

Spektrale Verbreiterung in Multipasszellen bis 2 mJ Impulsenergie

Kilian Fritsch¹, Kevin Schwarz², Martin Kellert³, Christian Franke¹, Mikhail Pergament³,
Franz Kärtner^{3,4} und Oleg Pronin^{1,2}

¹⁾ n2-Photonics GmbH, Hamburg, Deutschland

²⁾ Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, Deutschland

³⁾ Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg, Deutschland

⁴⁾ Physics Department & The Hamburg Centre for Ultrafast Imaging, University of Hamburg, Hamburg, Deutschland

Wir präsentieren erste Ergebnisse mit einem Prototyp der nächsten Ausbaustufe unseres kommerziellen Spektralverbreiterungs- und -komprimierungssystems basierend auf der Multipasszellentechnologie. Er ist für 2,0 mJ Eingangsenergie bei 0,9 ps Impulsdauer ausgelegt und soll komprimierte Ausgangsimpulse von unter 100 fs liefern. Bei der vollen Eingangsenergie wurde eine spektrale Verbreiterung auf 30 nm Bandbreite bei -10 dB mit einem Fourier-Transformlimit von 0.11 ps erzielt wurde. Die Transmission der Durchschnittsleistung betrug dabei 90,5 %.

We present first results with a prototype of the next development stage of our commercial spectral broadening and compression system based on the multi-pass cell technology. It is designed for 2.0 mJ input energy at 0.9 ps pulse duration and is expected to deliver compressed output pulses of below 100 fs. At the full input energy of 2.0 mJ a spectral broadening to 30 nm bandwidth at -10 dB with a Fourier transform limit of 0.11 ps as achieved. The transmission of the average power was 90.5 %.

1. Einleitung

Bekanntermaßen erreichen vielfach verwendete Verstärkermaterialien für Ultrakurzpuls-Hochleistungsleiter, z. B. Yb:YAG oder Yb:YVO, ihr unteres Impulsdauerlimit in der Praxis bei etwa 250 fs, bedingt durch ihre Emissionsbandbreite. Kürzere Laserimpulse werden üblicherweise durch spektrale Verbreiterung mittels Selbstphasenmodulation (SPM) und anschließender Phasenkomensation in den Lasern nachgelagerten Impulskompressoren erzeugt. Seit einigen Jahren etabliert sich hier, neben der bekannten Fasertechnologie zunehmend die Selbstphasenmodulation in Freistrahlsgeometrie innerhalb einer Multipasszelle (MPC) [1]. Es kommen sowohl Gase als auch Festkörper in der MPC als optisch nichtlineares Medium zum Einsatz. Abbildung 1 zeigt einen typischen Strahlengang, wobei die MPC in der meist verwendeten Herriott-Geometrie [2] aufgebaut ist. Diese wurde auch in dem hier präsentierten Experiment verwendet.

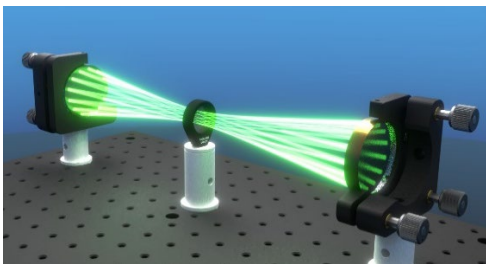


Abbildung 1: Simulierter Strahlengang durch eine MPC in Herriott-Geometrie mit Festkörpermedium in der Symmetrieebene.

Durch die ausgezeichnete Stabilität der MPC und ihren wartungsarmen Betrieb eignet sie sich besonders für zuverlässige und prozessstabile Industrieanwendungen. Im Forschungsumfeld wurden mit der MPC-Technologie bereits Impulsdauern von unter 20 fs [3] erzeugt und Durchschnittsleistungen von über 0,5 kW prozessiert [4]. Die momentan größte verwendete Impulsenergie liegt bei 150 mJ [5]. Die Firma „n2-Photonics GmbH“ ist eine Ausgründung aus dem Lehrstuhl für Lasertechnologie und Spektroskopie von Prof. Dr. Pronin der Helmut-Schmidt-Universität und beschäftigt sich mit der Kommerzialisierung von Impulskompressionseinheiten basierend auf der MPC-Geometrie. Bei der 12. Mittweidaer Lasertagung stellten wir die Kompression von 100 µJ Impulsenergie von 250 fs zu 40 fs bei 10 W Durchschnittsleistung vor [6]. Dieses Jahr präsentieren wir erste Ergebnisse des Prototyps der nächsten Ausbaustufe, welche 2 mJ Impulsenergie verarbeiten soll.

2. Auslegung des Systems

Die Auslegung erfolgt für einen Gaußschen Eingangsimpuls mit Energie von $E = 2$ mJ und Impulsdauer $\tau = 0,9$ ps. Es ergibt sich eine Impulsspitzenleistung von $P_{\text{peak}} = 2,1$ GW. Diese liegt damit mehrere Größenordnungen über den kritischen Leistungen von Festkörpermaterialien im Megawatt-Bereich, weshalb bei der weiteren Auslegung nur Gase als nichtlineare Medien berücksichtigt werden.

Der wichtigste Parametersatz für die Auslegung eines MPC-Systems sind die Krümmungsradien der MPC-Spiegel R sowie deren Separation L . Nach [7] lässt sich die minimal benötigte MPC-Länge L_{min} bei gegebenen R ,

Zerstörschwelle der Optiken J_d , Ionisationsschwelle des Prozessgases I_{ion} und Zentralwellenlänge λ wie folgt berechnen:

$$L_{\min} = \frac{2RE^2}{E^2 + \lambda^2 R^2 J_d^2}$$

$$L_{\min} = R - \sqrt{R^2 - \frac{16E^2}{\lambda^2 \tau^2 J_{\text{ion}}^2}}$$

Es ist der jeweils größere Wert als minimale MPC-Länge ausschlaggebend. Für den präsentierten Prototyp wurde die Paarung aus $R = 0,6 \text{ m}$ und $L = 1,16 \text{ m}$ gewählt, basierend auf der Ionisationsschwelle $I_{\text{ion}} = 10^{13} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ sowie der Herstellerangabe der Zerstörschwelle der Optiken inklusive eines Sicherheitsfaktors.

Anschließend gilt es die gesamte erforderliche optische Nichtlinearität abzuschätzen. Diese wird üblicherweise durch das aufgesammelte B-Integral B_{ges} quantifiziert. Es gilt nach [8]:

$$\frac{\Delta\omega}{(\Delta\omega)_0} \approx [1 + 0,19 \cdot B_{\text{ges}}^2]^{\frac{1}{2}} \propto \frac{900 \text{ fs}}{90 \text{ fs}} \approx 10,0$$

Die Bandbreiten der Winkelfrequenzen in obiger Formel sind über das quadratische Mittel definiert. Es wird vereinfachend angenommen, dass diese direkt proportional zur Impulsdauer sind. Es folgt, dass $B_{\text{ges}} \approx 22,8 \text{ rad}$ angestrebt werden muss.

In der gewählten MPC-Konfiguration können 17 volle Umläufe auf den Zellen spiegeln untergebracht werden, d. h. der Laserimpuls passiert 34-mal das nichtlineare Medium. Das angestrebte B-Integral pro Umlauf durch die MPC beträgt also etwa $0,67 \text{ rad}$. Der Gasdruckkörper, in dem sich die MPC befindet, ist so dimensioniert, dass er mit genügend Druck beaufschlagt werden kann um dieses B-Integral zu erreichen.

3. Numerische Simulation

Zur Bestätigung der analytischen Auslegung wurde auf deren Grundlage eine eindimensionale numerische Simulation durchgeführt, die in diesem Abschnitt beschrieben wird. Die Eingangsenergie von $2,0 \text{ mJ}$ sowie Impulsdauer von $0,9 \text{ ps}$ sind Grundlage für die Simulationsrechnung. Die nichtlineare Propagation in einer MPC ist ein komplexes dreidimensionales physikalisches Problem. Um dieses mit unserem eindimensionalen Simulationsprogramm berechnen zu können, wurden die Annäherungen aus [9, Abbildung 1b)] verwendet. Des Weiteren wurde die Dispersionsfreiheit der Optiken und eine Reflektivität von $99,9 \%$ der MPC-Spiegel angenommen. Für die Berechnung der Intensität galt die Annahme einer idealen Gaußschen Strahlform ($M^2 = 1,0$). In der Simulation wurde Argon mit $1,5 \text{ bar}$ absolutem Druck angenommen, wobei die Dispersion und der nichtlineare Brechungsindex des Gases linear zu ihrem Referenzwert bei Atmosphärendruck skaliert wurden.

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der Simulation als Vergleich zwischen dem angenommenen

Eingangsspektrum und dem berechneten Ausgangsspektrum. Es erstreckt sich über 30 nm Bandbreite bei -10 dB und besitzt somit ein Fourier-Transformlimit (FTL) von etwa 90 fs . Der Gasdruck wurde in der Simulation nicht weiter erhöht, obwohl eine stärkere Verbreiterung möglich scheint. Allerdings erreicht das Spektrum bei einer Bandbreite von 30 nm die Bandbreite der gechirpten Spiegel, die für das spätere Experiment zur Verfügung stehen. Bei einem breiteren Ausgangsspektrum könnte die Dispersionskompensation zur Impulskompression also nicht durchgeführt werden.

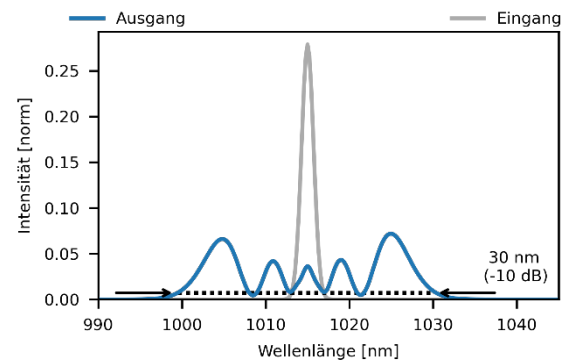


Abbildung 2: Vergleich des Eingangs- und Ausgangsspektrums in die numerische Simulation.

Die leichte Asymmetrie im Spektrum lässt sich durch das Eintreten von „self-steepening“ erklären. Hierdurch entsteht eine Asymmetrie in der Steilheit der Impulsflanken, welche die Frequenzverschiebung durch die Selbstphasenmodulation bestimmt. Dadurch kommt es im Spektrum zu einer einseitig stärkeren Verbreiterung. Die Impulslängung während der Propagation durch die chromatische Dispersion des Gases betrug lediglich $7,5 \%$, da die Ausgangsimpulse aus der MPC ohne nachgeschaltete Phasenkorrektur durch gechirpte Spiegel bei $0,97 \text{ ps}$ lag. Eine Dispersionskompensation während der Propagation scheint bei diesen niedrigen Gasdrücken nur wenig effizienzsteigernd.

4. Experimentelle Resultate

Das gezeigte Experiment wurde am DESY mit dem in [10] veröffentlichten Lasersystem durchgeführt. Zur Zeit der Durchführung wurde die Ausgangsenergie auf $2,0 \text{ mJ}$ bei 10 kHz Wiederholrate beschränkt. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, bestehend aus dem Treiberlaser selbst, der MPC nach der in 2. beschriebenen Auslegung und einer zwischen geschalteten Modenanpassung. Diese ist notwendig, da eine MPC, ähnlich einem optischen Resonator, eine Eigenmode besitzt. Sie ist durch ihre Selbstreproduktion bei jedem Umlauf durch die MPC charakterisiert. Bei Lasersystemen im Millijoule-Bereich ist es äußerst wichtig, dass der Eingangsstrahl der Eigenmode der MPC möglichst identisch ist. Andernfalls entstehen durch die Modenfehlanspassung unterschiedlich große Strahldurchmesser auf den MPC-Spiegeln. Dies verursacht dabei auch zwangsläufig kleinere Strahldurchmesser auf den Spiegeln als sie die Eigenmode aufweisen würde. Kleine

Strahldurchmesser können schnell die Fluenz auf der dielektrischen Spiegelbeschichtung über ihre Zerstörschwelle heben, weshalb zuerst die Modenanpassung des Treiberlasers an die MPC optimiert wurde.

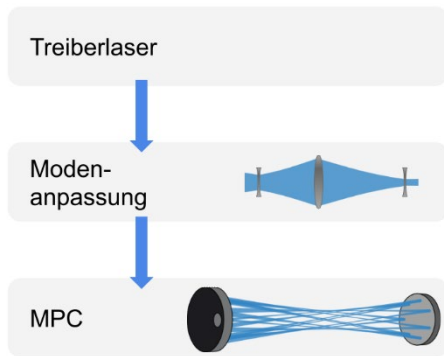


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Modenanpassung wurde mit Hilfe eines optischen Systems bestehend aus drei Linen mit den Brennweiten 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m umgesetzt. Die Erzeugung des ersten Fokus in der MPC übernahm ein gekrümmter Spiegel mit 2,5 m Brennweite. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Optimierung der Linenabstände als Projektion der Leckage eines MPC-Spiegels auf einen CMOS-Sensor.

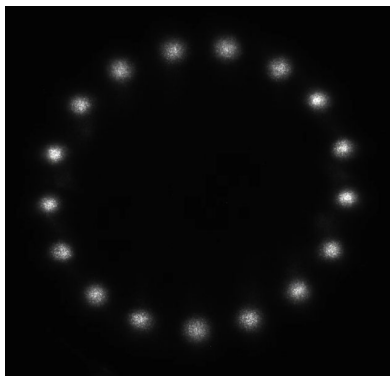


Abbildung 4: Projektion der Leckage durch einen MPC-Spiegel auf einen CMOS-Sensor

Es sind alle 17 vollen Umläufe in der MPC zu sehen. Alle Projektionen besitzen ähnliche Größe, was darauf schließen lässt, dass die Eingangsmode in die MPC der Eigenmode der MPC entspricht.

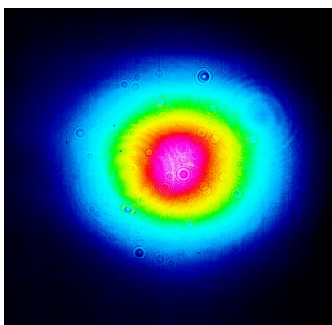


Abbildung 5: Strahlprofil aus der MPC bei 1,5 bar Argon-Druck und 2,0 mJ Eingangsenergie

Anschließend wurde das Ausgangsstrahlprofil bei 2,0 mJ Impulsenergie untersucht, siehe Abbildung 5.

Es zeigt keine Anzeichen für ein Beschneiden des Strahls im optischen System oder Indikatoren für ein erhöhtes B-Integral in der MPC, wie zum Beispiel konzentrische Beugungsmuster um die Strahlmitte. Zusammen mit der Transmission der Durchschnittsleistung von 90,5 % lässt dies auf eine erfolgreiche Justage des Systems schließen.

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich des im vorherigen Abschnitt simulierten Ausgangsspektrums und dem tatsächlich gemessenen.

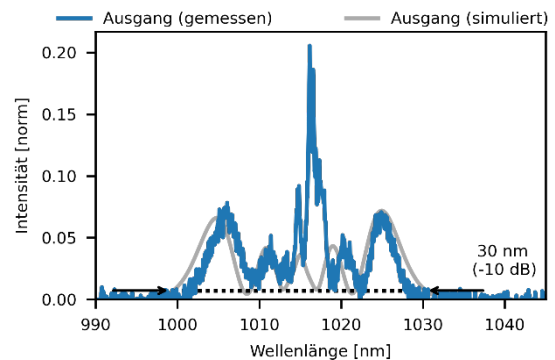


Abbildung 6: Vergleich gemessenes Ausgangsspektrum aus der MPC bei 1,5 bar Argon-Druck und 2,0 mJ Eingangsenergie mit der numerischen Simulation

Es lässt sich feststellen, dass die Bandbreite des Simulationsergebnisses mit der des gemessenen Spektrums übereinstimmt. Auch die Modulation des Spektrums lässt sich übertragen, da beide Spektren vier lokale Minima aufweisen. Jedoch stimmt die Modulationstiefe in den Spektren nicht überein. Sie fällt im Experiment wesentlich geringer als in der Simulationsrechnung aus. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Annahme der Dispersionsfreiheit der MPC-Spiegel. Sollten diese wider Erwarten leicht positive Dispersion einführen, würde dies zu einer Abschwächung der Modulation im Spektrum führen. Des Weiteren ist das gemessene Spektrum leicht asymmetrisch, wobei das lokale Maximum bei 1005 nm höher ausfällt als das bei 1028 nm. In der Simulationsrechnung ist dieses Verhältnis umgekehrt.

Zur weiteren Evaluierung wurde das FTL des gemessenen Ausgangsspektrums berechnet und in Abbildung 7 dargestellt. Mit etwa 113 fs voller Halbwertsbreite ist es noch vergleichbar mit dem Simulationsergebnis von 90 fs. Möglicherweise wurden in der Simulation die Verluste zu gering eingeschätzt. Es weist außerdem die SPM-typischen zeitlichen Seitenstrukturen auf.

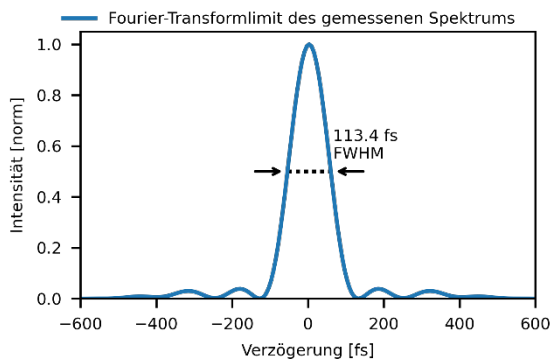


Abbildung 7: Fourier-Transformlimit des gemessenen Spektrums aus Abbildung 6.

5. Fazit und Ausblick

Das präsentierte Impulskompressionsystem erreicht die erwartete spektrale Verbreiterung basierend auf der numerischen Simulation. Die Bandbreite und spektrale Form stimmen annähernd überein. Die volle Halbwertsbreite der FTLs variieren mit 113 fs für das Experiment und 90 fs für die Simulation mehr als 10 %, was vermut-

lich durch zu gering geschätzte Verluste in der Simulation erklärt werden kann. Es konnte mit 90,5 % eine hohe Transmission der Durchschnittsleistung mit gutem Strahlprofil erreicht werden. Durch die Optimierung der Modenanpassung wurde sichergestellt, dass die MPC-Spiegel auch bei 2,0 mJ Impulsenergie nicht zerstört werden.

Im nächsten Schritt gilt es, die Impulskompression mittels geschirpter Spiegel nachzuweisen sowie die Strahlqualität und räumlich-spektrale Homogenität zu untersuchen. Abschließend soll das System mit erhöhter Eingangsimpulsenergie untersucht werden um seine Grenzen zu bestimmen.

Diese Experimente dienen als Erfahrungsgrundlage für die Auslegung einer weiteren Entwicklungsstufe der kommerziellen MPC-Impulskompressoren hin zu 10 mJ Eingangsenergie.

Kontaktinformationen

Ansprechpartner: Kilian Fritsch

Korrespondenz: info@n2-photonics.de

Literaturverzeichnis

- [1] Schulte, J.; Sartorius, T.; Weitenberg, J.; Vernaleken, A.; Russbuedt, P. (2016): Nonlinear pulse compression in a multi-pass cell. In *Optics letters* 41 (19), pp. 4511–4514. DOI: 10.1364/OL.41.004511.
- [2] Herriott, D.; Kogelnik, H.; Kompfner, R. (1964): Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers. In *Appl. Opt.* 3 (4), p. 523. DOI: 10.1364/AO.3.000523.
- [3] Fritsch, K.; Poetzlberger, M.; Pervak, V.; Brons, J.; Pronin, O. (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.
- [4] 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.
- [5] Pfaff, Y.; Barbiero, G.; Rampp, M.; Wang, H.; Klingebiel, S.; Teisset, C. Y. et al.: Multipass Cell Based Spectral Broadening of High Energy and High Average Power Thin-Disk Amplifiers. In: *Ultrafast Optics 2023 - UFOXIII*. Ultrafast Optics. Bariloche, Río Negro. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, M4.3.
- [6] Fritsch, K.; Franke, C.; & Pronin, O. (2021). Effiziente Impulskompression im industriellen Kontext mittels Multipasszellen. In *12. Mittweidaer Lasertagung* (No. 003, pp. 036-039). Hochschule Mittweida.
- [7] Hanna, M.; Délen, X.; Lavenu, L.; Guichard, F.; Zaouter, Y.; Druon, F.; Georges, P. (2017): Nonlinear temporal compression in multipass cells: theory. In *J. Opt. Soc. Am. B* 34 (7), p. 1340. DOI: 10.1364/JOSAB.34.001340.
- [8] Pinault, S. C.; Potasek, M. J. (1985): Frequency broadening by self-phase modulation in optical fibers. In *J. Opt. Soc. Am. B* 2 (8), p. 1318. DOI: 10.1364/JOSAB.2.001318.
- [9] Daher, N.; Guichard, F.; Jolly, S. W.; Délen, X.; Quéré, F.; Hanna, M.; Georges, P. (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.
- [10] Pergament, M.; Kellert, M.; Demirbas, U.; Thesinga, J.; Reuter, S.; Liu, Y. et al. (2023): 100-mJ, 100-W cryogenically cooled Yb:YLF laser. In *Opt. Lett.* 48 (11), pp. 2833–2836. DOI: 10.1364/OL.489397.