

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 verzeichnetet 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

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Laser in der Fertigungstechnik	21
1.2 Abtragende Laserverfahren	22
1.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	25
2 Grundlagen abtragender Laserverfahren	27
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 – „Hirschegg-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
3 Experimentelle Methoden	60
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	Lumineszenzfotografie	69
3.4.2	Schattenfotografie	71
3.4.3	Resonanzabsorptionsfotografie	72
3.4.4	Streustrahlungsfotografie	73
3.4.5	Versuchsanordnung	75
3.4.6	Interferometrie	77
4	Luftdurchbruch und nichtlineare Wechselwirkung	81
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
5	Dynamik der Materialdampf- und Plasmawolken	105
5.1	Stoßwellenexpansion und Energieinhalt	105
5.2	Dampfausbreitung – Verbleib der Ablationsprodukte	108
5.3	Charakterisierung von Prozessparametern	113
6	Einflüsse repetierend gepulster Bearbeitung	118
6.1	Transmissionsmessungen bei Pulstügen	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
7	Einflüsse der Umgebungsatmosphäre	135
7.1	Abtragsraten bei reduziertem Atmosphärendruck	135
7.2	Atmosphäreneinfluss auf die Bohrungsgeometrie	139
7.3	Effizienzsteigerung beim Laserbohren	142
8	Zusammenfassung und Ausblick	148

Literatur- und Quellenverzeichnis	153
Anhang	181
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 Vorteile aus.

Zunehmend werden harte oder spröde Materialien wie Keramiken, Diamant oder faser verstärkte 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]. Gleichermanne 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 Druckklischees 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 $100\text{ }\mu\text{m}$ 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 $10\text{ }\mu\text{s}$ – 10 ms (lange Pulse) und Leistungsdichten oberhalb von 10^7 W/cm^2 Anwendung,

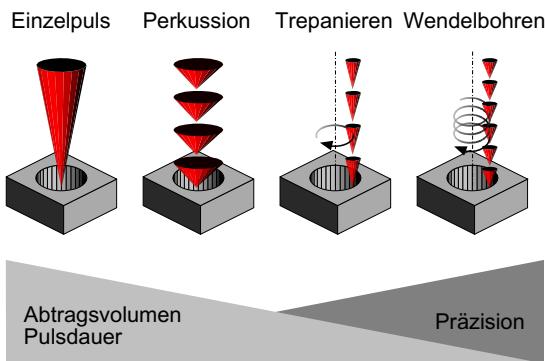


Bild 1.1: Schematische Darstellung der wichtigsten Verfahrensstrategien zum Bohren mit Laserstrahlung. Bei repetierend gepulsten Verfahren erlaubt die Reduzierung von Pulsdauer und Abtragsvolumen je Puls eine Präzisionssteigerung. Durch eine gezielte überlagerte Strahlbewegung können Maßhaltigkeit und 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 Schmelzanhäufungen 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 μ s (kurze Pulse) emittieren. Auch Excimerlaser liegen mit Pulsen von einigen 10 ns Dauer in diesem Bereich. Obgleich diese Strahlquellen mit 10^9 – 10^{11} W/cm² höhere Pulsspitzenleistungen erreichen, sinkt in der Regel die Pulsenegie 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 Tropianieren und Wendelbohren die Bohrungsgeometrie wesentlich von dieser Kreisbahn bestimmt, wodurch eine höhere Formtreue erreicht wird. Beim Tropianieren 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. Daraus 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/cm² im Fokus erreicht, so dass Prozesstemperaturen und -dynamik weiter zunehmen können. Insbesondere sind diese Leistungsdichten ausreichend hoch, um mit dem Atmosphärentaschen 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 der 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 Materialigenschaften 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 ultrakurz gepulster 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

Gorri, Michael

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

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigen-
schaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-
Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

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

Borik, Stefan

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

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell
längsgest्रömt CO₂-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

Frederking, Klaus-Dieter

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

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in
längsgest्रömt CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laserober-
flächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulver-
zufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werk-
stoffe 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 zwei-
stufiger 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 Gasentladungs-
strecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, Jürgen

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

Krepulat, Walter

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

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden
dünner Bleche mit CO₂- 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

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

- Wittig, Klaus**
Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5
- Grünenwald, Bernd**
Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-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 Strahl-formungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5
- Bea, Martin**
Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3
- Stöhr, Michael**
Beeinflussung der Lichtheission bei mikrokanal-gekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8
- Plaß, Wilfried**
Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-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 CO₂-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**
Fluidodynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9
- Volz, Robert**
Optimierte 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 Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9
- Rohde, Hansjörg**
Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7
- Huonker, Martin**
Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5
- Callies, Gert**
Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laser-abtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3
- Schubert, Michael E.**
Leistungsskalierbares Lasersystem aus faser-gekoppelten 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

Bahnmüller, 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 Laserpräzisionsabtragens 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-Doppelfokus-technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9
- Jasper, Knut**
Neue Konzepte der Laserstrahlformung und -föhrung 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 CO₂-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 Aluminium-gusslegierungen 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 Laserstrahlenschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern 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

Laserstrahlenschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablen 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 Laserstrahlenschweißen
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 Naht-eigenschaften beim Laserstrahlenschweißen 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 Laserstrahlenschweißen
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 Halbleiter-scheibenlasers
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlenschweißen
2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3