

Optiken für ultrakurze Laserpulse – Analyse, Design und Herstellung



Ulrike Fuchs



Uwe Detlef Zeitner

Die außergewöhnlichen Eigenschaften ultrakurzer Laserpulse werden in verschiedensten Anwendungsgebieten, wie z. B. Mikromaterialbearbeitung, nichtlineare Mikroskopie und Spektroskopie, genutzt. Bei der Ausbreitung auftretende lineare und nichtlineare Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserlicht und Materie sind dabei z. T. explizit gewünscht, erschweren jedoch auch die Strahlführung. Insbesondere ist die Propagation eines ultrakurzen Laserpulses durch ein optisches System unter Beibehaltung der Pulsparameter schwierig. Aus den Bedürfnissen der einzelnen Anwendungen sowie den charakteristischen Eigenschaften ultrakurzer Laserpulse ergeben sich neue Herausforderungen für das Design optischer Systeme. Von besonderem Interesse sind dabei Fokussierungsoptiken.

Mittels der Kombination von Methoden der geometrischer Optik (ray-tracing) und der Wellenoptik ist erstmals die numerische Berechnung der Propagation ultrakurzer Laserpulse durch beliebige reale optische Systeme möglich [1]. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Aberrations-, Dispersions- und Beugungseffekten bei realen Optiken tragen wesentlich zum Verständnis der Vorgänge beim Fokussieren ultrakurzer Laserpulse bei. Zusätzlich zur Analyse der Fokussierung in Luft kann, unter Beschränkung auf lineare Materialeffekte, auch das Fokussierungsverhalten in transparenten Materialien untersucht und optimiert werden. Die numerische Umsetzung erfolgt unter Verwendung der Optikdesignsoftware ZEMAX für Berechnungen mittels geometrischer Optik und Virtual Optics Lab für die Berechnung der wellenoptischen Ausbreitung.

Aufgrund der Verwendung einer Optikdesignsoftware (ZEMAX) lassen sich zusätzlich zur Analyse der Systemeigenschaften diese auch optimieren und an die jeweilige Anwendung anpassen. Zum einen kann eine Verzerrung der Pulsfront aufgrund von Aberrationen kompensiert werden (Abb. 1). Zum anderen ist es möglich den Laserpuls gleichzeitig räumlich und zeitlich maßgeschneidert zu verformen. Hierfür bieten sich speziell diffraktive optische Elemente an, da sie sowohl verschiedene optische Funktionen gleichzeitig vereinen können, als auch aufgrund der geringen Substratdicke kaum zur Materialdispersion des optischen Systems beitragen. Des Weiteren lassen sie sich auf gekrümmten Oberflächen strukturieren, was zu einer Reduzierung der Anzahl der optischen Elemente im System beiträgt [2].

In einem hybriden Ansatz wurde eine Asphäre diffraktiv bzgl. der chromatischen Aberrationen und der Fokussierungstiefe in Quarzglas korrigiert (Abb. 2). Durch die gewählte Kombination liegt die Materialdispersion bei der Hybridoptik deutlich unter der eines Mikroskopobjektivs. Dadurch wird die beim Mikroskop auftretende Pulsverlängerung fast vollständig vermieden.

Literatur:

- /1/ Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.: "Ultra-short pulse propagation in complex optical systems", Opt. Express 13 (2005) 3852–3861.
- /2/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", Proc. SPIE 4440 (2001) 44–50.

The extraordinary attributes of ultra-short laser pulses are utilized in various applications such as micromachining, nonlinear microscopy and spectroscopy. Linear and nonlinear interaction processes between light and material arising during the propagation, are partially desired but may also have disturbing effects on the laser pulse. It is especially difficult to maintain the parameters of an ultra-short laser pulse during propagation through an optical system. Requirements of individual applications as well as special characteristics of ultra-short laser pulses result in new challenges for optics design. Therefore, focusing optics are of special interest.

Based on a combination of ray-tracing and wave optical propagation methods, the simulation of ultra-short laser pulse propagation through arbitrary optical systems is feasible /1/. The insights gained into the influence of aberrations, dispersion and diffraction effects of real world optics contribute essentially to the understanding of the

processes occurring while focusing ultra-short laser pulses. In addition to the analysis of focusing in air, the focusing behavior in transparent material – limited to linear interaction processes – can be investigated and optimized. The numerical implementation is performed using the optics design software package ZEMAX for ray-tracing and Virtual Optics Lab for the computation of the wave optical propagation.

Because of the usage of ZEMAX the system parameters cannot only be analyzed but also optimized for an application as needed. On the one hand the distortion of the pulse front caused by aberrations can be compensated for (Fig. 1). On the other hand it is possible to shape the laser pulse spatially and temporally on demand. For this purpose diffractive optical elements (DOE) are of special interest because they can combine several optical functions at once and have negligible contribution to material dispersion of the optical system due to the low substrate thickness.

Furthermore, such elements can be structured upon curved surfaces, whereby the number of optical elements within a system is reduced /2/.

With a hybrid approach an asphere has been corrected for chromatic aberrations and focused into fused silica using a DOE (Fig. 2). Due to the combination selected, the material dispersion of the hybrid optics is clearly below that one of a microscope objective. Therefore, the increase of the pulse duration occurring with the microscope objective can almost completely be avoided.

References:

- /1/ Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.: "Ultra-short pulse propagation in complex optical systems", Opt. Express 13 (2005) 3852–3861.
- /2/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", Proc. SPIE 4440 (2001) 44–50.

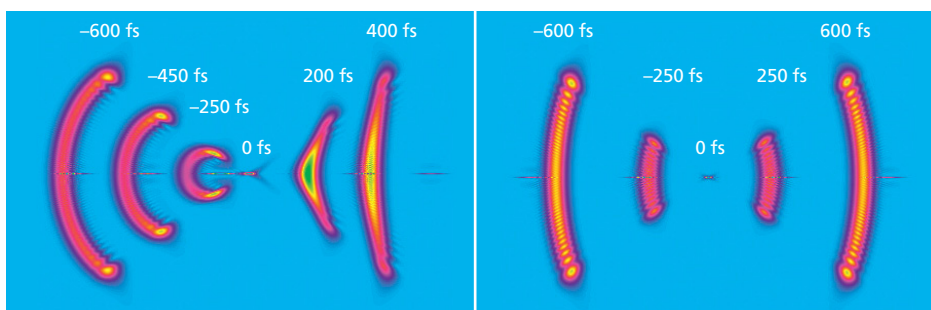


Abb. 1:
Intensitätsverteilungen der Pulsfronten (Pulsdauer 50 fs) in der Fokusumgebung einer Asphäre (links) und eines hybriden Achromaten (rechts). Die bei der Asphäre auftretende Verformung der Pulsfront durch chromatische Aberrationen ist bei der Hybridoptik kompensiert.

Fig. 1:
Intensity distributions of the pulse front (pulse duration 50 fs) in the vicinity of the focus of an asphere (left) and a hybrid achromatic doublet (right). The pulse front distortion appearing while focusing with the asphere is caused by chromatic aberrations, for which the hybrid optics compensates.

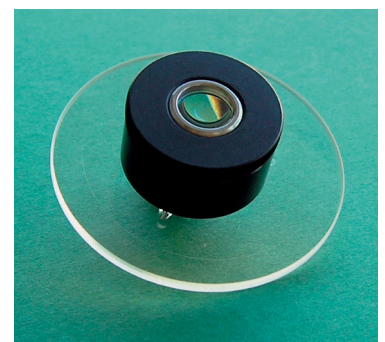


Abb. 2:
Hybridoptik, bestehend aus einer Asphäre und einem diffraktiven optischen Element zur Fokussierung, in Quarzglas. Die runde Glasplatte trägt die diffraktive Struktur.

Fig. 2:
Hybrid optics consisting of an asphere and a diffractive optical element for focusing into fused silica. The round glass substrate carries the diffractive structure.