

## Ultrakurzpuls-Scheibenlaser für die hochpräzise Materialbearbeitung

Als eine der bahnbrechenden Erfindungen der letzten Jahre gehört der Scheibenlaser mit seiner hervorragenden Strahlqualität und Effizienz inzwischen bei mehreren namhaften Herstellern zum festen Produktumfang und stellt seine Qualitäten im Industrieinsatz unter Beweis. Die Palette reicht von wenigen Watt Ausgangsleistung bis in den Kilowatt-Bereich. Aus einer einzigen, etwa 150 Mikrometer dünnen Scheibe wurden bereits kontinuierlich bis zu 4 kW Laserleistung erzielt. Für Anwendungen in der Mikromaterialbearbeitung kommt es jedoch häufig nicht auf hohe kontinuierliche Leistung an; hier ist vielmehr hohe Spitzenleistung bei kurzer Impulsdauer gefragt.

Die Markteinführung des Scheibenlasers in den verschiedenen Leistungsklassen zeigt, wie konsequent das Konzept der diodenlasergepumpten Scheibe in den letzten Jahren verfolgt wurde und schließlich in serienreife Produkte mündete. Eindrucksvollstes Beispiel sind Serienprodukte der Firmen TRUMPF Laser GmbH + Co. KG und Rofin Sinar Laser GmbH mit bis zu 4 kW kontinuierlicher Ausgangsleistung für industrielle Anwendungen z.B. im Automobilbau. Dabei

wird der Scheibenlaser aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften, zu denen auch die exzellente Strahlqualität zählt, nicht nur vorhandene Lasersysteme verdrängen können, sondern er bietet darüber hinaus auch die Möglichkeit, neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Für hochpräzise Materialbearbeitung kommt es weniger auf hohe kontinuierliche Ausgangsleistungen an, vielmehr konnte durch den Einsatz gepulster Lasersysteme mit Impulsdauern im

Domäne	Impulsdauer	Wiederholrate	Impulsenergie	M <sup>2</sup>
ps	2...5 ps	bis 30 kHz	5 mJ @ 1 kHz 1 mJ @ 20 kHz	< 1,3
fs	700...900 fs	10...45 kHz	100...50 µJ	< 1,3
fs	300 fs	200 kHz	15 µJ	< 1,5

Tabelle 1: Am IFSW demonstrierte Daten (Oktober 2004).

ps/fs-Bereich ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) verbunden mit geeigneten Prozessstrategien ein bisher unerreichtes Präzisionsniveau erzielt werden. Während für die Mikrobearbeitung von metallischen Werkstoffen Impulsdauern von einigen wenigen ps bereits ausreichend sind, sind bei anderen Werkstoffen, beispielsweise Keramiken oder biologischem Gewebe, Impulsdauern von weniger als 1 ps erforderlich. Bei der Bestrahlung von Materie mit solch kurzen Impulsen wird diese augenblicklich in einen hochangeregten Zustand, ein sogenanntes Plasma, versetzt, wodurch letzten Endes ein Materialabtrag mit der geschilderten

höchsten Präzision erreicht wird.

Die benötigten Impulsenergien im µJ- bis mJ-Bereich werden üblicherweise durch die Technologie der regenerativen Verstärkung erreicht. Abb. 1 zeigt das Funktionsprinzip eines regenerativen Scheibenlaserverstärkers. Dabei werden ultrakurze Impulse in einem sogenannten Seed-Laser erzeugt, beispielsweise durch passive Modenkopplung von Festkörperlasern. Nach Durchlaufen einer Separationseinheit, in der später der verstärkte Laserstrahl vom Seed-Laserstrahl getrennt wird, wird der Impuls des Seed-Lasers in den Verstärkerresonator eingekoppelt und dort durch Einschalten der Hochspannung an der Pockelszelle zu vielen Umläufen gezwungen. Dabei wird der Impuls bei jedem Durchlaufen des gepumpten Lasermaterials verstärkt. Die Verstärkung pro Umlauf bewegt sich lediglich in der Größenordnung von 10%, aber durch vielfache Umläufe lässt sich auf diese Art und Weise eine Verstärkung um den Faktor  $10^6 - 10^8$  erreichen. Schließlich wird der Impuls mit ausreichend hoher Energie durch Ausschalten der Hochspannung an der Pockelszelle aus dem Verstärker ausgekoppelt. Selbst moderate Impulsenergien im mJ-Bereich führen bei einer Impulsdauer von

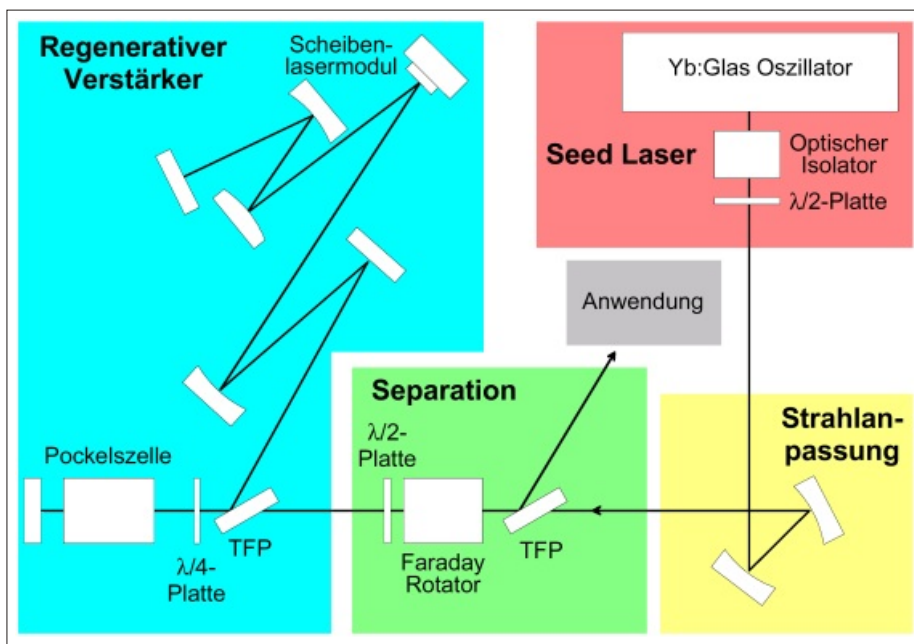


Abb. 1: Funktionsprinzip eines regenerativen Scheibenlaserverstärkers.

1 ps bereits zu Spitzenleistungen von 1 Gigawatt, was mit der Leistung eines Kernkraftwerks vergleichbar ist, wobei der Laser diese natürlich nur für den Bruchteil einer Sekunde zur Verfügung stellt, das Kraftwerk dagegen kontinuierlich.

Durch den Einsatz der Scheibenlasertechnologie ist eine sehr gute Strahlqualität und die daraus resultierende extrem gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlung gewährleistet, was wiederum für sehr hohe Leistungsdichten im Fokus sorgt. Verbunden mit hohen Wiederholraten lassen sich auf diese Art und Weise kurze Bearbeitungszeiten erzielen.

Je nach gewünschter Impulsdauer kommen unterschiedliche Scheibenlasermaterialien zum Einsatz. Für Impulsdauern von einigen wenigen ps werden typischerweise Ytterbium dotierte YAG-Scheiben (Yb:YAG) eingesetzt. Am IFSW wurden Impulsenergien von 1 mJ bei 20 kHz Wiederholrate bzw. 5 mJ mit entsprechend niedrigerer Wiederholrate von 1 kHz demonstriert. Mögliche Anwendungen solcher Lasersysteme liegen beispielsweise in der Fertigung von Dieseleinspritzdüsen, wo immer kleinere Düsenbohrungen für eine bessere Durchmischung des Dieselmotors sorgen.

Für kürzere Impulsdauern reicht jedoch die Verstärkungsbandbreite von Yb:YAG nicht mehr aus, dort werden vornehmlich Ytterbium dotierte Wolframate (Yb:KYW) eingesetzt, die aufgrund ihrer größeren Verstärkungsbandbreite Impulsdauern von einigen 100 fs ermöglichen. Würde man derartig kurze Impulse direkt auf die erforderlichen Energien verstärken, würden unweigerlich so hohe Spitzenintensitäten erreicht, dass optisch nichtlineare Effekte bis hin zur Zerstörung der optischen Komponenten auftreten würden. Üblicher-

weise wird daher die Technologie der Verstärkung frequenzmodulierter Impulse, auch bekannt unter der Bezeichnung CPA Technik, eingesetzt, bei der die Impulse vor der Verstärkung zunächst zeitlich stark gedehnt werden, dann auf die erforderliche Energie verstärkt werden und schließlich mit einem geeigneten Impulskompressor wieder

unserem Fall wird dieser dispersiven Impulsdauerverlängerung durch die Verwendung speziell beschichteter Spiegel im regenerativen Verstärker vorgebeugt. Tatsächlich wurde am IFSW mit einem CPA freien Scheibenlasersystem die Verstärkung von Laserimpulsen mit 700 fs Impulsdauer auf 100  $\mu$ J Impulsenergie bei einer



Abb. 2: Der Ultrakurzpuls-Scheibenlaser ermöglicht eine schmerzfreie Kariestherapie.

auf die ursprüngliche Impulsdauer komprimiert werden. Solche Systeme sind jedoch sehr komplex und erfordern eine sehr präzise Justierung von Impulsstreckern und Kompressoren. Unser Scheibenlaserdesign basiert im Gegensatz zu klassischen Verstärkersystemen auf entsprechend großen Laserstrahlquerschnitten, wodurch hohe Intensitäten vermieden werden. Dadurch kann bei der Verstärkung von Impulsen mit etwa 700 fs bis in den 100  $\mu$ J Energiebereich auf das soeben geschilderte Verfahren gänzlich verzichtet werden. Bei derartigen kurzen Impulsdauern muss jedoch bereits großes Augenmerk auf sogenannte dispersive Impulsdauerverlängerungen gerichtet werden. Beim Durchlaufen optischer Materialien erfahren ultrakurze Impulse nämlich aufgrund ihrer spektralen Bandbreite automatisch eine unerwünschte Verlängerung, die beim Layout des Scheibenlasersystems entsprechend berücksichtigt werden muss. In

Wiederholrate von 45 kHz demonstriert. Die Impulsenergie ist bei dieser Art der Verstärkung allerdings durch das Auftreten optisch nichtlinearer Effekte limitiert.

Dieses Lasersystem wurde für Untersuchungen zur Ablation von Zahnhartsubstanz eingesetzt, wobei zum einen eine bisher nicht erreichte Präzision erzielt wurde, zum anderen wurde eine derartig hohe Abtragsrate erreicht, dass der Einsatz eines solchen Lasersystems als Ersatz für mechanische Dentalbohrer in den Bereich des Machbaren rückt. Die kurze Impulsdauer bietet zusätzlich den unschätzbaren Vorteil einer schmerzfreien Kariestherapie. Aufgrund des großen Potentials hat sich das BMBF entschlossen, die Entwicklung eines Kariestherapiegeräts unter Einbeziehung eines solchen Lasersystems entsprechend zu fördern.

Um nun noch kürzere Impulsdauern von etwa 300 fs zu erzielen, kann man sich die bereits beschriebene dispersi-

ve Impulsdauerverlängerung im Verstärker in Verbindung mit den entsprechend großen Laserstrahlquerschnitten im regenerativen Verstärker zunutze machen, um die Limitierung durch optisch nichtlineare Effekte zu umgehen. In diesem Fall ist lediglich die Kompression der verstärkten Impulse notwendig, auf einen entsprechenden Impulsstreckern kann verzichtet werden. Erste Versuche haben gezeigt, dass auf diese Weise tatsächlich Impulsenergien im 10  $\mu$ J-Bereich bei Impulsdauern von unter 300 fs mit einer sehr hohen Wiederholrate von 200 kHz realisierbar sind. Die Steigerung der Ausgangsenergie ist Gegenstand aktueller Forschungen im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projekts.

Die aufgezeigten Ergebnisse geben einen Eindruck von den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten ultrakurzgepulster Scheibenlasersysteme für die hochpräzise Materialbearbeitung. Diese Lasersysteme mit ultrakurzen Impulsen werden, wie dies schon bei den kontinuierlich arbeitenden Hochleistungsscheibenlasern geschehen ist, in den nächsten Jahren zur Marktreife entwickelt werden und dort ihr volles Potential entfalten. Die FGSW unterstützt dabei maßgeblich die Weiterentwicklung der am Institut erarbeiteten Konzepte.

#### Institutsadresse:

Institut für Strahlwerkzeuge  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711-685 6840  
Fax: +49 (0)711-685 6842  
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>

#### Autor:

Dr. Detlef Nickel

#### Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner  
FGSW - Forschungsgesellschaft  
für Strahlwerkzeuge  
Nobelstr. 15  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711351 451-28  
Fax: +49 (0)711351 451-29  
E-Mail:  
[friedemann.lichtner@fgsw.de](mailto:friedemann.lichtner@fgsw.de)  
<http://www.fgsww.de>