.

Abbildung 1.5 ordnet die verschiedenen Methoden zur Untersuchung der Systemeigenschaften mechanischer Systeme nach Komplexitäts- und Entwicklungsgrad ein. Für die Untersuchung und Variation der Systemeigenschaften einzelner Bauteile eignet sich demnach die FEM hervorragend. Bei Betrachtung komplexer Systeme, wie Werkzeugmaschinen, bietet sich in der frühen Phase der Entwicklung ein MKS mit starren Gestell-Komponenten an, die in einem zweiten Schritt durch FE-Körper ersetzt werden können.

*Abbildung 1.5: Methoden zur Auslegung, Analyse und Verbesserung des dynamischen Strukturverhaltens mechanischer Systeme (in Anlehnung an WEIßENBERGER 2007)*

In vielen Arbeiten wird der Einsatz von Simulationssystemen während des Entwicklungsprozesses als *Optimierung* bezeichnet. In den meisten Fällen handelt es sich aber lediglich um Variantenvergleiche oder Parameterstudien und nicht um die Minimierung eines Gütekriteriums zur Findung eines globalen oder lokalen Minimums. Daher ist es zweckmäßig, statt von *Optimierung* eher von *Verbesserung* des Maschinenverhaltens zu sprechen.

In der Regel werden bei der Veränderung von Systemeigenschaften konkurrierende Ziele verfolgt. Bewegte Baugruppen werden durch eine Reduktion des Materialeinsatzes oder Substitution durch neuartige Materialien, wie bspw. faserverstärkte Verbundwerkstoffe, leichter hergestellt. Demgegenüber stehen die statischen und dynamischen Steifigkeitsanforderungen an eine Maschine, die dann durch aufwändige Konstruktionsarbeiten und damit steigende Entwicklungskosten erbracht werden müssen.

Bei den oben genannten Simulationmethoden steht die rechnergestützte Verbesserung der Massen- und Steifigkeitseigenschaften im Vordergrund. Ein praktischer Ansatz zur Beeinflussung der Dämpfungseigenschaften wird von HIPKE 2003 vorgeschlagen. Herkömmliche Gestell-Bauteile werden in dieser Arbeit durch aluminiumgeschäumte Stahlblech-Schweißkonstruktionen in Sandwichbauweise ersetzt. Dadurch konnte die Dämpfung eines Werkzeugmaschinen-



Querträgers gegenüber der nicht ausgeschäumten Variante um den Faktor zwei bis drei erhöht werden.

Abbildung 1.6 zeigt beispielhaft drei Möglichkeiten zur Veränderung der Eigenschaften eines mechanischen Systems. Die dargestellten Maßnahmen der Integration einer zusätzlichen Masse, der zusätzlichen Reibungs- und/oder Materialdämpfung sowie einer Versteifung haben Einfluss auf die Massen-, die Dämpfungs- bzw. die Steifigkeitsmatrix der Bewegungsdifferentialgleichung.

*Abbildung 1.6: Beispiele zur Veränderung der Systemeigenschaften mechanischer Systeme*

### 1.4.3 Störgrößenvariation

Findet eine periodische Kraftanregung innerhalb sensibler Frequenzbereiche der Maschinenstruktur statt, kann diese zu Ratterschwingungen führen. Derartig erzwungene Schwingungen lassen sich in der Regel durch die Beseitigung der Störquellen oder durch eine Variation der Anregungsfrequenz, so dass diese nicht im Bereich einer Eigenfrequenz der Maschinenstruktur liegt, vermeiden (WECK ET AL. 2006). Dazu realisierten AL-REGIB ET AL. 2003 eine Methode für einen Drehprozess, durch die mittels kontinuierlicher Spindeldrehzahlvariation Ratterschwingungen erfolgreich reduziert werden konnten.

Anstatt die Spindeldrehzahl zu verändern, variierten ISMAIL ET AL. 2002 die Vorschubgeschwindigkeit während der Bearbeitung von Turbinenschaufeln auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum. Durch eine zwischenzeitliche sprunghafte Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ist es gelungen, die Oberflächenqualität des Werkstücks bei erhöhter Produktivität zu steigern.

ZÄH 1995 entwickelte erstmals auf Basis eines dynamischen Modells des Kreis sägeprozesses eine adaptive Regelstrategie, die durch Anpassung der Prozessparameter für diese Zerspanungsvariante den stabilen Bearbeitungsbereich vergrößerte.

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Schwingungsreduktion mit Hilfe der Störgrößenvariation wurde von PALANISAMY ET AL. 2007 erprobt. Mit Hilfe eines genetischen Algorithmus wurden für einen Fräsbearbeitungsprozess die optimalen Parameter für Vorschub, Schnittgeschwindigkeit und Schnitt-Tiefe identifiziert, wobei die dabei eingesetzte Zielfunktion die Minimierung der Bearbeitungszeit anstrebt. Für wichtige Merkmale, wie Oberflächenrauheit, auftretende Zerspankräfte, Standzeit und Schwingungsintensität, wurden nicht zu überschreitende Grenzwerte definiert.

### **1.4.4 Passive und aktive Zusatzsysteme**

Aufgrund der Vielzahl bereits bestehender Zusatzsysteme ist zunächst eine Strukturierung sinnvoll. Es existieren passive und aktive Zusatzsysteme. Beide Ausprägungen zeichnen sich durch mechanische Systeme aus, die an die schwingende Struktur angebracht werden. Der Unterschied besteht lediglich in der Notwendigkeit einer von außen zugeführten so genannten *Hilfsenergie* aktiver Systeme, die zur Erzeugung einer gegenphasigen Schwingung verwendet wird. Passive Systeme hingegen benötigen keine externe Energieversorgung.

#### **Passive Zusatzsysteme**

Die Dämpfungswirkung passiver Zusatzsysteme wird durch Energieumwandlung erzielt. Meistens werden mit Hilfe geeigneter Koppelmedien zusätzliche Masskörper an die Struktur angebracht und die Energie dann in Wärme oder Relativbewegung zwischen den Körpern umgewandelt.

Ein Lanchester-Dämpfer mit einer integrierten, dämpfend wirkenden Einheit beeinflusst maßgeblich die Amplitude des Systems. Passive Zusatzsysteme, wie sie in Abbildung 1.7 schematisch dargestellt sind, werden gezielt auf eine Struktureigenfrequenz abgestimmt. Die Qualität dieser Abstimmung hat einen großen Einfluss auf die erreichbare Schwingungsreduzierung. SIMS 2007 entwickelte daher einen analytischen Ansatz, um diesen kritischen Prozess einer gezielten Parameterabstimmung eines Schwingungstilgers für den Einsatz an einer Werkzeugmaschine zu unterstützen.

*Abbildung 1.7: Passive Zusatzsysteme mit ihren Auswirkungen auf den Nachgiebigkeitsfrequenzgang eines mechanischen Systems (in Anlehnung an WECK ET AL. 2006 und TELLBÜSCHER 1986)*

Schwingungstilger arbeiten in einem sehr kleinen Frequenzband und haben zusätzlich den Nachteil, aufgrund der Aufspaltung der Eigenfrequenz die Schwingungsamplituden des Systems um das Frequenzband noch zu verstärken. Im schlimmsten Fall ändern sich die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen eines Systems derart stark, bspw. durch eine Verfahrbewegung der Maschinenachsen, dass ein Schwingungstilger oder Hilfsmassendämpfer die Wirkung vollständig verliert.

Im Werkzeugmaschinenbereich kommen Hilfsmassen- und Reibungsdämpfer aufgrund ihrer Wirksamkeit am häufigsten zum Einsatz. TELLBÜSCHER 1986 gibt diesbezüglich einen detaillierten Überblick über bereits erfolgreich entwickelte Systeme. Darüber hinaus stellte er zunächst eine Methode zur optimalen Abstimmung eines Hilfsmassendämpfers auf eine Schleifmaschine vor und erzielte in den anschließenden Experimenten eine Verringerung der Nachgiebigkeit auf ein Zwanzigstel. Damit konnte die ratterfreie Bearbeitungsdauer wesentlich erhöht werden.

### **Aktive Zusatzsysteme**

Ein aktives Zusatzsystem zeichnet sich dadurch aus, dass die Schwingung einer mechanischen Struktur mit einer Sensorik erfasst, von einem Regler verarbeitet und mit Hilfe eines Aktors durch eine Gegenschwingung reduziert wird. Die Energie für diesen Aktor wird stets von außen zugeführt.

Erste Ansätze zur Integration aktiver Zusatzsysteme in Werkzeugmaschinen finden sich in den achtziger Jahren. TELLBÜSCHER 1986 skizzierte bereits die Idee, die Zentrierspitzen einer Rundschleifmaschine mit Piezoaktoren auszustatten. Eine praktische Umsetzung wurde aber noch nicht durchgeführt.

Aktive Zusatzsysteme können parallel oder seriell in eine Struktur integriert werden. Die parallele Anordnung hat den Vorteil, dass sie die dynamischen Eigenschaften der Ausgangsstruktur nicht negativ beeinflusst, sondern aufgrund eines zusätzlichen parallelen Kraftflusses auf jeden Fall eine Verbesserung hervorruft. Bei einer seriellen Anordnung dagegen besteht die Gefahr eines Steifigkeitsverlustes durch die eingebrachte Nachgiebigkeit des Aktors in den Kraftfluss, der im geregelten Betrieb zu überwinden ist, bevor das aktive Zusatzsystem effektiv zur Schwingungsreduktion beiträgt.

WECK ET AL. 2003 entwickelten bspw. einen parallel in den Kraftfluss integrierten Reibungsdämpfer. Die Dämpfungswirkung basiert auf Coulomb'scher Reibung, die eine dämpfende, geschwindigkeitsproportionale Kraft erzeugt. Mit einer geeigneten Regelung sowie pneumatischen Stellgliedern wird die Dämpfungswirkung an die Betriebsbedingungen und die Struktureigenschaften der zu bedämpfenden Anlage angepasst.

Ein aktives Zusatzsystem, das nicht in den Kraftfluss integriert ist, wird als absolut wirkendes Zusatzsystem bezeichnet. Ein aktiver Hilfsmassendämpfer stellt z. B. diese Ausprägung dar.

Abbildung 1.8 zeigt die verschiedenen Wirkprinzipien aktiver Zusatzsysteme.

*Abbildung 1.8: Wirkprinzipien aktiver Zusatzsysteme für Werkzeugmaschinen*

### **1.4.5 Zusammenfassung**

Selbst- und fremderregte Ratterschwingungen führen bei der spanenden Bearbeitung zu Qualitätsverlusten. Diese Schwingungsarten sind daher unbedingt zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Mit Hilfe zusätzlich wirkender innerer und äußerer Kräfte lässt sich eine Schwingungsreduktion realisieren. Diese Kräfte können durch eine Veränderung der Systemmatrizen, durch die Variation der Technologieparameter des Zerspanprozesses oder zusätzlich applizierte Systeme verursacht werden (Abbildung 1.9).

*Abbildung 1.9: Möglichkeiten der Einflussnahme auf das dynamische Verhalten eines schwingungsfähigen Systems*

Im Bereich der Veränderung der Systemeigenschaften existiert eine Vielzahl an erprobten Methoden, um die Teilsysteme oder das Gesamtsystem Werkzeugmaschine zu beschreiben und anschließend zu verbessern. Der Fokus der Arbeiten reduziert sich dabei häufig auf die Betrachtung eines stationären Zustands, speziell auf eine Position oder wenige diskrete Positionen im Arbeitsraum. Dass Werkzeugmaschinen im Betrieb in der Regel ein zeitvariantes Systemverhalten aufweisen, wurde bei dem Großteil der Forschungsvorhaben zumeist bewusst vernachlässigt.

Die dargestellten Verfahren der Störgrößenvariation haben den Vorteil, dass keine zusätzliche Hardware in das System integriert und in Betrieb genommen werden muss. Allerdings ist bei vielen Varianten eine Implementierung aufwändiger Algorithmen in die Maschinensteuerung erforderlich. Weiterhin besteht die Notwendigkeit einer detaillierten Kenntnis der vorliegenden Schwingungsercheinungen, um eine zielgerichtete Anpassung der Technologieparameter zu gewährleisten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die aufgezeigten Methoden im Allgemeinen eine Verbesserung der dynamischen Wechselwirkungen zwischen der passiven Maschinenstruktur und dem Bearbeitungsprozess herbeiführen. Das Gesamtsystemverhalten ist allerdings maschinenseitig durch das dynamische Maschinenverhalten der passiven Struktur begrenzt.

Die Vorteile passiver Zusatzsysteme liegen in dem einfachen Aufbau, der kostengünstigen Umsetzungsmöglichkeit und der großen und stabilen Wirksamkeit, sofern sie einmal für einen Anwendungsfall ausgelegt wurden (WECK ET AL. 2006). Die Abstimmung auf nur eine Frequenz oder ein kleines Frequenzband stellt den großen Nachteil passiver Systeme dar, da nach jeder Veränderung der Systemparameter oder des Systemverhaltens eine erneute Einstellung erforderlich ist. In der Praxis kann es sein, dass eine ausreichende Dämpfungswirkung nur mit sehr großen Reaktionsmassen erreicht wird. Dies wiederum kann das gesamte dynamische Nachgiebigkeitsverhalten einer Maschine negativ beeinflussen.

Die Integration aktiver Zusatzsysteme in Werkzeugmaschinen eignet sich besonders gut, denn sie können in einem breiten Frequenzband eingesetzt werden. Obwohl sich die Auslegung aktiver Zusatzsysteme komplexer gestaltet als für passive Zusatzsysteme, unterstreicht EHMANN 2007 das enorme Potenzial aktiver gegenüber passiven Systemen trotz des zusätzlichen Realisierungsaufwands. Außerdem können aktive Zusatzsysteme ihre Wirkung dort entfalten, wo passive Maschinenstrukturen bereits vollständig angereizt sind. In dieser Arbeit soll

daher der Fokus auf die aktiven Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion gelegt werden.

Zusammenfassend lässt sich für die Motivation dieser Arbeit folgende These formulieren: An den Grenzen passiver Systeme setzen aktive Systeme zumeist erst an.

### **1.5 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ziel dieser Arbeit ist es, Werkzeugmaschinenhersteller sowie -anwender in die Lage zu versetzen, mit Hilfe aktiver Zusatzsysteme Schwingungen spanender Werkzeugmaschinen zu reduzieren und so die Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Es soll eine Methode entwickelt werden, die den/die Entwickler/-in bei der Auswahl und Positionierung der aktiven Zusatzsysteme unterstützt und dabei einen effizienten Einsatz der aktiven Zusatzsysteme sicherstellt. Außerdem ist es notwendig, eine geeignete Regelstrategie zu erarbeiten und zu implementieren, die den Anforderungen eines aktiven Zusatzsystems in Kombination mit einer Werkzeugmaschine gerecht wird.

Kapitel 1 verdeutlichte zunächst die Dringlichkeit nach Technologiesprüngen in der deutschen Werkzeugmaschinenbranche. Es wurden leistungsbegrenzende Einflussfaktoren aufgezeigt, auftretende Schwingungsarten sowie deren Ursachen klassifiziert und Möglichkeiten zur Schwingungsreduktion dargelegt. Kapitel 2 beinhaltet eine Analyse bereits entwickelter aktiver Zusatzsysteme und zeigt den Handlungsbedarf auf. Eine Methode zur Entwicklung aktiver Zusatzsysteme sowie die Anforderungen an derartige Systeme sind Bestandteil von Kapitel 3. Der Kern der Arbeit folgt in den Kapiteln 4 und 5. In Kapitel 4 wird eine Berechnungsvorschrift entwickelt, die bei der Positionierung aktiver Zusatzsysteme in eine Maschinenstruktur unterstützt. Im Rahmen von Kapitel 5 wird anschließend eine Regelstrategie für aktive Zusatzsysteme hergeleitet. Die Validierung der Methode zur mechanischen Integration sowie der entwickelten Regelung erfolgt anhand einer Versuchsmaschine in Kapitel 6. Dazu werden zwei aktive Zusatzsysteme appliziert und deren Einsatztauglichkeit untersucht.

Einen Überblick der Arbeit zeigt Abbildung 1.10.

*Abbildung 1.10: Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise*

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode ermöglicht dem/der Leser/-in einen strukturierten Einstieg in die Entwicklung, Integration und Regelung aktiver Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen. Die Realisierung dieser Systeme soll damit erleichtert werden, so dass langfristig vermehrt derartige Produkte den Reifegrad der Serientauglichkeit erreichen und in den Werkzeugmaschinenmarkt Einzug finden.



# Seminarberichte iwb

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

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! Herausforderungen und Lösungen für die Zerspangung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte iwb

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

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd 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 *Ralf 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 Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung 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 Fokuspositionierung 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. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: 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 Teilbereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher 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 Laserstrahlschweißens 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 Höppler:** 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 Roßgöderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen 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  
150 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 telepräzenter 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 Breitingler:** 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 Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim 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 Laserstrahlsschweißens 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:** Prozessgaseinfluss 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 Schlip:** 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  
114 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 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-Gribsch:** 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 telepräsenten 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 Schlickeneder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** 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 Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmehranalytische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernad Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Loucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mürtl:** 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:** Laserstrahlbigen 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 kraftrückkopplenden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlintensiters  
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 überbetrieblichen 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 Münzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
270 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 Schlip:** 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  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
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 materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
220 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 Radi:** 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 Rühstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen 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-Vorförmlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung 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-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2