

Tobias Hornfeck

**Laserstrahlbiegen komplexer
Aluminiumstrukturen für Anwendungen
in der Luftfahrtindustrie**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 221

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 978-3-8316-0826-3

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

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. M. Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung meiner Arbeit.

Bei Herrn Priv.Do. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. A. Otto, Mitglied der wissenschaftlichen Leitung des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Holzapfel danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

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

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, meiner Familie und meiner Freundin Ulrike, die mit ihrer beständigen Unterstützung, ihrer Motivation und ihrem Vorbild diese Ausbildung letztendlich erst ermöglicht haben.

München, im Juni 2008

Tobias Hornfeck

„Des is wia bei jeda Wissenschaft, am Schluss stellt sich dann heraus, dass alles ganz anders war.“

Karl Valentin

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis | III |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 2 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise | 5 |
| 2 Grundlagen | 7 |
| 2.1 Grundlagen des thermischen Umformens | 7 |
| 2.1.1 Thermische Umformverfahren | 7 |
| 2.1.2 Mechanismen beim Laserstrahlumformen | 9 |
| 2.2 Werkstoffprüfung charakteristischer Kennwerte | 14 |
| 2.2.1 Statische Kennwerte | 14 |
| 2.2.2 Dynamische Kennwerte | 16 |
| 2.2.3 Eigenspannungen | 20 |
| 2.2.4 Korrosion | 25 |
| 3 Stand der Technik | 28 |
| 3.1 Entwicklungen und industrielle Applikationen des Laserstrahlumformens | 28 |
| 3.1.1 Primärformgebung | 28 |
| 3.1.2 Richtprozesse | 32 |
| 3.1.3 Feinjustierung | 32 |
| 3.1.4 Prozessregelung | 33 |
| 3.2 Produktionstechnische Randbedingungen in der Luftfahrtindustrie | 33 |
| 3.2.1 Anforderungen an den Prozess | 33 |
| 3.2.2 Werkstoffe | 35 |
| 3.3 Ableitung des Handlungsbedarfs | 37 |
| 4 Untersuchungen zum Laserstrahlbiegen | 38 |
| 4.1 Experimenteller Aufbau | 38 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2 | Bestimmung der Einflussgrößen und der Prozessgrenzen | 40 |
| 4.3 | Werkstofftechnische Eignung des Verfahrens für Anwendungen in der Luftfahrt | 47 |
| 4.3.1 | Statische mechanische Eigenschaften | 47 |
| 4.3.2 | Dynamische mechanische Eigenschaften | 48 |
| 4.3.3 | Beständigkeit gegen Korrosion | 52 |
| 4.3.4 | Verfahrensbewertung | 56 |
| 5 | Produktionstechnische Umsetzung | 59 |
| 5.1 | Umformen von Komplexproben | 59 |
| 5.1.1 | Einfluss der Bahnrichtung | 68 |
| 5.1.2 | Einfluss der Taschen | 69 |
| 5.1.3 | Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit | 72 |
| 5.1.4 | Einfluss von Stringerquerschnitt und -anbindung | 75 |
| 5.2 | Anforderungen an die Produktion | 88 |
| 6 | Wirtschaftliche Bewertung | 93 |
| 6.1 | Umformung von Frästeilen | 93 |
| 6.2 | Umformung von Füge teilen | 97 |
| 6.3 | Abschätzung der Kostensituation | 101 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 102 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 105 |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die aktuelle Diskussion um die weltweite Entwicklung des Klimas lenkt die Aufmerksamkeit auf den Ausstoß so genannter Treibhausgase (UN 2007). Die kommerzielle Luftfahrt trägt zwar derzeit nur zu ca. 3,5 % zum Gesamtausstoß bei (AEROSUISSE 2007), aber im Hinblick auf langfristig prognostizierte Wachstumsraten im Luftverkehr von jährlich 3 % bis 4 % sind von Seiten dieser Branche steigende Auswirkungen auf das Klima zu erwarten (JUNIOR et al. 2006). Die Emissionen umfassen dabei direkte Treibhausgase, wie beispielsweise Kohlendioxid (CO_2), sowie indirekte Treibhausgase, z. B. Stickoxide (NO_x), welche wiederum Einfluss auf die Bildung direkter Treibhausgase wie Methan (CH_4) oder Ozon (O_3) ausüben. Zusätzlich ist die Emission in großen Höhen besonders schädlich. Aus diesem Grund hat es sich der Rat für Luft- und Raumfahrtforschung in Europa (ACARE) in der zweiten Auflage seiner strategischen Forschungsagenda zum Ziel gesetzt, die Emissionen für CO_2 um 50 % und für NO_x um 80 % bis zum Jahr 2020 zu reduzieren (SCHUMANN 2006).

Um diese Ziele zu erreichen, ist die Verminderung des Treibstoffverbrauches zwingend notwendig. Neben einer Optimierung von Turbinentechnologie oder Aerodynamik geht diese Reduzierung mit Einsparungen an der jeweils bewegten Masse einher. Die Voraussetzung dafür ist die bestmögliche Kombination von Werkstoff, Struktur und eingesetztem Fertigungsverfahren. Die Faktoren *Werkstoff* und *Struktur* werden im Bereich der Luftfahrtindustrie weitgehend durch den Einsatz moderner Leichtbauwerkstoffe in angepasster Integralbauweise ausgeschöpft. Der Einsatz neuartiger Fertigungsverfahren, beispielsweise des Laserstrahlschweißens, eröffnet zusätzliche Möglichkeiten der Gewichtsreduzierung. Bei einem größtmöglichem Ersatz des Nietens als bestehendes Fügeverfahren ist dadurch eine Gewichtsreduzierung um 10 % zu erwarten (BERGMANN 2002b).

Für die industrielle Umsetzung dieser Ziele stehen zusätzlich wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund. Vor allem die Globalisierung der Märkte verschärft die Wettbewerbsbedingungen für Hochlohnländer. Dieser Kostendruck kann in der industriellen Fertigung nur kompensiert werden, indem die bestehende Infrastruktur durch innovative Produkte und Prozesse für neues Wachstum genutzt wird (MILBERG 2003). Ziel produktionstechnischer Forschung muss es also sein, durch die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren bis zur industriellen Reife kosten-

technische und qualitative Optimierungen in bestehenden Produktionsprozessen etablieren zu können.

1.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit, die im Rahmen des von der Europäischen Union geförder- ten Projektes „Economic Advanced Shaping Processes for Integral Structures“ (ECOSHAPE) angefertigt wurde, befasst sich mit der fertigungstechnischen Opti- mierung der Produktion von komplexen Außenhautbauteilen für Rumpf und Trag- flächen, so genannte Rumpf- oder Tragflächenschalen. Diese Schalen bestehen aus Blechmaterial, das durch aufgefugte Rippen (Stringer) ausgesteift wird. Die kon- ventionelle Fertigung dieser Schalen umfasst zahlreiche Prozessschritte. Das Aus- gangsmaterial durchläuft nach dem Zuschnitt verschiedene chemische und mecha- nische Oberflächenbearbeitungen. Für die Formgebung werden mechanische Um- formverfahren genutzt. Hauptsächlich kommen dabei Walz- oder Streckziehverfah- ren zum Einsatz. Das Fügen der Stringer auf das umgeformte Grundblech erfolgt in der Luftfahrtindustrie typischerweise durch Nieten. In der Fertigung neuer Flug- zeugtypen wird mittlerweile auch das Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren ein- gesetzt. Nach dem Schweißen müssen die Schalen jedoch zusätzlich gerichtet wer- den (Abbildung 1).

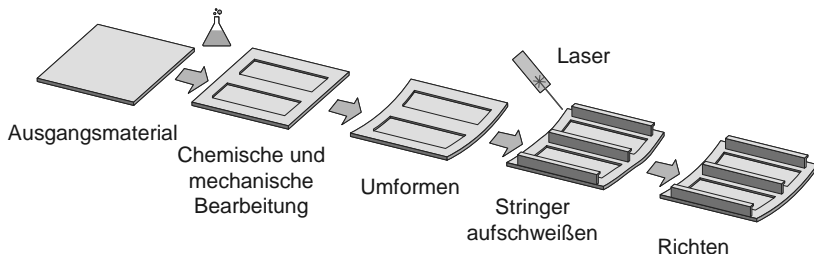


Abbildung 1: Prozesskette bei der Fertigung von komplexen Rumpf- und Tragflächenschalen (VÖLLNER 2004)

Als kostentreibende Prozesse in der Fertigung können vor allem Bearbeitungsschritte von Freiformflächen sowie die mechanische Umformung für großflächige Bauteile identifiziert werden (KOPP 1995). Ein zusätzlicher Aufwand entsteht durch das Richten der Baugruppen nach dem Laserstrahlschweißen.

Mit Hilfe einer produktionstechnischen Optimierung dieser Prozesskette kann eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der Produktion der komplexen Rumpf- und Tragflächenschalen ermöglicht werden. Eine zentrale Rolle in der Fertigung dieser Leichtbaustrukturen nimmt dabei das Umformen ein. Ein Lösungsszenarium ist die Entwicklung eines innovativen Umformverfahrens, das als finaler Arbeitsschritt gestaltet ist. Vorgelagerte Fertigungsschritte könnten so im geometrisch ebenen Zustand des jeweiligen Bauteils durchgeführt werden. Die Maschinen- und Bearbeitungskosten reduzieren sich dadurch erheblich. Des Weiteren ist eine hohe Flexibilität des Verfahrens für die Bearbeitung verschiedener Endkonturen zu fordern. Im Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Umformverfahren mit festen Umformwerkzeugen, wie z. B. dem Streckziehen, ist weiteres Potenzial zur Kostenreduzierung durch die Einsparungen im Werkzeugbereich gegeben.

Ein möglicher Lösungsansatz ist das Laserstrahlumformen. Dieses Verfahren, das als Weiterentwicklung des Flammrichtens gesehen werden kann, nutzt als „Umformwerkzeug“ Lichtenergie, bzw. die daraus resultierende Wärmeentwicklung bei der Bestrahlung von Oberflächen. Die so induzierte lokale Erwärmung verändert den Eigenspannungshaushalt des Bauteils und führt so zu einer Formänderung.

Das Verfahren ist seit den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts bekannt. Bisherige Entwicklungen und Anwendungen finden sich vor allem im Bereich reiner Blechumformungen. Bei erfolgreicher Entwicklung des Laserstrahlumformens für die Fertigung in der Luftfahrtindustrie, im Besonderen auch für die Umformung von Komplexbauteilen, lassen sich alle oben angesprochenen Optimierungspotenziale ausschöpfen. Die Arbeitsschritte im Produktionsprozess können einschließlich des Fügens vor dem Umformen im geometrisch ebenen Zustand durchgeführt werden (Abbildung 2).

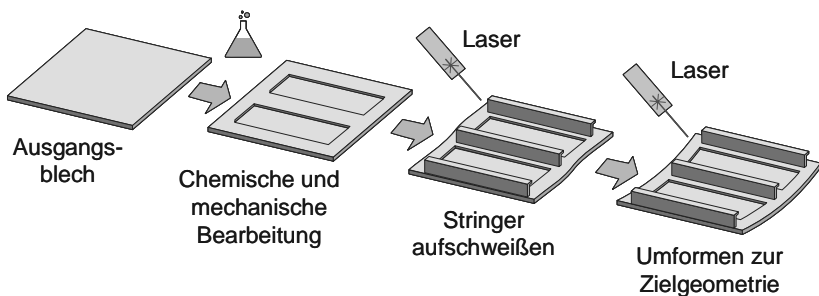


Abbildung 2: Optimierte Prozesskette in der Schalenfertigung (VÖLLNER 2004)

Unabdingbare Voraussetzung für den Einsatz des Laserstrahlumformens in der Luftfahrtindustrie ist die Qualifizierung des Produktionsverfahrens. Diese Qualifizierung kann in drei Teilaspekte aufgespalten werden. Der erste Gesichtspunkt ist die werkstofftechnische Eignung für das Verfahren. In der Luftfahrt zeichnet sich diese Qualifizierung durch einen extrem hohen experimentellen Aufwand und damit entsprechend hohe Kosten aus. Den zweiten Aspekt stellt die verfahrenstechnische Umsetzung dar. Vor allem die Robustheit und die Reproduzierbarkeit des Verfahrens müssen für die Fertigung der angestrebten Leichtbaustrukturen gewährleistet sein. Die kostentechnische Betrachtung führt abschließend zur Bewertung der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Das Benchmark ist dabei die bestehende Fertigung.

Ziel dieser Arbeit ist es, die bestehenden Erkenntnisse zum Laserstrahlumformen hinsichtlich der Eignung des Verfahrens für den Qualifizierungsprozess in der Luftfahrtindustrie zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Den ersten Schritt muss dabei die Identifikation der Prozessparameter und -grenzen bilden. Mit diesen Größen kann das grundsätzliche Einsatzpotential des Verfahrens hinsichtlich der angestrebten Geometrien für die Anwendungen in der Luftfahrtindustrie sichergestellt werden. Nachfolgend ist es notwendig, das Werkstoffverhalten nach der Bestrahlung bezüglich der Kriterien für die Qualifizierung zu untersuchen. Neben den Veränderungen der statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften nach der Laserbestrahlung müssen dafür die Auswirkungen auf die Korrosionsbeständigkeit der eingesetzten Legierungen untersucht werden. Ein weiterer Aspekt, vor allem für die produktionstechnische Umsetzung, ist die Absicherung der Robustheit und der Reproduzierbarkeit der Prozessergebnisse. Dafür müssen neue Bestrahlungs- und Regelstrategien entwickelt werden, die die Einflüsse von verwendeten Werkstoffen, vorgelagerten Produktionsschritten und zu fertigenden Bauteilen kompensieren können. Für diese Untersuchungen werden Komplexproben verwendet, die mit lokalen Oberflächenmodifikationen, aufgeschweißten Versteifungsrippen (Stringer) und flächigem Materialabtrag in mechanisch gering belasteten Bereichen alle Merkmale in der Luftfahrtindustrie verwendeter Außenhautstrukturen für Rumpf- und Tragflächenschalen besitzen. Neben diesen technischen Fragestellungen muss das Verfahren hinsichtlich seiner wirtschaftlichen Tragfähigkeit untersucht werden.

Die erfolgreiche Durchführung dieser Arbeitsschritte bildet damit die Grundlage, um das kostenintensive Qualifizierungsverfahren mit möglichst minimiertem Versagensrisiko durchführen zu können.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Als Ausgangsbasis der in der Zielsetzung angeführten Schritte zur Identifizierung der Leistungspotentiale des Laserstrahlumformens in der Luftfahrtindustrie werden zunächst die Grundlagen des Verfahrens sowie die bereits verfügbaren Erfahrungswerte vorgestellt. Hierzu wird das Grundwissen in Kapitel zwei aufbereitet, das zum Verständnis der Arbeit notwendig ist. Zu Beginn wird der Ursprung des thermischen Umformens beleuchtet. Dabei zeigt die Entwicklung der thermischen Umformverfahren die besondere Eignung des Laserstrahlumformens für die automatisierte Fertigung. Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit den maßgeblichen Werkstoffeigenschaften und -prüfverfahren, die zur Verfahrensqualifizierung im Luftfahrtbereich angewendet werden. Diese umfassen Verfahren zur Bestimmung von statischen und dynamischen Kennwerten, der Ausbildung und Bestimmung von Eigenspannungen, sowie dem Korrosionsverhalten der eingesetzten Aluminiumlegierungen.

Im dritten Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik beim Laserstrahlumformen aufbereitet. Das Augenmerk liegt dabei auf den derzeitigen Anwendungsbereichen des Verfahrens. Aus den produktionstechnischen Randbedingungen, die speziell von der Luftfahrtindustrie an neue Fertigungsverfahren gestellt werden, sowie den spezifischen Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Aluminiumlegierungen wird der genaue Handlungsbedarf der Forschungsarbeiten abgeleitet.

Die beiden ersten Teilziele der experimentellen Entwicklung des Verfahrens bilden die Identifikation der maßgeblichen Prozessparameter und -grenzen sowie das Werkstoffverhalten nach der Bestrahlung. Sie werden im vierten Kapitel dargestellt. Beginnend mit der Beschreibung der Versuchsaufbauten werden anschließend die technischen Grenzen des Verfahrens hinsichtlich der zu erreichenden Umformungen untersucht. Darauf aufbauend wird die Eignung zur werkstofftechnischen Qualifizierung abgeschätzt. Diese Abschätzung umfasst neben den statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften Härte, Festigkeit, Dauerfestigkeit und Rissausbreitung die Beständigkeit gegen Korrosion, die anhand von interkristalliner Korrosion, Schichtkorrosion und Beständigkeit gegen Salzlösungen untersucht wird. Für diese Untersuchungen werden standardisierte Probengeometrien und Prüfverfahren verwendet.

Die produktionstechnische Umsetzung des Verfahrens wird in Kapitel fünf erarbeitet. Zentrales Thema ist dabei die prozesssichere Umformung von Komplexproben, welche alle Merkmale der im Flugzeugbau eingesetzter Außenhautstrukturen enthalten. Aus den Einflüssen, die von den einzelnen Merkmalen, wie z. B. lokalen

Oberflächenmodifikationen, resultieren, werden geeignete Regelstrategien entwickelt. Auswirkungen von Strukturmerkmalen, die nicht von der Prozessregelung kompensiert werden können, werden genau identifiziert. Daraus lassen sich Anforderungen an vorgelagerte Prozessschritte ableiten, um die optimale Implementierung des Umformverfahrens in die Prozesskette gewährleisten zu können.

In Kapitel sechs wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beurteilt. Für die Abschätzung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit wird eine statische Amortisationsrechnung auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Als Referenzbeispiel dienen zwei konventionelle Produktionsrouten, d. h. Fertigungsabläufe mit verschiedenen Produktionsschritten, für die Schalenfertigung in der zivilen Luftfahrtindustrie, die aktuell Anwendung finden. In diesen Produktionsrouten wird das konventionelle, mechanische Umformen fiktiv durch das Laserstrahlbiegen ersetzt.

Den Abschluss bildet Kapitel sieben mit der Zusammenfassung der Inhalte der Arbeit und einem Ausblick auf mögliche weitere Anwendungen des Verfahrens.

2 Grundlagen

Im ersten Teil dieses Kapitels wird eine Übersicht über die Grundlagen thermischer Umformverfahren erarbeitet. Die maßgeblichen Umformmechanismen beim Laserstrahlumformen werden dabei erläutert. Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit den Grundlagen der Werkstoffprüfung, die für die Verfahrensqualifikation notwendig sind.

2.1 Grundlagen des thermischen Umformens

2.1.1 Thermische Umformverfahren

Gemäß der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 sind die thermischen Umformverfahren dem Umformen zuzuordnen (DIN 8580). Gemäß der DIN 8586 entsprechen sie einem Umformen mit Wirkenergie (DIN 8586). Die plastische Formgebung erfolgt bei thermischen Umformverfahren durch die lokale Induktion thermischer Spannungen (BEITZ & KÜTTNER 1990). Damit können diese Verfahren in der Gruppe der inkrementellen Umformverfahren eingeordnet werden (VOLLERTSEN 1996). In der industriellen Fertigung werden dabei hauptsächlich das Flammrichten und das Formrichten verwendet. Die Verfahren werden je nach Anwendungsgebiet eingeteilt. Als Flammrichten wird das Richten verzogener Bauteile mittels Wärmeeintrag bezeichnet. Dies können sowohl Schweißkonstruktionen, deren Verzug aus dem Schweißprozess resultiert, als auch einzelne Bauteile sein, die beispielsweise Verzüge nach dem Brennschneiden aufweisen. Beim Formrichten wird durch das gezielte Einbringen von Wärmefeldern eine dreidimensionale, nicht-gerade Form eines Werkstücks erzeugt (PEITER et al. 1983).

Grundprinzip für die Umformung ist die lokale Erwärmung der Werkstückoberfläche (Abbildung 3). Die Fließgrenze wird dabei herabgesetzt und der Werkstoff erweicht im aufgeheizten Bereich. Gleichzeitig stellt sich mit der Erwärmung die thermische Dehnung des Werkstoffes ein. Diese wird allerdings durch das umgebende Material behindert, sodass sich Druckspannungen aufbauen. Übersteigen die Druckspannungen die werkstoffspezifische Fließgrenze, so wird das erwärmte Material plastisch gestaucht. Bei der Abkühlung und der damit verbundenen Schrumpfung des gestauchten Bereichs bilden sich lokale Zugspannungen aus. Die Ableitung dieser Spannungen in die umliegenden Werkstoffbereiche bewirkt die Formänderung des Werkstücks (PFEIFFER 1989).

Das Flammrichten wird hauptsächlich für das Richten von Schweißkonstruktionen und großflächigen Blechteilen verwendet. Ein charakteristisches Einsatzfeld ist der Schiffsbau. Die Prozessparameter hängen vom Werkstoff, der Bauteilgeometrie und der Umformaufgabe ab. Die Wärme wird je nach Anwendung quasi punktförmig, entlang einer Linie oder flächig eingebracht. Als Wärmequelle wird ein Acetylen-Sauerstoff-Brenner verwendet. Für die erfolgreiche Umsetzung in der Praxis ist für dieses Verfahren hoch qualifiziertes Fachpersonal mit langjähriger Erfahrung notwendig. Eine ausreichende Reproduzierbarkeit des Verfahrens ist bei automatisierten Lösungen bisher nicht darstellbar.



Abbildung 3: Flammrichten verschweißter Stahlkonstruktionen im Schiffbau

Das Flammrichten von Aluminium gilt aufgrund von dessen hoher Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig niedrigem Schmelzpunkt allgemein als schwierig (PFEIFFER 1989). Besonders bei ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen, beispielsweise aus der Gruppe AlMgSi, ist die Temperaturführung von besonderer Bedeutung. Bis zu einer Temperatur von 200 °C ist nur mit einem geringfügigen Festigkeitsverlust zu rechnen. Jenseits dieser Temperatur ist ein starker Festigkeitsverlust zu erwarten. Bei einer Bearbeitungstemperatur von mehr als 400 °C sinkt die Festigkeit bis zum Niveau der nicht ausgelagerten Legierung (GERIDÖNMEZ 1966). Eine maximal mögliche Aufheizgeschwindigkeit von 500 K/s reduziert die Haltezeit der Temperatur zusätzlich (DENNIN 1976).

Die aufgezeigten Problemstellungen beim Flammrichten resultieren hauptsächlich aus der Verwendung einer offenen Flamme als Wärmequelle. Im Gegensatz dazu können durch den Einsatz eines Hochleistungslasers folgende Fortschritte erzielt werden (MAGEE et al. 1998a, HOLZER 1996, KRAUS et al. 1996, STEEN 1991, MOSHAIOV & VORUS 1987):

- Genaue Quantifizierung der zugeführten Energie,
- genaue Lokalisierung des Einbringungsortes und
- Erhöhung der Aufheizgeschwindigkeit auf bis zu 10^7 K/s.

2.1.2 Mechanismen beim Laserstrahlumformen

Das Laserstrahlumformen stellt einen neuen Typus im Bereich der flexiblen Umformverfahren dar. Es benötigt keine Formwerkzeuge oder äußere Kräfte (YANJIN et al. 2005). Für die Erzeugung einer Biegung wird das jeweilige Bauteil entlang einer Geraden bestrahlt. Dabei bildet sich ein Biegewinkel α_b über das gesamte Bauteil aus (Abbildung 4).

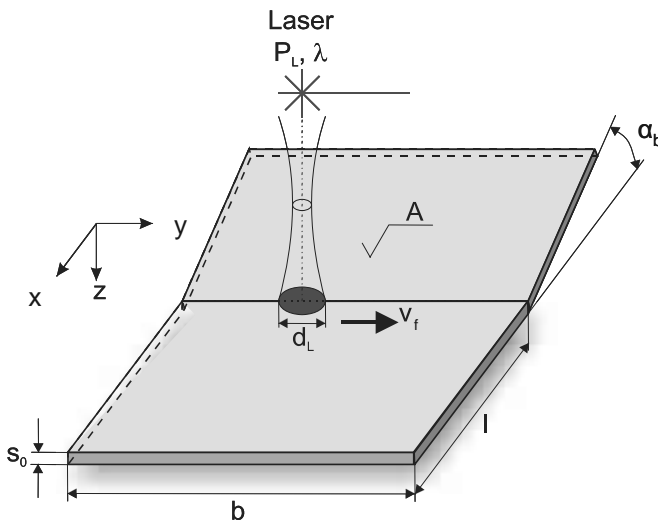


Abbildung 4: Grundprinzip des Laserstrahlbiegens (VÖLLNER 2004)

Grundsätzlich werden beim Laserstrahlumformen thermische und athermische Verfahren unterschieden (Abbildung 5). Bei den thermischen Verfahren lässt sich eine Differenzierung wiederum hinsichtlich der Ausprägung eines Temperaturgradienten über der Bauteildicke treffen.

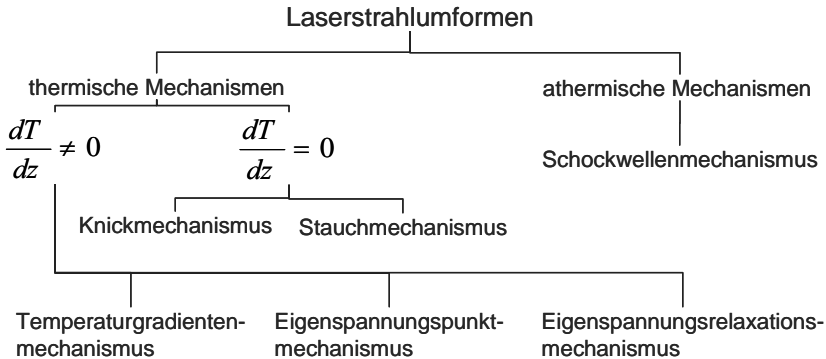


Abbildung 5: Einteilung der Mechanismen beim Laserstrahlumformen (VOLLERTSEN 1996)

Der Temperaturgradientenmechanismus (TGM) ist der bedeutendste Mechanismus für die gezielte Umformung, da damit eine genaue Steuerung des Biegewinkels möglich ist (MERKLEIN 2001, WATKINS et al. 2001). Durch die Bestrahlung mit dem Laser entlang der Biegelinie wird die Werkstoffoberfläche erwärmt. Der Wärmetransport in den Werkstoff ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit. Über die Bauteildicke baut sich ein Temperaturgradient auf.

Die Erwärmung der Oberfläche bewirkt eine thermische Ausdehnung. Durch diese Ausdehnung werden Druckspannungen in den Oberflächenschichten induziert, die eine elastische Biegung vom Strahl weg hervorrufen. Im Werkstück baut sich ein gegenwirkendes Moment auf, da ein thermo-mechanisches Kräftegleichgewicht im nicht eingespannten Bauteil herrschen muss (Abbildung 6).

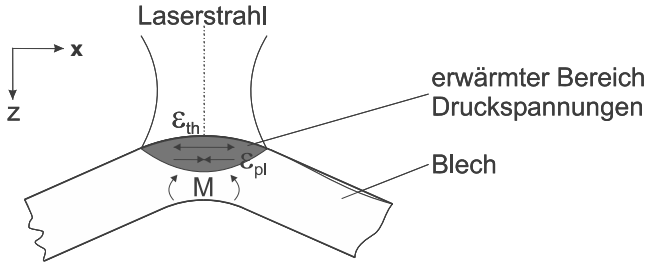


Abbildung 6: Elastische Gegenbiegung aufgrund thermisch induzierter Druckspannungen bei der Bestrahlung (VOLLERTSEN 1996)

Bei weiterer Erwärmung sinkt die Streckgrenze des erwärmten Bereichs ab, der Werkstoff plastifiziert. Das vorher induzierte Gegenmoment kann so durch eine Stauchung des plastifizierten Bereichs abgebaut werden. Die anfängliche Gegenbiegung geht zurück. Unterstützt wird diese Biegung durch eine zusätzliche Ausdehnung der Bauteilrückseite aufgrund der Wärmeleitung und der damit eintretenden thermischen Dehnung.

Die Bewegung der Laserquelle während des Biegeprozesses schiebt die Bestrahlungszone aus dem erwärmten und plastifizierten Bereich. In der so eingeleiteten Abkühlphase werden durch den Rückgang der thermischen Dehnung Zugspannungen im gestauchten Bereich induziert (KOHN 2002). Das Bauteil biegt sich bis zum mechanischen Gleichgewicht zur vorher bestrahlten Richtung hin (Abbildung 7) (VOLLERTSEN 1996). Nach dem Umformen stellt sich eine kontinuierliche Spannungsverteilung über dem Querschnitt ein (Abbildung 8).

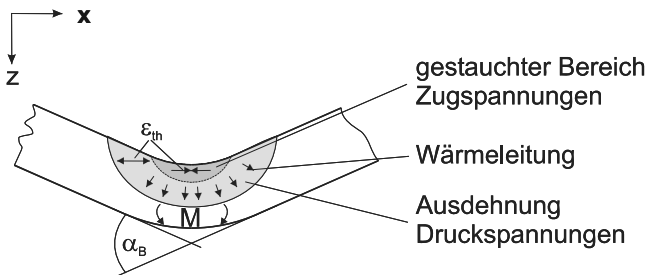


Abbildung 7: Ausbildung des finalen Biegewinkels bei der Abkühlung des Bauteils in Folge von Zugspannungen im plastisch gestauchten Bereich (VOLLERTSEN 1996)

3 Stand der Technik

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Entwicklungen des Laserstrahlumformens und gängige Anwendungen in der industriellen Fertigung. Aus den speziellen Anforderungen der Luftfahrtindustrie und den Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe wird der Handlungsbedarf für die grundlegenden Untersuchungen zur industriellen Umsetzung des Verfahrens abgeleitet.

3.1 Entwicklungen und industrielle Applikationen des Laserstrahlumformens

3.1.1 Primärformgebung

Anwendung im Schiffbau

Einer der klassischen Anwendungsbereiche thermischer Umformverfahren ist der Schiffbau, der dafür hauptsächlich das Flammrichten einsetzt. 1980 regte Masubuchi an, Hochleistungslaser für diese Aufgaben einzusetzen (MASUBUCHI 1992). Die ersten Forschungsarbeiten für das Laserstrahlumformen wurden im Jahr 1980 von der U. S.-amerikanischen Marine durchgeführt. Für das Umformen von Blechteilen für Schiffskörper wurde das Laserstrahlumformen als Ersatz für das konventionelle Formrichten mittels Acetylen-Sauerstoff-Flamme untersucht. Das besondere Interesse begründete sich darin, den Laser als sehr gut regelbare Energiequelle im Gegensatz zur offenen Flamme einzusetzen. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass sich besonders Stähle für dieses Umformverfahren eignen. Die Materialstärken bewegten sich im Bereich von 6,25 mm bis 12,5 mm. Im Vergleich zum Flammrichten zeichnet sich das Verfahren durch eine höhere Genauigkeit der umgeformten Bauteile sowie eine geringere Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften aus. Die Materialspezifikation MIL-S-16216J des US-Militärs für hochfeste Stähle kann nach der Bearbeitung eingehalten werden (MAGEE et al. 1998b). Für den industriellen Einsatz erweisen sich vor allem die Regelung des Prozesses sowie die Handhabung der Laserstrahlung als vorteilhaft. Durch die Weiterentwicklung dieses Prozesses hinsichtlich dieser vorteilhaften Eigenschaften findet das Laserstrahlumformen im Schiffsbau vermehrten Einsatz. Die Prozesskontrolle auf Basis einer pyrometrischen Temperaturerfassung sowie ein direktes Aufsetzen der Optik auf die Oberfläche des umzuformenden Bauteils zur Vermeidung unkontrollierter Streustrahlung bilden eine Basis für die Anwendung (KOERDT et al. 2007).

2-d- und 3-d-Umformung einfacher Blechstrukturen

Die bisher am intensivsten untersuchten Anwendungsfälle für das Laserstrahlumformen sind die zweidimensionale und die dreidimensionale Formgebung von Blechmaterial. Blake beschreibt das Laserstrahlbiegen von Dünoblechen (Dicke 0,26 mm bis 0,64 mm). Zum Einsatz kam dabei ein Desktopsystem, das mit einer CO₂-Strahlquelle ausgerüstet war. Die Bahngenerierung für die verschiedenen Biegeradien wurde aus den CAD-Daten der Endkontur berechnet. Basis für die Parameterbestimmung war allerdings eine definierte Vorbereitung der bestrahlten Oberfläche, wodurch wiederum die Flexibilität einschränkt war (BLAKE et al. 1997).

Für das Biegen einfacher Zylindersegmente aus Blechmaterial entwickelte Magee 1998 einen ersten Demonstrator. Mit dem verwendeten Lasersystem wurden Proben der Größe 450 mm x 225 mm bearbeitet. Ziel war es, ein Zylindersegment mit 900 mm Radius zu biegen. Mit Hilfe dieses Demonstrators wurde eine Regelstrategie entwickelt. Die Regelung basiert zum einen auf der Probengeometrie, die mittels eines Laserlichtschnittverfahrens erfasst wird. Zum anderen nutzt die Regelung Prozessparameter, die in vorgelagerten Parameterstudien bestimmt werden. Die Genauigkeiten, die mit diesem System erreicht werden können, liegen im Bereich derjenigen von bestehenden mechanischen Umformverfahren (MAGEE et al. 1998c).

Die Generierung großer Biegewinkel erfordert Vielfachbestrahlungen des umzuformenden Werkstückes. Die genaue Kenntnis der Auswirkungen benachbarter oder übereinander liegender Bestrahlungsbahnen ermöglicht die exakte Kontrolle des Umformprozesses. Verfestigung und Aufdickung durch die Umformung und die Veränderung des Absorptionsverhaltens nach einer Bestrahlung wirken sich dabei nur auf Vielfachbestrahlungen einer Bahn aus. Thermische Effekte und Einflüsse durch das jeweils verwendete Spannsystem müssen für die entsprechende Umformaufgabe experimentell bestimmt werden (EDWARDSON et al. 2005, EDWARDSON 2004).

Kontrollierte dreidimensionale Umformungen stellen erheblich höhere Anforderungen an das Kontrollsystem. Durch eine geeignete Wahl der Bestrahlungsbahnen ist die gezielte Umformung von Blechmaterial sogar zu unregelmäßigen Formen möglich (CHENG et al. 2005, DUFLOU et al. 2005).

Die Verwendung von Scannersystemen zur Umformung dünner Blechwerkstoffe erweitert das Anwendungsgebiet des Umformprozesses. Zum einen ermöglicht das Scannersystem durch eine effektive Verteilung der Laserenergie den Einsatz von Laserquellen mit geringen Leistungen. Zum anderen kann durch diese gleichmäßige

Energieverteilung eine nahezu kontinuierliche Rundung ohne Polygoneffekt erzeugt werden (OJEDA & RAMOS-GREZ 2007, BARTKOWIAK et al. 2005).

Umformen von Profilen

Verschiedene Entwicklungen und Anwendungen im Bereich der Umformung von Rohren und Profilen sind seit 1990 zu verzeichnen. Frackiewicz nutzte beispielsweise das Laserstrahlumformen zur Erzeugung konventionell schwer herstellbarer Geometrien. Dazu gehören sowohl radialsymmetrische Formänderungen als auch Biegungen (FRACKIEWICZ et al. 1992). Die Weiterentwicklungen des Verfahrens ermöglichen Umformungen in der Longitudinalrichtung. Aus radialsymmetrischen Profilen können nahezu beliebige Querschnittsformen hergestellt werden (Abbildung 21). Mit diesem Verfahren können außerdem auch radialsymmetrische Aufdickungen der Wandstärke erzeugt werden. Der Vorteil des Laserstrahlumformens ist dabei, dass keine Matrize für das Umformen benötigt wird (OSAKADA et al. 2005).

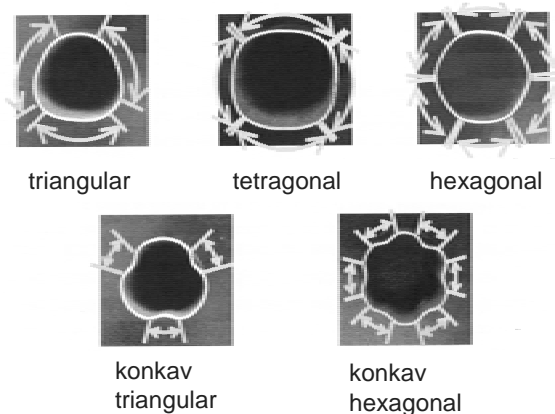


Abbildung 21: Beispiele für durch Laserstrahlumformen herstellbare Querschnittsformen von radialsymmetrischen Rohren (OSAKADA et al. 2005)

Anwendung für das Rapid Prototyping

Erste Anwendungen des Verfahrens im Bereich des Rapid Prototyping wurden 1995 von Vollertsen vorgestellt. Der Vorzug liegt dabei vor allem in der hohen Flexibili-

tät des Verfahrens. In Kombination mit dem Laserschneiden als vorgelagerter Prozess ergibt sich ein äußerst flexibles Produktionsverfahren für einfache Strukturen aus Blechmaterial (VOLLERTSEN 1995).

Die Kombination aus mechanischem Umformen zur Grobformgebung und Laserstrahlumformen zum Richten erweitert die Umformtechnik hinsichtlich Genauigkeit und Flexibilität. Darüber hinaus ermöglicht das Richten mittels Laser die zusätzliche Integration von Schweiß- oder Schneidprozessen in der Produktionskette (MAGEE & DE VIN 2000, MAGEE & DE VIN 2002).

Umformen verschiedener Werkstoffgruppen

Aufgrund seiner Ableitung aus dem Flammrichten erfolgten die ursprünglichen Untersuchungen und Anwendungen des Laserstrahlumformens bei Stählen. Die Umformung durch thermisch induzierte Eigenspannungen erweitert die Werkstoffauswahl auf spröde Werkstoffe. Vor allem im Bereich von Sinterwerkstoffen können heute Umformungen erfolgreich durchgeführt werden (FRACKIEWICZ et al. 1990).

Magee nutzt das Laserstrahlumformen für hochfeste Titan- und Aluminiumlegierungen. Er zeigt, dass das gezielte Umformen auf Basis des Temperaturgradientenmechanismus für beide Werkstoffe trotz des hohen Unterschieds in der Wärmeleitfähigkeit möglich ist (MAGEE et al. 1998a). Die erarbeiteten Grundlagen nutzt Watkins, um in der Luftfahrtindustrie verwendete Aluminium- und Titanlegierungen umzuformen. Unterhalb einer mittleren Energiedichte von 25 J/mm^2 können die Aluminiumlegierungen thermisch umgeformt werden, ohne das Mikrogefüge zu beeinflussen. Für die experimentellen Untersuchungen wird ein CO_2 -Lasersystem verwendet. Die Proben werden zur Erhöhung der Absorption mit Graphit geschwärzt (WATKINS et al. 2001).

Für das Trainieren von Formgedächtnislegierungen können die herkömmlichen Produktionsverfahren durch das Laserstrahlumformen erweitert werden. Dies ermöglicht das „Umschalten“ zwischen zwei Zuständen: der laserinduzierten Form und der „Gedächtnisform“. Damit sind komplexe Bewegungen möglich. Gleichzeitig wird durch das Laserstrahlumformen die Anzahl der möglichen Temperaturzyklen erhöht. Vor allem für mikrosystem- und medizintechnische Anwendungen ergeben sich dabei neue Möglichkeiten hinsichtlich der Formgebung ohne zusätzliche Verfestigung (VON BUSSE et al. 2005).

3.1.2 Richtprozesse

Erste Anwendungen für das Richten von Schweißkonstruktionen im Bereich der Automobilindustrie wurden von Geiger 1993 berichtet. Der Vorzug des Laserstrahlumformens liegt in der Möglichkeit, das Richten in die Schweißanlage zu integrieren. Manuelle Arbeitsschritte können dadurch reduziert werden. Konstante Schweißverzüge, die beispielsweise in einer Serienfertigung im Karosseriebau auftreten, können automatisch ausgeglichen werden (GEIGER et al. 1993).

Für einen kombinierten Prozess aus Richten und Härten von Zähnen auf Sägeblättern nutzt Tönshoff den Laser. Er bringt über die Bestrahlung Tangentialspannungen im Bereich der Zähne ein, mit welchen er vor allem die Schränkung genau einstellen kann. Eine Erhöhung der Schnittqualität sowie eine Erhöhung der Standzeit ist damit möglich (TÖNSHOFF et al. 1994).

Durch die Anwendung des Laserstrahlbiegens im Bereich der Zahnradfertigung sind im Produktionsprozess Genauigkeitssteigerungen möglich. Durch den Laser werden lokal thermische Spannungen induziert, die im finalen Härteverfahren eine Reduzierung der Verzüge hervorrufen (PRETORIUS et al. 2007).

3.1.3 Feinjustierung

Im Bereich der Mikrosystemtechnik finden sich aufgrund der besonderen Anforderungen diverse Anwendungsmöglichkeiten für das Laserstrahlumformen. Die Herausforderungen für die Bearbeitung der verwendeten Strukturen liegen dabei zum einen in der Handhabung der filigranen Strukturen, zum anderen in der taktilen Handhabung der feinst bearbeiteten Oberflächen. Ein weiterer Aspekt ist die Zugänglichkeit. Die Umformung bereits gekapselter Systeme ist durch mechanische Verfahren nicht möglich. Das Laserstrahlumformen kann hier als berührungsloses Umformverfahren eingesetzt werden, da dafür keine zusätzlichen externen mechanischen Kräfte notwendig sind. Die Genauigkeit der Umformung kann über die eingebrachte Energie exakt gesteuert werden. Darüber hinaus erlaubt die lokale Wirkung der Laserstrahlung den Einsatz an bereits fertig montierten oder gekapselten Systemen (WIDLASZEWSKI 2005, OTTO 2005, LÖSCHNER 2003, NOTENBOOM & HOVING 1995, GEIGER et al. 1994).

4 Untersuchungen zum Laserstrahlbiegen



In diesem Kapitel werden die experimentellen Arbeiten dargestellt, mit denen die grundsätzliche Eignung des Verfahrens für die Anwendung in der Luftfahrtindustrie untersucht wurde. Das Verfahrenspotenzial wird dabei ausgehend von der Beschreibung des experimentellen Aufbaus und den Ergebnissen der mechanischen und nasschemischen Untersuchungen abgeschätzt.

4.1 Experimenteller Aufbau

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit zwei verschiedenen handelsüblichen Lasersystemen durchgeführt (Tabelle 3):

- Lampengepumpter Nd:YAG-Laser vom Typ Haas HL 3006d
- Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) vom Typ Laserline LDL 160/3000

Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Laserstrahlquellen

| | Nd:YAG | HLDL |
|------------------------|--|---|
| Lasertyp |  Quelle: Trumpf |  Quelle: Laserline |
| Wellenlänge | 1064 nm | 808 – 940 nm |
| Leistungsbereich | 300 – 3000 W | 100 – 3000 W |
| Strahlparameterprodukt | 25 mm·mrad | 85 x 200 mm·mrad |
| Fokus | ● | ■ |
| Fokusintensität | 10^6 W/cm ² | 10^4 W/cm ² |
| Wirkungsgrad | 3 – 5 % | ~35 % |
| Strahlführung | Lichtleitfaser | Direkt/Lichtleitfaser |

Das Laserlicht wird bei beiden Lasersystemen durch eine Glasfaser übertragen. Für die Bestrahlung wurde ein integriertes Optiksystem entwickelt und aufgebaut. In diesem Optiksystem kann in den kollimierten Strahl neben einer optischen Prozessüberwachung auch eine Temperaturerfassung mittels Pyrometer eingebündelt werden. Fokussiert werden Laserstrahlung und Prozessüberwachung über eine gemeinsame Bündelungslinse. Zur prozesssicheren Absorption der primär reflektierten Laserstrahlung, die auf den verwendeten Aluminiumoberflächen bis zu 90 % der eingestrahlenen Laserleistung betragen kann, ist eine wassergekühlte Strahlfalle installiert (Abbildung 23).

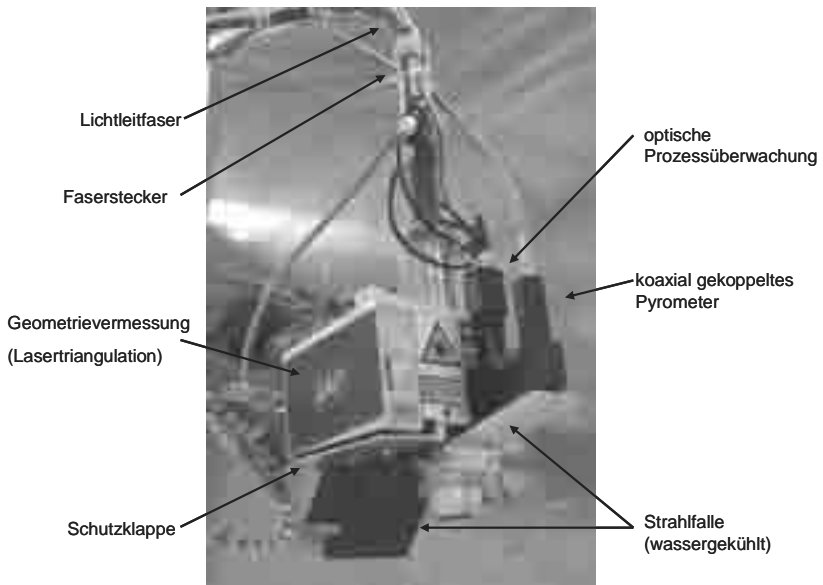


Abbildung 23: Integriertes Optiksystem für die Umformung und die Geometrie- vermessung

Für die Geometrie- vermessung der Probebauteile wurde ein Lasertriangulations- system der Firma LAP verwendet. Der Triangulationssensor ist in das Optiksystem integriert. Zum Schutz vor Streustrahlung wurde er während der Bestrahlung mit einer Schutzklappe verschlossen. Die Messwerte wurden mit dem Programm Lab- View™ der Firma National Instruments (NATIONAL INSTRUMENTS 2003) aufge- zeichnet und unter MATLAB® der Firma The MathWorks (THE MATHWORKS 2006) ausgewertet.

Die Handhabung des Optiksystems erfolgte mit einem Sechs-Achs-Knickarmroboter KR 15 der Firma Kuka. Zum Schutz vor hochenergetischer Laserstrahlung war der Versuchsaufbau in einer Schutzkabine der Klasse 4 eingehaust (Abbildung 24). Der Prozess wurde entweder direkt durch ein Laserschutzglas oder mittels einer Videoübertragung aus der Schutzkabine beobachtet.



Abbildung 24: Experimenteller Aufbau zum Laserstrahlbiegen

4.2 Bestimmung der Einflussgrößen und der Prozessgrenzen

Maßgeblich für eine technische Umsetzung des Laserstrahlbiegens ist die Kenntnis der Korrelation zwischen den Prozesseinflussgrößen und dem erreichten Biegewinkel. Die Prozesseinflussgrößen lassen sich in vier Gruppen einteilen. Jede Gruppe enthält spezifische Faktoren, die sich aus vorbestimmten und regelbaren Größen zusammensetzen. In Abbildung 25 sind die wichtigsten Größen dargestellt.

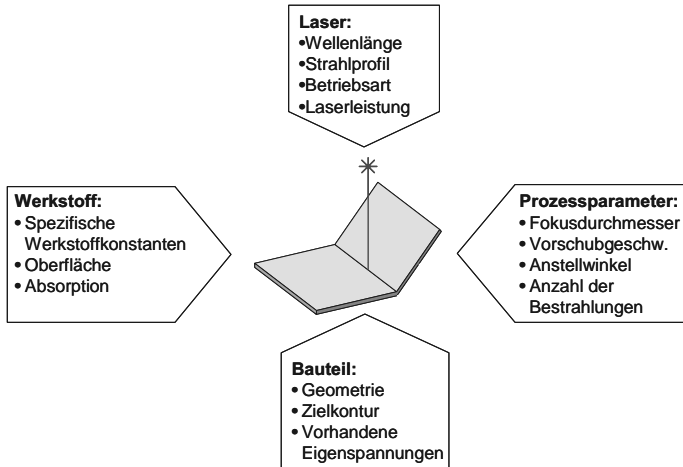


Abbildung 25: Einflussgrößen für das Laserstrahlbiegen

In der einschlägigen Fachliteratur existiert eine beachtliche Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema Laserstrahlumformen. Der Großteil davon ist auf die Untersuchungen an Stählen fokussiert. Aluminiumlegierungen werden nur mit beschichteten Proben (meist Graphit) umgeformt, um die Absorption für das eingestrahlte Laserlicht zu erhöhen. Daher ist eine Quantifizierung dieser Einflussgrößen für metallische, unbeschichtete Aluminiumlegierungen notwendig.

Randbedingung für die Parameterstudie war eine Bestrahlung der Werkstoffoberfläche ohne Anschmelzung. Ein Anschmelzen würde aufgrund der Tendenz zu Heißrissen in der erstarrenden Schmelze bei den verwendeten Legierungen zum lokalen Versagen des Werkstoffes führen. Das betroffene Bauteil wäre Ausschuss.

Das Parameterfeld wird von den regelbaren Größen Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung und Fokussdurchmesser auf der Bauteiloberfläche bestimmt. In Abbildung 26 ist die Korrelation zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Biegewinkel für EN AW 6013 T6 mit chemisch gefräster Oberfläche dargestellt. Die erhöhte Absorption bei EN AW 6056 im gewalzten Zustand (Abbildung 29) ergibt qualitativ einen vergleichbaren Kurvenverlauf, allerdings bei um ca. 30 % reduzierten Laserleistungen. Der Biegewinkel in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit zeigt bei konstanter Laserleistung und Fokusgröße einen charakteristischen Verlauf mit einem Maximum. Wird von diesem Maximum ausgehend die Vorschubgeschwindigkeit erhöht, so geht der erreichbare Biegewinkel zurück. Grund

hierfür ist die Reduzierung der eingebrachten Energie, die indirekt proportional zur Vorschubgeschwindigkeit ist. Bei Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit vom Maximum aus verkleinert sich der Temperaturgradient in Dickenrichtung aufgrund der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium. Der TGM wird dadurch in seiner Wirkung eingeschränkt (MERKLEIN 2001).

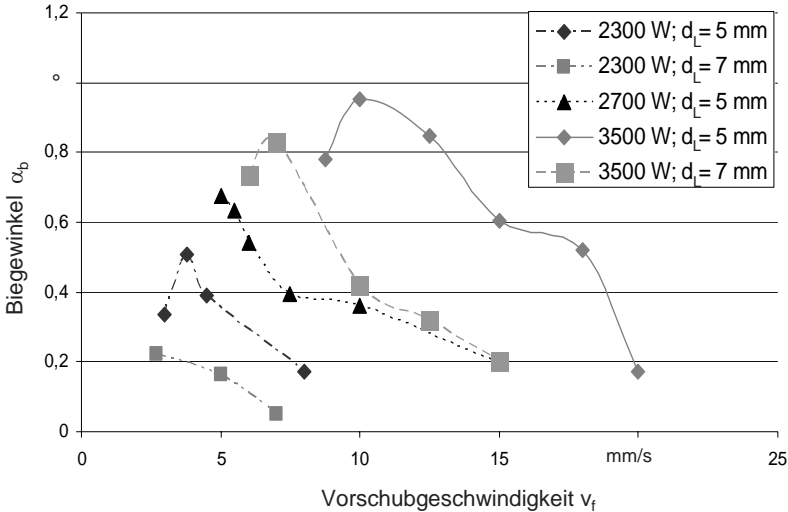


Abbildung 26: Biegewinkel α_b in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_f für die Legierung EN AW 6013 mit 3,2 mm Dicke und chem. gefräster Oberfläche bei verschiedenen Laserleistungen (Nd:YAG) und Fokusburchmessern d_L

Bezüglich der Laserleistung bei konstantem Vorschub und Fokusburchmesser lässt sich keine quantifizierbare Aussage treffen, da auch in diesem Fall der wirksame Temperaturgradient von Bedeutung ist. Qualitativ können mit steigender Laserleistung höhere Biegewinkel erzielt werden.

Der Vergleich der wirksamen Fokusburchmesser bei gleicher Leistung und Vorschubgeschwindigkeit zeigte eine Reduzierung des Biegewinkels bei Vergrößerung des wirksamen Fokusburchmessers. Der Fokusburchmesser ist bei einem rotations-symmetrischen Strahl als die Fläche definiert, auf der 86 % der Nennleistung auf-treffen (HECHT 2005). Die Ursache für den Rückgang des Biegewinkels liegt in der Reduzierung der Leistungsdichte, die indirekt proportional zur wirksamen Fokus-

5 Produktionstechnische Umsetzung

Im fünften Kapitel wird die Untersuchung der Eignung des Verfahrens für die produktionstechnische Umsetzung beschrieben. Anhand von Komplexbauteilen, die mit lokalen Oberflächenmodifikationen, aufgeschweißten Versteifungsrippen (Stringer) und flächigem Materialabtrag in mechanisch gering belasteten Bereichen alle Merkmale in der Luftfahrtindustrie verwendeter Außenhautstrukturen für den Druckrumpf oder die Tragflächen aufweisen, wurden die Einflüsse dieser einzelnen Strukturelemente identifiziert. Ziel ist es, anhand der gewonnenen Kenntnisse eine Optimierung im Produktionsprozess durchführen zu können.

5.1 Umformen von Komplexproben

Rumpf- und Tragflächenschalen in der zivilen Luftfahrt sind großflächige, versteifte Blechstrukturen. Es werden Einzelschalen bis zu 3 m x 10 m Größe gefertigt. Das Grundblech wird durch Stringer ausgesteift, die auf das Bauteil gefügt werden. Das klassische Fügeverfahren ist dabei das Nieten (Abbildung 42). Für moderne Produktionslinien ist das Laserstrahlschweißen für den Einsatz in der Luftfahrtindustrie qualifiziert und etabliert. Der Grund für den Einsatz des Verfahrens liegt dabei vor allem in der Gewichtsreduzierung der so gefertigten Integralstrukturen. Zusätzlich wird die Materialstärke des Grundbleches in mechanisch gering belasteten Bereichen flächig reduziert. Die dabei entstehenden so genannten Taschen werden in der Produktion durch mechanisches oder chemisches Fräsen eingebracht. Die hier betrachteten Komplexbauteile wurden zwischen den Stringern in drei Stufen um maximal ca. 50 % der ursprünglichen Dicke reduziert.



Abbildung 42: Segment einer Rumpfschale, gefertigt in klassischer Nietbauweise (STARON et al. 2007)

Für die produktionstechnische Umsetzung des Laserstrahlbiegens müssen die Einflüsse aus den vorgelagerten Fertigungsschritten untersucht werden. Zum Einsatz kamen zwei verschiedene Komplexproben der Typen I (Abbildung 44) und II (Abbildung 43). Einflüsse, die aus der mechanischen Bearbeitung resultieren, wurden anhand von Komplexproben vom Typ II untersucht. In diese Blechproben mit den Abmessungen 200 mm x 300 mm wurden zwei Taschen eingefräst, in welchen die Ausgangsdicke in drei Stufen auf 50 % der ursprünglichen Materialdicke reduziert wurde. Zusätzliche Oberflächeneffekte konnten durch eloxierte Bereiche auf den Proben dargestellt werden. Diese wiesen eine erhöhte Absorption für die verwendete Laserstrahlung auf.

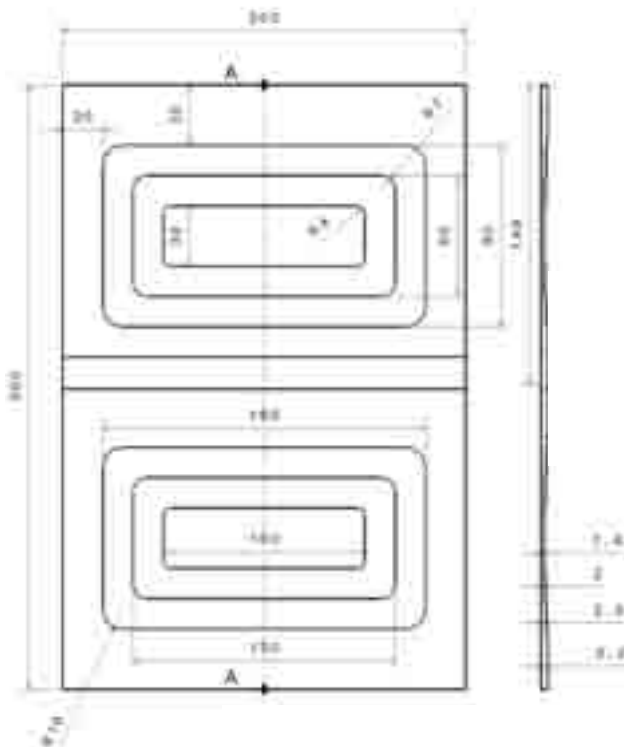


Abbildung 43: Komplexprobe vom Typ II zur Quantifizierung der Einflüsse von Bauteilstärke und Oberflächeneffekten

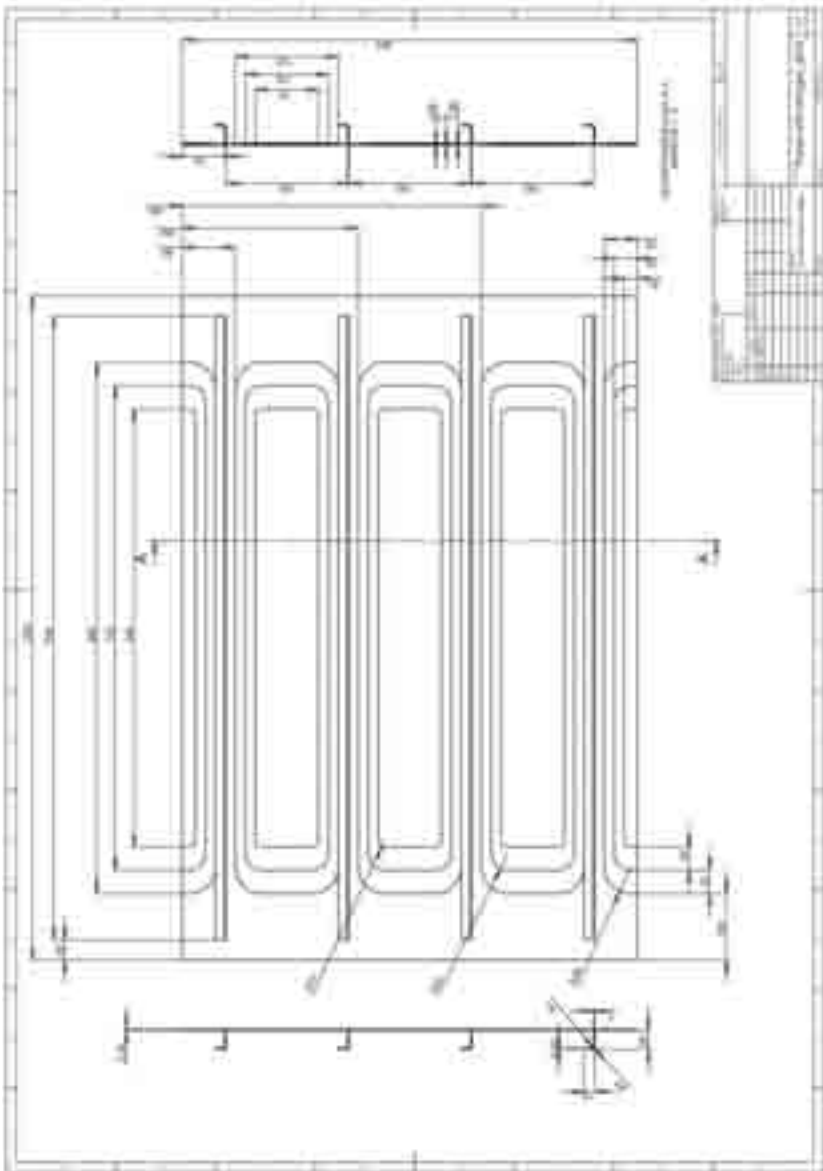


Abbildung 44: Geometrie der Komplexproben vom Typ I mit gefrästen Taschen und laserstrahlgeschweißten Stringern

Für die weitergehende Verfahrensqualifizierung wurden bauteilähnliche Proben (Komplexprobe I) genutzt, die alle angesprochenen Eigenschaften und Merkmale in der Luftfahrtindustrie verwendeter Rumpf- und Tragflächenschalen besaßen (Abbildung 44). Die Größe der verwendeten Proben betrug 1000 mm x 685 mm. Sie enthielten je fünf Taschen, in denen wiederum in drei Stufen die Bauteildicke auf 50 % der Ausgangsdicke reduziert wurde.

Auf die Komplexproben wurden vier Stringer aufgebracht. Um den Einfluss des jeweiligen Fügeverfahrens beurteilen zu können, kamen drei verschiedene Verfahren zum Einsatz:

- Kleben
- Laserstrahlschweißen – Heftnaht am T-Stoß
- Laserstrahlschweißen – Kehlnaht am T-Stoß

Für das Kleben der Stringer wurden beide Fügepartner mit adhäsionsfördernden Primern vorbehandelt. Die Stringer wurden auf dem Grundblech mit Blindnieten oder Passstiften positioniert und fixiert (Abbildung 45). Geklebt wurde mit einem Zweikomponentenklebstoff auf Epoxydharzbasis, der 12 Stunden lang im gepressten Zustand aushärtete. Dieses Fügeverfahren geht somit ohne thermischen Einfluss auf das gesamte Bauteil von statten.



Abbildung 45: Klebeverbindung zwischen Stringer und Grundblech

Das Schweißen der Stringer wurde durch beidseitiges und gleichzeitiges Laserstrahlschweißen der Kehlnähte am Stringerfuß ausgeführt. Für dieses Verfahren wurde ein Optiksystm verwendet, das die Strahlung zweier unabhängiger Laser

gleichzeitig auf beide Schweißpositionen am Stringerfuß fokussiert (GRUSS 2005). Durch das gleichzeitige Schweißen beider Kehlnähte konnte ein Minimum des Schweißverzuges gewährleistet werden. Der Stringer wurde während der Schweißung vom Spannsystem fixiert (Abbildung 46). Der notwendige Schweißzusatz wurde als Profildraht zwischen Stringer und Grundblech geklemmt und während des Schweißprozesses vollständig aufgeschmolzen (Abbildung 47 rechts). Sämtliche Schweißarbeiten an den Schalen wurden bei der Firma EADS Deutschland GmbH in Ottobrunn bei München durchgeführt.

Das Heften mittels Laser stellt kein eigentliches Fügeverfahren dar. In der Fertigung dient es zur Fixierung der Fügepartner als Vorstufe zum Schweißen. Im Querschliff ist zu erkennen, dass lediglich die Grenzflächen Stringer/Zusatzwerkstoff bzw. Zusatzwerkstoff/Grundblech anschmelzen (Abbildung 47). Im Vergleich zum eigentlichen Schweißen ist der Wärmeeintrag erheblich reduziert. Die Heftung erfolgte kontinuierlich über gesamte Bauteillänge bei einem Vorschub von 4 m/min mit 2 x 1200 W Laserleistung. Als Schutzgas wurde Helium verwendet.

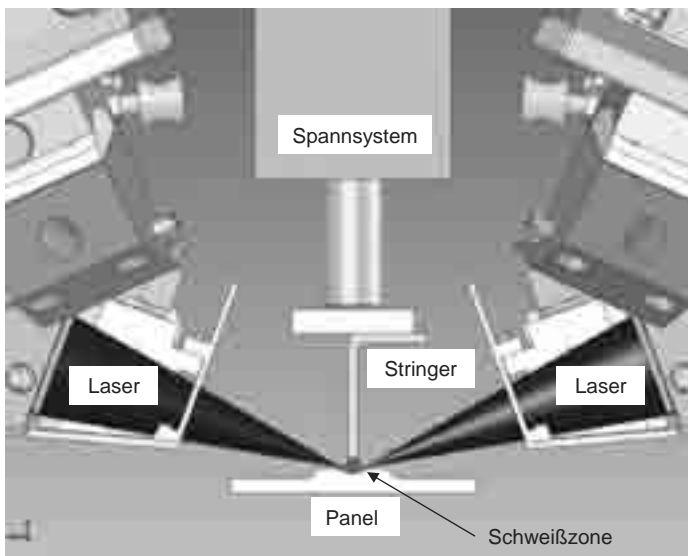


Abbildung 46: Beidseitig-gleichzeitiges Laserstrahlschweißen von Stringern auf Rumpf- und Tragflächenschalen (GRUSS 2005)

6 Wirtschaftliche Bewertung

Für die wirtschaftliche Bewertung des Laserstrahlbiegens im Hinblick auf einen Einsatz in der Luftfahrtindustrie muss die gesamte Prozesskette betrachtet werden, da durch das Laserstrahlbiegen unter Umständen Veränderungen oder Reduzierungen von Prozessschritten möglich sind. Anhand zweier Beispielbauteile, die zwei typischen Produktionsabläufen aus der Fertigung von Rumpf- und Tragflächenschalen entnommen sind, wurde die Kostenabschätzung exemplarisch durchgeführt, wenn in der Fertigung das Laserstrahlbiegen fiktiv eingesetzt werden würde.

Die Anforderungen an die Maschinen sowie die Abschätzung der Fertigungsdauer basiert auf den experimentell ermittelten Prozessparametern, die zur Beurteilung der Verfahrensqualifizierung in den Kapiteln vier und fünf ermittelt wurden. Technische Randbedingung für den Vergleich des Laserstrahlbiegens mit dem jeweils bestehenden und etablierten Verfahren ist der Einsatz gleicher Werkstoffe und Werkstückgeometrien. Die Formgenauigkeiten nach dem Umformen müssen bei beiden Verfahren vergleichbar sein.

6.1 Umformung von Frästeilen

Ein klassischer Fertigungsprozess in der Luftfahrtindustrie ist das Fräsen von Strukturbauteilen mit Freiformflächen aus dem Vollmaterial. Zum einen kann die Struktur dadurch genau den Anforderungen hinsichtlich Belastung und Gewichtsoptimierung angepasst werden, zum anderen werden Fügestellen vor allem bei schlecht schweißbaren Legierungen vermieden.

Als Demonstrationsbeispiel für diese Fertigungsroute wurde eine Tragflächenschale gewählt. Die Abmessungen betragen ca. 8 m x 2 m. In der Produktion wird die Struktur der Schale mit Stringern und Taschen aus Dickblech mit ca. 40 mm Stärke gefräst. Die Struktur enthält 7 Stringer mit einem Abstand von ca. 170 mm. Die Materialstärke zwischen den Stringern beträgt minimal 2,5 mm. Als Material wird EN AW 6056 verwendet. Zum Erreichen der Endkontur muss die Tragflächenschale in zwei Bereichen mit verschiedenen Radien gebogen werden.

In der bestehenden Fertigung wird die gesamte spanende Bearbeitung im geometrisch ebenen Zustand durchgeführt. Das Umformen der fertig bearbeiteten Tragflächenschalen erfolgt in zwei Schritten. In der Vorstufe wird die Grobform durch freies Biegen über die gesamte Bauteillänge angepasst. Die Schale wird mittels einer NC-gesteuerten Transfereinheit im Biegewerkzeug positioniert. Zwischen den

Stringern wird um $0,4^\circ$ immer im Abstand von 25 mm gebogen. Die Biegebearbeitung wird unter Aufsicht von Fachkräften teilüberwacht. Für diese Grobformgebung können inklusive Rüsten und Beladen der Maschine ca. zwei Stunden Bearbeitungszeit pro Bauteil angesetzt werden (Abbildung 76 links).

Die endgültige Form wird im zweiten Schritt durch manuelles Richten erreicht. Das vorgeformte Panel wird dabei mittels Kugelstrahlen einer Negativform angepasst (Abbildung 76 rechts). Für diesen Richtprozess können ca. 20 Stunden Bearbeitungszeit eingeplant werden.

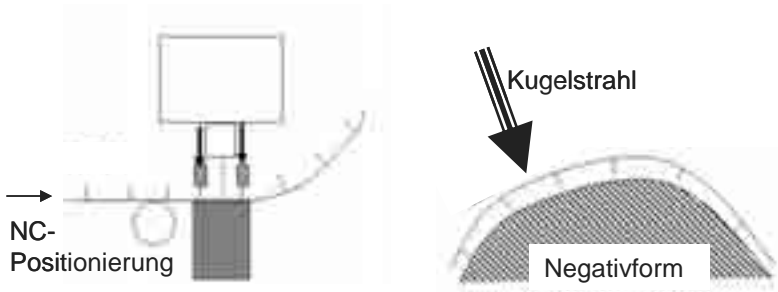


Abbildung 76: Zweistufiger Biegeprozess bei der mechanischen Formgebung: Grobformgebung durch freies Biegen (rechts) und anschließendes Richten durch Kugelstrahlen (links)

Als mögliches Szenarium für die Umformung des gefrästen Panels durch Laserstrahlbiegen wäre ebenfalls ein zweistufiger Prozess denkbar. Ziel dieses fiktiven Einsatzes des Laserstrahlbiegens wäre ein vollständiger Ersatz der mechanischen Umformung und des Richtprozesses. In der Vorstufe soll eine Grobformgebung durch Laserstrahlbiegen durchgeführt werden. Die Parameter werden dabei so gewählt, dass daraus eine ca. 80 %ige Annäherung an die Endkontur erreicht wird. Im zweiten Umformschritt soll die finale Form in einem Richtprozess angepasst werden. Für den Richtprozess wird ein diskreter Regelkreis gemäß Abbildung 75 genutzt. Die Kontur des Bauteils wird erfasst und einem Rechenalgorithmus zur Verfügung gestellt. Dieser Algorithmus bestimmt die Prozessdaten für die weitere Bestrahlung des Panels und übergibt diese an die Maschinensteuerung. Weiter wird angenommen, dass dieser Regelkreis dreimal durchlaufen werden muss. Folgende Prozessparameter liegen der Abschätzung zu Grunde:

- Maximale Laserleistung 3 kW

- Vorschubgeschwindigkeit bei der Umformung 1 m/min
- Vorschubgeschwindigkeit für die Rückstellbewegung 12 m/min
- 49 Biegebahnen (24 bzw. 25 gleiche Bahnen in jede Richtungen)
- Flexibles Spannsystem (automatische Geometrie Anpassung)
- Vorschubgeschwindigkeit bei der Geometriemessung 6 m/min
- 8 Messbahnen
- 10 Biegebahnen pro Richtprozess
- Kontrolle der berechneten Prozessparameter für den Richtprozess durch den Maschinenführer

Auf Basis dieser Prozessparameter können die Prozesszeiten für die Umformung berechnet werden (Tabelle 5). Dazu werden folgende Gleichungen genutzt:

$$t_{\text{LSB}} = n \cdot \frac{l_{\text{B}}}{v_{\text{f}}} + 2 \cdot \frac{l_{\text{Q}}}{v_{\text{R}}} \quad (14)$$

$$t_{\text{M}} = n_{\text{m}} \cdot n_{\text{PM}} \cdot t_{\text{M}} + n_{\text{M}} \cdot \left(\frac{l_{\text{Q}}}{v_{\text{M}}} + \frac{l_{\text{Q}}}{v_{\text{R}}} \right) + 2 \cdot \frac{l_{\text{B}}}{v_{\text{R}}} \quad (15)$$

$$t_{\text{R}} = n_{\text{R}} \cdot \frac{l_{\text{B}}}{v_{\text{f}}} + 2 \cdot \frac{l_{\text{Q}}}{v_{\text{R}}} \quad (16)$$

$$t = t_{\text{LSB}} + 3 \cdot (t_{\text{M}} + t_{\text{R}}) + t_{\text{M}} \quad (17)$$

Tabelle 5: Angenommene Parameter und Prozesszeiten für das Laserstrahlbiegen

| Parameter | Einheit |
|-----------------|----------|
| v_{f} | 1 m/min |
| v_{R} | 12 m/min |
| v_{M} | 6 m/min |
| t_{PM} | 0,6 s |
| l_{B} | 8 m |
| l_{Q} | 2 m |
| n | 49 |
| n_{R} | 10 |
| n_{M} | 20 |
| n_{PM} | 40 |

| Prozesszeiten | Einheit |
|------------------|---------|
| t_{LSB} | 392 min |
| t_{M} | 19 min |
| t_{R} | 80 min |
| t | 711 min |

Um den wirtschaftlichen Vorteil durch die Einführung des Laserstrahlbiegens in die industrielle Produktion bewerten zu können, müssen die Fertigungskosten der herkömmlichen, mechanischen Fertigung mit denen der neuen Fertigungsroute verglichen werden. Da für diese statische Amortisationsrechnung eine Entscheidungsirrelevanz hinsichtlich der Erlösseite vorausgesetzt werden kann, wurden die Kosten auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung abgeschätzt (WÖHE 1996). Zur Verallgemeinerung der Kostenabschätzung, besonders hinsichtlich verschiedener internationaler Produktionsstandorte, müssen die Einflüsse verschiedener Finanzierungsmodelle reduziert werden. Um dies zu erreichen, wurden die Fixkosten auf die jeweiligen Anschaffungskosten der Maschine beschränkt. Weitere Fixkosten, die für Flächenbedarf oder Wartungsarbeiten aufgewendet werden müssen, werden für beide Fertigungsverfahren als gleich abgeschätzt und können damit im Kostenvergleich unberücksichtigt bleiben. Die variablen Kosten berücksichtigen Faktoren, die zusätzlich durch den Betrieb der Maschine entstehen. Neben den Kosten für gebundenes Personal umfassen diese z. B. die Energiekosten. Für den Kostenvergleich beider Verfahren muss die Summe aus fixen und variablen Kosten betrachtet werden.

Im angeführten Beispiel ist die Fräsbearbeitung für beide Prozessketten identisch und kann damit ebenfalls im Kostenvergleich unberücksichtigt bleiben. Die Rentabilität des Laserstrahlbiegens ist dann gegeben, wenn die Kosten der Umformung für eine gleiche Teileanzahl n_T dadurch reduziert werden können:

$$K_{\text{LSB}} \leq K_{\text{MB}} \Leftrightarrow K_{\text{LSB}}^{\text{Fix}} + K_{\text{LSB}}^{\text{Var}} \leq K_{\text{MB}}^{\text{Fix}} + K_{\text{MB}}^{\text{Var}} \Leftrightarrow \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow K_{\text{LSB}}^{\text{Fix}} + n_T \cdot K_{\text{LSB}}^{\text{h}} \cdot t_{\text{LSB}} \leq K_{\text{MB}}^{\text{Fix}} + n_T \cdot K_{\text{MB}}^{\text{h}} \cdot t_{\text{MB}} \Leftrightarrow \quad (19)$$

$$\Leftrightarrow n_T \geq \frac{K_{\text{LSB}}^{\text{Fix}} - K_{\text{MB}}^{\text{Fix}}}{K_{\text{MB}}^{\text{h}} \cdot t_{\text{MB}} - K_{\text{LSB}}^{\text{h}} \cdot t_{\text{LSB}}} \quad (20)$$

Basierend auf der Annahme, dass für die Anschaffung einer Anlage zum Laserstrahlbiegen eine Zusatzinvestition von 1,5 Mio € im Vergleich zu einer konventionellen Biegeanlage zu tätigen ist, ergibt sich für die Differenz der Fixkosten:

$$\Delta K^{\text{Fix}} = K_{\text{LSB}}^{\text{Fix}} - K_{\text{MB}}^{\text{Fix}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ €} \quad (21)$$

Es wird weiter angenommen, dass die Betriebsstundenkosten einer Laseranlage aufgrund des erheblich höheren Energieverbrauchs, höherer Instandhaltungskosten

sowie der Notwendigkeit des Einsatzes besser geschulten Personals im Vergleich zur konventionellen mechanischen Fertigung um 2/3 höher anzusetzen sind. Die Bearbeitungszeiten für den Laserbiegeprozess sind im angeführten Beispiel mit ca. 12 Stunden deutlich kleiner als für den mechanischen Biegeprozess (22 Stunden). Für die Stückzahlen, ab welchen eine Fertigung als rentabel angesehen werden kann, ergibt sich damit:

$$n_T \geq \frac{K_{LSB}^{Fix} - K_{MB}^{Fix}}{K_{MB}^h \cdot t_{MB} - K_{LSB}^h \cdot t_{LSB}} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \text{ €}}{K_{MB}^h \cdot 22 \text{ h} - 5/3 \cdot K_{MB}^h \cdot 12 \text{ h}} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \text{ €}}{2 \text{ h} \cdot K_{MB}^h} \quad (22)$$

Ausgehend von Betriebsstundenkosten von 75 €/h für eine Biegeanlage ergeben sich damit Stückzahlen von mehr als 10.000 gefertigten Einzelschalen. Aufgrund angenommener Fertigungszahlen in der Luftfahrtindustrie von ca. 500 Flugzeugen pro Jahr ergibt sich damit eine Mindestlaufzeit der Anlage von 10 Jahren, wenn das Laserstrahlbiegen für ein Schalensegment eines Flugzeugtyps verwendet wird.

6.2 Umformung von Fügeteilen

Die anhaltende Preissteigerung von Rohstoffen wirkt sich drastisch auf die Produktionskosten aus. Dies gilt vor allem für Produktionsprozesse mit sehr hohem Abtrag. Gerade die Fertigung von Rumpf- und Tragflächenschalen, die im Falle von Frästeilen (Abschnitt 6.1) bis zu 90 % Zerspanungsanteil aufweisen kann, stellt hier einen enormen Kostenfaktor dar. Ein mögliches Szenarium, das sich zum einen durch eine maximale Werkstoffausnutzung im Sinne eines minimalen Anteils spanender Bearbeitung auszeichnet, zum anderen aber minimalen Massenzuwachs im Bereich der Fügeverbindung aufweist, stellt die Bauweise von Schalen als Füge teil dar. Als Fügeverfahren kommt dabei das Laserstrahlschweißen zum Einsatz, da durch dieses Verfahren ein minimaler Wärmeeintrag ins Bauteil und damit nur eine minimale Beeinflussung des Werkstoffes gewährleistet werden kann.

In der derzeitigen Fertigung wird dieses Verfahren bereits praktiziert. Der Fertigungsverlauf stellt allerdings noch sehr hohe Anforderungen an die einzelnen Bearbeitungsschritte.

Als Demonstrationsbeispiel wird eine Rumpfschale gewählt. Sie hat als Zielgeometrie eine einheitliche Biegung mit einem Radius von 2800 mm. Die Abmessungen des flachen Ausgangsbauteils betragen ca. 8 m x 2 m. Als Werkstoff kommt EN AW 6013 mit einer Stärke von 3,2 mm zum Einsatz.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Zwang zur Reduzierung von Emissionen erfordert in der Luftfahrtindustrie den konsequenten Einsatz von Leichtbaustrukturen. Für die Produktion ergeben sich diesbezüglich Anforderungen hinsichtlich eines möglichst kostengünstigen, robusten und einfach transferierbaren Fertigungsprozesses. Gegenüber den herkömmlichen Nietstrukturen können dabei z. B. für Rumpf- und Tragflächenschalen Gewichtseinsparungen durch die Verwendung von geschweißten Integralstrukturen ermöglicht werden. Durch den Einsatz des Laserstrahlbiegens als flexibles Umformverfahren kann in der Fertigung dieser Komponenten in Folge einer Reduzierung der Anzahl und der Komplexität der Fertigungsschritte eine Kostenreduzierung erreicht werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, das Laserstrahlbiegen versteifter Aluminiumstrukturen hinsichtlich der Anforderungen in der Luftfahrt zu untersuchen und für die Anwendung zu entwickeln.

Die Basis der Forschungsarbeit war die Untersuchung des Umformpotenzials von Aluminiumlegierungen, die typischerweise in der Luft- und Raumfahrt verwendet werden. Die Randbedingung aus produktionstechnischer Sicht war dabei die Umformung metallischer Oberflächen, um die Verwendung absorptionssteigernder Hilfsbeschichtungen in der Fertigung zu vermeiden. Die Untersuchungen zeigten, dass die geforderten Biegeradien beim Einsatz handelsüblicher Festkörperlaser bereits bei einer Einfachbestrahlung paralleler Biegebahnen erreicht werden können.

Der nächste Schritt für die Umsetzung ist die werkstofftechnische Qualifizierung des Verfahrens, die in der Luftfahrtindustrie durch den hohen experimentellen Aufwand und die damit verbundenen hohen Kosten charakterisiert ist. Um das Risiko für die Finanzierung dieser Qualifikation minimieren zu können, wurden die Auswirkungen des Laserstrahlbiegens auf die charakteristischen Werkstoffeigenschaften betrachtet. Die Untersuchungen zum mechanischen Verhalten der verwendeten Legierungen zeigten, dass die statischen Eigenschaften Härte und Festigkeit bei einmaliger Bestrahlung keine Veränderung gegenüber dem Grundwerkstoff erfahren. Die in der Luftfahrt besonders wichtigen dynamischen Eigenschaften Dauerfestigkeit und Risswachstum konnten verfahrensbedingt nur nach doppelter Bestrahlung (biegen und rückbiegen) untersucht werden. Trotz des doppelten Wärmeeintrags blieben beide Eigenschaften in einem vorgegebenen Rahmen, d. h. es kam zu einer Reduzierung um maximal 10 %. Die Beständigkeit gegenüber interkristalliner

8 Literaturverzeichnis

ABED et al. 2005

Abed, E.; Edwardson, S. P.; Dearden, G.; Watkins, K. G.: Closed Loop 3 - Dimensional Forming of Developable Surfaces. In: Vollertsen, F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Workshop on Thermal Forming (IWOTE'05). Bremen, 2005. Bremen: BIAS Verlag 2005. ISBN: 3-933762-16-2.

AEROSUISSE 2007

N. N.: Luftverkehr und Klimawandel
<<http://www.aerosuisse.ch/docsAero/Klimawandel%20Positionspapier-%2019.6.2007.pdf>> - 01.10.2007.

ALLMEIER 2005

Allmeier, S.: Untersuchung von Schweißeigenspannungen an Aluminiumkonstruktionen. Diss. Technische Universität München (2005).

ANDERHOLM 1970

Anderholm, N.: Laser-generated stress waves. Appl. Phys. Lett 16 1970 / 3 (1970), S. 113-115.

ARNOLD 2005a

Arnold, B.: Freies Internetportal zum Thema Korrosion
<<http://www.werkstoffe-korrosion.de>> - 1.10.2005.

ARNOLD 2005b

Arnold, B.: Fachinformationsportal zu Korrosion und Korrosionsschutz
<<http://www.korrosion-online.de>> - 1.10.2005.

ASSMANN 2006

Assmann, B.: Technische Mechanik Band 2: Festigkeitslehre. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2006.

ASTM B 117

ASTM B 117: Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken (US): ASTM International 2003.

ASTM E 466

ASTM E 466: Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken (US): ASTM International 2002.

VOLLERTSEN 2005

Vollertsen, F.: Thermal Bending: History and Perspectives. In: Vollertsen, F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Workshop on Thermal Forming (IWOTE'05). Bremen, 2005. Bremen: BIAS Verlag 2005. ISBN: 3-933762-16-2.

VÖLLNER 2004

Völlner, G.: Prozessparameterermittlung für das Laserstrahlumformen von Luftfahrt-Aluminiumlegierungen. Diplomarbeit, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften - Technische Universität München (2004).

VON BUSSE et al. 2005

von Busse, A.; Paschko, S.; Bunte, J.; Fargas, M.; Ostendorf, A.: Laser-Based Thermal Forming of Shape Memory Alloy Components. In: Vollertsen, F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Workshop on Thermal Forming (IWOTE'05). Bremen, 2005. Bremen: BIAS Verlag 2005. ISBN: 3-933762-16-2.

WATKINS et al. 2001

Watkins, K. G.; Edwardson, S. P.; Magee, J.; Dearden, G.; French, P.; Cooke, R. L.; Sidhu, J.; Calder, N. J.: Laser Forming of Aerospace Alloys. Proceedings of the Aerospace Manufacturing Conference 01. Washington, 2001.

WELSINK 2005

Welsink, M.: Planning, realizing and analyzing the experiences of Laser Beam Forming. Diplomarbeit, EADS Innovation Works, München (2005).

WERNER 2006

Werner, E.: Skriptum Werkstofftechnik 2006. Technische Universität München, Garching (2006).

WIDLASZEWSKI 2005

Widlaszewski, J.: Mikro Adjustment by Thermal Upsetting. In: Vollertsen, F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Workshop on Thermal Forming (IWOTE'05). Bremen, 2005. Bremen: BIAS Verlag 2005. ISBN: 3-933762-16-2.

WÖHE 1996

Wöhe, G. (Hrsg.): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Franz Vahlen 1996.

YANJIN et al. 2005

Yanjin, G.; Sheng, S.; Guoqun, Z.; Yiguo, L.: Influence of material properties on the laser forming process of sheet metals. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005), S. 124-131.

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, I.*
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 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klippsmontage 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 *Saverer, 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 *Witbe, 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 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen 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 3-540-54078-8
- 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 Programmabkastens 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.*
Prozuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, 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 *Glas, 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 *Bamm, 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 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, 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/CAM-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 *Zwanger, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, 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
Harthbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
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 *Rackland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, 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 *Kähler, 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 *Krönert, 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 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfäden 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.*
Erfahrungsgleitetete 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 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 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 zu 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 Mößmer, 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 Partnerverbänden
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 Höhn, 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 Schraubverbindungen 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 Breitingner
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 Ehrenstraßeer
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 Schlickerrieder
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 Verfabrbewegungen
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