Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

H. Ridderbusch
Longitudinal angeregte passiv güte-
geschaltete Laserzündkerze

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.

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

von Dr.-Ing. Heiko Ridderbusch
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. phil. Ernst Winter

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.,

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 2008

ISBN 978-3-8316-0840-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de.de

Kurzfassung

Werden Verbrennungsmotoren eines Tages mit einem Laser gezündet? Noch ist dies Zukunftsmusik, denn die konventionelle Zündkerze ist bewährt und billig. Und dennoch interessieren sich einige Hersteller und Zulieferer der Automobilindustrie sowie stationärer Großmotoren ernsthaft für das Thema der Laserzündung, denn diese eröffnet neue Möglichkeiten.
Brennverfahren für Ottomotoren mit Direkteinspritzungssystemen der zweiten Generation besitzen aufgrund ihrer günstigen thermodynamischen Prozessführung momentan das größte Potential zur Verbrauchsreduktion im Segment Ottomotoren. Die Technikkombination von strahlgeführtem Brennverfahren mit laserinduzierter Zündung ermöglicht eine freie Wahl des Zündorts, eine direkte Zündung im Kraftstoffstrahl und somit eine sichere und verschleißfreie Verbrennungseinleitung. Bei stationären Großgasmotoren liegen die Hauptziele der Motorenentwicklung ebenfalls in der Wirkungsgradsteigerung und Emissionsreduzierung. Um diese Ziele zu erreichen, müssen bei diesen Motoren die Mitteldrücke gesteigert und die Gemische abgemagert werden. Auch hier ermöglicht die Laserzündung weitere Entwicklungsmöglichkeiten bezüglich der thermodynamischen Potentiale, sowie für eine sichere und verschleißfreie Entflammung.
Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung einer Laserzündkerze. In dieser Laserzündkerze ist nach Kenntnis des Autors erstmalig ein longitudinal angeregter passiv gütegeschalteter Festkörperlaser integriert und direkt am Motor verbaut. Zuerst werden mit einem kommerziellen aktiv gütegeschalteten Lasersystem die Anforderung für dieses Lasersystem an Verbrennungsgefäßen bestimmt. Diese Untersuchungen werden für strahlgeführte Benzindirekteinspritzung sowie für homogene Methan-Luft-Gemische durchgeführt. Die Simulation eines longitudinal gepumpten passiv gütegeschalteten Lasersystems lässt sich in verschiedenen Stufen der Komplexität ausführen. Ein einfaches analytisches Modell lässt sich für erste Abschätzungen verwenden. Für eine genauere Bestimmung der optimalen Ausgangsparameter wird ein numerisches Modell entwickelt. Dies beinhaltet die Berechnung der für die Laserzündung wichtigen Parameter der Pulsenergie und Pulslänge ebenso wie den Zündzeitpunkt zwischen Pumpbeginn und Emission des Laserpulses. Gleichzeitig werden thermische Einflüsse wie auch die Einflüsse des optischen Pumpens für Vier- wie auch für Quasi-Vier-Niveau-Lasersysteme berücksichtigt. Vergleiche mit experimentellen Daten bestätigen die Genauigkeit des numerischen Modells, anhand dessen die optimalen Auslegungs-

parameter eines longitudinal gepumpten passiv gütegeschalteten Lasersystems für eine erste Laserzündkerze bestimmt werden. Dieses Laserzündsystem wird erfolgreich an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzungssystem getestet.

Inhalt

Kurzfassung **5**

Inhalt **7**

Liste der verwendeten Symbole **10**

Extended Abstract **15**

1 Einleitung **19**

2 Prinzipien der Laserzündung **23**
2.1 Thermische Zündung mittels Laser 23
2.2 Laserinduzierte photochemische Zündung 23
2.3 Laserinduzierte resonante Durchbruchzündung 24
2.4 Laserinduzierte Funkenzündung oder nicht-resonante Durchbruchzündung 24

3 Laserzündung am Ottomotor **28**
3.1 Laserzündung bei strahlgeführter Benzindirekteinspritzung 28
3.2 Laserzündung homogener Methan-Luft-Gemische 35
3.3 Zusammenfassung Anforderungen an das Lasersystem 38

4 Sättigbarer Absorber als passiver Güteschalter **40**
4.1 Analytisches Modell des sättigbaren Absorbers 41
4.2 Numerisches Modell des sättigbaren Absorbers 43
4.2.1 Berechnungen zum numerischen Modell des sättigbaren Absorbers 45

5 Grundlagen der Modellierung eines Lasersystems **53**
5.1 Modellierung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems 54
5.2 Analytische Lösung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems 57
5.2.1 Berechnungen mit analytischer Lösung 60
5.2.1.1 Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission 60
5.2.1.2 Anfangstransmission 62
5.2.1.3 Wirkungsquerschnitte sättigbarer Absorber 63
5.2.1.4 Pumpradius 64

5.2.1.5 Resonatorlänge 65
5.2.1.6 Reflektivität des Auskoppelspiegels 66
5.2.2 Zusammenfassung 67
5.3 Numerische Lösung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems 68
5.3.1 Temperatureinflüsse auf ein passiv gütegeschaltetes Lasersystem 69
5.3.1.1 Quasi-Vier-Niveau-Lasersystem 70
5.3.2 Numerische Lösung der Ratengleichungen 72
5.3.2.1 Simulation Vier-Niveau-System 73
5.3.2.2 Simulation Quasi-Vier-Niveau-System 74
5.3.3 Berechnungen mit numerischem Modell 75
5.3.3.1 Wirkungsquerschnitt stimulierte Emission 75
5.3.3.2 Fluoreszenzlebensdauer 76
5.3.3.3 Länge, Dotierung und Absorptionsquerschnitt 77
5.3.3.4 Thermische Besetzung der Laserniveaus 79
5.3.3.5 Anfangstransmission 81
5.3.3.6 Wirkungsquerschnitte sättigbarer Absorber 82
5.3.3.7 Pumpvolumen 83
5.3.3.8 Pumpleistung 84
5.3.3.9 Resonatorlänge 86
5.3.3.10 Reflektivität des Auskoppelspiegels 87
5.3.4 Zusammenfassung 88

6 Thermische Effekte 90
6.1 Pumplichtinduzierte thermische Effekte 90
6.1.1 Bestimmung der Temperaturverteilung eines longitudinal dioden-gepumpten Festkörperlasers 91
6.1.2 Thermooptische Effekte 92
6.1.2.1 Thermische Linse 94
6.1.2.2 Spannungsinduzierte Bruchgrenze 95
6.2 Temperaturabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts der stimulierten Emission 96

7 Experimente zum Laserdesign 98
7.1 Charakterisierung der Pumpquellen 98
7.1.1 Charakterisierung der fasergekoppelten Laserdiode bei 808 nm . 99
7.1.2 Charakterisierung der fasergekoppelten Laserdiode bei 940 nm . 101
7.2 Experimente mit sättigbarem Absorber 103
7.2.1 Verifikation des Modells des sättigbaren Absorbers 103

7.2.2 Untersuchte sättigbare Absorber 106
7.3 Eigenschaften der untersuchten laseraktiven Materialien 107
7.3.1 Nd:YAG 108
7.3.2 Nd:YLF 109
7.3.3 Yb:YAG 110
7.4 Experimente mit laseraktiven Materialien 112
7.4.1 Experimente mit Nd:YAG 112
7.4.1.1 Anfangstransmission sättigbarer Absorber 113
7.4.1.2 Pumpvolumen 114
7.4.1.3 Pumpleistung 116
7.4.1.4 Resonatorlänge 118
7.4.1.5 Reflektivität des Auskoppelspiegels 120
7.4.1.6 Thermische Effekte 121
7.4.2 Experimente mit Nd:YLF 126
7.4.2.1 Anfangstransmission sättigbarer Absorber 127
7.4.2.2 Pumpleistung 128
7.4.2.3 Reflektivität des Auskoppelspiegels 129
7.4.2.4 Thermische Effekte 130
7.4.3 Experimente mit Yb:YAG 132
7.4.3.1 Thermische Effekte 132
7.5 Vergleich der laseraktiven Materialien im Laserbetrieb 136
7.5.1 Vergleich der erzielbaren EinzelPulsenergien 136
7.5.2 Vergleich der Temperaturabhängigkeiten 137
7.5.3 Diskussion des Vergleichs 141

8 Experimente zum Motorversuch 142
8.1 Kristallhalterung 142
8.2 Aufbau der Laserzündkerze 146
8.3 Vorversuche 147
8.4 Motorversuch 149

9 Zusammenfassung 151

Literatur– und Quellenverzeichnis 155

Danksagung 170

1 Einleitung

Das enorme Potential, als einziges alternatives Zündsystem die konventionelle elektrische Zündkerze ersetzen zu können [1], etablierte das Forschungsgebiet der Laserzündung in den letzten Jahren ungemein. Hauptursache für das Vorantreiben dieser Forschung sind die zahlreichen und bemerkenswerten Vorteile der Laserzündkerze gegenüber der elektrischen Zündkerze.
Bei den Untersuchungen wird unterschieden zwischen der Anwendung an einem Ottomotor in Personenkraftwagen (PKW) und der Anwendung in stationären Großmotoren. Die Ansprüche an die Laserzündung sind bei diesen beiden Motoren zwar sehr verschieden, dennoch sind es die gleichen Probleme, die es zu lösen gilt.
Beim Ottomotor in PKW besitzt die strahlgeführte Benzindirekteinspritzung als Einzelmaßnahme das höchste thermodynamische Potential. Mit der Beseitigung der Drosselverluste sind theoretisch Verbrauchseinsparungen möglich, die den Abstand zwischen Diesel- und Benzinmotor beim Kraftstoffverbrauch deutlich kleiner werden lassen. Mit der Einführung des geregelten Drei-Wege-Katalysators vor etwa 20 Jahren musste die Gemischbildung stöchiometrisch erfolgen, was keine besonderen Anforderungen an die Zündung stellte. Magerkonzepte waren bis zur Einführung der ersten Motoren mit Benzindirekteinspritzung nicht mehr gefragt. Aktuell sind Motoren mit wandgeführter Benzindirekteinspritzung auf dem Markt erhältlich [2], die das gesamte Potential der Benzindirekteinspritzung zwar nicht ausnutzen können. Dennoch ist diese Technologie der Einspritzung die erste neue Herausforderung für die Zündung in PKW seit 20 Jahren und für die Zukunft. Neben dem mageren nichtstöchiometrischen Betrieb führt eine Tendenz der Motorenentwicklung zu dem sogenannten Downsizing. Das bedeutet, dass der Motor per Turbolader oder Kompressor zwangsbeatmet wird und somit in Leistungsregionen vorstößt, die sonst nur großvolumigere Motoren erreichen – und das bei niedrigerem Kraftstoffverbrauch. Dieses Konzept führt zu mehreren Problemen. Durch die Zwangsbeatmung des Motors steigt die Dichte im Brennraum und damit die Zündspannung, die mit der Dichte korreliert. Folglich wächst der Energieaufwand quadratisch mit der Zündspannung. Doch höhere Zündspannungen können nur durch im Durchmesser größere Zündkerzen realisiert werden, will man die Kosten nicht durch den Einsatz von teurem Edelmetall oder durch zu hohen Verschleiß der Zündkerze erhöhen. Auch für die Zündung im Magerbetrieb oder bei Hoch-Abgasrückführraten steigt der Zündspannungsbedarf. In Kombination mit dem Downsizing existiert im Moment, wie auch

zukünftig, kein elektrisches Zündsystem, das das thermodynamische Potential des Ottomotors nutzen kann [1].
Die zweite Generation der Benzindirekteinspritzung mit strahlgeführten Systemen hat Anfang 2007 die Serienreife erreicht [3]. Bei den strahlgeführten Systemen kommt dann ein weiteres Problem hinzu. Die Zündkerze ist hier direkt neben dem Einspritzventil eingebaut und soll den Kraftstoffstrahl am Rand entzünden. Dies gestaltet sich sehr schwierig, da Fertigungs- oder auch Einbautoleranzen der Komponenten des Einspritzsystems, des Zylinderkopfes und der Zündkerze auftreten. Störend wirken sich auch statistische Schwankungen des Zündortes und die Auslenkung des Zündfunkens sowie die Schwankungen des Kraftstoffstrahls auf die Entflammung aus. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Schwankungen betriebspunktabhängig sind. Darüber hinaus können sie aufgrund von laufzeitbedingten Ablagerungen an den Einspritzlöchern der Einspritzventile variieren.
Bei stationären Gasmotoren sind die Ziele für die Zukunft genauso klar definiert wie beim Ottomotor. Um den Wirkungsgrad zu steigern und die Emissionen, insbesondere die NO_x-Emissionen, zu senken, müssen die Mitteldrücke gesteigert und das Gemisch weiter abgemagert werden [4–7]. Auch diese Maßnahmen führen zu einem erhöhten Zündspannungsbedarf, zu größeren Zündkerzen und zu einem erhöhten Einsatz von Edelmetallen in der Zündkerze, um die Haltbarkeit zu steigern. Zwar mangelt es stationären Großmotoren nicht an Platz im Zylinderkopf, aber die Standzeit einer Zündkerze ist ein wichtiger Aspekt bezüglich der Wirtschaftlichkeit des Motors.
Die Laserzündung besitzt das Potential, die oben angesprochenen Probleme zu lösen und bietet nebenbei noch weitere Vorteile gegenüber der konventionellen elektrischen Zündanlage. Das Problem des höheren Energiebedarfs bei höheren Drücken im Zylinder existiert für die Laserzündung nicht, da mit steigender Teilchendichte der Energiebedarf der Laserzündung sinkt. Somit ist der begrenzende Faktor bei der weiteren Druckerhöhung nicht mehr das Zündsystem sondern die Klopfgrenze des Motors. Von einer klopfenden Verbrennung spricht man, wenn das gesamte Endgas die Zündtemperatur erreicht und schlagartig ohne geordnete Flammenausbreitung verbrennt [8]. Dadurch wird der Motor durch die dann sehr hohe umgesetzte Wärmemenge mechanisch stark belastet. Aber auch das Limit, welches durch die Klopfgrenze des Motors vorgegeben ist, kann bei der Laserzündung durch die freie und somit thermodynamisch optimale Position des Zündfunkens weiter optimiert werden. Weitere Vorteile der freien Wahl des Zündortes sind kürzere Flammenwege und daraus resultierend geringere Wandwärmeverluste. Zusätzlich lassen sich Brennstoffe mit geringerer Qualität, wie z.B. Synthetikgas oder Faulschlammgas, mit der Laserzündung entflammen.
Neben diesen Vorteilen sind bei dem direkten Vergleich der Laserzündkerze mit einer konventionellen elektrischen Zündkerze die bauartbedingten Vorteile sofort ersichtlich.

Da bei der Laserzündkerze keine Elektroden in den Brennraum ragen, wird die Gemischbildung nicht negativ beeinflusst. Es werden Quenchingverluste an den Elektroden vermieden, so dass die Grenzen der Abmagerung und der Abgasrückführrate erweitert werden. Des Weiteren existiert kein Totvolumen im Brennraumdach, so dass eine weitere Quelle unverbrannter Kohlenwasserstoffe beseitigt ist. Auch die bekannten thermisch oder mechanisch bedingten erosiven und korrosiven Probleme der Elektroden der konventionellen elektrischen Zündkerze werden vermieden.
Neben all diesen Vorteilen sollen die Probleme einer Laserzündkerze nicht verschwiegen werden. Der optische Zugang zum Brennraum durch das Brennraumfenster muss über alle Betriebspunkte durchlässig und mechanisch haltbar sein. Bis heute ist die Funktion unter motorraumtypischen Umgebungsbedingungen nicht ausreichend geklärt. Die Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit eines Laserzündungssystems über einen Temperaturbereich von -40 °C bis +160 °C und die mechanischen Belastungen bei Beschleunigungen mit bis zu 100facher Erdbeschleunigung sind noch zu zeigen, genauso wie die Funktion über den gesamten dynamischen Betriebsbereich des Ottomotors in einem PKW.
Weltweit existieren mehrere Institutionen, die sich mit der Laserzündung ausgiebig beschäftigen. Dabei ist die Anzahl derer, die sich mit der Anwendung am stationären Gasmotor befassen sehr viel größer, als die bei den Ottomotoren für einen PKW. In Europa ist insbesondere die Firma General Electric Jenbacher zu nennen, die seit mehreren Jahren mit staatlicher Unterstützung und in Kooperation mit der Technischen Universität Wien Untersuchungen an Stationärmotoren betreibt [9–18]. In Amerika sind mit dem National Energy Technology Laboratory und dem U.S. Department of Energy, unterstützt durch das Argonne National Laboratory, zwei staatlich geförderte Konsortien bekannt [4, 6, 19, 20]. Im Automobil-Sektor erregte die AVL List GmbH mit ihrem Entwicklungspartner Carinthian Tech Research AG mit der Vorstellung der ersten funktionierenden Laserzündung, die nicht aus einem Freistrahlaufbau bestand und der ersten kommerziell erhältlichen Laserzündkerze Aufmerksamkeit [21, 22]. Da diese Laserzündkerze einen transversalen Pumpaufbau und eine komplizierte Temperierung besitzt [23], ist sie zwar für Grundsatzuntersuchungen gut geeignet, aber der kommerzielle Einsatz ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht realisierbar. Die AVL List GmbH kooperiert auch mit der Technischen Universität Wien und stellte bisher mehrere Untersuchungen mit Freistrahl-Lasersystemen vor [21, 24, 25]. Von den großen Automobilzulieferern ist neben der Robert Bosch GmbH [1] die japanische Firma Denso mit seinen Studien zur Laserzündung an die Öffentlichkeit getreten [26].
Bei den Laserkonzepten für die Laserzündung gibt es mehrere Ansätze. Die Intensitäten, um ein laserinduziertes Plasma zu generieren, werden mit einem gütegeschalteten Festkörperlaser erreicht. Neben den oben vorgestellten transversal oder longitudinal gepumpten Lasersystemen [1, 21, 22, 26] gibt es auch Ansätze, den Laserpuls über eine

optische Faser zum Brennraum zu leiten [27]. Bei der Güteschaltung fällt die Wahl auf einen passiven Güteschalter, der erstens kostengünstiger als ein aktiver Güteschalter ist und zweitens keine Hochspannung benötigt, die zu zusätzlicher elektromagnetischer Belastung für die Vielzahl von Steuergeräten in einem heutigen PKW führen könnte. Um den Aufbau möglichst einfach zu gestalten, verwendet man ein Oszillatorsystem aus laseraktivem Medium und passivem Güteschalter. In dieser Arbeit werden ausschließlich longitudinal gepumpte Oszillatorsysteme untersucht. Diese Pumptechnik ist wirkungsgradgünstiger und bietet eine bessere Strahlqualität. Des Weiteren wird durch den Wegbau der Pumplaser vom Motor keine ausgefeilte Kühltechnik für die Diodenlaser benötigt [23].

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Auslegung des Lasersystems mit der Anwendung im PKW. Des Weiteren werden neue, die Literatur ergänzende Messungen für stationäre Gasmotoren vorgestellt.

Die Vorteile der Laserzündung gegenüber der konventionellen elektrischen Zündung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

In den folgenden Kapiteln 2 und 3 werden die Themen „Prinzipien der Laserzündung“ und „Laserzündung am Ottomotor“ behandelt. Hier werden ausschließlich die für das Laserdesign relevanten Aspekte beleuchtet. Aus diesen Untersuchungen werden die erforderlichen Leistungsmerkmale für die Laserzündkerze festgelegt.

In Kapitel 4 wird der sättigbare Absorber theoretisch betrachtet, der als passiver Güteschalter verwendet wird. In den Kapiteln 5 und 6 wird das gesamte passiv gütegeschaltete Lasersystem im Detail theoretisch betrachtet. Diese theoretischen Betrachtungen zu dem passiven Güteschalter und dem passiv gütegeschalteten Lasersystem werden in Kapitel 7 experimentell überprüft.

In Kapitel 8 wird eine longitudinal gepumpte Laserzündkerze beschrieben und die erfolgreichen Tests an einem Einzylindermotor mit einem strahlgeführten Brennverfahren wiedergegeben.

Eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten bietet Kapitel 9.

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_2-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 längsgeströmte CO_2-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 längsgeströmten CO_2-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_2-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

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

Xiao, Min
Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO_2- 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 Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd
Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO_2-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_2-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

Plaß, Wilfried
Zerstörschwellen und Degradation von CO_2-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 verfahrentechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO_2-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
Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO_2-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 Zerspanung
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_2-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 magnetofluiddynamische 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-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_2-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 Laserstrahltiefschweißen 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 Laserpulsen
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