

Alexander Götzfried

**Analyse und Vergleich fertigungstechnischer  
Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren**



Herbert Utz Verlag · München

**Forschungsberichte IWB**

Band 277

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

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 978-3-8316-4310-3

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 Akronyme .....</b>	<b>vii</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation der Arbeit .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Flugzeugtriebwerks-Rotoren .....	4
1.3.1 Prinzipieller Aufbau von Flugzeugtriebwerken .....	4
1.3.2 Konventionelle Bauweise von Rotoren .....	5
1.3.3 Bliskbauweise von Rotoren .....	6
1.4 Vorgehensweise .....	10
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>13</b>
2.1 Allgemeines .....	13
2.2 Fertigungstechnische Prozessketten .....	13
2.2.1 Begriffsdefinition.....	13
2.2.2 Erstellung fertigungstechnischer Prozessketten .....	18
2.2.3 Strukturierung fertigungstechnischer Prozessketten .....	20
2.2.4 Strukturmaßnahmen zur Anpassung fertigungstechnischer Prozessketten .....	22
2.3 Grundlagen qualitätsrelevanter Aspekte.....	24
2.3.1 Qualität und Qualitätsmanagement .....	24

## Inhaltsverzeichnis

---

2.3.2	Produkt- und Prozessqualität .....	27
2.3.3	Toleranzmanagement .....	29
2.3.4	Qualitätsplanung mittels der FMEA.....	35
2.4	Grundlagen wirtschaftlicher Aspekte .....	37
2.4.1	Allgemeines .....	37
2.4.2	Kostenrechnung .....	38
2.4.3	Bestimmung von Materialkosten.....	43
2.4.4	Bestimmung von Platzkosten .....	44
2.5	Grundlagen des Variantenmanagements .....	49
2.6	Die aktuellen Ansätze zur Prozesskettenbetrachtung.....	51
2.6.1	Kostenorientierte Ansätze .....	51
2.6.2	Qualitätsorientierte Ansätze .....	54
2.6.3	Thematisch übergreifende Ansätze .....	56
2.7	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	59
<b>3</b>	<b>Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau .....</b>	<b>63</b>
3.1	Allgemeines .....	63
3.2	Definition des Betrachtungsraumes.....	63
3.3	Struktur der Methodik .....	65
3.4	Datenmanagement der Prozesskettenbetrachtung .....	68
3.4.1	Allgemeines .....	68
3.4.2	Datenquellen.....	68
3.4.3	Datenabbildung.....	71
3.4.4	Strukturierung von Prozessketten.....	72
3.5	Zusammenfassung .....	74

<b>4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte .....</b>	<b>77</b>
4.1 Allgemeines .....	77
4.2 Toleranzmanagement für Prozessketten.....	77
4.2.1 Vorgehensweise .....	77
4.2.2 Adaption eines bekannten Toleranzsystems.....	78
4.2.3 Aufbau eines neuen Toleranzsystems.....	79
4.2.4 Abgleich von Toleranzen und Abweichungen auf Prozessebene .....	82
4.3 Beschreibung von Fehlerpotenzialen.....	85
4.3.1 Vorgehensweise .....	85
4.3.2 Bestimmung und Auswahl potenziell kritischer Prozesse.....	86
4.3.3 Ermittlung möglicher Fehler.....	87
4.3.4 Bestimmung der Fehlerauswirkungen .....	87
4.3.5 Bestimmung der Fehlerursachen .....	87
4.3.6 Bestimmung des Fehlerpotenzials .....	88
4.3.7 Ableitung von Maßnahmen .....	89
4.3.8 Aggregation .....	90
4.4 Zusammenfassung .....	90
<b>5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte.....</b>	<b>93</b>
5.1 Allgemeines .....	93
5.2 Rohteilkosten .....	94
5.2.1 Bedeutung der Rohteilkosten.....	94
5.2.2 Kosten für Materialeinsatz.....	95
5.2.3 Wertschöpfung beim Urformen.....	97
5.3 Platzkosten .....	97

## Inhaltsverzeichnis

5.3.1	Allgemeines .....	97
5.3.2	Einflussgrößen der Platzkosten .....	98
5.3.3	Maschinenkosten .....	103
5.3.4	Personalkosten .....	103
5.3.5	Rüstkosten .....	104
5.4	Zusammenfassung .....	105
<b>6</b>	<b>Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten .....</b>	<b>107</b>
6.1	Allgemeines .....	107
6.2	Betrachtung von Prozesskettenvarianten.....	107
6.3	Variantenbetrachtung mittels Skalierungsgrößen .....	109
6.3.1	Vorgehensweise.....	109
6.3.2	Definition von Skalierungsgrößen.....	110
6.3.3	Überführung in fertigungstechnisch relevante Parameter ....	112
6.3.4	Beschreibung der Rotorveränderungen mittels Skalierungsgrößen .....	113
6.3.5	Beschreibung der Einflussgrößen der Fertigungsprozesse mittels Skalierungsgrößen .....	114
6.3.6	Abgleich anhand der Skalierungsgrößen.....	115
6.3.7	Quantifizierung durch Kostenwachstumsgesetze.....	116
6.4	Zusammenfassung .....	120
<b>7</b>	<b>Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk .....</b>	<b>121</b>
7.1	Allgemeines .....	121
7.2	Betrachtungsgegenstand <i>Turbinenblisk</i> .....	121
7.3	Alternative Prozessketten .....	123

7.4	Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte .....	125
7.4.1	Toleranzmanagement.....	125
7.4.2	Fehlerpotenziale.....	127
7.5	Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte .....	129
7.6	Betrachtung von Rotorvarianten.....	133
7.7	Fazit des Anwendungsbeispiels.....	135
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>137</b>
8.1	Nutzen der Methodik .....	137
8.1.1	Allgemeines .....	137
8.1.2	Reduzierung des Entwicklungsaufwandes .....	138
8.1.3	Vermeidung unternehmerischer Risiken .....	139
8.2	Zusammenfassung der Arbeit .....	139
8.3	Ausblick auf weitere wissenschaftliche Arbeiten.....	142
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel <i>gefügte Turbinenblick</i> .....</b>	<b>161</b>
10.1	Prozesskette für den konventionellen Rotor .....	161
10.2	Prozesskette für die direkte Turbinenblick .....	162
10.3	Prozesskette für die indirekte Turbinenblick .....	163
10.4	Daten für die Fehlerpotenzialbetrachtung .....	164
10.5	Daten für die Berechnung der Rohteilkosten .....	167
10.6	Prozessdaten für die Referenzanwendung .....	168
10.7	Daten für die Variantenbetrachtung .....	173

# **1 Einleitung**

## **1.1 Motivation der Arbeit**

„In einer Zeit der globalen Vernetzung sind Industrie und Handel mehr denn je auf schnelle Flugverbindungen zwischen Ländern und Kontinenten angewiesen“ (DFS 2008). Langfristig ist deshalb davon auszugehen, dass der Luftverkehr auf globaler Ebene deutlich zunimmt (DFS 2008). Nach einem Rückgang des weltweiten Passagier- und Frachtgeschäfts durch die Auswirkungen der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 konnte ein erhebliches Wachstum, vor allem in Asien, aber auch in Europa verzeichnet werden. In Deutschland wurden im Jahr 2010 neue Höchststände in Bezug auf die Anzahl der Passagiere und die Menge der Luftfracht verzeichnet (DFS 2011). Die Luftfahrt ist „eine Wachstumsbranche und hat somit eine Schlüsselfunktion für ein gesundes Wirtschaftswachstum“ (LBA 2009). Dies lässt sich beispielsweise durch ihren Beitrag zur globalen Mobilität, die Schaffung von Arbeitsplätzen für hochqualifiziertes Personal und den Hochtechnologiecharakter begründen (EUROPEAN COMMISSION 2011).

Dennoch stellt sich die aktuelle Marktsituation für Luftfahrtunternehmen schwierig dar. Ein Zivilflugzeug soll sicher, sauber und bezahlbar sein (YAKINTHOS ET AL. 2007). Darüber hinaus sind auch in dieser Branche „erfolgreiche Produkte (...) eine wichtige Voraussetzung für eine prosperierende Wirtschaft“ (LINDEMANN 2009). Insbesondere der Umweltschutz tritt immer mehr in den Vordergrund und bildet einen zentralen Aspekt bei der Entwicklung neuer Luftfahrzeuge (EUROPEAN COMMISSION 2011). So sollen im Vergleich zum Jahr 2000 bis 2050 durch neue Technologien die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Flugzeugs um 75 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 90 % pro befördertem Passagier und geflogenem Kilometer reduziert werden (EUROPEAN COMMISSION 2011). Über den ökologischen Aspekt hinaus sind Fluggesellschaften zudem mit steigenden Treibstoffpreisen und wachsendem Konkurrenzdruck konfrontiert, wodurch die Forderung nach effizienten Flugzeugen gestärkt wird (LBA 2009). Künftig sollen deshalb durch die Realisierung neuer Technologien Flugzeuge ökonomischer, ökologischer und sicherer werden. Um dies zu erreichen, steht dabei z. B. der Leichtbau durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen und nietenfreien Strukturen im Fokus. Zukünftige Flugzeugtriebwerke sollen im Vergleich zu heutigen zuverlässiger sein und dabei geringere Betriebskosten sowie deutlich weniger Emissionen verursachen (WELLS ET AL. 2001). Zukunftsweisende Technologien hierfür sind unter anderem komplexe Schaufelgeometrien und neuartige Rotoren mit integralen Schau-

feln, sogenannte Blisks (Blade integrated disks; femininum, da im Deutschen „Scheibe“) (ABELE & REINHART 2011). Aufgabenstellungen ergeben sich aus der Entwicklung solcher ressourceneffizienter Produkte, der anwendungsorientierten Gestaltung von Methoden und Werkzeugen sowie der Forderung nach deren Skalierbarkeit. Hinzu kommt allgemein die zunehmende Individualisierung von Kundenwünschen, ein Trend, der für zahlreiche Neuentwicklungen verantwortlich ist (ZÄH 2003). Daraus ergeben sich auch Forschungsbedarfe im Hinblick auf die Herstellung ressourceneffizienter Produkte. Dabei sind insbesondere die Formgebung und Funktionseinstellung in kombinierten Prozessen, Fertigsystemkonzepte für Leichtbauprodukte, das Lebenszyklusdesign und die technologieübergreifende Prozessketten gestaltung hervorzuheben (ABELE & REINHART 2011). Letztere ist von „wesentlicher Bedeutung für die Beherrschung der wirtschaftlichen und zugleich ökologischen Fertigung multifunktionaler, ressourceneffizienter Produkte“ (ABELE & REINHART 2011).

Insgesamt ist festzuhalten, dass großer Bedarf an der Verbesserung der Ressourceneffizienz von Flugzeugen besteht. Ein großes Potenzial bieten dabei innovative Triebwerkstechnologien wie z. B. neuartige Rotorkonzepte. Um diese realisieren zu können, ist neben der Produktentwicklung selbst die Gestaltung geeigneter Prozessketten zu deren Herstellung notwendig. Dadurch werden die Sicherstellung der Qualität der Produkte und gleichzeitig eine wirtschaftliche Fertigung unterstützt. Die vorliegende Arbeit greift dies auf und gibt eine methodische Hilfestellung vor dem Hintergrund der im nächsten Abschnitt aufgezeigten Zielsetzung.

### **1.2 Zielsetzung**

In diesem Abschnitt wird die Zielsetzung zur Prozesskettenbetrachtung von Rotoren im Triebwerksbau definiert. Die hierfür notwendige Methodik ist dabei als plannmäßiges Vorgehen zu verstehen, das sich aus einer Anzahl verschiedener Methoden bzw. Hilfsmittel zusammensetzt und diese zur Erreichung der Aufgabenstellung in geeigneter Weise kombiniert (PAHL 2005). Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Priorisierung: Die Ergebnisse der Methodik sollen einen direkten Vergleich von Fertigungsalternativen ermöglichen. Im Hinblick auf den ganzheitlichen Charakter sind hierfür die gesamten Prozessketten als Vergleichsobjekte heranzuziehen.

- Integration: Die Methodik soll vornehmlich für die Anwendung im Rahmen einer Produktentwicklung ausgelegt und in diese eingebunden werden. Es soll jedoch auch der serienbegleitende Einsatz der Methodik insgesamt oder in Teilen möglich sein.
- Datenmanagement: Die Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken erfordert die Ermittlung, Verarbeitung und Abbildung einer Vielzahl von Daten. Die Methodik soll mögliche Informationsquellen und deren Verwendung aufzeigen, um fundierte Ergebnisse zu erreichen.

Über diese Teilziele hinaus sind bezüglich der inhaltlichen Fokussierung der Prozesskettenbetrachtung unterschiedliche Randbedingungen zu beachten:

- Wirtschaftliche Aspekte: Die Methodik soll wirtschaftlich relevante Größen innerhalb der Produktherstellung berücksichtigen und über die gesamte fertigungstechnische Prozesskette hinweg abbilden können.
- Qualitätsrelevante Aspekte: Die Methodik soll die Einflüsse der Gestaltung der fertigungstechnischen Prozesskette auf die Rotorqualität darstellen. Dies beinhaltet sowohl die Ableitung von Anpassungsmöglichkeiten der Prozesskette an die Anforderungen im Hinblick auf die Maßhaltigkeit als auch die Be trachtung prozessbedingter Quellen für Qualitätsmängel am Rotor.
- Integration von Rotorvarianten: Die Methodik soll die Abhängigkeit qualitätsrelevanter und wirtschaftlicher Aspekte vom Betrachtungsgegenstand abbilden können, d. h. es soll ermöglicht werden, die Ergebnisse für die Herstellung verschiedener Rotorvarianten zu vergleichen.

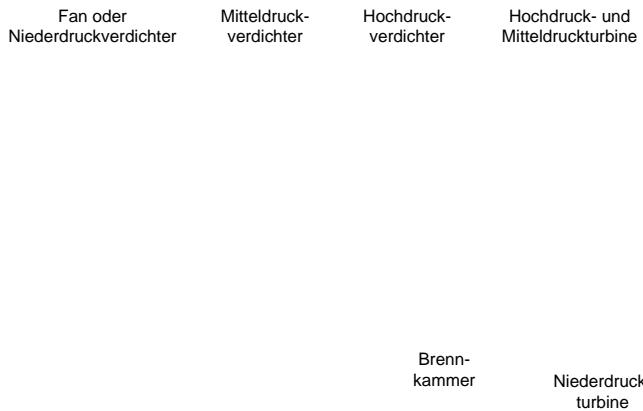
Insgesamt stellen die für eine Referenzanwendung sowie mögliche Rotorvarianten parallel zu betrachtenden Aspekte *Qualität* und *Kosten* die inhaltliche Fokussierung dar. Das hierfür notwendige Datenmanagement ist bereitzustellen und die Methodik in den Produktentwicklungsprozess einzubinden. Dadurch soll eine frühzeitige Priorisierung von Fertigungsalternativen ermöglicht werden.

Bevor die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Vorgehensweise zur Erreichung der genannten Ziele aufgezeigt wird, stellt der nachfolgende Abschnitt den Rotor als Komponente eines Flugzeugtriebwerkes, seine Bauweisen sowie die für die Produktion benötigten Fertigungsverfahren vor, um zu verdeutlichen, wie unterschiedlich die Prozessketten möglicher Fertigungsalternativen sein können.

### **1.3 Flugzeugtriebwerks-Rotoren**

#### **1.3.1 Prinzipieller Aufbau von Flugzeugtriebwerken**

Als *Flugzeugtriebwerke* im Rahmen dieser Arbeit sind luftatmende Triebwerke zu verstehen, die einen Verdichter und eine Turbine besitzen. Dies können sowohl Turbostrahl- als auch Wellenleistungstriebwerke sein. Erstere erzeugen ihren Schub ausschließlich „durch die aerothermodynamische Beschleunigung des sie durchströmenden Gases“, letztere übertragen die Leistung auf eine Welle, um den Antrieb von z. B. Hubschrauberrotoren, Propellern oder Generatoren zu ermöglichen (BRÄUNLING 2009). Beide zeichnen sich dadurch aus, dass der Druck der einströmenden Luft nicht nur durch den Staudruck entsteht, sondern durch einen oder mehrere *Rotationsverdichter* erhöht wird, bevor die Entzündung zusammen mit Kraftstoff in der Brennkammer erfolgt. Der Antrieb eines Rotationsverdichters wird durch eine *Turbine* realisiert, die nach der Brennkammer angeordnet und über eine Welle mit dem Verdichter verbunden ist. Zur Erhöhung der Effizienz werden in modernen Triebwerken, wie Abbildung 1 zeigt, mehrere Verdichter und Turbinen auf unterschiedlichen Druckniveaus eingesetzt (Nieder-, Mittel- und Hochdruckteil).



*Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Mehrwellen-Turbofan-Triebwerks mit Nieder-, Mittel- und Hochdruckteil (BRÄUNLING 2009)*

Die einzelnen Verdichter und Turbinen wiederum können aus einer oder auch mehrerer *Stufen* aufgebaut sein, wobei eine Stufe immer aus einem *Stator* und einem *Rotor* besteht. Der *Stator* (auch *Leitrad* genannt) besitzt Schaufeln, die mit dem feststehenden Gehäuse verbunden sind. So wird die Luft gezielt auf die Schaufeln des nachfolgenden *Rotors* (auch *Laufrad* genannt) geleitet, der über eine Scheibe mit der Welle des Triebwerks verbunden ist.

Die Herstellung der durch thermische und mechanische Belastungen hoch beanspruchten Triebwerks-Rotoren ist eine schwierige Fertigungsaufgabe. Prinzipiell existieren zwei Bauweisen, die sich in der Art der Kraftübertragung zwischen der Scheibe und den Schaufeln unterscheiden. Beim *konventionellen Rotor* erfolgt sie form- und kraftschlüssig, bei einer *Blisk* stoffschlüssig. Im Folgenden werden beide Bauweisen sowie die für ihre Produktion eingesetzten Fertigungsverfahren erläutert.

### 1.3.2 Konventionelle Bauweise von Rotoren

Rotoren in *konventioneller Bauweise* bestehen aus mehreren Bauteilen, die einzeln hergestellt und am Ende einer Prozesskette in einem Montageschritt zusammengesetzt werden. Die Kraftübertragung zwischen den Schaufeln und der Scheibe erfolgt form- und kraftschlüssig über die sogenannten Tannenbaumprofile (Abbildung 2).

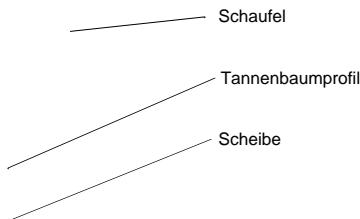


Abbildung 2: Verbindung zwischen den Schaufeln und der Scheibe bei einem konventionellen Rotor (BRÄUNLING 2009)

## **1 Einleitung**

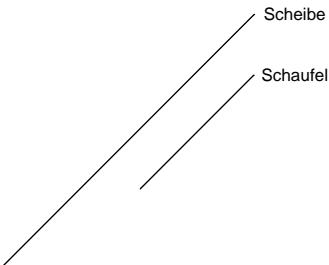
---

Zur Herstellung der Profile kommen unterschiedliche Fertigungsverfahren zum Einsatz. So werden die Schaufelfüße mittels *Profilschleifen* bearbeitet. In diesem Prozess werden Schleifscheiben mit dem negativen Profil der herzustellenden Kontur eingesetzt, um die gewünschte Formgebung zu erreichen. Aufgrund der geometrischen Komplexität sind dabei stets mehrere Prozessschritte notwendig, um die Endkontur des Schaufelfußes aus dem Rohteil zu fertigen. Auf Scheibenseite werden die Konturen als Nuten mittels *Räumen* eingebbracht. Dabei wird mit dem entsprechenden formgebenden Werkzeug jede Nut einzeln hergestellt, wobei mit dem Vor- und dem Nachräumen zwei Prozessschritte notwendig sind, um die Toleranzanforderungen zu erfüllen (ADAM 1998).

Charakteristisch für die konventionelle Bauweise ist, dass die formschlüssige Verbindung über die Tannenbaumprofile mit Spiel ausgeführt wird, sodass die Schaufeln nicht starr mit der Scheibe verbunden sind. Dadurch können sie sich durch die Fliehkraft im Betrieb radial ausrichten und die Belastung der Schaufelfüße durch Biegemomente bleibt gering (BRÄUNLING 2009). Eine feste Schaufelverbindung lässt dies nicht zu, was ein Grund für höhere Toleranzanforderungen bzgl. der Schaufelblattstellung bei der Bliskbauweise von Rotoren ist, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

### **1.3.3 Bliskbauweise von Rotoren**

Bei einer *Blisk* bilden die Schaufeln und die Scheibe des Rotors im Gegensatz zum konventionellen Rotor eine integrale Einheit (Abbildung 3). Ein Vorteil besteht dabei in der geringeren Masse. Diese ergibt sich aus dem Wegfall der einzelnen Schaufelfüße, die von der Scheibe aufgenommen werden müssen (BRÄUNLING 2009).



*Abbildung 3: Rotor in Bliskbauweise mit integralen Schaufeln (MTU 2012A)*

Zudem kann durch die stoffschlüssige, flächige Verbindung der Kraftfluss optimiert werden, sodass eine belastungsgerechtere Gestaltung möglich ist als bei der konventionellen Bauweise (PROKOPCZUK 2011). Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass eine höhere Anzahl an Schaufeln auch bei einem kleinen Rotor-durchmesser realisiert werden kann, da bei einem konventionellen Rotor die Schaufelfüße und die Scheibennuten nicht beliebig verkleinert werden können (BRÄUNLING 2009).

Für die Herstellung einer Blisk gibt es zwei verschiedene Vorgehensweisen. Zum einen ist es möglich, ein Rohteil zu verwenden, welches das gesamte Volumen des fertigen Rotors umschließt, und das Material aus den Zwischenräumen der Schaufeln zu entfernen (Abbildung 4 links). Zum anderen können, wie beim konventionellen Rotor, die Schaufeln und die Scheibe einzeln gefertigt werden. Diese werden dann allerdings nicht zusammengesetzt, sondern in einem Schweißprozess gefügt (Abbildung 4 rechts) (UIHLEIN 2010).

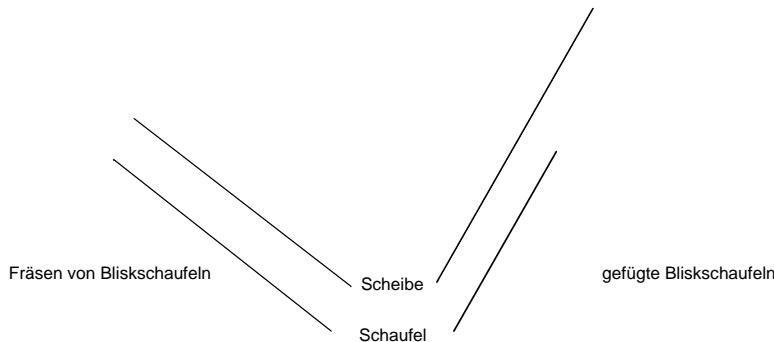


Abbildung 4: *Fräsen von Bliskschaufeln (links, MTU 2012C) und Blisk mit gefügten Schaufeln (rechts, MTU 2012D)*

Die Auswahl der Vorgehensweise für die Herstellung einer Blisk hängt von ihrer späteren Lage im Flugzeugtriebwerk ab. So nimmt die Schaufellänge i. d. R. sowohl auf Turbinen- als auch auf Verdichterseite zur Brennkammer hin ab. Je länger die Schaufeln sind, desto größer ist das zu zerspanende Volumen bei der Vorgehensweise der *Bliskherstellung mittels Fräsen*. Mit steigender Schaufellänge sinkt deshalb die Wirtschaftlichkeit einer solchen Blisk-Fertigung. Sie ist somit im Vergleich zu einem konventionellen Rotor nur begrenzt gegeben.

Deshalb wurden, zunächst insbesondere für den Einsatz im Verdichter, *gefügte Blisks* entwickelt. Das Problem bei dieser Lösungsmöglichkeit ist, dass die im Flugzeugtriebwerks-Bau eingesetzten Werkstoffe individuelle Eigenschaften für die jeweils auftretenden Belastungsarten besitzen, die während des gesamten Herstellungsprozesses bis zur fertigen Blisk am Ende der Prozesskette beibehalten werden müssen. Kritisch ist dabei insbesondere das Fügen der Schaufeln auf die Scheibe mittels Schweißen, da die hohe Energieeinbringung zu einer lokalen Verschlechterung der Materialeigenschaften in der Füge- und/oder der Wärmeinflusszone führen kann. Etabliert haben sich für diesen Anwendungsfall deshalb die unterschiedlichen Ausprägungen des Reibschiweißens, wie z. B. das lineare Reibschiweißen oder das Rotationsreibschiweißen (PROKOPCZUK 2011). Diese Fügeverfahren zeichnen sich durch eine verhältnismäßig geringe und kurze Wärmeeinbringung aus, die erreicht wird, indem die Werkstoffe nur bis knapp unterhalb ihrer Schmelztemperatur erhitzt und die Fügef lächen zusätzlich durch Druckbeaufschlagung zusammengepresst werden.

Allerdings sind für den Einsatz dieser Verfahren umfassende vorbereitende und nachbereitende Tätigkeiten notwendig. Insbesondere die ebenen Fügeflächen müssen mittels Fräsen und/oder Schleifen hergestellt werden. An der Schaufel ist dies die Unterseite des Fußes, an der Scheibe die Mantelfläche, aus der einzelne Fügeflächen herausgearbeitet werden müssen. Zusätzlich müssen Spannmöglichkeiten gegeben sein, um die hohen Prozesskräfte beim Reibschweißen übertragen zu können. Insbesondere an der Schaufel ist dies ein Problem, da das Schaufelblatt nicht beschädigt werden darf. Deshalb sind gegebenenfalls Aufmaße, wie in Abbildung 4 rechts zu sehen, erforderlich, die nach dem Fügen zusätzlich entfernt werden müssen. Darüber hinaus sind weitere Prozessschritte an der Blisk notwendig, um z. B. beim Fügen ausgedrücktes Material zu entfernen, die endgültige Kontur des Übergangs zwischen Schaufel und Scheibe herzustellen, den Werkstoff in der Fügezone zu homogenisieren oder die bearbeiteten Oberflächen zu verfestigen.

Ein zusätzlicher Vorteil *gefügter Blisks* gegenüber *gefrästen Blisks*, außer der höheren Wirtschaftlichkeit bei großen Schaufellängen, besteht darin, dass für die Schaufeln und die Scheibe unterschiedliche Werkstoffe verwendet werden können (UIHLEIN ET AL. 2010). Verdichter-Rotoren bestehen im Allgemeinen aus nur einem Material, in der Turbine hingegen trifft dies nur auf Stufen mit kleinem Durchmesser, z. B. für den Einsatz in Hubschraubertriebwerken, zu. Für die zivile Luftfahrt sind jedoch größere Turbinen-Rotoren erforderlich, bei denen aufgrund der unterschiedlichen Belastungsarten durch thermische und mechanische Einflüsse verschiedene Werkstoffe für die Schaufeln und die Scheibe eingesetzt werden müssen (PROKOPCZUK 2011). Bislang werden deshalb ausschließlich *gefräste* und *gefügte Verdichterblisks* sowie *kleine Turbinenblisks*, die als Einheit gegossen werden, in Serie produziert. *Gefügte Turbinenblisks* hingegen befinden sich derzeit noch in der Entwicklung, da das Fügen der Schaufeln und der Scheibe aus unterschiedlichen Werkstoffen ein fertigungstechnisches Problem darstellt, das nicht nur das Schweißen an sich betrifft, sondern auch die vor- und nachgelagerten Prozesse und somit die gesamte Prozesskette beeinflusst.

Darauf basierend wird nachfolgend die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit aufgezeigt, die dazu dienen soll, die Entwicklung neuer Rotoren, insbesondere gefügter Turbinenblisks, dahingehend zu unterstützen, dass alternative Prozessketten analysiert und bewertet werden können.

### 1.4 Vorgehensweise

Um die gestellten Anforderungen und Randbedingungen zu erfüllen, wird bzw. werden ausgehend von der Zielsetzung der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik wiedergegeben, daraus der Handlungsbedarf abgeleitet und anschließend die Gesamtmethodik sowie die Einzelmethoden dargestellt. Zudem wird deren Validierung anhand eines Anwendungsbeispiels aufgezeigt. Insgesamt gliedert sich die Arbeit wie in Abbildung 5 dargestellt in acht Kapitel. Die jeweiligen Inhalte werden nachfolgend erläutert.

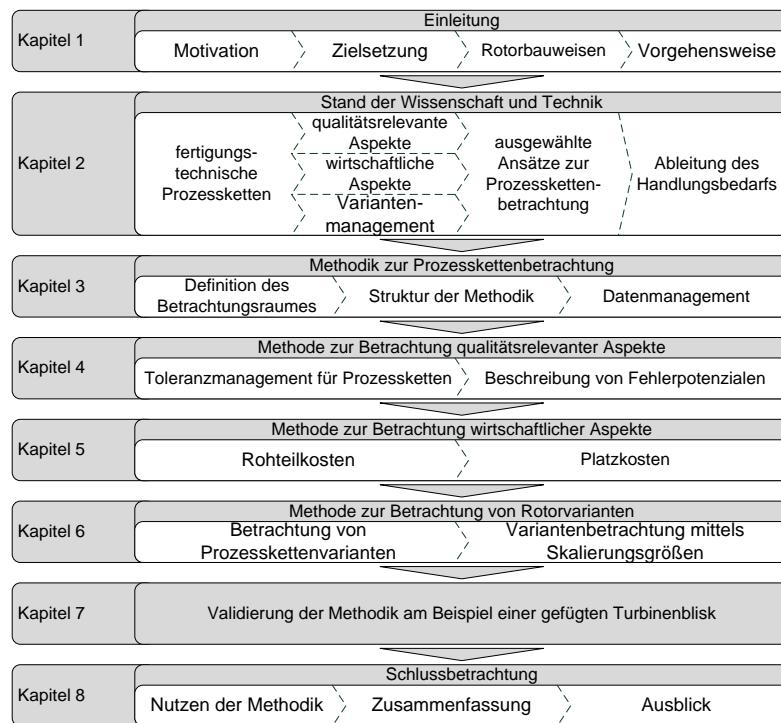


Abbildung 5: *Vorgehensweise zur Entwicklung und Validierung der Methodik zur Analyse und zum Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren*

Kapitel 1 beinhaltet die grundlegenden Voraussetzungen für diese Arbeit. Ausgehend von der Motivation zur Entwicklung der Methodik werden die Gesamtzielsetzung sowie die hierfür notwendigen Inhalte definiert.

Kapitel 2 gibt den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik für die relevanten Themengebiete wieder. Zunächst werden grundlegende Begrifflichkeiten dieser Arbeit aufgezeigt sowie bestehende Möglichkeiten zur Erstellung, Strukturierung und Anpassung fertigungstechnischer Prozessketten erläutert. Die anschließende Darstellung qualitätsrelevanter Aspekte adressiert Qualitätsmanagement im Allgemeinen und im Besonderen die Methode FMEA (Failure Modes And Effects Analysis) sowie die Ansätze der Toleranzanalyse und -synthese. Ferner werden die Grundlagen der Prozesskettenbetrachtung hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte beleuchtet. Hierzu werden aus dem Themengebiet der Kostenrechnung die relevanten Methoden für die Bestimmung bauteilbezogener Kosten in der Produktion erläutert. Es folgt eine kurze Einführung in das Variantenmanagement von Bauteilen. Außerdem werden ausgewählte Forschungsarbeiten für Prozesskettenbetrachtungen aufgezeigt, die wirtschaftliche und/oder qualitätsrelevante Aspekte beinhalten. Von diesen Inhalten ausgehend erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfes.

In Kapitel 3 wird darauf aufbauend die entwickelte Methodik vorgestellt. Sie besteht aus mehreren Einzelmethoden, um qualitätsrelevante und wirtschaftliche Vergleichsgrößen zunächst für eine Referenzanwendung zu ermitteln und diese anschließend auf Rotorvarianten zu extrapolieren. Durch deren Verknüpfung entsteht eine Vorgehensweise zur ganzheitlichen Prozesskettenbetrachtung mit der Möglichkeit des quantitativen Vergleichs von Fertigungsalternativen für Flugzeugtriebwerks-Rotoren. Anschließend wird vor den Detaillierungen der einzelnen Methoden in den Kapiteln 4, 5 und 6 das übergreifende Datenmanagement zur Ermittlung, Verarbeitung und Darstellung aller benötigten Informationen beschrieben.

In Kapitel 4 wird die Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte erläutert. Zum einen wird hierbei als Grundlage für die Vergleichbarkeit von Prozessketten eine Vorgehensweise zu deren Anpassung an gegebene Toleranzanforderungen entwickelt, zum anderen wird eine Möglichkeit zur Identifizierung und quantifizierten Beurteilung fertigungstechnischer Fehlerpotenziale präsentiert.

Kapitel 5 beleuchtet das Schema zur Berechnung der bauteilbezogenen Fertigungskosten, bestehend aus monetären Aufwänden für das Rohmaterial und für die Bearbeitung. Insbesondere die Ermittlung von Prozesszeiten sowie die maß-

## **1 Einleitung**

---

geblichenen Einflüsse und Randbedingungen des Flugzeugtriebwerks-Baus werden erläutert.

Kapitel 6 fokussiert die Betrachtung von Rotorvarianten, sodass Abhängigkeiten der Fertigungskosten und der Fehlerpotenziale von geometrischen Parametern ermittelt werden können. Dazu werden in einer Methode standardisierte Skalierungsgrößen eingeführt. Dadurch kann die Kalkulation trotz der geometrischen Komplexität von Triebwerksrotoren mittels Kostenwachstumsgesetzen aufwandsarm durchgeführt werden.

Kapitel 7 beschreibt die Validierung der Methodik. Diese erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner zur Entwicklung eines neuartigen Rotors. Es werden sowohl die Ergebnisse der Einzelmethoden als auch die Resultate der Methodik erläutert.

Kapitel 8 stellt zunächst den erzielbaren Nutzen durch die Anwendung der Methodik heraus, bevor abschließend die gesamte Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche, zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben wird.

## 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<br>115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9                                     | 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele<br>152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6                           |
| 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt<br>82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7  | 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4                      |
| 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5                                    | 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt<br>111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2                             |
| 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte<br>134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3   | 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt<br>154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0                                 |
| 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1   | 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar<br>156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9  |
| 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung<br>86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0   | 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen  |
| 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9   | 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends<br>183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0  |
| 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7   | 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen  |
| 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte<br>120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5  | 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension<br>181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7  |
| 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel<br>90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8   | 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz<br>102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5                    |
| 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6   | 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben<br>129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3   |
| 12 Autonome Produktionsysteme<br>100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4  | 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion<br>124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1                               |
| 13 Planung von Montageanlagen<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2  | 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X       |
| 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen   | 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung<br>128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8                               |
| 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9  | 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6  |
| 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7   | 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen<br>160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X |
| 17 Industrierakamik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5                                     | 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen<br>146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0  |
| 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen<br>165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3   | 42 Stückzahlflexible Montagesysteme<br>139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9   |
| 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung<br>85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1                                       | 43 Produktivität und Verfügbarkeit ...durch Kooperation steigern<br>120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7  |
| 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme<br>105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5 | 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen<br>125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5                                 |
| 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3   | 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele<br>173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3  |
| 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1                                  | 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation<br>108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1  |
| 24 EDM Engineering Data Management<br>195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8   |  |

- 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 Prototypenserenien  
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 Produktionsysteme - 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 Produktionsysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvergehen, 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 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturodynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebetechnik - 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 - Schlanke 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 iwb 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 Simulationsystem für das Strahlschmelzen  
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 Zerspanung 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 Produktionsysteme  
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 Kugelman*: 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 Partnerverbünden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung 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 Aboy*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industrierakemik  
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 Laserstrahl schweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilfenbacher*: 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-Laserstrahlenschweißprozesses von Magnesiumumdruckguss  
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 Bügel*: Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelter 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 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 Laserstrahlwärmezens 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 Fährer*: Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 *Jürgen Höppner*: Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsfester 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 Roßgodeyer*: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 *Robert Klingel*: Anziehverfahren 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 nachgelegter 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 telepräsentierer 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 Breitinger*: Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 *Johann von Pieverling*: 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 *Joachim Berlak*: Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungsystmen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 *Christian Meierhofer*: 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 kompetenzorientierten 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 978-3-8316-0336-2
- 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*: Qualitätsteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme  
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 Produktionsystemen  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 *Florian Auer*: Methode zur Simulation des Laserstrahl schweißens 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 Kostenenkung 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 Schilp*: Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0631-1
- 200 *Florian Manfred Grätz*: Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 *Dieter Eireneir*: 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 Steuerungsfunktionalitäten für die NC-Simulation  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 *Sven Rooren*: 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 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 Schlickenrieder*: 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 Verfahrerbewegungen  
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 *Dirk Ansorge*: Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiraumern  
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*: 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 telepräseste 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 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 Sigl*: Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsintern  
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 roboterbasierten 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 978-3-8316-0878-8
- 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 zeitfensterbasierter 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 Munzert*: Bahnanpassalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 *Georg Völlner*: Röhreleinschweißen 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*: Modularer Vibrationswendelförderer zur 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 Pasch*: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten · ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 *Johannes Schipf*: Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräzisenz  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 *Stefan Lutzmann*: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlenschmelzens  
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 berührungsloser 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 Presswerkzeugen 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 Röhreleinschweißen  
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 multidimensionalen 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 Inbetriebsnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 *Thomas Hense*: 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 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 *Marcus Ruhstorfer*: Röhreleinschweißen 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 pulverbasierten 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 pulverbasierte 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 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 Schwunggrad-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  
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 Escher*: 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 Prozesketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3