

Hrsg.:
**Stabsstelle für Presse, Kommunikation
und Marketing**
D-57068 Siegen
Telefon: +49 271 740 4860
presse@uni-siegen.de

Siegen, den 15. Juli 2022

Ultraschnelle Oberflächenprozesse beobachtet

Eine Studie eines Teams von European XFEL und der Universität Siegen hat erstmals gezeigt, dass einzelne Röntgenlaserpulse genutzt werden können, um ultraschnelle Veränderungen an Materialoberflächen mit bisher unerreichter Tiefen- und Zeitauflösung zu beobachten.

Forschungserfolg in der Physik. Ein internationales Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unter der Leitung von European XFEL und der Universität Siegen hat erstmals gezeigt, dass die intensiven Pulse eines Röntgenlasers genutzt werden können, um ultraschnelle Prozesse, die auf und direkt unter Materialoberflächen ablaufen, mit bisher unerreichter Tiefen- und Zeitauflösung zu untersuchen. Damit können die Forschenden Prozesse erfassen, die mehr als eine Milliarde Mal schneller sind als das, was bisher auf diesem Gebiet beobachtet werden konnte. Die Ergebnisse, die das Team in der Fachzeitschrift *Physical Review Research* veröffentlicht hat, ebnet den Weg für vielfältige Anwendungen, die auf dem Verständnis von ultraschnellen Prozessen auf Oberflächen beruhen. Beispiele dafür sind die Laserbearbeitung von Materialoberflächen zur Schaffung maßgeschneiderter Strukturen im Nanomaßstab oder die Realisierung kompakter laserbasierter Teilchen- oder Strahlungsquellen.

Mit Hilfe intensiver Laserpulse lassen sich winzige Oberflächenstrukturen im Nanobereich mit optimierten optischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften erzeugen. Solche maßgeschneiderten Strukturen spielen eine entscheidende Rolle auf vielen Gebieten mit erheblicher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Auswirkung. Sie können zur Herstellung antimikrobieller Beschichtungen, zur Verbesserung der Verbindung von Zahnimplantatschrauben mit dem Knochen und zum Bau fortschrittlicher, besonders widerstandsfähiger optischer Komponenten verwendet werden. Um diese Strukturen besser herstellen und ihre Auswirkungen verstehen zu können, müssen Forschende zunächst die ultraschnellen Prozesse beobachten und verstehen, die beim Auftreffen der intensiven Femtosekundenlaserpulse ablaufen, die bei der Oberflächenbearbeitung eingesetzt werden.

„An Synchrotronstrahlungsquellen ist die Zeitauflösung solcher Oberflächenuntersuchungen bisher auf wenige Millisekunden, also tausendstel Sekunden beschränkt“, erklärt Lisa Randolph, Postdoktorandin an der Universität Siegen und Erstautorin der Studie. „Wir haben jetzt gezeigt, dass man mit einzelnen Röntgenlaserpulsen auf Pikosekunden, also billionstel Sekunden springen kann – das entspricht einer mehr als eine Milliarde Mal besseren Zeitauflösung. Und dank unseres speziellen Aufbaus, bei dem die Röntgenstrahlen in einem flachen Winkel, im sogenannten streifenden Einfall, auf die Materialoberfläche

treffen, können wir die Prozesse auf und direkt unter der Oberfläche mit einer Tiefenauflösung im Nanometerbereich beobachten.“

Der technologische Durchbruch gelang dem Team am SACLA-Röntgenlaser in Japan durch die Kombination der oberflächensensitiven Kleinwinkelstreuung unter streifendem Einfall mit den von SACLA erzeugten Röntgenpulsen. Diese neuartige Methode ermöglichte es den Forschenden, die ultraschnellen Veränderungen des Dichteprofiles an und unter der Oberfläche, die durch einen auf das Material auftreffenden Laserpuls ausgelöst werden, mit einer räumlichen Auflösung von Nanometern (milliardstel Meter) und einer zeitlichen Auflösung von Pikosekunden (billionstel Sekunden) zu beobachten. Um die beteiligten Prozesse besser zu verstehen, verglich das Team anschließend die experimentellen Ergebnisse mit den Daten aus Simulationsmodellen. „Unsere experimentellen Daten stellen modernste Plasmasimulationsmodelle in Frage“, berichtet Mohammadreza Banjafar, Doktorand von European XFEL und der Technischen Universität Dresden und Zweitautor der Studie. „Überraschenderweise sagen die weit verbreiteten hydrodynamischen Simulationen die in unseren Experimenten gemessene Dichtedynamik nicht korrekt voraus.“ Sogenannte Particle-in-Cell-Simulationen hingegen, die bisher als unzureichend galten, um solch intensive Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie zu beschreiben, zeigten eine deutlich bessere Übereinstimmung mit dem Experiment.

„Allerdings fehlen auch in diesen Particle-in-Cell-Simulationen noch viele physikalische Effekte“, sagt Motoaki Nakatsutsumi von European XFEL, der das Experiment koordinierte. „Unsere Methode wird dazu beitragen, die Modellierung von Laser-Festkörper-Wechselwirkungen weiter zu verbessern und neue Anwendungen dafür zu entwickeln.“ Insbesondere erwarten die Forschenden, dass die beispiellosen Möglichkeiten, die ihre neue Technik bietet, neue Perspektiven für die Lasermaterialbearbeitung und die Forschung mit hohen Energiedichten eröffnen werden.

Publikation:

L. Randolph, M. Banjafar, T.R. Preston, T. Yabuuchi, M. Makita, N.P. Dover, C. Rödel, S. Göde, Y. Inubushi, G. Jakob, J. Kaa, A. Kon, J.K. Koga, D. Ksenzov, T. Matsuoka, M. Nishiuchi, M. Paulus, F. Schon, K. Sueda, Y. Sentoku, T. Togashi, M. Bussmann, T.E. Cowan, M. Kläui, C. Fortmann-Grote, L. Huang, A.P. Mancuso, T. Kluge, C. Gutt and M. Nakatsutsumi, “Nanoscale subsurface dynamics of solids upon high-intensity laser irradiation observed by femtosecond grazing-incidence x-ray scattering”, Phys. Rev. Res. 4, 033038 (2022)

Wissenschaftliche Ansprechpartner

Dr. Motoaki Nakatsutsumi

Tel: +49 40 8998 6966

Email: motoaki.nakatsutsumi@xfel.eu

Dr. Lisa Randolph

Tel. +49 271 740 3761

Email: lisa.randolph@uni-siegen.de

Bildunterschriften:

1) Röntgenkleinwinkelstreuung unter streifendem Einfall an einer mehrschichtigen Probe, gemessen mit einzelnen Röntgenpulsen des SACLA-Röntgenlasers in Japan. Der zentrale schwarze Kreis ist eine Strahlblende, die verwendet wurde, um den direkt gespiegelten Strahl abzudecken, der deutlich

intensiver ist als das Streumuster. Das Muster enthält Information zum tiefenaufgelösten Dichteprofil (horizontale Achse) und zur Oberflächenstruktur (vertikale Achse).

2) Im Experiment verwendete mehrschichtige Proben. Jede Probe hat eine Größe von 4 x 7 mm. Nach jeder Laserbestrahlung wird eine neue Probe verwendet.