

1 Einleitung

Wenn Sie dieses Buch in einem typischen Leseabstand von ca. 50 cm vor sich sehen, benötigt das Licht bereits 1,7 ns, um die Strecke von der Papieroberfläche bis zu Ihrer Pupille zurückzulegen. Da eine einzelne Signalübertragung zwischen zwei Nervenzellen ca. 50 μ s erfordert, dauert die Erfassung des Bildes und dessen Weiterleitung zum Gehirn bereits einige Millisekunden.

Die Pulse eines Femtosekundenlasers, die kürzesten von Menschen bisher erzeugten Ereignisse, sind jedoch selbst im Vergleich zu diesen Zeitskalen nochmals um viele Größenordnungen kürzer.

Ein nachverstärkter Femtosekundenlaser nach aktuellem Stand der Technik, der typischerweise mit einer Frequenz von 1 kHz Pulse von 100 fs Länge und 1 mJ Pulsenergie emittiert, erzeugt beispielsweise Lichtblitze, die eine räumliche Ausdehnung in Propagationsrichtung von nur 30 μ m aufweisen. Dies entspricht in etwa der Hälfte des Durchmessers eines menschlichen Haares. Selbst in der Natur laufen innerhalb vergleichbarer Zeiträume nur Elementarreaktionen wie z. B. atomare Schwingungen, die Bildung bzw. Auflösung molekularer Bindungen oder der Ladungstransfer in Halbleitern ab. Da sich Zeiträume in der Größenordnung von Femto- oder Pikosekunden¹ in der Regel

¹ 1 fs = 10^{-15} s, 1 ps = 10^{-12} s

Veranschaulichung ultrakurzer Pulslängen

unserer Vorstellungskraft entziehen, können sie nur durch Vergleiche veranschaulicht werden (Bild 1).

So verhält sich eine Femtosekunde zu einer Sekunde wie eine Sekunde zu einem Zeitraum von 32 Millionen Jahren bzw. wie fünf Minuten zum Gesamtalter der Erde. Auch der Vergleich, dass sich 10 fs zu einer Sekunde verhalten wie ein Cent zur gesamten Staatsverschuldung der Bundesrepublik Deutschland, mag einen Eindruck von den betrachteten Dimensionen vermitteln.

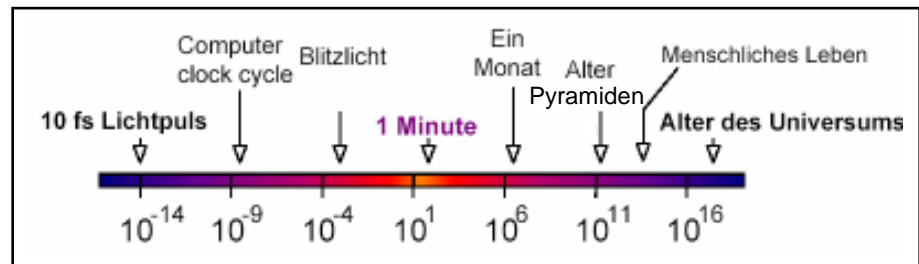


Bild 1:
Zeitliche Größenordnung ultrakurzer Laserpulse

$$\frac{1 \text{ fs}}{1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ s}}{32 \text{ Mio. Jahre}} = \frac{5 \text{ min}}{\text{Alter der Erde}}$$

$$\frac{10 \text{ fs}}{1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ Cent}}{\text{Staatsverschuldung Deutschlands}}$$

Die Technologie der Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) schafft die Möglichkeit, Photonen im Femto- und Piko-sekundenbereich zu kontrollieren und in diesen zeitlichen Größenordnungen als Werkzeug zur Beeinflussung von Materie zu nutzen.

Ziel und Aufbau des Buches

Ziel dieses Buches ist es, die Grundlagen, die Herausforderungen und das Potenzial dieser Technologie darzustellen und zu erläutern. Hierfür werden zunächst

die besonderen Eigenschaften der Interaktion ultrakurzer Laserpulse mit Materie beschrieben und ein Überblick der physikalischen und technologischen Prinzipien ihrer Erzeugung gegeben. Ausgehend von diesen Grundlagen folgt ein Markt- und Technologieüberblick bzgl. des aktuellen Stands der UKP-Strahlquellenentwicklung sowie eine Übersicht konkreter Anwendungsfelder, in denen UKP-Laser aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften besonders vorteilhafte Lösungswege erschließen können und deshalb bereits heute in der Praxis eingesetzt werden.

2 Interaktion ultrakurzer Pulse mit Materie

Interaktion konventioneller Laserstrahlung mit Materie

Bereits um die Frage zu beantworten, wie kurz ein Laserpuls sein muss, um als „ultrakurz“ eingestuft zu werden, ist eine Betrachtung der Interaktionsmechanismen von Laserpulsen mit Materie notwendig.

Ein der Strahlung einer konventionellen Laserstrahlquelle ausgesetztes Material absorbiert die in den Photonen enthaltene Energie in einer oberflächennahen Schicht und setzt sie in Wärme um. Bei entsprechend hohen Energiedichten der Laserstrahlung verursachen die dabei entstehenden Temperaturen ein Aufschmelzen oder Verdampfen des Materials.

Je kürzer und energiereicher die Laserpulse sind, desto genauer müssen jedoch die einzelnen Schritte dieses Vorgangs unterschieden werden. Beispielsweise können Effekte, wie die Interaktion der Laserpulse mit dem Ablationsplasma oder durch die Plasmaexpansion generierte Schockwellen, den Prozess beeinflussen. Bei ultrakurzen Pulslängen, deren zeitliche Ausdehnung in die Größenordnung der Dauer der im Material ablaufenden Wärmeleitungs- und Diffusionsvorgänge fällt, verlieren die thermischen Interaktionsmechanismen nahezu vollkommen an Bedeutung. Stattdessen wird der Prozess von speziellen photochemischen Effekten dominiert, die nur bei der Interaktion ultrakurzer Laserpulse mit Materie zu beobachten sind.

Interaktion ultrakurzer Laserpulse mit Materie

Die Interaktion eines ultrakurzen Laserpulses mit einer Metallprobe läuft beispielsweise in folgender Reihenfolge und Zeitskala ab:

Die auf das Material treffenden Photonen werden innerhalb weniger Femtosekunden von den freien Elektronen in einem bestimmten Absorptionsvolumen, das sich von der Materialoberfläche bis zur optischen Eindringtiefe erstreckt, absorbiert. Die Dicke δ der Absorptionsschicht, die den überwiegenden Teil der Laserenergie aufnimmt, errechnet sich mit Hilfe des material- und wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten α nach

$$\delta = 2 / \alpha$$

und liegt bei Metallen sowie Laserwellenlängen von ca. 800 nm in der Größenordnung von 10 nm. Die Relaxationszeit der Elektronen beträgt ca. 1 ps. Die Energie des Laserpulses wird also für etwa 1 ps in den Elektronen gespeichert und danach in Wärme umgewandelt und an das Gitter weitergegeben. Diese Wärme diffundiert aus der Oberflächenschicht in das Materialinnere. Die thermische Diffusionstiefe d ist eine Funktion der Zeit t und des Diffusionskoeffizienten a

$$d = \sqrt{4at}$$

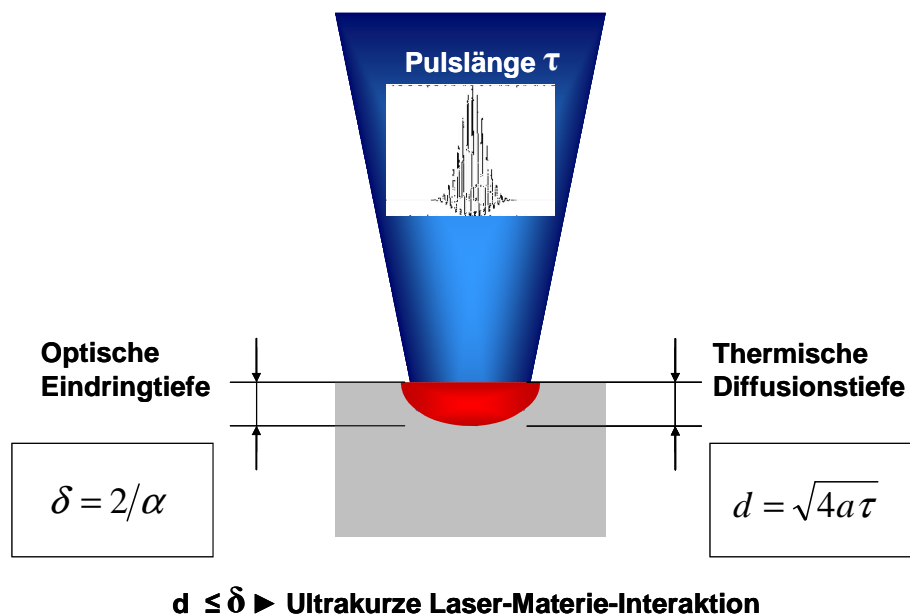
und beträgt im betrachteten Fall nach 1 ps ebenfalls ca. 10 nm. Wird eine Metallprobe von einem Laserpuls mit einer Länge von 1 ps getroffen, entspricht somit die optische Eindringtiefe der Photonen der thermischen Diffusionstiefe während der Dauer eines Pulses. Aus dieser Betrachtung kann die Definition einer ultra-

kurzen Laser-Materie-Interaktion aus Materialsicht abgeleitet werden [1]:

Definition
„Ultrakurze
Laser-Materie
Interaktion“

Ein Laserpuls ist dann als ultrakurz einzustufen, wenn die thermische Diffusionstiefe, die während der Fortdauer des Pulses erreicht wird, in derselben Größenordnung liegt oder kleiner ist als die optische Eindringtiefe des Laserlichts in das betrachtete Material (vgl. Bild 2).

Bild 2:
Ultrakurze Laser-
Materie Interaktion



Abgrenzung kur-
zer / ultrakurzer
Pulse

Diese Definition ist aufgrund der in den o. g. Formeln verwendeten, werkstoffabhängigen Koeffizienten materialspezifisch und setzt die Grenze zwischen kurzen und ultrakurzen Pulsen für Metalle bei ca. 1 ps und für Keramiken bei ca. 10 ps. Für bestimmte Kunststoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit können nach dieser Definition auch bereits Pulse mit einer Länge von 1 ns als ultrakurz eingestuft werden.