

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

S. Barbu
Hochleistungsscheibenlaser mit
Ytterbium-dotierten
Sesquioxid-Keramiken

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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.

Hochleistungsscheibenlaser mit Ytterbium-dotierten Sesquioxid-Keramiken

von Dr.-Ing. Stefan Barbu
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rheinheimer

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.

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH ·
Herr Matthias Hoffmann · Nymphenburger Straße 91 ·
80636 München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2025

D DE 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2026

ISBN (Print) 978-3-8316-5099-6
ISBN (E-Book) 978-3-8316-7841-9

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Liste der verwendeten Symbole	5
Abkürzungen	6
Kurzfassung der Arbeit	8
Extended Abstract.....	11
1 Einleitung.....	13
1.1 Motivation	13
1.2 Struktur der Arbeit.....	19
1.3 Stand der Technik – Herstellungsverfahren für Sesquioxide.....	20
1.3.1 Kristallzüchtung aus der Schmelze	20
1.3.2 Herstellung als Keramik	23
1.4 Stand der Technik – Yb:Lu ₂ O ₃ -Scheibenlaser	28
1.4.1 Yb:Lu ₂ O ₃ -Scheibenlaseroszillatoren im Dauerstrichbetrieb	28
1.4.2 Fazit und Zielsetzung	33
1.5 Stand der Technik – Yb:LuScO ₃ -Scheibenlaser	34
1.5.1 Yb:LuScO ₃ -Scheibenlaseroszillatoren im Dauerstrichbetrieb	34
1.5.2 Fazit und Zielsetzung	37
2 Single-crystal and ceramic Yb:Lu₂O₃ gain media for thin-disk oscillators	39
3 Ceramic Yb:Lu₂O₃ thin-disk laser oscillator delivering an average power exceeding 1 kW in continuous-wave operation	53
4 First thin-disk oscillator with ceramic Yb:LuScO₃ in comparison to the operation with ceramic Yb:Lu₂O₃	64
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	76
5.1 Yb:Lu ₂ O ₃ -Keramik-Scheibenlaseroszillatoren	76
5.1.1 Zusammenfassung.....	76

5.1.2	Ausblick	79
5.2	Yb:LuScO ₃ -Keramik-Scheibenlaseroszillator.....	80
5.2.1	Zusammenfassung.....	80
5.2.2	Ausblick	81
6	Literaturverzeichnis.....	83

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
dl/dT	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	10^{-6} K^{-1}
dn/dT	Thermooptischer Koeffizient	10^{-6} K^{-1}
M^2	Beugungsmaßzahl	1
n	Brechungsindex	1
T	Temperatur	K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
T_{Schmelz}	Schmelztemperatur	$^{\circ}\text{C}$
P	Mittlere Leistung	W
ΔP_{abs}	Differenz der absorbierten Pumpleistung	W
λ	Wellenlänge	nm
λ_{therm}	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
σ_{abs}	Wirkungsquerschnitt der Absorption	cm^2
σ_{em}	Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission	cm^2
τ_{fluo}	Fluoreszenzlebensdauer	s

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2PP	Zwei-Photonen-Polymerisation
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid (oder auch Saphir)
AR	engl.: Anti Reflective (dt.: antirefektiv)
CW	engl.: Continuous Wave (dt.: Dauerstrich)
FAP	Fluorapatit
FM	engl.: Fundamental Mode (dt.: Grundmode)
FWHM	engl.: Full Width at Half Maximum (dt.: Halbwertsbreite)
HEM	engl.: Heat Exchanger Method (dt.: Wärmetauschermethode)
HIP	Heiß-isostatisches Pressen
HR	engl.: Highly Reflective (dt.: hochreflektiv)
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge (Stuttgart)
ILP	Institut für Laserphysik (Hamburg)
ISO	Internationale Organisation für Normung
KLM	Kerr-Linsen Modenkopplung
Lu ₂ O ₃	Lutetiumoxid
LuScO ₃	Lutetium-Scandiumoxid
MM	engl.: Multimode (dt.: Multimode)
OC	engl.: Output Coupler (dt.: Auskoppelspiegel)
PC	engl.: Polycrystalline Ceramic (dt.: Polykristalline Keramik)
PM	engl.: Power Meter (dt.: Leistungsmesskopf)
ppm	engl.: parts per million (dt.: Millionstel Anteil)
RoC	engl.: Radius of Curvature (dt.: Krümmungsradius)
SC	engl.: Single Crystal (dt.: Einkristall)
Sc ₂ O ₃	Scandiumoxid
SESAM	engl.: Semiconductor Saturable Absorber Mirror (dt.: Sättigbarer Halbleiterspiegel)
TDL	engl.: Thin-Disk Laser (dt.: Scheibenlaser)

Abkürzung	Bedeutung
------------------	------------------

UKP	Ultrakurzpuls (Kontext: UKP-Laser)
UV	Ultraviolett
ZrO ₂	Zirkonoxid
VBG	engl.: Volume-Bragg-Grating (dt.: Volumen-Bragg-Gitter)
VSN	Vakuum-Sinter und Nanokristalline Technologie
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Y ₂ O ₃	Yttriumoxid

Kurzfassung der Arbeit

Die Ytterbium-dotierten Sesquioxide Lutetiumoxid (kurz: $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$) und Lutetium-Scandiumoxid (kurz: Yb:LuScO_3) sind äußerst interessante Verstärkungsmedien für Scheibenlaser mit hoher Effizienz, besonders kurzen Pulsen (mit Pulsdauern unter 100 fs) und im Fall von $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ auch mit hohen mittleren Leistungen. Allerdings stellt die Kristallzüchtung dieser Sesquioxide aufgrund der hohen Schmelztemperatur von bis zu 2450 °C [1] (für Lu_2O_3) bis heute eine Herausforderung dar, weshalb diese Sesquioxide bisher nur selten in Scheibenlasern eingesetzt werden. Neuere Ansätze zur Herstellung dieser Sesquioxide als Keramiken gewinnen zunehmend an Bedeutung und könnten zukünftig eine gute Alternative zur Kristallzüchtung aus der Schmelze sein.

Im Rahmen eines DFG-geförderten Forschungsprojekts (Nr.: 410806665) wurden zu Beginn dieser Arbeit $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ - und Yb:LuScO_3 -Keramiken mit einer relativ neuen Sintermethode und optimierten Sinterparametern hergestellt [2], [3]. Diese Keramiken waren mit Durchmessern von 11 mm (im Fall von $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$) und 15 mm (im Fall von Yb:LuScO_3) relativ groß und von bisher unerreichter Qualität, wie sich im Verlauf dieser Arbeit herausstellte.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war es, diese $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ - und Yb:LuScO_3 -Keramiken in Scheibenlaseroszillatoren mit hoher mittlerer Ausgangsleistung im Dauerstrichbetrieb zu untersuchen, um anhand der Ergebnisse aus dem Laserbetrieb Rückschlüsse auf die Qualität dieser neuartigen Keramiken ziehen zu können. Dabei sollte erstmals gezeigt werden, dass mit Scheibenlaseroszillatoren mit $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ -Keramiken vergleichbare Ergebnisse im Laserbetrieb erzielt werden können, wie mit Scheibenlaseroszillatoren mit $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ -Einkristallen und diese Keramiken somit eine attraktive Alternative zu den Einkristallen darstellen können.

Zunächst wurden dazu $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ -Keramiken mit einem $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ -Einkristall hinsichtlich ihrer spektroskopischen Eigenschaften sowie ihrer Eignung als Verstärkungsmedium in einem Scheibenlaseroszillator verglichen (Kapitel 2). Die Fluoreszenzspektren der Keramiken und des Einkristalls waren nahezu identisch und die Fluoreszenzlebensdauern der Keramiken waren nur um wenige Prozent geringer als die des Einkristalls. In einem Scheibenlaseroszillator mit einer $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ -Keramik im Multimodebetrieb betrug die maximale Ausgangsleistung 860 W mit einer optischen Effizienz von 62,7 % und einer dabei maximal erreichten Temperatur der Keramik von 100 °C. Mit dem

Yb:Lu₂O₃-Einkristall wurde bei gleicher maximaler Temperatur eine höhere Ausgangsleistung von 997 W mit einer optischen Effizienz von 66,4 % erzielt. Im Grundmodebetrieb hingegen wurde die höchste Ausgangsleistung mit einer Yb:Lu₂O₃-Keramik erzielt und betrug 360 W mit einer optischen Effizienz von 39,5 % und einer Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1,1$. Mit dem Yb:Lu₂O₃-Einkristall war die Ausgangsleistung im Grundmodebetrieb aufgrund von inhomogener spannungsinduzierter Doppelbrechung auf 113 W beschränkt. Insgesamt zeigten die hier untersuchten Yb:Lu₂O₃-Keramiken eine ähnliche Eignung für den Einsatz in Scheibenlaseroszillatoren, wie der zum Vergleich herangezogene Yb:Lu₂O₃-Einkristall.

Im nächsten Schritt (Kapitel 3) wurde die Skalierung der Ausgangsleistung eines Scheibenlaseroszillators mit einer keramischen Yb:Lu₂O₃-Laserscheibe sowohl im Multimode- als auch im Grundmodebetrieb experimentell untersucht. Im Multimodebetrieb wurde eine Ausgangsleistung von 1190 W mit einer optischen Effizienz von 60,3 % erzielt. Die maximale Pumpleistungsdichte betrug dabei 8,7 kW/cm². Es zeichnete sich ein leichtes thermisches Überrollverhalten ab, was an einer leichten Abnahme der optischen Effizienz ab einer Pumpleistungsdichte von 7,6 kW/cm² zu erkennen war. Die im Betrieb maximal erreichte Temperatur der Yb:Lu₂O₃-Keramik betrug 132 °C. Für den Grundmodebetrieb wurde die Länge des Resonators derart angepasst, dass der Stabilitätsbereich des Grundmodebetriebs hin zu höheren Pumpleistungsdichten verschoben wurde. Hierdurch wurde eine maximale Ausgangsleistung von 409 W mit einer optischen Effizienz von 35,6 % und einer Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1,1$ erzielt. Bei einer weiteren Erhöhung der Pumpleistung kam die Laseroszillation zum Erliegen, wodurch die keramische Laserscheibe aufgrund der schlagartigen Temperaturerhöhung zerstört wurde. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Leistungsgrenze der hier untersuchten Yb:Lu₂O₃-Keramik im Multimodebetrieb bis in den Kilowattbereich reicht und das im Grundmodebetrieb eine Ausgangsleistung von über 400 W mit einer hervorragenden Strahlqualität möglich ist.

Schließlich wurde erstmals eine Yb:LuScO₃-Keramik als Verstärkungsmedium in einem Scheibenlaseroszillator untersucht (Kapitel 4). Die Resonatorverluste im Multimodebetrieb waren dabei mit 2,1 % vergleichsweise hoch. Dies wird auf Streuverluste zurückgeführt, die durch eine Variation des Brechungsindex der einzelnen Körner im polykristallinen keramischen Gefüge hervorgerufen wurden. Die höchste Ausgangsleistung im Multimodebetrieb betrug 149 W mit einer optischen Effizienz von 35,9 %. Aufgrund der starken Erwärmung der Yb:LuScO₃-Keramik auf 150 °C bei der noch moderaten Pumpleistungsdichte von 2,7 kW/cm² wurde von einer weiteren Erhöhung der Pumpleistung abgesehen, um einen thermisch induzierten Schaden der Laserscheibe zu

Extended Abstract

The ytterbium-doped sesquioxides lutetium oxide ($\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$) and lutetium scandium oxide (Yb:LuScO_3) are very attractive gain media for thin-disk lasers with high efficiencies, particularly short pulses (with pulse durations below 100 fs) and, in the case of $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$, also with high average powers. However, the crystal growth of these sesquioxides is still a challenge due to their high melting temperature (of 2450 °C for Lu_2O_3 [1]), which is why these sesquioxides have hardly been used in thin-disk lasers so far. Recent approaches to fabricate these sesquioxides as ceramics are becoming increasingly important and have the potential to increase the availability of ytterbium-doped sesquioxides with high quality and large dimensions (diameters of 10 mm and more) for the future.

As part of a DFG-funded research project (No.: 410806665), $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ - and Yb:LuScO_3 -ceramics were produced prior to this work using a relatively new sintering method and optimized sintering parameters [2],[3]. These ceramics were relatively large, with diameters of 11 mm (for $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$) and 15 mm (for Yb:LuScO_3), and of unprecedented quality, as became apparent in this work.

The overall aim of this work was therefore to investigate these $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ - and Yb:LuScO_3 -ceramics in thin-disk oscillators with high average output power in continuous-wave operation, to infer the quality of these novel ceramics based on the laser results. The aim was also to show for the first time that comparable laser results can be obtained from a thin-disk oscillator using a $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ ceramic compared to one using a $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ single crystal, showing that these ceramics can indeed be an attractive alternative to the use of a single crystal as gain medium in thin-disk oscillators.

First, the spectroscopic properties of $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ ceramics were compared to those of a $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ single crystal along with their suitability as gain medium in a thin-disk oscillator with high average output powers (Chapter 2). The fluorescence spectra of the ceramics and the single crystal were almost identical, and the fluorescence lifetimes of the ceramics were only a few percent shorter than the one of the single crystal. The maximum output power of a thin-disk oscillator with an $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ ceramic in multimode operation was 860 W with an optical efficiency of 60.2%, with the temperature of the ceramic reaching a value of 100 °C. A higher output power of 997 W and an optical efficiency of 62.3 % was achieved with an $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ single crystal at the same maximum temperature. The highest output power in fundamental-mode operation was achieved with an $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ ceramic and was 360 W with an optical efficiency of 39.5% and a beam propagation factor of $M^2 = 1.1$. For the $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ single crystal, the output

power in fundamental-mode operation was limited to 113 W due to inhomogeneous stress-induced birefringence intrinsic to the crystal. Overall, the Yb:Lu₂O₃ ceramics investigated here showed a similar suitability for use as a gain medium in thin-disk oscillators as a Yb:Lu₂O₃ single crystal used for comparison.

In the next step (Chapter 3), the scaling of the output power of a thin-disk oscillator with a Yb:Lu₂O₃ ceramic as gain medium was investigated experimentally in both multimode- and fundamental-mode operation. In multimode operation, an output power of 1190 W was achieved with an optical efficiency of 60.3 %. The maximum pump power density was 8.7 kW/cm². A slight thermal rollover was observed, as indicated by a slight decrease in optical efficiency at pump power densities exceeding 7.6 kW/cm². The peak temperature of the Yb:Lu₂O₃ ceramic reached a value of 132 °C. For power scaling in fundamental-mode operation, the length of the resonator was optimized to shift the stability range of fundamental-mode operation towards higher pump power densities. This resulted in a maximum output power of 409 W with an optical efficiency of 35.6 % and a beam propagation factor of $M^2 = 1.1$. As the pump power was increased further, the laser oscillation collapsed and the ceramic laser disk was destroyed by the sudden rise in temperature. Overall, it was shown that a thin-disk oscillator with a Yb:Lu₂O₃ ceramic as gain medium can deliver output powers above one kilowatt in multimode operation and more than 400 W in fundamental-mode operation.

Finally, an Yb:LuScO₃ ceramic was tested as gain medium in a thin-disk oscillator for the first time (Chapter 4). The resonator losses in multimode operation amounted to 2.1 %, which is comparatively high. This is attributed to scattering losses caused by a variation in the refractive index between the individual grains in the microstructure of the polycrystalline ceramic. The highest output power in multimode operation was 149 W with an optical efficiency of 35.9%. Due to the excessive heating of the Yb:LuScO₃ ceramic to a temperature of 150 °C at a moderate pump power density of 2.7 kW/cm², the pump power was not increased further to avoid a thermally-induced damage of the ceramic. An Yb:Lu₂O₃ ceramic used for comparison allowed for an output power of 957 W at the same peak temperature of 150 °C with an optical efficiency of 67.6% at a pump power density of 9.3 kW/cm². Overall, it was shown that thin-disk oscillators with Yb:LuScO₃ ceramics and output powers above 100 W are possible. However, the Yb:LuScO₃ ceramics investigated here were found to be unsuitable for output powers in the kilowatt range due to relatively high scattering losses and significant heating during laser operation.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ultrakurzpulslaser erzeugen gepulste Laserstrahlung mit Pulsdauern im Bereich von typischerweise einigen 100 fs bis zu einigen 10 ps und sind heute mit mittleren Ausgangsleistungen bis in den Kilowattbereich hinein verfügbar [4]–[9]. Diese Laser gewinnen in verschiedenen industriellen Fertigungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Typische Anwendungsgebiete von Ultrakurzpulslasern in der Fertigung sind das Abtragen [10], das Bohren [11] sowie die Oberflächenstrukturierung [12] von Metallen, Halbleitern, Keramiken oder Gläsern [13]. Weitere Anwendungsgebiete sind das Schneiden und das Schweißen von ansonsten transparenten Materialien wie Glas mittels nichtlinearer Absorption [14]. Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsfeld ist die Herstellung von Nanopartikeln mittels Laserablation und Sedimentation [15]. Auch die hochpräzise Herstellung von Polymerbauteilen mittels Zwei-Photonen-Polymerisation (kurz: 2PP) ist ein attraktives Anwendungsfeld für Ultrakurzpulslaser [16].

Der Volumendurchsatz des mit ultrakurzen Laserpulsen bearbeiteten Materials (in mm^3/s) skaliert dabei mit der mittleren Laserleistung [17]. Somit kann die Produktivität von Fertigungsverfahren mit Ultrakurzpulslasern durch die Erhöhung der mittleren Laserleistung gesteigert werden. Daher sind Ultrakurzpulslaser mit hohen mittleren Leistungen wünschenswert.

Der Einfluss der Pulsdauer auf die Produktivität und auch auf die erzielbare Präzision bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen hängt stark vom jeweiligen Laserprozess und dem bearbeiteten Material ab. Wie im Folgenden erläutert wird, gibt es jedoch einige Beispiele für Anwendungen in der Materialbearbeitung, bei denen sich besonders kurze Pulse mit Pulsdauern im Bereich von wenigen 100 fs positiv auf die Produktivität oder die Präzision auswirken.

Beim Abtragen verschiedener Materialien (Kupfer, Stahl 1.4301, Silizium, Germanium, ZrO_2 -Keramik) mit ultrakurzen Laserpulsen mit Pulsdauern im Bereich von 250 fs bis zu mehreren 10 ps wurden die höchsten Abtragraten jeweils bei den kürzesten Pulsdauern gemessen [18]. Beispielsweise war die Abtragrata von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen bei einer Wellenlänge von 1026 nm und einer Pulsdauer von 250 fs dreimal höher als bei einer Pulsdauer von 10 ps [18]. Holder et al. demonstrierten die Steigerung der Produktivität beim Abtrag von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen auf eine Abtragrata von $230 \text{ mm}^3/\text{min}$ [19]. Dabei wurde ein am Institut für Strahlwerkzeuge

(kurz: IFSW) entwickelter Scheibenlaser-Multipassverstärker mit einer mittleren Ausgangsleistung von 1,1 kW, einer Pulsdauer von 600 fs und einer Repetitionsrate von 500 kHz verwendet [19]. Beim Vergleich von Mikrobohrungen sowie dem Abtrag von Stahl, Silizium und Glas mit ultrakurzen Laserpulsen mit einer Pulsdauer von 130 fs und 12 ps wurden die präziseren Prozessergebnisse durchwegs mit der kürzeren Pulsdauer erzielt. Die Bohrungen und die abgetragenen Oberflächen waren glatter und wiesen schärfere Kanten auf [20]. Untersuchungen von Tan et al. zur 2PP zeigten eine nahezu lineare Abnahme des polymerisierten Volumens mit der Pulsdauer - von einem Volumen von $80 \mu\text{m}^3$ bei einer Pulsdauer von 714 fs auf ein Volumen von $32 \mu\text{m}^3$ bei einer Pulsdauer von 214 fs [16]. Somit können mit kürzeren Pulsdauern kleinere und präzisere Strukturen polymerisiert werden, was im Sinne der Miniaturisierung von Vorteil ist. Für die Herstellung von Nanopartikeln mittels Laserablation und Sedimentation sind Ultrakurzpulslaser mit Pulsdauern von wenigen 100 fs interessant, aufgrund der potenziell höheren Abtragraten [15],[18] und damit höheren Produktivität. Da sich das abzutragende Material bei der Laserablation und Sedimentation typischerweise in Wasser befindet, müssen dabei Maßnahmen getroffen werden, um die nichtlineare Wechselwirkung des hochintensiven Laserstrahls mit dem Wasser zu reduzieren. Khairini et al. nutzten hierzu die räumlich-zeitliche Fokussierung [21] eines Laserstrahls mit einer Pulsdauer von unter 50 fs (am Ort des abzutragenden Materials) und konnten die Produktivität im Vergleich zur konventionellen räumlichen Fokussierung auf das Sechsfache steigern [15].

Laser mit Pulsdauern von 100 fs (und darunter) bei gleichzeitig hohen mittleren Ausgangsleistungen im Kilowattbereich sind heute noch nicht weit verbreitet und Gegenstand aktueller Forschung. Das gesamte Potenzial solcher Laserstrahlquellen für industrielle Fertigungsverfahren sowie für wissenschaftliche Anwendungen ist daher auch noch nicht voll ausgeschöpft und auch noch nicht vollständig bekannt.

Typische Laserarchitekturen zur Erzeugung ultrakurzer Laserpulse mit mittleren Ausgangsleistungen im Kilowattbereich sind mehrstufige Systeme, bestehend aus einem Master-Oszillator und mindestens einem Leistungsverstärker. Dabei eignet sich die Scheibenlaserarchitektur hervorragend sowohl für Laserstrahlung mit hoher mittlerer Laserleistungen (im Dauerstrich- und im gepulsten Betrieb) als auch für hohe Spitzenleistungen (im gepulsten Betrieb).

Die Scheibenlaserarchitektur erlaubt hohe mittlere Laserleistungen im Kilowattbereich, aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen dem laseraktiven Volumen, in dem Wärme erzeugt wird, und der gekühlten Oberfläche, über die die Wärme abgeführt wird. Die Laserscheibe weist dabei in der Regel eine Dicke von 100 μm bis 200 μm auf, ist