



*Ansprechpartner:*

Dr. Robert Moshhammer

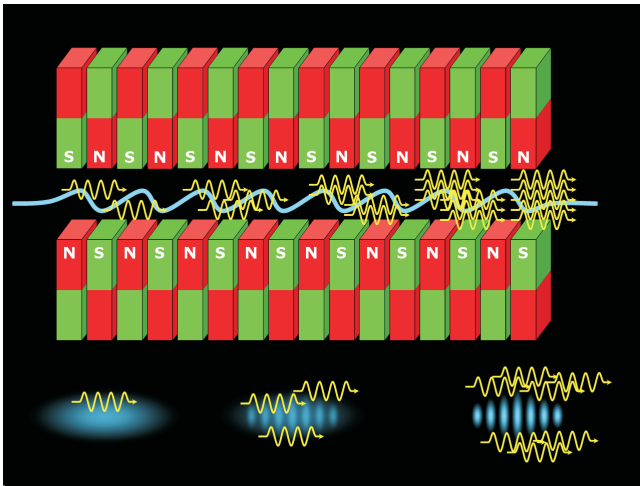
Tel: 06221 516461

E-Mail: [robert.moshhammer@mpi-hd.mpg.de](mailto:robert.moshhammer@mpi-hd.mpg.de)

Prof. Dr. Thomas Pfeifer

Tel: 06221 516380

E-Mail: [thomas.pfeifer@mpi-hd.mpg.de](mailto:thomas.pfeifer@mpi-hd.mpg.de)



*Schematische Darstellung der selbstverstärkenden Lichtemission beim Durchflug eines Elektronenpakets (blau) durch die alternierende Magnetstruktur eines Undulators. Durch Wechselwirkung mit dem Lichtfeld wird dem Elektronenpaket eine Dichtemodulation aufgeprägt (unten), was zu einer verstärkten kohärenten Lichtemission führt.*

Am Freie-Elektronen-Laser bei DESY in Hamburg, FLASH, wird dieses Prinzip verwendet, um Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von wenigen Nanometern bei Puls-längen von ca. 20 fs zu erzeugen. Die Leistung in einem einzigen Lichtblitz, von denen bis zu dreißigtausend pro Sekunde erzeugt werden können, übersteigt dabei eine Mil-liarde Watt.

Mit speziell angepassten Experimenten, darunter ein dauerhaft in der Experimentierhalle von FLASH aufge-bautes Reaktionsmikroskop, versuchen wir grundlegende Fragestellungen zur Wechselwirkung dieser kurzwelligen, extrem intensiven Strahlung mit Materie zu untersuchen: Wie verhalten sich die Bausteine unserer Welt, Atome, Mo-leküle und Ionen unter diesen extremen Bedingungen? Wie absorbiert ein Atom oder Molekül innerhalb einer extrem kurzen Zeit zwei, drei oder mehr Photonen? Kann man che-mische Reaktionen wie in einem Film mit atomarer Auf-lösung in Echtzeit verfolgen? Dies sind exemplarisch nur einige der aktuellen Themen. Sehr wahrscheinlich ergeben sich noch viele andere, bisher nicht erahnte und völlig neue Möglichkeiten mit den laserartigen, superintensiven Rönt-genblitzen dieser neuen „Lichtmaschinen“, den Freie-Elek-tronen-Lasern (FEL).



MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR KERNPHYSIK  
HEIDELBERG

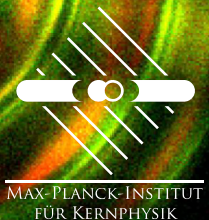
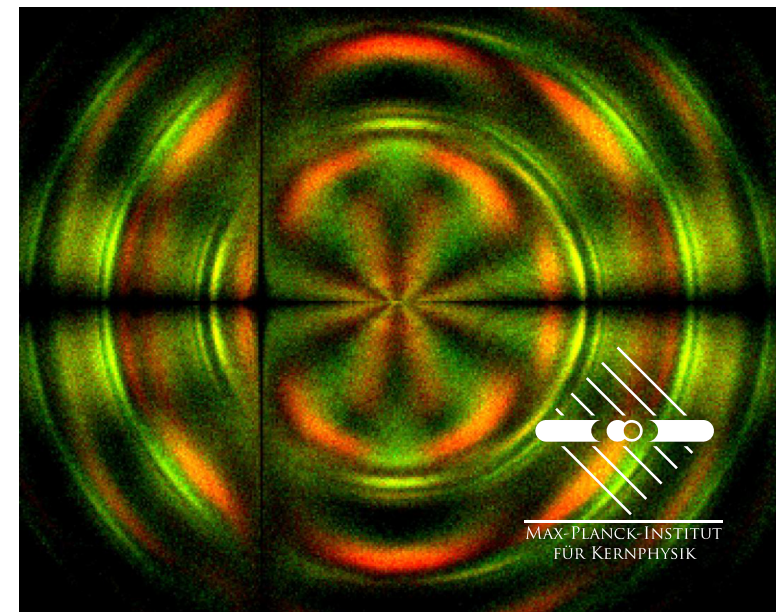
Saupfercheckweg 1  
69117 Heidelberg

[www.mpi-hd.mpg.de](http://www.mpi-hd.mpg.de)



Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK be-treibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Ge-bieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.

# Ultrakurze Laserpulse „Chemie“ in Zeitlupe



MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR KERNPHYSIK

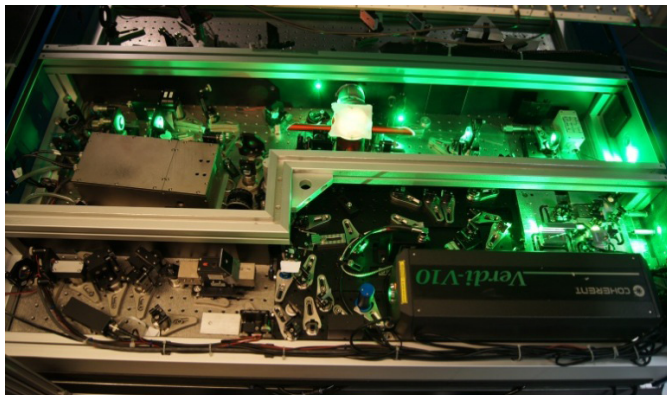
# Ultrakurze Laserpulse

## „Chemie“ in Zeitlupe

*Unvorstellbar schnell laufen die Prozesse ab, die chemischen Reaktionen zu Grunde liegen: Atomkerne schwingen um ihre Gleichgewichtsposition, Bindungselektronen wandern durch das Molekül und dessen Atomkerne ordnen sich um. All das spielt sich innerhalb von wenigen Femtosekunden ( $10^{-15}$  s) oder gar Attosekunden ( $10^{-18}$  s) ab – also in Sekundenbruchteilen, die im Vergleich zu einer Sekunde so winzig sind wie die Sekunde gegenüber dem Alter des Universums. Die Erforschung dieser Abläufe in Atomen und Molekülen gibt uns ein genaueres Verständnis der quantenmechanischen Regeln, welche die stoffliche Welt um uns bestimmen. Ziel ist es aber auch, eines Tages den Ausgang chemischer Reaktionen zu beeinflussen oder gar zu steuern. Um diesem Ziel näher zu kommen verwenden wir gepulste, sehr intensive Laser in Kombination mit Vielteilchen-Nachweissystemen, so genannten Reaktionsmikroskopen.*

### Femtosekundenlaser

Ein häufig verwendetes Verfahren zur Beobachtung ultraschneller Prozesse sind sogenannte „pump-probe“-Experimente. Dabei werden Atome oder Moleküle mit einem ersten Laserpuls („pump“) präpariert und anschließend mit einem zweiten Puls („probe“, Abfrage) vermessen. Das Ergebnis der Messung mit dem zweiten Lichtpuls ist vom zeitlichen



Ein Blick in das Innere eines Femtosekundenlasers.

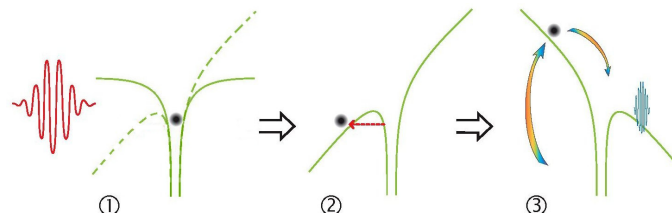
Abstand zwischen pump und probe abhängig. Löst der Anregungspuls z. B. eine Schwingungsbewegung des Moleküls aus, führt eine Variation der Verzögerung zwischen pump und probe zu einer Art Filmaufnahme der molekularen Bewegung: Aus vielen Einzelaufnahmen lässt sich so die Bewegung der Kerne Bild für Bild rekonstruieren.

Die Länge des Laserpulses hat bei einer solchen Messung in etwa die Bedeutung, die bei der Fotografie die Belichtungszeit innehat: Je schneller sich ein Objekt bewegt, das man fotografieren möchte, desto kürzer muss die Belichtungszeit eingestellt werden, sonst verwischt die Aufnahme. Zur Beobachtung der Vibrationen eines Moleküls benötigt man daher Lichtpulse, die nur wenige Femtosekunden (fs) dauern. Moderne Laser sind heute in der Lage, solche Pulse mit unvorstellbar hohen Intensitäten zu erzeugen.

### Attosekunden-Lichtpulse

Für bestimmte Fragestellungen allerdings reicht selbst eine Zeitauflösung von wenigen Femtosekunden nicht aus. Um etwa die Bewegung von Elektronen in Atomen oder Molekülen zu beobachten, werden Lichtpulse von weniger als 100 Attosekunden benötigt. Da Lichtblitze aus mindestens einem vollständigen Schwingungszyklus des elektrischen Feldes bestehen, erfordert dies also Laserlicht mit deutlich kürzerer Wellenlänge im Vergleich zu den bereits erwähnten Femtosekundenlasern.

Eine Möglichkeit, zu kürzeren Wellenlängen zu gelangen, ist die Erzeugung hoher Harmonischer der Wellenlänge eines Femtosekundenlasers. Damit erreicht man heute die geforderten Pulsdauern von unter 100 Attosekunden in einem Wellenlängenbereich von einigen 10 Nanometer. Zur technischen Realisierung fokussiert man das Licht eines Femtosekundenlasers in einen Gasstrahl. Die hohe elektrische Feldstärke im Fokus verzerrt das Bindungspotential der äußersten Elektronen der Atome (siehe Abbildung unten). Dabei entsteht eine Potential-



Schema des 3-Stufen-Modells: 1. Verzerrung des atomaren Potentials, 2. Tunnelionisation, 3. Rekollision und Emission harmonischer Strahlung mit hoher Energie (kurze Wellenlänge).

barriere, durch die das Elektron mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit hindurch „tunneln“ kann und somit freigesetzt wird. Diesen Vorgang nennt man Tunnelionisation. Nur 1,4 fs später ändert das elektromagnetische Wechselfeld des Lasers seine Richtung (das entspricht einer Wellenlänge von etwa 800 nm). Das Elektron befindet sich daher, kurz nachdem es das Atom verlassen hat, in einem elektrischen Feld mit umgekehrter Polarität, welches das Elektron zurück zum Atomrumpf treibt. Dort fällt es zurück in einen gebundenen Zustand, wobei es die gesamte überschüssige Energie (Bindungsenergie des Atoms und die aus dem Laserfeld aufgenommene kinetische Energie) durch Emission eines entsprechend hochenergetischen Photons abgibt.

### Freie-Elektronen Laser: Neue „Lichtmaschinen“

Laserpulse bei ähnlich kurzen oder sogar noch kürzeren Wellenlängen mit allerdings millionenfach höheren Intensitäten können heute an beschleunigerbasierten Lichtquellen, so genannten Freie-Elektronen-Lasern (FEL) erzeugt werden. Dabei schickt man ein Paket von ca. einer Milliarde Elektronen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch eine Anordnung von Magnetfeldern mit wechselnder Feldrichtung, einen so genannten Undulator, und zwingt die Elektronen auf eine oszillierende Bahn. Als beschleunigte Ladungen emittieren sie Licht – die Synchrotronstrahlung. Auf diese Weise kann intensive Strahlung bis hinein in den Röntgenbereich erzeugt werden.

Startet man mit einem ultrakurzen Elektronenpuls (blau illustrierte Wolke unten links in der Abbildung auf der nächsten Seite) von einigen 10 Femtosekunden Länge und lässt diesen immer weiter durch den Undulator fliegen, so beginnt das anfänglich emittierte Licht mit dem Elektronenpaket so zu wechselwirken, dass die Elektronen (unten Mitte) mehr und mehr in Phase geraten: Sie bewegen sich somit im Gleichtakt und die emittierte Strahlung wird kohärent, d. h. Wellentäler und -berge der von den einzelnen Elektronen abgestrahlten Lichtzüge liegen übereinander. Dies hat dramatische Konsequenzen: Die Intensität des emittierten Lichtpulses ist nicht mehr, wie bei einem normalen, ca. 2 m langen Synchrotron-Undulator, proportional zur Zahl der Elektronen im Paket, sondern proportional zu deren Quadrat, so dass die abgestrahlte Lichtintensität in den bis zu 200 m langen FEL-Undulatoren also eine Milliarde mal größer wird!