

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser

von Dr.-Ing. Mikhail Larionov
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Günter Huber
PD Dr. rer. nat. Adolf Giesen

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., 2008

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 2009

ISBN 978-3-8316-0855-3

Printed in Germany

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

Kurzfassung

Scheibenlaser finden zunehmend Einsatz in industriellen und wissenschaftlichen Anwendungen. Die Geometrie des Lasermediums – eine dünne Scheibe, die durch eine Stirnseite gekühlt wird – gibt dem Design seinen Namen. Eine geringe Dicke des Lasermediums, die typischerweise einige Hundert Mikrometer beträgt, ermöglicht eine effiziente Kühlung, die besonders für den Betrieb von Quasi-Drei-Niveau-Lasermaterialien vorteilhaft ist. Die Ausgangsleistung kann über die Fläche des gepumpten Bereichs skaliert werden, da sowohl die mechanischen Spannungen im Lasermedium als auch seine Temperatur hauptsächlich von der Leistungsdichte und nicht von der absoluten Leistung abhängig ist. Der Wärmefluss ist annähernd parallel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls. Daher ist die Verzerrung der Wellenfront beim Durchgang durch das Lasermedium gering und ein effizienter Betrieb mit hoher Ausgangsleistung und guter Strahlqualität ist möglich.

Das Lasermaterial in Form einer dünnen Scheibe wird für den Laserbetrieb üblicherweise auf einem Träger befestigt, um die notwendige mechanische Stabilität zu erreichen. Der Kontakt zum Träger soll homogen und mechanisch dauerhaft stabil sein. Zusätzlich soll er einen niedrigen Wärmewiderstand aufweisen. Verschiedene Kontaktierungsmöglichkeiten, wie Löten und Kleben auf einen Träger oder eine Komposit-Scheibe, bei der der Träger transparent ist und vom Laserstrahl durchquert wird, werden beschrieben und miteinander verglichen.

Insbesondere das Löten der Laserscheiben auf den Träger hat am IFSW Einsatz gefunden. Die Auswahl des Lotes und die verwendete Technik werden beschrieben. Um die Lötung zu charakterisieren, wurde ein Testaufbau entwickelt, der die Fehlstellen der Lötverbindung visualisiert.

Das meist eingesetzte Material im Scheibenlaserdesign ist Ytterbium dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (Yb:YAG). Das dreifach ionisierte Ytterbium besitzt eine einfache Energie-Struktur, die keine zusätzlichen Zerfallsprozesse außer spontanen und induzierten Emissionen zulässt. Bei den im Scheibenlaserdesign typischen Anregungsdichten ist aber zusätzlicher nichtstrahlender Zerfall (engl.: Quenching) vorhanden, der die Anregungsenergie zum großen Teil in Wärme umwandelt und so die erreichbare Verstärkung und die maximal zulässige Pumpleistungsdichte begrenzt. Dieser Zerfall wurde in Ytterbium dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat (Yb:YAG) experimentell nachgewiesen. Ein Messaufbau, der die gleichzeitige Messung der absorbierten Leistung, Temperatur und Verstärkung des Lasermaterials ermöglicht, wurde verwendet, um die Rate und die Wärmeerzeugung des zusätzlichen Zerfalls zu quantifizieren. Eine starke Abhängigkeit der Zerfallsrate von der Dotierung wurde festgestellt, so dass die Dotierung für die Laserexperimente auf 10 at. % Ytterbium begrenzt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Symbolverzeichnis	11
Abkürzungen	15
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Stand der Technik	22
1.2 Scheibenlaserdesign	25
1.2.1 Besonderheiten des Scheibenlaserdesigns	27
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	29
2 Grundlagen	31
2.1 Messung relevanter Materialparameter von Yb:YAG	31
2.1.1 Yb:YAG – spektrale Eigenschaften	31
2.1.2 YAG – thermomechanische und thermooptische Eigenschaften	36
2.1.3 YAG – Wärmeleitfähigkeit	38
2.1.4 Yb:YAG – Zusammenfassung der Materialparameter	39
2.2 Analytisches Modell des Scheibenlasers	39
2.2.1 Ratengleichungen	40
2.2.2 Nulldimensionales Modell	42
2.2.2.1 Berücksichtigung der Pumpoptik	42
2.2.2.2 Lösung für den Fluoreszenzbetrieb	43
2.2.2.3 Lösung für Dauerstrichbetrieb	44
2.2.3 Axiale Temperaturverteilung	47
2.2.4 Nulldimensionales Modell mit Berücksichtigung der Temperatur	48
2.2.4.1 Fluoreszenzbetrieb	49
2.2.4.2 Scheibentemperatur und Laserwirkungsgrad	54
2.3 Fluoreszenz im Scheibenlaserdesign: ASE und Absorption der Fluoreszenz in der Beschichtung	56

2.3.1	ASE	57
2.3.2	Wärmeerzeugung in der Beschichtung und Unterdrückung der ASE	60
2.4	Laserbetrieb und Scheibenform	64
2.4.1	Beugungsverluste	65
2.4.2	Optische Phasendifferenz (OPD) in einer Laserscheibe	67
2.4.3	Inversionsabhängigkeit des Brechungsindex	67
3	Quenching in Yb:YAG	69
3.1	Messaufbau	72
3.2	Vergleich zwischen Laser- und Fluoreszenzbetrieb	76
3.3	Auswertung der Messungen im Fluoreszenzbetrieb	79
3.4	Ergebnisse der Messungen	84
3.5	Zusammenfassung des Kapitels 3 und Ausblick	89
4	Kontaktierungsdesign und Kühlung	93
4.1	Beschichtungsdesign	95
4.1.1	Beschichtungsmaterialien	96
4.1.2	Designs	97
4.1.3	Wärmewiderstand der HR-Beschichtung	98
4.1.4	Mechanische Festigkeit	99
4.1.5	Pulsfestigkeit	99
4.1.6	Beschichtungsprozess und eingebaute Spannungen	101
4.2	Scheibe auf dem Träger	103
4.2.1	OPD in Laserscheibe im Betrieb	103
4.2.2	Aufpressen	105
4.2.3	Löten	107
4.2.3.1	Lötfähige Beschichtung	108
4.2.3.2	Spannungen nach dem Löten	108
4.2.3.3	Auswahl des Lotes	111
4.2.3.4	Das Lot Au80Sn20	114
4.2.3.5	Löten mit Gold-Zinn auf Kupfer-Wolfram	115
4.2.4	Kleben	117

4.2.4.1	Klassifizierung und Vergleich der Klebstoffe	118
4.2.4.2	Klebeaufbau und -prozedur	121
4.2.4.3	Experimentelle Ergebnisse	124
4.3	Scheibe auf der Vorderseite kontaktiert.....	126
4.3.1	Experimente	128
4.4	Vergleich einiger Kontaktierungsdesigns mittels FEM-Rechnungen	130
4.4.1	Multimode-Betrieb.....	131
4.4.2	Absorption und ASE.....	132
4.4.3	Mittlere Temperatur und Spannungen	134
4.4.4	Brechkraft der thermischen Linse.....	136
4.4.5	Verstärkung und Beugungsverluste	137
4.4.6	Pulsbetrieb.....	139
5	Charakterisierung der Kristalle für Scheibenlaser	141
5.1	Anforderungen	141
5.2	Technologischer Ablauf.....	142
5.3	Kontaktierungsqualität	143
5.4	Form.....	149
6	Zusammenfassung.....	154
7	Anhang	158
7.1	Einfluss der dreidimensionalen Wärmeleitung.....	158
7.2	Temperaturverteilung über einen Lötdefekt	160
7.3	Gleichungen und Aufgaben der Elastizitätstheorie	161
7.3.1	Axial symmetrische Formulierung der Gleichungen.....	161
7.3.2	Berücksichtigung der Temperaturverteilung	162
7.3.3	Aufgabe: Spannungen in einer dünnen Scheibe nach dem Löten	163
7.3.4	Aufgabe: Scherspannungen im Lot beim Abkühlen.....	163
7.3.5	Aufgabe: Verbiegung der Wärmesenke bei einem radial homogenen axialen Wärmefluss im Pumpfleck	165
7.3.6	Dünne Platten.....	167
7.3.6.1	Aufgabe: Verbiegung einer dünnen Platte unter Wasserdruck	168

7.3.6.2 Aufgabe: Verbiegung der Scheibe mit Beschichtungsspannungen .	168
Literaturverzeichnis	170

Extended Abstract

Thin disk laser concept was introduced in 1992 by the „Institut fuer Strahlwerkzeuge (IFSW)“ und „Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt (DLR)“. The design employs a disk with a thickness, which is much smaller than the diameter of the pumped spot in the disk. This allows a very efficient cooling over one of the flat disk faces, making an efficient operation of quasi-three-level materials such as Yb:YAG possible. The heat flow is almost one-dimensional and collinear with the propagation direction of the laser light. The absence of strong radial heat flow eliminates in a first approximation the problem of thermal lensing and diffraction losses in laser operation with good beam quality.

The scalability of the output power with the pumped area is the next important feature of the thin disk laser design. Using the same pump and laser fluences on the laser disk the size of the pumped area can be enlarged without any significant increase of the crystal temperature and therefore with the same efficiency in multimode operation. However the diffraction losses due to a residual thermal lens reduce the efficiency in the operation with good beam quality for higher pump powers.

The heat flow through the cooled face of the laser disk achieves several hundred Watts per square centimetre, making a fluid cooling necessary. However a laser disk with a typical thickness of 0,2 mm and a typical diameter of 10 mm cannot be cooled directly. The mechanical stability of the disk has to be improved by some mechanically rigid mounting.

The mounting of the laser disk should fulfil several conditions:

- + providing a plane or spherical shape of the laser disk during laser operation
- + withstanding the mechanical stress during laser operation
- + being homogeneous at least in the pumped region
- + having a low heat resistance (in case of heat sink)

Especially the first requirement is hard, because the deviation from the spherical shape should be smaller than $\lambda/20$, that means at a laser wavelength of 1 μm the deviation should be smaller than 50 nm.

There are two major possibilities to mount the laser disk - to contact a transparent mechanically stable carrier disk to the uncooled side of the laser disk or to contact the laser disk with its cooled side to a mechanically stable heat sink. The first possibility can be realized e.g. by bonding of a thick undoped YAG disk to the laser disk. Gluing or soldering of the laser disk on the heat sink are examples of the second possibility. These three techniques – bonding, gluing and soldering – were studied by the author experimentally and theoretically.

A bonded laser disk can be directly cooled with a cooling fluid, eliminating the heat resistance of a heat sink. This reduces the temperature of the laser material and enhances the laser efficiency. The undoped cap on the laser disk reduces the amplification of spontaneous emission (ASE). So a higher gain can be achieved in high power operation with a large pump spot and more energy can be stored in the

disk. A disadvantage of this design is the three-dimensional heat flow in the thick carrier disk. This leads for pump spot diameters, D_p smaller than eight times the crystal thickness, d ($D_p < 8d$) to stronger thermal lensing. The change of the refractive power of the spherical part of the thermal lens is large and the diffraction losses due to the aspherical part of the thermal lens are high, making an efficient laser operation with a good beam quality impossible without phase correction.

Laser disks can also be mounted on a heat sink with an adhesive. Adhesives have generally a low heat conductivity of about $0,1 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ – $0,2 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$. In order to minimize the heat resistance of the mounting the thickness of the adhesive layer have to be limited to approximately $1 \mu\text{m}$. It is technologically difficult to produce a thin adhesive layer and a good spherical shape of the mounted laser disk, simultaneously. Using a transparent adhesive and a transparent heat sink the absorption of the fluorescence at the bottom of the crystal can be avoided and the effect of ASE can be reduced, simultaneously. The total heat generation in the disk can be reduced compared with the soldering case. Using UV-curing adhesives the material of the heat sink can be free chosen, since it is not necessary to heat up the disk for curing. For example it is advantageous to use diamond due to its high mechanical rigidity, high thermal conductivity and transparency.

Soldering is a mounting technique, which is currently employed at the IFSW. But solders commonly used in the electronic industry have a low mechanical strength at the operation temperature and plastic deformation of solder in laser operation can occur. In this case the shape of the laser disk changes during laser operation, making a stable laser operation impossible. Therefore a special solder – the gold-tin eutecticum (Au80Sn20) with a melting temperature of $280 \text{ }^\circ\text{C}$ was chosen. Its tensile strength of 250 MPa is high enough to avoid any mechanical deformation of the mounting in laser operation. To avoid a contacting stress due to the high soldering temperature a cte-matched heat sink made of copper-tungsten is used.

A mounted laser disk should have a homogeneous heat contact and mechanical bond in the pumped area. Any imperfections cause local phase distortions and stress. Local phase distortions reduce the efficiency in the laser operation with good beam quality and local stress can destroy the laser crystal. However, contact delaminations are common for soldering with gold-tin because of very rapid oxidation of the solder surface. A special soldering technique was developed to minimize the number of soldering defects.

In order to test the soldered crystals and qualify them for laser operation with a given pump spot size a special set-up was developed to visualize the contact defects. A spot with a diameter of 2 mm on the laser crystal is pumped with a power of 500 W . The crystal is illuminated with a collimated beam of a green helium-neon laser ($\lambda=543 \text{ nm}$). Interference of the green light reflected from both sides of the crystal can be observed with a CCD camera. Any local temperature rise during laser operation is visualized as a change of the intererometric fringe pattern. Additionally, the laser crystal can be moved in the disk plane, so the whole disk can be tested.

Another key issue of the thin disk laser design is the choice of the laser material. The excitation density is very high in the thin disk laser design. Up to 40 \% of the ytterbium ions are excited in pulse laser operation at low repetition rate. At such high

excitation densities several additional decay mechanisms other than the spontaneous and induced emission exist in Yb:YAG. A measuring set-up allowing a simultaneous measurement of the absorbed power, the small signal gain, surface temperature of the disk with and without laser operation was used in order to investigate these processes. The measured data were analysed using an analytical model. The main assumption of the model is the homogeneous distribution of the absorbed power across the thickness of the laser disk. This assumption was proved using a numerical 2D-modelling and found to be correct for typical operation conditions. Absorption and emission cross sections of Yb:YAG were measured in the temperature range of interest between room temperature and 300 °C. The measured cross sections were used in the evaluation of the measurements.

For all materials a decay rate and a heat generation higher than predicted by the model was measured. Changing of the cooling water temperature from 16 °C to 85 °C showed, that the decay is only slightly dependent on the temperature in this temperature range. The rate of the additional decay – “quenching” – depends mainly on the density of excited ytterbium ions. Two types of additional decay were identified. The rate of the first one is lower than that of the spontaneous fluorescence. It increases nonlinearly with the density of the excited ions. The second one is a threshold process. It starts at some threshold density of the excited ytterbium ions and is so fast, that the density of the excited ions does not increase further by increasing the pump power. Approximately half of the pump photon energy is converted into heat by excited ions decaying through this channel. The threshold density depends on the doping concentration and is lower for higher doping concentrations. This type of quenching limits the achievable density of the excited ions and the gain of the laser disk. Using crystals with thicknesses optimised for efficient cw operation a maximum gain of 22 % with a doping concentration of 9 %, a gain of 7 % with a doping concentration of 12,7 % and only a gain of 1 % with a doping concentration of 15,7 % was achieved.

Concluding, two key issues of thin disk laser design are addressed in this thesis; the choice of the material and the mounting of the laser crystal are discussed in detail. It is shown experimentally, that the doping concentration of Yb should be kept low for an efficient laser operation. In the pulsed laser operation with low repetition rates ($<1/\tau_f$) the doping concentration should be lower than 10 %. In continuous wave operation an efficient operation is possible with a doping concentration of 12,7 % as well. Quenching in Yb:YAG was experimentally observed and empirically described. The quenching rate depends strongly on the density of excited Yb ions and on the doping concentration.

Three mounting techniques: soldering, adhesive bonding and diffusion bonding are compared experimentally and theoretically. Soldering with gold-tin is the most promising mounting technique for the output powers up to several kW. The manufacturing process for laser disks beginning with the polishing and coating of the crystal and finishing by the testing of the soldered crystal was developed and is described in the thesis.

1 Einleitung

Die Festkörperlaser finden zunehmend Einsatz in der Industrie. Dank ihrer Kompaktheit und Zuverlässigkeit gewinnen sie immer größere Anteile des Weltlasermarkts. Auch in der Materialbearbeitung, die einst von CO₂-Laser bedient wurde, gewinnen sie zunehmend an Bedeutung. Hier kommt dem Festkörper die Emissionswellenlänge zugute, die bei den üblichen Festkörperlasern etwa zehnmal unter der eines CO₂-Lasers liegt. Das hat insbesondere zwei Auswirkungen – der Laserstrahl kann durch eine Glasfaser transportiert werden und die durch die Beugungsmaßzahl ausgedrückte Strahlqualität des Lasers darf zehnmal schlechter sein, ohne dass die Fokussierbarkeit des besten CO₂-Lasers unterschritten wird.

Die prinzipiell mögliche bessere Strahlqualität würde dem Anwender erlauben [1], eine günstigere Kombination aus Arbeitsabstand, Fokusgröße und Größe der eingesetzten Optik auszunutzen. Entweder kann der Fokus verkleinert werden, wobei die anderen beiden Parameter konstant bleiben, der Arbeitsabstand unter Beibehaltung der Fokus- und Optikgröße erhöht werden, oder es können kleinere und billigere Optiken zur Fokussierung des Laserstrahls eingesetzt werden. Es ist auch denkbar, dass alle drei Parameter geändert werden, so dass die Bearbeitungsanlage schneller oder effektiver wird.

Die Fokussierbarkeit ist maximal, wenn ein Gaußstrahl eingesetzt wird. Dieser stellt unter allen möglichen Intensitätsverteilungen das Optimum dar, für das das Produkt aus Fokusdurchmesser und Fernfelddivergenz minimal ist. Für die Anwendung bedeutet das, dass auch bei einem kleinen Fokusdurchmesser die Fokussieroptik relativ klein bleibt bzw. ein großer Arbeitsabstand gewählt werden kann. Eine weitere Verbesserung der Fokussierbarkeit könnte durch weitere Verkürzung der Wellenlänge erreicht werden.

Was bedeutet Strahlqualität für den Laserentwickler? Physikalisch gesehen setzt sie eine obere Grenze für die Indizes m, n der Gauß-Moden TEM_{mn}, die im Laserresonator zugelassen sind. Im Grenzfall oszilliert nur ein Mode – der Gauß-Mode TEM₀₀. Man spricht in diesem Fall vom Grundmodebetrieb. In der Praxis wird leider üblicherweise eine Verschlechterung der Lasereffizienz bei einer Verbesserung der Strahlqualität verzeichnet. Abgesehen von dem kleineren Überlapp zwischen Verstärkungsbereich und Resonatormode ist die mit der Verbesserung der Strahlqualität steigende Empfindlichkeit des Lasers auf Phasenstörungen der wichtigste Grund dieser Verschlechterung.

Unter der Annahme, dass alle Resonatorelemente ohne Last eine ideal sphärische Form besitzen, werden die Phasenstörungen im Betrieb durch die Änderung der Form für reflektierende Elemente und zusätzlich durch die Änderung des Brechungsindex für transmittierenden Elemente verursacht. Die Änderungen werden durch Erwärmung hervorgerufen. Da das laseraktive Medium üblicherweise die größte Erwärmung aufweist, entstehen die größten Phasenstörungen im laseraktiven Medium. Die Wärme im laseraktiven Medium entsteht u.a. wegen des Quantendefekts. Das Pumpphoton hat mehr Energie als das Laserphoton. Die Energiedifferenz verbleibt im Lasermaterial in Form von Wärme. Je mehr Laserphotonen produziert werden, desto mehr Wärme entsteht. Die thermischen Probleme werden mit steigender Ausgangsleistung

gravierender. Die Situation wird durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit der meisten Lasermaterialien erschwert, die typischerweise 50-fach geringer als die von Kupfer und 100 bis 1000 mal niedriger als die von Diamant ist.

Um die zwei Anforderungen, die seitens der Anwendung gestellt werden – höhere Ausgangsleistung und bessere Strahlqualität oder gar einen beugungsbegrenzten Strahl – gerecht zu werden, wurden und werden unterschiedliche Laserkonzepte verfolgt.

1.1 Stand der Technik

Das Stablaserdesign hat zuerst den Weg in die Industrie gefunden. Wie der Name sagt, hat das Lasermaterial die Form eines Stabs. Der Stab wird entweder durch die zylindrische Oberfläche oder durch die Stirnflächen mit Lampen oder Diodenlasern gepumpt. Die erzeugte Wärme wird durch die zylindrische Oberfläche abgeführt. Der Wärmefluss und der Temperaturgradient sind damit radial. Die radiale Temperaturverteilung erzeugt im Laserstab eine starke thermische Linse, die wegen der nicht vollständig homogenen Pumpstrahlungsverteilung und Kühlung nicht perfekt sphärisch ist. Die asphärischen Anteile verursachen Verluste beim Betrieb mit guter Strahlqualität. Außerdem begrenzen die Brechkraft der thermischen Linse und die mechanischen Spannungen im Stab, die Doppelbrechung und Depolarisationsverluste verursachen, die extrahierbare Laserleistung.

Eine Gruppe aus Japan hat einen quasi-cw Nd:YAG Stablaser mit einer mittleren Leistung von 1 kW und einer Strahlqualität von $M^2 < 9$ [2] demonstriert. Eine andere Gruppe aus Japan hat eine Leistung von 12 kW bei einer elektrisch-optischer Effizienz von 22 % und einer Beugungsmaßzahl von etwa 30 erzielt [3]. Kommerziell werden diodengepumpte Stablaser für die Materialbearbeitung z. B. von den Firmen TRUMPF Laser [4] und ROFIN SINAR [5] angeboten. Laser mit einer Ausgangsleistung von 6 kW bei einer Strahlqualität von $M^2=75$, mit 4,5 kW mit einer Strahlqualität von $M^2=48$ (TRUMPF) bzw. $M^2=36$ (ROFIN SINAR) stehen im Lieferprogramm. Die Leistung wird in eine Faser mit einem Durchmesser von 600 μm (6 kW) bzw. 400 μm (4,5 kW) eingekoppelt und zum Werkstück geführt.

Um einen effizienten Grundmodebetrieb im Stabdesign zu gewährleisten müssen spezielle Maßnahmen wie Kompensation der Depolarisation und der thermischen Linse ergriffen werden (s. z. B. [6] und [7]).

Eine Verbesserung der Wärmeabfuhr kann mit einem Design erreicht werden, in dem das Lasermedium dünn ist, so dass der Weg des Wärmeflusses im Lasermaterial möglichst kurz ist. Zur Zeit werden drei Ansätze verfolgt, die nach der Form des Lasermediums benannt werden: Slab, Faser und Scheibe [8].

Im Slablaserdesign [9, 10, 11, 12] besitzt das Lasermedium die Form eines Quaders (engl. Slab), der in einer Richtung dünn ist (einige mm oder unter 1 mm). Die Kühlung wird so aufgebaut, dass der Wärmefluss parallel zur kürzesten Kante ist. Der Laserstrahl verläuft senkrecht dazu. Aufgrund der Kühlgeometrie weist das Slablaserdesign unterschiedlich starke thermische Linsen und dementsprechend auch typischerweise unterschiedliche Strahlqualitäten für die tangentialen und sagittalen Richtungen auf. Die Kühlung ist viel effizienter als im Stablaserdesign. Die Probleme der Doppelbrechung und der thermischen Linse sind stark reduziert.

Der Resonator kann so aufgebaut werden, dass das Licht im Zig-Zag mehrmals durch den Slab geschickt wird. Auf diese Weise haben SHNITZLER ET. AL. [10] eine Ausgangsleistung von 982 W mit einer elektro-optischen Effizienz von 16 % erreicht. Die Beugungsmaßzahl ist richtungsabhängig und wurde zu $M^2 < 3$ und $M^2 < 7$ gemessen. Auch höhere Leistungen von 5,4 kW [13] und 6,1 kW [14] sind bereits demonstriert. Die Firma EdgeWave GmbH [15] bietet Slablaser bis zu einer Ausgangsleistung von 200 W bei einer Beugungsmaßzahl $M^2 < 2$ an [16].

Alternativ kann ein rechteckiger Strahl entsprechend der Apertur des Slabs ausgekoppelt werden. Die Verwendung eines Auskoppelspiegels mit einem über den Strahlquerschnitt variierenden Reflexionsgrad erlaubt es, einen Strahl mit gleicher Strahlqualität in beide Richtungen zu erzeugen. HOFFMAN ET.AL. [11] haben mit diesem Ansatz eine Ausgangsleistung von 220 W mit $M^2 < 1,5$ in beide Richtungen demonstriert.

Im Faserlaserdesign ist üblicherweise die Strahlqualität durch den Faserkerndurchmesser und numerische Apertur der Faser gegeben. Falls die Faser nur einen Mode zulässt, kann nur ein Mode anschwingen. Die Strahlqualität des Lasers wäre in diesem Fall nahezu beugungsbegrenzt. Die kleinen Endflächen einer Faser und die nichtlinearen Effekte in der Faser begrenzen allerdings die Ausgangsleistung des Faserlasers.

Mittels Verwendung von „double-cladding“ und einer Faser mit einer kleinen numerischen Apertur im Kern wurde allerdings eine Leistung von über 1 kW mit einer Beugungsmaßzahl von 3,4 und einer optisch-optischen Effizienz von 80 % demonstriert [17]. Eine kompliziertere Faserstruktur mit drei Ummantelungen hat eine Leistung von 1,3 kW [18] ermöglicht. Die Verwendung der „photonischen Faser“ – der Faserquerschnitt enthält in einer besonderen Weise angeordnete Poren [19] – könnte eine Vergrößerung des Faserquerschnitts unter Beibehaltung der guten Strahlqualität ermöglichen.

Um die Leistung zu erhöhen, kann die Strahlung mehrerer Faserlaser in eine Faser gekoppelt werden. Die Strahlqualität wird dabei schlechter. Auf diese Weise hat die Firma IPG Photonics eine Laserausgangsleistung von 5,5 kW mit $M^2 = 12$ [20] und 10,4 kW mit $M^2 = 34$ [3] demonstriert. Die Gesamteffizienz des 10,4 kW-Lasers ist mit über 25 % sehr hoch.

Im Scheibenlaserdesign ist der Wärmefluss kollinear mit dem Laserstrahl. Die Scheibe ist dünn. Die Wärme wird durch eine oder beide Stirnflächen abgeführt. Diese Anordnung verkleinert die Phasenstörungen und erlaubt einen effizienten Betrieb mit guter Strahlqualität. Inzwischen sind Scheibenlaser kommerziell erhältlich. Sie werden zur Zeit von den Firmen TRUMPF Laser (4 kW mit $M^2 = 21$, gekoppelt in eine 200 μ -Faser [4]), ROFIN SINAR Laser (3 kW mit $M^2 = 36$, gekoppelt in 300 μ -Faser [5]), JENOPTIK L.O.S. (8 W bei $\lambda = 532$ nm mit $M^2 < 10$ [22]) und ELS (100 W mit $M^2 < 1,1$ [23]) angeboten. Im IFSW beträgt die höchste zur Zeit erreichte Grundmodeleistung 225 W mit $M^2 < 1,2$ [24].

Die bisher genannten Ergebnisse beziehen sich auf den Dauerstrichbetrieb. Der Pulsbetrieb mit guter Strahlqualität und hoher mittleren Leistung bedeutet hohe Wärmeerzeugung, große Phasenstörungen und niedrige Effizienz im Betrieb mit guter

Strahlqualität. Deswegen muss das Problem der Wärmeabfuhr ebenfalls behandelt werden, was durch Verwendung der oben genannten Designs möglich ist.

Im folgenden wird zwischen Piko- und Nanosekundenbetrieb unterschieden, da die Laser unterschiedlich aufgebaut werden. Falls die Pulsdauer im Pikosekundenbereich oder kürzer ist, treten viele zusätzliche Effekte auf. Nichtlineare Effekte verbreitern das Spektrum des Pulses, die Dispersion der eingesetzten Resonatorelemente muss kompensiert werden. Außerdem muss die Bandbreite des verstärkenden Mediums ausreichend groß sein. Diese zusätzlichen Effekte müssen bei der Laserauslegung berücksichtigt werden und begrenzen die mittlere Leistung bzw. die Pulsenergie.

Abgesehen von der „national ignition facility“ [25] und Militärprojekten [26] wird die z.Zt. höchste Pulsleistungsdichte von mehrstufigen Titan-Saphire-Lasern erreicht. Die Pulsenergie liegt bei einigen Joule, die Pulsrepetitionsrate ist unter 100 Hz und die Pulsdauer beträgt deutlich unter 1 ps [27].

Im Faserlaserdesign begrenzen die nichtlinearen Effekte die erreichbare Pulsenergie. In der Gruppe von PROF. TÜNNERMANN [28] wurde ein Faserlaser mit einer Pulsenergie von maximal 4 mJ und einer Pulslänge von 50 ns bei einer Pulsrepetitionsrate von 3 kHz demonstriert. Bei Erhöhung der Pulsrepetitionsrate auf 50 kHz steigt die mittlere Leistung auf 100 W. Die Strahlung ist beugungsbegrenzt. Die Verwendung einer Faser mit einem größeren Kerndurchmesser ermöglicht eine Steigerung der Pulsenergie auf 8 mJ bei einer Verschlechterung der Strahlqualität auf etwa $M^2=10$.

Im Pikosekundenbereich werden z. B. von IMRA America Inc. Faserlaser mit eingebauten Verstärker angeboten. Die Geräte zeichnen sich durch kompakte und robuste Bauform aus. Die höchste mittlere Leistung im Angebot beträgt z.Zt. 400 mW [29] bei einer Pulsdauer von unter 300 fs. Die höchste Pulsenergie beträgt etwa 100 μ J. Die CPA-Technik – Verlängerung der Pulsdauer vor der Verstärkung und anschließende Komprimierung – und Fasern mit großem Kerndurchmesser kommen zum Einsatz [30].

In den Scheiben- und Slabdesigns kann die Größe des Strahls im LAM theoretisch so groß gehalten werden, dass die Zerstörung vermieden wird. Falls die Verstärkung hoch und die Resonatorlänge klein ist, können Pulse mit einer Pulsdauer von einigen Nanosekunden im gütegeschalteten Betrieb erzeugt werden. So werden z. B. von der Firma EdgeWave GmbH [15] gütegeschaltete Laser mit einer Pulsdauer von etwa 5 ns und einer Pulsenergie von maximal 20 mJ bei einer Strahlqualität von $M^2<2$ im Slablaserdesign angeboten. Die höchste angebotene mittlere Leistung beträgt 80 W und die Repetitionsrate 50 kHz.

Die Eignung des Scheibenlaserdesigns für den Pulsbetrieb war aufgrund der geringen Verstärkung der Scheibe von 10 % - 20 % nicht selbstverständlich. Im gütegeschalteten Betrieb sind die Pulse im Scheibenlaserdesign deswegen länger als bei den anderen Konzepten. Die Pulsdauer beträgt 100 ns und mehr [31]. Wegen der kleinen Phasenstörungen sind die Verluste allerdings so niedrig, dass das Verhältnis von Verstärkung zu Verlusten günstig ist und das Erreichen einer Verstärkung von 10^6 und mehr in einem regenerativen Scheibenlaserverstärker möglich ist. Im Nanosekundenbereich ist eine Pulsenergie von 37 mJ bei einer Repetitionsrate von 1 kHz und einer Pulslänge von 10 ns demonstriert worden [31]. Im

Pikosekundenbereich wurde eine mittlere Leistung von 26 W bei 20 kHz und einer Pulslänge von 1,8 ps gezeigt [32]. Die höchste demonstrierte Pulsenergie beträgt 4,5 mJ bei einer Pulsdauer von 5 ps [33]. Im modengekoppelten Betrieb mit sättigbarem Halbleiter-Absorber (SESAM) wurde im Scheibenlaserdesign eine mittlere Leistung von 60 W bei einer Repetitionsrate von 34 MHz mit einer Yb:YAG-Scheibe erreicht [34]. Die Pulslänge beträgt dabei 810 fs.

1.2 Scheibenlaserdesign

Das Scheibenlaserprinzip ist in Abbildung 1.1 illustriert. Der Laserkristall hat die Form einer Scheibe mit einem Radius R_{sch} und einer Dicke d . Eine Seite des Laserkristalls ist für die Pump- und Laserwellenlänge entspiegelt (AR vom engl. anti reflection) und wird weiter AR-Seite genannt. Die andere Seite ist für die beiden Wellenlängen verspiegelt (HR vom engl. high reflection) und wird im weiteren HR-Seite genannt.

Der Laserkristall wird über die HR-Seite gekühlt. Die Pumpstrahlung beaufschlagt den Laserkristall von der anderen Seite und wird im Laserkristall absorbiert. Der gepumpte Teil des Laserkristalls wird im weiteren Pumpfleck genannt. Der Pumpfleck ist meistens radialsymmetrisch und hat einen Radius von R_p . Es ist auch denkbar, dass der Kristall vollflächig gepumpt wird. Das ist z. B. der Fall, wenn die Pumpleistung durch die zylindrische Mantelfläche in den Laserkristall radial eingestrahlt wird [40, 35, 36]. Diese Pumptanordnung kann für einen multi-kW-Betrieb interessant sein. Das Erreichen einer homogenen Verteilung der absorbierten Leistung, was für einen effizienten Betrieb mit guter Strahlqualität notwendig ist, ist in dieser Anordnung allerdings schwieriger zu realisieren.

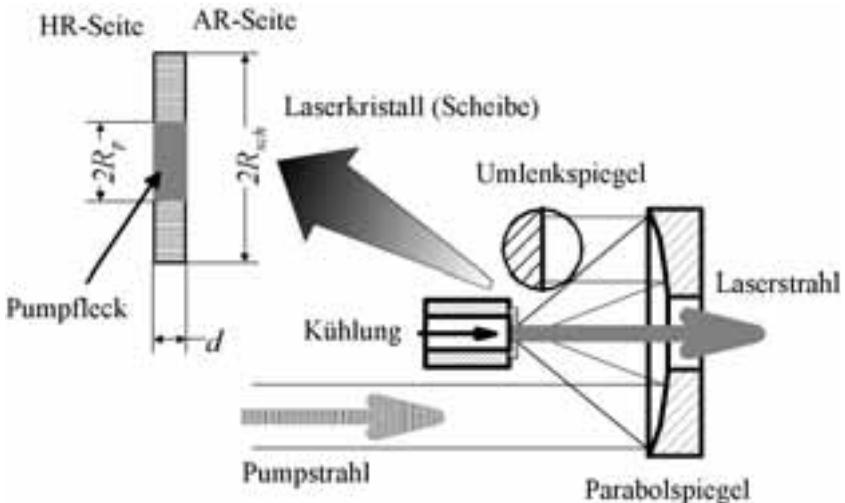


Abbildung 1.1: Scheibenlaserprinzip

Der Laserkristall wird im Resonator als Spiegel verwendet. Der Laserstrahl verläuft senkrecht oder nahezu senkrecht zur Laserkristallebene und wird an der HR-Seite des Laserkristalls reflektiert.

Die Dicke des laseraktiven Mediums muss klein im Vergleich zum Pumpfleckradius sein, um einen überwiegend eindimensionalen Wärmefluss im Laserkristall zu gewährleisten.

$$\frac{d}{R_p} \ll 1 \quad (1.1)$$

Wenn diese Bedingung erfüllt ist, ist der Wärmefluss senkrecht zum Laserstrahl im Gegensatz zum Stablaserdesign gering. Deswegen ist der Temperaturunterschied in der Scheibenebene im Pumpfleck klein, aber aufgrund der restlichen dreidimensionalen Wärmeleitung und radialen Pumpstrahlungsverteilung nicht gleich Null. Das radiale Temperaturprofil führt zu einer Phasenänderung Φ der Laserstrahlung, die von der radialen Koordinate r abhängig ist und thermische Linse genannt wird. Die Funktion $\Phi(r)$ kann in eine Potenzreihe über die geraden Potenzen von r entwickelt werden. Der konstante Term ist für den Laserbetrieb irrelevant. Der nächste parabolische Term beschreibt in der paraxialen Näherung eine sphärische Linse, die durch ihre Brechkraft beschrieben wird. Die restlichen Summanden und die nicht radial symmetrischen Anteile der thermischen Linse sind asphärisch und verursachen Verluste im Laserbetrieb mit guter Strahlqualität.

Die thermische Linse im Scheibenlaserdesign ist klein verglichen mit dem Stablaserdesign. Ihre Brechkraft ist weit unter 1 m^{-1} (im Stablaserdesign typischerweise über 10 m^{-1}). Die asphärischen Anteile der thermischen Linse sind auch klein, was einen effizienten Betrieb mit hoher Ausgangsleistung und guter Strahlqualität ermöglicht.

Mit einem Scheibendurchmesser von 10 mm und einem Pumpfleckdurchmesser von 6 mm und einer Scheibendicke von 205 μm ist im IFSW eine Leistung von 650 W im Dauerstrichbetrieb demonstriert worden [37]. Für die höheren Ausgangsleistungen bzw. eine andere Betriebsart muss der Pumpfleckradius und dementsprechend der Scheibendurchmesser angepasst werden. Eine Laserleistung von 5,3 kW aus einer Laserscheibe wurde bereits von der Firma TRUMPF Laser demonstriert [38].

Aufgrund der kleinen Dicke des Laserkristalls ist die Absorption der Pumpstrahlung bei einer Reflexion auf dem Laserkristall niedrig, typischerweise 10 % - 30 %. Um trotzdem einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, muss eine Pumpoptik eingesetzt werden. Sie ist in Abbildung 1.1 mit Parabol- und Umlenkspiegel schematisch dargestellt. Die Aufgabe der Pumpoptik ist es, den nichtabsorbierten Teil der Pumpstrahlung nach der Reflexion auf dem Laserkristall mehrmals wieder auf den Laserkristall zu richten, bis die Pumpstrahlung möglichst vollständig absorbiert ist. Es können unterschiedliche Konzepte eingesetzt werden, wie es in den Arbeiten von STEFFEN ERHARD [39, 40] beschrieben ist. Es hat sich herausgestellt, dass der Einsatz eines Parabolspiegels zur Abbildung der Pumpstrahlung auf den Laserkristall besonders vorteilhaft ist, da in diesem Fall mehrere (16, 24, 32 und mehr) Pumpstrahlungsdurchgänge in einer einfachen Weise mit einem Parabolspiegel und vier Umlenkspiegeln realisiert werden können.

Der Einsatz einer Pumpoptik sieht auf den ersten Blick wie ein Nachteil des Scheibenlaserdesigns aus, ermöglicht aber die Entkopplung der Absorption der Pumpstrahlung und der Verstärkung der Laserstrahlung, was für einen effizienten Betrieb eines Drei-Niveau-Lasermaterials wichtig ist.

Die Besonderheiten des Scheibenlaserdesigns, die aus Gl. (1.1) folgen, werden im folgenden kurz aufgeführt und unter den Aspekten, die für diese Arbeit interessant sind, diskutiert. Für eine ausführliche Beschreibung des Scheibenlaserdesigns können die am IFSW abgeschlossenen Dissertationen von KARSTEN CONTAG [41] und ANDREAS VOSS [42], wissenschaftliche Veröffentlichungen [43, 40, 37] und der Beitrag im Sammelwerk von R. DIEHL [44] empfohlen werden.

1.2.1 Besonderheiten des Scheibenlaserdesigns

Die Ausgangsleistung bzw. Pulsenergie ist im Scheibenlaserdesign prinzipiell über die Fläche des gepumpten Bereichs skalierbar. Weder die Scheibentemperatur noch die mechanischen Spannungen steigen wesentlich bei einer Vergrößerung des Pumpflecks unter Beibehaltung einer konstanten Pumpleistungsdichte. Der Skalierung stehen nur einige technologische Probleme im Weg – die Handhabung einer größer werdenden Scheibe ist schwieriger und ein Resonator mit einem großen Strahlradius auf der Scheibe ist empfindlicher gegen Verkipfung der Resonatorspiegel und Änderung der Brechkraft der Scheibe [45].

Im Scheibenlaserdesign werden hohe Leistungen aus einem kleinen Volumen (einige mm^3) extrahiert. Deswegen sind die Anregungsdichte und die Wärmeerzeugung groß, was hohe Temperaturen (100 °C und mehr) und eine hohe Dichte der angeregten Ionen im Betrieb bewirkt. Die Eigenschaften der Lasermaterialien in diesem Temperaturbereich sind meistens nicht bekannt und werden im allgemeinen ungünstiger für den Laserbetrieb. Die hohe Anregungsdichte zusammen mit einer hohen Dotierung, die für das Scheibenlaserdesign theoretisch vorteilhaft wäre, begünstigen die Energiemigration zu Verunreinigungen und anderen Störstellen oder die Anregung von Bändern des Wirtsmaterials mit Energien einiger angeregten Ionen. Diese Prozesse erzeugen zusätzliche Wärme im Material und bauen die Anregung ab. Sie begrenzen z.Zt. die Dotierung von Yb:YAG auf 10 at. % im Puls- und auf etwa 12 at. % im Dauerstrichbetrieb. Bei höheren Dotierungen wird der Laserbetrieb ineffizienter.

Die Kleinsignalverstärkung der Scheibe bei einer Reflexion ist gering, typischerweise 10 % bis 30 %. Um dennoch einen effizienten Verstärkerbetrieb zu erreichen muss entweder ein regenerativer Verstärker eingesetzt werden oder viele Reflexionen auf der Scheibe müssen geometrisch realisiert werden [46, 48].

Die Depolarisation in einer Laserscheibe ist niedrig, typischerweise unter 0,1 %, was einen effizienten TEM₀₀-Betrieb und den Betrieb mit einer festgelegten Polarisation, wie es z. B. für einen regenerativen Verstärker erforderlich ist, ermöglicht.

Eine effektive Kühlung wird benötigt, um die entstehende Wärmeleistungsdichte von einigen 100 W/cm² ohne große Temperaturerhöhung des laseraktiven Mediums abzuführen. Im IFSW wurden Untersuchungen unterschiedlicher Kühlkonzepte durchgeführt [47]. Mit dem Konzept, in dem das Wasser die Scheibe oder den Träger der Scheibe direkt anspricht, wurden die besten Ergebnisse erzielt. Das zweitbeste

Konzept - die Mikrokanalkühlung - wird viel in der Laserdiodenindustrie eingesetzt. Die Mikrokanalkühler haben aber generell für den Einsatz für die Kühlung der Scheibenlaser den Nachteil, dass die Wärme lokal und nicht flächig abgeführt wird, was dem Scheibenlaserkonzept widerspricht.

Die dünne Scheibe hat einen zu niedrigen Biege­widerstand, um direkt mit Wasser gekühlt zu werden. Deswegen muss sie auf einen Träger kontaktiert werden. Die beiden am häufigsten eingesetzten Kontaktierungsmöglichkeiten sind in Abbildung 1.2 gezeigt.

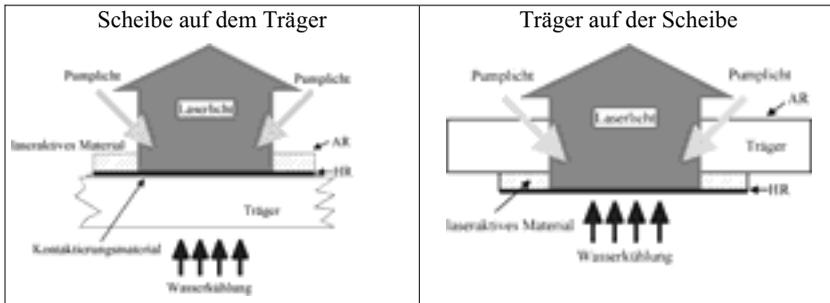


Abbildung 1.2: Kontaktierungsmöglichkeiten

Entweder wird die Scheibe mit der HR-Seite auf einer Wärmesenke montiert, beispielsweise durch Kleben oder Löten (in der Abbildung links) oder ein transparenter Träger wird an die andere Seite der Scheibe kontaktiert (in der Abbildung rechts). Die obere Seite des Aufbaus wird mit einer Entspiegelung für Pump- und Laserstrahlung versehen.

In der Methode „Scheibe auf dem Träger“ fließt die in der Scheibe produzierte Wärme durch die Wärmesenke, was zu einer höheren Temperatur im Lasermedium führt. Die Geometrie des Aufbaus – die heißeste Stelle ist in der Abbildung oben, die kälteste unten - sorgt für die Wölbung der Wärmesenke und so zu einer Änderung der Scheibenform im Betrieb.

Im anderen Fall ist der Wärmewiderstand zwischen Laserkristall und Wasser kleiner. Das Trägermaterial muss transparent und die Grenze zwischen dem Träger und dem Lasermedium verlust- und reflexionsarm sein. Der Wärmefluss in dem Trägermaterial ist dreidimensional. Da die Laserstrahlung den Träger durchquert, führt dies zu einer viel stärker ausgeprägten thermischen Linse als bei der Rückseitenkontaktierung (die aber immer noch um Größenordnungen schwächer ist als im Stablasersdesign) und zu höheren Beugungsverlusten.

Es sind viele weitere Konzepte neben den beiden oben vorgestellten denkbar, wie ein dünnes Lasermedium gepumpt und gekühlt werden kann. Der Laserkristall kann z. B. mit einer Gasströmung gekühlt werden. Die Kontaktierung des Laserkristalls auf der Wärmesenke kann durch Aufpressen mit einem transparenten Fenster [49] geschehen. Oder der Kristall kann direkt mit Flüssigkeit durch die Mikrokanäle in einer strukturierten Wärmesenke gekühlt werden [50]. Bis jetzt haben sich allerdings nur die beiden oben genannten Varianten bewährt.

Die letzte Besonderheit des Scheibenlaserdesigns, die hier angesprochen werden soll, ist der Wellenleitereffekt einer dünnen Scheibe. Eine dünne Scheibe kann die Fluoreszenz aus dem Pumpfleck zum Rand hin durch Totalreflexion an den Stirnflächen führen. Nach der Reflexion an der Seitenfläche wird der Weg der Fluoreszenz umgekehrt. Die auf diese Weise in der Scheibe umlaufende Fluoreszenz baut die Inversion im Pumpfleck zusätzlich ab und stellt einen parasitären Prozess dar, der ASE (von engl. Amplified Spontaneous Emission) genannt wird und z. B. aus dem „Aktivspiegel“-Design („active mirror“ [51]) bekannt ist. Die ASE begrenzt die Pumpfleckgröße und damit die theoretisch erreichbare Ausgangsleistung. Die Grenze ist allerdings in Experimenten noch nicht erreicht und liegt je nach Design unterschiedlich hoch.

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines technologischen Ablaufs für die Herstellung von kontaktierten Laserkristallen für den Scheibenlaser. Der Autor hat die Herstellung der Laserkristalle von der Kristallzucht bis hin zum Kontaktieren und Testen betreut und teilweise entwickelt. Die Erfahrungen bilden das Grundgerüst dieser Arbeit.

Theoretisch bringt eine höhere Dotierung Vorteile für den Laserbetrieb im Scheibenlaserdesign. Der Kristall kann dünner werden, die mittlere Kristalltemperatur sinkt. Eine niedrigere Kristalltemperatur senkt die Laserschwelle im Dauerstrichbetrieb bzw. erhöht die Verstärkung der Scheibe im Pulsbetrieb. Beim Versuch die Dotierung von Yb:YAG von 9 at. % auf 12 at. % und mehr zu erhöhen, hat sich aber herausgestellt, dass diese kleine Änderung der Dotierung zu einer dramatischen Verschlechterung der Lasereigenschaften führt. Die Gründe dafür wurden untersucht und die Anwesenheit von nichtlinearen Prozessen, die die Anregung abbauen und zum großen Teil in Wärme umwandeln, wurde gezeigt. Diese nichtlinearen Prozesse sind vermutlich unabhängig von der Reinheit des Materials und den Zuchtbedingungen in Yb:YAG immer präsent. Sie begrenzen die Dotierung, bei der Yb:YAG im Scheibenlaserdesign effizient eingesetzt werden kann.

Die Untersuchungen der nichtlinearen Prozesse und die Kontaktierung der Kristalle sind die zwei Hauptthemen dieser Arbeit. Die nichtlinearen Prozesse bestimmen die Wahl des Lasermaterials, das erst durch Kontaktierung als Laserkristall verwendet werden kann.

Entsprechend ist diese Arbeit gegliedert. Im Kapitel 2 *Grundlagen* werden Messungen und theoretische Überlegungen vorgestellt, die weiter in der Arbeit verwendet werden und von allgemeinem Interesse sind. Zuerst werden die relevanten gemessenen Materialparameter von Yb:YAG und YAG bei den im Scheibenlaserdesign üblichen bzw. möglichen Temperaturen beschrieben. Diese Daten werden bei der Auswertung der Messungen und bei der Modellierung verwendet.

Anschließend wird ein Modell eingeführt, das in einer einfachen Weise die Temperaturerhöhung im Betrieb berücksichtigt. Die aufgeführten Formeln können von einem Laserentwickler verwendet werden, um ohne FEM-Rechnungen die experimentellen Ergebnisse nachzurechnen, auszuwerten oder einen Laser auszulegen. Als Beispiel werden die Formeln zur Veranschaulichen des Einflusses der Temperatur

im Dauerstrichbetrieb verwendet, um die Anforderungen an den Wärmewiderstand der Kontaktierung zu erklären.

Das beiden letzten Unterkapitel behandeln die zwei Teilprobleme, die im Scheibenlaserdesign in einer besonderen Weise berücksichtigt werden müssen – ASE und thermische Linse.

Das Kapitel 3 *Quenching in Yb:YAG* stellt den verwendeten Messaufbau vor. Die nichtlinearen Prozesse werden quantitativ beschrieben, ihre Ursache und Gegenmaßnahmen werden diskutiert.

Das Kapitel 4 *Kontaktierungsdesign und Kühlung* widmet sich dem Thema Kontaktierung. Unterschiedliche Möglichkeiten der Kontaktierung werden diskutiert. Die entwickelten Verfahren und Aufbauten werden beschrieben, sowie die Erfahrungen mit der jeweiligen Kontaktierungsmethode bzw. mit den auf diese Weise kontaktierten Kristallen. Zum Schluss werden die drei aussichtsreichsten Kontaktierungsmethoden mit Hilfe von FEM-Rechnungen verglichen.

Ein Bestandteil des Fertigungsprozesses ist die Qualitätskontrolle, die in Kapitel 5 *Charakterisierung der Kristalle für Scheibenlaser* vorgestellt wird. Sie hilft, fehlerhafte Kristalle bereits auf frühen Stufen im Fertigungsprozess auszusortieren und so die Kosten zu senken. Dem Anwender erspart sie Zeit und Nerven bei den Versuchen mit einem schlechten Laserkristall. Der entwickelte technologische Ablauf wird zuerst skizziert. Die einzelnen Kontrollen sowie die verwendeten Qualitätskriterien werden ausführlich beschrieben. Die entwickelten Aufbauten werden dargestellt.

Eine *Zusammenfassung* gibt die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit wieder. Im *Anhang* sind die mathematischen Ausführungen platziert. Außerdem beinhaltet er einige Formeln der Elastizitätstheorie, die für die Abschätzungen für die im Scheibenlaserdesign üblichen Größenverhältnisse nützlich sind.

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

Gorritz, Michael

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

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-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 CO₂-Lasern
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 CO₂-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 CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebisch, 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 CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

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

Gross, Herbert

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

Rapp, Jürgen

Laserschweißbeignung 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 CO₂-Hochleistungslaser

1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung

1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren

1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren

1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen

1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung

1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden

1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Pläß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken

1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän

1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW

1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser

1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-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 Zerspansung

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 CO₂-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

Bahn Müller, Jochen

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

Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

Angstenberger, Birgit

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

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlaser 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 Weichlötlens 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

Laserstrahlsschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

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

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlsschweißen 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 ke-
ramischen 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 Laserstrahlsschweißen 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 Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

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

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-8

Michael Honer

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

Thomas Herzinger

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

Reiner Heigl

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

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

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign

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

Jiancun Gao

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

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

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

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

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen 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

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

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

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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