

# Innovative Entwicklungen bei Lasern für die Laserstrahlreinigung

**042** Hans-Dieter Hoffmann, Peter Loosen, Klaus Schnitzler, Konrad Wissenbach, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen

In den letzten Jahren hat das Laserstrahl-Reinigen neben den chemischen, mechanischen und thermischen Verfahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Gründe hierfür sind sowohl verfahrenstechnische Vorteile (z.B. berührungsloses und schonendes Verfahren, hohe Präzision, geringe Wärmebeeinflussung des Grundwerkstoffes) als auch strenger werdende Regelungen des Gesetzgebers bezüglich Hygiene-Einhaltung und Abfall- bzw. Schadstoffvermeidung (z.B. Vermeidung von kontaminierten Reinigungsmitteln).

Um neue Anwendungsfelder für die Laserstrahl-Reinigung zu erschließen oder die Umsetzung dieser innovativen Reinigungstechnologie im industriellen Maßstab zu erweitern, ist die Neu- und Weiterentwicklung der Einzelkomponenten der Laserstrahl-Reinigungssysteme notwendig; dies betrifft insbesondere die Laserstrahlquelle. Dabei spielen neben technischen auch wirtschaftliche Aspekte eine zentrale Rolle.

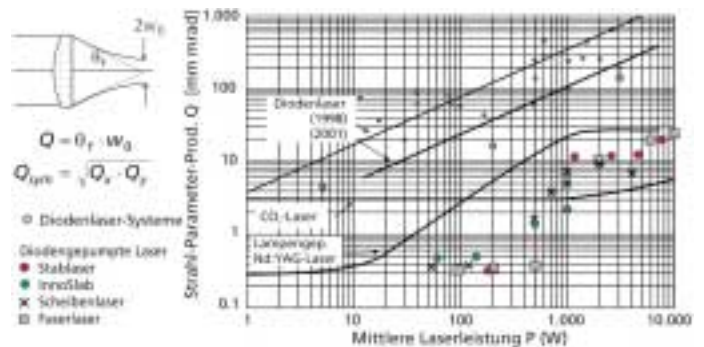
In diesem Beitrag werden aktuelle Entwicklungen im Bereich der Laserstrahlquellen mit Bezug auf Aufgaben in der Reinigungstechnik diskutiert.

## 1 Einleitung

Das Laserstrahl-Reinigen erfordert in vielen Fällen Laser mit relativ kurzer Pulsdauer und hoher Pulsspitzenleistung, um Schichten von Werkstückoberflächen effizient und präzise abtragen zu können, ohne den Grundwerkstoff zu schädigen. Weiterhin sollte ein Laser für die Reinigung nach Möglichkeit folgende Forderungen erfüllen:

- hohe mittlerer Leistung: gerade bei der Behandlung makroskopischer Bauteile sind Leistungen von einigen 100W bis zu einigen kW erforderlich, um die notwendigen Flächenraten und ausreichende Produktivität zu erreichen;
- hohe Strahlqualität: in vielen Fällen wird mit Scannern gearbeitet, um den fokussierten Strahl über größere Flächen zu lenken. Um bei den dabei typischen Arbeitsabständen noch einen kleinen Fokusdurchmesser und ausreichend hohe Intensität zu erzielen, ist ein Strahl mit hoher Strahlqualität erforderlich;
- geeignete Wellenlänge: ideal geeignet ist ein Laser mit einer Wellenlänge, die von der abzutragenden Schicht sehr gut absorbiert wird. Das Grundmaterial sollte bei dieser Wellenlänge einen geringen Absorptionsgrad aufweisen, damit die thermische Beeinflussung minimiert wird;
- weiterhin gilt auch beim Reinigen wie bei fast allen anderen industriellen Anwendungen die Forderung nach hoher Wirtschaftlichkeit, d.h. niedrigen Investitions- und Betriebskosten und nach Kompaktheit, Robustheit und einfacher Handhabung.

Die Kombination dieser Kriterien wird, wie nachfolgend diskutiert, von den heute verfügbaren Laserstrahlquellen in unterschiedlichem Maße erfüllt und definiert die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die zu neuen, innovativen Laserstrahlquellen für die Reinigung führen.

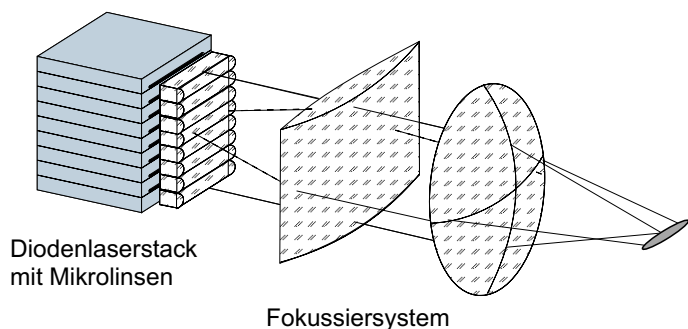


**Bild 1:** Vergleich von Laserstrahlquellen für die industrielle Fertigung: das Bild gibt für die verschiedenen Laser typische Werte der mittleren Laserleistung und der Strahlqualität an.

## 2 Trends in der Entwicklung anwendungsangepasster Laserstrahlquellen

Ein Vergleich der Strahleigenschaften unterschiedlicher Laser im Hinblick auf mögliche Einsatzgebiete lässt sich sehr einfach an einem „Strahlqualitäts-Leistungsdiagramm“ (**Bild 1**) durchführen. Die im Bild gezeigten Punkte repräsentieren für einen spezifischen Laser die kontinuierliche bzw. mittlere Ausgangsleistung und die Strahlqualität, gemessen als Strahlparameterprodukt  $Q$ . Je kleiner  $Q$ , desto feiner ist ein Laserstrahl fokussierbar und desto breiter und flexibler ist er einsetzbar. Das Strahlparameterprodukt ist aufgrund der Beugung nach unten begrenzt; diese Beugungsgrenze hängt von der Wellenlänge ab und beträgt für  $\text{CO}_2$ -Laser ca. 3mm mrad und für Nd:YAG-Festkörperlaser ca. 0,3mm mrad. Ziel der meisten Entwicklungsarbeiten ist, bei der von der Anwendung vorgegebenen Laserleistung eine möglichst hohe Strahlqualität, d.h. ein kleines  $Q$  zu erreichen.

Excimerlaser sind in dem Bild und im vorliegenden Text nicht berücksichtigt, da diese Laser in der industriellen Reinigungstechnik nur vereinzelt, in einigen Nischenanwendungen wie der Reinigung von Druckwalzen eingesetzt werden. Der im Bild genannte  $\text{CO}_2$ -Laser ist in der Ausführung als TEA- $\text{CO}_2$ -Laser in der Laserstrahl-Reinigungstechnik ein lange bekanntes und etabliertes System. Eingesetzt werden Systeme bis zu einer mittleren Leistung von einigen kW. Die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei Lasern für die Reinigung konzentrieren sich allerdings nahezu ausschließlich auf die diodengepumpte Festkörperlaser und die Diodenlaser, dies wegen der Vorteile dieser Systeme wie kompakte Bauform, der Möglichkeit des Strahlungstransports in optischen Fasern und des hohen Wirkungsgrads. Diodenlaser und diodengepumpte Festkörperlaser stehen deshalb im Zentrum der nachfolgenden Diskussionen.



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines Hochleistungs-Diodenlasersystems für die Fertigungstechnik. Im Diodenlaserstack sind eine Reihe von Diodenlasern übereinander geschichtet.

### 2.1 Entwicklungen bei Diodenlasern

Die Strahlqualität von Diodenlasersystemen ist bis zu zwei Größenordnungen kleiner als die von CO<sub>2</sub>- oder diodengepumpten Festkörperlasern. Aufgrund des kompakten Aufbaus von Diodenlasersystemen, der niedrigen Investitionskosten und eines relativ breiten Spektrums vorhandener Wellenlängen werden diese Systeme allerdings intensiv untersucht, vorwiegend mit dem Ziel, die Strahlqualität weiter zu erhöhen. Wie Bild 1 belegt, sind dabei in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden, die hauptsächlich getrieben wurden durch Diodenlaserchips mit höherer Ausgangsleistung und Strahlqualität, durch präzisere Techniken für den Aufbau und die Strahlformung der Diodenlaserstrahlung und durch bessere mikrooptische Komponenten. Das Bild zeigt allerdings auch, dass die Strahlqualität der Diodenlaser trotz dieser Fortschritte noch recht weit von der klassischen Laser entfernt ist.

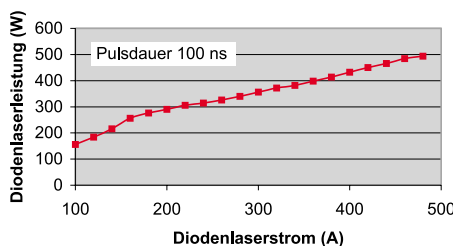
Für die Laserstrahl-Reinigungstechnik wird heute teilweise versucht, mit Hochleistungs-Diodenlasern Schichten thermisch, d.h. mit vergleichsweise niedriger Spitzenintensität abzutragen. Verwendet werden dazu Systeme mit Ausgangsleistungen bis in den kW-Bereich, wie sie in **Bild 2** schematisch dargestellt sind und von verschiedenen Herstellern kommerziell angeboten werden [1]. Solche Diodenlaser werden vorwiegend kontinuierlich betrieben oder auch gepulst, wobei die Pulsleistung aber nur maximal einen Faktor 2 über der kontinuierlichen Leistung liegt.

Für die Laserstrahl-Reinigungstechnik ist allerdings in vielen Fällen der Betrieb mit kurzen Pulsen ( $\mu\text{s}$  - ns) und einer Spitzenleistung weit oberhalb der mittleren Leistung vorteilhaft. Diodenlaser sind dafür

weniger geeignet als klassische Laser, da die Lebensdauer der Laserniveaus sehr kurz ist und in dem sehr kleinen aktiven Volumen nur sehr wenig Energie gespeichert werden kann. Neueste Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass auch ein Diodenlaser – in bestimmten Grenzen – erheblich oberhalb der mittleren Leistung betrieben werden kann, wenn er mit sehr kurzen und hohen Strompulsen angeregt wird. Typischerweise liefert ein einzelner Diodenlaser aus einem Diodenlaserstack (Bild 2) eine kontinuierliche Leistung von 40–50W bei einem Anregungsstrom von ca. 50A. Eine weitere Erhöhung des Stroms im kontinuierlichen Betrieb würde zur Überhitzung und zur Zerstörung der Auskoppelfacetten des Diodenlasers führen.

Mit einem am ILT neu entwickelten Diodenlasertreiber [2] können sehr kurze Strompulse von einigen 100ns und hohe Ströme von einigen 100A erzeugt werden. **Bild 3** zeigt Ergebnisse, die bei der Anregung eines Hochleistungs-Diodenlasers mit diesem Treiber erzielt wurden. Verwendet wurde ein handelsüblicher Diodenlaserbarren mit einer Breite von 10mm. Bei einer Pulsdauer im Bereich um 100ns wird eine Spitzenleistung von ca. 500W erzielt, die künftig nochmals auf ca. 1kW gesteigert werden soll.

Die mittlere Leistung liegt aufgrund von Begrenzungen der im Laboraufbau verwendeten Bauelemente zur Zeit noch erheblich unter der im kontinuierlichen Betrieb erzielbaren Leistung von ca. 40W.

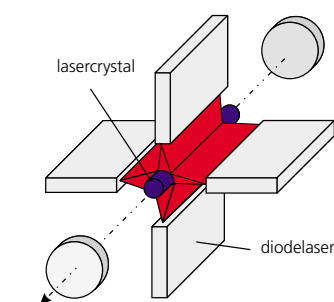


**Bild 3:** Gemessene Laserleistung eines Diodenlaserbarrens, der mit einem Pulsstromtreiber hoher Stromstärke angeregt wurde (Pulsdauer 100ns)

Mit dem neuen Pulser soll aber eine mittlere Leistung im Pulsbetrieb erzielt werden, die mindestens 50% der kontinuierlichen Leistung entspricht. Der Aufbau solcher Diodenlaser als Stapel (Bild 2) wird kompakte und einfach bedienbare Systeme ermöglichen, die eine Gesamt-Pulsleistung von bis zu ca. 100kW erzeugen und in idealer Weise für Reinigungsaufgaben geeignet sein werden.

### 2.2 Diodengepumpte Festkörperlaser

Festkörperlaser eignen sich wegen der Möglichkeit, hohe Laserleistungen in flexiblen optischen Fasern zu führen, ausgezeichnet



**Bild 4:** Transversal mit Diodenlasern gepumpter Stablaser: Prinzip (links oben), Diodenlaser-Pumpmodul (links unten), Resonatoraufbau des gütegeschalteten Systems (Mitte), Komplettsystem (rechts)

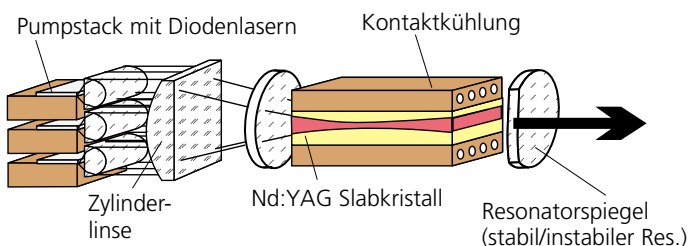
für Reinigungsanwendungen. In der Vergangenheit war das dominierende Konzept der Nd:YAG-Laser, bei dem der Laserkristall durch Blitz- oder Bogenlampen zur Lasertätigkeit angeregt wurde. Werden diese Lampen durch Hochleistungs-Diodenlaser als Anregungsquellen ersetzt, können Strahlqualität (vgl. Bild 1), Wirkungsgrad und Lebensdauer der Systeme erheblich gesteigert werden.

Der transversal gepumpte Slablaser war eines der ersten industriell umgesetzten Konzepte dieser Art; sein Aufbau lehnt sich stark an den lampengepumpte Slablaser an (Bild 4). Derartige Systeme sind mit hohen Leistungen im kW-Bereich seit einigen Jahren kommerziell verfügbar [3], arbeiten aber nahezu ausschließlich im kontinuierlichen Betrieb. Um die für Reinigungszwecke erforderlichen hohen Pulsspitzenleistungen weit oberhalb der kontinuierlichen Leistung zu erreichen, müssen solche Systeme mit einer elektro- oder akustooptischen Güteschaltung ausgerüstet werden.

Das in Bild 4 gezeigte System erzeugt im gütegeschalteten Betrieb Pulsleistungen von bis zu einem Megawatt bei einer mittleren Laserleistung von 1kW. Die maximale Wiederholfrequenz liegt bei etwa 30kHz. Das System ist so robust aufgebaut, dass es auch im freien Feld eingesetzt werden kann, beispielsweise für die Reinigung von Eisenbahnschienen [4] oder von Hochspannungsmasten [5].

Obwohl mit transversal gepumpten Slablaser schon erhebliche technische Fortschritte erzielt werden konnten, schöpft dieses Konzept die grundsätzlichen Vorteile und Möglichkeiten der Hochleistungs-Diodenlaser bei weitem noch nicht aus. Wie Bild 1 belegt, kann die Strahlqualität, aber auch der Wirkungsgrad weiter gesteigert werden, wenn andere Geometrien des aktiven Mediums und der Pumpanordnung gewählt werden [6].

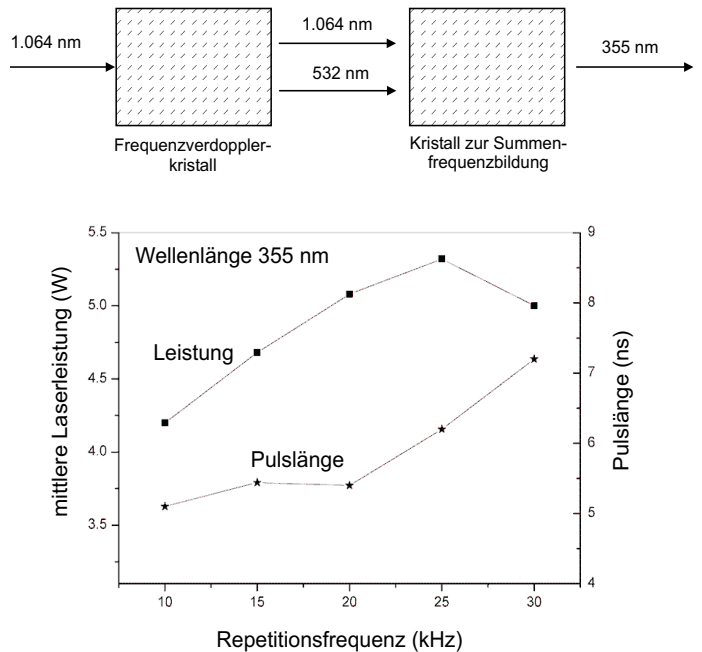
Ein für Reinigungsanwendungen besonders interessantes Konzept ist dabei der endgepumpte Slablaser, wie in Bild 5 dargestellt [7]. Aufgrund der hohen Verstärkung im aktiven Medium und der sehr kurzen Resonatorlänge können mit diesem Konzept im Güteschaltungsbetrieb sehr kurze und leistungsstarke Pulse erzeugt werden. Die Strahlqualität dieses unter dem Markennamen INNOSLAB angebotenen Lasers liegt an der Spitze dessen, was mit den verschiedenen Konzepten erreichbar ist (vgl. Bild 1);



**Bild 5:** Prinzip des endgepumpten Slablasers (INNOSLAB)

darüber soll in einem späteren Fachbeitrag in dieser Zeitschrift berichtet werden.

Hohe Strahlqualität und Pulsleistung bieten auch ausgezeichnete Voraussetzungen für die effiziente Konversion der Grundwellenlänge des Systems zu Wellenlängen im sichtbaren und ultravioletten Bereich, wie sie beispielsweise zum selektiven Abtragen dünner Farbschichten benötigt werden. Das üblicherweise für die Frequenzkonversion angewandte Prinzip ist in Bild 6 dargestellt: in Kristallen mit nichtlinear-optischem Verhalten wird die Grundwellenlänge (üblicherweise 1064nm) halbiert, bzw. die Frequenz verdoppelt, und zur Erzeugung von UV-Strahlung die verdoppelte Frequenz mit der nicht verdoppelten gemischt, so dass eine Wellenlänge von 355nm erzeugt wird. Mit dem INNOSLAB-Laser werden so 15W Ausgangsleistung im grünen Spektralbereich bei 532nm Wellenlänge erzeugt und 5W bei 355nm [8].



**Bild 6:** Frequenzkonversion mit nichtlinearen Kristallen: Prinzip (oben), mit dem INNOSLAB erzielte UV-Leistung (Fa. EdgeWave, unten)

### 2.3 Kurzpuls laser

Für das Mikro- und Präzisionsabtragen und -reinigen könnte es in vielen Fällen vorteilhaft sein, Laser mit deutlich kürzeren Pulsen als bisher diskutiert einzusetzen. In den letzten Jahren sind eine Vielzahl solcher Kurzpuls laser mit einer Pulsdauer im Bereich von Femtosekunden bis Pikosekunden entwickelt worden, deren Eignung für Reinigungsaufgaben Gegenstand aktueller Untersuchungen ist. Ein erprobtes und vielfach realisiertes Konzept für Kurzpuls laser ist der Titan-Saphir-Laser, der mit einem frequenzverdoppelten, diodengepumpten Festkörperlaser angeregt wird. Als Alternative zu Titan-Saphir werden Laserkristalle wie Cr:LiSAF untersucht, die direkt, ohne Umwege über den diodengepumpten Festkörperlaser, mit Diodenlasern angeregt werden können. Mit beiden Konzepten ist eine Pulsdauer bis hinunter in den Bereich um 10 fs erzielbar.

Wenn die jeweilige Anwendung auch mit etwas längeren Pulsen von einigen 100 fs bis zu einigen ps durchführbar ist, stehen Konzepte zur Verfügung, deren Kernelemente schon im industriellen Einsatz erprobt sind. Beispiele sind der Yb:YAG Scheibenlaser [9] oder ein System, das auf dem INNOSLAB-Konzept beruht. Dieses nutzt eine Verstärkerstufe, mit der die Strahlung eines Oszillators kleinerer Leistung (ca. 1–2W) auf mehr als 40W verstärkt wird. Das System wurde mit einer Wiederholfrequenz von 1,5MHz und 100MHz demonstriert und erzeugt Pulse mit einer Dauer von etwa 10 ps. Gegenstand laufender Untersuchungen ist der Aufbau von Systemen mit variabler, an den jeweiligen Bearbeitungsprozess anpassbarer Pulsdauer und die Erprobung dieses Systems beim Präzisionsabtrag und anderen Anwendungen.

## 3 Zusammenfassung

Die Prozesscharakteristik des Reinigens mit Laserstrahlung erfordert Laser, die je nach Anwendungsfall kurze, intensive Pulsen erzeugen, hohe Strahlqualität haben oder mit materialangepassten Wellenlängen arbeiten. Darüber hinaus muss jeweils eine mittlere Leistung

bereit gestellt werden, mit der die geforderte Produktivität erreicht werden kann.

Für die Behandlung makroskopischer Teile stehen inzwischen industrielle diodengepumpte und gütegeschaltete Laser zur Verfügung, mit denen bei mittleren Leistungen im kW-Bereich auch große Flächen wirtschaftlich behandelt werden können. Für die Feinbehandlung, wo Leistungen bis zu etwa 100W benötigt werden, sind ebenfalls industrielle diodengepumpte Laser verfügbar, die wegen ihrer hohen Pulsspitzenleistung und hohen Strahlqualität auch sehr effizient von der Grundwellenlänge (1064nm) in den grünen und ultra-violetten Strahlungsbereich verschoben und damit auf die Absorptionseigenschaften der zu entfernenden Schichten angepasst werden können.

Für die Reinigung mikrotechnischer Teile wird derzeit untersucht, ob die Verwendung sehr kurzer Pulse im ps- oder sogar fs-Bereich verfahrenstechnische Vorteile hat oder bessere Produkteigenschaften erzeugt werden können. Für ps-Pulse stehen dafür schon jetzt Laser zur Verfügung, die zwar noch nicht industriell eingesetzt werden, deren Kernelemente sich aber schon in anderen industriellen Lasern finden.

Hochleistungs-Diodenlaser (HLDL) sind derzeit auf Reinigungsaufgaben beschränkt, bei denen der für HLDL charakteristische thermische Abtragsprozess ausreicht. Es ist allerdings damit zu rechnen, daß die aktuell durchgeführten F&E-Arbeiten zu HLDL-Systemen führen, mit denen die Pulsleistungen heutiger Systeme um einen Faktor 10–50 gesteigert werden können. Damit können auch in der Laserstrahl-Reinigungstechnik die Vorteile dieser neuen Laserstrahlquelle, wie Kompaktheit, einfache Handhabung und hohe Wirtschaftlichkeit, voll zum Tragen kommen.

#### Literaturhinweise:

- [1] z.B.: [www.dilas.de](http://www.dilas.de), [www.laserline.de](http://www.laserline.de), [www.jold.de](http://www.jold.de)  
 [2] M. Bartram, Rik W. De Doncker, D. Hoffmann, R. Poprawe: New Soft-Switching Current-Pulse Power-Supply offers more than

500A Current Pulses with Pulsewidth less than 100ns to Explore New Applications with High-Power Laser Diode Arrays, Lasers in Manufacturing, Proc. of the second int. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, June 2003, Ed. R. Poprawe, A. Otto, AT-Fachverlag Stuttgart 2003

- [3] z.B. [www.rofin.com](http://www.rofin.com), [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)  
 [4] [www.laserthor.com](http://www.laserthor.com) (Articles & News)  
 [5] H. Brüninghoff: Laserstrahlreinigen von Hochspannungsmasten, Proceedings Aachener Kolloquium Lasertechnik 2002, S. 517, ILT Aachen ([www.ilt.fhg.de](http://www.ilt.fhg.de))  
 [6] Claus Schnitzler, Peter Loosen, Gunther Schmidt, Dieter Hoffmann, Joachim Giesekus, Thorsten Mans, Xiaoyu Wie, Daijun Li, Keming Du: Stab, Scheibe oder Slab (Diodengepumpte Festkörperlaser im Vergleich), Laser-Magazin, Juli 2001  
 [7] C. Schnitzler et.al.: A 500W high brightness diode end pumped Nd:YAG slab laser, OSA Trends in Optics and Photonics 68, Editors: Martin E. Ferman, Chistopher Marshall, OSA, 2002  
 [8] [www.edge-wave.com](http://www.edge-wave.com)  
 [9] Aus der Au, J.; Spühler, G. J.; Südmeyer, T.; Paschotta, R.; Hövel, R.; Moser, M.; Erhard, S.; Karszewski, M.; Giesen, A.; Keller, U.: 16.2W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser, Optics Letters 25(11) 2000 p. 859

#### Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann  
 Dr. Peter Loosen  
 Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)  
 Steinbachstr. 15, D-52074 Aachen  
 Tel. 0241/8906-162, Fax 0241/8906-121  
 eMail: [peter.loosen@ilt.fhg.de](mailto:peter.loosen@ilt.fhg.de)  
 Internet: [www.ilt.fhg.de](http://www.ilt.fhg.de)



Peter Loosen

ANZEIGE(N)