

# Phasenstabile Lichtpulse für die Atomphysik

Hartmut Gimpel

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg  
<http://www.mpi-hd.mpg.de/femtolab>, email: [hartmut.gimpel@mpi-hd.mpg.de](mailto:hartmut.gimpel@mpi-hd.mpg.de)  
Tel.: 06221/514-256, Fax: 06221/514-604

In den letzten Jahren ist es gelungen Laseroszillatoren zu bauen, die Lichtpulse einer Dauer unter 10 fs ( $10^{-14}$  s) emittieren. Mit der immer kürzer werdenden Pulsdauer kam die Phase zwischen der optischen Trägeroszillation und der Einhüllenden von Femtosekundenpulsen in den Blickpunkt, die so genannte *Träger-Einhüllenden Phase* (oder auf englisch: Carrier-Envelope Offset Phase, CEO-Phase). Sie spielt eine interessante Rolle in vielen Gebieten der Physik, auch in der Atomphysik. Seit kurzem ist es möglich diese Phase zu messen und zu stabilisieren.

In einem kontinuierlich modengekoppelten Laser werden im Laserresonator viele Longitudinalmoden mit verschiedenen diskreten Wellenlängen angeregt. Bei geeigneter gegenseitiger Phasenbeziehung dieser Moden addieren sie sich zu einem kurzen Lichtpuls. Verschiedene physikalische Effekte sind für die Realisierung eines solchen Lasers relevant:

Die Reflexionsbandbreite der verwendeten Resonatorspiegel wie auch die Gewinnbandbreite des Gewinnmediums müssen ausreichen groß sein, damit hinreichend viele Longitudinalmoden angeregt und verstärkt werden können. Mit Hilfe des räumlichen Kerr-Effekts werden in einer so genannten Kerr-Linse die verschiedenen Lasermoden phasenstarr gekoppelt, damit sie sich zu einem kurzen Puls überlagern (*Kerr-Linsen Modenkopplung*).

Die Gruppenlaufzeitdispersion der resonatorinternen Komponenten würde eigentlich bewirken, dass ein kurzer Laserpuls sich bei der Propagation durch den Resonator verlängert. Die Selbstphasenmodulation, die auf dem zeitlichen Kerr-Effekt beruht, würde bewirken, dass sich das optische Spektrum eines Lichtpulses verbreitert, wenn er durch das Gewinn-Medium läuft. Die beiden genannten Effekte können nun aber so gegeneinander austariert werden, dass ein zeitlich wie auch spektral unveränderlicher Lichtpuls im Resonator umläuft, den man *Soliton* nennt.

Ein typischer auf diese Weise konstruierter Kurzpuls laser in unserem Labor hat einen Titan-Saphir Kristall als Gewinnmedium. Er emittiert Lichtpulse einer Dauer von 15 fs mit einer Repetitionsrate von 75 MHz und einer mittleren Ausgangsleistung von 330 mW. Das entspricht einer Pulsenergie von 4,5 nJ und einer Pulsspitzenleistung von 0,3 MW.

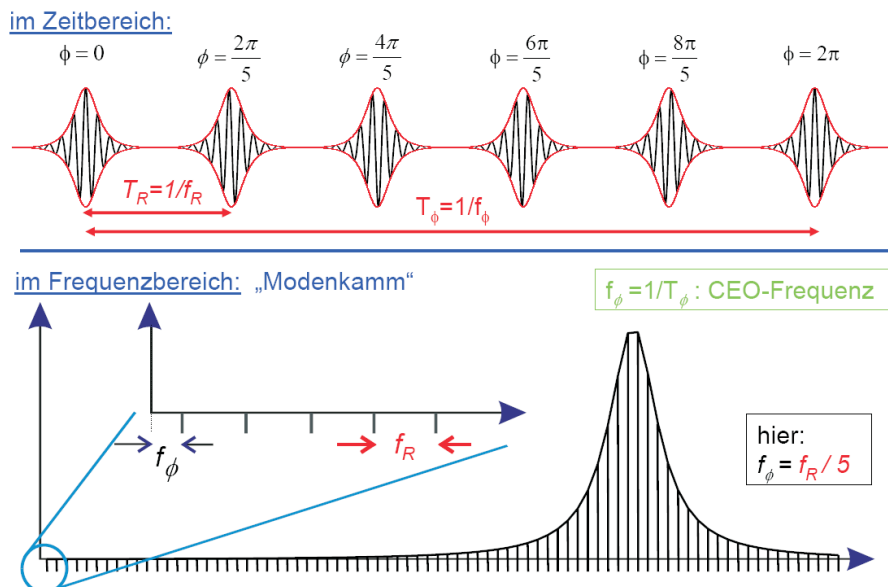


Abbildung 1: Pulzzug aus einem Kurzpuls laser im Zeitbereich und im Frequenzbereich. Man erkennt die Träger-Einhüllenden Frequenz  $f_\phi$ . ( $f_R = 1/T_R$  ist die Pulswiederholfrequenz.)

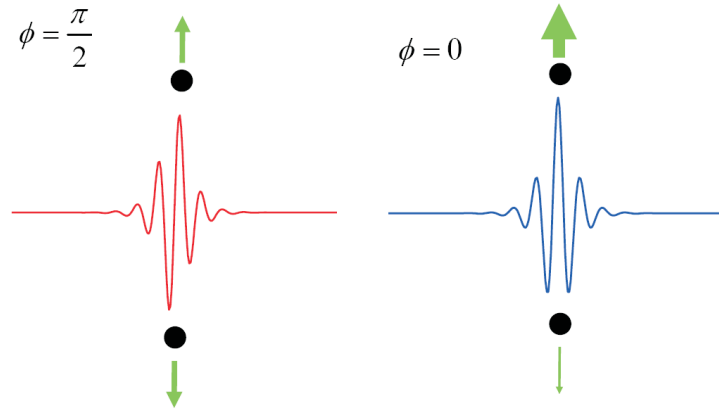


Abbildung 2: Die Emissionsrichtung des Elektrons bei der Photo-Ionisation eines Atoms hängt ab von der Träger-Einhüllenden Phase  $\phi$  des ionisierenden Lichtpulses.

In Abbildung 1 ist der Pulszug eines solchen KurzpulsLasers schematisch dargestellt. Im oben dargestellten Zeitbereich wird deutlich, dass sich die CEO-Phase von Puls zu Puls um einen konstanten Wert ändert. Man erkennt die Träger-Einhüllenden Frequenz als Kehrwert der Zeit, die es dauert, bis wieder ein Lichtpuls mit demselben Feldverlauf den Oszillator verlässt. Im Frequenzbereich ergibt sie sich als die Frequenz der niederfrequentesten Nadel, wenn man die Lasermoden auch außerhalb des optischen Spektrums zur Frequenz Null hin extrapoliert.

Die Messung der CEO-Frequenz eines Pulszuges ist am einfachsten, wenn dessen optisches Spektrum schon eine Oktave überspannt. In einem so genannten *f-zu-2f Interferometer* frequenzverdoppelt man den Anteil aus dem langwelligen Ende des Spektrums und bringt es zur Interferenz mit Licht aus dem kurzwelligen Ende desselben Spektrums. Das resultierende Schwebungssignal liefert direkt die CEO-Frequenz im Radiofrequenzbereich zwischen 0 und der Puls wiederholrate. Um die Träger-Einhüllenden-Frequenz eines Pulszuges mit einem schmaleren optischen Spektrum zu bestimmen, kann man sich behelfen, indem man das Spektrum in einer speziellen mikrostrukturierten Glasfaser auf die Oktave verbreitert, um dann wie oben fortzufahren. Sobald man die CEO-Frequenz gemessen hat, kann man sie mit einem elektronischen Regelkreis stabilisieren.

Für Ionisationsexperimente in der Atomphysik haben Lichtpulse direkt aus einem Laseroszillator im allgemeinen nicht genügend Spitzenfeldstärke. Man kann die Pulse aber beispielsweise mit einem Multi-pass Verstärker auf die benötigten Intensitäten verstärken. Macht man das mit Lichtpulsen, deren CEO-Phase stabilisiert ist, deren Feldverlauf also von Puls zu Puls identisch ist, dann schwankt die Phase der verstärkten Pulse nur sehr langsam und kann durch einen zweiten langsamen Regelkreis stabilisiert werden. Dieser Aufbau wurde zuerst von Baltuška realisiert [1]. Verbreitert man das optische Spektrum der Pulse nach der Verstärkung noch mittels einer gasgefüllten Hohlkapillare, dann lassen sich auf diesem Wege 5 fs lange optische Pulse mit einer Pulsenergie von 5 mJ und einer Repetitionsrate von 1 kHz erreichen, deren Träger-Einhüllenden Phase stabilisiert ist.

Mit einem ähnlichen Lasersystem beabsichtigen wir in der Abteilung am MPI-K in Heidelberg die Ionisation von Atomen in einem Reaktionsmikroskop zu untersuchen. In Abbildung 2 ist veranschaulicht, warum beispielsweise die Emissionsrichtung der Elektronen bei der Photo-Ionisation eines Atoms von der Träger-Einhüllenden Phase des ionisierenden Lichtpulses abhängen sollte. Diese Vermutung wurde in [2] von G. Paulus experimentell bestätigt. Mittlerweile hat diese Gruppe auch detailliertere Daten zur phasenabhängigen above-threshold Ionisation veröffentlicht [3].

So ist zu erwarten, dass auch die Doppelionisation und andere Effekte in starken Laserfeldern von der Träger-Einhüllenden Phase der verwendeten Lichtpulse abhängen.

## Literatur

- [1] A. Baltuška et al., „Attosecond control of electronic processes by intense light fields“, *Nature* **421**, 611 (2003).
- [2] G. G. Paulus et al. „Absolute-phase phenomena in photoionisation with few-cycle laser pulses“, *Nature* **414**, 182 (2001).
- [3] G. G. Paulus et al. „Measurement of the Phase of Few-Cycle Laser Pulses“, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 253004 (2003).