

Effiziente Impulskompression im industriellen Kontext mittels Multipasszellen

Kilian Fritsch, Christian Franke, Oleg Pronin

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
Spin-off Projekt: n₂-Photonics

Wir stellen einen kommerziellen Prototyp eines auf Multipasszellen basierenden Spektralverbreiterungs- und -komprimierungssystems vor. Er ist in der Lage 40 fs-Impulse von einem 250 fs-Treiberlaser mit hervorragender Effizienz von 92 % zu erzeugen, was zu einer Verfünffachung der Spitzenleistung führt. Bei der maximalen Eingangsleistung (10 W) ist die Stabilität so hoch wie die Stabilität des Treiberlasers.

We present a commercial prototype of a multipass cell based spectral broadening and compression system capable of generating 40 fs pulses from a 250 fs driving laser with excellent throughput efficiency of 92 % resulting in a fivefold increase in peak power. At the maximum input power (10 W) the stability is as good as the stability of the driving laser.

1. Einleitung

Die Emissionsbandbreite der meist verwendeten Verstärkerkristalle, zum Beispiel Yb:YAG oder Nd:YVO, limitiert die erreichbare Impulsdauer von Hochleistungslasern auf etwa 250 fs. Nachgeschaltete externe Impulskompressoren können zum einen das Frequenzspektrum des Laserimpulses mittels Selbstphasenmodulation (SPM) erweitern und zum anderen die Impulsdauer verkürzen. Alternativ zu etablierten faserbasierten Systemen lässt sich der Prozess auch in einer Multipassanordnung im freien Strahl umsetzen [1]. Neben der Impulskompression zu unter 20 fs [2] wurde auch die Skalierbarkeit der Methode bis zu einer Durchschnittsleistung von 0,5 kW bereits nachgewiesen [3]. Die Technik ist überaus tolerant gegenüber äußeren Einflüssen. So arbeitet die Frequenzverbreiterung wesentlich stabiler und benötigt keinerlei Wartung im Gegensatz zu konkurrierenden Technologien. Die Multipassanordnung erfüllt deshalb die Anforderungen von Industrieanwendern nach Prozessstabilität und Zuverlässigkeit. Hier präsentieren wir die kommerzielle Umsetzung der Technologie in Form eines Impulskompressionssystems, an dem wir als Ausgründung „n₂-Photonics“ (www.hsu-hh.de/lts/spin-offs/exist) aus dem Lehrstuhl für Lasertechnologie und Spektroskopie von Prof. Pronin der Helmut-Schmidt-Universität arbeiten.

2. Systemauslegung

In dieser Arbeit wird die Impulskompression eines 250 fs langen Gaußschen Impulses mit 100 µJ Impulsenergie aus einem „PHAROS“-Laser der Firma Light Conversion untersucht. Die Spitzenleistung des Eingangsimpulses beträgt demnach etwa 380 MW. Ziel ist die Verkürzung der Impulsdauer auf etwa 40 fs. Für die Auslegung gilt es zunächst das gesamt erforderliche B-Integral abzuschätzen. Hierzu wurde Gleichung 14 aus [4] verwendet:

$$\frac{\Delta\omega}{(\Delta\omega)_0} \approx \left[1 + 0,19 \cdot B_{\text{ges}}^2\right]^{\frac{1}{2}} \propto \frac{250 \text{ fs}}{40 \text{ fs}} \approx 6,3$$

Die Bandbreiten der Winkelfrequenzen sind hier über das quadratische Mittel definiert. Es wird angenommen, dass diese direkt proportional zur Impulsdauer sind. Es folgt, dass ein B-Integral B_{ges} von etwa 14 rad für die gewünschte spektrale Verbreiterung erreicht werden muss. Die detaillierte Auslegung basiert auf den Erfahrungen aus [2]

3. Numerische Simulation

Um die analytische Auslegung aus vorigem Abschnitt zu untermauern, wurde auf deren Grundlage eine eindimensionale numerische Simulation durchgeführt. Um das dreidimensionale physikalische Problem der nichtlinearen Propagation in der Multipasszelle mit dem eindimensionalen Simulationsprogramm berechnen zu können, wurden die Annäherungen aus [5, Abbildung 1b)] verwendet. Außerdem wurde zusätzlich Verlust- und Dispersionsfreiheit der Optiken und des Mediums sowie ideale Gaußsche Strahlqualität ($M^2 = 1$) angenommen.

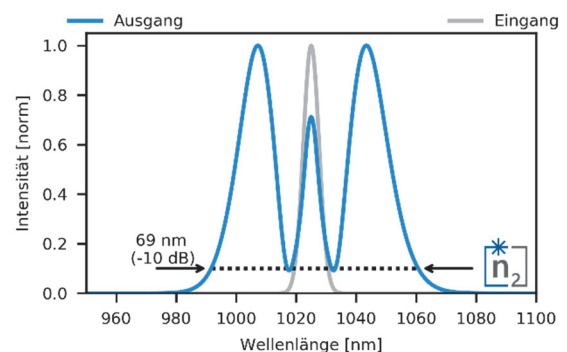


Abb. 1: Eindimensionale numerische Simulation der analytischen Auslegung aus Abschnitt 2.

Abb. 1 zeigt das errechnete Ausgangsspektrum sowie das angenommene Eingangsspektrum der Simulation. Die Verbreiterung sollte demnach mehr als versechsfachen und so die Kompression auf 40 fs ermöglichen. Das Fourier-Transformlimit beträgt 41 fs, wobei ca. 85 % der Energie im Hauptpuls enthalten sind.

Demnach bestätigt die numerische Analyse die analytische Auslegung des Systems.

4. Experimentelle Resultate

Dieser Abschnitt fasst die erzielten Ergebnisse zusammen. Das mechanische Design des Aufbaus ist für einen stabilen 24/7-Betrieb in einer industriellen Umgebung optimiert. Alle Komponenten, einschließlich Strahlführung und Diagnose, sind vollständig im abgedichteten monolithischen Gehäuse verbaut, das eine einfache Integration in bestehende Lasersysteme ermöglicht.

Als wichtigsten Parameter gilt es die Bandbreite zu untersuchen. Die Spektren vor und nach der Verbreiterungsstufe sind in Abb. 2 dargestellt.

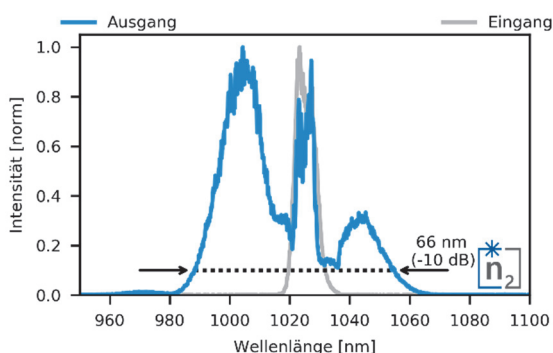


Abb. 2: Spektrum vor und nach der spektralen Verbreiterung in der MIKS. Die Bandbreite erreicht 66 nm auf dem -10 dB Niveaufaktor gegenüber dem Maximum.

Die spektrale Breite auf dem -10 dB Niveaufaktor gegenüber dem Maximum konnte von ursprünglich etwa 12 nm auf 66 nm erweitert werden. Dies steht in keinem Widerspruch zum in Abschnitt 2 angenommenen Verbreiterungsfaktor von 6,3, da dieser über die quadratischen Mittel der Spektren definiert ist. Die spektrale Form und Bandbreite des Ausgangsspektrums stimmen weitgehend mit der numerischen Vorhersage überein. Es sei erwähnt, dass die Asymmetrie zwischen langen und kurzen Wellenlängen auf die fehlende Korrektur der Quanteneffizienz des Siliziumdetektors im Spektrometer zurückzuführen ist.

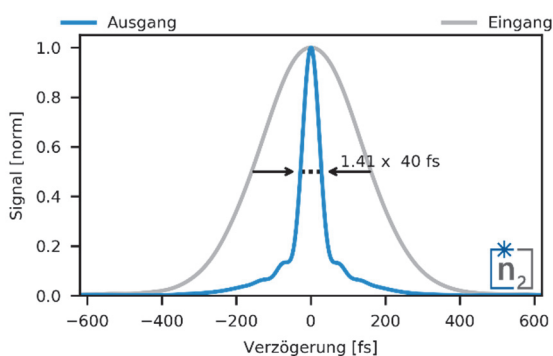


Abb. 3: Autokorrelationsmessung vor und nach der Kompression in der MIKS. Die volle Halbwertsbreite der

Impulsdauer erreicht 40 fs unter der Annahme eines Faltungsfaktors von 1.41.

Die abschließende Kompression des verbreiterten Spektrums wurde mit 6 Reflexionen auf dispersiven Spiegeln vorgenommen, welche -400 fs^2 spektrale Phase pro Umlenkung auf den Impuls aufprägen. Die resultierenden Autokorrelationen in Abb. 3 zeigen, dass die entstandene nichtlineare Phase kompensierbar ist und der Ausgangsimpuls auf etwa 40 fs Impulsdauer bei voller Halbwertsbreite verkürzt werden konnte.

Bei einem Leistungsdurchsatz des Systems von über 92 % konnte demnach die Spitzenleistung des Ausgangsimpulses auf 2,2 GW angehoben werden. Selbst unter der Annahme, dass 15 % der Impulsenergie in Nebenimpulsen verortet ist und nicht zur Spitzenleistung beiträgt, erreicht diese noch 1,8 GW. Sie wurde also etwa verfünffacht.

Der Strahlquerschnitt nach spektraler Verbreiterung und Kompression ist in Abb. 4 dargestellt. Es konnten keine Beugungsringe oder Substrukturen im Strahl festgestellt werden, was auf eine gute Strahlqualität schließen lässt.

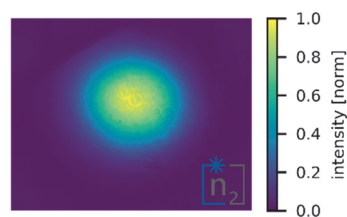


Abb. 4: Strahlprofil nach spektraler Verbreiterung & Kompression

Im Fokus dieser Arbeit steht die industrielle Anwendbarkeit des Verfahrens, weshalb der Stabilität eine außerordentlich hohe Bedeutung zukommt. Die Stabilität der Durchschnittsleistung, der Strahlage und des Ausgangsspektrums sind in Abb. 5 mit 7 entsprechend dargestellt.

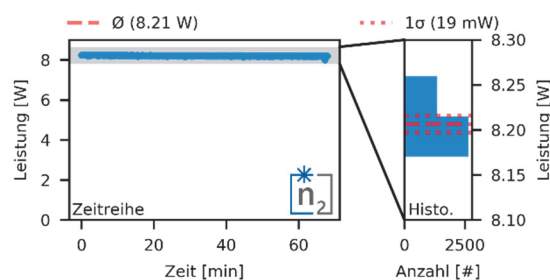


Abb. 5: Stabilität der Durchschnittsleistung gemessen über 68 min. Links: Zeitlicher Verlauf der Leistung. Rechts: Histogramm der Messwerte.

Die Messungen wurden mit voller Impulsenergie von $100 \mu\text{J}$ und einer Wiederholrate von 100 kHz durchgeführt, was der maximalen Durchschnittsleistung des Treiberlasers bei dieser Energie entspricht. Es wurde nicht die volle Ausgangsleistung für die Leistungsmessung verwendet, da noch andere Parameter

zeitgleich aufgezeichnet wurden. Die durchschnittlich erzielte Leistung während der Messdauer betrug 8,2 W, wobei eine Standardabweichung von 0,02 W erreicht wurde.

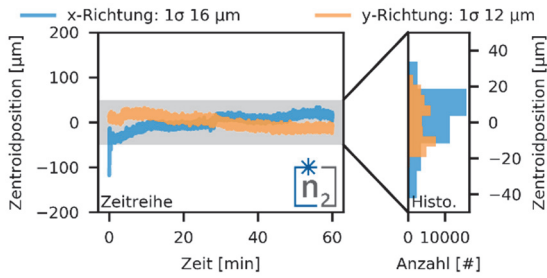


Abb. 6: Strahlagenstabilität gemessen über 60 min. Links: Zeitlicher Verlauf der Messung. Rechts: Histogramm der Messwerte.

Die Strahlage wurde über die Zentroidposition des Strahlquerschnitts ca. 50 cm hinter der Ausgangsapertur des Systems vermessen (Abb. 6). Über die volle Messdauer von 60 min trat eine Standardabweichung von 16 µm in x-Richtung und 12 µm in y-Richtung auf. Sowohl die Stabilität der Durchschnittsleistung als auch die Strahlagenstabilität sind vergleichbar mit der des Treiberlasers. Demzufolge wird die Stabilität des Treiberlasers durch das nachgelagerte Impulskompressionssystem nicht beeinträchtigt.

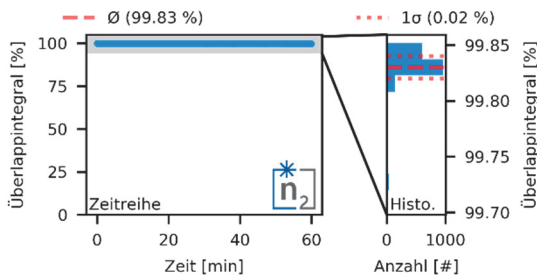


Abb. 7: Spektrale Stabilität des Ausgangsimpulses gemessen über das paarweise Überlappintegral des initialen Spektrums mit allen folgenden. Links: Zeitlicher Verlauf der Messung. Rechts: Histogramm der Messwerte.

Da die Bandbreite durch SPM, einen optisch nichtlinearen Prozess, erzeugt wird, können Schwankungen der Eingangsparameter die Bandbreite beeinflussen. Zur Evaluation der spektralen Stabilität wurde deshalb sekundlich ein Ausgangsspektrum aufgezeichnet. Abb. 7 zeigt das paarweise Überlappintegral¹ V_n des initialen Spektrums S_{init} mit allen folgenden S_n . Bei einem durchschnittlichen Überlapp von 99,8 % beträgt die Standardabweichung lediglich 0,02 %. Es treten demnach nur vernachlässigbare Schwankungen im Ausgangsspektrum auf. Die Tatsache, dass die abschließende Kompression über dispersive Spiegel praktisch keinen Schwankungen unterliegt lässt darauf

schließen, dass ähnlich kleine Schwankungen auch für die zeitliche Form des Ausgangsimpulses anzunehmen sind. Dies wurde jedoch nicht mit einer direkten Messung verifiziert.

5. Fazit und weitere Systeme

Das Impulskompressionssystem erfüllt die gestellten Anforderungen an Verbreiterung und Kompression vollumfänglich. Dabei erreicht der Leistungsdurchsatz mit 92 % bei voller Eingangsenergie einen exzellenten Wert. Die Stabilität der Durchschnittsleistung, der Strahlage nach der Ausgangsapertur sowie des Ausgangsspektrums des Impulskompressionssystems ist maximal und bildet daher die Stabilität des Treiberlasers nahezu exakt nach. Die industriell erforderliche Prozessstabilität und Zuverlässigkeit der Impulskompression ist somit sichergestellt.

Diese Verifikation ebnet den Weg für weitere Entwicklungsstufen dieses Prototyps hin zu verschiedenen Impulsenergieklassen. Das vorgestellte Gerät entspricht der mittleren Energieklasse und soll mit leichten Modifikationen Energien bis zu 300 µJ verarbeiten können. Die untere Energieklasse wird zwischen 10 µJ und 100 µJ betrieben werden können und die Hochenergieklasse zwischen 300 µJ und 1 mJ. Hierbei wird es sich um skalierte Versionen des hier vorgestellten Geräts handeln. Schließlich ist ein zweistufig-kaskadiertes System ähnlich zu [2] in Planung, welches in der mittleren Leistungsklasse die Impulsdauer in einer zweiten Multipasszelle auf unter 15 fs komprimieren soll.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts durch den EXIST-Forschungstransfer.

Literaturverzeichnis

- [1] Schulte, Jan; Sartorius, Thomas; Weitenberg, Johannes; Vernaleken, Andreas; Russbuedt, Peter (2016): Nonlinear pulse compression in a multipass cell. In Optics letters 41 (19), pp. 4511–4514. DOI: 10.1364/OL.41.004511.
- [2] Fritsch, Kilian; Poetzlberger, Markus; Pervak, Vladimir; Brons, Jonathan; Pronin, Oleg (2018): All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs. In Optics letters 43 (19), pp. 4643–4646. DOI: 10.1364/OL.43.004643.
- [3] Russbuedt, P.; Weitenberg, J.; Schulte, J.; Meyer, R.; Meinhardt, C.; Hoffmann, H. D.; Poprawe, R. (2019): Scalable 30 fs laser source with 530 W average power. In Opt. Lett. 44 (21), p. 5222. DOI: 10.1364/OL.44.005222.
- [4] Pinault, Steven C.; Potasek, M. J. (1985): Frequency broadening by self-phase modulation in optical

¹ $V_n = \frac{\{\int \sqrt{S_{init} \cdot S_n} d\lambda\}^2}{\int S_{init} d\lambda \int S_n d\lambda}$ [6]

fibers. In *J. Opt. Soc. Am. B* 2 (8), p. 1318. DOI: 10.1364/JOSAB.2.001318.

[5] Daher, Nour; Guichard, Florent; Jolly, Spencer W.; Délen, Xavier; Quéré, Fabien; Hanna, Marc; Georges, Patrick (2020): Multipass cells: 1D numerical model and investigation of spatio-spectral couplings at high nonlinearity. In *J. Opt. Soc. Am. B* 37 (4), p. 993. DOI: 10.1364/JOSAB.386049.

[6] Weitenberg, Johannes; Vernaleken, Andreas; Schulte, Jan; Ozawa, Akira; Sartorius, Thomas; Pervak, Vladimir et al. (2017): Multi-pass-cell-based nonlinear pulse compression to 115 fs at 7.5 μ J pulse energy and 300 W average power. In *Optics express* 25 (17), pp. 20502–20510. DOI: 10.1364/OE.25.020502.