

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

## **Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**

**Matthäus Sigl**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Die Dissertation wurde am 17.12.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.04.2008 angenommen.

Matthäus Sigl

**Ein Beitrag zur Entwicklung  
des Elektronenstrahlsinterns**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 223

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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 · 2008

ISBN 978-3-8316-0841-6

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

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, dem Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit, ebenso wie seinem Kollegen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunter Reinhart.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn, dem Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau und meinen Sohn danken, die mir die notwendige Unterstützung und Geduld entgegengebracht haben und somit die Arbeit ermöglichten.

München, im August 2008

*Matthäus Sigl*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise.....	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Verfahrensgrundlagen.....</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlagen der Rapid-Technologien .....	5
2.1.1	Allgemeines und Begriffsdefinitionen.....	5
2.1.2	Verfahrensprinzip .....	6
2.1.3	Potenziale und Grenzen in der Anwendung .....	8
2.2	Schichtweise Herstellung metallischer Bauteile .....	10
2.2.1	Einteilung der Verfahren.....	10
2.2.2	Einprozessverfahren.....	12
2.2.3	Industrielle Herstellung und Anwendung von Metallpulvern ...	13
2.2.4	Modellierung und Simulation von Einprozessverfahren .....	16
2.2.5	Einsatz des Elektronenstrahls in Rapid-Technologien .....	17
2.3	Einführung in die Elektronenstrahltechnologie.....	17
2.3.1	Funktionsweise .....	17
2.3.2	Anwendungsfelder .....	23
2.4	Methodische Entwicklung .....	26
2.4.1	Anwendung von Methoden in der Entwicklung von generativen Verfahren.....	26
2.4.2	Methoden der Produktentwicklung.....	28
2.5	Zusammenfassung und Handlungsbedarf .....	30

<b>3</b>	<b>Vorgehensweise zur Entwicklung von generativen Verfahren .....</b>	<b>33</b>
3.1	Grundmuster der Vorgehensweise .....	33
3.2	Adaption des Münchener Vorgehensmodells .....	34
3.2.1	Ziel planen .....	35
3.2.2	Ziel analysieren und strukturieren .....	37
3.2.3	Lösungsalternativen suchen/Eigenschaften ermitteln .....	43
3.2.4	Entscheidungen herbeiführen/Ziel absichern .....	44
<b>4</b>	<b>Entwicklung der inneren Teilsysteme.....</b>	<b>47</b>
4.1	Versuchsanlage.....	47
4.2	Teilsystem Elektronenstrahl.....	50
4.2.1	Vorgehen.....	50
4.2.2	Fokussierbarkeit und Qualität des Strahls .....	51
4.2.3	Messung des Strahldurchmessers .....	53
4.2.4	Fokussierbarkeit.....	55
4.3	Teilsystem Metallpulver.....	57
4.3.1	Vorgehen.....	57
4.3.2	Auswahl der Pulverwerkstoffe .....	58
4.3.3	Eigenschaften ermitteln .....	60
4.3.3.1	Physikalische Eigenschaften .....	60
4.3.3.2	Elektrische und thermische Eigenschaften.....	61
4.4	Teilsystem Prozesssteuerung .....	70
4.4.1	Vorgehen.....	70
4.4.2	Anforderungen und Auswahl.....	70
4.4.3	Datenaufbereitung.....	70

4.4.4	Prozesssteuerung .....	72
4.4.5	Integrationsfähigkeit .....	73
4.5	Zusammenfassung .....	76
<b>5</b>	<b>Entwicklung der äußeren Teilsysteme.....</b>	<b>77</b>
5.1	Allgemeines .....	77
5.2	Strahl-Stoff-Wechselwirkungen .....	77
5.2.1	Vorgehen.....	77
5.2.2	Instationäre Effekte.....	79
5.2.3	Strahleindringtiefe.....	85
5.3	Materialbereitstellung.....	88
5.3.1	Vorgehen.....	88
5.3.2	Ziel planen, analysieren und strukturieren.....	88
5.3.3	Lösungssuche und Eigenschaftsermittlung.....	91
5.3.3.1	Lösungsalternativen suchen.....	91
5.3.3.2	Pulver sieben.....	92
5.3.3.3	Pulverrutsche .....	95
5.3.3.4	Rakelmechanismus .....	98
5.4	Belichtungsstrategie .....	100
5.4.1	Vorgehen.....	100
5.4.2	2D-Versuche .....	102
5.4.2.1	Versuchsplanung .....	102
5.4.2.2	Allgemeine Beobachtungen.....	106
5.4.2.3	Versuchsauswertung.....	107
5.4.2.4	Oberflächenanalyse .....	110



5.4.3	3D-Versuche .....	114
5.4.3.1	Synthese.....	114
5.4.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	117
5.4.4	Simulation von Belichtungsstrategien .....	122
5.4.4.1	Vorgehen .....	122
5.4.4.2	Modellbildung .....	124
5.4.4.3	Simulation .....	128
5.5	Technologische und wirtschaftliche Bewertung .....	132
5.5.1	Allgemeines .....	132
5.5.2	Wirtschaftliche Betrachtung .....	133
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>137</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>157</b>
9.1	Anforderungsliste Pulverauftrag .....	157
9.2	Auftragsmechanismus .....	159
9.3	Versuchsdurchführung und Auswertung von 2D-Versuchen .....	160
9.4	Flussdiagramm NC-Programm für den Schichtauftrag .....	162
9.5	Aufbau des Simulationsprogrammes .....	163
9.6	Referenzierte Firmen.....	164

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangssituation

*„Nur das Individuelle ist vornehm; was vielem gleich ist, ist dem Niedrigsten von diesem gleich und zieht deshalb auch das Höchste darunter auf das Niveau des Niedrigsten hinab (SIMMEL 1890)“.*

Schon Georg Simmel erkannte im vorletzten Jahrhundert dieses Bedürfnis des Menschen, sich von der Masse abzuheben, was sich heute im Trend zur Individualisierung niederschlägt. Die Kunden „verlangen immer häufiger an ihre Bedürfnisse angepasste Produkte und haben Änderungswünsche“ (LINDEMANN et al. 2006). Dieser Trend stellt allerdings gerade in der Produktionstechnik eine große Herausforderung dar. Der Kunde ist an den niedrigen Preis des Massenproduktes gewöhnt, individuelle Produkte verursachen hingegen höhere Herstellkosten.

Das Paradigma der „Individuellen Produktion“ wird deshalb langfristig die Produktionstechnik dominieren (ZÄH 2003a). Hier scheitern oftmals die heute vorhandenen Fertigungsprozessketten, die meist auf Massenproduktion ausgerichtet sind. Mit erfolgreichen Fertigungsverfahren müssen in Zukunft Bauteile schnell, kostengünstig und flexibel hergestellt werden können. Dafür erweist sich eine neue Gruppe von Fertigungsverfahren als äußerst geeignet: Die generativen Verfahren, so genannte Rapid-Technologien, mit denen in einem Arbeitsgang direkt aus 3D-CAD-Daten Bauteile hergestellt werden. Bei diesen Verfahren wird das Prinzip des schichtweisen Aufbaus umgesetzt. Dadurch ist es möglich, Bauteile nahezu kostenunabhängig von der geometrischen Komplexität zu erzeugen.

Der Einsatz dieser Verfahren konnte sich bereits im Muster- und Prototypenbau stark ausweiten (Rapid Prototyping). Hier steht die schnelle und direkte Umsetzung der Konstruktionsdaten in physische Modelle im Vordergrund. Durch die schichtweise Herstellung der Bauteile kann diese Anforderung in besonderem Maße erfüllt werden. Mittlerweile sind weltweit 13000 Rapid-Anlagen im Einsatz (WOHLERS 2003). Vor der Markteinführung der ersten Rapid-Technologie wurden Muster- und Prototypen in erster Linie händisch durch den Modellbauer erstellt. Heute können diese Modelle automatisiert mittels der neuen Fertigungsverfahren, beispielsweise über Stereolithographie in Polymerharz, hergestellt werden. Rapid-Technologien revolutionierten somit den Muster- und Prototy-

penbau, da mit ihnen Lohnkosten eingespart und gerade komplexe Bauteile schneller hergestellt werden können.

Darüber hinaus wurden erste Metall verarbeitende Rapid-Anlagen bereits 1993 für das Rapid Tooling, also die schnelle Herstellung von Vorserienwerkzeugen für den Spritz- oder Druckguss, eingesetzt (vgl. GEBHARDT 1996, GRIMM 2004). Aber auch die technologischen und wirtschaftlichen Eigenschaften dieser Fertigungsverfahren sind heute bereits für die Erzeugung von Endprodukten und Kleinserien in Nischen ausreichend (ZÄH 2003b). Die breite industrielle Anwendung der Verfahren scheitert jedoch oft an den starken Einschränkungen. Zurzeit können Bauteile nur mit geringen Oberflächengüten und Genauigkeiten und nur in bestimmten Materialien hergestellt werden. Metall verarbeitende Rapid-Technologien verfügen daher über ein stark begrenztes Potenzial im Hinblick auf das Produktspektrum.

Derzeit sind am Markt acht verschiedene Rapid-Anlagen für die direkte Herstellung von Metallbauteilen verfügbar. Sieben dieser Anlagen basieren auf Laserstrahlquellen zum Versintern oder Schmelzen des Pulvers. Hier stellte sich in den letzten Jahren eine Stagnation ein. Vor allem Rapid-Technologien, mit denen Metallpulver direkt zu Bauteilen verarbeitet werden kann, weisen wenige Innovationssprünge auf. Es scheinen physikalische Grenzen, wie beispielsweise die Ablenkgeschwindigkeit des Lasers bei gleichzeitig hoher Strahlleistung, der jeweiligen Fertigungsverfahren erreicht zu sein. Da die Bauteilkomplexität aufgrund zunehmender Funktionsintegration stetig steigt, ist die Nachfrage nach diesen Technologien dennoch erheblich. Um das Anwendungsspektrum zu erweitern und damit die Verbreitung der Verfahren zu forcieren, ist die Weiterentwicklung dieser Technologien gerade im Hinblick auf die Verwendbarkeit von seriennahen Werkstoffen dringend nötig.

Aus diesem Sachverhalt heraus entstanden erste Ansätze, den Elektronenstrahl als Energiequelle in einer Rapid-Anlage einzusetzen. Grundsätzlich besitzt der Elektronenstrahl als Energiequelle einige Vorteile gegenüber dem Laserstrahl, und zwar im Hinblick auf eine flexiblere Strahlführung oder die höhere Leistungsdichte des Strahls. Bis dato bestehen allerdings kaum Erfahrungen und Erkenntnisse bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen des Elektronenstrahls in Rapid-Anlagen. Diese gilt es exakt zu bestimmen, um die weiteren Entwicklungsziele im Bereich der Metall verarbeitenden Rapid-Technologien strategisch zu definieren.

Schichtweise arbeitende Elektronenstrahlanlagen werden bisher von einem Anlagenhersteller weltweit angeboten, der Firma Arcam AB (Schweden). Diese wei-

sen gegenüber den vorhandenen Laseranlagen ausgedehnte Defizite hinsichtlich erzielbarer Bauteilqualitäten auf. Damit wird deutlich, dass die Potenziale des Elektronenstrahls in Rapid-Anlagen noch nicht umfassend umgesetzt sind.

### 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, eine schnelle, flexible und schichtweise Herstellung von Bauteilen aus Metallpulver mit der Entwicklung einer neuartigen Elektronenstrahlsinter-Technologie umzusetzen.

Da in bisherigen Untersuchungen und Forschungsarbeiten im Bereich der Rapid-Technologien in erster Linie Teilaspekte der Technologien untersucht wurden, soll hier ein ganzheitlicher Ansatz gewählt werden. Die Entwicklung wird stets vor dem Hintergrund der Möglichkeiten in der Anlagentechnik betrachtet. Dabei werden bekannte Vorgehensweisen aus der Produktentwicklung genutzt und an die Herausforderungen einer kombinierten Anlagen- und Technologieentwicklung angepasst.

Diese Arbeit soll die industrielle Anwendung des Elektronenstrahlsinterns forcieren. Neben der Anpassung und Entwicklung entsprechender Methoden für die Technologieentwicklung sind Vorgehensweisen und Leitlinien zur Adaption der Technologie in der industriellen Anwendung zu erarbeiten.

Das methodische Vorgehen bei der Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns soll auf andere Rapid-Technologien übertragbar sein, um so einen Mehrwert für die gesamte Branche der Rapid-Technologien zu schaffen.

### 1.3 Vorgehensweise

Um die vorgestellte Zielsetzung zu erfüllen, wird im Kapitel 2 dieser Arbeit zunächst der Stand der Technik erörtert. Sowohl der aktuelle Entwicklungstrend der Rapid-Technologien als auch die bisherige industrielle Anwendung des Elektronenstrahls sind hierfür von Bedeutung. Darüber hinaus werden Ansatzpunkte aus der methodischen Entwicklung von Produkten aufgezeigt, die auf eine Technologieentwicklung übertragbar sind.

Der Ausbau dieser Methodenbausteine aus der Produktentwicklung erfolgt im Kapitel 3 im Rahmen einer Vorgehensweise für die Entwicklung des Fertigungsverfahrens Elektronenstrahlsintern. Dabei werden Ansätze wie das Münchener

## 1 Einführung

---

Vorgehensmodell (LINDEMANN 2005) an die Anforderungen einer Technologieentwicklung angepasst. Der Themenkomplex wird darauf aufbauend in sechs Teilsysteme gegliedert, mit denen die Technologie umfassend betrachtet werden kann. Diese Teilsysteme sind weiter in eine Gruppe innerer und eine Gruppe äußerer Teilsysteme strukturiert.

Im Kapitel 4 werden die inneren Teilsysteme mittels der jeweils an den Wissensstand angepassten Vorgehensweise erarbeitet. Im Teilsystem *Energiequelle* werden die Aspekte des Elektronenstrahls betrachtet, im Teilsystem *Stoff* werden die Eigenschaften der Metallpulver untersucht und im Teilsystem *Information* werden die Grundlagen für die Datenverarbeitung im Prozess geschaffen.

Im Anschluss werden in Kapitel 5 die äußeren Teilsysteme analysiert und entwickelt. Zunächst wird das Teilsystem *Strahl-Stoff-Wechselwirkungen* untersucht und die physikalischen Effekte modelliert. Dies bildet die Grundlage für die Entwicklung der *Materialbereitstellung*, dem zweiten äußeren Teilsystem. Hier sind unterschiedliche Lösungsansätze mit den Methoden der Produktentwicklung erarbeitet, analysiert und strukturiert. Die vielversprechenden Lösungsalternativen werden anschließend umgesetzt und deren Eigenschaften in Versuchen ermittelt. Als drittes äußeres Teilsystem wird die *Belichtungsstrategie* betrachtet, die zunächst für 2D-Versuche ausgearbeitet und anschließend an die schichtweise Herstellung von 3D-Bauteilen adaptiert wird. Auf der Basis der Versuchsergebnisse im Bereich der 3D-Bauteile kann der Prozess dann thermisch simuliert werden. Damit ist die Basistechnologie des Elektronenstrahlsinterns geschaffen und für die weitere Entwicklung das nötige Prozesswissen aufgebaut. Eine wirtschaftliche und technologische Betrachtung, in der die künftigen Handlungsfelder definiert werden, schließt das fünfte Kapitel ab.

Das Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick für weitere Forschungstätigkeiten.

## 2 Stand der Technik und Verfahrensgrundlagen

### 2.1 Grundlagen der Rapid-Technologien

#### 2.1.1 Allgemeines und Begriffsdefinitionen

Schichtweise arbeitende Fertigungsverfahren werden in der Praxis als ein Randgebiet in der allgemein bekannten Norm DIN 8580 gesehen. In dieser sind Fertigungsverfahren in Hauptgruppen unterteilt. Die Rapid-Technologien können dabei der ersten Hauptgruppe, den urformenden Verfahren, zugeordnet werden. Der feste Körper wird bei den Rapid-Technologien aus einem formlosen Stoff durch das Schaffen eines Zusammenhalts gefertigt. Für die Rapid-Technologien werden jedoch, im Gegensatz zu herkömmlichen urformenden Verfahren, keine Formen verwendet, die das Material aufnimmt. Diese geometrische Information des Bauteils existiert lediglich virtuell als 3D-CAD-Datensatz.

Die Vielfalt der Rapid-Technologien lässt allerdings keine eindeutige Zurodnung zu den vorhandenen Untergruppen der DIN 8580 zu. Hier ist die Bildung neuer Untergruppen zur Unterscheidung der Verfahren nötig, um den einheitlichen Sprachgebrauch und eine klare Differenzierung der Verfahren zu ermöglichen. Beispielsweise kann das Laminated Object Manufacturing (LOM) keinem der Stoffzustände und damit der Untergruppen von urformenden Verfahren zugeordnet werden (FICHTNER 2006), da im LOM Materiallagen in festem Zustand (Platten oder Folien) als Baumaterial verwendet werden. Um sich am Markt zu diversifizieren, führen Anlagenhersteller zusätzlich neue Begriffe ein. Für ein leichteres Verständnis der Thematik ist daher vorab eine Definition der Begriffe nötig.

In dieser Arbeit werden folgende Begriffe verwendet:

**Rapid-Technologien** beinhaltet ursprünglich alle Fertigungsverfahren, die das Prinzip des schichtweisen Aufbaus umsetzen und mit denen es schneller als mit konventionellen Verfahren möglich ist, Bauteile zu produzieren. Heute bezeichnet *Rapid-Technologien* nicht ausschließlich schichtweise arbeitende Verfahren, da beispielsweise auch mit modernen Hochgeschwindigkeitsverfahren (HSC) sehr schnell Bauteile hergestellt werden können. Der Begriff Rapid-Technologien ist damit als Überbegriff anzusehen, der schnelle und innovative Fertigungsverfahren umfasst.

**Rapid Prototyping (RP)** bezeichnet - im Sinne der Produktionstechnik - die schnelle Herstellung von Muster- oder Prototypenbauteilen durch schichtweisen Aufbau. Hierfür finden spezielle Fertigungsverfahren Anwendung, die unter dem Begriff der Rapid-Technologien zusammengefasst werden können.

Allerdings ist die Bandbreite der Anwendungen heute sehr viel größer als lediglich die Herstellung erster Muster- oder Prototypenbauteile.

**Rapid Tooling (RT)** ist eine Vorgehensweise zur schnellen Herstellung von Werkzeugen für urformende und umformende Fertigungsverfahren. Mittels Rapid Tooling können Kleinserien bereits im späteren Serienfertigungsverfahren, beispielsweise dem Spritzgießen, im Serienwerkstoff hergestellt werden.

**Rapid Manufacturing (RM)** bezeichnet die schnelle und kostengünstige Herstellung einzelner komplexer Bauteile oder Kleinserien als serienreife Produkte mittels Rapid-Technologien.

Neben dieser Einteilung hinsichtlich des Einsatzzweckes von schichtweise hergestellten Bauteilen sind weitere Begriffe, wie beispielsweise das Lasersinterverfahren, geprägt worden (SEEFRIED 2005, ZÄH 2006).

### 2.1.2 Verfahrensprinzip

Das Prinzip aller generativen Verfahren basiert auf der Idee, ein komplexes dreidimensionales Fertigungsproblem in einzelne Schnitte, die sogenannten Schichten, und damit in eine zweidimensionale Aufgabenstellung, zu zerlegen. Die sequenzielle Erzeugung der Schichten wird vollständig automatisiert durchgeführt und ermöglicht eine praktisch werkzeuglose Fertigung komplexer Geometrien (siehe Abbildung 1). Grundsätzlich benötigen alle Verfahren hierfür zunächst ein 3D-CAD-Modell. Dieses Modell bildet die Basis der folgenden Schritte.

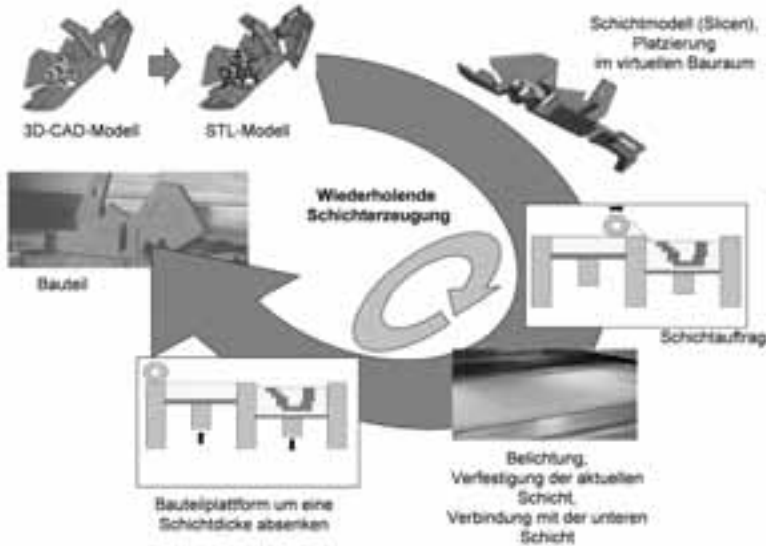


Abbildung 1: Verfahrensprinzip der generativen Technologien (MEINDL 2004)

Durch die sogenannte Triangulation wird das Modell im ersten Schritt in eine STL-Datei (Standard Transformation Language) überführt. Die STL-Datei nähert die Kontur des Bauteils durch eine Vielzahl orientierter Dreiecke an. Durch einen Normalenvektor jedes Dreiecks wird dokumentiert, wo sich die Innen- bzw. Außenseite des Bauteiles befindet. Die Anzahl der Dreiecke wird dabei so hoch gewählt, dass die entstehende Abweichung von der Originalkontur kleiner als die Baugenauigkeit des Verfahrens ist. Diese Datenkonvertierung findet heute in der CAD-Anwendung durch eine Exportschnittstelle statt. Gegenüber anderen Verfahrensgruppen, wie beispielsweise dem NC-Fräsen, bei dem eine steuerungsspezifische CAD/CAM-Kopplung notwendig ist, ergibt die durchgängige Verwendung der STL-Datei in allen generativen Verfahren einen großen Vorteil. Hier wurde eine umfassende, standardisierte Schnittstelle zwischen Datenmodell und Fertigungstechnologie geschaffen. Ist die Datei erzeugt, so kann diese ohne Konvertierungsaufwand auf unterschiedlichen Anlagen verwendet werden. Dem gegenüber kann ein NC-Programm, das für konventionelle Verfahren erforderlich ist, aufgrund steuerungsspezifischer Befehlssätze nur bedingt auf unterschiedlichen Werkzeugmaschinen zur Anwendung kommen.

In der Bauprozessvorbereitung werden anschließend in einer maschinenspezifischen Software die relevanten Parameter (z. B. Schichtdicke oder Laser-



### 3 Vorgehensweise zur Entwicklung von generativen Verfahren

#### 3.1 Grundmuster der Vorgehensweise

Obwohl es sich bei generativen Verfahren im Vergleich zu konventionellen Prozessen um noch sehr junge Fertigungsverfahren handelt, wurde bereits eine Vielzahl an Methoden für die Entwicklung einzelner Technologien eingesetzt. Umfangreiche Vorgehensweisen, wie das DoE, wurden dabei auf die wesentlichen oder notwendigen Methoden beschränkt.

Diese Methoden werden darüber hinaus auf Teilprobleme der Entwicklung von generativen Verfahren angewandt. Das Eingrenzen auf spezifische Problemstellungen in den bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten ist in erster Linie auf die Komplexität und den hohen Umfang einer umfassenden Entwicklung von der Prozessidee bis hin zur produktionsfähigen Anlage zurückzuführen.

Die bis dato sehr erfolgreiche Entwicklung und Optimierung der Verfahren lässt zunächst vermuten, dass diese Vorgehensweise weiterhin Erfolg versprechend ist. Bei näherer Betrachtung zeigt sich allerdings eine Eingrenzung in immer kleinere Entwicklungsschritte. Beispielsweise wurde die Oberflächenqualität der Bauteile in den letzten Jahren nur noch gering verbessert. Dies liegt auch in der bisherigen Vorgehensweise begründet. Die einzelnen Eigenschaften der generativen Verfahren, wie die Laserleistung, wurden in eingehenden Untersuchungen bis an ihre Grenzen optimiert. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Teilaspekten konnten hierbei nur eingegrenzt betrachtet werden. Deshalb ist eine Vorgehensweise notwendig, innerhalb derer sowohl die Teilaspekte der Prozessentwicklung als auch die Wechselwirkungen mit der Anlagentechnik betrachtet werden können.

Ein entscheidender Aspekt hierbei ist die Flexibilität der Vorgehensweise. Werden mehrere Teilsysteme einer Technologie entwickelt, so ergeben sich gerade durch neue Erkenntnisse in einem Teilsystem veränderte Voraussetzungen bei einem anderen Prozess.

Daher wird als Vorgehensweise für eine ganzheitliche Entwicklung einer generativen Technologie das MVM gewählt. Dieses bietet durch die Flexibilität in der Anwendung genügend Freiraum, um über die Problemstellungen in einem Teilsystem hinaus die Wechselwirkungen durch neue Erkenntnisse in ein anderes

### **3 Vorgehensweise zur Entwicklung von generativen Verfahren**

---

Teilsystem zu übertragen. Das Grundmuster der Vorgehensweise in der Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns teilt sich also auf die sieben Schritte des MVM auf.

Im Weiteren wird diese Vorgehensweise an die jeweiligen Teilsysteme angepasst und mittels ausgewählter Methoden angewandt. Durch die umfangreiche Aufgabenstellung in der Entwicklung muss darüber hinaus der Detaillierungsgrad spezifisch angepasst werden. Hier gilt das Grundprinzip „vom Ganzen zum Detail“ (DAENZER & BÜCHEL 2002). Dadurch wird gewährleistet, dass das Betrachtungsfeld zunächst weit gefasst ist und anschließend schrittweise eingegrenzt werden kann.

#### **3.2 Adaption des Münchener Vorgehensmodells**

Die Entwicklung der generativen Verfahren ist meist eine Weiterentwicklung von vorhandenen Verfahren oder Anlagen. Die Basis bildet dabei immer das Prinzip des schichtweisen Aufbaues. Im Münchener Vorgehensmodell können also in einer abstrakten Ebene die sieben Schritte mit bereits durchgeführten Arbeiten hinterlegt werden. Die unterschiedlichen generativen Verfahren befinden sich dabei auf verschiedenen Entwicklungsniveaus. Von neu zu entwickelnden Technologien, wie dem Selective Inhibition of Sintering (SIS, ASIABANPOUR et al. 2003, KHOSHNEVIS et al. 2002), bis hin zu am Markt verfügbaren Verfahren, wie dem Indirekten Metall-Lasersintern (BEAMAN 1997), reicht die Spannweite des Entwicklungsstandes.

Nicht nur der Stand der Technik in den einzelnen Technologien, sondern auch die Unterschiede in den Verfahren selbst, sind gravierend. Selbst die Einschränkung auf direkte Metall verarbeitende Verfahren ist nicht ausreichend für die Erstellung eines übergreifend gültigen Methodenbaukastens. Zu vielfältig sind die Entwicklungsziele in den einzelnen Verfahren.

Eine Adaption der Entwicklungsmethoden kann daher ausschließlich auf einzelne Verfahren angewendet werden. Die zu entwickelnde Vorgehensweise wird deshalb im Folgenden auf das Elektronenstrahlsintern metallischer Bauteile beschränkt. Dabei wird zunächst das MVM im Standardweg, also sequenziell entlang der sieben Teilschritte, durchlaufen. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Teilsysteme behandelt.

### 3.2.1 Ziel planen

Die grundsätzliche Zielsetzung ergibt sich aus dem Stand der Technik. Es wird ein Verfahren entwickelt, das metallisches Pulver durch ein schichtweise arbeitendes Verfahren zu einem komplexen Bauteil verfestigt. In einer detaillierten Zielplanung zeigt sich, dass eine Vielzahl an Aspekten hierfür genau zu definieren sind. Offen ist beispielsweise, welches Metallpulver mittels welcher Elektronenstrahlquelle verarbeitet werden soll.

Ein Aspekt in der Zielplanung ist zudem, dass generative Verfahren derzeit in erster Linie in Nischenbereichen erfolgreich eingesetzt werden können. Soll eine neue Technologie nachhaltig entwickelt werden, so müssen die Anforderungen an das Verfahren in der Zielplanung klar definiert sein. Bisher geht man davon aus, dass mit generativen Verfahren durch deren Flexibilität äußerst unterschiedliche Bauteilanforderungen erfüllt werden können. Führt man sich jedoch vor Augen, dass die meisten Anlagen in sehr engen Nischen eingesetzt werden und hier zusätzlich die Verfahren an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst oder in speziellen Prozessketten integriert werden, so sollte bereits zu Beginn der Entwicklung dieser Aspekt in der Zielplanung berücksichtigt werden. Deutlich wird dies vor allem im Bereich der Stereolithographie. Nach ZÄH (2006) wurden schätzungsweise zwei der vier Millionen im Jahre 2002 hergestellten Stereolithographie-Bauteile in nur einem Unternehmen in einer speziell angepassten Prozesskette gefertigt. Mittels dieser Prozesskette werden z. B. Zahnspangen produziert.

Bisher wurden generative Verfahren soweit entwickelt, dass diese für unterschiedliche Bauteilgeometrien und damit auch verschiedene Bauteile verwendbar sind. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal sind die verarbeitbaren Materialien. Dies spiegelt auch das Angebot der Anlagenhersteller wider, die je nach Material unterschiedliche Anlagentypen anbieten. Diese Diversifizierung bildet einen ersten Schritt in Richtung modulare generative Verfahren. Trotzdem ist in der Anwendung der Technologien am Beispiel der Zahnspangen erkennbar, dass die Verfahren an die jeweilige Aufgabenstellung vom Anlagenbetreiber weiter angepasst werden müssen. Dies wirft die Fragestellung auf, wie weit die generativen Verfahren in einer ersten Stufe vom Anlagenhersteller entwickelt werden sollten, und liefert damit auch die Begründung für eine neue Aufteilung der Entwicklung zwischen Anlagenherstellern und Anlagenbetreibern beim Elektronenstrahlsintern.

## 4 Entwicklung der inneren Teilsysteme

### 4.1 Versuchsanlage

Wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, ist zunächst die Entwicklung der inneren Teilsysteme *Strahl*, *Stoff* und *Information* notwendig. Daraus kann grundlegendes Wissen über diese Sintertechnologie abgeleitet werden und durch eine Synthese in die Entwicklung der äußeren drei Teilsysteme übergeleitet werden.

Die Anlagentechnik zur produktionstechnischen Nutzung eines Elektronenstrahls ist, wie bereits beschrieben, sehr aufwendig. Eine Versuchsanlage wurde daher auf Basis eines Kriterienkatalogs ausgewählt. Entscheidende Merkmale bei dieser Auswahl der Anlagentechnik sind neben der verfügbaren Leistung, die Bauraumgröße und Strahleigenschaften, sowie die Fokussierbarkeit und die Ablenkgeschwindigkeit.

Für die Forschungsarbeiten wurde eine Elektronenstrahlanlage der Firma probeam AG & Co. KGaA beschafft (Abbildung 22). Dabei handelt es sich um eine Universalkammer-Schweißanlage mit 600 l Bauraumvolumen und einer maximal zur Verfügung stehenden Nennleistung bis 10 kW. Da das Elektronenstrahlsintern in ähnlichen Leistungsbereichen wie das Schweißen stattfinden wird, eignet sich diese Anlagentechnik für die Entwicklung einer Prototypenanlage zum Elektronenstrahlsintern in idealer Weise.



Abbildung 22: Elektronenstrahl-Schweißanlage im Versuchsfeld des iw (Insitut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München)

## 4 Entwicklung der inneren Teilsysteme

---

In *Abbildung 23* sind die wichtigsten technischen Daten der ausgewählten Anlage zusammengefasst.

Prinzip	Triodensystem mit direkt geheizter Wolframdioden
Beschleunigungsspannung	0 bis 100 kV
Strahlleistung	max. 10 kW
Strahlstrom	0 bis 100 mA
Linsenstrom (Fokus)	1800 bis 1900 mA
Kammermaße	1180 mm · 750 mm · 720 mm
Kammermaterial	Bleimantel
Vakuum	ca. $2 \cdot 10^{-8}$ mbar
Anpumpzeit ( $3 \cdot 10^{-6}$ mbar)	ca. 20 min.

*Abbildung 23: Technische Daten der EB-Anlage K6 der Firma pro-beam*

Für das Schweißen von Bauteilen ist in der Kammer ein x-y-Koordinatentisch montiert. Dieser wird von zwei Servomotoren mit integrierten Wegmesssystemen angetrieben. Die Steuerung der Anlage erfolgt über eine CNC-Steuerung Sinumerik 840 D der Siemens AG. Der Elektronenstrahl wird über eine zusätzliche Steuerung gelenkt, über die eine schnelle Strahlableitung ermöglicht wird. Hierbei handelt es sich um einen Steuerungsrechner, der mit 50 MHz Taktfrequenz Steuerdaten an die Ablenkspulen übermittelt. Diese Einheit wird benötigt, da der Arbeitstakt der NC-Steuerung mit 10 ms zu groß ist, um den Elektronenstrahl bei maximaler Ablenkgeschwindigkeit definiert zu bewegen. Entwickelt wurde die Steuereinheit, eine sogenannte Minimod, von der Firma pro-beam. Des Weiteren sind eine CCD-Kamera zur Prozessbeobachtung, ein Windows-XP-Rechner mit Analyse- und Auswertungssoftware und ein NC-Bedienpult vorhanden.

Für die Steuerung des Elektronenstrahls stehen demnach drei verschiedene Systeme zur Verfügung:

- Der x-y-Koordinatentisch ermöglicht die Bewegung des Bauteils relativ zum Strahl. Dies dient in erster Linie zur Bearbeitung mehrerer kleiner Werkstücke in einer Aufspannung, indem nach dem Schweißen eines Bauteils das nächste in den Strahlengang bewegt wird.
- Die Strahlsteuerung mittels der Sinumerik 840 D ermöglicht die Bewegung des Elektronenstrahls in x- und y-Richtung auf dem jeweiligen Bauteil. Dabei werden in der angepassten CNC-Steuerung die x- und y-Achse wie Servomotoren behandelt. Die gewohnten Verfahrensbefehle aus

der NC-Programmierung können hier direkt übernommen werden. Dadurch wird es einem Maschinenbediener ermöglicht, die Elektronenstrahlanlage wie eine Werkzeugmaschine zu bedienen, bei der die Strahlachsen den Werkzeugachsen entsprechen.

- Die schnelle Strahlablenkung mittels Minimod-Steuerung erfolgt über einen zusätzlichen Steuerungsrechner. Die damit erzeugten Steuerungsdaten werden überlagert und zu den Steuerinformationen der CNC-Steuerung an die elektromagnetischen Ablenkspulen übermittelt. Hierbei wird eine Strahlfigur von 1000 Punkten (1000-Punkte-Figur), die in x- und y-Koordinaten vordefiniert wird, mit einer Frequenz von bis zu 50 kHz angesteuert.

In der Schweißtechnik können beispielsweise Mehrbadschweißungen vorgenommen werden, indem in der Minimod-Steuerung drei Punkte definiert werden, zwischen denen der Strahl sehr schnell springt. Diese drei Punkte werden parallel zur Sprungfunktion durch die Sinumerik 840 D über dem Bauteil abgelenkt. Die 1000-Punkte-Figur in der Minimod-Steuerung kann darüber hinaus dazu verwendet werden, unterschiedliche Musterungen im Schweißbad hervorzurufen, indem beispielsweise eine Kreis- oder Schleifenform vorgegeben wird. Hierin kann eine Analogie zur Werkzeugmaschine gesehen werden. Die Minimod-Steuerung entspricht dabei der jeweiligen Werkzeuggeometrie, die auf das Bauteil einwirkt. Da die thermischen Effekte langsamer ablaufen als die Ablenkung des Elektronenstrahls, trifft diese Analogie zu. Die Mehrstrahltechnik, die durch dieses Prinzip ermöglicht wird, wird bereits industriell eingesetzt (Abbildung 24).

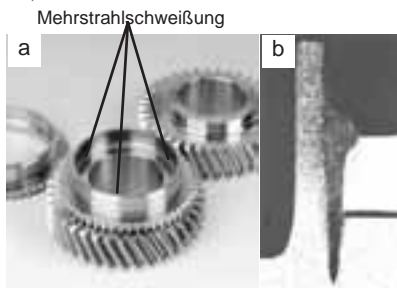


Abbildung 24: Mehrstrahlschweißung an einem Getriebezahnrad (a). Schliff der Mehrstrahlschweißnaht (b) (LÖWER et al. 2004)

## 5 Entwicklung der äußeren Teilsysteme

### 5.1 Allgemeines

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen in den inneren Teilsystemen *Strahl*, *Stoff* und *Information* werden im Folgenden die äußeren Teilsysteme *Strahl-Stoff Wechselwirkungen*, *Materialbereitstellung* und *Belichtungsstrategie* erarbeitet.

Dafür sind die Grundlagen aus den bisherigen Systemen Voraussetzungen. In der Entwicklung können sowohl die drei grundlegenden Teilsysteme als auch die drei folgenden Teilsysteme jeweils parallel bearbeitet werden. Die beiden Gruppen der Teilsysteme müssen allerdings sequentiell betrachtet werden.

### 5.2 Strahl-Stoff-Wechselwirkungen

#### 5.2.1 Vorgehen

Sowohl die physikalischen und thermischen Eigenschaften des Pulvers als auch die Eigenschaften des Strahles sind in den vorangegangenen Abschnitten intensiv untersucht worden. Allerdings wurden bisher im Bereich der Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Elektronenstrahlsintern nur die Untersuchungen von MEINDL (2004) durchgeführt. Er wandte für die Belichtung von einzelnen Linien im Pulverbett die Methoden nach Shainin (BHOTE & BHOTE 2000) an. Über dieses Vorgehen gelang es, die Wechselwirkungen zwischen den definierten Einfluss- und Zielgrößen einzugrenzen. Die Einschränkung der Einflussgrößen ermöglichte die Untersuchung dieser Zusammenhänge. Sinnvoll ist es, zunächst die Erkenntnisse von MEINDL (2004) an der installierten Elektronenstrahlanlage nachzuvollziehen. Damit soll gewährleistet werden, dass keine bisher ausgeschlossenen Einflussgrößen die weiteren Untersuchungen in ihrer Aussagekraft einschränken.

Aus den Erkenntnissen der Linienbelichtung kann anschließend auf die Parameter der Belichtung einzelner Schichten geschlossen werden. Jedoch erhöht sich die Anzahl der Einflussgrößen, da in der Linienbelichtung Parameter wie der Abstand zwischen zwei Linien nicht relevant sind. Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den Linienbelichtungen übertragen und um neue Parameter, wie der Linienabstand, erweitert. Die Schichtbelichtungen sind dem Teilsystem Be-

## 5 Entwicklung der äußeren Teilsysteme

---

lichtungsstrategie zuzuordnen. Während einfache Linienbelichtungen durch wenige NC-Programmbefehle abgearbeitet werden können, ist die Untersuchung verschiedener Belichtungsstrategien in einer Ebene bereits mit höherem Aufwand verbunden.

Sind Erkenntnisse über unterschiedliche Belichtungsstrategien gefunden, so werden diese wiederum auf die schichtweise Herstellung von 3D-Bauteilen übertragen. Dies ist in engem Zusammenhang mit der Materialbereitstellung zu sehen. Insgesamt erweitern sich die Einflussgrößen und Parameter. Die Schichtdicke, die Zeit zwischen zwei Belichtungen und die Feinheit der 3D-Strukturen können beispielsweise erst bei 3D-Bauteilen untersucht werden.

Im weiteren Vorgehen können die Methoden von Shainin und Taguchi aus zwei Gründen nur sehr begrenzt angewandt werden. Beiden Methodenbaukästen ist gemeinsam, dass zunächst die Einflussgrößen eingegrenzt werden müssen. Dies geschieht in früheren Untersuchungen bei Shainin beispielsweise durch die drei Methoden Komponentenaustausch, paarweiser Vergleich und Multi-Variationskarten (WIENDAHL 2002). Grundsätzlich setzt Shainin hierfür einen stabilen Fertigungsprozess voraus. In vielen Fällen, so auch bei Linienbelichtungen, ist dieses Vorgehen möglich. Allerdings ist die Anzahl an Einflussgrößen in Schichtversuchen bzw. bei 3D-Bauteilen zu hoch, um eine sinnvolle Eingrenzung vorzunehmen.

Zudem ist das vorhandene Prozesswissen zu gering. Es kann im Voraus nicht bestimmt werden, ob und in welchem Maße die einzelnen Parameter das Ergebnis beeinflussen. Teil- bzw. vollfaktorielle Versuche scheiden aus diesem Grund für die weitere Vorgehensweise aus, diese sind erst dann anwendbar, wenn das entsprechende Prozesswissen aufgebaut ist.

Um das Prozesswissen zu erhöhen, eignet sich dagegen der Vorgehenszyklus für die Erkenntnisgewinnung nach EHRENSPIEL (2003). In der Analyse eines Fertigungsprozesses kann nach diesem Muster vorgegangen werden. Zunächst wird die Aufgabe geklärt, dann werden aus Wirkzusammenhängen einzelne Hypothesen abgeleitet, analysiert und anschließend bewertet. Aus der Entscheidung für eine Hypothese aufgrund nachgewiesener Zusammenhänge wird im Folgenden der Erkenntnisgewinn erzeugt. Aus diesem Erkenntnisgewinn wiederum lassen sich erste Prozessfenster finden, in denen ein dreidimensionaler Schichtaufbau möglich wird. Erst dann kann von einem stabilen Fertigungsprozess gesprochen werden, bei dem die Methoden der statistischen Versuchsplanung greifen, da die zu variierenden Parameter eingegrenzt werden können.



### 5.2.2 Instationäre Effekte

Im ersten Schritt wurden über Linienbelichtungen grundlegende Strahl-Stoff-Wechselwirkungen untersucht. Dabei fanden die Untersuchungen in Anlehnung an die bisherigen Arbeiten (MEINDL 2004) bei unterschiedlichen Strahlparametern (Strahlleistung, Strahlfokuslage, Strahlgeschwindigkeit) mit den gemäß Abschnitt 4.3.2 ausgewählten Pulvermaterialien statt (CuSn20, 1.2343, FeNi, CuSn20+1.2343, NdFeB). In eine Metallplatte (siehe Abbildung 39) wurde stets dieselbe Menge Pulver gefüllt, das anschließend mit dem Elektronenstrahl belichtet wurde.

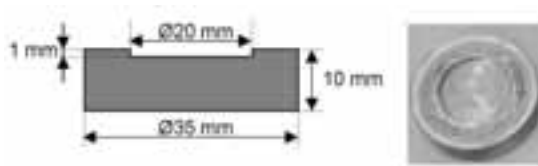


Abbildung 39: Metallplatte als Versuchskörper (Schnittzeichnung und Fotografie)

Dabei wurde festgestellt, dass sich das Pulver bei Raumtemperatur unter Beschuss des Elektronenstrahls sofort explosionsartig ausbreitet. In Abbildung 40 ist dies anhand einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme erkennbar. Das Pulver wurde dabei in kreisförmigen Bahnen durch den Elektronenstrahl (4 mA Strahlstrom, 100 kV Beschleunigungsspannung) erhitzt. Nach 5 ms (Abbildung 40 links oben) glüht der erste Viertelkreis. Das Verblasen tritt nach 10 ms auf. Dabei werden die Pulverkörner aus der Metallplatte herausgeschleudert. Dies ist deutlich an den glühenden Spritzern zu erkennen. Der Effekt führt schließlich nach 40 ms dazu, dass das gesamte Pulver verblasen wird, wodurch keine weitere Bearbeitung mehr möglich ist. Das Verblasen des Pulvers konnte zunächst durch ein indirektes Vorwärmen (Erwärmung der umliegenden Metallplatte) unterbunden werden. Dabei wurde die Metallplatte bis in den rotglühenden Bereich erwärmt, wodurch auch das Pulver teilversintert. Durch das angehaftete Pulver konnte ein so genanntes explosionsartiges Verblasen in der Vakuumkammer vermieden werden.

Das Vorwärmen des Pulvers hat jedoch direkte Auswirkungen auf die Konstruktion des Auftragsmechanismus, der für entsprechende Temperaturen ausgelegt werden muss. Ebenfalls werden die Parameter der Belichtungsstrategie stark beeinflusst. Daher wird im weiteren Verlauf das Verblasen näher untersucht.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Verlauf der Industrialisierung war zunächst der Preis eines Massenproduktes ausschlaggebend für den Erfolg im Verkauf, heute sind die Innovation, Neuheit oder Individualität eines Produktes häufig von entscheidender Rolle. Damit können Unternehmen, die sich auf die kostengünstige Fertigung einer Vielzahl von identischen Produkten spezialisieren, immer schwieriger erfolgreich am Markt agieren. Der Bedarf an neuen Fertigungsverfahren, mit denen schnell und trotzdem kostengünstig Einzelteile und Kleinserien hergestellt werden können, ist demnach sehr hoch.

Die generativen Verfahren bieten hier eine neue Chance zur wirtschaftlichen Produktion. Jedoch unterliegen diese neuen Verfahren einigen Einschränkungen. Die herstellbare Oberflächengüte oder die verwendbare Materialbandbreite ist nicht mit den Möglichkeiten der konventionellen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise dem Urformen oder Umformen, vergleichbar. Der Entwicklung und Optimierung der generativen Verfahren kommt daher eine wichtige Rolle in der weiteren Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Fertigungstechnik zu. Das Wissen um die Zusammenhänge im schichtweisen Aufbau von Bauteilen aus Metallpulver muss hier intensiv erweitert werden.

Gerade dem Elektronenstrahl kann aufgrund der schnellen Strahlablenkung und der hohen verfügbaren Leistung ein entsprechendes Potenzial für den künftigen Einsatz in generativen Verfahren zugesprochen werden. Allerdings sind hier die Kenntnisse bezüglich der physikalischen Abläufe im Prozess des Elektronenstrahlsinterns lediglich von grundlegender Natur.

Aus diesen beiden Aspekten, der Notwendigkeit für verbesserte generative Verfahren und der Einsatzmöglichkeiten des Elektronenstrahls, entstand die Idee zu dieser Arbeit. Die Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns sollte dabei durch modifizierte Methoden und Vorgehensweisen, die aus der Produktentwicklung bekannt sind, durchgeführt werden. Die Übertragung der Kenntnisse aus der Produktentwicklung führte im Verlauf der Arbeit zu einer strukturierten und nachvollziehbaren Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns. Das Vorgehen in der Entwicklung und die gewonnenen Erkenntnisse können daher mit geringem Aufwand auf andere Technologien übertragen werden.

Kern in der Vorgehensweise zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns war das Münchener Vorgehensmodell. Die Entwicklung wurde dabei in sechs Teilsysteme gegliedert: *Stoff*, *Energie*, *Information* als innere Systeme, sowie *Strahl-Stoff-Wechselwirkungen*, *Materialbereitstellung* und *Belichtungsstrategie* als

## 7 Literaturverzeichnis

3D-SYSTEMS 1988

3D-Systems (Hrsg.): Stereolithography Interface Specification. Valencia (Kalifornien, USA): 1988

3D-SYSTEMS 2005

3D-Systems (Hrsg.): Viper HA SLA System. Valencia (Kalifornien, USA): 2005

ALTSCHULLER 1984

Altschuller, G. S.: Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: Verlag Technik 1984.

ASIABANPOUR et al. 2003

Asiabanpour, B.; Khoshnevis, B.; Palmer, K.; Mojdeh, M.: SIS – a new SFF Method based on Powder Sintering. In: Boston (Massachusetts, USA): Kluwer Academic Publishers 2003, S. 25-38.

ASSMANN 2003

Assmann, B. O.: Herstellung hochgenauer Prototypen mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid-Prototyping-Verfahren. Diss. Univ. Duisburg-Essen (2003). Essen 2003.

BARTEL 2002

Bartel, R.: ELEWER – Der Elektronenstrahl als Werkzeug. F & E - Abschlussbericht. FEP 2002.

BEAMAN 1997

Beaman, J. J. B., J. W.; Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Marcus, H. L.; McAlea, K. P.: Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing. In: Boston (Massachusetts, USA): Kluwer Academic Publishers 1997.

BENDER 2004

Bender, K.: Vorlesungsskript Modellbildung und Simulation. München: Fachschaft Maschinenbau 2004.

BERGMANN et al. 1999

Bergmann, L.; Schäfer, C.; Raith, W.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 2, 9te Aufl. Berlin: de Gruyter 1999.

BHOTE & BHOTE 2000

Bhote, K. R.; Bhote, A. K.: World Class Quality: Using Design of Experiments to Make It Happen. New York: AMA 2000.

BÖHM 1999

Böhm, S.: Modellierung und Simulation des Elektronenstrahl-Schweißprozesses unter Berücksichtigung der Elektronenreflexion und der Elektronenstreuung. Diss. RWTH Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999.

WECK & BRECHER 2005

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 1- Maschinenarten und Anwendungsbe-  
reiche. 6 Aufl. Heidelberg: Springer 2005.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Erfolgsfaktor Logistikqualität: Vorgehen, Methoden und Werkzeuge  
zur Verbesserung der Logistikleistung. Heidelberg: Springer 2002.

WOHLERS 2003

Wohlens, T.: Wohlens Report 2003. Fort Collins (Colorado, USA): Wohlens Associates  
Inc. 2003.

WOLF et al. 2005

Wolf, G.; Bendix, D.; Faulstich, M.: Hot Gas Atomized Melts - Potentials for Thermal  
Spray Powders. In: DVS (Hrsg.): International Thermal Spray Conference and Expositi-  
on; Basel. Düsseldorf: DVS 2005.

ZÄH 2003a

Zäh, M. F.: Megatrends in der Produktionstechnik - Herausforderungen für Gesell-  
schaft, Wissenschaft und Ausbildung. In: Zäh, M. F.; Hoffmann, H.; Reinhart, G.;  
Milberg, J. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2003 Grenzen überwinden - Wachstum der  
neuen Art. München: Herbert Utz 2003a, S. 271.

ZÄH 2003b

Zäh, M. F.: Rapid Manufacturing - Strategie für die wirtschaftliche Kleinserienferti-  
gung. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin:  
Springer 2003b, S. 249.

ZÄH 2006

Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. München: Hanser 2006.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensprinzip der generativen Technologien (MEINDL 2004)...	7
Abbildung 2: Herstellkosten/-zeiten in Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität .....	9
Abbildung 3: Generative Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen (SEEFRIED 2005) .....	11
Abbildung 4: Anlagenhersteller (selektives Sintern oder Verschmelzen).....	12
Abbildung 5: Durchschnittliche Partikelgrößen ausgewählter Pulverherstellungsverfahren (WOLF et al. 2005).....	14
Abbildung 6: Wasser- (a) und gasverdüstes (b) Pulver(SURI et al. 2003).....	15
Abbildung 7: Emissionsstromdichte verschiedener Materialien bei unterschiedlichen Kathodentemperaturen (DOBENECK et al. 2001) .....	19
Abbildung 8: Dioden- (links) und Triodensystem (rechts) zur Strahlerzeugung	20
Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau einer Elektronenstrahlanlage (DOBENECK et al. 2001).....	22
Abbildung 10: Physikalische Effekte beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf ein Werkstück (LONGERICH et al. 2006, SCHILLER et al. 1977)..	23
Abbildung 11: Tiefschweißeffekt bei einem Aluminium-Werkstück, Nahttiefe 150 mm (DOBENECK 2006a) .....	24
Abbildung 12: Einsatzgebiete der Elektronenstrahltechnologie in Abhängigkeit von der Leistungsdichte (KLOCKE & KÖNIG 2006) .....	25
Abbildung 13: Elektronenstrahlanlagen, links: Schleusen-Shuttle-Anlage für die Fertigung von Sensoren bei Bosch, rechts: Großkammeranlage für das Schweißen großer Bauteile (Quelle: pro-beam).....	26
Abbildung 14: Struktur des Münchener Vorgehensmodells (MVM, LINDEMANN 2005).....	29
Abbildung 15: Anforderungen und Erfüllungsgrad von generativen Verfahren.	36

## 9 Anhang

### 9.1 Anforderungsliste Pulverauftrag

Anforderungen an den Pulverauftragsmechanismus mit Festforderungen (FF), Mindestforderungen (MF) und Wunschforderungen (W)

lfd.Nr	Anforderung	Zahlenwert mit Toleranz	Art der Anforderung
<b>I</b>	<b>Geometrie</b>		
1	max. Baugröße	1000 x 500 x 500 mm <sup>3</sup>	FF
2	Anordnung	bewegliche Teile vor Hitze und Pulver geschützt	MF
3	Sinterfläche	ca. 100 <sup>2</sup> mm <sup>2</sup>	MF
4	Sintervolumen	ca. 100 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	MF
5	Tiefe der Sinterbereichs	ca. 100 mm	MF
<b>II</b>	<b>Kinematik</b>		
1	Bewegungsart von absenkbarer Plattform und Auftrageinheit	spielfrei	W
3	Geschwindigkeit	Plattform ca. 0,15 mm/s Rakel ca. 300 mm/min	W W
4	Beschleunigung	keine Bewegung des Pulvers zulässig kein Verschieben bereits versinterter Schichten	FF
<b>III</b>	<b>Kräfte</b>	Vorhandene Motoren einsetzen, u. U. noch weitere Motoren verwendbar	MF
<b>IV</b>	<b>Energie</b>		
1	Motoren	vorhandene Anschlüsse	MF
2	Elektronenstrahl	100 kV Beschleunigungsspannung 1-10 kW Leistung	FF
<b>V</b>	<b>Stoff</b>		
1	Werkstoff	hitzebeständig bis ca. 1200° C	FF
2	Physikalische Eigenschaften	geringe Wärmeausdehnung wenig Verzug nicht magnetisch vakuumtechnisch geeignet	W W FF FF
<b>VI</b>	<b>Signale</b>		
1	Betriebsgeräte	vorhandene Steuerung der Anlage (Sinumerik 840 D)	FF

### 9.6 Referenzierte Firmen

3D-Systems Corporation  
333 Three D Systems Circle  
Rock Hill, SC 29730, USA  
[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)

ATZ Entwicklungszentrum  
Kropfersrichter Straße 6-10  
D-92237 Sulzbach-Rosenberg  
[www.atz.de](http://www.atz.de)

Concept Laser GmbH  
An der Zeil 8  
96215 Lichtenfels  
[www.concept-laser.de](http://www.concept-laser.de)

EOS GmbH  
Robert-Stirling-Ring 1  
82152 Krailling bei München  
[www.eos-gmbh.info](http://www.eos-gmbh.info)

Marcam Engineering GmbH  
Fahrenheitstrasse 1  
D-28359 Bremen  
[www.marcam.de](http://www.marcam.de)

Optomec Advanced Applications  
1000 Westgate Dr.  
Saint Paul, MN 55114, USA  
[www.optomec.com](http://www.optomec.com)

pro beam AG & Co. KGaA  
Behringstraße 6  
82152 Planegg bei München  
[www.pro-beam.de](http://www.pro-beam.de)

Thermosensorik GmbH  
Am Weichselgarten 7  
91058 Erlangen  
[www.thermosensorik.de](http://www.thermosensorik.de)

Arcam AB (publ.)  
Kroksläatts Fabriker 30  
SE-431 37 Mölndal, Sweden  
[www.arcam.com](http://www.arcam.com)

CADFEM GmbH  
Marktplatz 2  
85567 Grafing b. München  
[www.cadfem.de](http://www.cadfem.de)

Deskartes Oy.  
Särkiniementie 5 C 13  
00210 Helsinki, Finnland  
[www.deskartes.com](http://www.deskartes.com)

HEK GmbH  
Kaninchenborn 24-28  
23560 Luebeck, Germany  
[www.mcp-group.de](http://www.mcp-group.de)

Materialise  
Technologielaan 15  
3001 Leuven, Belgien  
[www.materialise.com](http://www.materialise.com)

Phenix systems  
29 rue Georges Besse  
63100 Clermont Ferrand, Frankreich  
[www.phenix-systems.com](http://www.phenix-systems.com)

Siemens Aktiengesellschaft  
Wittelsbacherplatz 2  
80333 München  
[www.siemens.de](http://www.siemens.de)

TRUMPF GmbH + Co. KG  
Johann-Maus-Straße 2  
71254 Ditzingen  
[www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
**Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel**  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
**Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen**  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
**Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern**  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
**Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen**  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
**Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen**  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
**Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung**  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*  
**Schneiderodierte Oberflächen**  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
**Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen**  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
**Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung**  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
**Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen**  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
**Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse**  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
**Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze**  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
**Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion**  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*  
**Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme**  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
**Klipsmontage mit Industrierobotern**  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
**Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung**  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
**Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems**  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
**Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung**  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
**Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme**  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
**Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen**  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
**Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen**  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
**Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung**  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
**Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems**  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
**Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage**  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Witba, P.*  
**Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik**  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
**Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung**  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
**Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie**  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2



- 28 *Teich, K.*  
**Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
**Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
**Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
**Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
**Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*  
**3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*  
**Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*  
**Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
**Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*  
**Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
**Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender  
Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-  
Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur  
Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/ICAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und  
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur  
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten  
Produktionsregelung in der Einzel- und  
Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer  
flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in  
der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von  
Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die  
Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanov, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von  
Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen  
Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der  
Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in  
flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung  
und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer  
Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in  
Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für  
rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in  
mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# 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@utz.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 ins 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 Dichtungsmontage 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 - Flexibel 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 3-89675-069-0
- 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 Kapselfur 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 · Schlank 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

# Forschungsberichte iw b

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

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

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnernverbänden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Hohn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer  
**Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6



- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräseneter Montagesysteme**  
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinge  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
 2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
 2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
 2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile**  
 2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen**  
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage**  
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis  
**Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains**  
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl  
**Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung**  
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig  
**Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten**  
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck  
**Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie**  
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier  
**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**  
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl  
**Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**  
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6