Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW

H. Ridderbusch Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete 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 Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – 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 Auslegungsparameter eines longitudinal gepumpten passiv gütegeschalteten Lasersystems für eine erste Laserzündkerze bestimmt werden. Dieses Laserzündsystem wird erfolgreich an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzungssystem getestet.

# Inhalt

Kι	ırzfas	sung	5									
In	Inhalt											
Li	Liste der verwendeten Symbole											
Ex	Extended Abstract 1											
1	Einl	eitung										
2	Prin	Prinzipien der Laserzündung										
	2.1	Thermische Zündung mittels Laser	23									
	2.2	Laserinduzierte photochemische Zündung 2	23									
	2.3	Laserinduzierte resonante Durchbruchzündung 2	24									
	2.4	Laserinduzierte Funkenzündung oder nicht-resonante Durchbruchzündung	24									
3	Lase	Laserzündung am Ottomotor										
	3.1	Laserzündung bei strahlgeführter Benzindirekteinspritzung 2	28									
	3.2	Laserzündung homogener Methan-Luft-Gemische										
	3.3	Zusammenfassung Anforderungen an das Lasersystem 3	38									
4	Sätt	gbarer Absorber als passiver Güteschalter 4	10									
	4.1	Analytisches Modell des sättigbaren Absorbers 4										
	4.2	Numerisches Modell des sättigbaren Absorbers										
		4.2.1 Berechnungen zum numerischen Modell des sättigbaren Absorbers 4	15									
5	Gru	ndlagen der Modellierung eines Lasersystems 5	53									
	5.1	Modellierung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems										
	5.2	Analytische Lösung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems 5										
		5.2.1 Berechnungen mit analytischer Lösung 6	50									
		5.2.1.1 Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission 6	50									
		5.2.1.2 Anfangstransmission 6	52									
		5.2.1.3 Wirkungsquerschnitte sättigbarer Absorber 6	53									
		5.2.1.4 Pumpradius	54									

			5.2.1.5	Resonatorlänge	65			
			5.2.1.6	Reflektivität des Auskoppelspiegels	66			
		5.2.2	Zusamm	enfassung	67			
	5.3	Numerische Lösung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems						
		5.3.1	Temperat	ureinflüsse auf ein passiv gütegeschaltetes Lasersystem	69			
			5.3.1.1	Quasi-Vier-Niveau-Lasersystem	70			
		5.3.2	Numerise	che 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	Zusamm	enfassung	88			
6	The	nermische Effekte						
	6.1	Pumpli	ichtinduzie	erte thermische Effekte	90			
		6.1.1	Bestimm	ung der Temperaturverteilung eines longitudinal dioden-				
			gepumpt	en Festkörperlasers	91			
		6.1.2	Thermoo	ptische Effekte	92			
			6.1.2.1	Thermische Linse	94			
			6.1.2.2	Spannungsinduzierte Bruchgrenze	95			
	6.2	2 Temperaturabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts						
		der stir	nulierten I	Emission	96			
7	Exp	perimente zum Laserdesign						
	7.1	Charak	terisierung	g der Pumpquellen	98			
		7.1.1	Charakte	risierung der fasergekoppelten Laserdiode bei 808 nm .	99			
		7.1.2	Charakte	risierung der fasergekoppelten Laserdiode bei 940 nm .	101			
	7.2	.2 Experimente mit sättigbarem Absorber						
		7.2.1	Verifikati	on des Modells des sättigbaren Absorbers	103			

		7.2.2	Untersuch	nte sättigbare Absorber	106					
	7.3	Eigenschaften der untersuchten laseraktiven Materialien								
		7.3.1	Nd:YAG		108					
		7.3.2	Nd:YLF		109					
		7.3.3	Yb:YAG		110					
	7.4	Experi	mente mit	laseraktiven Materialien	112					
	7.4.1 Experimente mit Nd:YAG									
			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								
			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	Experime	nte mit Yb:YAG	132					
			7.4.3.1	Thermische Effekte	132					
	7.5	Verglei	gleich der laseraktiven Materialien im Laserbetrieb							
		7.5.1	.5.1 Vergleich der erzielbaren EinzelPulsenergien							
		7.5.2	Vergleich	der Temperaturabhängigkeiten	137					
		7.5.3	Diskussic	on des Vergleichs	141					
8	Exp	eriment	e zum Mo	torversuch	142					
	8.1	Kristal	lhalterung		142					
	8.2	2 Aufbau der Laserzündkerze								
	8.3 Vorversuche				147					
	8.4	Motory	versuch .		149					
9	Zusa	ammenf	assung		151					
Literatur- und Quellenverzeichnis										
Da	Danksagung									

# 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<sub>x</sub>-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.

# 2 Prinzipien der Laserzündung

Die Zündung reaktiver Gemische mit Hilfe eines Lasers kann in vier Kategorien aufgeteilt werden [7,28]:

- Thermische Zündung mittels Laser
- Laserinduzierte photochemische Zündung
- · Laserinduzierte resonante Durchbruchzündung
- · Laserinduzierte Funkenzündung oder nicht-resonante Durchbruchzündung

# 2.1 Thermische Zündung mittels Laser

Bei der thermischen Zündung mittels Laser [29–38] wird die kinetische Energie eines Moleküls erhöht. Dabei werden durch kontinuierliche Laserstrahlung die Vibrations-, Translations- oder Rotationsschwingungen des Gas-Moleküls angeregt, was eine Erhitzung der bestrahlten Region zur Folge hat. Als Resultat der Energieerhöhung brechen die chemischen Bindungen des Moleküls auf und chemische Reaktionen können starten. Die Zeitdauer zwischen Beginn der Laserstrahlung und der Entzündung des Gases ist vergleichsweise lang in der Größenordnung von bis zu einer Millisekunde [37]. Ein geeignetes Lasersystem für die Anregung der oben genannten Molekülschwingungen ist der  $CO_2$ -Laser mit seiner Emissionwellenlänge von etwa 10 µm. Dieses Lasersystem schließt die Anwendung an einem Ottomotor aufgrund seiner Baugröße sofort aus. Des Weiteren besitzt man mit der thermischen Zündung mittels Laser nicht mehr die freie Wahl des Zündortes im Brennraum, da die Laserstrahlung direkt hinter dem Brennraumfenster absorbiert wird und bei der Propagierung in den Brennraum eine exponentielle Abschwächung erfährt.

# 2.2 Laserinduzierte photochemische Zündung

Bei der laserinduzierten photochemischen Zündung [39–42] werden Gas-Moleküle durch hochenergetische Photonen in hochreaktive Radikale gespalten. Aufgrund ihrer hohen Reaktivität können diese Radikale weitere Moleküle angreifen, ihnen Atome entreißen

und somit neue Radikale erzeugen. Diese sogenannte Radikalkettenreaktion führt zur Zündung und vollständigen Verbrennung des Gasgemisches. Da die laserinduzierte photochemische Zündung bei den meisten Gasgemischen nur bei UV-Wellenlängen effektiv anwendbar ist, scheidet auch diese Art der Laserzündung für die Anwendung an einem Ottomotor aus. Im Moment sind keine leichten und kompakten Lasersysteme, die im UV-Bereich emittieren, preiswert verfügbar.

# 2.3 Laserinduzierte resonante Durchbruchzündung

Die laserinduzierte resonante Durchbruchzündung [43–46] ist eine Verknüpfung aus der nicht-resonanten Multiphotonen-Dissoziation von einigen Molekülen des Gasgemisches und der resonanten Photoionisation von einem oder mehreren Atomen, die durch den Photodissoziationsprozess gebildet wurden. Die Folge dieser beiden Prozesse ist die Bildung von Startelektronen, die dann sofort mehr Energie durch den Effekt der inversen Bremsstrahlung aufnehmen können. Daraus entsteht ein Plasma und die Zündung des Gemisches erfolgt. Obwohl die laserinduzierte resonante Durchbruchzündung im Vergleich zur nicht-resonanten Durchbruchzündung sehr effektiv sein kann [7], ist analog zur laserinduzierten photochemischen Zündung die Verwendung von UV-Lasern notwendig und somit der Einsatz an einem Ottomotor ausgeschlossen.

# 2.4 Laserinduzierte Funkenzündung oder nicht-resonante Durchbruchzündung

Die laserinduzierte Funkenzündung oder nicht-resonante Durchbruchzündung [47–66] startet mit der Multiphotonen-Ionisation einiger Gasmoleküle. Die direkte Photoionisation von Molekülen ist nur möglich, falls die Energie hv der Photonen größer ist als die Ionisationsenergie  $E_{Ion}$ , wobei h die Planck-Konstante und v die Vakuum-Frequenz der absorbierten Photonen ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, kann die Photoionisation nur durch gleichzeitige Absorption mehrerer k Photonen erfolgen. Die Multiphotonenionisation eines Moleküls oder neutralen Atoms M ist durch folgende Gleichung beschrieben:

$$M + kh\nu \to M^+ + e^- \tag{2.1}$$

Zum Bespiel benötigt man für die Ionisation des Sauerstoffmoleküls  $O_2$  9 Photonen bei der Nd:YAG-Wellenlänge von 1064 nm, beim Stickstoffmolekül  $N_2$  sind es sogar 12 Photonen. Für die Multiphotonen-Ionisation ist es somit günstiger, wenn die emittierte

# 3 Laserzündung am Ottomotor

Eine sehr populäre Methode, Grundlagen über die Entflammung eines reaktiven Gemisches zu sammeln, ohne die vielfältigen Einflüsse eines dynamischen Motors mitbeachten zu müssen, sind Experimente in sogenannten Entflammungsgefäßen, in denen nur die Zündung eines Gases, nicht aber der Betrieb eines Motors im Vordergrund steht [12, 15, 31, 64, 93–96]. Neben diesen stationären Untersuchungen gab es in jüngster Vergangenheit vermehrt Untersuchungen zur Laserzündung an realen Motoren [6, 20, 21, 24, 25, 61]. Zu den Untersuchungen zur Bestimmung der minimalen Zündenergie [9–11, 16, 18, 51, 55, 61] sind die unterschiedlichsten Einflüsse auf die Zündung mit einem Lasersystem experimentell und theoretisch betrachtet worden. So hängt die Zündfähigkeit ab von der Teilchendichte im Brennraum [6, 9, 68], von den Eigenschaften des Lasers – wie Wellenlänge [6, 24, 25], Pulslänge [68], Kohärenz [68] und Polarisation [19, 68] – sowie vom Strahldurchmesser im Fokus [9, 11, 68] und von der Form der Fokussierung [9, 11]. Die Entflammung an einem Kraftstoffspray wurde bis jetzt nur wenig untersucht [1,97].

Neben diesen Themen wurde auch die Verschmutzung des Brennraumfensters [17, 21, 24, 25] untersucht und Vergleiche zwischen der Laserzündung und der konventionellen elektrischen Zündung [4, 6, 19, 24, 25, 97] angestellt.

In den folgenden Abschnitten 3.1 und 3.2 werden Untersuchungen an einem Entflammungsgefäß mit Benzindirekteinspritzung bzw. einer Homogenbrennkammer mit Methan-Luft-Gemischen vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hier in der Bestimmung der Anforderungen an das Lasersystem im 1  $\mu$ m-Wellenlängenbereich bezüglich der notwendigen Pulsenergien und Pulslängen mit dem Ziel einer sicheren Entflammung bei maximaler Abmagerung des zündfähigen Gemisches.

# 3.1 Laserzündung bei strahlgeführter Benzindirekteinspritzung

Für die Untersuchungen der Laserzündung bei strahlgeführter Benzindirekteinspritzung wurde ein Entflammungsgefäß mit einer rechnergesteuerten Schlierenmesstechnik verwendet, wie es Abbildung 3.1 zeigt. Um die Bedingungen in einem Ottomotor zu si-



Bild 3.1: Schematischer Aufbau des Entflammungsgefäßes zur Untersuchung der Laserzündung an Kraftstoffsprays [98].

mulieren, waren folgende Parameter variabel: Der Kammerdruck von 0,2 bis 20 bar, die Kammertemperatur bis zu 160 °C, die Kraftstofftemperatur bis zu 120 °C, der Gasdurchfluss bis zu 2000 Liter pro Minute und der Einspritzdruck bis zu 200 bar. Der Zündzeitpunkt war frei wählbar und der Zündort in Höhe und Tiefe verstellbar. Als Einspritzventil wurde ein Bosch-Einzelstrahlventil EV mit einem Zentralloch von 100 µm Durchmesser verwendet. Für die Beleuchtung der Verbrennung werden Leuchtdioden und zur Detektion 8 Kameras verwendet, die die 8 Bilder hintereinander in einem Abstand von minimal 0,1 ms aufnehmen. Der Laserstrahl wird von oben in die Kammer über eine plankonvexe Linse eingekoppelt. Zur Brennkammer wird das Lasersystem mit einem Brennraumfenster abgeschlossen.

Der schematische Aufbau der Fokussierung inklusive der Bildung eines Plasmas in Umgebungsluft ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Der Laserstrahl mit der Wellenlänge  $\lambda = 1064$ nm wird über eine plankonvexe Linse mit einer Brennweite von 20 mm in die Brennkammer fokussiert und bildet dort bei ausreichender Lichtintensität ein Plasma. Die Halterung der Fokussierlinse und des Brennraumfensters sind in der Fotografie oben als schwarzes Rechteck und das Plasma als heller Punkt auf der unteren Seite zu erkennen. Wie in Kapitel 1 schon kurz erwähnt, besteht bei der Benzindirekteinspritzung das Problem, dass ein lokal stark inhomogenes Gemisch gezündet werden soll. Außerhalb des Sprays existiert nur reine Luft, d.h. das lokale Luft-Kraftstoff-Verhältnis  $\lambda_{lokal}$  beträgt

# 4 Sättigbarer Absorber als passiver Güteschalter

Ein passiver Güteschalter besteht aus einem optischen Element, wie z.B. einer mit organischem Farbstoff gefüllten Zelle oder einem dotierten Kristall, der die in Abbildung 4.1 gezeigten typischen Transmissionseigenschaften besitzt. Bei niedrigen Energiedichten besitzt der Absorber seine Anfangstransmission  $T_0$ , in diesem Fall etwa 0,43. Das Material wird transparenter bei höheren Energiedichten und bleicht aus oder sättigt bei hohen Energiedichten. Auch in gesättigtem Zustand besitzt die Transmission nicht den idealen Wert 1, aufgrund von Verlusteffekten wie z.B. der Absorption in den angeregten Zuständen.

Der Ausbleichprozess des sättigbaren Absorbers basiert auf der Sättigung eines spektralen Übergangs. Wird ein solches Material mit einer niedrigen Transmission der Laserwellenlänge in den Laserresonator eingebracht, so verhindert das zunächst die Laseroszillation. Wenn die Verstärkung während des Pumppulses steigt und die Resonatorumlaufverluste übersteigt, wächst die resonatorinterne Strahldichte und der passive



**Bild 4.1:** Nichtlineare Transmission eines sättigbaren Absorbers als Funktion der momentanen Energiedichte mit der Anfangstransmission  $T_0 = 0.43$  und der maximal möglichen Transmission  $T_{max} = 0.86$ .

Güteschalter wird gesättigt. Unter diesen Bedingungen sind die resonatorinternen Verluste gering und der Laserpuls beginnt sich aufzubauen.

Da der passive Güteschalter von der Laserstrahlung selbst geschaltet wird, wird der Einsatz von Hochspannung, einer schnellen elektrooptischen Ansteuerung oder von Hochfrequenzmodulatoren vermieden. Gegenüber aktiven Güteschaltern, wie z.B. elektrooptischen oder akustooptischen, besitzt der passive Güteschalter den Vorteil einer sehr einfachen Bauweise. Dadurch ist er sehr klein, robust und preiswert in seiner Herstellung. Ein Hauptnachteil des passiven Güteschalters liegt in der nicht exakten Ansteuerung des Zündzeitpunktes des Lasers. Der Zündzeitpunkt eines passiv gütegeschalteten Lasersystems ist definiert als die Zeitdauer zwischen Pumpbeginn und der Emission des Laserpulses. Im Vergleich zu aktiven Güteschaltern besitzt er darüber hinaus höhere Verluste und senkt dadurch den Wirkungsgrad des Lasers.

In den folgenden Abschnitten 4.1 und 4.2 wird der sättigbare Absorber analytisch bzw. numerisch beschrieben.

# 4.1 Analytisches Modell des sättigbaren Absorbers

Ein Material, das sich als sättigbarer Absorber eignet, insbesondere der häufig verwendete Cr<sup>4+</sup>-dotierte YAG, kann vereinfacht durch ein Vier-Niveau-System dargestellt werden [101, 102], wie es in Abbildung 4.2 gezeigt wird. Durch optische Absorption mit dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{GSA}$  (engl.: ground-state absorption, GSA) gelangen aus dem Grundzustand 1 Elektronen in den ersten angeregten Zustand 2'. Die Relaxation in den Zustand 2 erfolgt meist praktisch instantan in sehr kurzer Zeit und basiert auf strahlungslosen Mehrphononenprozessen. Durch Absorption mit dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{ESA}$  (engl.: excited-state absorption, ESA) gelangen die bereits angeregten Elektronen aus dem Zustand 2 in den obersten Zustand 3. Der spontane Zerfall von Zustand 3 zu Zustand 2 erfolgt mit der Lebensdauer  $\tau_{3-2}$ . Aufgrund der sehr kurzen Zerfallszeit  $\tau_{3-2}$ können Übergänge von Zustand 3 zu Zustand 1 vernachlässigt werden. Die Lebensdau-



Bild 4.2: Vier-Energie-Niveau-Modell eines sättigbaren Absorbers.

# 5 Grundlagen der Modellierung eines Lasersystems

Die Dynamik eines Lasers kann in guter Näherung mit einem Satz gekoppelter Ratengleichungen beschrieben werden. In der einfachsten Form beschreiben zwei Differentialgleichungen die Besetzungsinversion und die Photonendichte in einem räumlich gleichmäßigen Laser-Medium [115, 116]. Dabei wird das Modell vereinfacht mit der Annahme, dass die Strahlung innerhalb des Laser-Mediums longitudinal und transversal nicht variiert. Die Ratengleichungen sind sehr nützlich, um einen Großteil der Lasercharakteristika, wie z.B. die Pulsenergie, Spitzenpulsleistung und das zeitliche Verhalten eines gütegeschalteten Laserpulses, die Form des Pulses oder den Zündzeitpunkt zu bestimmen. Für ein Vier-Niveau-Lasersystem, dargestellt in Abbildung 5.1, lauten die Ratengleichungen [115–117]

$$\frac{\partial n_0}{\partial t} = \frac{n_{uL}}{\tau_1} - P(n_0) + \frac{n_{oL}}{\tau_2} \beta_{20}, \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial n_{uL}}{\partial t} = \frac{n_{oL}}{\tau_2} \beta_{21} + c \phi \sigma \left( n_{oL} - \frac{g_{oL}}{g_{uL}} n_{uL} \right) - \frac{n_{uL}}{\tau_1}, \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial n_{oL}}{\partial t} = P(n_0) - \frac{n_{oL}}{\tau_2} - c\phi\sigma\left(n_{oL} - \frac{g_{oL}}{g_{uL}}n_{uL}\right),\tag{5.3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c \phi \sigma \left( n_{oL} - \frac{g_{oL}}{g_{uL}} n_{uL} \right) \frac{l_k}{l_c} - \frac{\phi}{\tau_c} + R_{SP} \frac{n_{oL}}{\tau_2} \frac{l_k}{l_c}, \tag{5.4}$$

wo  $n_{0,uL,oL}$  die Besetzungsdichten im Grundzustand, im unteren Laserniveau bzw. im oberen Laserniveau sind.  $P(n_0)$  ist die Pumprate, welche als Funktion der Pumpleistung  $P_p$ , der Photonenenergie  $hv_p$ , des Pumpradius  $r_p$ , der optischen Kristalllänge  $l_k$  und des Absorptionsquerschnitts  $\sigma_{abs}$  des laseraktiven Materials durch

$$P(n_0) = \frac{P_p}{h v_p \pi r_p l_k} [1 - \exp\left(-\sigma_{abs} n_0 l_k\right)]$$
(5.5)

beschrieben wird.  $g_{uL,oL}$  beschreiben die Entartung der Laserniveaus und  $\beta_{20,21}$  sind die Übergangswahrscheinlichkeiten<sup>1</sup> zwischen den Energiezuständen.  $\tau_{1,2}$  sind die jeweiligen Lebensdauern zwischen den Energiezuständen.  $\tau_c$  ist die Lebensdauer der Photonen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>engl.: branching ratios



**Bild 5.1:** Darstellung eines 4-Niveau-Laser-Energieschemas mit den Besetzungsdichten im Grundzustand  $n_0$ , im oberen Laserniveau  $n_{oL}$  und im unteren Laserniveau  $n_{uL}$  sowie den möglichen Übergängen, ohne Entartung der Laserniveaus.

im Resonator. Sie ist definiert als

$$\tau_c = \frac{2l_c}{c\left(-\ln\left(VR_sR_r\right)\right)} \tag{5.6}$$

mit der Resonatorlänge  $l_c$ , dem Resonatorumlaufverlustkoeffizient V und den Reflektivitäten der Einkoppel- und Auskoppelspiegel  $R_s$  und  $R_r$ .  $\sigma$  ist der Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission und  $\phi$  die Photonendichte. Die instantane Relaxation aus dem oberen Pumpniveau in das obere Laserniveau basiert auf Mehrphononenprozessen. Der Strahlungsparameter  $R_{SP}$  ist definiert durch

$$R_{SP} = \frac{c\tau_2 \sigma}{V_m} \tag{5.7}$$

mit dem Modenvolumen  $V_m$ . Er berücksichtigt, dass nur ein geringer Teil der Spontanemission in Richtung der Laserstrahlung erfolgt und somit nur einen kleinen Teil zu dessen Leistung beiträgt.

# 5.1 Modellierung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems

Verbindet man die Eigenschaften des sättigbaren Absorbers aus (4.7) bis (4.9) mit der Beschreibung des Lasersystems aus (5.1) bis (5.4) und erweitert den Ausdruck für die Lebensdauer der Photonen im Resonator (5.6) um die durch den sättigbaren Absorber bedingten Verluste zu

$$\tau_{csa} = \frac{2l_c}{c\left(-\ln\left(T_{total}VR_sR_r\right)\right)},\tag{5.8}$$

# 6 Thermische Effekte

In diesem Kapitel werden thermisch induzierte Effekte eines passiv gütegeschalteten Lasersystems untersucht. In Abschnitt 6.1 wird mit einem analytischen Modell die Temperaturverteilung in einem longitudinal gepumpten passiv gütegeschalteten Laserkristall berechnet. Mit dieser Temperaturverteilung werden optische Effekte, wie z.B. die thermische Linse betrachtet, um den Einfluss auf das Lasersystem der Laserzündung abzuschätzen. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 6.2 der Einfluss der Kristalltemperatur auf die Pulsenergie des passiv gütegeschalteten Lasersystems untersucht.

# 6.1 Pumplichtinduzierte thermische Effekte

Der optische Pumpvorgang eines Festkörperlasermaterials ist verbunden mit der Erzeugung von Wärme im laseraktiven Medium. Hauptursache für diese Wärmeerzeugung sind die Energiedifferenzen zwischen Pumpband und oberem Laserniveau sowie zwischen unterem Laserniveau und Grundzustand des Lasermaterials. Dieser Quantendefekt, oder auch Stokes-Verschiebung genannt<sup>1</sup>, beträgt z.B: für Nd:YAG, gepumpt bei 808 nm bei der Emissionswellenlänge von 1064 nm, 24 %. Somit werden mindestens 24 % der Pumpleistung im laseraktiven Medium in Wärme umgewandelt. In der Praxis ist dieser Wert noch höher, da nicht jedes Pumpphoton in ein Laserphoton umgewandelt wird. Experimentell ermittelte Werte bei Laserbetrieb liegen zwischen 30 und 32 % [151]. Ohne Vorhandensein stimulierter Emission liegen die Werte für den Wärmeeintrag noch höher im Bereich von etwa 40 % [152–155]. Für die nachfolgenden Rechnungen wird ein Wärmeeintrag von 30 % der Pumpleistung angenommen, da bei einem passiv gütegeschalteten Lasersystem stimulierte Emission notwendig ist, um den passiven Güteschalter auszubleichen.

Im Vergleich dazu liegt der theoretische Wert für Yb:YAG, gepumpt bei 943 nm bei einer Emissionswellenlänge von 1030 nm, bei nur 9 %. Der experimentell ermittelte Wert für den Quantendefekt bei Laserbetrieb bei Yb:YAG liegt bei 11 % [152].

Durch diesen Wärmeeintrag aufgrund des optischen Pumpens werden diverse Effekte wie z.B. thermische Linse, thermisch induzierte Spannungen und damit spannungsinduzierte Doppelbrechung bewirkt, die die Leistungsfähigkeit des Lasers oder auch das

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>engl.: quantum defect bzw. Stokes shift

Strahlprofil beeinflussen können. Im Folgenden wird ermittelt, welche Temperaturen in einem Lasersystem der Laserzündung entstehen und welche Effekte dadurch hervorgerufen werden können.

# 6.1.1 Bestimmung der Temperaturverteilung eines longitudinal diodengepumpten Festkörperlasers

Das hier verwendete Modell liefert eine exakte Temperaturverteilung für ein zylindersymmetrisches laseraktives Material, mit einer ungleichmäßigen Wärmequellenverteilung in transversaler und longitudinaler Richtung, sowie einer zylindersymmetrischen Kühlung um das laseraktive Material [156]. Abbildung 6.1 zeigt die Seitenansicht des laseraktiven Materials mit den dazugehörigen Kühlflächen. Der Laserstab in Form eines Zylinders, mit der Länge  $l_c$  und dem Durchmesser  $\rho_0$ , ist umgeben von Kühlmaterial. Die Ein- und Austrittsoberflächen a und s sind kontaktiert mit zwei unterschiedlichen Medien. Die erzeugte Wärme wird durch einen longitudinalen Pumpstrahl erzeugt.

Ein Teil der Pumpstrahlung wird wie oben beschrieben in Wärme umgewandelt und durch die pro Volumeneinheit erzeugte Wärmeleistung Q(x,y,z) beschrieben. T(x,y,z) ist die Temperaturverteilung im Laserstab. Wenn Wärme in einem Festkörper erzeugt wird, ist die allgemeine Differentialgleichung zur Beschreibung der Temperatur die stationäre Wärmeleitungsgleichung

$$DC_{p}\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,z) = \nabla \left[\lambda_{th}(T) \nabla T(x,y,z)\right] + Q(x,y,z)$$
(6.1)

mit der thermischen Leitfähigkeit  $\lambda_{th}(T)$ , der spezifischen Wärme bei konstantem Druck  $C_p$  und der Materialdichte D. Mit der Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}(T)$ 



Bild 6.1: Seitenansicht des laseraktiven Materials mit den dazugehörigen Kühlflächen.

mit dem Pumpwirkungsgrad  $\eta_{pe}$ . Differentiation von (6.12) und (6.13) nach der Temperatur *T* führt zu

$$\frac{dE_{out}}{dT} = \eta_{slope} \left( -\frac{dE_{th}}{dT} \right) \tag{6.14}$$

und

$$\frac{1}{E_{th}}\frac{dE_{th}}{dT} = \left(-\frac{1}{\sigma}\frac{d\sigma(T)}{dT}\right).$$
(6.15)

Die Differentialgleichung (6.15) beschreibt die temperaturabhängige Schwellenenergieänderung eines kontinuierlich emittierenden Lasers als Funktion des temperaturabhängigen Wirkungsquerschnitts der stimulierten Emission.

Mit (6.11) und (6.15) ist ersichtlich, dass die Pulsenergie E eines passiv gütegeschalteten Lasers bzw. die Schwellenenergie  $E_{th}$  eines kontinuierlich emittierenden Lasers mit steigender Temperatur ansteigt, wenn  $d\sigma(T)/dT$  negativ ist.

Für die Lasermaterialien Nd: YAG, Nd: YLF und Yb: YAG wird die Temperaturabhängigkeit der jeweiligen Wirkungsquerschnitte der stimulierten Emission in den Abschnitten 7.4.1.6, 7.4.2.4 und 7.4.3.1 bestimmt.

# 7 Experimente zum Laserdesign

Um anhand des numerischen Modells verlässliche Voraussagen über die Auslegung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems treffen zu können, ist es notwendig die Ergebnisse aus den numerischen Modellbetrachtungen mit den experimentellen Werten zu vergleichen.

Die in dieser Arbeit für die Experimente zum Laserdesign und auch für die Motorversuche verwendeten Pumpquellen werden in Abschnitt 7.1 charakterisiert.

Die in Kapitel 4 theoretisch betrachteten Eigenschaften eines sättigbaren Absorbers werden in Abschnitt 7.2 anhand von Cr<sup>4+</sup>:YAG verifiziert. Außerdem werden zu Cr<sup>4+</sup>:YAG alternative sättigbare Absorber untersucht.

Die verwendeten Lasermaterialien werden in Abschnitt 7.3 hinsichtlich ihrer Eigenschaften vorgestellt. Das in Kapitel 5 vorgestellte numerische Modell für ein passiv gütegeschaltetes Lasersystem wird in Abschnitt 7.4 bestätigt.

Ein Vergleich der Lasermaterialien im Hinblick auf die Anwendung der Laserzündung wird in Abschnitt 7.5 präsentiert.

# 7.1 Charakterisierung der Pumpquellen

Für die optische Anregung der Festkörperlaser werden fasergekoppelte Diodenlaserpumpmodule verwendet. Im Pumpwellenbereich um 800 nm wird ein Diodenlasermodul der Firma Smart Laser Systems verwendet, das eine maximale Ausgangsleistung von etwa 130 W besitzt. Im Pumpwellenbereich um 940 nm wird ein Diodenlasermodul der Firma Dilas verwendet, mit einer Ausgangsleistung von etwa 600 W. Alle Module koppeln die Pumpstrahlung in eine Faser mit einem Faserdurchmesser von 600 bis 1200 µm und einer numerischen Apertur von 0,22. Die Module werden quasi kontinuierlich betrieben mit Wiederholraten von 10 bis 50 Hz sowie Pumpdauern von bis zu 2 ms. Die Charakterisierung der Module umfasst die Messung der Leistungskennlinien sowie die Wellenlängenabhängigkeit der Module von der Diodenlasertemperatur und des Diodenlaserstroms. Die Wellenlängenabhängigkeit  $\lambda(T)$  resultiert aus der temperaturabhängigen Bandlücke  $\Delta E(T)$  des Diodenlasers mit der Beziehung

$$\lambda(T) = \frac{hc}{\Delta E(T)}.$$
(7.1)

Anhand der gemessenen Werte für die einzelnen Diodenlasermodule kann der spektrale Überlapp zwischen den Emissionsspektren der Diodenlaser und den Absorptionsspektren der Lasermaterialien für jede Pumpleistung optimiert werden.

# 7.1.1 Charakterisierung der fasergekoppelten Laserdiode bei 808 nm

Das Diodenlasermodul der Firma Smart Laser System ist mit einem Laserbarren LT-1610 der Firma Lasertel ausgestattet, der eine Ausgangsleistung von 200 W besitzt. Gekühlt wird der Barren über ein Peltierelement. Nach einer "fast axis" Kollimation wird das Diodenlaserlicht über ein Umstapelelement aus planparallelen Platten, eine asphärische und eine Zylinderlinse in die Faser eingekoppelt. Die Einkoppeleffizienz beträgt etwa 65 % bei der Einkopplung in eine 1200 µm-Faser mit der numerischen Apertur von NA = 0, 22.

Abbildung 7.1 zeigt die Leistungskennlinie des Smart Laser Systems Modul. Die Kennlinie wird bei einer Diodenlasertemperatur von 30 °C, einer Wiederholrate von 10 Hz und einer Pumpdauer von 500 µs gemessen. Eingekoppelt wird das Licht in eine 1200 µm-Faser mit NA = 0,22. Der Schwellenstrom  $I_{thr}$  liegt bei 24 A und der differentielle Wirkungsgrad  $\eta_{slope}$  beträgt 75 %.

Um die Wellenlängenabhängigkeit des Diodenlasermoduls zu bestimmen, wurden zwei Messungen vorgenommen. In der ersten Messung wurde die Abhängigkeit der Emissionswellenlänge von der Diodenlasertemperatur bei konstantem Diodenlaserstrom von



Bild 7.1: Leistungskennlinie der fasergekoppelten Laserdiode bei 808 nm, Diodenlasertemperatur 30 °C.

# 8 Experimente zum Motorversuch

Bei der Anwendung eines passiv gütegeschalteten Lasersystems an einem Ottomotor mit seinem großen Temperaturbereich von -40 °C bis +160 °C und den hohen Beschleunigungen bis zum hundertfachen der Erdbeschleunigung, sind an die Konstruktion der Laserzündkerze hohe Anforderungen zu stellen. So muss der Laserkristall gut fixiert sein, die Wärmeausdehnung kompensiert werden und eine gute Wärmeableitung gewährleistet sein. Auch eine einfache Montage der notwendigen Komponenten von der Pumpfaser bis zum Auskoppelfenster ist erforderlich.

Im folgenden Abschnitt wird die Auslegung der Kristallhalterung, dem wichtigsten Punkt bei der Konstruktion der Laserzündkerze, vorgestellt.

# 8.1 Kristallhalterung

Für die Fixierung des Laserkristalls wird eine Halterung aus einem Kupfer-Stahl-Verbund gewählt, die auf dem Prinzip der "verhinderten Wärmeausdehnung" basiert. Der Kristall ist nur dann optimal gehaltert, wenn die thermische Ausdehnung des Laserkristalls größer, oder innerhalb der Fertigungstoleranzen der Verbundmaterialien gleich der Ausdehnung des Kupfer-Stahl-Verbunds, ist. Ist die thermische Ausdehnung größer als die des Verbunds, darf die Bruchspannung des Laserkristalls  $\sigma_{max}$  nicht überschritten werden.

Die Fertigungstoleranzen des Laserkristalls und der Kupferhülse betragen jeweils 10 µm. Aufgrund der Toleranzen wird der Kristall in der Praxis bei Raumtemperatur unter einer mechanischen Spannung eingebaut, die aber nicht quantifizierbar ist. Ausgeschlossen ist dagegen eine Montage des Kristalls, bei der zwischen Kristall und Kupferhülse ein Bewegungsraum existiert.

Abbildung 8.1 zeigt schematisch den Aufbau der Kristallhalterung. Der Kristall besitzt den Radius  $r_{Nd:YAG}$ , die Kupferhülse den Außenradius  $r_{Cu}$  und die Stahlhülse den Außenradius  $r_{Stahl}$ .

Für die Berechnung der Spannungen in dem Kristall-Metall-Verbund mittels Finite-Elemente-Methode wurde das Programm ABAQUS 6.6-1 verwendet. Hiermit wurde das axialsymmetrische dreidimensionale Modell aus Schalenelementen berechnet, welches als Welle-Naben-Verbindung aus Laserkristall, Kupfer- und Stahlhülse dargestellt



Bild 8.1: Schematische Darstellung der Kristallhalterung aus einem Kupfer-Stahl-Verbund.

ist. Für die Berechnungen werden für einen Nd:YAG-Kristall die Werte des Wärmeausdehnungskoeffizienten, des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl aus Tabelle 7.2 verwendet. Für Kupfer werden die Werte  $E_{Cu} = 128000 \text{ Nmm}^{-2}$ ,  $\alpha_{Cu} = 1,65 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  und  $\nu_{Cu} = 0,34$  verwendet, für Stahl die Werte  $E_{Stahl} = 210000 \text{ Nmm}^{-2}$ ,  $\alpha_{Stahl} = 1,25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  und  $\nu_{Stahl} = 0,30$  [190]. Es wird dabei vereinfacht angenommen, dass die Materialkennwerte unabhängig von der Temperatur sind.

Bei den Berechnungen wird angenommen, dass bei einer Temperatur von -40 °C die Montage von Kristall und der beiden Hülsen aus Kupfer und Stahl spannungsfrei erfolgt. Für eine Temperatur von +400 °C werden die Radial- und Umfangsspannungen sowie die daraus resultierenden Radialverschiebungen der Verbundmaterialien berechnet. Durch diese Wahl des Temperaturbereiches werden die Anforderungen in PKW sowie die an stationäre Großmotoren ausreichend abgedeckt.

Abbildung 8.2 zeigt für einen Nd:YAG-Kristall mit Durchmesser 3 mm und 10 mm Länge, einer Kupferhülse mit einer Dicke von 1 mm und einer Stahlhülse mit der Dicke 4,5 mm die berechneten Radialspannungen in den einzelnen Materialien bei einer Temperatur von +400 °C. Der Kristall, rechtsseitig von Kupfer- und Stahlhülse ummantelt, ist auf der linken Seite der Abbildung zu erkennen. Die Radialspannungen sind in Graustufen codiert und in der Einheit Nmm<sup>-2</sup> angegeben. Bei der gewählten Temperatur von +400 °C wird keine Radialspannung auf den Kristall ausgeübt. Die größten Radialspannungen treten innerhalb des Verbunds an der Fläche zwischen Kupfer- und Stahlhülse auf. Auf die Kupferhülse wirkt maximal ein Druck von -85,5 Nmm<sup>-2</sup>, auf die Stahlhülse ein Druck von -100,3 Nmm<sup>-2</sup>.

Abbildung 8.3 zeigt für den gleichen Verbund die berechneten Umfangsspannungen. Die Umfangsspannungen sind in Graustufen codiert und in der Einheit Nmm<sup>-2</sup> angegeben. Wiederum treten die größten Umfangsspannungen an den Metallhülsen auf. Die Innenseite der Kupferhülse erfährt einen maximalen Druck von -273,9 Nmm<sup>-2</sup>. Auf der

# 9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden ausgehend von grundlegenden Experimenten an Verbrennungsgefäßen die Anforderungen für die Laserzündung bestimmt. Dabei wurden ausführliche Untersuchungen für Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzungssystem durchgeführt. Die Anforderungen für stationäre Großgasmotoren, die bereits in der Literatur ausführlich beschrieben sind, wurden durch neue Messungen ergänzt, wie sie mit kommerziellen Lasersystemen in dieser Form noch nicht realisiert werden konnten. Zusammenfassend sind für beide Anwendungen Pulsenergien bis zu 10 mJ bei Pulslängen im Bereich weniger Nanosekunden notwendig, um eine sichere Entflammung des reaktiven Gemisches zu gewährleisten. Bei idealen Entflammungsbedingungen, das bedeutet hohe Teilchenzahldichte und Temperatur des reaktiven Gemisches, reduziert sich die Anforderung an die Pulsenergie drastisch auf wenige mJ.

Ein longitudinal gepumptes passiv gütegeschaltetes Lasersystem, welches die Anforderungen an ein Laserzündsystem erfüllen kann, wurde im Detail theoretisch wie auch experimentell untersucht.

Der passive Güteschalter ist das zentrale Bauteil eines passiv gütegeschalteten Lasersystems. Die genaue Funktionsweise des Güteschalters wurde mit einem numerischen Modell beschrieben. Für die Beschreibung des gesamten passiv gütegeschalteten Lasersystems genügt eine analytische Beschreibung des passiven Güteschalters. Das System der gekoppelten Ratengleichungen des passiv gütegeschalteten Lasersystems lässt sich durch diese Vereinfachung mit einem reduzierten Rechenaufwand lösen.

Für erste Abschätzungen, die Auslegung des Lasersystems betreffend, wurde ein analytisch lösbares Ratengleichungssystem berechnet. Anhand dieses Modells lassen sich bereits erste Ansätze für die Auslegung des passiv gütegeschalteten Lasersystems finden. So besitzen die Ausgangsparameter in Abhängigkeit der Eigenschaften von laseraktivem Material, passivem Güteschalter und des Resonators eine gewisse Aussagekraft, aber in vielen Bereichen wird der Geltungsbereich des analytischen Modells verlassen. Weitere, für die Laserzündung wichtige, Aussagen können nicht getroffen werden: So sind zum Beispiel der Zündzeitpunkt, das heisst die Zeitdauer zwischen Pumpbeginn und Emission des Pulses, wie auch Temperaturabhängigkeiten der Ausgangsparameter nicht zu berechnen.

# Literatur- und Quellenverzeichnis

- HERDEN, W.: Perspektiven alternativer Zündsysteme. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Diesel- und Benzindirekteinspritzung III: Einspritzsysteme, Potentiale, Anwendungen, Zukunftsentwicklungen. Expert Verlag, 2004.
- [2] STIEBELS, B.; SCHWEIZER, M. J.; EBUS, F.; POTT, E.: Die FSI-Technologie von Volkswagen – nicht nur ein Verbrauchskonzept. In: Direkteinspritzung im Ottomotor IV. Essen, 2003.
- [3] KITTLER, E.: Voll auf Draht. Auto, Motor und Sport 11 (Mai 2006), S. 38–39.
- [4] GUPTA, S. B.; SARETTO, S.; BINING, A.; SEKAR, R. R.; PAL, S.; SANTORO, R. J.: Laser Ignition for Natural Gas Reciprocating Engines: A Literature Review. In: CIMAC Congress 2004. Kyoto, 2004.
- [5] HERDIN, G.: Gasmotoren Potenziale und Zukunft. In: DVV Kolloquium. November 2004.
- [6] MCMILLIAN, M. H.; WOODRUFF, S. D.; RICHARDSON, S. W.; MCINTYRE, D. L.: Laser Spark Ignition: Laser Development and Engine Testing. In: 2004 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Long Beach, California USA: ASME, 2004, S. 823–832.
- [7] PHUOC, T. X.: Laser-induced spark ignition fundamental and applications. Optics and Lasers in Engineering (Reviewed Article in Press).
- [8] HEYWOOD, J. B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [9] KOPECEK, H.; LACKNER, M.; ISKRA, K.; FORSICH, C.; RÜDISSER, D.; NE-GER, T.; WINTER, F.; WINTNER, E.: Laser Ignition of methane-air mixtures at high pressures and optical diagnostics. In: Weber, H. P.; Konov, V. I.; Graf, T. (Hrsg.): International Conference on Advanced Laser Technologies. SPIE, 2003, S. 331–342.
- [10] KOPECEK, H.; CHARAREH, S.; LACKNER, M.; FORSICH, C.; WINTER, F.; KLAUSNER, J.; HERDIN, G.; WINTNER, E.: Laser Ignition of Methane-Air Mixtures at High Pressures and Diagnostics. In: 2003 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Long Beach, California USA: ASME, 2003, S. 147–154.
- [11] KOPECEK, H.; MAIER, H.; REIDER, G.; WINTER, F.; WINTNER, E.: Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures. Experimental Thermal and

- [189] KOECHNER, W.: Solid-State Laser Engineering, 6. Aufl. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [190] BILINGS, B. H.; BLEIL, D. F.; COOK, R. K.; CROSSWHITE, H. M.; FREDE-RIKSE, H. P. R.; LINDSAY, R. B.; MARION, J. B.; ZEMANSKY, M. W.: American Institute of Physics Handbook, 3. Aufl. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [191] GS/ETC: Robert Bosch GmbH.

# 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 längsgeströmte 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

## 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<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

# 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<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

## Plaß, 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 verfahrentechnischer 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

Fluiddynamische 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 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<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 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

Laserstrahischweißen 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 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