

Revolutionäre Verstärker

Parametrische Lasersysteme revolutionieren die Ultrakurzpuls-Physik.

Thomas Binhammer, Jan Ahrens, Stefan Rausch, Oliver Prochnow und Gregor Klatt

Intensive, ultrakurze Laserpulse haben eine Vielzahl neuer Erkenntnisse in Physik, Biologie und Chemie ermöglicht. Dabei hat vor allem die Entwicklung von Titan-Saphir-basierten Verstärkersystemen in den letzten 30 Jahren eine regelrechte Revolution eingeleitet [1]. Diese Lichtquelle war die Basis für den Vorstoß in den Attosekunden-Zeitbereich und in die XUV-Spektroskopie, die erstmals interatomare Vorgänge auflösen konnten. Die Ansprüche an die Lichtquelle steigen stetig, denn viele Anwendungen benötigen extrem kurze Pulsdauern mit stabilisiertem Verlauf des elektrischen Trägerfeldes, möglichst hohen Photonenfluss mit Wiederholraten im MHz-Bereich oder einen weiten Durchstimmbereich vom sichtbaren bis in den MID-IR-Spektralbereich. Da die etablierten Titan-Saphir-Verstärkersysteme technologisch an ihre Grenzen gestoßen sind, bahnt sich mit parametrischen Verstärkern eine zweite Revolution in der Lasertechnik an.

Stand der Technik

Während der letzten zwei Jahrzehnte haben sich Femtosekunden-Lasersysteme als Lichtquelle für verschiedenste Anwendungen in Wissenschaft und Industrie etabliert. Diese Systeme liefern die einzigartige Kombination von sehr hohen Spitzenleistungen von Megawatt zu Petawatt mit einer ultrakurzen Pulsdauer von 30 fs ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Ihre Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig und umfassen unter anderem industrielle Anwendungen wie Schneiden, Augenchirurgie, Mikrobearbeitung, biomedizinische Bildgebung sowie wissenschaftliche Grundlagenforschung

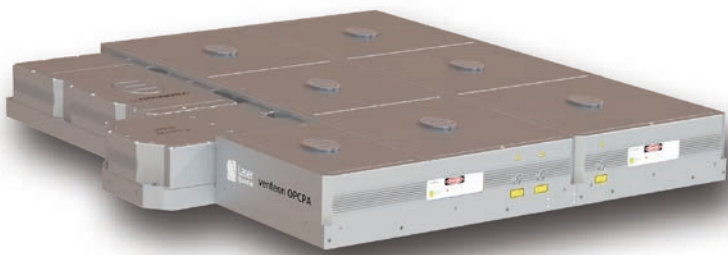


Abb. 1 Produktdesign des kommerziellen venteon OPCA der Laser Quantum GmbH

wie Pump-Probe-Spektroskopie oder Untersuchungen zur Wechselwirkung von Licht und Materie.

Unter den wissenschaftlichen Anwendungen sei hier vor allem die Erzeugung von kohärenter XUV- bzw. Hoher Harmonischer Strahlung (High Harmonic Generation, HHG) hervorgehoben. Dieser Bereich ermöglicht es Wissenschaftlern, die Wechselwirkungen innerhalb der Materie mit Attosekunden-Zeitauflösung zu untersuchen und damit fundamentale Einblicke in die Natur zu gewinnen.

Mittlerweile ist die Entwicklung von Titan-Saphir-basierten Laseroszillatoren und Verstärkersystemen nicht mehr im Stande, die gestiegene Anforderung zu erfüllen. Die Ursachen für die Limitierung der traditionellen Titan-Saphir-Multipass-Verstärker liegen im Verstärkungsprozess selbst begründet. Typischerweise wird ein frequenzverdoppelter, gütegeschalteter Festkörperlaser mit hoher Energie und Pulsdauer im Bereich von Nanosekunden verwendet, um einen Titan-Saphir-Kristall optisch zu pumpen, der das Pumplicht absorbiert und einige Mikrosekunden lang speichert. Der Energietransfer der „grünen“ Pumpstrahlung bei 532 nm auf den Femtosekunden-Puls mit einer Zentralwellenlänge

von 800 nm geschieht mit einem so genannten Quantendefekt, d. h. der Kristall nimmt die überschüssige Photonenenergie in Form von thermischer Last auf. Die Kristalle sind folglich aufwändig zu sehr tiefen Temperaturen zu kühlen, oftmals sogar kryogen. Die dennoch vorhandene thermische Linsenbildung ist eines der Hauptprobleme. Zusätzlich sind die gütegeschalteten Pumpelaser auf wenige kHz in der Wiederholrate begrenzt, und es ist hier kaum eine technische Weiterentwicklung festzustellen.

Parametrisch verstärkt

Die Vorteile, die eine deutlich erhöhte Puls-Wiederholrate bietet, sind erheblich: Durch Steigerung von 1 kHz auf beispielsweise 1 MHz verringert sich die Messzeit von einer Stunde auf nur 3,6 Sekunden. Ein parametrisches Verstärkerkonzept weist zudem neben einer großen Verstärkungsbandbreite auch hohes Skalierungspotenzial auf. Ein optisch parametrischer Verstärker (OPCPA, Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier) beruht auf der Differenzfrequenz-Erzeugung [2]. Dabei werden zwei Strahlen – Pumpe und Signal – mit den jeweiligen Frequenzen ω_P und ω_S in einem nichtlinearen Kristall über-

Dr. Thomas Binhammer, Dipl.-Phys. Jan Ahrens, Dr. Stefan Rausch, Dr. Oliver Prochnow und Dr. Gregor Klatt, Laser Quantum GmbH, Hollerithallee 17, 30419 Hannover, www.laserquantum.com

Best of

lagert. Es entsteht der „Idler“ mit der Differenzfrequenz $\omega_i = \omega_p - \omega_s$. Dieser Prozess ermöglicht es, einen Teil der Energie eines hochenergetischen Pumpimpulses auf einen schwachen Signalpuls zu übertragen. Dies geschieht mit einem sehr hohen Kleinsignal-Gewinn, sodass eine optisch-zu-optische Effizienz von 30 % schon im einfachen Durchgang möglich ist. Die Differenzfrequenz wird dabei als Idler-Photon emittiert, sodass der nichtlineare Kristall energetisch nicht beteiligt ist, der Prozess verläuft parametrisch. Dadurch wird keine Wärme im Kristall deponiert, wodurch sich die Ausgangsleistung dieses Verstärkungsprinzips exzellent skalieren lässt.

Die Bandbreite und der Wellenlängenbereich sind prinzipiell nur durch die Phasenanpassungsbedingungen gegeben, bei denen gleichzeitig Energie und Impuls erhalten sein müssen. Durch die Wahl des richtigen Kristalls und die Einführung eines kleinen Winkels zwischen Signal- und Pumpstrahl erweitert sich die Akzeptanzbandbreite erheblich (Abb. 2). Dies erlaubt eine extrem breitbandige Verstärkung von 650 nm bis weit über 1000 nm [3]. Dadurch ist die parametrische Verstärkung bestens dazu geeignet, sogar die kürzesten Laserpulse mit weniger als 6 fs Pulsdauer, die von kommerziellen Laseroszillatoren erzeugt werden, direkt in den Mikrojoule- oder Millijoule-Bereich zu verstärken und gleichzeitig die ultrakurze Pulsdauer zu erhalten.

Aus der fehlenden Energiespeicherung im Kristall ergeben sich allerdings hohe Anforderungen an die zeitliche Synchronizität von Pump- und Signalpuls. Für eine effiziente, breitbandige Verstärkung ist ein möglichst perfekter zeitlicher Überlapp im Kristall notwendig mit einem zeitlichen Jitter, der deutlich kleiner als die Pumpimpuls-Dauer ist.

Grundsätzlich gibt es für Hochleistungs-OPCPA-Systeme mit ultrakurzer Pulsdauer zwei alternative Möglichkeiten, diese intrinsische Synchronisation zu realisieren. Die erste Variante nutzt Weißlicht- oder Superkontinuumstrahlung, für die ein kleiner Teil der infraroten Pumpstrahlung abgezweigt und in ein nichtlineares Kerr-Medium fokussiert wird, um dort mittels nichtlinearen Effekten wie der Selbstphasen-Modulation ein breites Weißlichtspektrum zu erzeugen. Dieses Licht kann als Signalpuls dienen und in einer oder mehreren aufeinanderfolgenden parametrischen Stufen verstärkt werden [5, 6].

Der zweite Ansatz beruht auf einem ultrabreitbandigen Titan-Saphir-Oszillator als rauscharme Lichtquelle, die einen breitbandigen Signalpuls sowie ausreichend Licht bei 1030 nm liefert, das dazu dienen kann, direkt einen Yb-basierten Verstärker zu „seeden“. Dieser lässt sich in Form eines regenerativen Thin-disk-Verstärkers oder rein faserbasiert realisieren und weist durch den gemeinsamen Ursprung der Strahlung eine intrinsische Synchronisierung und somit einen

extrem geringen Jitter relativ zum Signalpuls auf. Zudem ist es möglich, den Ausgang eines solchen Verstärkers mit über 50 % Effizienz in der Frequenz zu verdoppeln. Er eignet sich damit als idealer rauscharmer Pumpimpuls für die parametrische Verstärkung.

Der parametrische Prozess erlaubt es, ein extrem breitbandiges Signal zu verstärken und somit entweder hochintensive, extrem kurze Pulse zu erzeugen [7–11] oder alternativ den verstärkten Puls in einem weiten Frequenzbereich vom sichtbaren bis ins Nahinfrarot durchzustimmen [12]. Für eine weitergehende Übersicht über parametrische Verstärkersysteme sei auf [13, 14] verwiesen.

In den letzten Jahren haben sich vor allem auf Ytterbium (Yb) basierte Pumpquellen rasant weiterentwickelt und erreichen nahezu jedes Jahr neue Leistungs- und Energie-Rekorde [15–17]. Diese Systeme sind in der Lage, Pulsdauern unterhalb einer Pikosekunde und extrem hohe Leistungen von mehr als 100 W bei hohen Wiederholraten zur Verfügung zu stellen und eignen sich dadurch hervorragend als Pumpquelle für OPCPA-Systeme. Zudem lassen sich Yb-basierte Quellen durch preiswerte und zuverlässige Diodenlaser pumpen.

Der venteon OPCPA

Der speziell in der Attosekundenphysik und XUV-Spektroskopie bestehende Bedarf an hochinten-

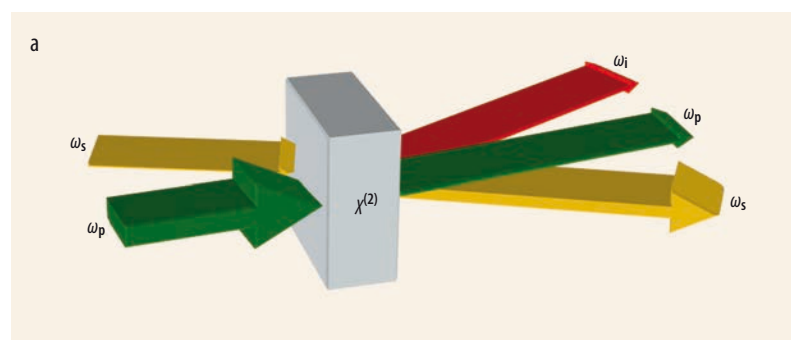
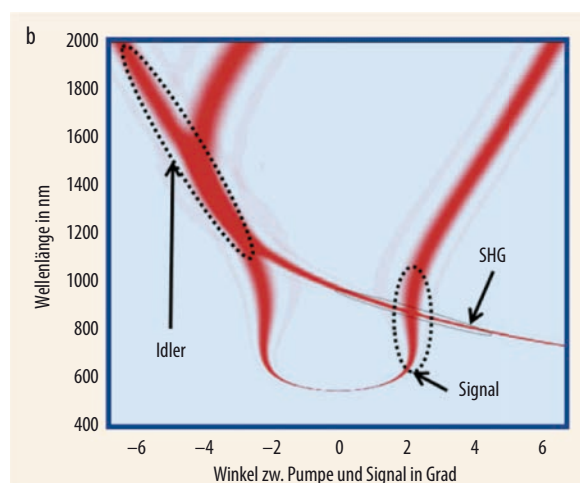


Abb. 2 Eine nicht-kollineare Geometrie ermöglicht Impuls- und Energie-Erhaltung über einen weiten Spektralbereich. Dies ermöglicht bei Nutzung eines BBO-Kristalls als nichtlineares Medium eine

breitbandige Phasenanpassung und somit Verstärkung über mehrere hundert Nanometer bei einem nichtkollinearen Winkel von $2,5^\circ$ (Magic Angle).



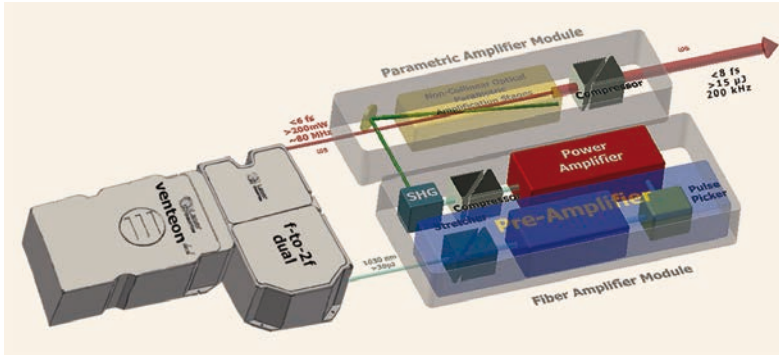


Abb. 3 Aufbau des kommerziellen venteon OPCPA der Laser Quantum GmbH

siven, ultrakurzen Laserpulsen mit hoher Wiederholrate, deren Dauer möglichst kleiner als 6 fs und somit nur wenige Zyklen des elektrischen Träger-Feldes beträgt (Few-cycle Pulse), ließ sich bislang in wissenschaftlichen Laboren nur durch selbstgebaute OPCPA-Systeme befriedigen. Dies grenzt den Nutzerkreis auf Laserexperten ein und beschränkt die Anwendbarkeit der oft komplexen und justage-intensiven Systeme. In den letzten Jahren schritt aber die Kommerzialisierung dieser Technologie zunehmend voran, sodass OPCPA-Systeme in naher Zukunft viele Anwendungsfelder erorbern dürften.

Als eine der ersten Firmen hat hier Laser Quantum mit ihrem venteon OPCPA Pionierarbeit geleistet und 2012 den ersten kommerziellen Few-cycle OPCPA auf den Markt gebracht (Abb. 1, 3). Das System nutzt einen ultrabreitbandigen Titan-Saphirlaser als Basis, der mit einem oktavbreiten Spektrum von 600 bis 1200 nm extrem kurze Pulse von weniger als 5 fs Dauer ermöglicht und dadurch ein breitbandiges Signal für den parametrischen Ver-

stärker sowie ausreichend Energie bei 1030 nm für das Seeden eines faserbasierten Verstärkers zur Verfügung stellt, der als Pumpimpuls für den OPCPA dient. Mit Hilfe zuverlässiger und relativ preiswerter Pumpdioden bei 976 nm kann Ytterbium bei geringem Wärmeeintrag eine breitbandige Verstärkung liefern, sodass der Faserverstärker Femtosekundenpulse mit einer Leistung von mehr als 40 W bei hoher Wiederholrate von mehr als 200 kHz liefern kann. Die hier generierte Energie wird im parametrischen Verstärker effizient auf das breitbandige Signal übertragen, sodass am Ausgang des OPCPA ultrakurze Pulse mit einer Dauer von weniger als 8 fs und einer Energie von mehr als 15 μJ emittiert werden. Das entspricht einer Spitzenleistung im Gigawatt-Bereich bei einer um mehrere Größenordnungen höheren Wiederholrate als bei Titan-Saphir-Verstärkern.

Darüber hinaus ist die spektrale Bandbreite für viele Anwendungen vor allem in der Femtosekunden-spektroskopie oder nichtlinearen Bildgebung (z. B. Coherent Anti-

stokes Raman Spectroscopy) von großer Bedeutung. Mit dem nicht-kollinearen parametrischen Verstärker lässt sich fast die gesamte Bandbreite des Signals von 700 bis 1100 nm verstärken (Abb. 4). Zudem sind weitere synchrone Ausgänge bei 520 oder 1040 nm verfügbar. Das System kann sehr einfach durchstimmbare gestaltet werden (Abb. 4), was die gezielte Anregung bestimmter Spektralbereiche ermöglicht.

Vor dem Durchbruch

Die zunehmende kommerzielle Verfügbarkeit von OPCPA-Systemen ermöglicht Nutzern den Zugang zu völlig neuen Strahlparametern. Durch die große Flexibilität der Technologie sind sowohl extrem kurze Pulse als auch durchstimmbare Systeme möglich. Der Spektralbereich erstreckt sich vom Sichtbaren bis ins MID-IR. Parametrische Verstärker erlauben Wiederholraten im MHz-Bereich und einen hohen Photonenfluss. Momentan finden sich Anwendungen noch hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich und in der Grundlagenforschung. Hier werden vor allem Untersuchungen zur nichtlinearen Licht-Materie-Wechselwirkung, XUV-Spektroskopie, kohärente Bildgebung mit Nanometer-Auflösung und dynamische Untersuchungen mit Attosekunden-Zeitauflösung von OPCPA-Systemen profitieren.

Als ein Anwendungsbeispiel sei die Erzeugung hoher harmonischer Strahlung durch die Interaktion des

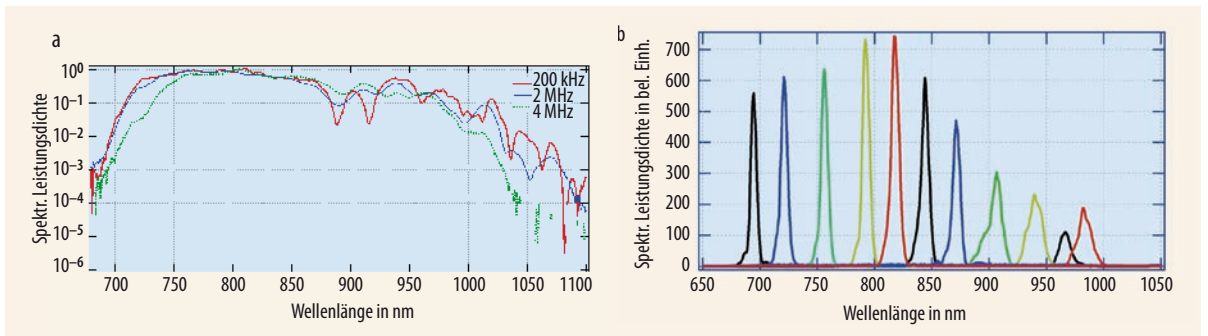


Abb. 4 Der extrem breitbandige Verstärker erlaubt eine spektrale Bandbreite von mehr als 400 nm bei hohen Wiederholraten von 200 kHz bis 4 MHz. Alternativ zur ultrakurzen Puls-

dauer von weniger als 8 fs lässt er sich auch in einem durchstimmbaren Modus betreiben.

ultrakurzen und intensiven Laserpulses mit Atomen in der Gasphase hervorgehoben (Abb. 5). Im Zeitbereich wurde an der Universität Lund (Schweden) ein Attosekunden-Pulszug erzeugt. Durch die extrem kurzen Pulse mit Stabilisierung des elektrischen Feldverlaufs, wie sie der OPCPA liefert, besteht die Möglichkeit, einen einzelnen Attosekundenpuls zu generieren. Der Hauptvorteil der hohen Wiederholrate ist der große Photonenfluss bei 200 kHz, der eine Voraussetzung für die weitere Nutzbarkeit der XUV-Strahlung darstellt.

Immer mehr Anwendungen benötigen eine Lichtquelle im XUV-Spektralbereich, die in der Lage ist, kurze Pulse zu erzeugen. Aufgrund der geringen Effizienz der HHG (rund 10^{-5}) ist die Zahl der pro Sekunde erzeugten XUV-Photonen dieser Lichtquelle derzeit nur sehr gering. Ein gesteigerter Photonenfluss ist daher einer der wichtigsten Faktoren, um weitere Anwendungsfelder zu erschließen.

Bislang kommen in diesen Bereichen gewöhnlich traditionelle Titan-Saphir-Verstärker zum Einsatz, die aber den Photonenfluss in vielen Anwendungen beschränken. So verursacht die niedrige Repetitionsrate mit nur wenigen Kilohertz oftmals sehr lange Messzeiten, z. B. bei der detaillierten Untersuchung von Atomen und Molekülen in der Strukturanalyse. Im konkreten Fall darf sich nur ein Atom oder Molekül im Fokus des Laserstrahls befinden, damit die Messdaten eindeutig zu interpretieren sind. Bei solchen Anwendungen ist daher eine bessere Statistik nicht durch eine höhere Dichte oder Pulsenergie möglich. Erhöht man jedoch die Wiederholrate z. B. um einen Faktor 500, so lässt sich dieselbe Datenmenge mit einem 500 kHz-OPCPA-System in nur einer Minute aufnehmen, für die man mit einem 1 kHz-Titan-Saphir-Verstärker über acht Stunden messen müsste. Diese Argumentation gilt in ähnlicher Weise für Anwendungen in der Bildgebung, bei der die Abtastgeschwindigkeit entscheidend ist. In der Materialbearbeitung ermöglichen höhere

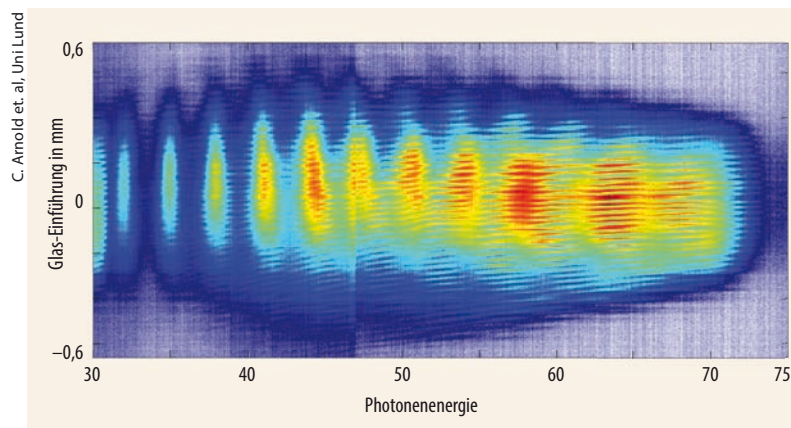


Abb. 5 Spektrum der Hohen Harmonischen Strahlung, erzeugt mittels des venteon OPCPA-Systems bei 200 kHz Wiederholrate. Bei hoher Photonenenergie

ist eine Modulation abhängig vom elektrischen Feldverlauf der Laserpulse zu beobachten, welches durch Einbringen von Glas in den Strahl variiert wird.

Wiederholraten schnellere Prozessgeschwindigkeiten und somit einen höheren Durchsatz für industrielle Anwendungen.

Ausblick und Perspektiven

Die Kommerzialisierung der ersten OPCPA-Systeme wird es Forschern und Anwendern in Zukunft erlauben, sich von den Beschränkungen der traditionellen Verstärker-Systeme zu lösen. Dadurch werden sich vor allem bei der Licht-Materie-Wechselwirkung auf Attosekunden-Zeitskala viele neue Erkenntnisse und Anwendungsfelder ergeben. Eine der vielversprechendsten Eigenschaften der OPCPA-Technologie ist ihre Vielseitigkeit in Hinblick auf realisierbare Pulsenergien, Pulsdauer, Wiederholraten und Wellenlängenbereiche. Denn diese lassen sich sehr einfach beeinflussen und durch die Wahl des Pumplaser-Konzeptes oder des nichtlinearen Kristalls variieren. Die parametrische Verstärkung ist nicht auf den hier beschriebenen Parameterbereich beschränkt, zudem existieren außer dem häufig benutzten BBO viele geeignete nichtlineare Kristalle, wie z. B. KTA oder periodisch gepolte Kristalle, die sich speziell auf bestimmte Ausgangsparameter designen lassen. Dabei befindet sich diese Technologie im Gegensatz zu Titan-Saphir-Verstärkern noch in einem Prozess dynamischer Weiterentwicklung.

- [1] S. Backus, C. G. Durfee, M. M. Murnane und H. C. Kapteyn, Review of Scientific Instruments **69**, 1207 (1998)
- [2] C. C. Wang und G. W. Racette, Appl. Phys. Lett. **6**, 169 (1965)
- [3] G. Cerullo und S. De Silvestri, Review of Scientific Instr. **74**, 1 (2003)
- [5] R. Riedel et al., Opt. Lett. **39**, 1422 (2014)
- [6] M. Emons et al., Opt. Express **18**, 1191 (2010)
- [7] A. Harth et al., Optics Express **20**, 3076 (2012)
- [8] D. Herrmann et al., Opt. Express **18**, 18752 (2010)
- [9] C. Manzoni et al., Optics Letters **37**, 1880 (2012)
- [10] M. Schultze et al., „CEP-Stable, Few-Cycle OPCPA System with more than 15 W of Average Output Power at 300 kHz,” 6th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Neuchatel, Switzerland, 24–29 Aug. 2014, paper ThE-T1-O-03
- [11] J. Rothhardt et al., Opt. Express **20** (10), 10870 (2012)
- [12] D. Brida et al., Journal of Optics **12**, 013001 (2010)
- [13] S. Witte und K. S. E. Eikema, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **18**, 296 (2012)
- [14] H. Fattahi et al., Optica **1**, 45 (2014)
- [15] C. Teisset et al., „300 W Picosecond Thin-Disk Regenerative Amplifier at 10 kHz Repetition Rate,” in Advanced Solid-State Lasers Congress Postdeadline, G. Huber und P. Moulton (Hrsg.), OSA Postdeadline Paper Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper JTh5A.1
- [16] C. J. Saraceno et al., Optics Letters **39**, 9 (2014)
- [17] A. Klenke et al., Opt. Lett. **38**, 2283 (2013)