

# Symposium Aktuelle Entwicklungen von Hochleistungslasern und deren Anwendungen (SYLL)

gemeinsam organisiert

von der Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik e.V. (WLT) und  
dem Fachverband Kurzzeitphysik der DPG e.V.

Andreas Tünnermann  
Universität Jena  
und  
Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und  
Feinwerttechnik Jena  
Andreas.Tuennermann@iof.fraunhofer.de

Andreas Görtler  
DZG  
Landsberg am Lech  
AGoertler@gmx.de

Das Symposiums gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik von Hochleistungslasersystemen und deren Anwendungen in Wissenschaft und Technik. Es werden verschiedene Festkörperlaserkonzepte vorgestellt und Ausblicke auf zukünftige Entwicklungen in diesen Technologiebereich, auch von der Seite der Anwendungen derartiger Lasersysteme gegeben.

## Übersicht der Hauptvorträge und Fachsitzungen

(Hörsaal HS 4)

### Hauptvorträge

|          |    |             |      |  |
|----------|----|-------------|------|--|
| SYLL 1.1 | Mi | 13:45–14:15 | HS 4 | <b>Ultrashort pulsed lasers in mass production: Applications and still open questions in fundamental physics</b> — ●JENS KÖNIG, ANDREAS MICHALOWSKI  |
| SYLL 1.2 | Mi | 14:15–14:45 | HS 4 | <b>Ultrafast Lasers in Industrial Micromachining - Established Status and Future Trends</b> — ●DIRK SUTTER, OLIVER HECKL, CHRISTOF SIEBERT   |
| SYLL 1.3 | Mi | 14:45–15:15 | HS 4 | <b>Laser für die Medizintechnik</b> — ●MARTIN LEITNER  |
| SYLL 1.4 | Mi | 15:15–15:45 | HS 4 | <b>Optisch-Parametrische Verstärker hoher mittlerer Leistung für Pulse weniger Femtosekunden Dauer</b> — ●UWE MORGNER, ANNE HARTH, JAN MATYSCHOK, MARCEL SCHULTZE, TINO LANG, THOMAS BINHAMMER |
| SYLL 1.5 | Mi | 15:45–16:15 | HS 4 | <b>Faserverstärker für ultrahohe Pulsspitzen- und Durchschnittsleistungen</b> — ●TINO EIDAM, SVEN BREITKOPF, ARNO KLENKE, THOMAS SCHREIBER, JENS LIMPERT, ANDREAS TÜNNERMANN                   |
| SYLL 2.1 | Mi | 16:30–17:00 | HS 4 | <b>Extreme Licht Infrastruktur - Eine einzigartige EU Laser-Forschungseinrichtung</b> — ●MIKHAIL KALASHNIKOV   |
| SYLL 2.2 | Mi | 17:00–17:30 | HS 4 | <b>High Power and High Energy Cryogenic Yb-Lasers for Soft-X-ray Sources</b> — ●FRANZ X. KAERTNER  |
| SYLL 2.3 | Mi | 17:30–18:00 | HS 4 | <b>A single frequency laser at 191 nm</b> — ●JÜRGEN STUHLER, MATTHIAS SCHOLZ, DMITRIJS OPALEVS, WILHELM KAENDERS   |
| SYLL 2.4 | Mi | 18:00–18:30 | HS 4 | <b>The Innoslab Laser Platform - ns to fs pulse duration at kW class output power</b> — ●DIETER HOFFMANN, PETER RUSSBÜLDT, MARCO HÖFER, PETER LOOSEN, REINHART POPRAWA                         |

### Fachsitzungen

|              |    |             |      |  |
|--------------|----|-------------|------|--|
| SYLL 1.1–1.5 | Mi | 13:45–16:15 | HS 4 | <b>Hochleistungslaser und deren Anwendungen I</b>  |
| SYLL 2.1–2.4 | Mi | 16:30–18:30 | HS 4 | <b>Hochleistungslaser und deren Anwendungen II</b> |

## SYLL 1: Hochleistungslaser und deren Anwendungen I

Zeit: Mittwoch 13:45–16:15

Raum: HS 4

**Hauptvortrag** SYLL 1.1 Mi 13:45 HS 4  
**Ultrashort pulsed lasers in mass production: Applications and still open questions in fundamental physics** — ●JENS KÖNIG and ANDREAS MICHALOWSKI — Robert Bosch GmbH, Postbox 300240, 70442, Stuttgart, Germany

At the Robert Bosch GmbH micro processing with ultrashort laser pulses is established in industrial mass production since 2007. Nowadays more than 20 million Bosch products are already produced using this powerful technique. Anyway, the number of applications and production machines is still growing every year. In perspective we assume in the next years a rise in production of more than 40% annually.

In this contribution several current applications, technical developments and open scientific questions will be addressed. A deeper understanding of the ablation process fundamentals will enable further applications of ultrashort pulses. Our current view of the ablation process in the far threshold fluence regime as well as interesting questions for further research are discussed.

**Hauptvortrag** SYLL 1.2 Mi 14:15 HS 4  
**Ultrafast Lasers in Industrial Micromachining - Established Status and Future Trends** — ●DIRK SUTTER<sup>1</sup>, OLIVER HECKL<sup>2</sup>, and CHRISTOF SIEBERT<sup>2</sup> — <sup>1</sup>TRUMPF Laser GmbH + Co. KG — <sup>2</sup>TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

Ultrafast Lasers have entered industrial micromachining over the past decade. Scaling of their average power by more than an order of magnitude has resulted in sufficient productivity for numerous commercial applications. High availability based on reliable diode pumping is a key for industrial success. Stable and reproducible beam quality at dynamic power variation can be guaranteed using the thin disk gain geometry combined with external modulation. The rising world-wide demand is barely satisfied by serial production of hundreds of systems per year. We review the state of the art of ultrafast disk lasers, mention several well established applications, and discuss current developments.

**Hauptvortrag** SYLL 1.3 Mi 14:45 HS 4  
**Laser für die Medizintechnik** — ●MARTIN LEITNER — Jenoptik Laser GmbH, Jena, Deutschland

Moderne Lasersysteme spielen in der Medizintechnik in verschiedenen Bereichen eine zunehmend bedeutende Rolle. Von der Diagnose über therapeutische Eingriffe bis hin zur Herstellung medizintechnischer Komponenten werden unterschiedlichste Laserquellen eingesetzt.

In der laserbasierten Therapie im Bereich der Ophthalmologie findet man mehrere Anwendungsgebiete des Lasers. Der besondere Vorteil des Lasers ist dabei seine fokussierte und damit lokal abgegrenzte Einsatzmöglichkeit, wodurch minimalinvasive Therapieformen erst möglich sind. Beispielsweise werden in der Photokoagulation hochbrillante frequenzkonvertierte Festkörperlaser im sichtbaren Spektralbereich eingesetzt.

Ultrakurzpuls Laser finden heute insbesondere im Bereich der refraktiven Augen Chirurgie eine zunehmende Verbreitung. Neue Ansätze sehen den Femtosekundenlaser beispielsweise bei der Presbyopie Therapie, auch die Kataraktchirurgie erfährt neue Impulse durch die Vorteile dieser Laserquellen.

Neben diesen unmittelbar zur Therapie eingesetzten Anwendungen spielen Laser aber auch im Bereich der Herstellung medizinischer Produkte eine wichtige Rolle. So werden Stents die als Implantate ein-

gesetzt werden mittels Hochleistungslaserquellen geschnitten um auch bei kleinsten Strukturen eine qualitativ hochwertige Kantenqualität zu erzielen.

**Hauptvortrag** SYLL 1.4 Mi 15:15 HS 4  
**Optisch-Parametrische Verstärker hoher mittlerer Leistung für Pulse weniger Femtosekunden Dauer** — ●UWE MORGNER<sup>1,2,3</sup>, ANNE HARTH<sup>1,2</sup>, JAN MATYSCHOK<sup>1,4</sup>, MARCEL SCHULTZE<sup>1</sup>, TINO LANG<sup>1,2</sup> und THOMAS BINHAMMER<sup>4</sup> — <sup>1</sup>Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover — <sup>2</sup>Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST) — <sup>3</sup>Laser Zentrum Hannover e. V. — <sup>4</sup>VENTEON Laser Technologies GmbH, Garbsen

Zug um Zug profitieren die hochrepetierlichen parametrischen Verstärker (OPA's) für sehr kurze Laserpulse vom Fortschritt der als Pump-laser verwendeten Hochleistungs-Festkörperlaser. OPA's bieten Verstärkungsbandbreiten deutlich oberhalb klassischer Lasermaterialien und mit der Pumpwellenlänge verschiebbare Verstärkungsbereiche. Auf Grund der thermischen Überlegenheit und der enormen Klein-signalverstärkung des parametrischen Verstärkungskonzeptes bieten sie fast ideale Bedingungen für die Erzeugung sehr kurzer Pulse mit hohen mittleren Leistungen. In diesem Vortrag werden aktuelle OPA's mit Sub-10-fs-Pulsen und bis zu mehreren Watt Ausgangsleistung vorgestellt. Die Pump-laser beruhen auf scheiben- oder faserbasierten Festkörperlasern und -verstärkern. Mit komplexen mathematischen Modellen ist es zudem möglich, die raum-zeitliche und spektrale Entwicklung aller wechselwirkenden Felder und deren Mischprodukte in den Verstärkerkristallen genau zu rekonstruieren, die spektralen und räumlichen Effekte anschaulich zu erklären und mit aktuellen experimentellen Ergebnissen aus unseren Laboren zu vergleichen.

**Hauptvortrag** SYLL 1.5 Mi 15:45 HS 4  
**Faserverstärker für ultrahohe Pulsspitzen- und Durchschnittsleistungen** — ●TINO EIDAM<sup>1,2</sup>, SVEN BREITKOPF<sup>1,2</sup>, ARNO KLENKE<sup>1,2</sup>, THOMAS SCHREIBER<sup>3</sup>, JENS LIMPET<sup>1,2,3</sup> und ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2,3</sup> — <sup>1</sup>Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena — <sup>2</sup>Helmholtz-Institut Jena — <sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik

Faserbasierte Ultrakurzpuls Laser haben in den letzten Jahren einen enormen Leistungszuwachs erfahren. So erreichen Großkern-CPA-Verstärker heute sowohl Durchschnittsleistungen im Kilowattbereich als auch multi-GW Pulsspitzenleistungen. Diese Leistungswerte haben bereits eine Vielzahl von Anwendungen revolutioniert bzw. erst ermöglicht. Es gibt jedoch Anwendungen, beispielsweise die laserbasierte Teilchenbeschleunigung, welche noch weitaus höhere Leistungen (multi-TW Pulsspitzen- und multi-kW Durchschnittsleistungen) benötigen.

In diesem Beitrag sollen entsprechende Skalierungskonzepte zum Erreichen dieser Parameter vorgestellt, diskutiert und erste Experimente präsentiert werden. So gelang es bereits durch die räumlich getrennte Verstärkung und anschließende kohärente Addition der Laserpulse Leistungswerte zu erreichen, welche diejenigen eines einzelnen Verstärkers bereits übertreffen. Des Weiteren soll das neuartige Konzept der kohärenten Addition zeitlich separierter Pulse vorgestellt werden.

Ein Faser-CPA System, welches diese Konzepte vereint, wird in der Lage sein, in Parameterbereiche vorzustoßen, welche für alle anderen Lasergeometrien heute noch unerreichbar erscheinen.

## SYLL 2: Hochleistungslaser und deren Anwendungen II

Zeit: Mittwoch 16:30–18:30

Raum: HS 4

**Hauptvortrag** SYLL 2.1 Mi 16:30 HS 4  
**Extreme Licht Infrastruktur - Eine einzigartige EU Laser-Forschungseinrichtung** — ●MIKHAIL KALASHNIKOV — Max-Born-Institut, Berlin Germany

ELI wird eine der größten Forschungseinrichtungen der Europäischen Union sein, wo die weltweit intensivsten Lasern mit kürzesten Pulsen entwickelt und aufgebaut werden. Dies ist die erste Forschungsstruktur in der Welt, um die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie bei ultra-relativistischer Lichtintensität zu untersuchen. Ihre Lasersysteme

werden neue Möglichkeiten von Laser-Materie-Wechselwirkung eröffnen: Erreichen des höchsten elektromagnetischen Feldes, Beschleunigung der Materie, Elektronen und Ionen zu relativistischen Geschwindigkeiten, Generation von kohärent oder nichtkohärent hochenergetischer Strahlung, Generation von ultra-kurzen Impulsen im atto- bis yocto- Sekunden Bereich. Dies bestimmt, dass ELI eine Vier-Säulen Architektur hat, der Attosekunden Forschungseinrichtung in Ungarn (ELI-ALPS), der höchst Energie Beamline Forschungseinrichtung in Tschechien (ELI-Beamlines), der Kernphysik Forschungseinrichtung in

Rumänien (ELI-NP) und einer Höchstfeld Forschungseinrichtung in einem Land, das in nächster Zukunft ausgewählt wird, besteht. Die ELI Forschungseinrichtung wird die erste große wissenschaftliche Infrastruktur sein, welche im östlichen Teil der Europäischen Gemeinschaft beheimatet sein wird und eine anziehende Plattform für die Entwicklung einer neuen Generation von Studenten, Doktoranden, Wissenschaftler und Ingenieure sein.

**Hauptvortrag** SYLL 2.2 Mi 17:00 HS 4  
**High Power and High Energy Cryogenic Yb-Lasers for Soft-X-ray Sources** — •FRANZ X. KAERTNER — Center for Free-Electron Laser Science, DESY and Physics Dept., University of Hamburg, — Dept. of Electr. Eng. and Computer Science and Research Laboratory of Electronics, MIT

High Harmonic Generation in the soft-X-ray region requires high energy and large average power long wavelength ultrashort pulses to achieve phase matching and counteract the low conversion efficiency of this process. In this presentation, we review our effort in developing suitable large average power, high energy laser sources at 2 micron based on optical parametric chirped pulse amplifiers pumped by cryogenically cooled Yb:YAG lasers. We demonstrate 40-mJ, 10-ps pulse generation at 1kHz repetition rate from a rod-type cryogenically cooled Yb:YAG amplifier chain and propose and analyze a composite-thin-disk laser technology. The advantages of this new technology in terms of power and energy handling as well as suppression of amplified spontaneous emission will be discussed and first experimental results will be presented.

**Hauptvortrag** SYLL 2.3 Mi 17:30 HS 4  
**A single frequency laser at 191 nm** — •JÜRGEN STUHLER, MATTHIAS SCHOLZ, DMITRIJS OPALEVS, and WILHELM KAENDERS — TOPTICA Photonics AG, Gräfelfing, Germany

We present a cw narrow linewidth deep-UV source at 191 nm, consisting of a grating-stabilized diode laser which is frequency-quadrupled by two consecutive second harmonic generation (SHG) stages.

In the first SHG stage, the fundamental light at 764 nm is reso-

nantly enhanced and frequency doubled to 382 nm in a lithium triborate (LBO) crystal. The resulting uv light is beam shaped and enhanced in the second SHG stage. Using the novel crystal potassium fluoroboratoberyllate (KBBF) [1], an output power of up to 1.3 mW at 191 nm is achieved [2]. The linewidth of the laser output at 191 nm (1570 THz) is estimated to be below 300 kHz (1 km coherence length). Automatic fine tuning of the laser up to 40 GHz and coarse wavelength changes of 1 nm are possible. Similar techniques should provide wavelengths between 165 nm and 205 nm.

The demonstrated light source is a unique tool for deep-UV metrology, photoemission spectroscopy or atomic spectroscopy.

[1] C. Chen et al., "Deep-UV nonlinear optical crystal KBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub> - discovery, growth, optical properties and applications", Appl. Phys. B 97, 9-25 (2009).

[2] M. Scholz et al., "A 1.3-mW Tunable and Narrow-Band Continuous-Wave Light Source at 191 nm", OPTICS EXPRESS 20, No. 17, 18659-18664 (2012).

**Hauptvortrag** SYLL 2.4 Mi 18:00 HS 4  
**The Innoslab Laser Platform - ns to fs pulse duration at kW class output power** — •DIETER HOFFMANN, PETER RUSSBÜLDT, MARCO HÖFER, PETER LOOSEN, and REINHART POPRAWA — Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen, Steinbachstraße 15

With the Innoslab concept a new fundamental platform for highly efficient and compact laser oscillators and amplifiers has been developed and continuously improved in the past 15 years. Starting with partially end-pumped lasers with a line-shaped pump cross section in 1996, the continuous performance improvement led to a series of output power records for short and ultrashort pulsed lasers. For example 120 mJ pulse energy at sub ns pulse duration and 1.3 kHz prf has been demonstrated based on a Nd:YAG MOPA. With a Yb:YAG MOPA more than 1 kW output power at 600 fs pulse duration has been demonstrated. Further power scaling to multi kW level, generation of sub 400 fs pulses and a new Innoslab design of an extremely compact planar geometry are currently in progress. The presentation provides an overview over the most important Innoslab results and gives an outlook on promising next development steps.