Femtosekundenspektroskopie & Ultraschnelle Laserkontrolle

Femtosecond Spectroscopy & Ultrafast Laser control

Prof. Dr. Thomas Baumert

Wie bewegen sich die Bausteine der Materie nach der Beleuchtung mit sehr kurzen und intensiven Laserpulsen und kann diese Bewegung gesteuert und ausgenutzt werden?

Um diese Fragen zu beantworten, beleuchten wir Materie mit extrem kurzen Laserpulsen im Bereich von Billiardstelsekunden und beobachten die dadurch erzeugte schnelle Dynamik mittels stroboskopischer Methoden in Zeitlupe (**Femtosekunden-spektroskopie**). Mit Hilfe von optischen Synthesizern steuern wir die zeitliche Struktur des Laserlichts und können dadurch die schnelle Dynamik kontrollieren (**Ultraschnelle Laserkontrolle**)

In unseren Forschungsvorhaben nutzen wir die einzigartigen Eigenschaften von ultrakurzen Laserpulsen aus:

1. Sehr kurze Lichtblitze.
Die Kürze der Laserpulse ermöglicht es uns, im Mikrokosmos „die Zeit zu stoppen“ und – wie unter einem Stroboskop – die lichtindizierte Dynamik in Zeitlupe zu beobachten. Unsere Stroboskope verwenden optische Anregungs- und Abfrage-techniken und auch ultraschnelle Elektronenbeugung.

2. Breites Farbspektrum
Ein kurzer Laserpuls enthält viele Farben. In einem optischen Synthesizer – auch Pulsformer genannt, da sie die zeitliche Struktur des Laserpulses ändern – können diese Farben nahezu beliebig kombiniert und arrangiert werden. Die resultierenden Pulse können verwendet werden, um Elektronendynamik zu kontrollieren, chirale Moleküle zu identifizieren, Laser-Materie-Wechselwirkung zu optimieren oder hochauflösende Mikroskopie zu entwickeln.

3. Extrem hohe Intensitäten
Durch ihre Kürze können fokussierte ultrakurze Laserpulse sehr hohe Intensitäten sogar bei niedrigen Energien pro Puls erreichen. Mit Hilfe von nichtlinearen optischen Effekten ermöglichen diese Intensitäten dreidimensionale Material-bearbeitung und Plasmaspektroskopie, die nicht thermisch-diffusiv ablaufen und daher mit wenig ungewollten Schäden einhergehen.

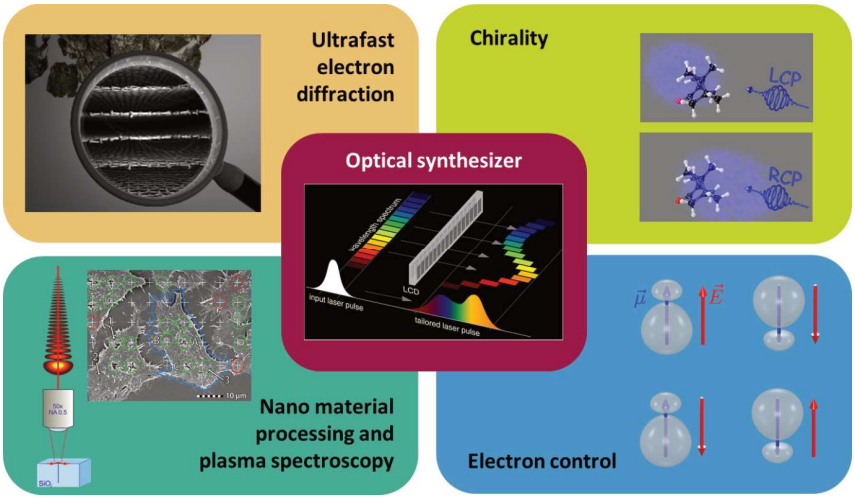
Auf diesen Eigenschaften aufbauend verwenden wir ultrakurze Laserpulse und optische Synthesizer in den folgenden Forschungsgebieten, die auch in Abbildung 1 illustriert sind:

Ultraschnelle Elektronenbeugung
Gleich einer Lupe erlaubt Beugung einen Einblick in die atomare Struktur eines Kristalls. Basierend auf unseren ultrakurzen Laserpulsen haben wir ein stroboskopisches System aufgebaut, das Veränderungen dieser atomaren Struktur nach der Beleuchtung mit einem kurzen Lichtblitz untersucht. Die Methode verwendet ähnlich kurze Elektronenpulsen, die durch Beugung einen Schnappschuss des sich bewegenden Kristalls erzeugen. Wir erreichen eine Zeitauflösung von 120 Femtosekunden, die zu den besten gehört, die mit Elektronenbeugung erreicht werden können. Wie in Abbildung 1 dargestellt, untersuchen wir Schichtkristalle wie Graphit, hexagonale Bornitrid und Über-gangsmetalldichalcogenide wie MoS_2, ReS_2 und TaS_2.

Chiralität
Chirale Moleküle kommen in zwei spiegelbildlichen Versionen vor, die unterschiedliche biologische oder pharmazeutische Wirkungen haben können. Physikalisch lassen sich die beiden Spiegelbilder hingegen schwer unterscheiden. In unserer Gruppe untersuchen wir die Wechselwirkung von zirkular polarisierten ultrakurzen Laserpulsen mit chiralen Molekülen in der Gasphase. Wenn dabei Elektronen aus dem Molekül herausgelöst werden, hängt deren Emissionsrichtung von der Chiralität des Moleküls und des Lichts ab. Die dabei entstehende Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie (siehe Abbildung 1) ist ein sehr starker chiraler Effekt, mit dem sich der Enantiomerenüberschuss einer chiralen Mischung besser als 1 % genau aus nur wenigen Molekülen bestimmen lässt. Zu unseren Zielen gehören die Maximierung des chiralen Signals mit dem optischen Synthesizer und die Umwandlung der Chiralität eines Moleküls. Unsere Forschungen an chiralen Molekülen sind Teil des DFG-Sonder-forschungs-bereichs 1319 ELCH an der Universität Kassel.

Abbildung 1: Forschungsgebiete der Gruppe Femtosekundenspektroskopie & Ultraschnelle Laserkontrolle.

Figure 1: Research areas of the group Femtosecond Spectroscopy & Ultrafast Laser control.



Nanomaterialbearbeitung und Plasmaspektroskopie

Mit ihrer hohen Lichtstärke können ultrakurze Laserpulse Material von Oberflächen verdampfen und so Löcher erzeugen. Wir haben mit einem optischen Synthesizer gezeigt, dass eine spezielle zeitliche Struktur von Laserpulsen die Licht-Materie-Wechselwirkung so modifiziert, dass Nanokanäle von unerreichter Dünne (250 nm) und Tiefe (7 µm) erzeugt werden. Dieselbe Pulsstruktur wurde auch erfolgreich eingesetzt, um Zellmembranen kontrolliert und überlebbar zu durchlöchern (siehe Abbildung 1). Ein Nebeneffekt von Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen ist die Erzeugung eines Plasmas aus kleinsten Volumina, das Licht ausstrahlt, dessen Farben charakteristisch für das verdampfte Material sind. Aus der Analyse dieses Lichts können wir die Zusammensetzung der Probe bestimmen. In einem aktuellen Projekt verwenden wir diese Plasmaspektroskopie um Tumore in menschlichem Gewebe zu identifizieren.

Elektronenkontrolle

Wenn Licht mit Materie wechselwirkt, treibt es vor allem die Elektronen. Mit unseren optischen Synthesizern können wir die Wechselwirkung so beeinflussen, dass die Elektronen kontrolliert getrieben werden können. Mit diesem Ansatz können zeitlich geformte Laserpulse verwendet werden, um langlebige Kohärenzen zu erzeugen, zu untersuchen und zu kontrollieren. Diese Kohärenzen könnten die Grundlage für die Entwicklung molekularer Quantenbits darstellen, die wir zusammen mit anderen CinSaT-Gruppen im LOEWE Schwerpunktprojekt SMolBits vorantreiben. Wir haben Elektronenkontrolle auch bereits eingesetzt, um Populationen in Atomen und Molekülen in gewünschte Quantenzustände zu steuern, wobei eine zeitliche Genauigkeit von Attosekunden und besser erreicht werden kann. In der Zukunft wollen wir das auch auf chirale Moleküle anwenden.

How do the building blocks of matter move after irradiation with very short and intense laser pulses and can this motion be controlled and used?

*To this end, we illuminate matter with extremely short laser pulses in the quadrillionth of a second range and observe the ultrafast dynamics with stroboscopic methods in slow motion (**femtosecond spectroscopy**). Using optical synthesizers, we shape the laser light in the time domain and can thus control the ultrafast dynamics (**ultrafast laser control**) by adjusting the energy transfer.*

In our research projects, we exploit the unique properties of ultrashort laser pulses:

1. Very short flashes of light.

The shortness of the pulses allows us to "stop time" in the microcosm and, used as a stroboscope, to view light-induced dynamics in slow motion. In our stroboscopes we use optical excitation and interrogation techniques as well as ultrafast electron diffraction.

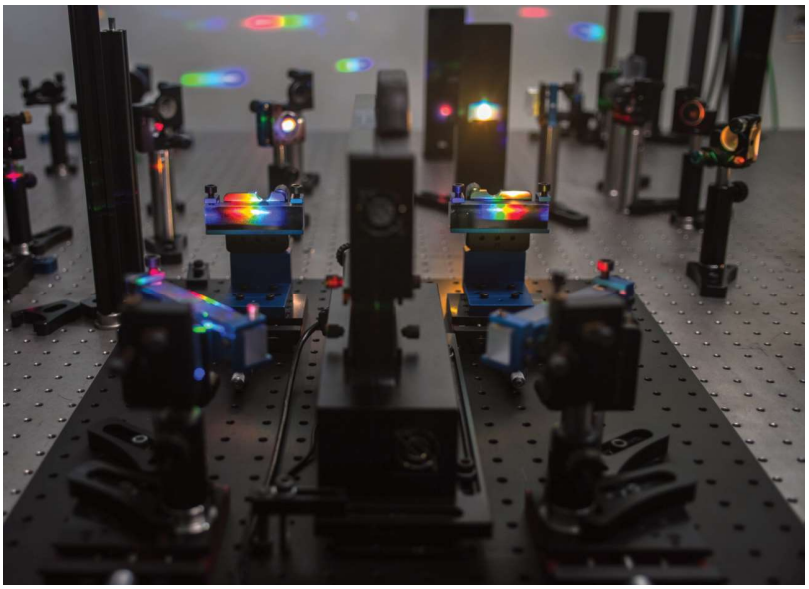
2. Broad color spectrum

A short pulse contains many colors. These can be arranged almost arbitrarily with optical synthesizers, which are also called pulse shapers because they allow to modify the temporal shape of laser pulses. These can be used to control electron dynamics, to detect chirality, but also to optimize laser materials processing and to develop high-resolution microscopy techniques.

3. Extremely high intensities

Due to the shortness of femtosecond laser pulses, focusing achieves very high intensities even at low energies per pulse. Using nonlinear optical effects, these can be used for three-dimensional, largely nonthermal and therefore low-damage laser material processing and plasma spectroscopy on the nanometer scale, as well as for three-dimensional microscopy.

Building on these properties we employ ultrashort laser pulses and optical synthesizers in the following research areas (see Figure 1):



Ultrafast electron diffraction

Diffraction acts as a magnifying glass into the atomic structure of a crystalline solid. Using our ultrashort laser pulses we have developed a stroboscopic system to investigate changes of this atomic structure after interaction with a short burst of light. The system uses similarly short pulses of electrons to create snapshots of the crystal in motion. We can achieve a temporal resolution as good as 120 femtoseconds which is among the best achievable in electron diffraction. As depicted in Figure 1, we are studying the layered materials graphite, hexagonal boron nitride and transition metal dichalcogenides such as MoS_2, ReS_2 and TaS_2.

Chirality

Chiral molecules come in two mirror symmetric forms that can have different functions in biology and medicine. Physically, the two forms appear barely distinct. In our group, we are investigating the interaction of circularly polarized ultrashort laser pulses with isolated chiral molecules in the gas phase. When electrons are removed from the molecule in such an interaction, their emission direction is influenced by the chirality of the molecule and the light, creating forward–backward asymmetries as illustrated in Figure 1. This asymmetry is a very strong chiral effect that allows to determine chirality with an accuracy on the enantiomeric excess of better than 1 % from a small number of molecules. Among our goals are the maximizing of chiral signature by means of the optical synthesizer as well as the inversion of chirality inside a molecule. Our investigations on chiral molecules are part of the DFG Sonderforschungsbereich 1319 ELCH located in Kassel.

Nano material processing plasma spectroscopy

With their high light intensity, ultrashort laser pulses can evaporate material from surfaces and create holes. Using an optical synthesizer, we have demonstrated that a special

Abbildung 2: Eindruck aus unserem Labor: Ein optischer Synthesizer im Einsatz, wobei die vielen Farben, die ein ultrakurzer Laserpuls enthält, sichtbar werden.

Figure 2: Impression from our lab: Optical synthesizer at work visualizing the many colors present in an ultrashort laser pulse.

temporal shape of laser pulses modifies the interaction of light and matter such that nano channels of unprecedented thinness (250 nm) and depth (7 µm) are created. These pulses have also been used successfully to perforate cell membranes in a controlled and survivable way (see Figure 1). A by-product of material processing with ultrashort laser pulses is the creation of a plasma from a very small volume that emits light in the colors characteristic for the materials present in the removed substance. We can analyze this light to learn about the composition. In a current project, this plasma spectroscopy is employed to identify tumors in human tissue.

Electron control

When light interacts with matter, it mainly drives electrons. Using our optical synthesizers we can modify the interaction such that electrons are driven in specific ways. Along this line, the shaped pulses can be used to induce, interrogate and control long-lived electronic coherences as a basis for the development of molecular qubits that we pursue in collaboration with other Cinsat groups in the LOEWE priority project SMolBits. We have also been using electron control to steer population in molecules to desired quantum states with a precision of attoseconds and below. In the future, we want to apply this approach to chiral molecules.

Weitere Informationen / *Further Information*

Prof. Dr. Thomas Baumert
Universität Kassel
Heinrich-Plett-Str. 40
34132 Kassel
AVZ I - Raum 1128

Tel: +49 561 804-4452
Fax: +49 561 804-4453
E-Mail: baumert@physik.uni-kassel.de
Website: http://www.physik.uni-kassel.de/exp3

Dr. Arne Senftleben
Universität Kassel
Heinrich-Plett-Str. 40
34132 Kassel
AVZ I - Raum 1126

Tel: +49 561 804-4294
E-Mail arne.senftleben@uni-kassel.de

Dr. Hendrike Braun
Universität Kassel
Institut für Physik
Heinrich-Plett-Str. 40
34132 Kassel
AVZ I - Raum 1126a

Tel: +49 561 804-4188
Fax: +49 561 804-4453
E-Mail: braun@physik.uni-kassel.de