

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

D. Breitling  
Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und  
Bohren mit ultrakurz gepulster Laser-  
strahlung

# **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.

# **Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung**

von Dr.-Ing. Detlef Breitling  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2009

D 93

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 Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2010

ISBN 978-3-8316-0960-4

Printed in Germany

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

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhalt</b>	<b>7</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>17</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>21</b>
1.1 Laser in der Fertigungstechnik . . . . .	21
1.2 Abtragende Laserverfahren . . . . .	22
1.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	25
<b>2 Grundlagen abtragender Laserverfahren</b>	<b>27</b>
2.1 Abtragen mit gepulster Laserstrahlung . . . . .	27
2.1.1 Energieeinkopplung . . . . .	27
2.1.2 Laserabtragen als thermischer Prozess . . . . .	28
2.1.3 Wirkung ultrakurzer Laserpulse . . . . .	30
2.2 Laserinduzierte Plasmen . . . . .	32
2.2.1 Absorptionsmechanismen . . . . .	33
2.2.2 Dynamik laserinduzierter Plasmen . . . . .	36
2.2.3 Gasdynamische Stoßwellenexpansion . . . . .	42
2.3 Modellvorstellungen zum Laserbohren . . . . .	44
2.3.1 Energieeinkopplung . . . . .	45
2.3.2 Materialabtrag . . . . .	46
2.3.3 Schmelzdynamik . . . . .	46
2.3.4 Gasdynamik und ganzheitliches Prozessmodell . . . . .	47
2.3.5 Phänomenologisches Bohrmodell – „Hirscheegg-Modell“ . . . . .	48
2.4 Materialabtrag bei kurzen und ultrakurzen Pulsen . . . . .	51
2.4.1 Axiale Abtragsraten und Bohrfortschritt . . . . .	51
2.4.2 Radiale Bohrlochaufweitung und Kapillarausbildung . . . . .	56
<b>3 Experimentelle Methoden</b>	<b>60</b>
3.1 Lasersysteme . . . . .	60

3.2	Energietransmission . . . . .	62
3.2.1	Transmission im Abtragsprozess . . . . .	62
3.2.2	Transmission des Luftdurchbruchs . . . . .	64
3.3	Spektroskopie des Strahlprofils . . . . .	67
3.4	Bildgebende Verfahren zur Plasmacharakterisierung . . . . .	69
3.4.1	Lumineszenzphotografie . . . . .	69
3.4.2	Schattenphotografie . . . . .	71
3.4.3	Resonanzabsorptionsphotografie . . . . .	72
3.4.4	Streustrahlungsfotografie . . . . .	73
3.4.5	Versuchsanordnung . . . . .	75
3.4.6	Interferometrie . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Luftdurchbruch und nichtlineare Wechselwirkung</b>	<b>81</b>
4.1	Gasdurchbruch im Fokus ultrakurzer Laserpulse . . . . .	81
4.2	Entstehung des Luftdurchbruchs . . . . .	84
4.3	Luftdurchbruch als hochionisiertes Plasma . . . . .	89
4.4	Fernfeld-Strahlprofile fokussierter ultrakurzer Pulse . . . . .	91
4.5	Wellenlängenkonversion im Luftdurchbruch . . . . .	94
4.6	Entstehungsregion der Conical Emission . . . . .	98
4.7	Einfluss der Atmosphäre auf die Wechselwirkung . . . . .	99
4.8	Ursache der Conical Emission . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Dynamik der Materialdampf- und Plasmawolken</b>	<b>105</b>
5.1	Stoßwellenexpansion und Energieinhalt . . . . .	105
5.2	Dampfausbreitung – Verbleib der Ablationsprodukte . . . . .	108
5.3	Charakterisierung von Prozessparametern . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Einflüsse repetierend gepulster Bearbeitung</b>	<b>118</b>
6.1	Transmissionsmessungen bei Pulszügen . . . . .	118
6.2	Ablationsdynamik für unterschiedliche Pulszahlen . . . . .	124
6.3	Einfluss der Repetitionsrate . . . . .	127
6.4	Spektroskopie am laserinduzierten Plasma . . . . .	130
6.5	Erweiterung des Bohrmodells . . . . .	133
<b>7</b>	<b>Einflüsse der Umgebungsatmosphäre</b>	<b>135</b>
7.1	Abtragsraten bei reduziertem Atmosphärendruck . . . . .	135
7.2	Atmosphäreinfluss auf die Bohrungsgeometrie . . . . .	139
7.3	Effizienzsteigerung beim Laserbohren . . . . .	142
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>148</b>

---

<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>Anhang</b>	<b>181</b>
A.1 Sedov–Taylor-Modell zur Stoßwellenausbreitung . . . . .	181
A.1.1 Gültigkeitsbereich des Modells . . . . .	181
A.1.2 Darstellung der experimentellen Expansionskurven . . . . .	182
A.1.3 Auswertung der Stoßwellenreichweite . . . . .	183
A.2 Ergänzende experimentelle Daten für repetierend gepulste Bearbeitung .	184

# 1 Einleitung

## 1.1 Laser in der Fertigungstechnik

Laser haben sich in den letzten Jahren als äußerst vielseitige Werkzeuge für eine breite Palette von Anwendungen in der industriellen Fertigungstechnik und der Medizintechnik erwiesen [1–5]. Nicht zuletzt dadurch, dass zusätzlich zu den Erfolgen in etablierten Bereichen durch den Fortschritt der Lasertechnik immer neue Anwendungsfelder erschlossen werden können, gilt sie als Schlüsseltechnologie, der noch erhebliches Wachstumspotenzial bescheinigt wird [6, 7]. Gegenüber herkömmlichen Verfahren besitzt die Lasertechnik im industriellen Einsatz oft Vorteile hinsichtlich Qualität, Produktivität, Automatisierbarkeit oder Vielseitigkeit der Bearbeitung. Diese gehen jedoch häufig mit höheren Aufwendungen bei der Investition oder für die Wartung einher, die es zunächst einmal zu kompensieren gilt. An Laserfertigungsverfahren werden daher in der Regel besonders hohe Anforderungen bezüglich der Bearbeitungsqualität und -effizienz gestellt.

Die Mikromaterialbearbeitung mit Lasern umfasst alle Verfahren der abtragenden Feinbearbeitung mit Laserstrahlung, Lasermarkieren und -beschriften, lithografische Prozesse. Ebenso gehören eine Vielzahl von laserunterstützten Abscheide- und Beschichtungsverfahren und Methoden dazu, die mit einer laserinduzierten, selektiven chemischen oder optischen Modifikation des bearbeiteten Materials einher gehen [8, 9]. In der Folge sollen hiermit jedoch nur Verfahren bezeichnet werden, denen einen Materialabtrag durch fokussierende Beaufschlagung mit gepulster Laserstrahlung zu Grunde liegt. Dazu zählen beispielsweise die abtragende Oberflächenstrukturierung, das Laserbohren und das Laserpräzisionsschneiden. In diesen Anwendungsfeldern zählen zu den Konkurrenzverfahren der Lasertechnik neben mechanischen Fertigungstechniken vor allem nass- und elektrochemische Verfahren, aber auch die Bearbeitung mit Elektronenstrahlen. Je nach Anforderungsprofil der einzelnen Anwendung zeichnet sich die Laserbearbeitung gegenüber den konkurrierenden Techniken durch einen oder mehrere der folgenden Vorzüge aus.

Zunehmend werden harte oder spröde Materialien wie Keramiken, Diamant oder faserverstärkte Verbundwerkstoffe auf Grund ihrer hohen Härte, Festigkeit, Temperatur-



oder chemischen Beständigkeit oder ihres vergleichsweise geringen spezifischen Gewichts in der Fertigungs- oder Medizintechnik interessant. Sie sind jedoch oft nicht oder nur mit hohem Aufwand mechanisch zu bearbeiten. Da sie zudem in der Regel allenfalls geringfügig elektrisch leitfähig sind, scheidet die Bearbeitung mit Elektronenstrahlen oder mit elektrochemischen Verfahren wie der Funkenerosion ebenfalls aus. Laserstrahlen hingegen erlauben die Bearbeitung nahezu beliebiger Materialien [10]. Anwendungen zur Fertigung keramischer Komponenten im Motoren- und Turbinenbau und von Düsenplatten für die Textilfaserherstellung [11–15] demonstrieren dies ebenso wie Laserschneid-, Laserpolier- und Laserbohrverfahren zur Herstellung von Diamantwerkzeugen [10, 16–19].

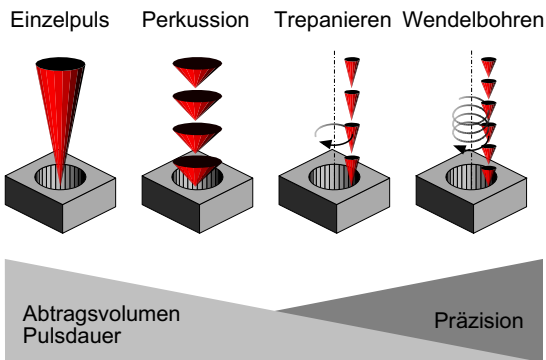
Bei der Metallbearbeitung stoßen mechanische Fertigungsverfahren in der Regel schon bei Strukturgrößen unterhalb einiger hundert Mikrometer an ihre Grenzen, Werkzeugverschleiß wird zunehmend zum Problem. Laser-, chemische und Elektronenstrahlverfahren sind hier die erreichbaren Strukturgröße und zum Teil auch die Präzision betreffend im Vorteil. Für die Laserbearbeitung gegenüber Elektronenstrahlprozessen spricht oft zusätzlich, dass sie keine aufwendige Vakuum-Prozessumgebung benötigt. Gegenüber chemischen und elektrochemischen Verfahren zählen zu den Vorteilen des Laser die kontaktfreie Bearbeitung ohne Werkzeugverschleiß sowie die hohe Flexibilität, die der Laserstrahl hinsichtlich der geometrischen Zugänglichkeit der Bearbeitungsposition bietet [20, 21]

## 1.2 Abtragende Laserverfahren

Gerade wenn ein Prozess eine hohe Produktivität erfordert, ist die Verschleißfreiheit des Werkzeugs oft ein entscheidender Vorteil der Laserbearbeitung. Dies gilt beispielsweise im Flugzeugbau für das Einbringen von Millionen kleiner Bohrungen in Bleche, die der Absaugung der Grenzschicht mit Verwirbelungen an Flugzeugoberflächen dienen, wodurch eine Reduzierung des Luftwiderstands und damit des Kraftstoffverbrauchs möglich wird [22]. Gleichermaßen können Kraftstofffilter im Automobilbau mit jeweils einigen Tausend lasergebohrten Löchern schnell in großer Stückzahl perforiert werden [23, 24]. Die Vielseitigkeit bei der Positionierung und Orientierung des Laserstrahls erlaubt das Einbringen von Schmierbohrungen in Motorkomponenten [24, 25] und Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln [22, 26, 27] auch unter spitzen Winkeln. Für die letzteren können in einem kombinierten Prozess aus Laserbohren und 3D-Abtragen auch sog. Formbohrungen (*engl.: shaped holes*) mit angepassten Einzugsgeometrien gefertigt werden. Im Formenbau zur Fertigung kleiner Spritzgussteile für den Modellbau

erlaubt die Lasertechnik durch die flexible Strahlführung und -orientierung die produktive Herstellung verschiedenster dreidimensionaler Abtragsstrukturen mit hoher Formtreue [28]. Ebenso ist beim Einbringen kleinster, flacher Strukturen in tribologische Funktionsflächen, beispielsweise in die Oberflächen von Gleitlagern und Zylinderlaufbuchsen [29], die leichte Erreichbarkeit des Bearbeitungsorts durch den Laserstrahl ein Pluspunkt der Laserbearbeitung. Präzision ist schließlich in der Drucktechnik bei der Direktstrukturierung von Druckklichschees oder von Prägewalzen zur Oberflächenveredelung gefragt [30, 31]. Hohe Formtreue und Wiederholgenauigkeit bei zunehmender Miniaturisierung sind auch Kernvorgaben beim Präzisionsbohren, wobei insbesondere die hohen Anforderungen der Dieseleinspritztechnik im KFZ-Bereich in den letzten Jahren Schrittmacher der Weiterentwicklung des Laserbohrens waren. Heute sind Bohrungsdurchmesser unterhalb von  $100\ \mu\text{m}$  in 1 mm dickem Material Stand der Technik [32–36]. Durch eine optimierte Systemtechnik können am Bohrungsaustritt sogar größere Durchmesser erzielt werden als am Eintritt [37, 38].

Am Beispiel des Laserbohrens wird auch deutlich, dass die Forderungen an den Fertigungsprozess nach Qualität der Bearbeitung auf der einen Seite und Produktivität auf der anderen sich oft gegensätzlich gegenüber stehen. In aller Regel muss zur Steigerung der Präzision die pro Puls ablatierte Materialmenge reduziert werden. Für jede Anwendung muss so von Neuem eine Abwägung stattfinden, wobei zunächst die Wahl der optimalen Bearbeitungsstrategie maßgeblich ist. Gängigerweise werden die vier in Bild 1.1 schematisch dargestellten Verfahren unterschieden. Gemeinsam ist allen Verfahren die Verwendung einer gepulsten Laserstrahlquelle, die durch eine entsprechende Pulsüberhöhung die zum Abtrag notwendige hohe Leistungsdichte bereitstellt. Beim Einzelpulsbohren finden blitzlampengepumpte Festkörperlaser mit Pulsdauern von rund  $10\ \mu\text{s}$ – $10\ \text{ms}$  (lange Pulse) und Leistungsdichten oberhalb von  $10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$  Anwendung,



**Bild 1.1:** Schematische Darstellung der wichtigsten Verfahrensstrategien zum Bohren mit Laserstrahlung. Bei repetierend gepulsten Verfahren erlaubt die Reduzierung von Pulsdauer und Abtragsvolumen je Puls eine Präzisionssteigerung. Durch eine gezielte überlagerte Strahlbewegung können Maßhaltigkeit und Materialaustrieb noch weiter verbessert werden (nach [39]).

die das Durchbohren von Materialstärken bis zu einigen Millimetern mit einem einzelnen Puls ermöglichen. Bis zu 100 Bohrungen pro Sekunde können mit diesem Verfahren gefertigt werden. Insbesondere bei der Bearbeitung von Metallen wird das Material vorwiegend in schmelzflüssiger Form ausgetrieben, so dass in der Regel qualitätsbeeinträchtigende Schmelzanhaftungen an den Bohrungswänden und der Materialoberfläche zurückbleiben [10, 40, 41]. Eine Qualitätsverbesserung lässt sich durch eine Verkürzung der Schmelze erzeugenden Einwirkdauer des Laserstrahls, d. h. der Pulsdauer, erzielen. Zum Einsatz kommen hierbei Festkörperlaser, die mittels Güteschaltung Pulsdauern zwischen 1 ns und rund 1  $\mu$ s (kurze Pulse) emittieren. Auch Excimerlaser liegen mit Pulsen von von einigen 10 ns Dauer in diesem Bereich. Obgleich diese Strahlquellen mit  $10^9$ – $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> höhere Pulsspitzenleistungen erreichen, sinkt in der Regel die Pulsenenergie gegenüber langen Pulsen ab, was zu einer Reduzierung des Abtragsvolumens für einen einzelnen Puls führt. Durch die Beaufschlagung derselben Bearbeitungsstelle mit mehreren Pulsen bei Repetitionsraten bis zu einigen Kilohertz können auch beim Perkussionsbohren größere Bohrtiefen erzielt werden. Schwankungen von Energie und Intensitätsprofil der Laserpulse, aber auch Unregelmäßigkeiten im Abtragsprozess sowie im Materialaustrieb führen auch beim Perkussieren noch zu ungleichmäßigen Bohrungsgeometrien. Durch eine stärkere Fokussierung der Laserpulse und eine überlagerte kreisförmige Relativbewegung zwischen Werkstück und Strahl wird beim Trepanieren und Wendelbohren die Bohrungsgeometrie wesentlich von dieser Kreisbahn bestimmt, wodurch eine höhere Formtreue erreicht wird. Beim Trepanieren wird das Bohrloch in einem Strahlumlauf ausgeschnitten. Für einen verbesserten Materialaustrieb wird dazu zunächst eine kleine Durchgangsbohrung erzeugt wird, die häufig sichtbare Einstichspuren in der fertigen Bohrung hinterlässt. Beim Wendelbohren kann dies vermieden werden, da hier der Strahl während des Durchbohrens vielfach auf der Kreisbahn umläuft und die Abtragsfront kontinuierlich auf einer Spirale im Werkstück voranschreitet. Die dabei erzielbare hohe Genauigkeit geht jedoch auf Kosten der Produktivität, typischerweise werden pro Bohrung mehrere Sekunden Bearbeitungszeit benötigt.

Ähnlich wie beim Laserbohren ist auch bei anderen abtragenden Laserverfahren mit kürzeren Pulsdauern eine Präzisionserhöhung möglich, die jeweils gegen die Verringerung der Abtragsproduktivität abgewogen werden muss. Für höchste Anforderungen verspricht die Verkürzung der Pulse auf Werte unter 10 ps (ultrakurze Pulse) bei all diesen Laserbearbeitungsprozessen eine weitere Steigerung der Bearbeitungsqualität. Daher ist die Erforschung des Potenzials ultrakurzer Pulse für fertigungstechnische Anwendungen im letzten Jahrzehnt Gegenstand zunehmender Forschungsaktivitäten geworden [42–51]. Zunächst wurde in der Tat gezeigt, dass ultrakurze Pulse eine bessere Bearbeitungsqualität ermöglichen als selbst langjährig optimierte Prozesse mit kurzen

Laserpulsen im Nanosekundenbereich [52, 53]. In letzter Zeit nimmt daher neben der Suche nach geeigneten Fertigungsstrategien im Allgemeinen die Umsetzung im industriellen Umfeld eine wachsende Rolle ein. Insbesondere soll durch die Entwicklung neuartiger Laserkonzepte für Strahlquellen mit erheblich höheren Pulswiederholraten und mittleren Leistungen die Schwelle der Wirtschaftlichkeit auch für Laserprozesse mit ultrakurzen Pulsen erreicht werden [54].

### 1.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Das gepulste Laserabtragen ist schon für einen einzelnen Puls ein hochdynamischer Vorgang, der wegen der Vielzahl an möglichen Phasenumwandlungen am beaufschlagten Werkstück eine ganze Reihe von unterschiedlichen, miteinander in ständiger Wechselwirkung stehenden physikalischen Teilprozessen umfasst. Verfahren, die wie die oben genannten Bohrverfahren auf einem repetierend gepulsten Laserabtrag beruhen, nehmen an Komplexität noch weiter zu. Die Optimierung eines solchen Vorgangs alleine auf Basis der erzielten Bearbeitungsergebnisse ist wegen der vielen Einflussgrößen und Prozessparameter äußerst aufwendig. Sie kann durch ein möglichst umfassendes Prozessverständnis aber erheblich erleichtert werden.

Schon bei kurzen Nanosekunden-Laserpulsen ist die Leistungsdichte im fokussierten Strahl ausreichend, um ablatiertes Material so stark aufzuheizen, dass es in erheblichem Umfang ionisiert wird. Dieses laserinduzierte Plasma tritt in vielfältiger Weise mit dem Laserpuls und mit der umgebenden Atmosphäre in Wechselwirkung und nimmt so Einfluss auf Prozesseffizienz und Bearbeitungsqualität [15, 39, 55]. Bei Pulsen im ultrakurzen Regime werden leicht sogar einige  $10^{12}$ – $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> im Fokus erreicht, so dass Prozesstemperaturen und -dynamik weiter zunehmen können. Insbesondere sind diese Leistungsdichten ausreichend hoch, um mit dem Atmosphäregas unmittelbar in Wechselwirkung zu treten. Dabei verursachen die hohen Lichtfeldstärken optisch induzierte dielektrische Durchbrüche ebenso, wie sie eine nichtlineare Reaktion des Gases hervorrufen. Andererseits aber ist die Einwirkdauer ultrakurzer Pulse kürzer als die typischen Zeiten innerhalb derer Materialverdampfung und Plasmabildung stattfinden. Die komplexen Rückkopplungen zwischen Laserstrahlung, Materialdampf und Atmosphäre, die für kurze Pulse im Nanosekundenregime den Plasmaeinfluss auf die Bearbeitung dominieren, sollten für ultrakurze Pulse daher nur eine nachgeordnete Rolle spielen. Bei repetierend gepulsten Abtragsverfahren kann dagegen ein Laserpuls mit dem von früheren Pulsen ablatierten Material in Wechselwirkung treten [56]. Für ultrakurze Pulse sollte der Effekt wegen der hohen Leistungsdichten im Fokus gegenüber Nanosekun-

denpulsen noch zunehmen, zumal wenn künftig Pulswiederholraten im Bereich von wenigstens einigen 10–100 kHz Anwendung finden werden, bei denen sich die Laserbearbeitung mit ultrakurzen Pulsen wahrscheinlich erst als wirtschaftlich konkurrenzfähig erweisen wird.

Auf dem Weg zu einem grundlegenden Verständnis der verschiedenen Verfahren auf Basis des Laserabtragens sind viele Teilprozesse experimentell nur schwer zu erfassen, da sie auf kurzen Zeitskalen und innerhalb kleiner räumlicher Abmessungen ablaufen. In vielen Fällen kann eine modellmäßige Erfassung und numerische Simulation dieser Abläufe gute Dienste leisten [57]. Die Einbeziehung der Gas- und Plasmaphasen in diese Modellierungen gestaltet sich wegen der oft nur rudimentär bekannten Materialeigenschaften für diese Phasen und wegen der starken Änderung der Eigenschaften an den Phasengrenzen bislang besonders schwierig. Andererseits ist der Bereich der Gas- und Plasmaphasen mit optischen Methoden experimentell verhältnismäßig gut erreichbar [55]. Sie sollen daher in dieser Arbeit zur Aufklärung des komplexen Wechselspiels in der Gasphase zwischen Laserstrahlung, Werkstück, ablatiertem Materialdampf und laserinduziertem Plasma für das Abtragen von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen herangezogen werden. Dabei steht die qualitative Analyse der grundlegenden Wirkzusammenhänge im Vordergrund, auf deren Basis Rückschlüsse auf die Materialbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung abgeleitet werden. Besonderes Augenmerk sollen die Grenzen erfahren, die den Verfahren durch die Wechselwirkung mit Materialdampf, Plasma oder der Umgebungsatmosphäre gesetzt werden, und wie sich diese durch die gezielte Beeinflussung der Wechselwirkungen erweitern lassen.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

### Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen  
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

### Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen  
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

### Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen  
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

### Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern  
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

### Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströimte CO<sub>2</sub>-Laser  
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

### Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung  
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

### Fredkering, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr  
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

### Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströimten CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

### Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr  
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

### Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern  
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

### Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern  
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

### Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität  
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

### Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß  
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

### Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

### Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

### Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen  
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

### Kreputat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

### Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern  
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

### Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen  
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

### Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen  
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

### Rapp, Jürgen

Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau  
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

**Wittig, Klaus**

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung  
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

**Lee, Jae-Hoon**

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung  
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

**Albinus, Uwe N. W.**

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

**Wiedmaier, Matthias**

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

**Bloehs, Wolfgang**

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

**Stöhr, Michael**

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

**Pläß, Wilfried**

Zerstörschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

**Schaller, Markus K. R.**

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

**Hack, Rüdiger**

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW  
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

**Krupka, René**

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser  
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

**Pfeiffer, Wolfgang**

Fluidynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

**Volz, Robert**

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

**Bartelt-Berger, Lars**

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

**Müller-Hummel, Peter**

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspaltung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

**Rohde, Hansjörg**

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser  
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

**Huonker, Martin**

Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

**Callies, Gert**

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen  
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

**Schubert, Michael E.**

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern  
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

**Kern, Markus**

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen  
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

**Raiber, Armin**

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas  
beim Abtragen und Schweißen  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

### Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung  
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

### Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen  
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

### Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität  
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

### Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

### Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

### Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

### Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen  
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

### Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten  
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

### Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau  
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

### Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen  
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

### Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

### Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern  
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

### Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung  
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

### Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG  
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

### Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

### Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtrags von Stahl  
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

### Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser  
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

### Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers  
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

### Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

### Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

### Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau  
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

### Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen  
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X



**Lücke, Bernd**

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays  
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

**Hohenberger, Bernd**

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -führung für die Mikrotechnik  
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

**Heimerdinger, Christoph**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt  
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

**Christoph Fleig**

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

**Joachim Radtke**

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

**Michael Brandner**

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern  
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

**Reinhard Winkler**

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss  
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

**Helmut Kindler**

Optische und gerätetechnische Entwicklungen zum Laserstrahlspritzen  
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

**Andreas Ruf**

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung  
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment  
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

**Thomas Wawra**

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung  
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

**Michael Honer**

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung  
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

**Thomas Herzinger**

Prozessüberwachung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

## **Thomas Fuhrich**

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

## **Daniel Müller**

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

## **Jiancun Gao**

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

## **Wolfgang Gref**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

## **Michael Weikert**

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpuls

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

## **Julian Sigel**

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

## **Andreas Ruß**

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

## **Gabriele Seibold**

Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

## **Dirk Lindenau**

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

## **Jens Walter**

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

## **Heiko Ridderbusch**

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

## **Markus Leimser**

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

## **Mikhail Larionov**

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

## **Jürgen Müller-Borhanian**

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

## **Andreas Letsch**

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

## **Thomas Kübler**

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

## **Günter Ambrosy**

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3