

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

J. Sigel  
Lasergenerieren metallischer Bauteile  
mit variablem Laserstrahldurchmesser  
in modularen Fertigungssystemen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

# **Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen**

von Dr.-Ing. Julian Sigel  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2006

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2006

ISBN 3-8316-0572-6

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Bedarf an laserintegrierten Fertigungssystemen . . . . .	17
1.2 Ziel dieser Arbeit . . . . .	19
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1 Laserbeschichten versus Lasergenerieren . . . . .	21
2.1.1 Gemeinsames Verfahrensprinzip . . . . .	21
2.1.2 Unterscheidungsmerkmale . . . . .	22
2.2 Lasergenerieren . . . . .	24
2.2.1 Verfahrensmerkmale . . . . .	24
2.2.2 Grund- und Folgeschichten . . . . .	24
2.2.3 Verfahrensvarianten . . . . .	25
2.2.4 Zusatzwerkstoffe . . . . .	31
2.2.5 Ähnliche Verfahren . . . . .	32
2.3 Parametereinflüsse auf den Spurquerschnitt . . . . .	32
2.3.1 Laserstrahlung . . . . .	33
2.3.1.1 Strahlquerschnitt . . . . .	33
2.3.1.2 Leistungsdichte . . . . .	34
2.3.1.3 Leistungsdichteverteilung . . . . .	34
2.3.2 Zusatzwerkstoff . . . . .	36
2.3.2.1 Eigenschaften und Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffs	36
2.3.2.2 Partikeldurchmesser . . . . .	37
2.3.2.3 Partikelform . . . . .	37
2.3.2.4 Pulvernutzungsgrad und Pulverdüsenanordnung . . . . .	38
2.3.3 Wechselwirkungszeit . . . . .	38
2.3.4 Schutzgas . . . . .	39
2.4 Systemtechnik . . . . .	39
2.4.1 Laserintegration in Werkzeugmaschinen . . . . .	39
2.4.2 Pulverförderung . . . . .	40
2.4.3 In-situ-Prozesskontrolle und -regelung . . . . .	41

<b>3 Lasergenerieren variabler Spurquerschnitte</b>	<b>43</b>
3.1 Grundlagen . . . . .	43
3.2 Spezifische Optimierung . . . . .	45
3.2.1 Zielrichtung . . . . .	45
3.2.2 Konstante Parameter . . . . .	47
3.2.3 Variable Parameter und Steuerungsmöglichkeiten . . . . .	48
3.2.4 Pulverzufuhr und Pulvernutzungsgrad . . . . .	50
3.2.5 Werkstoffe . . . . .	53
3.3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen . . . . .	56
3.3.1 Aufschmelzen der Partikel . . . . .	57
3.3.2 Spurentstehung . . . . .	59
3.3.2.1 Spurstart . . . . .	59
3.3.2.2 Spurende . . . . .	65
3.3.3 Schlussfolgerungen für die Bearbeitungsstrategie . . . . .	65
<b>4 Das Konzept eines modularen Fertigungssystems</b>	<b>67</b>
4.1 Modulares Softwarekonzept . . . . .	69
4.2 Steuerungs- und Datenkonzept des Leitrechners . . . . .	70
4.3 Handhabungssystem . . . . .	74
4.3.1 Drehzentrum . . . . .	74
4.3.2 Fräszentrum . . . . .	74
4.4 Laserstrahlquelle . . . . .	74
4.5 Variable Laserbearbeitungsoptik . . . . .	76
4.5.1 Anforderungen . . . . .	76
4.5.2 Optisches Konzept . . . . .	77
4.5.3 Konstruktive Umsetzung . . . . .	79
4.5.4 Justage und Kalibrierung . . . . .	81
4.5.5 Steuerung . . . . .	82
4.5.6 Messwerte . . . . .	82
4.6 Pulverzufuhr . . . . .	84
4.6.1 Pulverförderer . . . . .	84
4.6.2 Steuerung . . . . .	86
4.6.3 Pulverdüse . . . . .	86
4.7 Prozesskontrolle und -regelung . . . . .	87
4.7.1 Temperaturregelung . . . . .	88
4.7.1.1 Detekterter Wellenlängenbereich . . . . .	89
4.7.1.2 Messfeld . . . . .	90
4.7.1.3 Temperaturverteilung . . . . .	91
4.7.1.4 Modellierung des Messsignals . . . . .	93
4.7.1.5 Messwerte . . . . .	96
4.7.1.6 Regelrechner . . . . .	97
4.7.2 Schichtdickenkontrolle . . . . .	98
4.7.2.1 Anforderungen . . . . .	98
4.7.2.2 Sensor . . . . .	100
4.7.2.3 Kalibrierung . . . . .	102
4.7.2.4 Messwerte . . . . .	103

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	9
4.7.2.5    Bewertung des Messsystems . . . . .	104
<b>5    Ergebnisse aus den Laboranlagen</b>	<b>105</b>
5.1    Drehzentrum . . . . .	105
5.2    Fräszentrum . . . . .	109
<b>6    Zusammenfassung</b>	<b>112</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>116</b>
<b>Danksagung</b>	<b>131</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Bedarf an laserintegrierten Fertigungssystemen

Der Laserstrahl hat als Werkzeug in der industriellen Fertigungstechnik einen hohen Stellenwert erlangt. Seine Stärken kommen insbesondere in solchen Anwendungsfällen zum Tragen, in denen hohe Flexibilität bezüglich bearbeitbarer Werkstoffe und Geometrien einerseits, und guter Automatisierbarkeit andererseits gefordert wird. Die Bedeutung der Lasertechnik als „Schlüsseltechnologie“ [1], die neue Möglichkeiten zu erschließen vermag, wird besonders deutlich im Bereich der automatisierten Herstellung von Musterteilen, dem **Rapid Prototyping**<sup>1</sup> [2]: Dieses umfangreiches Themenfeld gewinnt in der industriellen Anwendung zunehmend an Bedeutung, und die Mehrzahl der kommerziell etablierten Rapid Prototyping-Verfahren basiert auf dem Einsatz von Laserstrahlung.

Bei der Herstellung von Kunststoff-Prototypen, zum Beispiel mit dem seit 1984 verfügbaren Verfahren der Stereolithographie, existieren heute Dank intensiver Entwicklungsarbeiten unterschiedlichster Institutionen nur noch geringe Einschränkungen bezüglich der aufbaubaren Geometrie-Vielfalt. Alle Ansätze zur automatisierten Fertigung von Einzelteilen aus **massivem Metall** bieten dagegen zum heutigen Zeitpunkt noch keine vergleichbare geometrische Flexibilität. Am weitesten entwickelt erscheint in dieser Hinsicht das lokale Sintern oder aufschmelzen von Metallpulver in einem Pulverbett mit dem Laserstrahl [3].

Die große Bedeutung, die Musterteile aus Metall zukommt, liegt insbesondere in den breiten und bislang weitgehend unerschlossenen Anwendungsfeldern im Automobil- und Maschinenbau begründet. Die Aussicht auf automatisiert hergestellte Einzelteile, die ohne Zwischenschritte aus dem Zielmaterial Metall gefertigt werden können, lässt in einigen Anwendungsfällen als weiteren Schritt auch die **Produktion kleinerer Stückzahlen**, wie sie zum Beispiel für Klein- oder Nullserien in der Automobilindustrie oder für Sonderanfertigungen im Werkzeug- und Anlagenbau benötigt werden, als mögliche und sinnvolle Anwendung erscheinen. Aber auch für die bereits heute in vielen Industriezweigen zu beobachtenden Bestrebungen, minimale Losgrößen wirtschaftlich herstellen zu können, zeigt den Bedarf an neuen Konzepten seitens der Fertigungstechnik. So werden beispielsweise Kunststoff-Steckverbinder heute bereits in Losgrößen zwischen 100 und 10 000 Stück mittels Selektivem Lasersintern (SLS) und Stereolithographie (SLA) produziert [4]. Langfristig wird es sicherlich auch Produkte oder Komponenten aus dem Maschinen- und Anlagenbau geben, bei denen die

---

<sup>1</sup>Der Begriff Rapid Prototyping wird in dieser Arbeit als Oberbegriff für das gesamten Gebiet des automatisierten Musterteilebaus verwendet und schließt auch Rapid Tooling mit ein.

automatisierte Herstellung von kundenspezifischen Einzelteilen nach Bestelleingang („manufacturing on demand“, „e-manufacturing“, „rapid manufacturing“) wirtschaftlich und sinnvoll sein wird, ähnlich wie es heute zum Beispiel im digitalen Buchdruck bereits realisiert ist [5, 6].

Aus solchen Überlegungen heraus leitet sich der Bedarf an flexiblen Fertigungstechnologien ab, die nicht nur metallische Zielwerkstoffe ohne Zwischenschritte in die gewünschte geometrische Form zu bringen vermögen, sondern die darüber hinaus auch die Möglichkeit bieten, die Bauteile mit **funktionalen Merkmalen** wie zum Beispiel der Härtung von Funktionsflächen oder einer definierten Oberflächenstrukturierung auszustatten. Hier eröffnet sich ein Anwendungsfeld, für das der **Laserstrahl** als flexibles Werkzeug prädestiniert ist, insbesondere **in Kombination mit den konventionellen Methoden der Metallbearbeitung in laserintegrierten Werkzeugmaschinen zur Komplettbearbeitung**, wie sie zum Beispiel in [7] aufgezeigt wird. Die Palette der denkbaren Verfahren reicht in einer solchen Anlage von konventionell spanender oder umformender Bearbeitung über die Vielfalt der etablierten Laserverfahren wie Schweißen, Schneiden, Härteten, Umschmelzen, Legieren, Beschichten, Abtragen (Strukturieren) oder Beschriften bis hin zu neueren laserbasierten Fertigungstechniken wie dem Lasergenerieren.

Dabei ist der Ansatz laserintegrierter flexibler Fertigungssysteme in seiner vollen Ausprägung als **umfassender Rahmen für untergeordnete Themenfelder** wie zum Beispiel laserintegrierte Komplettbearbeitung, Reparaturbeschichtung verschlissener Bauteile oder auch Rapid Prototyping zu verstehen. Das Themenfeld „Rapid Prototyping metallischer Teile“ eignet sich dabei aufgrund seiner Anforderung nach höchster geometrischer Flexibilität sehr gut dazu, weitere Schritte in Richtung laserintegrierter flexibler Fertigungssysteme zu initiieren.

Natürlich ist es weder notwendig noch zweckmäßig, *alle möglichen* Verfahrensvarianten in *einem einzigen* Fertigungssystem vorzuhalten. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Handhabbarkeit sollte die Zusammensetzung eines solchen Systems viel mehr auf die Anforderungen **einer Produkt- oder Teilefamilie** abgestimmt werden, wie sie branchen- oder produktpalettenspezifisch in der fertigungstechnischen Praxis meist anzutreffen ist. Beispiele für solche Teilefamilien sind Wellen, Blechteile oder Gesenke. Dies führt zu einem **modularen Aufbau flexibler Fertigungssysteme** sowohl hinsichtlich der Maschinen- als auch der Steuerungstechnik, der es erlaubt, ein spezifisches System aus einem „Baukasten“ vorhandener Funktionskomponenten zusammenzustellen.

Dem **Lasergenerieren** kommt zunächst sowohl im Zusammenhang mit Rapid Prototyping, als auch im Hinblick auf laserintegrierte Werkzeugmaschinen eine besondere Bedeutung zu. Zum einen ist es vom Prinzip her vielen der etablierten Rapid Prototyping-Verfahren ähnlich, weil neues Bauteilvolumen schichtweise aufgebaut wird. Dadurch können einige bereits bewährte Ansätze und Lösungen, zum Beispiel aus dem Software-Bereich, adaptiert werden. In einer Werkzeugmaschine integriert, bietet es neue Möglichkeiten bei der Auswahl der Halbzeuge und bei Verfahrensfolgen aus additiven und subtraktiven Bearbeitungsschritten. Daraus resultieren **wesentliche Erweiterungen der Grenzen** bisher konventionell fertigbarer Geometrien zum Beispiel für Hinterschneidungen oder für nicht-zylinderförmige Hohlräume und Bohrungen, die durch konventionelle Dreh- oder Bohrbearbeitung nicht ohne weiteres herstellbar sind.

## 1.2 Ziel dieser Arbeit

Die Vielzahl der im folgenden **Kapitel 2** betrachteten Veröffentlichungen zum Lasergenerieren zeigt das Potenzial auf, das von unterschiedlichsten Institutionen weltweit in dieser Möglichkeit zur schnellen Herstellung komplexer Metalleile gesehen wird. Ein vermehrter Einsatz dieser Technologie über das bis jetzt genutzte Maß an kommerziellen Nischenanwendungen hinaus setzt jedoch voraus, dass zum einen die **geometrischen Freiheitsgrade** des Prozesses weiter ausgebaut und zum anderen die praktische **Handhabbarkeit** zur Nutzung der flexibleren Möglichkeiten erleichtert wird. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf diesen beiden Feldern eine Beitrag zu leisten.

Zwar existieren aus den Arbeiten zum technologisch verwandten Laserbeschichten bereits eine breite Wissensbasis sowie verschiedene Prozessmodelle; für einige spezifische Aspekte, in denen sich das Lasergenerieren vom Laserbeschichten unterscheidet, sind jedoch noch weitere Untersuchungen zur Verbreiterung des bisherigen Einsatzspektrums notwendig. Dies betrifft vor allem eine **Erweiterung der geometrischen Flexibilität** des Prozesses und eine Erhöhung von Form- und Maßgenauigkeiten der generierten Bauteile. Durch die in dieser Arbeit gezeigte Möglichkeit, den Querschnitt einer lasergenerierten Spur gezielt zu beeinflussen, erlangt das Verfahren zusätzliche Flexibilität für unterschiedliche Anwendungsfälle. Wie bei den spanenden Fertigungsverfahren üblich, lässt sich damit auch der Materialauftrag in „Schrupp-“ und „Schlichtprozesse“ unterteilen, je nach dem, ob eine hohe Volumenleistung mit hoher Laserleistung, großem Strahldurchmesser und hohem Pulvermassenstrom gefordert wird, oder ob feine Strukturen nahe der Bauteil-Endkontur mit kleinem Strahldurchmesser generiert werden sollen. Des Weiteren kann im Falle des Reparaturbeschichtens der notwendige Spurquerschnitt optimal an das jeweils vorliegende Bauteil angepasst werden, zum Beispiel an großvolumige Gesenke oder an schmale Messerschneiden. Ist es – wie in dieser Arbeit vorgestellt – zudem möglich, den Spurquerschnitt *während* des Materialauftrags gezielt kontinuierlich zu verändern, so lässt sich die ohne Nachbearbeitung erzielbare Konturtreue generierter Bauteile weiter maximieren, was sich unmittelbar in erheblichen Einsparungen an Kosten und Zeit sowie einem minimalen Ressourcenverbrauch niederschlägt.

**Kapitel 3** befasst sich deshalb mit den grundlegenden Zusammenhängen bei einer **gezielten Variation der Spurquerschnitte während des Lasergenerierens**. Ausgehend von der Vielzahl der signifikanten Prozessparameter wird ein praxistauglicher Rahmen aufgezeigt, in dem sich die Beeinflussung des Spurquerschnitts mit reproduzierbarem Ergebnis und mit in der Praxis vertretbarem gerätetechnischen Aufwand realisieren lässt. Weiterhin werden die Vorgänge beim Ein- und Ausschalten des Laserstrahls auf dem Werkstück analysiert. Insbesondere bei der Erzeugung von unterbrochenen Strukturen spielen diese als kurzzeitig instationäre Prozessphasen eine bedeutende Rolle, so dass sie hinsichtlich der erzeugten Geometrien einer besonderen Aufmerksamkeit bedürfen.

In **Kapitel 4** wird ein Konzept für modulare laserintegrierte Fertigungssysteme vorgestellt. Als **systemtechnischer Ansatz** wurden im labormaßstäblichen Rahmen dieser Arbeit steuerungstechnisch autarke Module entwickelt, die – je nach Bearbeitungsaufgabe – entsprechend eines „Baukastens“ gezielt ausgewählt und in spezifischen Anlagen miteinander kombiniert

werden können. Die Grundlage bildet dabei jeweils ein geeignetes Handhabungssystem, das die Teile zur Bearbeitung aufnimmt. Ideal ist dabei der Einsatz von konventionellen Werkzeugmaschinen, die mit der modularen Laserintegration sowohl konventionell spanende als auch lasergestützte Bearbeitungsschritte in einer Aufspannung erlauben und damit die Voraussetzungen für eine flexible Fertigungsfolge bieten.

Zu den realisierten Modulen, die je nach Anwendungsfall miteinander kombiniert werden können, gehört eine **variable Laserbearbeitungsoptik**, mit der sich die Spurbreitenvariation in der Praxis realisieren lässt. Diese Optik ist dabei so ausgelegt, dass neben dem Lasergenerieren auch andere Laser-Anwendungen durchgeführt werden könnten.

Um das Lasergenerieren in einem breiteren Spektrum praktischer Anwendungen einsetzen zu können, muss die Stabilität des Prozesses und die Reproduzierbarkeit des Bearbeitungsergebnisses gewährleistet sein. Da die Ergebnisqualität in diesem relativ empfindlichen Prozess jedoch wesentlich von äußeren Einflussfaktoren wie zum Beispiel Bauteilgeometrie oder -temperatur beeinflusst wird, kann die geforderte Stabilität nur mit geeigneten Methoden zur **Prozesskontrolle und -regelung** gewährleistet werden. Hierzu werden Module für die Regelung der Schmelzbadtemperatur und eine In-situ-Kontrolle der Schmelzbadhöhe vorgestellt.

Als Abschluss werden die auf den Laboranlagen erzielten **Ergebnisse in Kapitel 5** zusammengefasst. Als Handhabungssysteme eingesetzt wurden in dieser Arbeit ein Drehzentrum sowie ein HSC-Fräszentrum. Gezeigt werden für beide Anlagen typische Bauteilgeometrien, die die spezifischen Möglichkeiten und Grenzen dokumentieren.