



**MASTERARBEIT**

**Full Electric Field Characterization of Soliton-effect  
Self-compressed Few-cycle Laser Pulses by Optical  
Field-induced Electric Currents in a Dielectric  
Microjunction**

**Carolin Bauer**

Elitestudiengang "Advanced Optical Technologies"

Universität Erlangen-Nürnberg, Januar 2020

# Warum wir ultrakurze Laserpulse charakterisieren müssen

Ultrakurze Laserpulse sind für viele ultraschnelle optische Experimente von Bedeutung. Je nach ihrer Dauer ermöglichen sie Messungen mit einer zeitlichen Auflösung bis in den Attosekundenbereich ( $10^{-18}$  Sekunden), in dem Wissenschaftler sogar die Dynamik von Elektronenbewegungen untersuchen können. Bevor diese ultrakurzen Pulse jedoch für Experimente eingesetzt werden können, müssen ihre Eigenschaften mit Hilfe einer Puls-Charakterisierungstechnik bestimmt werden. Wenn man weiß, wie der Puls vor einem Experiment aussieht, lässt sich daraus schließen, wie das Experiment den Puls verändert hat.

Das Ziel meines Masterprojekts war die experimentelle Umsetzung einer Meßmethode zur vollständigen Charakterisierung des elektrischen Feldes eines Laserpulses, die als *Nonlinear Photoconductive Sampling* bekannt ist. Meine Masterarbeit, die ich am Erlanger Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts unter Dr. Francesco Tani und Professor Philip Russell abgeschlossen habe, lässt sich im Wesentlichen in zwei Teile untergliedern. Der erste Teil konzentriert sich auf die Kompression von Laserpulsen durch Soliton-Selbstkompression in einer photonischen Kristallfaser (PCF) und der zweite Teil auf die Charakterisierung von Pulsen durch *Nonlinear Photoconductive Sampling*.

## Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse

Das Verfahren, das ich zur Erzeugung der ultrakurzen Pulse verwendet habe, beruht auf der Bildung zeitlicher optischer Solitonen. Das Zusammenspiel von Dispersion und nichtlinearen Effekten erweitert das Spektrum und verschiebt die Phase der einzelnen Komponenten des Spektrums so, dass der Laserpuls zeitlich komprimiert wird. Im Allgemeinen unterstützt ein breiteres Spektrum kürzere Pulse. Wie stark der Puls komprimiert wird, oder allgemeiner gesagt, wie der Puls nach Verlassen der Faser aussieht, habe ich durch die Wahl des Faserdesigns, Art und Druck des Edelgases in der Faser sowie die Pulsenergie beim Eintritt in die Faser beeinflusst. In einem iterativen Prozess, basierend auf Simulationen und unter Verwendung eines Spektrometers zur Messung der Bandbreite des erzeugten Spektrums und einer Messtechnik namens *Dispersion Scan* sowie durch kontinuierliche Anpassung der Kompressionsparameter konnte ich schließlich Impulse erzeugen, von denen wir vermuten, dass sie nicht länger als wenige Zyklen lang sind. Die Pulskompression in einer PCF durch den Soliton-Effekt bietet viele Vorteile, wie zum Beispiel der große Bereich unterstützter Pulsenergien bis zu 100 nJ.

## Aufbau der Messtechnik für *Nonlinear Photoconductive Sampling*

Zunächst möchte ich kurz erklären, wie *Nonlinear Photoconductive Sampling* das volle elektrische Feld eines Laserpulses charakterisieren kann. Das elektrische Feld vollständig zu charakterisieren bedeutet die Amplitude und Phase jeder spektralen Komponente und die relative Phase zwischen der Trägerwelle und der Einhüllenden zu bestimmen. *Photoconductive Sampling* bedeutet im Wesentlichen, dass ein elektrischer Stromkreis durch das Bestrahlen mit Licht auf ein photoleitendes Medium geschlossen wird; im vorliegenden Fall ist dieser Schließmechanismus hochgradig nichtlinear. Die Feldabhängigkeit, über die wir Informationen über die Trägerwelle erhalten können, kommt von diesem hochgradig nichtlinearen Prozess, der hier der optischen Induktion von Strom in einem Dielektrikum entspricht.

Für die Strominduktion und damit für den Charakterisierungsprozess wird ein Anregungs-Abfrage-Aufbau installiert. Der Anregungspuls dient als zeitliches Tor und bestimmt die Auflösung der Gesamtmessung. Er wird zeitlich mit dem letztlich zu charakterisierenden Abfragepuls überlagert. Der sehr intensive Anregungspuls injiziert Träger in das Dielektrikum und ein Abfragepuls treibt die Träger in Richtung der mit dem Dielektrikum verbundenen Elektroden. Durch Kombination beider Prozesse lässt sich ein elektrischer Strom messen. Aus der Spannung des gemessenen Stroms lässt sich die imminente Feldstärke des Abfragepulses während der zeitlichen Überlappung mit dem Anregungspuls ableiten. Durch Erfassung einer Reihe von Datenpunkten bei Änderung des relativen Zeitpunkts der Überlappung lässt sich das volle elektrische Feld des Abfragepulses rekonstruieren. Der Kernpunkt dieser Technik besteht darin, dass sich eine Auflösung von einem Bruchteil einer Femtosekunde ( $10^{-15}$  s) erzielen lässt, ohne dass ein entsprechend kurzer Anregungspuls erforderlich ist. Dadurch kann ein wesentlich komplexerer Messaufbau umgangen werden. Zur Überwindung der breiten Bandbreite des Dielektrikums, womit Träger injiziert werden, ist ins unserem Fall nur der stärkste Teil des Feldes des Laserpulses ausreichend intensiv. Dieser wiederum ist nur einen Bruchteil des Laserpulses lang.

Zum Ende meines Masterprojekts konnte ich Pulse in der Größenordnung von einigen Zyklen erzeugen, was ich mit den oben genannten etablierten Techniken validierte. Ich habe unseren experimentellen Aufbau für *Nonlinear Photoconductive Sampling* weiterentwickelt, einschließlich der Anpassung für verschiedene Abwandlungen der Technik und der Durchführung mehrerer Zwischen- und Testmessungen. Letztlich habe ich Erfahrungen mit der Arbeit mit PCFs und der Ausrichtung verschiedener *Free Space Optics*-Techniken gesammelt, meine Kenntnisse der nichtlinearen Faseroptik vertieft und Einblicke in viele andere Themen zur wissenschaftlichen Arbeit auf dem Gebiet der Optik und Lasertechnik gewonnen.

Mehr zum Elitestudiengang “Advanced Optical Technologies”:

<https://www.elitenetzwerk.bayern.de>

Mehr zur Forschung in der Russell Division am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts:

<https://mpl.mpg.de/divisions/russell-division/>