

■ Elektronen steuern mit Licht

Die Elektronenmanipulation durch kohärente optische Nahfelder führt zu Rabi-Oszillationen freier Elektronenwellenpakete.

Die Ultrakurzzeitoptik eignet sich bestens, um die Dynamik elementarer elektronischer, Spin- und Kernschwingungsanregungen in Nanostrukturen zu untersuchen. Sie bietet damit unvergleichliche Einblicke in die Funktion von Nanostrukturen. Im Allgemeinen wechselwirkt dazu ein sich im Fernfeld ausbreitender, ultrakurzer Lichtpuls mit Elektronen, die im Inneren der Nanostruktur gebunden sind. Seit ein paar Jahren rückt ein weiterer Prozess in den Fokus: die Wechselwirkung von Elektronenpulsen, die sich frei ausbreiten, mit den evaneszenten optischen Nahfeldern von Nanostrukturen [1, 2]. Die Ausdehnung der Nahfelder ist durch Größe der Naturstruktur auf einige 10 Nanometer begrenzt. Dies begrenzt die Wechselwirkungslänge und umgeht die Impulsfehlانpassung, die aus dem Unterschied zwischen der de Broglie-Wellenlänge der Elektronen und der Lichtwellenlänge resultiert. Dadurch wechselwirken die Elektronen erheblich stärker mit evaneszenten Nahfeldern als mit sich frei ausbreitenden Lichtwellen. Evaneszente optische Felder können nun dazu dienen, die zeitliche und/oder energetische Struktur von ultrakurzen Elektronenpulsen zu manipulieren und zu steuern. Das könnte ein wichtiger Schlüssel sein, um extrem kurze Elektronenpulse (wenige Femtosekunden oder sogar nur Attosekunden) gezielt zu erzeugen und damit die derzeitige Zeitauflösung ultraschneller Elektronenmikroskope und -beugungsexperimente von etwa 100 fs [3] deutlich zu erhöhen.

Kürzlich sind zwei Arbeiten erschienen, die neue Bereiche der Wechselwirkung von ultrakurzen Elektronenpulsen mit lokalisierten optischen Nahfeldern erschließen [4, 5]. Eine Gruppe um Fabrizio Carbone von der EPFL Lausanne nutzt einen Elektronenstrahl, der 1,5 ps kurz ist und eine kinetische Energie von 200 keV besitzt, um

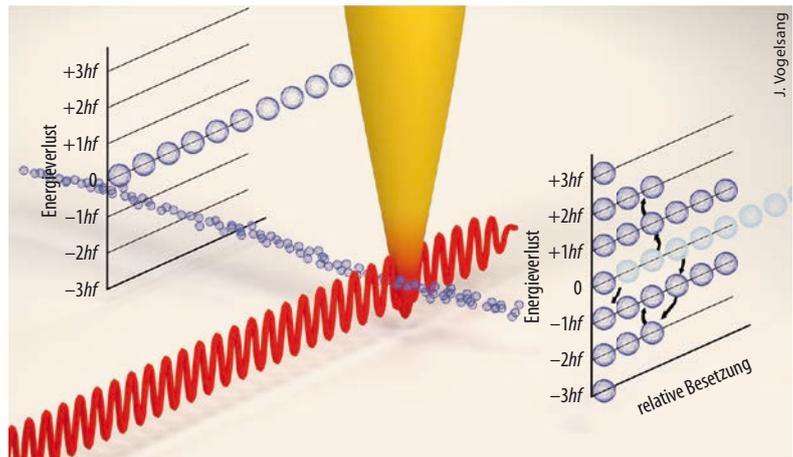


Abb. 1 Die Wechselwirkung zwischen einem kurzen Elektronenpuls und dem durch einen kurzen Laserpuls angeregten optischen Nahfeld einer sehr feinen Goldspitze führt zu Rabi-Oszillationen

zwischen den sich ausbreitenden Elektronen und Plasmon-Anregungen der Goldspitze und damit zu einer kohärenten Manipulation der kinetischen Energieverteilung des Elektronenstrahls.

Silberdrähte abzubilden, die einige Mikrometer lang sind und einen Radius von rund 50 nm haben [4]. Nach der Wechselwirkung mit der Probe wird die kinetische Energieverteilung der Elektronenpulse vermessen. Intensive nahinfrarote Laserpulse beleuchten gleichzeitig die Silberdrähte und regen evaneszente Oberflächenplasmonmoden an. Das sind kollektive Schwingungen der Elektronen im Metall und der von ihnen erzeugten optischen Nahfelder. Dabei wirkt der Draht wie ein Stehwellenresonator für diese Plasmonen [6]. Durch Interferenz und Reflexion an den Drahtenden bilden sich quasi-eindimensionale plasmonische Stehwellen mit einer Wellenlänge von etwa 600 nm aus. Wenn nun Elektronen- und Lichtpulse gleichzeitig auf die Probe treffen, erhöht oder erniedrigt sich die kinetische Energie der Elektronen um ganzzahlige Vielfache der Photonenenergie des Lasers und damit der Energie des quantisierten Plasmonfeldes. Dabei lässt sich die kinetische Energie der Elektronen um bis zu zehn Quanten verändern, wie es Ahmed Zewail bereits in ersten Experimenten der Photon-induzierten Nahfeld-Elektronenmikroskopie (PINEM)

beobachtet hat [7]. Die Wechselwirkung mit dem optisch induzierten Nahfeld führt also dazu, dass der Elektronenstrahl Plasmonen absorbiert bzw. emittiert. Diese Wechselwirkung erfolgt nur dann, wenn das optische Nahfeld, genauer die Komponente des Nahfelds entlang der Ausbreitungsrichtung der Elektronen, eine hohe Feldstärke aufweist.; also in den Maxima des plasmonischen Stehwellenfeldes. Die räumliche Abbildung der Elektronen, die dem Feld Energie entzogen haben, liefert daher ein direktes Bild der optisch angeregten Eigenmode des Stehwellenresonators. Ähnlich zur rein optischen Nahfeldmikroskopie sind selektiv nur diejenigen Moden sichtbar, die der eingestrahlte Laser optisch anregt [6]. Nach Meinung von Piazza et al. ist die Beobachtung des Energieaustausches in Vielfachen der Photonenenergie – in Anlehnung an den Photoeffekt – ein Anzeichen für die Quantisierung des Plasmonfeldes. Diese Interpretation ist allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da bereits gezeigt wurde, dass sich die Beobachtungen beim klassischen Photoeffekt und der PINEM-Experimente zwanglos in einem semiklassischen Bild ohne

Quantisierung des Strahlungsfeldes beschreiben lassen [1, 8]. Unabhängig davon ist PINEM eine hochinteressante Alternative, um eng lokalisierte elektromagnetische Felder abzubilden. Bei deutlich höherer zeitlicher Auflösung böte sie die Möglichkeit, die zeitliche Dynamik solcher Felder direkt orts aufgelöst zu vermessen.

In einem Experiment von Armin Feist und Kollegen aus Göttingen geht es primär um die gezielte Manipulation der Elektronenwellenfunktionen selbst [5]. Wie im obigen Experiment wird eine metallische Nanostruktur (hier eine Goldspitze) mit intensiven Laserpulsen beleuchtet und der Einfluss des Nahfeldes auf das Energiespektrum kurzer Elektronenpulse beobachtet, die das Nahfeld durchlaufen (Abb. 1). Eine Wolfram-Feldemitterspitze erzeugt dafür einen besonders feinen Elektronenstrahl, dessen Pulse eine kürzere Dauer als das optische Nahfeld besitzen (800 fs gegenüber 3 ps) [9]. Unter diesen Bedingungen zeigt sich die quantenmechanische Kohärenz der Wechselwirkung in spektakulärer Klarheit: Wieder erhöht bzw. erniedrigt sich die Energie des Elektronenstrahls um ganzzahlige Vielfache der Photonenenergie. Allerdings oszilliert die Besetzung jeder Photonenordnung periodisch, wenn man die eingestrahlte Laserfeldstärke erhöht. Es kommt somit zu starken Rabi-Oszillationen zwischen dem einfallenden elektronischen Wellenpaket und dem evaneszenten Plasmonfeld nahe der Goldspitze. Dieses räumlich eingeschränkte Plasmonfeld lässt sich in guter Näherung als harmonischer Oszillator beschreiben. Durch die Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl wird die äquidistante Energieleiter der gekoppelten Elektronen- und Plasmonzustände quasi hoch und wieder herunter gewandert. Während die konventionellen Rabi-Oszillationen in einem Zwei-Niveau-System [10] als periodische Abfolge von Absorption und stimulierter Emission zu verstehen sind, interferieren bei den beobachteten Vielzustands-Rabi-Oszillationen mehrere mögliche

Quantenpfade. Die kinetischen Energiespektren hängen daher charakteristisch von der Intensität ab, wie es theoretisch von de Abajo et al. vorhergesagt [1] und nun quantitativ bestätigt wurde [5]. Bei hohen Laserintensitäten gleicht die Energieverteilung der Elektronen einem äquidistanten Kamm mit einem Abstand der Photonenenergie, wie er ähnlich auch aus Experimenten mit Höheren Harmonischen bekannt ist. In der Zeitdomäne entwickelt sich dieses Spektrum durch Propagation in einen periodischen Zug von Elektronenpulsen, die kürzer sind als 100 Attosekunden und einen Pulsabstand von 2,6 fs besitzen.

Auch wenn Feist et al. die von ihnen vorhergesagte Zeitstruktur dieser ultrakurzen Elektronenpulse noch nicht nachgewiesen und für zeitaufgelöste Experimente genutzt haben, werden die Ergebnisse dieser Arbeit die Fantasie aller derer beflügeln, die sich Gedanken über die Zukunft der zeitaufgelösten Elektronenmikroskopie machen. Generell zeigen sie einen hoch-

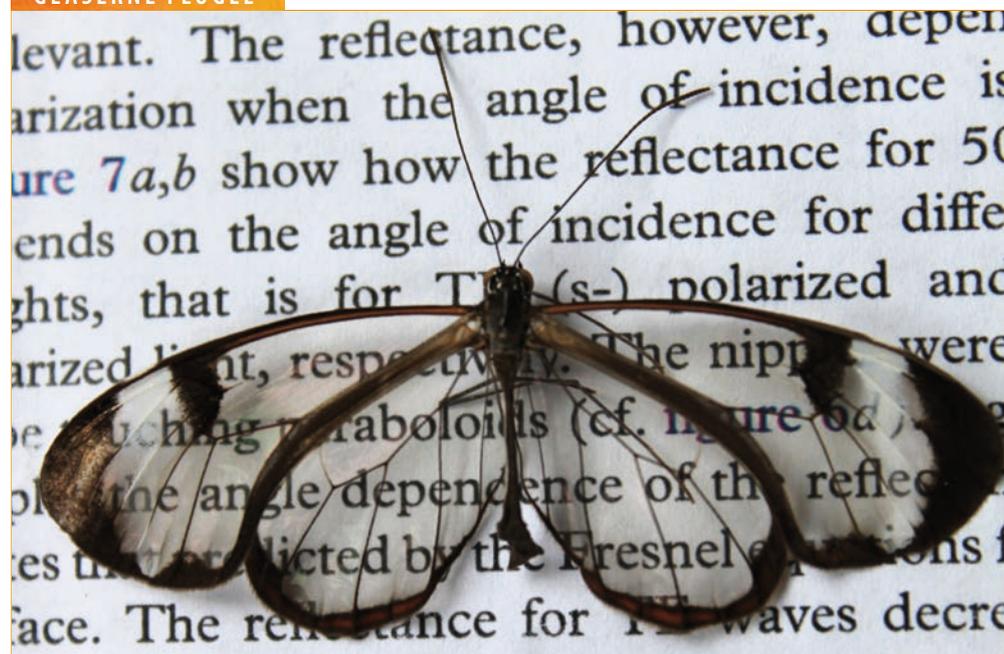
spannenden Weg zur kontrollierten Steuerung von Elektronen durch optische Nahfelder auf ultrakurzen Zeitskalen.

Ralf Vogelgesang, Jan Vogelsang und
Christoph Lienau

- [1] F. J. G. de Abajo, A. Asenjo-Garcia und M. Kociak, *Nano Letters* **10**, 1859 (2010)
- [2] F. J. G. de Abajo, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 209 (2008)
- [3] C. Gerbig et al., *New J. of Phys.* **17**, 043050 (2015)
- [4] L. Piazza et al., *Nat. Comm.* **6**, doi:10.1038/ncomms7407 (2015)
- [5] A. Feist et al., *Nature*, doi:10.1038/nature14463 (2015)
- [6] J. Dorfmueller et al., *Nano Lett.* **9**, 2372 (2009)
- [7] B. Barwick, D. J. Flannigan und A. H. Zewail, *Nature* **462**, 902 (2009)
- [8] G. Grynberg, A. Aspect und C. Fabre, *Introduction to Quantum Optics: From the Semi-classical Approach to Quantized Light*, Cambridge University Press, Cambridge (2010)
- [9] C. Ropers et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 043907 (2007)
- [10] A. Zrenner et al., *Nature* **418**, 612, doi:10.1038/nature00912 (2002)

Dr. Ralf Vogelgesang, M. Sc. Jan Vogelsang und Prof. Dr. Christoph Lienau, Institut für Physik und Center of Interface Science, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg

GLÄSERNE FLÜGEL



Wieder einmal ist die Natur besonders schlau: Trotz durchsichtiger Flügel reflektiert der Glasflügel-Schmetterling kaum Licht und ist dadurch im Flug praktisch unsichtbar für Fressfeinde. Forscher am Karlsruher Institut für Technologie haben nun mittels Rasterelektronenmikroskopie herausgefunden, dass Nanosäulen, die gänzlich unregel-

mäßig angeordnet sind und unterschiedlich groß sind, für die geringe Reflexion von nur zwei bis fünf Prozent – je nach Blickrichtung – verantwortlich sind. Mögliche Anwendungen könnten schwach reflektierende Oberflächen von Brillengläsern oder Handydisplays sein. R. H. Siddique et al., *Nature Comm.* **6**, 6909 (2015)