

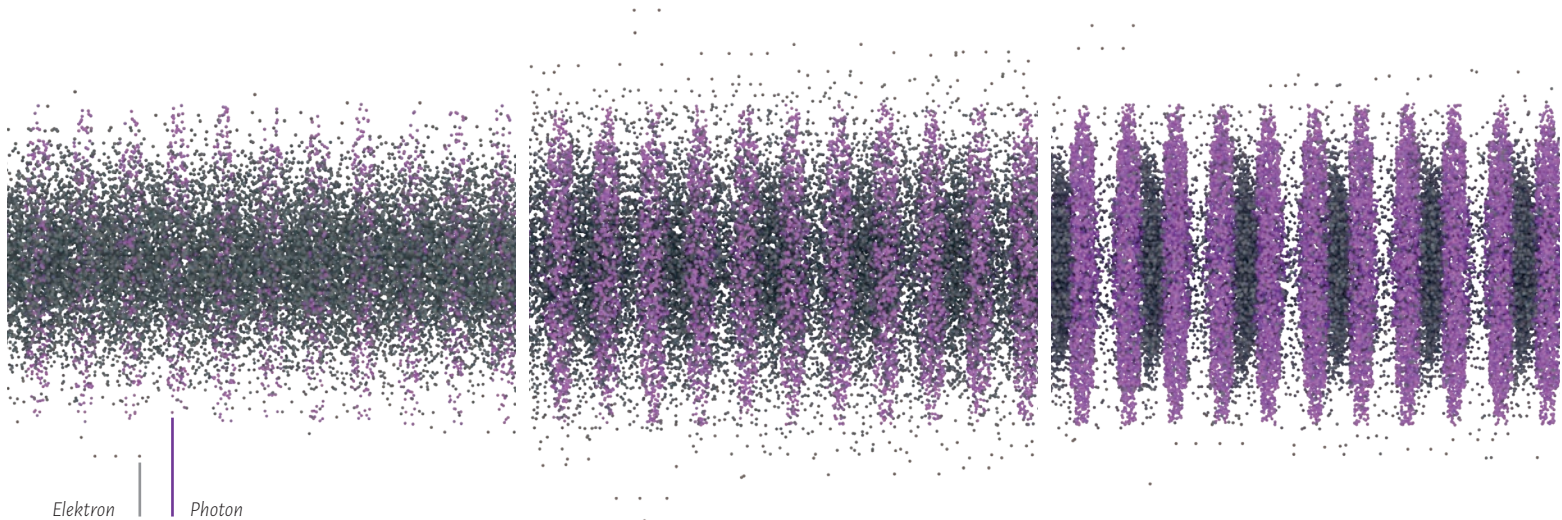
GEMEINSAM VIEL HELLER

Im Verbund das Potenzial der hellsten Lichtquellen der Welt ausschöpfen

GEMEINSAM VIEL HELLER

*Freie-Elektronen-Laser zählen zu den hellsten Lichtquellen der Welt.
In ihnen werden Elektronen zum gemeinsamen Strahlen gebracht.*

In einem Freie-Elektronen-Laser werden Elektronen auf hohe Energien beschleunigt und anschließend durch Magnetfelder auf eine Slalombahn gebracht. Dabei senden die Elektronen spontan Strahlung aus, die die Teilchen zu schmalen Scheiben zusammenpresst. Diese Ordnung führt dazu, dass sich weitere Strahlung der Elektronen optimal zur bestehenden Strahlung addieren kann.



Sobald die Elektronen (grau) die magnetischen Kräfte des Undulators spüren, senden sie spontan Strahlung aus (violett) – Undulatorstrahlung, bei der eine durch Magnetfeld und Elektronenenergie bestimmte Wellenlänge besonders häufig vertreten ist.

Die Undulatorstrahlung wirkt nun als zusätzliche Kraft auf die Elektronen ein. Sie presst die Elektronen zu schmalen Scheiben zusammen.

Der Abstand der Elektronenscheiben entspricht genau der Wellenlänge des Undulatorlichts. Deshalb addiert sich neue – von den Elektronen weiterhin ausgesandte – Undulatorstrahlung weit stärker zur bestehenden Strahlung als im ungeordneten Fall.

LIEBE LESERINNEN UND LESER,

wer einen unbekanntem Gipfel erklimmen will, wird sich viele Gedanken um die richtige Ausrüstung machen. Naturwissenschaftliche Forschung auf internationalem Spitzenniveau hängt mehr denn je vom Zugang zu modernsten Forschungsinstrumenten ab. Die derzeit leistungsfähigsten Röntgenlichtquellen sind die Freie-Elektronen-Laser, deren Funktionsprinzip auf der linken Seite erläutert wird. Zwei solche Instrumente – FLASH und der European XFEL – stehen uns bereits jetzt beziehungsweise in Kürze in Deutschland zur Verfügung. Diese Anlagen sind so groß und aufwändig, dass sie nur als zentrale Großforschungsanlagen betrieben werden können. Dafür können wir an diesen Lichtquellen vollkommen neue Klassen von Experimenten durchführen: Das

Ergünden der atomaren Struktur beliebiger Moleküle, das Beobachten der Bildung und des Brechens von chemischen Bindungen in milliardenfacher Zeitlupe oder das Herstellen bislang unbekannter Materiezustände mit Hilfe von Licht hätten vor einigen Jahren noch wie pure Science-Fiction angemutet, sind aber bereits Wirklichkeit oder in greifbarer Nähe. Viele wissenschaftliche Nutzerinnen und Nutzer von Freie-Elektronen-Lasern kommen aus den Universitäten, sie bringen neben ihren Fragestellungen auch große methodische Erfahrung mit. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert daher im Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser Beiträge universitärer Gruppen zur Ausrüstung von Freie-Elektronen-Lasern mit modernster Röntgenoptik und -sensorik, mit

innovativen Messmethoden und maßgeschneiderter Probenpräparation.

In dieser Broschüre wollen wir Ihnen die vielfältigen Aktivitäten im Forschungsschwerpunkt näherbringen. Das Motto »Gemeinsam viel heller« weist auch auf die produktive Zusammenarbeit der Partner dieses Verbunds hin. Immer wieder erleben wir bei der Arbeit mit den brilliantesten Röntgenlichtquellen der Welt wahrhaft erhellende Momente – etwas von dieser Begeisterung wollen wir hier weitergeben.

Viel Vergnügen!

Prof. Dr. Markus Drescher
Koordinator des FSP-302

INHALT

GEMEINSAM VIEL HELLER

Freie-Elektronen-Laser zählen zu den hellsten Lichtquellen der Welt. In ihnen werden Elektronen zum gemeinsamen Strahlen gebracht. → 2

VORWORT

→ 3

BMBF-FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

FREIE-ELEKTRONEN-LASER

Untersuchung von Materie mit ultrakurzen, extrem intensiven Röntgenpulsen → 6

VOM ELEKTRONENPAKET

BIS ZUR ERKENNTNIS

Fünf Schritte der Forschung an Freie-Elektronen-Lasern → 8

PROJEKTBEREICHE

Die Projekte des Forschungsschwerpunkts sind zu thematischen Projektbereichen gruppiert. → 10

ÜBER PULS-UMWEGE ZUR SUPERZEITLUPE

Kein FEL pulst in dem Takt, der für Aufnahmen in Superzeitlupe nötig wäre. Eine Lösung sind Doppelpulse, die durch Verzögern je einer Einzelpulshälfte erzeugt werden. → 14

Split-and-Delay Instrument für die European XFEL Beamline Materials Imaging and Dynamics

JEDER SCHUSS EIN TREFFER

Erst die separate Belichtung erhellt, wie Nanoteilchen funktionieren und sich funktionalisieren lassen. Was tun, wenn sie immerzu verklumpen? Wie an einer Perlenkette aufreihen! → 16

Labor zur Einzelanalyse von funktionellen Nanopartikeln

JEDER SCHUSS VIELE TREFFER

Kleinen Nanoteilchen lassen sich nur mit großem Aufwand Informationen entlocken. Eine ultrakalte Falle sortiert die Teilchen nach Masse und Zustand und verspricht mehr Signifikanz. → 17

Ultrakalte Probenumgebung für die Rumpfniveau-Photoelektronenspektroskopie massenselektierter Cluster

NANOGROOßES KINO!

Neuerdings kann die dreidimensionale Form einzelner Nanoteilchen in Schnappschüssen aufgenommen werden. Hier folgt die Erweiterung auf Filme mit mehr als zwei Bildern. → 18

Dynamik einzelner Nanoteilchen in Femtosekunden-Zeitlupenfilmen mit ultrakurzen Röntgendoppelpulsen

MAßNEHMER MAßSCHNEIDERN

An FEL-Messplätzen herrscht notorischer Platzmangel. Daher sind raumsparende modulare Konzepte für Messinstrumente gefragt. → 21

FEL-spezifische Röntgendiagnostik zum Studium dichter Plasmen

ERKENNTNIS DURCH

DATENDECODIERCODES

Daten aus FEL-Experimenten mit Plasmen sind kryptisch. Eine theoretische Vor- und Nachbereitung der Experimente macht Messdaten menschenlesbarer. → 22

Licht-Materie-Wechselwirkung und Diagnostik von Materie unter extremen Bedingungen

FERNSTEUERUNG FÜR DIE SUPERZEITLUPE

Messzeit ist knapp. Das zeitintensive Justieren der verwendeten Strahlteiler- und Verzögerungseinheit erfolgt daher am besten automatisiert. → 23

Bau von Diagnostik- und Justiereinrichtungen für die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit am Undulator SASE2 des European XFEL

PIONIER-EQUIPMENT

AUS DEM SUPERCOMPUTER

Bei Pionier-Experimenten mangelt es an Erfahrungswerten. Erkenntnisse aus Computerberechnungen helfen, Experimentdesign und Datenanalyse zu optimieren. → 24
Zeitaufgelöste Photoionisation am FEL – nichtlineare Effekte, Korrelationen und Kohärenz in Atomen und Molekülen

KOLLISION UNTER

GENORMTEN BEDINGUNGEN

Vielteilchendynamik ist bedeutsam von der Supraleitung bis zur Selbstorganisation des Lebens. Ein Spektrometer am European XFEL hilft, die Dynamik systematisch zu untersuchen. → 26
Ein COLTRIMS Reaktionsmikroskop für Vielteilchen-Koinzidenz-Experimente am European XFEL

PRESTO STACCATO ACCURATO

Mit seiner rasanten Pulsrate diktiert der European XFEL Sensorentwicklern das Tempo. Ein neues Spektrometer kann im Takt von billionstel Sekunden auch Einzelpulse analysieren. → 27
Hochauflösendes Fluoreszenzspektrometer für den Spektralbereich zwischen 5 und 110 Nanometern für Experimente an Freie-Elektronen-Lasern mit hoher Repetitionsrate

MIT PULS-ZÄSUR ZUR SUPERZEITLUPE

Die Wartezeit zwischen zwei FLASH-Pulsen ist zu lang, um atomare Prozesse zu verfolgen. Eine Lösung sind Doppelpulse, wofür je Einzelpulse zerschnitten werden. → 28
Entwicklung und Aufbau einer Strahlteilungs- und Verzögerungseinheit für ultraschnelle Pump-Probe-Experimente mit Photonenenergien bis 1500 Elektronenvolt am FLASHz

DIE GUTEN INS TÖPFCHEN

Die gegenseitige Abstoßung von Photoelektronen macht das Messergebnis ungenau. Werden informationsarme Elektronen frühzeitig aussortiert, bleibt der Störeffekt beinahe aus. → 31
Raumladungskorrigiertes Elektronen-Impulsmikroskop für den harten Röntgenbereich am European XFEL

FLOTT UND EXAKT

Chemische Reaktionen laufen extrem schnell ab. Ein Spektrometer am European XFEL nimmt auch flüchtigste Zwischenzustände auf – neuer Antrieb für die Femtochemie. → 32
Aufbau einer Instrumentierung für zeitaufgelöste Röntgen-Raman-Spektroskopie auf Zeitskalen von Femto- bis zu Millisekunden

WIDER DAS CHRONOLOGISCHE CHAOS

Wann ein FEL-Puls eintrifft, ist im Voraus ungewiss – folglich auch die Zeitordnung von Messdaten. Ein neues Diagnosegerät stellt sie wieder her. → 34
Charakterisierung von ultrakurzen Röntgenpulsen

KONTROLLIERTE EMISSION

Kein FLASH-Puls gleicht dem anderen. Indem wohldefinierte Lasersignale auf die Elektronenpakete einwirken, können besser reproduzierbare Pulse erzeugt werden. → 35
EEHG bei FLASH und FLASHz, Seeding in FLASHz – Freie-Elektronen-Laser als Laserverstärker mit optimierter Pulsqualität

ELEKTRONENPRÄPARATION

FÜR PRÄZISERE ABSTRAHLUNG

Beschleuniger beschleunigen inhomogen. Für präzisere Lichtabstrahlung soll eine günstige und effiziente Komponente die Elektronenenergien wieder austarieren. → 36
Entwicklung von Wakefield-basierten Apparaturen zur Kompression der longitudinalen Phasenraumverteilung an ELBE



BMBF-FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

FREIE-ELEKTRONEN-LASER

*Untersuchung von Materie
mit ultrakurzen, extrem intensiven
Röntgenpulsen*

Freie-Elektronen-Laser zählen zu den derzeit hellsten Lichtquellen der Welt und bieten einzigartige Möglichkeiten für die Grundlagenforschung. Ihre internationale Bedeutung wächst: Ideen für neuartige Experimente führen dazu, dass die Freie-Elektronen-Laser weltweit stetig weiterentwickelt und an die neuen Forschungsfragen angepasst werden.

Auch in Deutschland bilden einige solche Lichtquellen wichtige Eckpfeiler der Forschungsinfrastruktur. Ihre wissenschaftliche und gesellschaftliche Wirkung sowie die ständige Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit werden durch gezielte Maßnahmen aus öffentlicher Hand langfristig gesichert. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) führt seit 2007 verstärkt universitäre Forschungsgruppen an den Freie-Elektronen-Lasern in Deutschland zusammen, damit sie dort innovative Instrumente für den wissenschaftlichen Betrieb aufbauen und maßgeschneiderte Forschungsmethodik entwickeln können.

Mit der Gründung des BMBF-Forschungsschwerpunkts Freie-Elektronen-Laser setzt das Ministerium von 2013 bis 2016 erneut einen Fokus der Förderung auf die zukunftssträchtigen Lichtquellen. Ein Fördervolumen von 13,1 Millionen Euro und die gebündelten Kompetenzen von 21 universitären Forschungsgruppen und außer-universitären Partnern schaffen die Basis, das wissenschaftliche Potenzial von FLASH, European XFEL und FELBE voll auszuschöpfen.



WISSENSCHAFT

Der Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser trägt zu wissenschaftlichen Erkenntnissen an Freie-Elektronen-Lasern (FEL) bei. Höchste Intensitäten und kürzeste Strahlungspulse eröffnen der Forschung neue Parameterbereiche und ebnen den Weg für ganz neue Klassen von Experimenten. Dazu sind technische und methodische Herausforderungen zu meistern: Hohe Datenraten und neue Messbereiche erfordern angepasste Nachweisinstrumente; andere Probenmaterialien brauchen spezifische Präparations- und Reaktionskammern; Messungen nichtlinearer Prozesse sowie an extremen Materiezuständen sind erst mit der geeigneten Theorie interpretierbar. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser entwickeln für FEL-Experimente maßgeschneiderte Methodik, Präparations- und Detektionssysteme. Die Instrumente werden an den Forschungszentren aufgebaut und stehen auch anderen Forschergruppen zur Verfügung. Das schafft die Voraussetzungen für exzellente Forschung an Freie-Elektronen-Lasern.

FORSCHUNGSZENTREN

Der Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser entwickelt Freie-Elektronen-Laser in Deutschland weiter. An den Forschungszentren DESY (Hamburg), European XFEL GmbH (Hamburg und Schenefeld) und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Dresden) sind mit FLASH, European XFEL und FELBE Großgeräte mit schon herausragender Pulsqualität vorhanden oder werden es in Kürze sein. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser formen, charakterisieren und verbessern die FEL-Pulse hinsichtlich Dauer, zeitlicher Abfolge und Synchronisation. In weiteren Projekten stellen sie die Strahllinien mit innovativen Instrumenten aus, die die Strahlung aufbereiten oder neuartige Experimente möglich machen. Das steigert die Leistungsfähigkeit und Attraktivität der Großgeräte als Experimentierstätten für die wissenschaftliche Gemeinschaft.

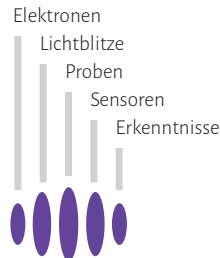
AUSBILDUNG

Der Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser bildet wissenschaftlichen Nachwuchs aus. Talentierten, jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bietet der Forschungsschwerpunkt die Möglichkeit, sich im Experimentieren mit und an Freie-Elektronen-Lasern zu qualifizieren. Der Netzwerkcharakter des Verbunds fördert den Transfer von Wissen und Erfahrung. Dadurch werden junge Forscherinnen und Forscher zu Experten auf diesem zukunfts-fähigen Fachgebiet und sichern so dessen Kontinuität.

VOM ELEKTRONENPAKET BIS ZUR ERKENNTNIS

Fünf Schritte der Forschung an Freie-Elektronen-Lasern

Freie-Elektronen-Laser ermöglichen eine große Bandbreite von Experimenten. Auch wenn sich diese im Detail stark voneinander unterscheiden können, ist ihre allgemeine Struktur gleich. Im Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser vereint, setzen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Kompetenzen in allen fünf Herausforderungsfeldern ein.



1.

ELEKTRONEN BESCHLEUNIGEN UND LEUCHTFERTIG MACHEN

Freie Elektronen stehen zu Beginn jedes Freie-Elektronen-Lasers. Die Elementarteilchen bilden die physikalische Lichtquelle. Um die kurzen, hellen Blitze zu erzeugen, werden Pakete aus zirka einer Milliarde Elektronen zunächst auf hohe Energien gebracht. Das geschieht in langen, unterirdischen Linearbeschleunigern. Die räumliche und energetische Struktur der beschleunigten Elektronenpakete bestimmt maßgeblich die Eigenschaften des abgestrahlten Lichts. Eigenschaften, die über Erfolg und Tragweite von Experimenten entscheiden. Eigenschaften, die sich gestalten lassen. Gruppen aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser optimieren die Qualität der Lichtblitze durch Elektronenpräparation.

2.

LICHTBLITZE ERZEUGEN UND ZUM MESSPLATZ LEITEN

Im zweiten Schritt werden die schnellen Elektronen zum Strahlen gebracht. Durch eine regelmäßige Anordnung von Magneten, den Undulator, auf einen Slalomkurs gelenkt, senden sie Synchrotronstrahlung aus. Daraus verstärkt sich das Licht einer Wellenlänge um mehrere Größenordnungen zu einem Röntgenpuls. Allerdings schwanken die Eigenschaften der einzelnen Pulse, vor allem ihre zeitliche Abfolge und ihr Wellenlängenspektrum. Gruppen aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser verbessern die zeitliche und energetische Auflösung von FEL-Experimenten. Mit neuen Methoden der Lichterzeugung und Instrumenten zur Nachbearbeitung der erzeugten Strahlung sorgen sie für taktfeste Folgen einheitlicher Pulse..

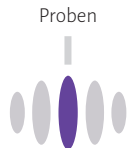


3.

PROBEN BEREITSTELLEN UND MIT LICHTBLITZEN REAGIEREN LASSEN

Wird eine Probe mit den Pulsen belichtet, sendet sie Antwortsignale in Form von Photonen, Elektronen und Ionen aus. Diese Signale tragen physikalische Information über die mikroskopische Natur der Probe und die Art ihrer Wechselwirkung mit Licht. Je gezielter die Proben vorbereitet werden können, desto aussagekräftiger sind die Versuchsergebnisse.

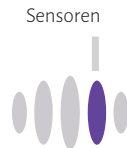
Gruppen aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser konstruieren und optimieren Probenumgebungen für die spezifischen Anforderungen an Freie-Elektronen-Lasern. In Präparationskammern werden Proben ausgewählt und für die Reaktion aufbereitet, in Reaktionskammern werden genormte Bedingungen sichergestellt.



4.

SENSOREN EINRICHTEN UND SIGNALE AUFZEICHNEN

Mit spezifischen Nachweistechiken werden die Antwortsignale der Proben aufgezeichnet und vermessen. Pixeldetektoren zählen Photonen oder Elektronen, Spektrometer messen Energie, Interferometer vergleichen Lichtwege. Um bei den hohen Intensitäten und Puls-taktungen, wie sie Freie-Elektronen-Laser vorgeben, alle Information aus den Proben verarbeiten zu können, entwickeln Gruppen aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser neuartige Detektoren, Interferometer und Spektrometer.



5.

ERGEBNISSE AUSWERTEN UND IN ERKENNTNISSE VERWANDELN

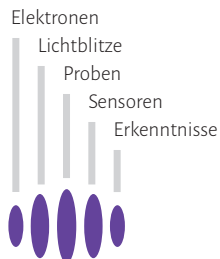
Sind die Signale in einen Computer eingelesen, können sie analysiert werden. Das kommt oft einem Entschlüsseln gleich, denn intuitive Ursache-Wirkung-Beziehungen sucht man auf dieser Komplexitätsstufe vergeblich. Nicht selten werden dabei neue Phänomene entdeckt, die in Fachpublikationen zur Diskussion gestellt werden und womöglich langfristig ihren Weg in den Alltag finden.

Gruppen aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser helfen beim Verstehen der Messdaten. Dazu werden die physikalischen Vorgänge bei der Kollision und in den neuartigen Detektoren am Computer simuliert.



PROJEKTBEREICHE

Die 19 Projekte des Forschungsschwerpunkts sind zu Projektbereichen gruppiert, die jeweils einen eigenen thematischen Schwerpunkt setzen.



NANOSKOPISCHE SYSTEME

Nanoteilchen bilden die Basis für neuartige, maßgeschneiderte Materialien. Die Projekte im Bereich »Nanoskopische Systeme« entwickeln Techniken, mit denen sich Nanoteilchen unterschiedlicher Größe untersuchen lassen. Zwei Projekte realisieren dies durch bestmögliche Trennung und gezielte Auswahl der Teilchen. In Berlin und Heidelberg werden dazu größere Nanoteilchen perlenschnurartig aufgereiht und einzeln belichtet (→ 16). In Rostock werden kleinere Nanoteilchen gruppiert, um bessere Antwortsignale zu erhalten (→ 17). An der TU Berlin wird eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit für den European XFEL entwickelt, um ultraschnelle Vorgänge zu untersuchen (→ 14). Gruppen aus Freiburg und Berlin installieren eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit an FLASH und entwickeln ein Detektorsystem, mit dem sich erstmals lange »Filme« von Nanoteilchen aufnehmen lassen (→ 18).



Split-and-Delay Instrument für die European XFEL Beamline Materials Imaging and Dynamics → 14



Labor zur Einzelanalyse von funktionellen Nanopartikeln → 16



Ultrakalte Probenumgebung für die Rumpfniveau-Photoelektronenspektroskopie massenselektierter Cluster → 17



Dynamik einzelner Nanoteilchen in Femtosekunden-Zeitlupefilmen mit ultrakurzen Röntgendoppelpulsen → 18

EXTREME BEDINGUNGEN

Im Bereich »Kondensierte Materie unter extremen Bedingungen« verbessern drei Projekte Komponenten und Verfahren für Experimente zu extremen Materiezuständen, wie sie etwa in Sternen und Planeten vorkommen. Eine Münsteraner Gruppe optimiert die Steuerung einer Strahlteiler- und Verzögerungseinheit, die aus einzelnen FEL-Pulsen jeweils Doppelpulse mit regelbarem Zeitabstand erzeugt (→ 23). In Jena werden Sensoren entwickelt, mit denen das ultraschnelle Entstehen und Vergehen von Plasmen verfolgt werden kann (→ 21). Schließlich sorgen Forscher aus Rostock für die passende Theorie, um die komplexen Daten analysieren zu können (→ 22).



FEL-spezifische Röntgendiagnostik zum Studium dichter Plasmen → 21



Licht-Materie-Wechselwirkung und Diagnostik von Materie unter extremen Bedingungen → 22



Bau von Diagnostik- und Justiereinrichtungen für die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit am Undulator SASE2 des European XFEL → 23

ULTRASCHNELLE DYNAMIK

Der Projektbereich »Nichtlineare und zeitaufgelöste Röntgenphysik« verbessert die Möglichkeiten an FLASH und European XFEL, unter anderem seltene Quantenphänomene zu untersuchen. Die Voraussetzung für ultraschnelle Messungen an einer neuen Strahllinie von FLASH schafft eine Münsteraner Gruppe (→ 28). Gleich zwei Projekte entwickeln verbesserte Nachweistechiken für den European XFEL: Im Spektrometer aus Frankfurt und Heidelberg können gleichzeitig eintreffende Reaktionsbruchstücke nachgewiesen werden (→ 26). Ein Kasseler Instrument kann hochaufgelöste Spektren aufzeichnen, unter voller Ausnutzung der enorm hohen Pulstaktung des European XFEL (→ 27). Eine Kieler Gruppe modelliert FEL-typische Vorgänge (→ 24) und trägt damit zu einer effizienteren Konzeption und einem besseren Verständnis der Experimente bei.



Zeitaufgelöste Photoionisation am FEL – nichtlineare Effekte, Korrelationen und Kohärenz in Atomen und Molekülen → 24



Ein COLTRIMS Reaktionsmikroskop für Vielteilchen-Koinzidenz-Experimente am European XFEL → 26



Hochauflösendes Fluoreszenzspektrometer für den Spektralbereich zwischen 5 und 110 nm für Experimente an Freie-Elektronen-Lasern mit hoher Repetitionsrate → 27



Entwicklung und Aufbau einer Strahlteilungs- und Verzögerungseinheit für ultraschnelle Pump-Probe-Experimente mit Photonenenergien bis 1500 Elektronenvolt am FLASH2 → 28

FUNKTIONELLE MATERIALIEN

Der Projektbereich »Zeitaufgelöste Spektroskopie an funktionellen Materialien und Flüssigkeiten« schafft mit neuen Instrumenten an FLASH und European XFEL verbesserte Voraussetzungen für die zeitaufgelöste Untersuchung energetischer Übergänge in Festkörpern und Flüssigkeiten. In Hamburg und Mainz wird dazu ein Problem mit einem Übermaß an Elektronen gelöst (→ 31). Die Hamburger Gruppe realisiert zudem ein Instrument, das auch rasche Folgen von Elektroneneinschlägen exakt registriert. Ein Dortmunder Instrument für den European XFEL kann auch kurzlebige Zwischenzustände chemischer Reaktionen aufzeichnen (→ 32).



Raumladungskorrigiertes Elektronen-Impulsmikroskop für den harten Röntgenbereich am European XFEL → 31



Aufbau einer Instrumentierung für zeitaufgelöste Röntgen-Raman-Spektroskopie auf Zeitskalen von Femto- bis zu Millisekunden → 32



Entwicklung und Test eines multihit-fähigen, zeit- und ortsauflösenden Detektors für zeitaufgelöste Elektronenspektroskopie

PRÄZISE PULSE

Projekte im Bereich »Beschleunigerphysik für Freie-Elektronen-Laser: Konzept und Vision« haben zum Ziel, die Eigenschaften von FEL-Strahlung reproduzierbarer und regelbarer zu machen. Dabei werden die Elektronenpakete manipuliert, bevor und während sie im Undulator sind. Eine Darmstädter Gruppe verbessert dazu die genaue Messung der Ankunftszeit der Elektronenpakete. Forscher aus Rostock entwickeln eine Komponente, mit der sich die Energien der Elektronen innerhalb eines Paketes angleichen lassen (→ 36). Eine Hamburg-Dortmund-Kollaboration lässt Laserpulse auf die Elektronenpakete einwirken, um die Merkmale des Laserlichts auf das später erzeugte FEL-Licht zu übertragen (→ 35). Ob das funktioniert hat, kann mit dem ultraschnellen Analysetool überprüft werden, das eine andere Hamburger Gruppe konstruiert (→ 34).



Charakterisierung von ultrakurzen Röntgenpulsen → 34



Weiterentwicklung der Ankunftszeitmonitore für sehr geringe Ladungen



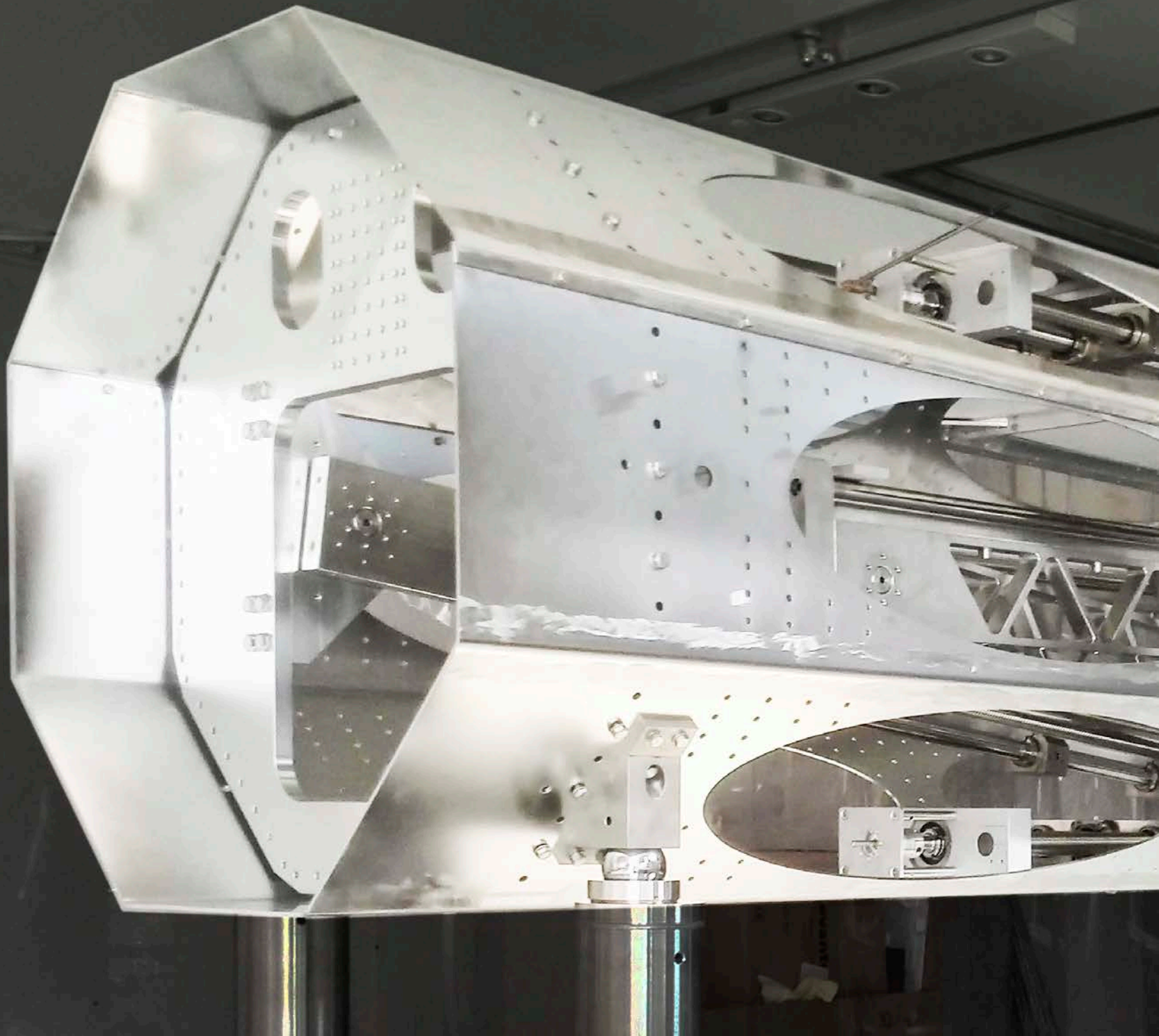
Echo-Enabled Harmonic Generation bei FLASH und FLASH2 → 35

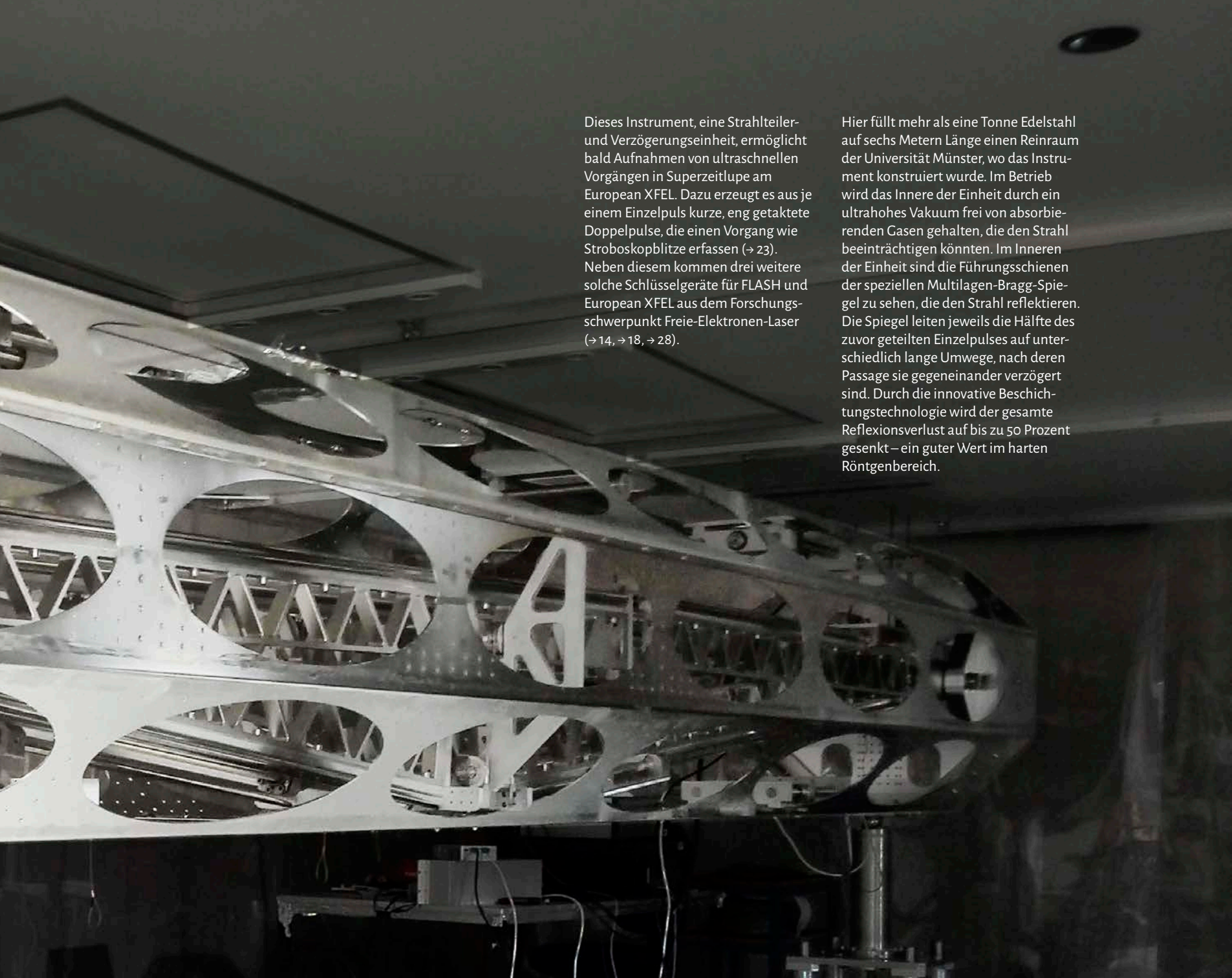


Seeding in FLASH2 – Freie-Elektronen-Laser als Laserverstärker mit optimierter Pulsqualität → 35



Entwicklung von Wakefield-basierten Apparaturen zur Kompression der longitudinalen Phasenraumverteilung an ELBE → 36



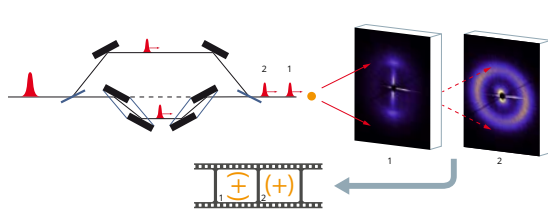


Dieses Instrument, eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit, ermöglicht bald Aufnahmen von ultraschnellen Vorgängen in Superzeitlupe am European XFEL. Dazu erzeugt es aus je einem Einzelpuls kurze, eng getaktete Doppelpulse, die einen Vorgang wie Stroboskopblitze erfassen (→ 23). Neben diesem kommen drei weitere solche Schlüsselgeräte für FLASH und European XFEL aus dem Forschungsschwerpunkt Freie-Elektronen-Laser (→ 14, → 18, → 28).

Hier füllt mehr als eine Tonne Edelstahl auf sechs Metern Länge einen Reinraum der Universität Münster, wo das Instrument konstruiert wurde. Im Betrieb wird das Innere der Einheit durch ein ultrahohes Vakuum frei von absorbierenden Gasen gehalten, die den Strahl beeinträchtigen könnten. Im Inneren der Einheit sind die Führungsschienen der speziellen Multilag-Bragg-Spiegel zu sehen, die den Strahl reflektieren. Die Spiegel leiten jeweils die Hälfte des zuvor geteilten Einzelpulses auf unterschiedlich lange Umwege, nach deren Passage sie gegeneinander verzögert sind. Durch die innovative Beschichtungstechnologie wird der gesamte Reflexionsverlust auf bis zu 50 Prozent gesenkt – ein guter Wert im harten Röntgenbereich.

ÜBER PULS-UMWEGE ZUR SUPERZEITLUPE

Kein FEL pulst in dem Takt, der für Aufnahmen in Superzeitlupe nötig wäre. Eine Lösung sind Doppelpulse, die durch Verzögern je einer Einzelpulshälfte erzeugt werden.



Ein Teil des zuvor geteilten Pulses wird gegen den andern durch einen Umweg beliebig verzögert. Ergebnis: exakte, reproduzierbare Doppelpulse. Diese sind notwendig, um die dynamischen Eigenschaften von Nanomaterialien mit Anrege-Abfrage-Experimenten zu erforschen.

PROJEKTNAME

Split-and-Delay Instrument für die
European XFEL Beamline Materials Imaging and Dynamics



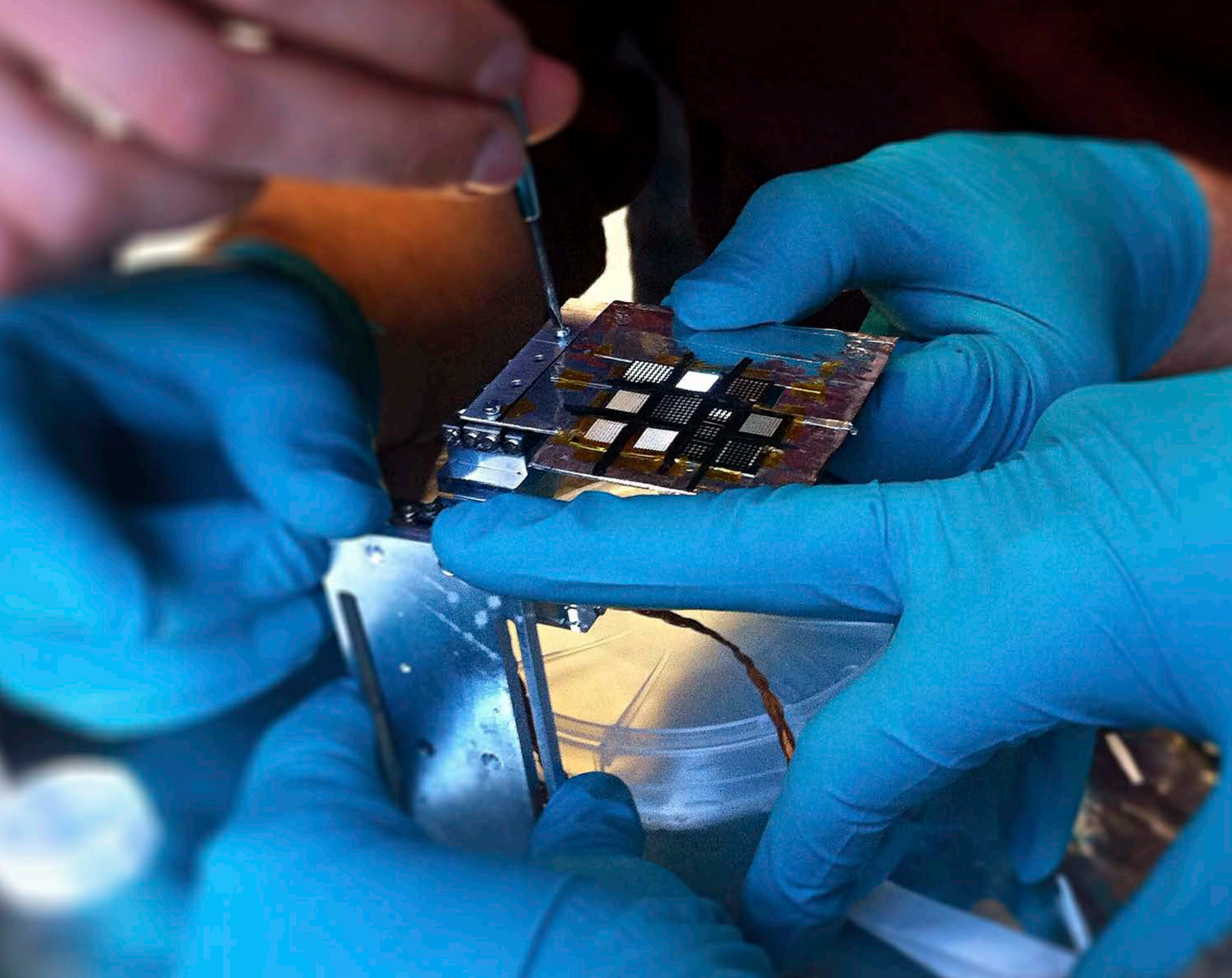
PROJEKTLEITER

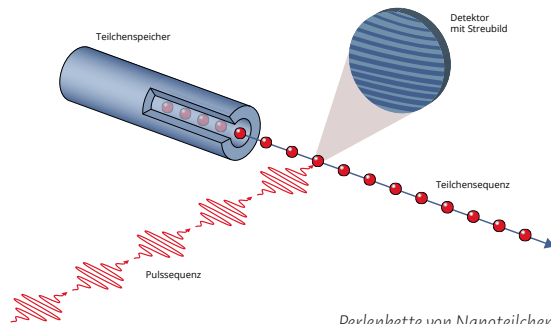
Prof. Dr. Stefan Eisebitt (TU Berlin)

Doppelpulse aus der Strahlung von Freie-Elektronen-Lasern sind der Schlüssel zur Erforschung ultraschneller physikalischer Vorgänge. Welche dynamischen Prozesse in nanoskopischen Systemen auf der weitgehend unerforschten Zeitskala von Femto- bis Pikosekunden ablaufen, können die normalen Pulssequenzen des European XFEL nicht abbilden. Dazu ist der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen zu lang. Zu kürzeren Zeitabständen kann eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit führen, doch am Forschungsinstrument Materials Imaging and Dynamics (MID) des European XFEL fehlt eine solche bislang.

Ziel dieses Projekts ist es, eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit für harte Röntgenstrahlung am European XFEL zu entwickeln und in der dortigen Optikhütte des MID-Instruments in Betrieb zu nehmen. Die Einzelkomponenten können in den präzisionsoptischen Laboren an der TU Berlin und an Synchrotronstrahlungsquellen charakterisiert werden. Das Instrument teilt einen Einzelpuls in eine Folge zweier Pulse und macht deren Zeitabstand bis hin zu maximal achthundert Pikosekunden regulierbar, mit einer Genauigkeit von wenigen Femtosekunden. So können auch schnelle Prozesse im Femtosekundenbereich beobachtet werden. Der zweite Puls erreicht sein Ziel später, weil er von Kristallen auf einen Umweg geleitet wird: Mithilfe von sogenannten Bragg-Reflexen am Kristallgitter kann harte Röntgenstrahlung um große Winkel abgelenkt werden. Verglichen mit alternativen Verfahren, die kleine Ablenkwinkel nutzen, bleibt das in diesem Projekt entwickelte Instrument kompakt. Dadurch gewinnt man die nötige Stabilität, um die Verzögerungszeiten über einen großen Bereich sehr präzise regulieren zu können – eine wichtige Voraussetzung für die Erforschung extrem kurzer Prozesse in Nanomaterialien.

Foto rechts: Berliner Forscher bereiten eine magnetische Probe für ein Röntgenstreuungsexperiment an FLASH vor.





*Perlenkette von Nanoteilchen:
Durch diese Präparation im universellen Teilchenspeicher lassen sich Teilchen- und Lichttaktung synchronisieren. So wird jeder Einzelpuls effizient genutzt und das Experiment gewinnt schneller an statistischer Signifikanz.*

PROJEKTNAME
Labor zur Einzelanalyse von funktionellen Nanopartikeln



PROJEKTLEITER
Prof. Dr. Thomas Leisner (Universität Heidelberg),
Prof. Dr. Eckart Rühl (FU Berlin)

JEDER SCHUSS EIN TREFFER

Erst die separate Belichtung erhellt, wie Nanoteilchen funktionieren und sich funktionalisieren lassen. Was tun, wenn sie immerzu verklumpen? Wie an einer Perlenkette aufreihen!

Einige Nanopartikel sind als funktionelle Bestandteile in neuartigen Materialien, Katalysatoren und biologischen Systemen Gegenstand der Material-, Umwelt- und Lebenswissenschaften. Ihre funktionellen Eigenschaften ergeben sich aus einem Zusammenspiel von Geometrie, elektronischen Eigenschaften und chemischer Reaktivität, für deren Analyse sich Röntgenbeugung und Röntgenfluoreszenz an Freie-Elektronen-Lasern etabliert haben. Könnte man statt wie bisher einen Schwarm je ein einzelnes Nanopartikel mit den FEL-Pulsen bestrahlen, ließen sich Struktur und elektronische Eigenschaften der Einzelpartikel genauer untersuchen, ohne über zahlreiche Partikel zu mitteln. Für solche Experimente müssen die Teilchen individuell in der Bestrahlungszone positioniert werden.

Ziel dieses Projekts ist es, einen vielseitig nutzbaren Aufbau zur isolierten Untersuchung funktioneller Nanopartikel an Freie-Elektronen-Lasern zu schaffen. In einem elektrodynamischen Teilchenspeicher liegen die Partikel im Abstand von einem zehntel Millimeter wie Perlen an einer Schnur aufgereiht. Da sie einfach elektrisch geladen werden, kann mithilfe der Felder je ein Teilchen ins Wechselwirkungszentrum hinein und nach Auftreffen des Pulses zur anderen Seite hinaus gelenkt werden, damit das nächste folgen kann. Die Pulstaktung, die bei Freie-Elektronen-Lasern vorhanden ist, wird somit optimal mit der Teilchentaktung synchronisiert, sodass jeder FEL-Puls genutzt wird. Darüber hinaus werden neuartige Detektoren und Spektrometer zur Analyse der Röntgenfluoreszenz zu den in der Experimentierkammer bereits vorhandenen Röntgenstreuendetektoren hinzugefügt. Aufgrund des modularen und mobilen Konzeptes kann der Aufbau an Freie-Elektronen-Lasern weltweit eingesetzt werden.

JEDER SCHUSS VIELE TREFFER

Kleinen Nanoteilchen lassen sich nur mit großem Aufwand Informationen entlocken. Eine ultrakalte Falle sortiert die Teilchen nach Masse und Zustand und verspricht mehr Signifikanz.

PROJEKTNAME

Ultrakalte Probenumgebung
für die Rumpfniveau-
Photoelektronenspektroskopie
massenselektierter Cluster

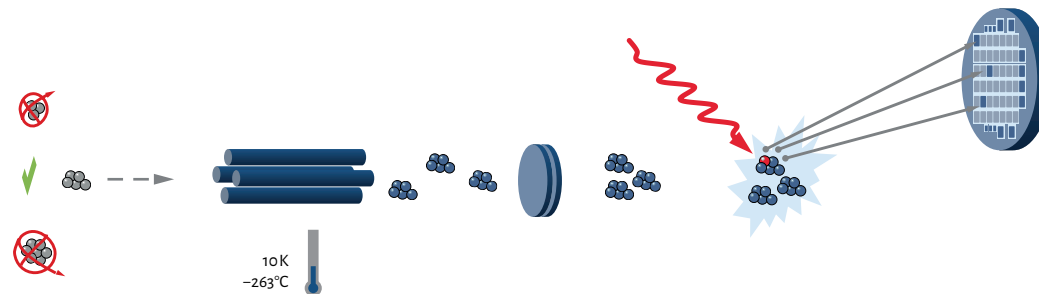


PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Karl-Heinz Meiwes-Broer
(Universität Rostock)

Cluster bestehen aus wenigen hundert Atomen und bilden den Übergang zwischen großen Molekülen und Festkörpern. An ihnen lässt sich unter anderem studieren, wie Eigenschaften von Festkörpern entstehen. So können einige wenige Atome mehr ausreichen, um einen nicht-metallischen Cluster metallisch werden zu lassen. Solche Ergebnisse liefert die Photoelektronenspektroskopie: Man misst die Energie stark gebundener Elektronen, der sogenannten Rumpfelektronen, nachdem sie ein intensiver FEL-Röntgenblitz aus dem Cluster gelöst hat. Um ausreichend Antwortsignal von den Clustern zu erhalten, benötigt man viele von ihnen. Um ihre Eigenschaften in Abhängigkeit der Zahl ihrer Atome zu ermitteln, muss man sie nach Größe auswählen können. Um auszuschließen, dass sich die Cluster aufgrund verschiedener Quantenzustände unterschiedlich verhalten, sollten sie zudem auch sehr kalt sein.

Ziel dieses Projekts ist es, eine ultrakalte Clusterionenfalle zu konstruieren, worin Cluster gezielt nach Zustand und Atomzahl präpariert werden. Haben sich in der Falle viele hunderttausend Teilchen angesammelt, werden diese durch elektrische Wechselfelder zu Paketen gruppiert und mit den Lichtpulsen synchronisiert. Man gewinnt so aus jedem einzelnen Puls des Freie-Elektronen-Lasers das maximale Messsignal. Die komplette Experimentierstation ist für das SQS-Instrument am European XFEL ausgelegt. Nach Projektende ermöglicht sie dort allen Wissenschaftlern, hochangeregte Clusterzustände, die chemische Umgebung von Clusteratomen und weitere grundlegende Clustereigenschaften zu studieren. Diese Kenntnisse nutzen unter anderem beim Design funktioneller Nanomaterialien, etwa Katalysatoren in Chemie und Industrie.



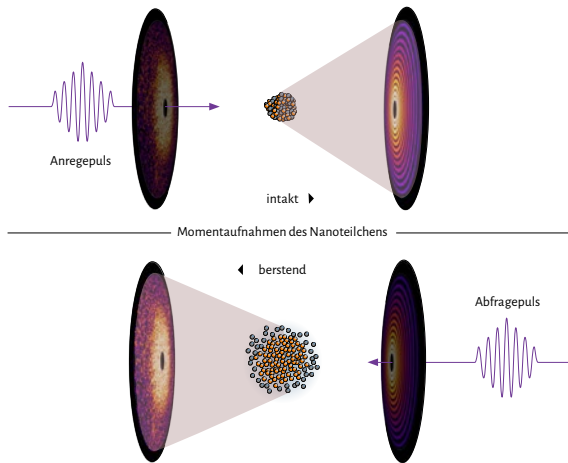
1. Cluster bestimmter
Größe auswählen

2. Cluster sammeln
und kühlen

3. Cluster in Paketen
weiterleiten

4. Clusterpakete mit Lichtblitzen
wechselwirken lassen

5. Energie frei werdender
Elektronen messen



Im Nanokino wird die Hauptrolle frameweise neu besetzt. Ob zwei Teilchen einander »doublen« können, kann nur im intakten Teilchenzustand entschieden werden. Dank des zweiten Detektors ergibt sich von jedem Teilchen ein Bildpaar. Die erste Momentaufnahme eines jeden Bildpaares wird genutzt, um die intakten Teilchenzustände zu vergleichen.

PROJEKTNAME

Dynamik einzelner Nanoteilchen in Femtosekunden-Zeitlupenfilmen mit ultrakurzen Röntgendoppelpulsen



PROJEKTLEITER/IN

Prof. Dr. Bernd von Issendorff (Universität Freiburg),
 Prof. Dr. Thomas Möller (TU Berlin)
 Dr. Daniela Rupp (TU Berlin)

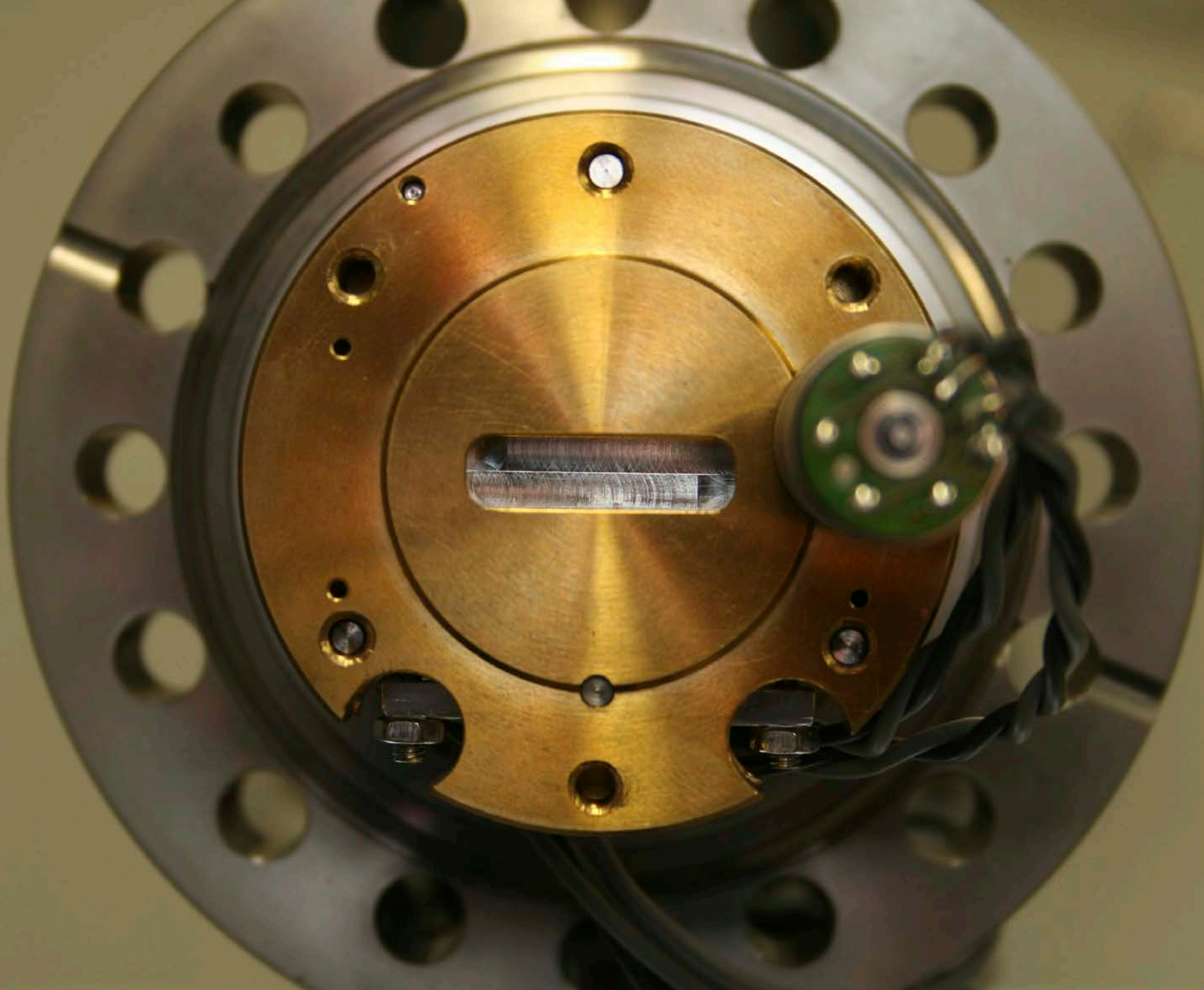
NANOGROßES KINO!

Neuerdings kann die dreidimensionale Form einzelner Nanoteilchen in Schnappschüssen aufgenommen werden. Hier folgt die Erweiterung auf Filme mit mehr als zwei Bildern.

Trifft ein intensiver Röntgenpuls auf ein Nanoteilchen, verändert es sich rasch und stark. Innerhalb von milliardstel Sekunden – quer durch ein menschliches Haar braucht Licht rund hundertmal so lange – lösen sich Elektronen und es entsteht ein Plasma, bis das Teilchen schließlich birst. Kann man ultraschnelle Prozesse wie diesen in einem Zeitlupenfilm abbilden, ergeben sich daraus wichtige Kenntnisse über die Eigenschaften der Partikel und der zugrunde liegenden atomaren Wechselwirkungen. Kenntnisse, die neben der Nanophysik auch Forschungsgebiete bereichern, in denen die Anregung und Dynamik kleiner Strukturen untersucht werden – etwa die Photonik oder die Biophysik.

In diesem Projekt wird die Bewegung eines Teilchens im freien Flug durch ein neuartiges Verfahren erstmals in einem echten 3D-Film sichtbar gemacht. Dazu werden in Berlin ein System aus zwei vis-à-vis positionierten Detektoren und eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit zur Erzeugung von Doppelpulsen entwickelt und in Experimenten unter anderem an Metall-Nanoteilchen erprobt, welche durch eine speziell hierfür in Freiburg entwickelte Quelle erzeugt werden. Aus gegenüberliegenden Richtungen kommend, treffen die zwei Pulse kurz nacheinander auf ein fliegendes Nanoteilchen. Jeder Puls hinterlässt auf einem separaten Detektor ein Beugungsbild des Teilchens, woraus sich dessen dreidimensionale Form zum jeweiligen Zeitpunkt berechnen lässt.

So erhält man von ein und demselben Teilchen ein Paar aus Schnappschüssen, die wenige Femto- bis sechshundert Pikosekunden auseinanderliegen. Zu diesem Minimalfilm aus zwei Frames kann je ein weiterer Frame hinzugefügt werden, wenn er aus einem Bildpaar eines zu Anfang ähnlichen Teilchens stammt. Der Film wird so immer detaillierter und zeigt schließlich das ultraschnelle Bersten in Zeitlupe. Die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit wird an der Experimentierstation CAMP von FLASH als erweiternder Teil dauerhaft installiert. Die Nutzer können dort Anrege-Abfrage-Experimente erstmals auch mit zwei FEL-Pulsen durchführen, statt wie bisher einen FEL-Puls mit einem optischen Laserpuls synchronisieren zu müssen – eine gute Voraussetzung für neue Einblicke in ultraschnelle Prozesse.





MAßNEHMER MAßSCHNEIDERN

An FEL-Messplätzen herrscht notorischer Platzmangel. Daher sind raumsparende modulare Konzepte für Messinstrumente gefragt.

*Foto auf Seite 19:
Der Eintrittspalt des Spektrometers stellt eine sogenannte virtuelle Lichtquelle dar. Je weiter der Spalt, desto größer die virtuelle Quelle und desto intensiver das Licht im Spektrometer. Ein Feinmotor (rechts) weitet den Spalt in jedem Schritt um zehn Mikrometer, gerade einmal so viel wie eine Lage Aluminiumfolie.*

*Foto links:
Fünfzig hauchdünne Schichten aus Silizium und Molybdän verleihen diesem Multilagenspiegel ausgezeichnete röntgenoptische Eigenschaften. So kann der Reflexionsverlust im Interferometer auf 35 Prozent verringert werden – ein guter Wert im extrem ultravioletten Spektralbereich. Zur Ansteuerung dienen die Halterung aus der Jenaer Werkstatt sowie eine Piezobühne.*

PROJEKTNAME

FEL-spezifische Röntgendiagnostik
zum Studium dichter Plasmen



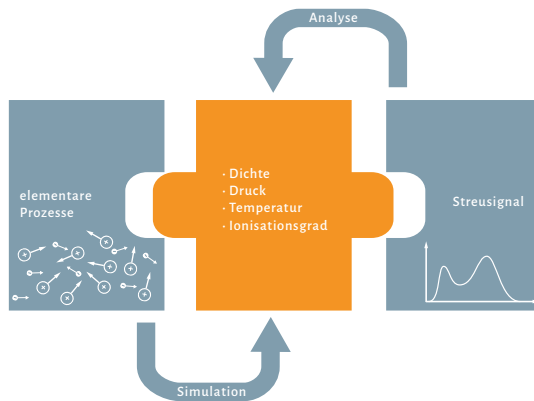
PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Gerhard G. Paulus (Universität Jena)

Zur Untersuchung dichter Plasmen eignen sich, je nach Dichte, energiereiche ultraviolette Strahlung oder Röntgenstrahlung von Freie-Elektronen-Lasern. Neben den charakteristischen Wellenlängenbereichen stellt auch die kompakte und spezielle Architektur an den Messplätzen von FLASH oder European XFEL strikte Anforderungen an Spektrometer und Interferometer. Beispielsweise steht an den Vakuumkammern, die die Absorption der FEL-Strahlung durch Luft verhindern, für Messgeräte kaum Raum zur Verfügung. Kein handelsübliches prêt-à-mesurer Instrument dient mit der gewünschten spektralen Auflösung und den passenden Abmessungen zugleich. In diesem Projekt werden Interferometer und Spektrometer entwickelt, die für die Bedingungen bei FLASH und European XFEL optimiert sind. Dazu ist es nötig, die geeigneten Einzelkomponenten genau zu charakterisieren, zum Beispiel hinsichtlich ihrer Reflektivität oder Dispersion bei den eingesetzten Wellenlängen. Halten die Beugungsgitter, Multilagenspiegel und Kristallbeugungsoptiken der Prüfung stand, werden sie zum Bausatz zusammengestellt und vor Ort montiert. Besonders durch den modularen Ansatz ist die Lösung flexibel. Die Komponenten können für andere Experimente weiterverwendet werden. Somit wird man neben der Geometrie auch licht- und probenspezifischen Anforderungen wie Quellgröße, Photonenzahl und Repetitionsraten des jeweiligen Plasmaexperiments gerecht.

ERKENNTNIS DURCH DATENDECODIERCODES

Daten aus FEL-Experimenten mit Plasmen sind kryptisch. Eine theoretische Vor- und Nachbereitung der Experimente macht Messdaten menschenlesbarer.



Dichte, Druck, Temperatur, Ionisationsgrad. Diese Größen charakterisieren ein Plasma und bilden zudem ein Bindeglied zwischen Modell und Messung. Sie lassen sich sowohl durch eine Simulation vorhersagen als auch durch Analyse der Streusignale gewinnen.

PROJEKTNAME

Licht-Materie-Wechselwirkung und Diagnostik von Materie unter extremen Bedingungen

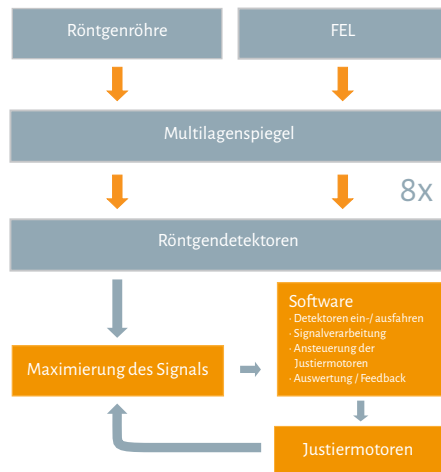
Erkenntnisse

PROJEKLEITER

Prof. Dr. Ronald Redmer (Universität Rostock)

Die Thomsonstreuung von intensiver Röntgenstrahlung spielt eine wichtige Rolle bei der Untersuchung von dichten Plasmen mit Anrege-Abfrage-Experimenten an Freie-Elektronen-Lasern. Ein erster kurzer Laserpuls regt die Materie in einen extremen Zustand an, in dem geladene Teilchen rasch ihre Bindungen lösen. Einige hundert Femto- bis wenige Pikosekunden danach fragt ein zweiter Puls ab, wie die im System deponierte Energie umverteilt wurde und wie sich das System wieder in den Ausgangszustand zurück entwickelt hat. Aus dem gemessenen Streuspektrum möchte man Informationen über die elementaren Wechselwirkungsprozesse gewinnen, insbesondere die Ionisations- und Rekombinationsprozesse. Experimente an dichten Plasmen bedürfen daher einer gründlichen theoretischen Vor- und Nachbereitung, um die gemessenen Daten deuten zu können.

Ziel dieses Projekts ist es, die Theorie zur Interpretation der gemessenen Spektren weiterzuentwickeln und damit zu einem besseren Verständnis von Materie unter extremen Bedingungen beizutragen. Zustandsgrößen wie die orts- und zeitaufgelösten Profile von Dichte, Temperatur und Ionisationsgrad des Plasmas sind dabei das Bindeglied zwischen dem gemessenen Streusignal und den elementaren Prozessen der Wechselwirkung. Die Zustandsgrößen des Plasmas werden mithilfe von Analysemethoden aus dem Streuspektrum errechnet und mit Ab-initio-Simulationen verglichen. Andere numerische Methoden, allen voran Particle-in-Cell- und Radiation-Hydrodynamics-Simulationen, werden verwendet, um die räumliche und zeitliche Entwicklung des Plasmas während und nach der Laser-Plasma-Wechselwirkung vorherzusagen. Um die Elementarprozesse in diesem bisher noch wenig erforschten Materiezustand besser zu verstehen, wird die Modellbildung verbessert, bis Simulation und Messung im Einklang stehen. Die im Experiment gewonnenen thermodynamischen Größen werden in der Physik dichter Plasmen und auch in angrenzenden Forschungsgebieten, besonders in der Astrophysik, benötigt. Dort können sie helfen, Modelle zur Entstehung, Struktur und Evolution von Planeten, Braunen Zwergen und Sternen zu verbessern.



Justierung der Strahlteiler- und Verzögerungseinheit im Flussdiagramm.
In Blau: Hardware, in Orange: Regelkreis.

Bau von Diagnostik- und Justiereinrichtungen für die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit am Undulator SASEz des European XFEL



PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Helmut Zacharias (Universität Münster)

FERNSTEUERUNG FÜR DIE SUPERZEITLUPE

Messzeit ist knapp. Das zeitintensive Justieren der verwendeten Strahlteiler- und Verzögerungseinheit erfolgt daher am besten automatisiert.

Die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit ist eine wichtige Voraussetzung für die in der Ultrakurzzeitphysik typischen Anrege-Abfrage-Experimente. Sie präpariert das Licht der Freie-Elektronen-Laser für das Experiment, indem sie aus einem einzelnen Rohpuls eine zeitlich präzise regelbare Folge zweier Pulse erzeugt. Dem fruchtbaren Betrieb im Experiment gehen aber einige repetitive Schritte der Justierung voraus. Zum Beispiel müssen die speziellen Umlenkspiegel genauer als hunderttausendstel Grad eingestellt werden. Manuell ausgeführt, verlangen diese Schritte Akribie, Routine und nicht zuletzt Zeit – auf Kosten der wertvollen Strahlzeit.

In diesem Projekt wird eine Automatisierungslösung für die Justierung der Strahlteiler- und Verzögerungseinheit am SASEz-Undulator des European XFEL entwickelt. Für den Justiervorgang werden die FEL-Pulse durch die Strahlen eines Laborlasers und einer Röntgenröhre ersetzt. Diese werden in eine Anordnung geeigneter Detektoren und Strahlmonitore eingespeist, die den Strahlenverlauf überwachen können. Auf Basis dieser Signale dosiert eine Software die Einstellsignale für die Spiegel. Sind die geplanten Hard- und Softwarekomponenten erst implementiert, gestalten sie das Experimentieren mit der Strahlteiler- und Verzögerungseinheit deutlich nutzerfreundlicher.

PIONIER-EQUIPMENT AUS DEM SUPERCOMPUTER

*Bei Pionier-Experimenten mangelt es an Erfahrungswerten.
Erkenntnisse aus Computerberechnungen helfen,
Experimentdesign und Datenanalyse zu optimieren.*

*Foto rechts:
Rechenkünstler vor Rechencluster—
die Vorbereitung der Gleichungen
erfolgt handschriftlich.
(Sebastian Bauch, Universität Kiel)*

PROJEKTNAME

Zeitaufgelöste Photoionisation am FEL
– nichtlineare Effekte, Korrelationen und
Kohärenz in Atomen und Molekülen

Erkenntnisse 

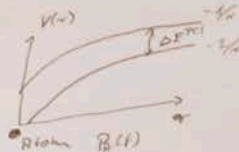
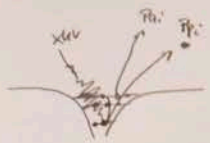
PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Michael Bonitz (Universität Kiel)

Gibt ein Atom nach Auftreffen eines Lichtpulses ein stark gebundenes Elektron frei, verbleibt es für einige milliardstel Sekunden in einem energetisch angeregten Zustand. In Folge dieses Energieüberschusses kann sich ein zweites Elektron lösen und das erste, auf dessen Kurs folgend, sogar überholen. Ein Experiment aus dem abgeschlossenen Forschungsschwerpunkt »FLASH« demonstrierte, wie wichtig eine akkurate quantenmechanische Beschreibung dieses »Quantenrennens« und anderer Korrelationseffekte bei der zeitaufgelösten Photoionisation durch Freie-Elektronen-Laser ist: Durch das Überholen waren die Messergebnisse bis zur Unlesbarkeit beeinflusst und konnten erst nach einer theoretischen Quantifizierung des Effekts entschlüsselt werden.

In diesem Projekt werden alle relevanten Vorgänge bei der zeitaufgelösten FEL-Photoionisation von Atomen experimentnah modelliert – vom anfänglichen Vielteilchenzustand des gewählten Atoms über die Anregung durch einen spezifischen FEL-Puls bis zum Nachweis mit einer neuartigen Schmierbildkamera. Dabei ist es wesentlich zu verstehen, wie sich die Elektronen als Gesamtheit während der ultraschnellen Prozesse arrangieren, insbesondere unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abstoßung. Dies gelingt nur,

wenn man zeitabhängige Gleichungen verwendet und zudem die komplette Vielteilchenkonfiguration in die Gleichungen einbezieht. In aufwändigen numerischen Verfahren, kombiniert mit Näherungsansätzen wie zeitabhängiges Restricted-Active-Space Configuration-Interaction, wird die zeitabhängige Schrödingergleichung, die grundlegende und ohne Ausnahme exzellent verifizierte Gleichung der Quantenmechanik, mithilfe von Supercomputern gelöst. So gelangt man zu einer vollständigen Beschreibung der Prozesse vor und während der Detektion mit der Schmierbildkamera. Diese ermöglicht es, die Information über die rasche zeitliche Abfolge ausgelöster Elektronen auf eine besser messbare Geschwindigkeitsmodulation zu übertragen. Die Modulation kommt dabei durch die zeitlich wechselnde Feldstärke einer zeitgleich überlagerten elektromagnetischen Terahertz-Welle zustande. Damit der Rückschluss auf die Zeiten zuverlässig glückt, wird die genaue Auswirkung des Wechselfeldes auf die Gesamtheit der Elektronen berechnet. Die Arbeiten aus diesem Projekt bilden eine wichtige Stütze zur Konzeption und Bewertung auch zukünftiger Experimente: Erst mit einer derart detailgetreuen Modellierung der realen Abläufe lassen sich Messungen stichhaltig analysieren und bewerten.



C

$$P_f(t_x) = P_0 - A(t_x)$$

$$\rightarrow E^{rel} = \frac{1}{2} [P_1 - P_2(t_x)]^2 \Delta t^{rel} = \frac{P_1^2}{2}$$

$$\Delta E^{rel} = \pm \frac{1}{4}$$

Press

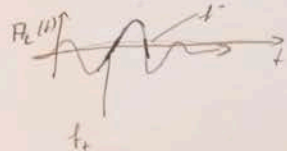
Wahrscheinlichkeitsverteilung
Abbildung durch Spektralansatz

da Protonen

$$f_+(E) = \sqrt{\frac{E}{4}} \frac{\sqrt{E^2 - P^2} - E}{\sqrt{E^2 + P^2}} e^{-\frac{1}{4} E} e^{-\frac{1}{4} \sqrt{E^2 + P^2}}$$

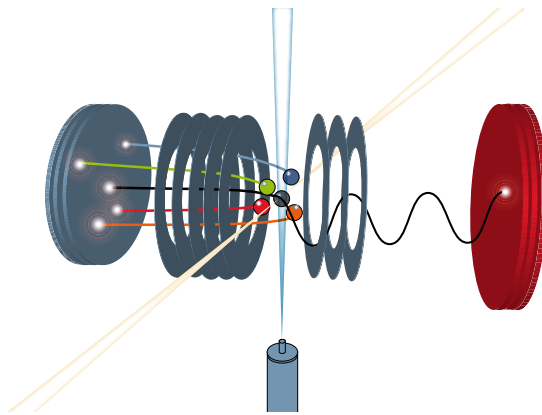
Wat
(dtr
FC
re
P
t

$$f_-(E) = 2\sqrt{\frac{E}{4}} \left(\frac{E}{\sqrt{E^2 - P^2}} \cosh \frac{1}{4} \sqrt{E^2 - P^2} - \sinh \frac{1}{4} \sqrt{E^2 - P^2} \right)$$



Protonen





Coulomb-Explosion im COLTRIMS: Gelöst durch die Energie des Lichtblitzes, fliegen die geladenen Bruchstücke des zuvor intakten Gasmoleküls auf die Detektorschirme, wo sie gleichzeitig nachgewiesen werden. Die elektrischen Felder der Ringelektroden lenken Ionen (bunt) nach links, das Elektron auf einer Spirale nach rechts.

PROJEKTNAME

Ein COLTRIMS Reaktionsmikroskop für Vielteilchen-Koinzidenz-Experimente am European XFEL



PROJEKTLLEITER

Prof. Dr. Reinhard Dörner (Universität Frankfurt),
Priv.-Doz. Dr. Robert Moshhammer
(Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg)

KOLLISION UNTER GENORMTEN BEDINGUNGEN

Vielteilchendynamik ist bedeutsam von der Supraleitung bis zur Selbstorganisation des Lebens. Ein Spektrometer am European XFEL hilft, die Dynamik systematisch zu untersuchen.

Wird ein Molekül durch Photonen mehrfach ionisiert, ist es nicht mehr stabil und zerbricht in einer Coulomb-Explosion. Die entstandenen Fragmente – Elektronen und Ionen – erreichen durch die gegenseitige Abstoßung hohe Impulse, deren Richtungen korreliert sind. Die COLTRIMS-Technologie bietet die Möglichkeit, eine Coulomb-Explosion zu rekonstruieren. Indem die Flugzeiten der Bruchstücke und deren Auftrefforte ladungssortiert auf zwei gegenüberliegenden Detektoren gemessen werden, können die Teilchenbahnen unter Berücksichtigung ihrer Korrelation bis zum Reaktionsort zurückverfolgt und die registrierten Bruchstücke ihrer Entstehungsreaktion zugeordnet werden. Problematisch wird die Analyse, wenn sich kontaminierende Restgasfragmente unter die Reaktionsfragmente mischen, weil das so entstehende Untergrundsignal die Auflösung reduziert.

Ziel dieses Projekts ist es, ein COLTRIMS-Reaktionsmikroskop für den Nutzerbetrieb am European XFEL zu konstruieren, das erstmals praktisch untergrundfreie Vielteilchen-Koinzidenz-Messungen auch im Anrege-Abfrage-Modus ermöglicht. Das anfangs in der Kammer befindliche Restgas wird mit einem Vakuumsystem bis auf eine milliardenfach dünnere Teilchenkonzentration abgepumpt, bevor das Untersuchungsmedium als mikrometerfeiner, überschallschneller Gasstrahl eindringt. Im Ultrahochvakuum ist sichergestellt, dass Puls des Freie-Elektronen-Lasers und Gasmolekül ungehindert vom Restgas kollidieren. Zur Rekonstruktion des Berstvorgangs nötige Anfangsparameter wie Geschwindigkeit, Reinheit und Temperatur des Gasstrahls lassen sich genau kontrollieren. Vakuum und Gasstrahl sorgen also für genormte Bedingungen bei den Kollisionen. Damit erlaubt das Instrument die derzeit umfassendsten und detailliertesten Experimente zur Quantendynamik von Mehrteilchensystemen in intensiven Röntgenlaserpulsen. So wird es zum Beispiel möglich sein, die Isomerisierung in raumfesten Molekülen durch zeitaufgelöste Photoelektronenbeugung sichtbar zu machen oder die Molekulardynamik mit Röntgenstrahlen zu treiben und gleichzeitig zeitaufgelöst zu verfolgen.

PRESTO STACCATO ACCURATO

Mit seiner rasanten Pulsrate diktiert der European XFEL Sensorentwicklern das Tempo. Ein neues Spektrometer kann im Takt von billionstel Sekunden auch Einzelpulse analysieren.

PROJEKTNAME

Hochauflösendes Fluoreszenzspektrometer für den Spektralbereich zwischen 5 und 110 Nanometern für Experimente an Freie-Elektronen-Lasern mit hoher Repetitionsrate



PROJEKTLEITER

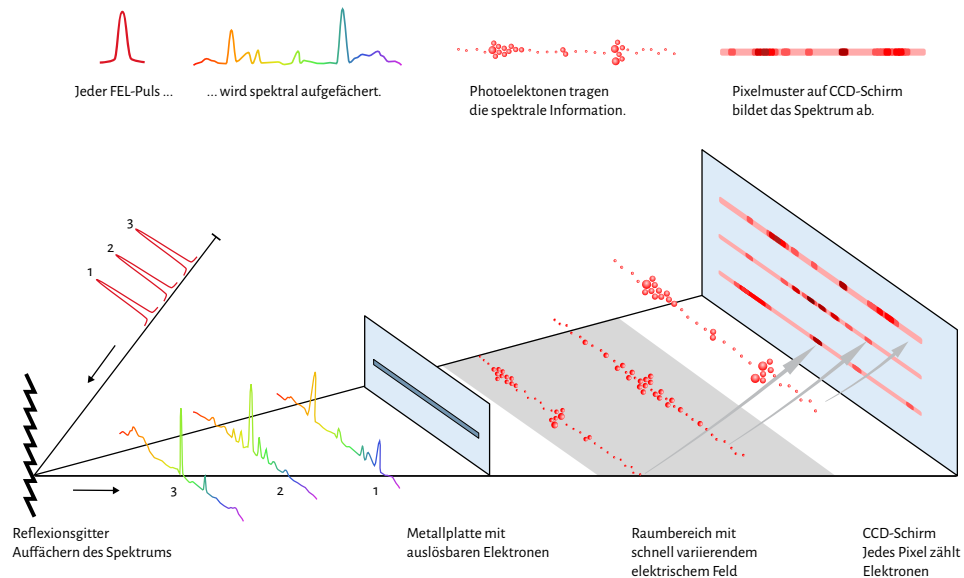
Prof. Dr. Arno Ehresmann
(Universität Kassel)

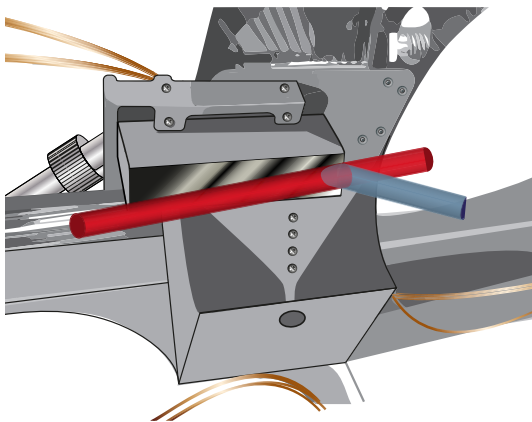
Das Fluoreszenzspektrometer übersetzt spektrale und zeitliche Information der aufgenommenen Strahlung in räumliche.

Jede Zeile auf dem Schirm gibt die Energiezusammensetzung – das Spektrum – eines Pulses wieder. Der »Zeilenumbruch« entsteht durch die Ablenkung der Elektronen im variierenden Feld.

Eine 16tel-Stakkatosequenz im Prestotempo und noch hunderttausendmal schneller: So rasant soll der European XFEL die Röntgenblitze aussenden. Die Blitze kommen in Gruppen von je 2700 und liegen darin weniger als eine millionstel Sekunde auseinander. Mit diesem Takt muss auch ein Nachweisgerät Schritt halten, will man jedem einzelnen Antwortsignal der untersuchten Probe die maximale Information entnehmen. Auch dieses Antwortsignal besteht aus schnell getakteten Einzelpulsen, zum Beispiel von einem zur Fluoreszenz angeregten Biomolekül. Übliche Geräte sind dafür nicht geeignet; sie mitteln viele Einzelpulse zu einem strukturlosen Signal, wie das Ohr die Schläge eines Trommelwirbels. Ziel dieses Projekts ist es, für das SQS-Instrument am European XFEL ein Fluoreszenzspektrometer zu konstruieren, mit dem sich Strahlung im Wellenlängenbereich von 5 bis 110 Nanometern von Puls zu Puls analysieren lässt. Die Pulse kommen

zu verschiedenen Zeiten am Spektrometer an und bestehen je aus Lichtquanten verschiedener Energien. Das Spektrometer bewirkt, dass die Lichtquanten am Detektorschirm räumlich sortiert auftreffen: Energiereichere liegen weiter rechts, spätere weiter unten. Zuerst lenkt ein Reflexionsgitter die Lichtquanten je nach Energie seitlich ab. Aus der Metallplatte dahinter löst der Puls einen Elektronenpuls aus, der dem ursprünglichen entspricht und anschließend durch ein schnell variierendes elektrisches Feld abgelenkt wird. Die Ablenkung ist umso stärker, je später die Elektronen entstanden sind. Mit der so erreichten Effizienz von Puls zu Puls lassen sich die Vorteile der hohen Repetitionsrate des European XFEL optimal nutzen. Da die Merkmale der einzelnen FEL-Pulse typischerweise variieren, fällt auch das Antwortsignal der Probe stets anders aus. Während langsame Sensoren diese Mustervielfalt kaschieren, macht das Spektrometer sie sichtbar.





Zäsur im Puls: Am Wellenfrontteiler wird der Puls entlang der Strahlachse »zerschnitten«. Das Verhältnis der entstehenden Teile lässt sich geometrisch regeln, ebenso die Verzögerungszeit zwischen beiden.

PROJEKTNAME

Entwicklung und Aufbau einer Strahlteilungs- und Verzögerungseinheit für ultraschnelle Pump-Probe-Experimente mit Photonenenergien bis 1500 Elektronenvolt am FLASH2



PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Helmut Zacharias (Universität Münster)

MIT PULS-ZÄSUR ZUR SUPERZEITLUPE

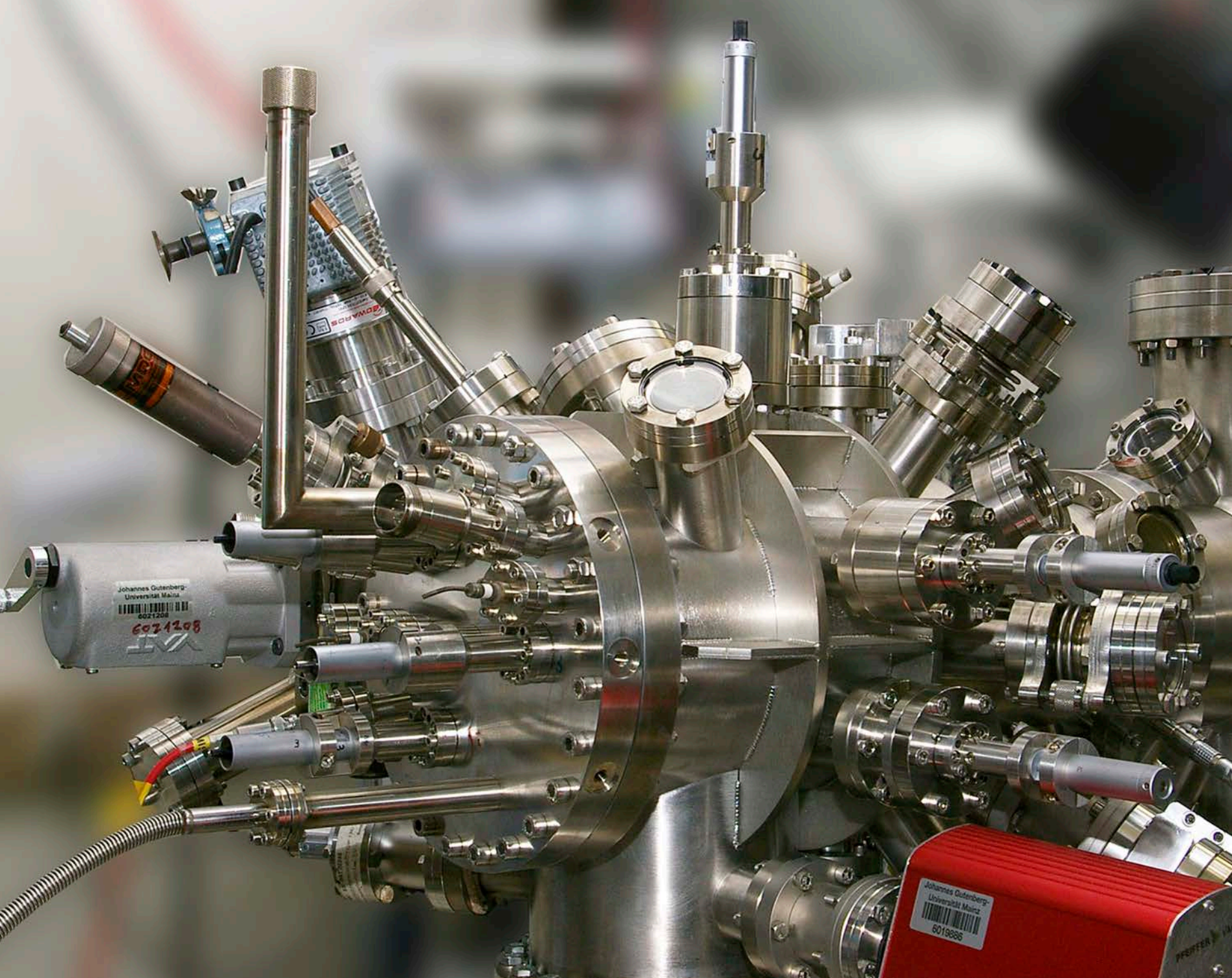
Die Wartezeit zwischen zwei FLASH-Pulsen ist zu lang, um atomare Prozesse zu verfolgen. Eine Lösung sind Doppelpulse, wofür je Einzelpulse zerschnitten werden.

Um ultraschnelle Vorgänge in Materie zu untersuchen, macht man in Anrege-Abfrage-Experimenten Schnappschüsse der Probe mit zwei kurzen Laserpulsen, die schnell, aber präzise regelbar aufeinanderfolgen. Lichtblitze von Freie-Elektronen-Lasern sind im Prinzip optimal dafür geeignet, da nur sie in wenigen Femtosekunden Dauer ausreichend Intensität liefern, um Materie zum Beispiel zu einem Plasmaübergang anzuregen. Aus technischen Gründen schwanken die Ankunftszeiten und die Merkmale der Einzelpulse für Präzisionsexperimente aber zu stark.

Ziel dieses Projekts ist es, an der Strahllinie FL24 von FLASH eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit aufzubauen. Eine Anordnung optimierter Spiegel teilt den Puls in zwei Pulse auf und führt sie auf verschieden langen Strahlwegen durch das Innere der Einheit. Das ermöglicht es, die Ankunftszeiten durch Streckenveränderung um bis zu zwölf Pikosekunden in beide Richtungen reproduzierbar zu verzögern. Zudem ist das Intensitätsverhältnis der zwei Pulse bei der Teilung regelbar, da der spiegelnde Wellenfrontteiler nur einen wählbar großen Teil des Pulsquerschnitts erfasst und umlenkt, während ihn der andere Teil, als einer der beiden entstehenden Pulse, ungehindert passiert. An dieser FLASH-Strahllinie steht Röntgenstrahlung bei Fundamentalenergien von fünfundzwanzig bis dreihundert Elektronenvolt sowie in den dritten und fünften Harmonischen daraus zur Verfügung. Häufig lassen sich die im Röntgenbereich kritischen Reflexionsgrade von Spiegeln nur für einen schmalen Spektralbereich optimieren. Die für die Strahlteiler- und Verzögerungseinheit konstruierten Spiegel reflektieren aufgrund flacher Umlenkwinkel von rund anderthalb Grad und Beschichtungen aus Nickel beziehungsweise Platin die Photonen aller Energiebereiche optimal. Zusätzlich wurde ein Konzept entwickelt, um thermische Veränderungen, Vibrationen und Druckeinflüsse zu umgehen.

Foto rechts: Durgamadhav Mishra (links) und Tino Noll (rechts), Helmholtz-Zentrum Berlin, konstruieren das Laserinterferometer, das in eine Strahlteiler- und Verzögerungseinheit für den European XFEL einging (-> 14).





Johannes Gutenberg-
Universität Mainz
6031208

6031208

Johannes Gutenberg-
Universität Mainz
6019686

PREPTEK

DIE GUTEN INS TÖPFCHEN

Die gegenseitige Abstoßung von Photoelektronen macht das Messergebnis ungenau. Werden informationsarme Elektronen frühzeitig aussortiert, bleibt der Störeffekt beinahe aus.

In der Photoelektronenspektroskopie schließt man aus der Impulsverteilung von Elektronen, die aus einem Material durch Lichtenergie ausgelöst wurden, auf die chemische Zusammensetzung von vorwiegend Festkörpern und deren Oberflächen. Mithilfe der intensiven Lichtblitze von Freie-Elektronen-Lasern lässt sich in volumensensitiven Messungen wesentlich weiter unterhalb der Materialoberfläche sondieren als es mit herkömmlichen Röntgenquellen möglich ist. Im Gegenzug verlässt mit jedem FEL-Puls gleich ein ganzer Schwarm von typischerweise tausend bis hunderttausend Elektronen das Material. Durch die hohe Ladung und die Fluktuationen im Schwarm kommt es zum sogenannten Raumladungsproblem, das die Aussagekraft von Messungen auf zwei mathematisch verschiedene Weisen begrenzt: Weil der Flug eines Elektrons sowohl vom gemittelten Elektronenschwarm als auch von einzelnen Elektronen daraus durch die Coulomb-Abstoßung beeinflusst wird, erreicht es das Spektrometer nicht mit dem gesuchten, ursprünglichen Impuls.

Ziel dieses Projekts ist es, ein Impulsmikroskop für den Nutzerbetrieb am European XFEL zur Verfügung zu stellen, das das Raumladungsproblem bis zur physikalischen Grenze minimiert. Der konzeptionell neue Ansatz beruht auf einer Separation der Elektronenklassen und auf Simulationsrechnungen zur Korrektur des berechenbaren Teils des Raumladungsproblems. Zunächst wird ein großer Störanteil der Elektronen mithilfe eines elektrischen Feldes ausgesondert. Diese sogenannten Sekundärelektronen sind keine Photoelektronen im strengen Sinn, da sie nicht durch Lichtenergie sondern durch Energieaustausch mit echten Photoelektronen oder angeregten Ionen aus dem Material entweichen. Ihr Herkunftszustand und Ionisationshergang sind sehr schwer zu rekonstruieren. Wesentlich informativer dagegen ist die Impulsverteilung des übrigen Promilles bis Prozents an Elektronen. Ihre Bahnen zum Detektor können im nun raumladungsreduzierten Szenario mit Particle-in-Cell-Verfahren simuliert werden, wobei auch der deterministische Effekt aus der Wechselwirkung mit der gemittelten Schwarmladung einbezogen wird. Mithilfe der Simulationsergebnisse lässt sich dann die Signatur des Effekts im gemessenen Spektrum identifizieren und herausrechnen. In Testmessungen an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II in Berlin zeigte das raumladungskorrigierte Impulsmikroskop im Vergleich mit konventionellen Spektrometern eine um eine Größenordnung verbesserte Auflösung.

links:

Foto des Impulsmikroskops. Grundvoraussetzung für die parallele Impulsbestimmung ist die präzise Ausrichtung der Probe durch einen Hexapod-Manipulator (mit Helium-Kühlung).

PROJEKTNAME

Raumladungskorrigiertes Elektronen-Impulsmikroskop für den harten Röntgenbereich am European XFEL

Sensoren 

PROJEKTLEITER/IN

Dr. Katerina Medjanik (MAXLAB, Lund),
Prof. Dr. Gerd Schönhense (Universität Mainz),
Prof. Dr. Wilfried Wurth (Universität Hamburg)

FLOTT UND EXAKT

Chemische Reaktionen laufen extrem schnell ab. Ein Spektrometer am European XFEL nimmt auch flüchtigste Zwischenzustände auf – neuer Antrieb für die Femtochemie.

Aus der charakteristischen Zusammensetzung der Röntgenstrahlung, die ein Molekül nach Wechselwirkung mit einem FEL-Puls abstrahlt, kann man die momentane Elektronenkonfiguration wie aus einem Fingerabdruck identifizieren. Die zeitaufgelöste Röntgenspektroskopie ermöglicht es somit, auch Sequenzen extrem kurzlebiger Zustände nachzuverfolgen – sogenannte transiente Zustände, die nur für einige billionstel bis milliardstel Sekunden existieren, aber über den Ablauf und das Ergebnis biochemisch und technisch relevanter Reaktionen entscheiden. Um derartige transiente Zustände zu beobachten, muss das Röntgenspektrum mit einer geeigneten Instrumentierung detektiert werden, bevor der Zustand vergeht. Diese Instrumentierung muss die erforderliche Zeitauflösung garantieren und zudem stabil und reproduzierbar betrieben werden können. Ziel dieses Projekts ist es, für das FXE-Instrument am European XFEL eine derartige Instrumentierung zur zeitaufgelösten Röntgenspektroskopie an Flüssigkeiten oder an Proben in flüssiger Lösung zu realisieren. Dazu wird eine Kombination aus Düsen für Hochgeschwindigkeits-Flüssigkeitsstrahlen, einem Detektor und einem von-Hamos-Röntgenspektrometer aufgebaut. Am Schnittpunkt der beiden probeführenden Flüssigkeitsstrahlen bildet sich stationär ein Flüssigkeitsblatt, das mit rund zwanzig Mikrometern fünfmal dünner ist als ein typisches Blatt Papier. Durch Variation der Blattdicke lassen sich dann in Anrege-Abfrage-Experimenten das Signal beziehungsweise die Zeitauflösung optimieren. Am Spektrometer sind sechzehn Kristallsegmente aus Silizium zylinderförmig um die Probe angeordnet. An ihren Kristallebenen werden die spektralen Anteile der Strahlung unter unterschiedlichen Winkeln reflektiert. Da sie sich somit auf dem Detektorschirm verteilen, kann zeitgleich das gesamte Spektrum gemessen werden. Je nach Struktur und Ausrichtung der Kristallsegmente kann man wahlweise bis zu sechzehn gleiche Spektren überlagern, um die Signalstärke zu erhöhen, oder Spektren unterschiedlicher Elemente im Molekül detektieren und somit auch die Entwicklungen sehr unterschiedlicher Reaktionspartner gleichzeitig verfolgen. Mit dieser Instrumentierung können am European XFEL beispielsweise extrem kurzlebige Zwischenzustände von Metallkomplexen untersucht werden, deren Eigenschaften unter anderem zum Verständnis und zur Lenkung photokatalytischer Reaktionen von entscheidender Bedeutung sind.

Foto rechts:

Das von-Hamos-Röntgenspektrometer im Test an PETRA III.

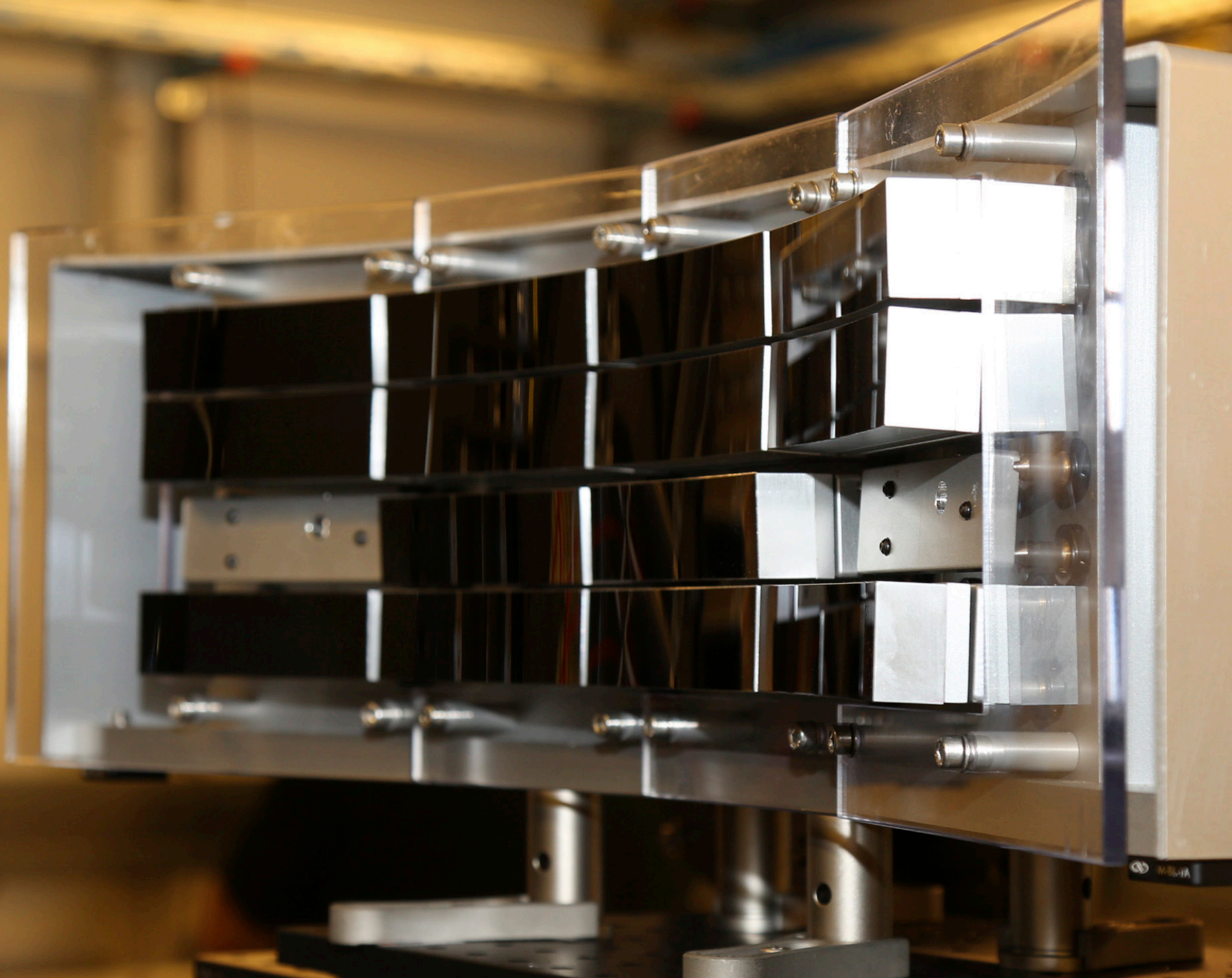
PROJEKTNAME

Aufbau einer Instrumentierung für zeitaufgelöste Röntgen-Raman-Spektroskopie auf Zeitskalen von Femto- bis zu Millisekunden



PROJEKTLLEITER

Dr. Christian Sternemann (TU Dortmund),
Prof. Dr. Metin Tolan (TU Dortmund)



WIDER DAS CHRONOLOGISCHE CHAOS

Wann ein FEL-Puls eintrifft, ist im Voraus ungewiss – folglich auch die Zeitordnung von Messdaten. Ein neues Diagnosegerät stellt sie wieder her.

Um an einem Freie-Elektronen-Laser ultraschnelle Vorgänge wie chemische Reaktionen oder Magnetwirbel zu »filmen«, erstellt man Momentaufnahmen und ordnet sie chronologisch. Jede Momentaufnahme entsteht, indem ein herkömmlicher Laser das System anregt, woraufhin ein FEL-Lichtblitz den momentanen Prozesszustand ablichtet. Als Zeitmarke, um die Aufnahmen zu ordnen, dient die eingestellte Verzögerungszeit der Pulse aber nur vermeintlich. Im Einzelfall weichen Ist- und Soll-Verzögerung nämlich regelungsbedingt voneinander ab. So bleibt die tatsächliche Reihenfolge der Aufnahmen ungewiss. Hinzu kommt, dass der Intensitätsverlauf von Puls zu Puls stark variiert – ein Makel, der intensitätssensible Experimente schwer reproduzierbar und kaum vergleichbar macht.

Ziel dieses Projekts ist es, eine lichtkontrollierte Schmierbildkamera zu einem zuverlässigen Diagnosegerät an FLASH zu machen, das Ankunftszeit und Intensitätsverlauf jedes Einzelpulses dokumentiert. Mithilfe dieser Daten lässt sich einer Momentaufnahme die richtige Zeitmarke samt Pulsprofil rückwirkend zuordnen und so das chronologische Chaos entwirren. Zu diesem Zweck wird der FEL-Puls zunächst durch einen Strahl aus Edelgas gelenkt, in dem er Photoelektronen freisetzt. Das zeitliche Profil dieser Photoelektronen entspricht demjenigen des Pulses. Mit einem elektromagnetischen Terahertz-Feld werden die Photoelektronen anschließend beschleunigt oder abgebremst – je nachdem, zu welchem Zeitpunkt sie emittiert wurden. Die Geschwindigkeitsänderung eines Elektrons dient dann als Kennzeichen seines Entstehungszeitpunkts. Aus diesen Informationen lassen sich das zeitliche Profil und die Ankunftszeit der Röntgenpulse ermitteln. Dieses Messverfahren stört die FEL-Blitze nicht, da nur wenige Photonen bei der Erzeugung der Photoelektronen verloren gehen. Daher kann die Technik parallel zu Experimenten zum Einsatz kommen.

PROJEKTNAME

Charakterisierung von ultrakurzen Röntgenpulsen



PROJEKTLEITER

Prof. Dr. Adrian L. Cavaliere
(Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie),
Prof. Dr. Florian Grüner (Universität Hamburg),
Dr. Andreas R. Maier (Universität Hamburg)

KONTROLLIERTE EMISSION

Kein FLASH-Puls gleicht dem anderen. Indem wohldefinierte Lasersignale im Undulator auf die Elektronenpakete einwirken, können besser reproduzierbare Pulse erzeugt werden.

NAMEN DER PROJEKTE

Echo-Enabled Harmonic Generation bei FLASH und FLASH2, Seeding in FLASH2 – Freie-Elektronen-Laser als Laserverstärker mit optimierter Pulsqualität



PROJEKLEITER

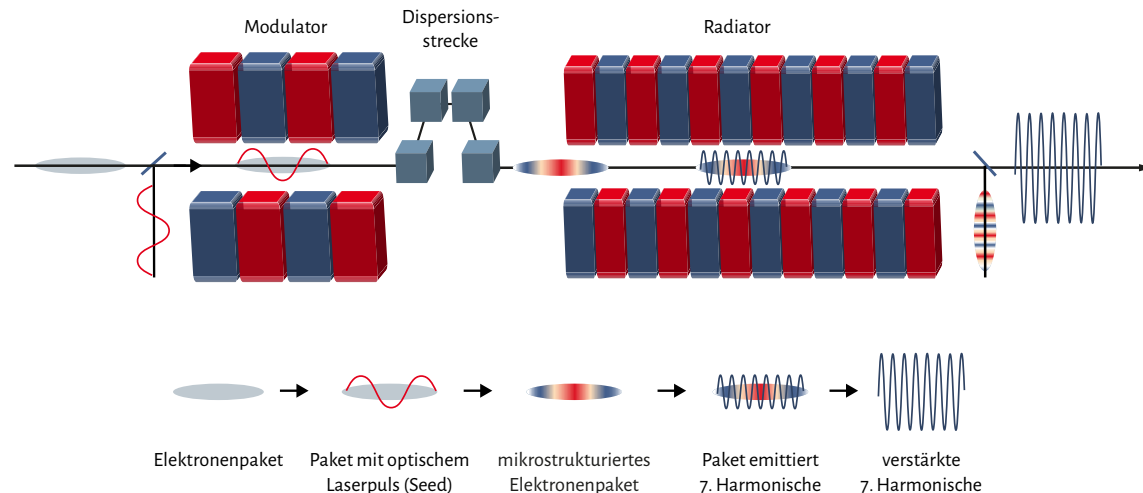
Prof. Dr. Markus Drescher (Universität Hamburg),
Dr. Velizar Miltchev (Universität Hamburg),
Prof. Dr. Shaukat Khan (TU Dortmund),
Prof. Dr. Jörg Rossbach (Universität Hamburg)

Es liegt in der Natur der spontanen Emission im SASE-Modus von Freie-Elektronen-Lasern, dass die Eigenschaften der einzelnen Lichtblitze variieren. Das sogenannte Seeding soll den Prozess der Strahlungserzeugung reproduzierbarer machen, die Brillanz der Pulse erhöhen und ihre Synchronisation mit externen Laserquellen optimieren. In die Undulatoren wird dazu gemeinsam mit den Elektronenpaketen ein Laserpuls eingespeist, dessen Qualitätsmerkmale die FEL-Strahlung annimmt und weiterträgt. In diesen zwei Projekten erproben Wissenschaftler der Universität Hamburg und der Technischen Universität Dortmund zwei Seedingverfahren: High-Gain Harmonic Generation, kurz HGHG, und Echo-Enabled Harmonic Generation, kurz EEHG. Durch die Laser-Seedpulse mit einer Wellenlänge von derzeit 266 Nanometern wird dem Elektronenpaket eine Dichtemodulation der gleichen Periode aufgeprägt. So präpariert, emittiert es in einem weiteren Undulator ein definiertes Spektrum aus der Laserfrequenz und ihren Vielfachen, den sogenannten Harmonischen. Eine ausgewählte Harmonische im extrem

ultravioletten Spektralbereich wird anschließend verstärkt. Bei EEHG erhält das Elektronenpaket eine noch spezifischere Dichtemodulation, indem es zweimal mit externen Laserpulsen wechselwirkt. Daraus entstehen in der Dichtemodulation noch höhere Harmonische mit ausreichender Intensität, um verstärkt zu werden. Bereits 2013 wurde im Experiment sFLASH das direkte Seeding bei einer Wellenlänge von 38 Nanometern demonstriert. Im April 2015 konnte dann erstmals HGHG-Seeding nachgewiesen werden. Bei 38 Nanometern, was der siebten Harmonischen des Seedpulses entspricht, wurden hochintensive Lichtpulse mit einer Energie von über zehn Mikrojoule erzeugt – im Schnitt mehr als tausendmal energiereicher als bei gleicher Undulatorlänge erzeugte SASE-Pulse. Damit ist der Weg offen für das Erzeugen hochintensiver Lichtpulse im extrem ultravioletten Spektralbereich, die alle Qualitätsmerkmale von Laserstrahlung aufweisen.

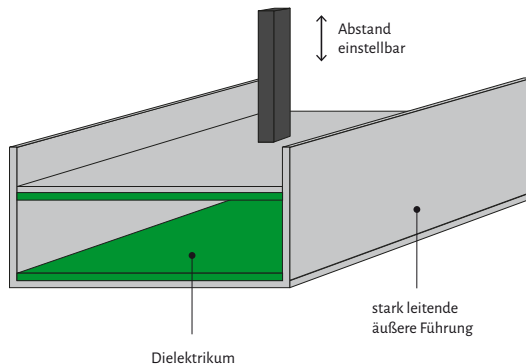
Oben: Vor der eigentlichen Lichterzeugung im Radiator durchlaufen die Elektronen einen (HGHG-Seeding) oder zwei (EEHG-Seeding, nicht im Bild) weitere Undulatoren, die Modulatoren. Mithilfe eines externen Lasers lässt sich eine spezifische Mikrostruktur im Elektronenpaket präparieren (bunte Ellipse) und letztendlich mehr Kontrolle über die Lichteigenschaften erhalten.

Unten: Phasen von Elektronen und Licht ohne Apparaturen. Für EEHG kann sogar die 11. Harmonische verstärkt werden.



ELEKTRONENPRÄPARATION FÜR PRÄZISERE ABSTRAHLUNG

Beschleuniger beschleunigen inhomogen. Für präzisere Lichtabstrahlung soll eine günstige und effiziente Komponente die Elektronenenergien wieder austarieren.



Ein Dechirper in Quaderform. Darin werden die Energien von Elektronen nach inhomogener Beschleunigung passiv wieder ausgeglichen. Die Stärke dieses Ausgleichs lässt sich über den Abstand der Dielektrika regeln.

PROJEKTNAME
Entwicklung von Wakefield-basierten Apparaturen zur Kompression der longitudinalen Phasenraumverteilung an ELBE

Elektronen

PROJEKTLEITERIN
Prof. Dr. Ursula van Rienen (Universität Rostock)

Die meisten Linearbeschleuniger beschleunigen inhomogen. Tritt ein Paket fast lichtschneller Elektronen aus dem letzten Beschleunigermodul, besitzen die Elektronen an der Stirnseite des Pakets weniger Bewegungsenergie als die Elektronen einige Mikrometer dahinter. Überholen die schnelleren Elektronen im weiteren Flug die langsameren, verschmiert das energetisch bereits uneinheitliche Paket zunehmend auch in der Länge. Lange Elektronenpakete und eine breite longitudinale Energieverteilung sind suboptimal für direkte Streuexperimente und wirken sich negativ auf die Merkmale des Lichts aus, das ein Elektronenpaket im Undulator eines Freie-Elektronen-Lasers abstrahlt.

Ziel dieses Projekts ist es, eine Komponente zu entwerfen, die die beschleunigungs-technisch bedingte Energieverbreiterung von Elektronenpaketen aus Linearbeschleunigern zu größten Teilen kompensiert. Dazu werden die elektrischen Felder berechnet, die sich ausbilden, wenn ein Elektron einen quader- oder zylinderförmigen Hohlraum in Längsrichtung mit nahezu Lichtgeschwindigkeit passiert. Da Metall und Leiterplatten – die Wandmaterialien des konzipierten »Dechirpers« – polarisierbar sind, entstehen sogenannte Kielfelder (Englisch: wakefields): Im Feld des Elektrons ordnen sich freie Ladungen in den Wänden um und erzeugen selbst ein Feld, das sich mit dem Elektronenfeld im Raum überlagert. Auf Basis der Rechnungen können Geometrie und Wandmaterialien der Struktur so gewählt werden, dass die höherenergetischen Elektronen am Ende des Pakets im Kielfeld der Stirnelektronen wie in den Kielwellen eines Bootes im richtigen Maß abgebremst werden. So verliert das Paket zwar insgesamt Energie, die Energiebreite nimmt jedoch ab. Die Berechnung der Felder kann aufgrund der Einfachheit der Struktur semi-analytisch erfolgen. Dadurch ist die Berechnung eines universellen Kielfelds möglich, aus dem sich die Kielfelder beliebiger Paketformen und -ladungen weitaus exakter ergeben, als es numerische Methoden erlauben. Die Kielfelder entstehen im Dechirper komplett passiv und haben zudem einen stärker homogenisierenden Effekt als Felder, die bislang mit großen und teuren Beschleunigerstrukturen aktiv erzeugt werden. Gelingt der Machbarkeitsnachweis, könnte sich der Kielfeld-basierte Dechirper in der Beschleunigungstechnik gegen aktive Komponenten durchsetzen.

IMPRESSUM

Redaktionsanschrift

Forschungsschwerpunkt
Freie-Elektronen-Laser
z. Hd. David Vogel
Luruper Chausee 149
22761 Hamburg
redaktion@fsp-fel.de

Realisation und Text

David Vogel

Gestaltung und Layout

Dr. Dirk Rathje

Illustrationen

Dr. Dirk Rathje (Seiten 1 und 2, Visualisierung des FEL-Prozesses auf Grundlage einer FLASH-Elektronensimulation von Guangyao Feng, DESY)
Britta von Heintze (Seiten 14 bis 36)

Lektorat

Ilka Flegel

Bildnachweise

Dr. Sebastian Roling (Seiten 12 und 13)
Prof. Dr. Stefan Eisebitt (Seite 15)
Vinzenz Hilbert (Seiten 19 und 20)
Stefanie Maack, CAU Kiel (Seite 25)
Manuel Fohler (Seite 29)
Thomas Berg (Seite 30)
Britta von Heintze (Seite 33)

Druck

Printmedien Mandany e. K.

Stand

Oktober 2015

Für nicht-kommerzielle Nutzung ist der Nachdruck – auch in Auszügen – unter Nennung der Quelle und der Autoren gestattet.

Wir danken dem BMBF für die Unterstützung und allen, die an der Entstehung der Broschüre mitgewirkt haben.



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung