

Hochkontrast-Ultrakurzpulsmessungen für fortgeschrittene Industrieanwendungen und Laserentwicklung

Matthias Baudisch, Mateusz Ibek, Edlef Büttner, Peter Staudt

APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH, Plauener Strasse 163-165 | Haus N, 13053 Berlin.

Femtosecond-ultrashort lasers are of fast growing importance for a multitude of material processing applications. Hereby, more and more studies focus on the influence of the pulse duration and pulse shape on the material processing mechanisms. Commonly the behaviour of the pulse is defined by the temporal width. Considering a Sech^2 or Gaussian-like pulse shape, the peak power and peak intensity of the laser pulse can be calculated. Nevertheless, this assumption ignores the fact that real laser pulses can feature long picosecond pulse trails below the main femtosecond peak, which are typically hard to measure with standard, commercially available devices like collinear SHG-autocorrelators.

Here we present various pulse measurements with the novel high-contrast autocorrelator from APE GmbH, demonstrating its capabilities and advantages in identifying the real pulse energy which is contained in the femtosecond main peak.

Femtosekunden-Ultrakurzpulslaser haben eine immer größere Bedeutung für eine Vielzahl von Materialbearbeitungsprozessen. Dabei adressieren auch immer mehr Untersuchungen die Abhängigkeit der Prozessqualität von der Laserpulsdauer [1-3], welche im Allgemeinen durch die Halbwertbreite des Pulses beschrieben wird. Über die Annahme einer Gauss- oder Sech^2 -förmigen Pulsform lässt sich dann die Spitzenleistung und Spitzenintensität eines Laserpulses bestimmen. Bei dieser Betrachtung wird jedoch meist vernachlässigt, dass Femtosekunden-Laserquellen auch Pulsenergien im Untergrund des Hauptpeaks im Picosekunden-Bereich haben können, welche mit herkömmlichen Pulsmessmethoden, wie z.B. kommerziellen, kollinearen SHG-Autokorrelatoren nur schwer zu identifizieren sind.

Hier zeigen wir unterschiedlichste Messungen mit dem neuen Hochkontrast-Autokorrelator der APE GmbH und demonstrieren deren Nutzen zum Identifizieren der tatsächlichen Pulsenergie im Femtosekunden-Hauptpeak.

Herkömmliche, kommerzielle Pulsmessmethoden wie kollineare SHG-Autokorrelation können meist nur schwer ermitteln, ob und wieviel Pulsenergie außerhalb des Femtosekunden-Hauptpulses in langgestreckten, pikosekunden-Strukturen vorhanden ist. Dieses Wissen gibt aber Aufschluss darüber, wie hoch die tatsächliche

Spitzenleistung und Spitzenintensität der Lichtquelle wirklich ist und wieviel Pulsenergie nur bedingt zum Bearbeitungsprozess beiträgt. Der Typ2-Hochkontrast-Autokorrelator der APE GmbH ermöglicht es SHG-Autokorrelationen mit einem Dynamikbereich von bis zu 10^7 über einen Scanbereich von 1000 ps aufzunehmen

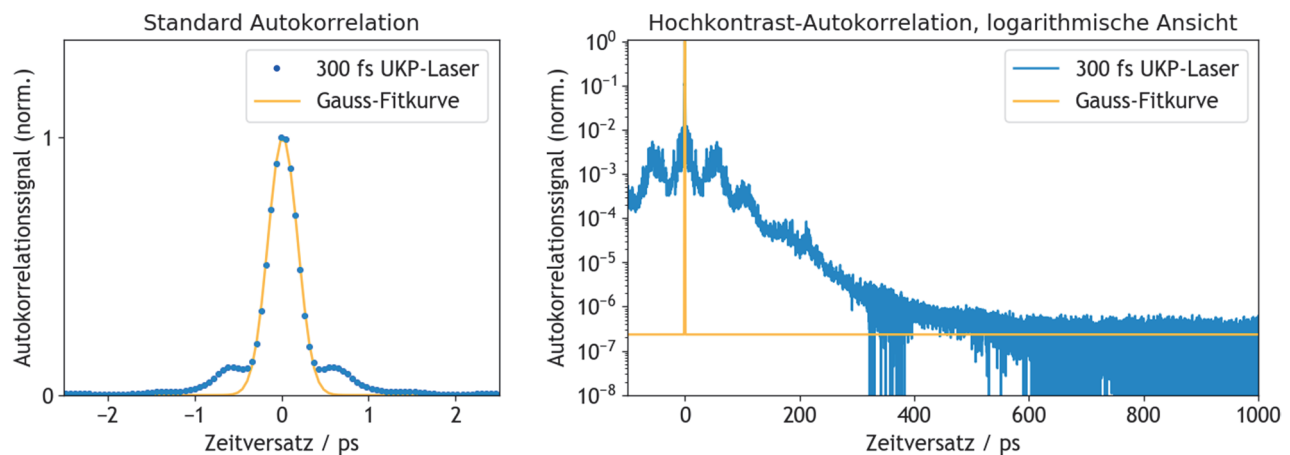


Bild 1: Messung eines Femtosekunden-Ultrakurzpulslasers mit einem Standard-Autokorrelator und einem Hochkontrast-Autokorrelator (unterschiedliche x-Achsenkalibrierung beachten). Neben dem Femtosekunden-Hauptpeak ist eine zeitlich deutlich längere Untergrundstruktur mit mehreren hundert Pikosekunden Länge zu erkennen, welche mit Standard-SHG-Autokorrelatoren nicht sichtbar ist. Bei dem Beispiel befinden sich nur ca. 52 % des Flächenintegrals im gelben Fit des Femtosekunden-Hauptpeaks.

Im Unterschied zu herkömmlichen Typ1-SHG-Autokorrelatoren basiert der Hochkontrast-Autokorrelator auf der nichtlinearen Typ2-Interaktion, welche eine fast untergrundfreie Autokorrelationsmessung selbst in kollinear Strahlgeometrie ermöglicht (siehe [4] für weitere Details). In Bild 1 ist ein Beispiel einer Standard-Autokorrelation im Vergleich mit einer Hochkontrast-Autokorrelation eines Femtosekunden-Lasers mit einer FWHM-Pulslänge von 300 fs zu sehen (blau). In Gelb ist die Gauss-Fit-Kurve dargestellt. In der Hochkontrast-Autokorrelation ist ein mehrere 100 Picosekunden langer Untergrundpuls zu sehen. Diese Messung erreicht einen Dynamikbereich von $>10^6$. Im Vergleich dazu sind mit Standard-Autokorrelatoren typischerweise nur Signal-zu-Rauschverhältnisse von 10^2 bis 10^3 möglich, wodurch der Pikosekunden-Untergrund nicht sichtbar wäre.

Es ist wichtig zu realisieren, dass viele Laserpulse von kommerziellen Laserquellen solche Pikosekunden-Untergründe besitzen, welche oft durch das Laserdesign intrinsisch vorhanden sind. Solange diese Pulseuntergründe jedoch keinen signifikanten Teil der Gesamtpulsenergie ausmachen, gibt es auch keine Nachteile für Materialbearbeitungsprozesse.

Eine mögliche Anwendung von Hochkontrast-Autokorrelatoren ist die Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Ultrakurzpulslasern. Ein Beispiel eines Anwendungsfalles ist in Bild 2 dargestellt. Bei diesem realen Beispiel wurde auf Grund eines Optikfehlers bei der La-

serfertigung ein defekter Laser hergestellt. Der produzierte Laser funktionierte zwar mit den spezifizierten Parametern (Durchschnittsleistung, Leistungsstabilität, Strahl-Richtungsstabilität). Auch die Pulsdauer gemessen mit einem Standard-Autokorrelator war innerhalb der Spezifikationen (siehe Bild 2a). Der Fehler fiel erst während der Anwendung auf, da dieser Laser zum Treiben einer nichtlinearen Frequenzkonversion vorgesehen war und auf Grund des Defektes signifikant geringere Effizienzen bei der Frequenzverdopplung erzielt wurden. Eine Hochkontrast-Autokorrelationsmessung hätte den Produktionsfehler schon bei der Fertigung identifizieren können und damit die zeitaufwendige, nachträgliche Reparatur verhindert. Bild 2a und 2c zeigen die jeweiligen Autokorrelationen des defekten Lasers und Bild 2b und 2d die Autokorrelationen des Laser nach der Reparatur. In der Standard-Autokorrelation ist kein signifikanter Unterschied feststellbar (Bild 2a vs. Bild 2b). Allerdings zeigt die Hochkontrast-Autokorrelation starke Unterschiede (Bild 2c vs. Bild 2d, zur besseren Visualisierung mit logarithmischer Intensitätsskala). Beim defekten Laser ist der Pikosekunden-Untergrund ca. eine Größenordnung stärker und besitzt damit mehr Pulsenergie des Gesamtpulses, als bei dem reparierten Laser. Zum quantitativen Vergleich wurde für beide Messungen ein Fidelity-Wert (Berechnung: Fläche des Gauss-Fits bzw. des Hauptpeaks vs. Gesamtfläche der Autokorrelation) ermittelt. In dem Beispiel besitzt der defekte Laser einen nur halb so großen Fidelity-Wert, wie der reparierte.

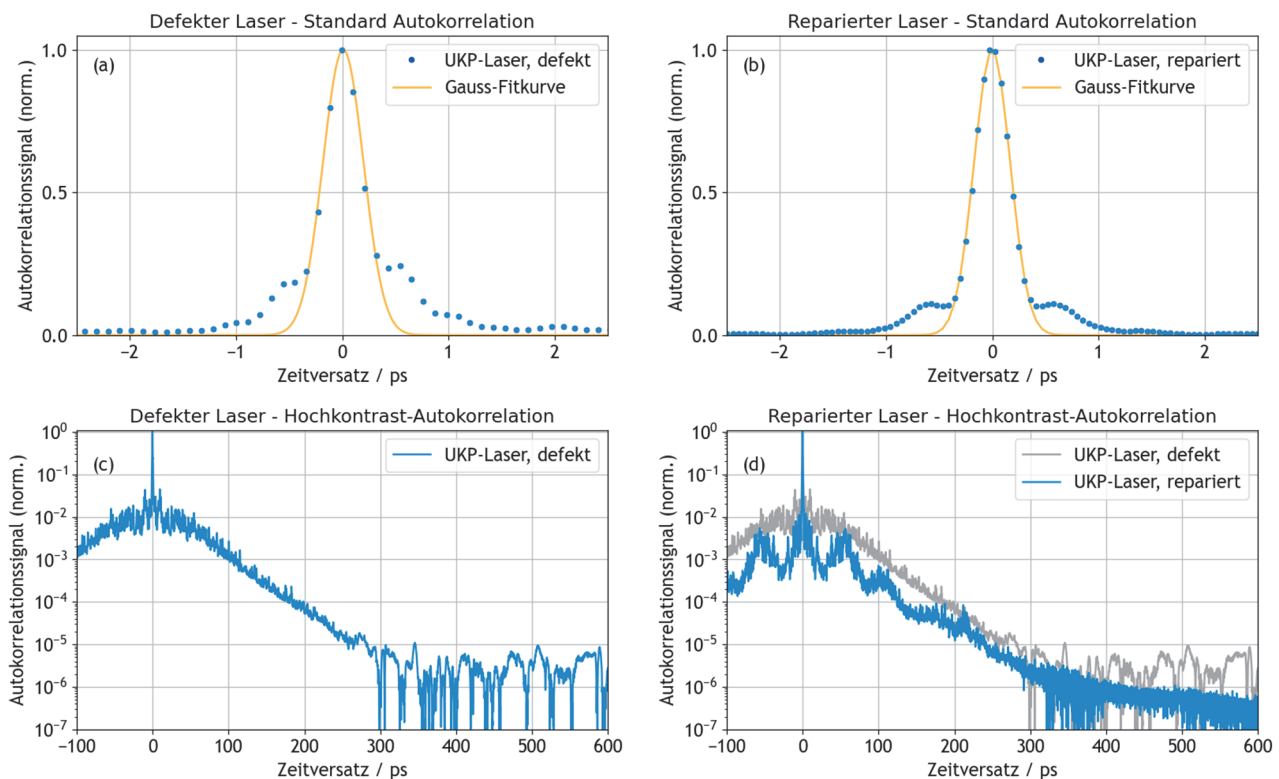


Bild 2: Vergleich von einer Standard-Autokorrelation und Hochkontrast-Autokorrelation eines defekten Lasers vor (a,c) und nach (b,d) der Reparatur. In der Hochkontrast-Autokorrelation ist beim defekten Laser ein deutlich höherer Pikosekunden-Pulsuntergrund sichtbar, welcher zu einer geringeren Pulsenergie im Femtosekunden-Hauptpeak führt.

Zusammenfassung

Mit dem Hochkontrast-Autokorrelator von APE GmbH, gibt es jetzt ein einfach zu benutzendes Laserpuls-Messgerät, welches für die Charakterisierung von Laserstrahlquellen benutzt werden kann. Es ist ein perfektes Werkzeug für die Optimierung des Pulscontrastes von bestehenden Laserquellen (zum Beispiel durch Kompressor-einstellungen) oder für die Verbesserung während der Entwicklung von neuen Ultrakurzpuls-Laserquellen. Die hierdurch eröffneten Möglichkeiten der Vermessung und Verbesserung des Pulscontrastes von Ultrakurzpuls-Laserquellen ist fundamental für die zukünftige Optimierung von spitzenleistungsgetriebenen Materialbearbeitungsprozessen.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Le Harzic et al., "Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100fs to 5ps," Applied Surface Science 249, Issues 1-4, (2005).
- [2] C. Chien und M. Gupta, "Pulse width effect in ultrafast laser processing of materials," Appl. Phys. A 81, 1257 (2005).
- [3] T. C. Gunaratne et al., "Influence of the temporal shape of femtosecond pulses on silicon micromachining" , Journal of Applied Physics 106, 123101 (2009).
- [4] M. Ibek und T. Neicke, "Advanced Ultrashort-Pulse Laser Diagnostics," PhotonicsViews, 16: 56-58 (2019).