

Technische Universität München
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim
Elektronenstrahlschmelzen (EBM)**

Dipl.-Ing. (Univ.)

Markus Kahnert

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. H.-J. Kaltenbach

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. G. Witt
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 29.08.2013 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.01.2014
angenommen.

Markus Kahnert

**Scanstrategien zur verbesserten
Prozessführung beim
Elektronenstrahlschmelzen (EBM)**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 293

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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 · 2015

ISBN 978-3-8316-4416-2

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Motivation der Arbeit.....	4
1.2.1	Das generative Verfahrensprinzip	4
1.2.2	Entwicklung, Abgrenzung und kommerzieller Einsatz generativer Fertigungsverfahren.....	5
1.2.3	Potenziale generativer Fertigungsverfahren	7
1.2.4	Metallische Werkstoffe in der generativen Fertigung	8
1.2.5	Einfluss von Scanstrategien auf die generative Fertigung	9
1.3	Zusammenfassung.....	11
1.4	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	13
1.4.1	Allgemeines	13
1.4.2	Zielsetzung.....	13
1.4.3	Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	14
2	Stand der Forschung und Technik	17
2.1	Allgemeines	17
2.2	Definitionen	17
2.2.1	Allgemeines	17
2.2.2	Scanstrategie	18
2.2.3	Übersicht der Parameter einer Scanstrategie	20
2.3	Bindungsmechanismen beim selektiven Verfestigen	21
2.4	Aufbau und Funktion von Anlagen für die generative Fertigung.....	24
2.4.1	Aufbau und Funktion.....	24

2.4.2	Energiequellen für das selektive Aufschmelzen	25
2.4.3	Systeme zur Energieführung	26
2.5	Analyse von Scanstrategien	27
2.5.1	Ausgangssituation	27
2.5.2	Bewertete Scanstrategien	28
2.5.2.1	Analyse verschiedener Scanmuster	28
2.5.2.2	Einfluss von Prozessparametern auf die strahlbasierte generative Fertigung.....	34
2.5.3	Zusammenfassung	36
2.6	Der Elektronenstrahl	38
2.6.1	Allgemeines	38
2.6.2	Funktionsprinzip der Strahlerzeugung und -formung	39
2.6.3	Prozesse in metallischen Werkstoffen.....	41
2.6.4	Parameter für das Elektronenstrahlschmelzen	43
2.6.5	Potenziale des Elektronenstrahls in Bezug auf das EBM	44
2.7	Das Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	46
2.7.1	Allgemeines	46
2.7.2	Physikalische Effekte	46
2.7.3	Prozessschritte beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	48
2.7.4	Der Elektronenstrahl in der generativen Fertigung	49
2.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für das EBM	51
3	Beschreibungsmethodik für Scanstrategien	53
3.1	Allgemeines	53
3.2	Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien	54
3.2.1	Allgemeines	54

3.2.2	Anforderungen an eine Methode zur Beschreibung von Scanstrategien	56
3.2.3	Elemente zur Beschreibung von Scanstrategien.....	59
3.2.3.1	Informationsebenen für die Beschreibung von Scanstrategien	59
3.2.3.2	Beschreibung von Scanstrategieelementen.....	59
3.2.3.3	Verknüpfung der Elemente.....	60
3.2.4	Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens	61
3.2.5	Exemplarische Umsetzung	65
3.2.6	Darstellung des potenziellen Lösungsraumes	67
3.2.7	Vorgehensweisen zur Einschränkung des Lösungsraums	68
3.2.7.1	Allgemeines	68
3.2.7.2	Schranken zur Lösungsraumeinschränkung	69
3.2.7.3	Schritte zur Bewertung von Scanstrategien	70
3.3	Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation.....	73
3.3.1	Installierte Anlagentechnik.....	73
3.3.2	Modifikationen an der Anlagentechnik	75
3.3.2.1	Allgemeines	75
3.3.2.2	Anforderungen	76
3.3.2.3	Anlagenerweiterungen	78
3.3.2.4	Integration eines Auftragsmechanismus in die Bearbeitungskammer	80
3.3.2.5	Anlagensteuerung	81
3.3.3	Resultierender modularer Aufbau	86
3.4	Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien	87

3.4.1	Allgemeines	87
3.4.2	Anforderungen und Randbedingungen	88
3.4.3	Softwaretool	91
3.4.3.1	Allgemeines	91
3.4.3.2	Struktur und Aufbau des Softwaretools	91
3.4.3.3	Benutzeroberfläche	93
3.4.3.4	Aufbau der Datei für die Strahlableitung	96
3.4.4	Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens	97
3.4.5	Einbindung in den Fertigungsablauf	97
3.5	Zusammenfassung	99
4	Analyse und Bewertung von Scanstrategien.....	101
4.1	Allgemeines	101
4.2	Schranke 1: Einsatz von Expertenwissen und Literaturquellen	103
4.2.1	Vorgehen	103
4.2.2	Bewertung der Scanstrategien hinsichtlich exemplarischer Zielgrößen.....	104
4.2.3	Zusammenfassung	106
4.3	Schranke 2: Simulationsuntersuchungen.....	107
4.3.1	Allgemeines.....	107
4.3.2	Simulationsmodell.....	108
4.3.3	Ziele.....	110
4.3.4	Vorgehensweise und untersuchte Parameter.....	111
4.3.5	Auswirkungen der Energieeinbringung.....	113
4.3.6	Steigerung der Prozessqualität durch adaptive Scanstrategien .	115
4.3.7	Validierung der Effekte durch Prozessuntersuchungen	118

4.3.8 Zusammenfassung	120
4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität	121
4.4.1 Allgemeines	121
4.4.2 Ziel der Untersuchungen und Versuchsplanung.....	121
4.4.3 Versuchsdurchführung zur Untersuchung unterschiedlicher Scanmuster.....	124
4.4.4 Analyse der durchgeführten Versuche	125
4.4.5 Zusammenfassung	135
4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter	138
4.5.1 Allgemeines	138
4.5.2 Oberflächengüte.....	138
4.5.3 Porenbildung.....	141
4.5.4 Schichtverbindung	144
4.5.5 Zusammenfassung	146
4.6 Zusammenfassung.....	147
5 Auswahl und Umsetzung von Scanstrategien.....	149
5.1 Allgemeines	149
5.2 Auswahl und Definition einer Scanstrategie.....	150
5.2.1 Mögliche Scanstrategien in der Elektronenstrahl- Universalkammeranlage	150
5.2.2 Bestimmung der Zielgrößen mit ihren Gewichtungsfaktoren ...	151
5.2.3 Bewertung und Auswahl möglicher Scanstrategien.....	152
5.3 Herstellung eines Demonstratorbauteils	154
5.4 Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens.....	158

6 Zusammenfassung und Ausblick	161
6.1 Zusammenfassung	161
6.2 Ausblick	163
7 Literaturverzeichnis	165
8 Anhang.....	181
8.1 Diagramm zur Beschreibung von Scanstrategien.....	181
8.2 Beispiel einer MiniMod-Datei	182
8.3 NC-Programme.....	183
8.4 Versuchsübersicht des Abschnitts 4.4.3	188
8.5 Versuchsübersicht der Abschnitte 4.5.2 und 4.5.4	190
8.6 Versuchsübersicht des Abschnitts 5.3	192
8.7 In der Arbeit genannte Firmen.....	193

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

„Der globale Wettbewerb ist vornehmlich ein Innovationswettbewerb.“ (BULLINGER 2010, S. 161) In diesem Zusammenhang führt auch MILBERG (2004, S. 13) aus, dass „ohne innovatives Wachstum eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft nicht denkbar“ sei. Dem Ökonomen Joseph Schumpeter zufolge ist hierbei die Prozessinnovation eine von fünf grundsätzlichen Möglichkeiten, um im Zusammenhang mit der Produktion stehende Inventionen erfolgreich am Markt durchzusetzen. (SCHUMPETER 1926)

Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass insbesondere aktuelle Marktentwicklungen immer häufiger eine Individualisierung der Produkte zur Folge haben. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass die hohe Qualität eines Produktes als selbstverständlich vorausgesetzt wird, wobei der Trend weg vom Massenprodukt hin zum individuellen Produkt geht. Hierfür sind etablierte Herstellungsprozesse nicht immer geeignet (HOFFMANN ET AL. 2010). Auch ist in diesem Zusammenhang die hohe Dynamik der Prozesse zu nennen. Dabei werden durch diese aktuellen Marktentwicklungen produzierende Unternehmen verstärkt mit Randbedingungen hinsichtlich Zeit, Kosten und Konkurrenz sowie sich wandelnden Entwicklungsaufgaben konfrontiert (LINDEMANN & LANGER 2009). Daher wird es immer schwieriger, eine flexible Fertigung unter Berücksichtigung von Kundenwünschen sowie unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sicherzustellen. Eine mögliche Lösung hierfür stellt die Anwendung von schichtweise arbeitenden, sogenannten generativen Fertigungsverfahren dar (GEBHARDT 2007). Durch Eigenschaften wie eine werkzeuglose Fertigung oder das Potenzial, nahezu beliebige Geometrien unabhängig vom Grad der jeweiligen Komplexität zu fertigen, wird die Relevanz generativer Fertigungsverfahren, auch durch den beginnenden Einsatz für Serienanwendungen, zukünftig stark zunehmen (WITT 2006).

Die generative Fertigung hat sich seit Anfang der 1990er-Jahre in den unterschiedlichsten Bereichen der Produktionstechnik etabliert. War es zu Beginn noch „exotisch“ und aufsehenerregend, innerhalb der Produktentwicklung schichtweise gefertigte Bauteile als Modelle einzusetzen, das sogenannte Rapid Prototyping, so entspricht es heute dem Standard, Produkteigenschaften auf diese Weise frühzeitig und anschaulich zu überprüfen. Dabei besitzen schichtweise arbeitende Fertigungsverfahren vor allem das Potenzial, Bauteile direkt, d. h.

1.1 Allgemeines

ohne weitere Programmierschritte aus CAD-Daten aufzubauen. Hierdurch ist die aufwandsarme, kostengünstige und werkzeuglose Herstellung auch komplexer Bauteile in einem Prozessschritt möglich. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren verändern sich die Kosten nicht in Abhängigkeit der Komplexität (ZÄH ET AL. 2006). Es kann so ein Kosten- wie auch ein Zeitvorteil gegenüber bisher genutzten Technologien durch den Einsatz generativer Verfahren erreicht werden. REITHOFER (2010) beschreibt im Rahmen eines Vortrags das Potenzial dieser Verfahren, Investitionen bspw. für Variantenwerkzeuge und Produktionsanlagen zu reduzieren. Insbesondere eignen sie sich, um komplexe Bauteile bzw. Bestandteile eines Bauteils wirtschaftlich herzustellen. Hierbei sind beispielhaft ein Bauteil mit Gitterstrukturen, Formeinsätze mit angepassten Kühlkanälen oder Dentalimplantate zu nennen (siehe Abbildung 1).



Quelle: Arcam



Quelle: Trumpf



Quelle: MTT Technologies

Abbildung 1: Bauteil mit Gitterstruktur (links, ARCAM 2011A), Formeinsatz mit angepasstem Kühlkanal (Mitte, BUCHFINK & LEIBINGER-KAMMÜLLER 2006), Dentalimplantat (rechts, MTT TECHNOLOGIES 2011)

Neben der Fertigung von Modellen aus Kunststoff im Rapid Prototyping (RP) etablierte sich zunehmend auch der Einsatz metallischer Werkstoffe bei generativen Verfahren zur schnellen Produktion von Werkzeugen (Rapid Tooling; RT). Die weitere Entwicklung wurde durch die direkte Herstellung von individualisierten Einzelteilen oder Kleinserien aus Metall und Kunststoff (Rapid Manufacturing; RM) bestimmt. Insbesondere die Potenziale und der zunehmende technologische Fortschritt der Rapid-Technologien bewirken einen solchen Trend. Dieser spiegelt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, auch in den Verkaufszahlen generativ arbeitender Anlagen wider. Diese sind ein Indikator für die zunehmende Relevanz generativer Fertigung in der Produktionstechnik.

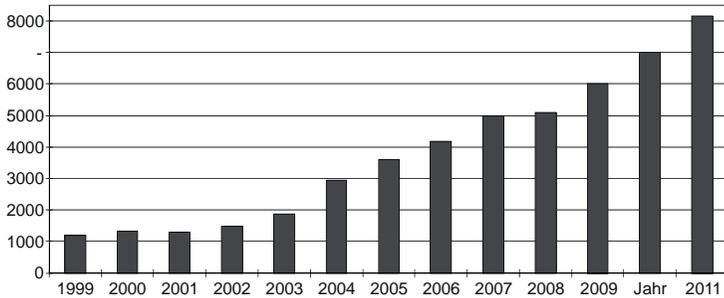


Abbildung 2: Anzahl verkaufter Anlagen für die generative Fertigung (NACH WOHLERS 2010)

WOHLERS (2010) unterstreicht dies, wie in Abbildung 3 dargestellt, indem er die zukünftige Entwicklung für die kundenspezifische Produktion und die Kleinserienfertigung unter der Annahme einer baldigen Integration der generativen Fertigungsverfahren in die industrielle Fertigungsumgebung antizipiert. Dabei führt er aus: „Rapid-Manufacturing-Anwendungen wachsen [...] Mit der steigenden Anzahl an Anwendungen wird die Entwicklung neuer Systeme stattfinden, welche schneller sind und höhere Produktionsvolumina erreichen können [...]“

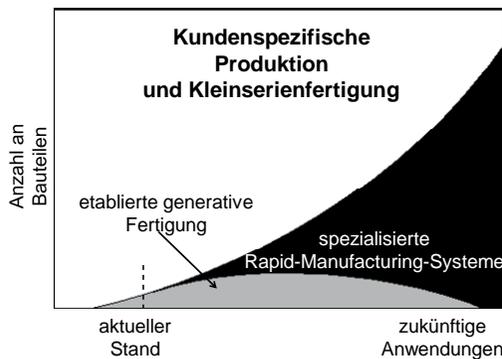


Abbildung 3: Zukünftige Entwicklung der kundenspezifischen Produktion und der Kleinserienfertigung (WOHLERS 2010)

Daher wird zukünftig die Anzahl generativ gefertigter Bauteile innerhalb der kundenindividuellen Fertigung stark zunehmen. Hierfür ist die schnelle und optimierte Fertigung ausschlaggebend. Für etablierte Systeme zur generativen Bauteilherstellung mithilfe des Laserstrahls wird es zukünftig immer schwieriger,

1.2 Motivation der Arbeit

die steigenden Anforderungen an die schichtweise Fertigung komplett zu erfüllen. Ein möglicher Ansatz für die Herstellung hochwertiger metallischer Bauteile ist, wie im Folgenden beschrieben, die Anwendung des Elektronenstrahls als Energiequelle bei der schichtweisen Verarbeitung metallischer Pulversysteme.

1.2 Motivation der Arbeit

1.2.1 Das generative Verfahrensprinzip

Im Gegensatz zu konventionellen bzw. etablierten Fertigungsverfahren erzeugen generative Fertigungsverfahren physische Gegenstände durch inkrementelles, meist schichtweises Hinzufügen von Material (MÜLLER & MÜLLER 2002). Dabei wird ein Ausgangsmaterial durch das lokale Einbringen von Energie Schicht für Schicht verfestigt und eine Verbindung der Schichten untereinander hergestellt. Es können flüssige, pulverförmige oder feste Werkstoffe genutzt werden (ZÄH ET AL. 2006). Als Basis dient immer eine 3D-CAD-Datei mit den Informationen über die Bauteilgestalt und seine Begrenzungen. Dieses Prinzip unterscheidet sich daher von den bekannten Verfahrensgruppen wie Urformen, Umformen, Trennen oder Fügen. Neben generativen Fertigungsverfahren (VDI 3404 2009) sind weitere gebräuchliche Bezeichnungen dieser Verfahren bspw. der Begriff „schichtweise Fertigung“ oder „additive Fertigung“ (ZÄH ET AL. 2006, VDI 3505 2012). Im anglo-amerikanischen Sprachraum haben sich zudem noch die Bezeichnungen Layer Manufacturing (LM) oder Additive Layer Manufacturing (ALM) etabliert (GRIMM 2004). In Abbildung 4 wird die grundlegende Prozesskette exemplarisch dargestellt.

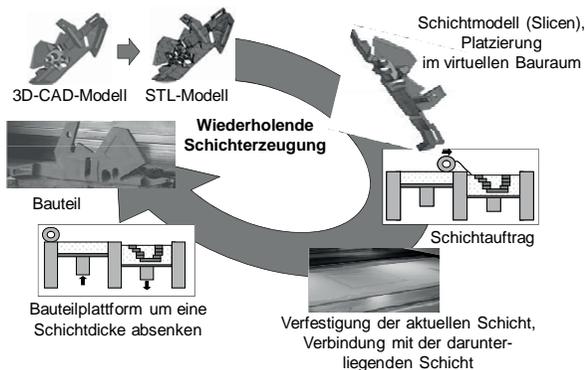


Abbildung 4: Prozesskette der generativen Bauteilherstellung (MEINDL 2005)

Im ersten Prozessschritt, der Triangulation, findet zunächst eine Annäherung aller Oberflächen des als Ausgangsbasis dienenden CAD-Volumenmodells durch Dreiecke statt. Der Datensatz wird hierbei in eine plattformneutrale STL-Datei zur Bauteilbeschreibung überführt. Diese Datei stellt den Ausgangspunkt für den *Slice*-Prozess dar. Hier wird das Modell in einzelne Schichten zerlegt und die jeweiligen Geometrieinformationen für den Bauprozess werden erstellt. In der anschließenden Bauprozessvorbereitung werden die STL-Datensätze virtuell im Bauraum der Maschine platziert. Das Anbringen von notwendigen Stützkonstruktionen bei Überhängen und Hinterschneidungen des Bauteils findet ebenfalls hier statt. Auch werden Prozessparameter wie die Ablenkgeschwindigkeiten während des Bauprozesses oder die Bauraumtemperatur festgelegt. Das Aufbringen der Werkstoffschichten wird durch einen anlagenspezifischen Mechanismus vorgenommen. Das selektive Verbinden der Werkstoffschichten bzw. der jeweiligen Bereiche führt meist eine punktförmige Energiequelle durch. Anschließend senkt sich die Bauplatte mit dem bereits gebauten Anteil um eine Schichtstärke ab. Bevor der nächste Querschnitt verfestigt wird, muss eine neue Werkstoffschicht aufgetragen werden. Diese Schritte wiederholen sich bis zur Fertigstellung des Bauteils. Abschließend kann dieses entnommen werden. Je nach Verfahrensprinzip können sich noch verschiedene Nachbearbeitungsschritte anschließen.

1.2.2 Entwicklung, Abgrenzung und kommerzieller Einsatz generativer Fertigungsverfahren

Da die generativen Verfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien neue Fertigungsprinzipien darstellen, gestaltet sich die Zuordnung in eine Untergruppe der DIN 8580 (2003) für Fertigungsverfahren schwierig. Ein bestehender Ansatz ist hierbei die Einordnung als urformende Verfahren, da die Verfahrensgruppendifinition „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen eines Zusammenhaltes“ (DIN 8580 2003) am ehesten dem vorgestellten Verfahrensablauf entspricht (FICHTNER 2009). Hier ist allerdings die Definition neuer Untergruppen zur Unterscheidung der Verfahren nötig, um den einheitlichen Sprachgebrauch und eine klare Differenzierung der Verfahren zu ermöglichen.

Ferner hat sich die Einteilung nach den verschiedenen Verfahrensprinzipien als eine gebräuchliche Methode erwiesen. In Tabelle 1 sind die fünf grundlegenden Verfahrensprinzipien mit jeweils einem Beispiel aufgeführt (ZÄH ET AL. 2006).

1.2 Motivation der Arbeit

Verfahrensgruppe	Prinzip	Beispiel
UV-Aushärtung	Lokal induzierte Copolymerisation	Stereolithographie (SLA)
Sintern/ Schmelzen	Lokales Aufschmelzen von Pulverwerkstoffen	Selektives Lasersintern (SLS)
Laminieren	Ausschneiden und Fügen von Platten	Laminated Object Manufacturing (LOM)
Extrudieren	Aufbringen von geschmolzenen Polymeren mittels Düsen	Fused Deposition Modelling (FDM)
Bindertechnologie	Einbringen von Bindemitteln in das Pulverbett	3D-Printing

Tabelle 1: Fünf grundlegende Verfahrensprinzipien der generativen Fertigung (ZÄH ET AL. 2006)

Das Prinzip der schichtweisen Herstellung von Bauteilen wurde erstmals von Blanter beschrieben. In seiner 1892 veröffentlichten Patentschrift (SCHUTZRECHT US473901A 1892) schlägt er die Herstellung von dreidimensionalen topografischen Karten durch das Ausschneiden und Verkleben von Wachsplatten vor. Dieser Ablauf stellt auch heute noch die Grundlage für verschiedene Fertigungsverfahren dar. Beispielhaft sind hierfür die Verfahren *Laminated Object Manufacturing* (LOM; SEIDEL 2007) oder *Metal Laminated Tooling* (MELATO; TECHEL ET AL. 2004) zu nennen.

Ferner berichtet u. a. Swainson im SCHUTZRECHT US4041476A (1977) über die lokale Aushärtung eines fotoreaktiven Polymers für die Bauteilherstellung. Bei dem von ihm dargelegten Prozessablauf wird die Aushärtungsreaktion in einem Kreuzungspunkt zweier überlagerter Laserstrahlen ausgelöst. Da für die Positionsveränderung des Kreuzungspunktes die beiden Laser bewegt werden und die Bauplattform fixiert ist, kann nur eingeschränkt von einem schichtweise arbeitenden Verfahren gesprochen werden (ZÄH ET AL. 2006). Ein auf dem Prinzip des lokalen Aushärtens eines Polymers basierendes Fertigungssystem wurde erstmals 1988 von der Firma 3D Systems angeboten und verkauft (BEAMAN 2001). Auf einer in z-Richtung beweglichen Bauplattform werden die Bauteilquerschnitte selektiv belichtet und untereinander verbunden. Die steigende Leistungsfähigkeit von Computersystemen ermöglichte zudem die direkte Umsetzung von 3D-CAD-Daten eines Volumenmodells in eine Bauteilherstellung.

Das selektive Verfestigen von pulverförmigen Werkstoffen mittels fokussierter Laserstrahlung zur Erzeugung komplexer Bauteile stellte Deckard im SCHUTZ-

RECHT US4863538A (1989) vor. Zunächst beschränkten sich die Werkstoffe auf thermoplastische Kunststoffe, wobei in der Folge auch metallische und keramische Werkstoffe (GRIMM 2004) genutzt wurden. Anlagen dieses Verfahrensprinzips werden von verschiedenen Herstellern vertrieben, wobei sich die Namensgebungen u. a. aus patentrechtlichen Gründen oder zur Abgrenzung von Wettbewerbern sehr stark unterscheiden. Das selektive Verfestigen von Pulverwerkstoffen wird je nach Hersteller z. B. als Direktes Metall-Lasersintern (DMLS) – Fa. EOS GmbH (STOTKO 2005), LaserCusing – Fa. ConceptLaser GmbH (EDELHANN 2005) oder Selektive Laser Melting (SLM) – Fa. SLM Solutions GmbH (EISEN & WITT 2007) bezeichnet. Gleich ist bei allen genannten Verfahren der Einsatz eines Laserstrahls als Energiequelle zum lokalen Aufschmelzen der Pulverwerkstoffe. Jedoch wiesen die Verfahren zu Beginn u. a. oftmals noch große Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Dichte des erzeugten Gefüges, der Eigenspannungen oder der Baugeschwindigkeit auf (GEBHARDT 2007). Teilweise konnten diese durch zielgerichtete Optimierungen überwunden werden. Einen weiteren deutlichen Fortschritt ermöglichte der Einsatz des Elektronenstrahls als neuartige Energiequelle. Durch die deutlich höhere Leistungsdichte, d. h. die Strahlleistung bezogen auf die Fläche des Strahlfokus, oder die Potenziale einer schnellen und flexiblen Strahlablenkung mittels elektromagnetischer Spulen kann das Spektrum möglicher metallischer Legierungen erweitert und es können die Prozesszeiten reduziert werden. Diesen Einsatz der Elektronenstrahltechnologie als neuartige Energiequelle zum selektiven Verfestigen eines metallischen Pulvers beschreibt Larson im SCHUTZRECHT WO1994026446A1 (1994). Daraus ging im Jahr 1997 das Unternehmen ARCAM hervor, das gegenwärtig die elektronenstrahlbasierten Anlagen EBM S12 und A2 zum Electron Beam Melting (EBM) vertreibt (ARCAM 2011B). Diese werden in Forschungsinstitutionen für die Verfahrensentwicklung, aber auch bereits in Bereichen der Luft- und Raumfahrt (GOOD 2007) sowie der Medizintechnik (HEINL ET AL. 2007) eingesetzt.

1.2.3 Potenziale generativer Fertigungsverfahren

Durch das Potenzial generativer Fertigungsverfahren, Bauteile direkt aus CAD-Daten aufzubauen, ist eine aufwandsarme und kostengünstige Herstellung auch komplexer Bauteile mittels einer werkzeuglosen Fertigung in einem Prozessschritt möglich. In Abbildung 5 ist nach SIGL (2003) zu erkennen, dass konventionelle Verfahren zwar bei einfachen Bauteilen Kostenvorteile haben, die Kosten bei generativen Verfahren aber auch bei steigender Komplexität näherungsweise konstant bleiben.

1.2 Motivation der Arbeit

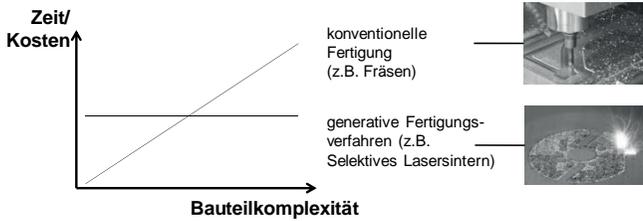


Abbildung 5: Vergleich der Herstellkosten in Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität (SIGL 2003)

Auch können durch die geometrischen Freiheiten bei den generativen Fertigungsverfahren Bauteilfunktionen realisiert werden, die bei konventionellen Fertigungsverfahren nicht bzw. nur mit einem extrem hohen Aufwand erreichbar sind. Beispielsweise ist es möglich, Überhänge und komplexe innere Strukturen in Bauteilen vorzusehen. Als einzige geometrische Restriktion ist die Entfernbarkeit des nicht verfestigten Werkstoffs aus den Hohlräumen sowie der ggf. erforderlichen Stützstrukturen zu beachten (GRIMM 2004). So sind, wie in Abbildung 6 links dargestellt, Baugruppen in einem Schritt, also ohne Montage, aber mit Gelenken und Bewegungsfunktionen verwirklichtbar (STOTKO 2005). Eine weitere erreichbare Funktion ist die Integration von konturnahen Kühlkanälen bei Formeinsätzen (siehe Abbildung 6 rechts) (EDELMAANN 2005). Durch die angepasste Formgebung kann die Wärmeenergie deutlich schneller als bei geraden Kühlmittelbohrungen aus den Bauteilen abgeführt werden. Hieraus ergibt sich eine Verringerung der Zykluszeiten bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen mittels Spritzgießen.

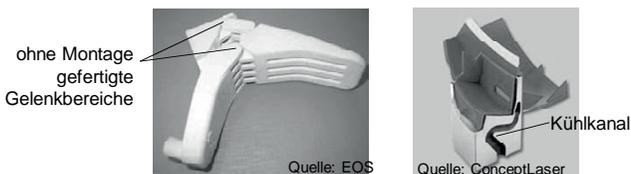


Abbildung 6: Integration von Gelenken in ein Bauteil (links) und konturnaher Kühlkanal (rechts)

1.2.4 Metallische Werkstoffe in der generativen Fertigung

Die Verfahrensentwicklung des selektiven Verfestigens pulverförmiger Werkstoffe startete, wie beschrieben, Ende der 1980er-Jahre mit der Konzeption einer

Anlage zum lokalen Aufschmelzen von Kunststoffen mittels eines Lasers, dem sogenannten *Selective Laser Sintering* (SLS) (DECKARD 1989). Seither erfolgte die Qualifikation unterschiedlicher Pulvermaterialien für die generative Bauteilherstellung. Unter anderem gelang es, Bauteile aus weiteren Kunststoffen (GEBHARDT 2007), metallischen Legierungen (ZÄH ET AL. 2006) oder auch keramischen Werkstoffen (KLOCKE & ADER 2003) in den verschiedenen Anlagentypen zu fertigen.

Insbesondere entstanden bereits kurz nach der Qualifikation von pulverförmigen Kunststoffen für das selektive Verfestigen Bestrebungen, auch *metallische Pulver* zu komplexen Bauteilen generativ aufzubauen. Jedoch konnten z. B. stahlbasierte Pulver aufgrund der in der damaligen Anlagentechnik geringen Laserleistungen nicht direkt verfestigt werden und wiesen daher eine begrenzte Bauteilfestigkeit auf. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde als ein Lösungsansatz ein niedrigschmelzender Legierungsanteil in das Pulver integriert, welcher den primären Werkstoffzusammenhalt sicherstellt (NIEBLING 2005). Eine weitere Verfahrensmöglichkeit ist der Einsatz eines kunststoffummantelten Metallpulvers, wobei erst in einem zweiten Schritt, dem Ofenprozess, der metallische Zusammenhalt der Pulverpartikel geschaffen und die entstehende Metallmatrix mit Bronze infiltriert wird (SEEFRIED 2005).

In der Folge gelang es u. a. durch steigende Laserleistungen, auch Pulver verschiedener Legierungen direkt, d. h. ohne zusätzlichen Werkstoff oder zweiten Prozessschritt, zu verfestigen. Aktuell sind für laserstrahlbasierte Verfahren Werkstoffe aus unterschiedlichsten Gruppen verfügbar. Bei der Anwendung dominieren insbesondere verschiedene Stähle. Da die jeweiligen Hersteller die Legierungen meist mit individuellen Marktnamen versehen, ist ein direkter Vergleich nur sehr begrenzt möglich.

1.2.5 Einfluss von Scanstrategien auf die generative Fertigung

Scanstrategien beeinflussen als wesentliches Merkmal die Qualität der herzustellenden Bauteile bei der schichtweisen Fertigung mit einer punktförmigen Energiequelle (MERCCELIS & KRUTH 2006). Beim selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe mittels Laser- oder Elektronenstrahlen müssen diese Aspekte berücksichtigt werden. Gemeinsam mit Strahlparametern wie der Leistung oder der Fokusslage haben daher die durch die Ablensysteme generierte geometrische Anordnung und der zeitliche Ablauf der Strahlableitwege einen entscheidenden Einfluss auf die Bauteilqualität. In Abbildung 7 ist hierzu die geometrische Abfolge grundlegender Scanstrategien aufgezeigt. Neben der Bauteilkontur ist die

1.2 Motivation der Arbeit

Füllung der Fläche mit angepassten Mustern, sogenannten *Hatches*, relevant. Beispielhaft ist hier der aktuelle Stand der Scanstrategien bzw. -muster von am Markt erhältlichen laserstrahlbasierten Anlagensystemen dargestellt, insbesondere der *x-Hatch*, der *y-Hatch*, der *xy-Hatch* und die Unterteilung in Schachbrettmuster. Aufgrund der zur Ablenkung des Laserstrahls genutzten Spiegelgalvanometer ergeben sich für Verfahren mit dieser Energiequelle Restriktionen hinsichtlich der Ablenkgeschwindigkeit und -genauigkeit, sodass für Flächen im jeweiligen Querschnitt nahezu ausschließlich lineare und parallele Ablenklinien eingesetzt werden.

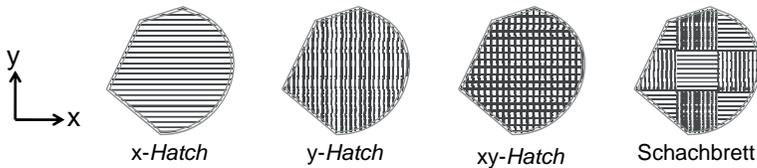


Abbildung 7: Scanstrategien in der generativen laserstrahlbasierten Fertigung zur selektiven Verfestigung pulverförmiger Werkstoffe

Der durch die Scanstrategie festgelegte zeitliche und geometrische Ablauf beim Eintrag der Strahlleistung in das Pulverbett zum Aufschmelzen des Werkstoffs verursacht thermisch induzierte Eigenspannungen in der jeweiligen Bauteilschicht (MERCCELIS & KRUTH 2006). Diese Eigenspannungen haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Strukturverhalten des gesamten Bauteils. Weitere augenscheinliche Qualitäts- und Prozessaspekte, welche durch die Scanstrategie beeinflusst werden, sind bspw. die Delamination, d. h. eine ungenügende Verbindung von Bauteilschichten untereinander, oder die Porenbildung auf der Schichtoberfläche und im Gefüge (ZAEH & KAHNERT 2009). Beide Effekte sind z. B. auf nicht an die Prozess- und Werkstoffanforderungen angepasste Temperaturen im Schmelzbadbereich zurückzuführen. Bei der Delamination reichen die Temperatur und die Energie nicht aus, um auch die darunterliegende Schicht an deren Oberfläche anzuschmelzen und mit der obersten Schicht zu verbinden. Porenbildung kann u. a. durch das nicht vollständige Aufschmelzen des Pulverwerkstoffes oder aber durch einen zu hohen Energieeintrag und eine infolgedessen zu hohe Prozesstemperatur verursacht werden (LUTZMANN 2011). Bei einer zu hohen Temperatur der Schmelze zieht diese sich aufgrund der Oberflächenspannung zusammen. Es entstehen freie Bereiche in der Werkstoffschicht, die auch nicht durch die darauf folgenden Schichten aufgefüllt werden. Die Temperatur wird durch die Strahlleistung sowie die zeitliche und geometrische Abfolge

des Energieeintrags, d. h. die Scanstrategie, maßgeblich beeinflusst. Dies verdeutlicht die Relevanz eines zeitlichen wie auch geometrisch optimierten Energieeintrags in die Pulverschicht für das Prozessergebnis. Dabei hängen die Eigenschaften und die erreichbaren Ablenkgeschwindigkeiten, Scannmuster und Richtungsänderungen stark von der jeweiligen Energiequelle und dem zugehörigen Ablenkensystem ab. Scanstrategien stellen daher ein zentrales Element des generativen Fertigungsprozesses dar.

In diesem Zusammenhang bietet die Elektronenstrahlablenkung mittels elektromagnetischer Spulen die notwendige Flexibilität, um auch komplexe Strahlablenkwege umzusetzen. Es ergibt sich somit ein hohes Maß an Freiheit für die Einbindung innovativer Scanstrategien und hoher Ablenkgeschwindigkeiten zur Optimierung der Prozessführung.

1.3 Zusammenfassung

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, erfüllen generative Fertigungsverfahren im Allgemeinen die Anforderung, auch komplexe Bauteile direkt und mit wenig Aufwand zu fertigen. Für hoch belastbare Bauteile erforderliche Kriterien, wie mechanische Festigkeiten, lassen sich in der generativen Fertigung nahezu ausschließlich durch den Einsatz von Metall erreichen. Daher verhilft u. a. eine hohe Baugeschwindigkeit, z. B. durch eine hohe Ablenkgeschwindigkeit oder eine hohe Leistungsdichte, zu einem wirtschaftlichen Einsatz dieser Verfahren. Jedoch sind insbesondere bei der Herstellung metallischer Werkstücke aktuell noch verschiedenste Restriktionen zu beachten.

Die selektive Verfestigung mittels laserstrahlbasierter Verfahren ist oftmals auf den Einsatz von Legierungen, welche eine geringe Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffs benötigen, beschränkt. Ebenso können mit dieser Energiequelle wegen der prozessbedingten Wechselwirkungen im Bereich des aufgeschmolzenen Werkstoffs im Vergleich zum Elektronenstrahl nur sehr begrenzt reaktive pulverförmige metallische Werkstoffe genutzt werden. Zudem bestehen aufgrund des physikalischen Aufbaus des Lasers und der zugehörigen Strahlablenkung mittels massebehafteter Spiegel-Scanner-Systeme für generative Fertigungsverfahren Einschränkungen hinsichtlich erreichbarer Ablenkgeschwindigkeiten und der Flexibilität in der Applizierung von Scanstrategien. Abbildung 8 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Energiequellen Laser- und Elektronenstrahl hinsichtlich verschiedener für die generative Fertigung relevanter Bewertungskriterien.

1.3 Zusammenfassung

Allgemein wurden bereits verschiedenste Ansätze und Systeme für die generative Fertigung metallischer Bauteile entwickelt; jedoch konnten diese bis jetzt noch nicht für einen breiteren Einsatz in der produzierenden Industrie qualifiziert werden. Restriktionen wie unzureichende Baugeschwindigkeiten, nicht geeignete Gefügeeigenschaften oder unzulängliche mechanische Kennwerte verhindern die umfangreichere Anwendung. Es gibt bereits verschiedene Ansätze, um dies auszugleichen: zum einen der Einsatz des Elektronenstrahls als Energiequelle, zum anderen die Optimierung von zu unzureichenden Bauteilqualitäten führenden, ursprünglich für die laserstrahlbasierte generative Fertigung mit Spiegelgalvanometern entwickelten Scanstrategien.

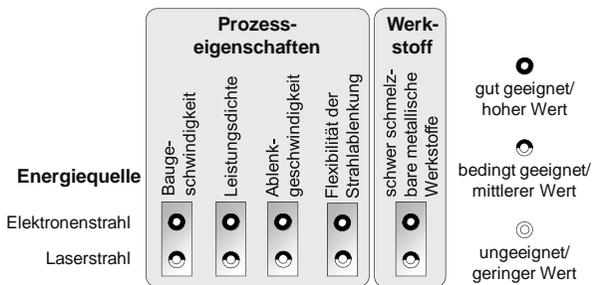


Abbildung 8: Übersicht der durch die Energiequellen bedingten Prozesseigenschaften und der anwendbaren Werkstoffgruppen

Es ist ersichtlich, dass der Elektronenstrahl ein hohes Potenzial besitzt, metallische Pulverwerkstoffe prozesssicher aufzuschmelzen. Bei weiteren Prozessparametern und -eigenschaften wie der Leistungsdichte, der Ablenk- oder der Baugeschwindigkeit können für die generative Fertigung beim Einsatz des Elektronenstrahls die höchsten Werte erzielt werden. Daneben erlaubt die Ablenkung mittels elektromagnetischer Spulen auch flexible Muster und Scanstrategien, die beim Laserstrahl aufgrund der Massenträgheit der Spiegelgalvanometer nicht realisierbar sind. Somit lassen sich durch den Einsatz des Elektronenstrahls die noch vorherrschenden Beschränkungen überwinden.

Trotzdem gibt es bis jetzt noch keine Bestrebungen, die Freiheit zur Implementierung neuer und flexibler Scanstrategien, welche die Elektronenstrahlableitung ermöglicht, zu nutzen. Um das Anwendungsfeld für generativ gefertigte metallische Bauteile zu erweitern, soll im Rahmen dieser Arbeit deren Herstellung mit dem Elektronenstrahl qualifiziert sowie die Applikation von innovativen Scanstrategien umgesetzt werden.

1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

1.4.1 Allgemeines

Wie einleitend erläutert, wird durch eine steigende Individualisierung und die damit einhergehenden niedrigen Stückzahlen einer Produktvariante das Rapid Manufacturing (RM) als Fertigungsstrategie weiter an Bedeutung gewinnen. Für die direkte Herstellung eines metallischen Bauteils bedeutet dies, die gewünschten Strukturen von Anfang an mit den späteren Serienwerkstoffen und den geforderten Werkstoffkennwerten herzustellen. Zu denjenigen generativen Fertigungsverfahren, welche das höchste Potenzial im Bereich der direkten Fertigung metallischer Bauteile bieten, zählt das selektive Verfestigen metallischer Pulverwerkstoffe mittels des Elektronenstrahls. Jedoch wird dieses Verfahren nur in Nischenbereichen (z. B. Medizintechnik, Rennsport usw.) mit spezifisch ausgelegten Fertigungsanlagen genutzt. In den folgenden Abschnitten werden darauf basierend eine Zielsetzung (Abschnitt 1.4.2) sowie die Vorgehensweise und die Struktur der Arbeit (Abschnitt 1.4.3) abgeleitet.

1.4.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, den Elektronenstrahl sowie die mit dem Elektronenstrahlablenksystem möglichen neuartigen Scanstrategien für die generative Fertigung zu qualifizieren. Dadurch soll eine Verbesserung gegenüber bestehenden, meist laserstrahlbasierten generativen Fertigungsverfahren hinsichtlich der Bauteilgüte und der Baugeschwindigkeit erzielt werden. Im Weiteren wird angestrebt, die Potenziale des Elektronenstrahls für eine zielgerichtete Auswahl und Verarbeitung von (Serien-)Werkstoffen zu nutzen. Mit diesen Maßnahmen sollen die Produktivität und die Qualität in der generativen Fertigung metallischer Bauteile gesteigert werden. Der Elektronenstrahl soll als flexibles Werkzeug und Energiequelle in der generativen Fertigung etabliert werden.

Zusammengefasst ist beabsichtigt, folgende Inhalte im Rahmen der Untersuchungen zu erarbeiten und umzusetzen:

- Qualifikation einer kommerziellen Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für die generative Fertigung
- Definition einer Methode zur Beschreibung, Bewertung und Auswahl unterschiedlicher Scanstrategien

1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

- Qualifikation unterschiedlicher Scanstrategien sowie deren Implementierung in der vorhandenen Steuerung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage, um
 - die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen,
 - Werkstoffe gezielt auswählen zu können,
 - die Produktivität und Qualität generativer Fertigungsverfahren zu erhöhen und
 - den Elektronenstrahl für die generative Fertigung in der Produktionstechnik etablieren zu können.

1.4.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Zielsetzung betrifft die Implementierung und Analyse von Scanstrategien direkt sowie die Neukonfiguration der Anlagentechnik indirekt. Dabei können bei der Weiterentwicklung und Optimierung von Fertigungsverfahren verschiedenste Methoden eingesetzt werden. MEINDL (2005) erläuterte hierfür bei generativen Fertigungsverfahren den exemplarischen Einsatz verschiedener Entwicklungsmethoden. Je nach Entwicklungsstufe des Verfahrens wurden z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder das *Design of Experiments* (DoE) vorgeschlagen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Entwicklungsmethoden nur jeweils einen Teilaspekt des jeweiligen Entwicklungsziels behandeln.

Da die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete übergeordnete Zielsetzung einer Qualifikation des Elektronenstrahls für die generative Fertigung, wie beschrieben, mehrere Teilaspekte wie die Modifikation einer Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und die Entwicklung einer Methodik zur Beschreibung von Scanstrategien inkl. einer Verfahrensweise zu deren Optimierung enthält, kann kein nur singuläre Aspekte betrachtendes Vorgehen genutzt werden. Stattdessen ist es essenziell, die verschiedenen Themen in einer übergreifenden Vorgehensweise zu integrieren. Ein effektives Verfahren hierzu ist der Problemlösungszyklus nach EHRENSPIEL (2003). Hierdurch können Methoden im Rahmen der Arbeit je nach Zeitpunkt zielgerichtet in die Entwicklung integriert und es kann ein Vorgehen zur Entwicklung und Analyse von Scanstrategien abgeleitet werden. Ferner ist die Selbstständigkeit der Vorgehensweise für die durchzuführenden Untersuchungen des Elektronenstrahlschmelzens vorteilhaft. Es soll also möglich sein, diese Untersuchungen auch auf die notwendigen Teilaspekte innerhalb der Bearbeitung anzuwenden.

In den folgenden Absätzen werden das Handlungsmuster des Problemlösungszyklus sowie die Inhalte und das Vorgehen für die drei Hauptschritte kurz umrissen.

Ziel klären

In der Phase *Ziel klären* sollen zunächst die Voraussetzungen für die Bearbeitung der Entwicklungsaufgabe geschaffen werden. Der Inhalt ist die Analyse, die Formulierung und die Strukturierung der Aufgabe. Hierbei erfolgt aus einer systematischen Ermittlung der Entwicklungspotenziale bestehender Lösungen die Definition der Zielsetzung. Wesentlich ist dabei, dass sowohl die Ausgangssituation als auch alle relevanten Ziele sowie Anforderungen abgeleitet und erfasst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist diese Phase von grundlegender Bedeutung. Ausgehend vom Stand der Technik werden zunächst die Randbedingungen sowie bestimmende Einflussfaktoren des Prozesses erfasst. Weiterhin wird die Zielsetzung anhand konkreter Anforderungen ausgeführt. Zu berücksichtigen sind sowohl Aspekte für die Entwicklung neuer Scanstrategien als auch die dabei notwendigen Modifikationen an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage.

Lösung suchen

Der Teilschritt *Lösung suchen* beinhaltet zunächst die Suche nach vorhandenen Lösungen, soweit diese auf die Problemstellung anwendbar sind. Im Weiteren können neue Ansätze mittels verschiedenster Kreativitätsmethoden generiert und angepasst werden. Durch das abschließende Systematisieren der Ergebnisse wird eine Synthese der ermittelten Ansätze erreicht.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen bedeutet dies für die Modifikation der Anlagentechnik das Ableiten von Teilaspekten und die Darstellung einer entsprechenden Vorgehensweise. Für die Scanstrategien muss eine Methode zur Beschreibung existierender Ansätze und zum Ableiten neuer, bisher noch nicht bekannter Lösungen gefunden werden.

Lösungsalternative auswählen bzw. verwirklichen

Abschließend werden im Rahmen des Teilschritts *Lösung auswählen bzw. verwirklichen* die im vorigen Teilschritt gefundenen Lösungen analysiert, bewertet und die beste Alternative ausgewählt. Dazu müssen die Eigenschaften der Lösungen über geeignete Vorgehensweisen ermittelt werden. Durch deren Vergleich mit der Anforderungsliste bzw. dem Zielsystem werden die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Varianten deutlich. Auf deren Basis erfolgt die Festlegung einer adäquaten Lösung.

1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird dieser Schritt auf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Erweiterungen und Änderungen der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage betreffen den mechanischen und den steuerungstechnischen Aufbau. Für die Entwicklung von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen wird die Definition einer Vorgehensweise zur systematischen softwarebasierten Erzeugung vieler verschiedener Lösungen inklusive deren methodischer Bewertung erarbeitet.

Die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Vorgehensweise spiegelt sich auch in der Struktur der Arbeit wider (vgl. Abbildung 9). Für die Phase „Ziel klären“ wurden im Rahmen der Einleitung (Kapitel 1) die Motivation, die Zielsetzung und die zugehörige Vorgehensweise erläutert. Zudem findet im Rahmen dieser Phase in Kapitel 2 eine Erläuterung des Standes der Forschung und Technik statt. Das Erzeugen von Lösungsalternativen, in diesem Zusammenhang die Phase „Lösung suchen“, ist Bestandteil von Kapitel 3 zur Entwicklung und Umsetzung einer allgemeinen Beschreibungsmethodik für Scanstrategien. Neben der Entwicklung einer Vorgehensweise zur Beschreibung von Scanstrategien wird durch die Arbeiten zur Modifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage die Basis geschaffen, um in Kapitel 4 zur Phase „Lösungsalternative auswählen und bewerten“ überzuleiten. Dieses Kapitel beinhaltet die Analyse und Bewertung von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen. Die Beschreibung einer Anwendung und eine Betrachtung der Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens in Kapitel 5 gehen nochmals auf die erarbeiteten Inhalte ein. Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick in Kapitel 6.

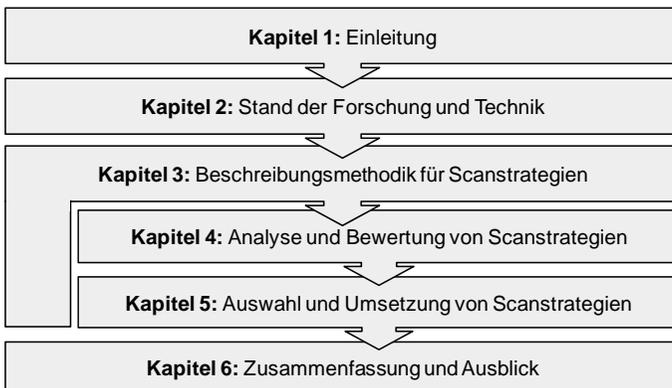


Abbildung 9: Struktur der vorliegenden Arbeit

Seminarberichte IWB

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

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

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur 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 - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

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

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

Forschungsberichte IWB

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

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

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

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerbereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fahrer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggeder:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patran:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickeneder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Sharif Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekongfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sharif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorförmlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Bau:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glongerger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahner:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0