

Peter Hommelhoff, Tobias Boolakee

Ultraschnelle Kontrolle von Elektronen in Graphen

Einlagiges Graphen ist bekannt für eine ganze Reihe höchst außergewöhnlicher Eigenschaften, die dies Material zu einem der meist erforschten des letzten Jahrzehnts gemacht haben. Aus Sicht der Festkörperoptik ist besonders herausragend die über einen großen Spektralbereich konstante optische Absorption von 2,3%. Sie ist direkt mit der Bandstruktur verknüpft, die sich in der berühmten Dirac-Kegel-Form an den K-Punkten ausbildet. Diese 2,3% sagen zweierlei aus: auf der einen Seite ist Graphen ein starker optischer Absorber – von einer einzigen Schicht Atome wird erstaunlich viel Licht absorbiert –, aber auf der anderen Seite heißt dies, dass 97% des Lichts das Material durchlaufen, ohne absorbiert zu werden. Damit können wir Graphen großen Lichtintensitäten aussetzen, ohne dass allzu viel Energie absorbiert wird, die das Material zerstören könnte.

Mit dieser Einsicht und der Dirac-Dispersionsrelation vor Augen hat sich uns die Frage gestellt, ob Graphen nicht vielleicht das ideale elektrisch leitende Material ist, um Elektronen im optischen Starkfeld-Bereich direkt mit Hilfe des optischen Feldes zu lenken. Die Starkfeldphysik kann man dadurch definieren, dass die Elektronen nicht mehr einfach auf die Energie reagieren, die innerhalb der Einhüllenden eines Laserimpulses transportiert wird, sondern dass die Elektronen direkt dem elektromagnetischen Feld folgen, das innerhalb der Einhüllenden schwingt. Wir gehen also vom Photonenbild über in ein Bild der feldgetriebenen Elektronik, allerdings mit Treiberfrequenzen, die nicht mehr wie bei herkömmlicher Elektronik im Gigahertz-, sondern im Petahertz-Bereich liegen ($1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$).

Für uns gilt es daher zu beobachten, ob Elektronen tatsächlich mit dieser hohen Taktrate, d.h. auf der (Sub-) Femtosekundenzeitskala, mit der optischen Wellenform gelenkt werden können. Um dies zu untersuchen, haben wir einlagiges Graphen mit Laserimpulsen beleuchtet, deren Träger-Einhüllenden-Phase (TEP) wir einstellen können [1]. Die Träger-Einhüllenden-Phase ϕ beschreibt den Phasenunterschied zwischen den Maxima des optischen Trägerfeldes und der Einhüllenden (s. Abb. 1). Wenn man ϕ messen und einstellen kann, hat man direkten Zugriff auf die zeitliche Symmetrie des optischen Trägerfeldes

der Laserimpulse – die revolutionäre Technologie dahinter ist die des sog. optischen Frequenzkamms, die Theodor Hänsch und John Hall vor ca. 25 erfunden und für die sie im Jahr 2005 den Physik-Nobelpreis erhalten haben.

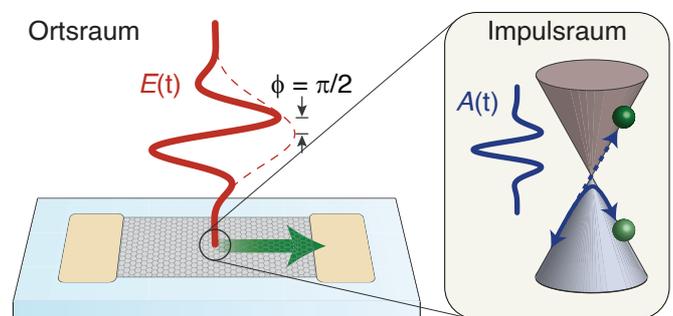


Abb. 1: Ein Streifen Monolagen-Graphen, gewachsen auf Siliziumkarbid, einem Halbleiter mit großer Bandlücke, wird mit Goldelektroden links und rechts kontaktiert. Ohne dass eine elektrische Spannung anliegt, messen wir mit Hilfe recht gewöhnlicher Messelektronik einen Strom, wenn wir phasenstabile Laserimpulse auf das Graphen fokussieren – allerdings nur für gewisse Träger-Einhüllenden-Phasen ϕ . Betrachtet man die Wechselwirkung im Impulsraum, so treibt das Vektorpotential Elektronen in der Dirac-Kegel-Dispersion von Graphen.

Mit einer Laser-Polarisation, die entlang der Verbindungslinie der beiden Goldelektroden gewählt ist, messen wir einen Strom, der maximal wird für $\phi = \pi/2$. Bei dieser Phase zeigt das elektrische Feld des Laserimpulses keine Links-Rechts-Asymmetrie, wohl aber das Vektorpotential, das über $E(t) = -dA/dt$ mit dem elektrischen Feld zusammenhängt. Warum erlaubt hier also das Vektorpotential tiefere Einblicke? Die Antwort findet man im Bloch'schen Beschleunigungstheorem: der Wellenvektor des Elektrons $k(t)$ im Impulsraum hängt demnach direkt vom Vektorpotential ab: $k(t) = k_0 - eA(t)/\hbar$. Und in der Tat zeigen uns Simulationen, dass sich nach dem Laserimpuls mit $\phi = \pi/2$ eine links-rechts-asymmetrische Leitungsbandbesetzung ausbildet, die zum von uns gemessenen Strom führt. Die asymmetrische Leitungsbandpopulation und der daraus resultierende Strom existieren auch noch, wenn der Laserimpuls bereits die Probe durchquert hat; diese Art von Elektronen wird reale Ladungsträger genannt.

Dagegen können wir auch virtuelle Ladungsträger anregen, und zwar an der Graphen-Gold-Schnittstelle [2]. Hier bricht die Schnittstelle die räumliche Symmetrie (z.B.: links Graphen, rechts Gold), d.h., hier ist die Symmetrie im Ortsraum bereits maximal verletzt (s. Abb. 2). Wenn wir Elektronen in der Nähe dieser Schnittstelle im Graphen stark treiben, entsteht eine Polarisation, die dem optischen elektrischen Feld des Lasers folgt. Diese Polarisation führt ebenfalls zu Strom – interessan-

Prof. Dr. Peter Hommelhoff
Tobias Boolakee
Department Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Staudtstraße 1, D-91058 Erlangen
Peter.Hommelhoff@fau.de
Tobias.Boolakee@fau.de
laser.physik.fau.de

DOI-Nr.: 10.26125/1gbj-3e74

ter Weise aber nur, während der Laserimpuls mit der Probe wechselwirkt. Wenn der Laserimpuls die Probe verlassen hat, ändert sich in unseren Simulationen nichts mehr an der Ladungsverteilung. Diese so induzierten Ladungsträger werden virtuell genannt. Dieser Name existiert bereits seit vielen Jahren [3]; diese Ladungsträger sollten aber nicht mit den vermutlich bekannteren virtuellen Austauscheteilchen in der Teilchenphysik verwechselt werden.

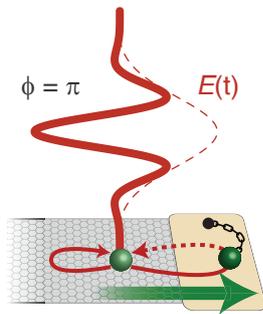


Abb. 2: An einer Graphen-Gold-Schnittstelle lässt sich während der Wechselwirkung mit einem Laserimpuls ein Strom induzieren, indem virtuelle Ladungsträger in die Goldkontakte getrieben werden. Ideal dazu ist eine optische Feldform, wie hier angedeutet.

Diese Erkenntnisse wären ohne Simulationen nicht möglich gewesen. Für das Verständnis der realen Ladungsträger reichen dazu recht einfache Lösungen der Schrödinger-Gleichung für stark gebundene Elektronen aus; für die virtuellen Ladungsträger haben unsere Kollaborationspartner um Ignacio Franco (U Rochester) aufwendige Simulationen auf Super-Computern ausgeführt, und selbst damit sind einige Details noch nicht voll verstanden: wie genau wird die Polarisation in einen messbaren Strom umgewandelt? Welche Material-Eigenschaften sind es, die hier vorteilhaft wirken, sprich, mit welchen Materialien und Materialkombinationen könnten wir noch größere Ströme beobachten?

Die Beantwortung dieser und ähnlicher Fragen könnte hochinteressant werden für zukünftige Lichtwellen-Elektronik. Die Lichtwellen-Elektronik strebt an, Elektronen auf ähnlich Art und Weise steuern zu können, wie sie in der allgegenwärtigen klassischen Mikrowellen-Elektronik gelenkt werden, nämlich einfach mit Hilfe elektrischer Felder in geeigneten Materialien – aber in der Lichtwellen-Elektronik sollen, wie der Name sagt, die Elektronen mit optischen Feldern gelenkt werden. Dies könnte dazu führen, dass die Taktraten der Elektronik vom heutigen Gigahertz-Bereich bis in den Petahertz-Bereich ansteigen könnten, Rechenoperationen also um den Faktor 1000 bis 1.000.000 schneller ausgeführt werden könnten.

Basierend auf den Einsichten zur Erzeugung von realen und virtuellen Ladungsträgern konnten wir ein erstes Logikelement demonstrieren. Wir fokussieren dazu zwei gepulste Laserstrahlen auf die Probe, einen in die Mitte nur auf Graphen, einen auf die Graphen-Gold-Schnittstelle. Wir kodieren binäre Bit-Information 0 und 1 in die TEP der jeweiligen Laserimpulse. Wählen wir z.B. $\phi = \pi/2$ für die Laserimpulse, die nur das Graphen beleuchten, und $\phi = \pi$ für die auf die Graphen-Gold-Schnittstelle, so addieren sich die resultierenden Ströme. Für andere TEPs heben sich die Ströme gerade auf oder addieren sich so, dass der Strom in die andere Richtung fließt. Jetzt müssen

wir nur noch definieren, wie das Ausgangsbit aussieht: wenn der Strom größer als +2pA ist, definieren wir das Ausgangsbit als 1, für kleinere Ströme oder Ströme in die andere Richtung definieren wir das Ausgangsbit als 0. Auf diese Art und Weise konnten wir ein logisches Nicht-Oder (NOR) und auch andere Logikgatter wie AND oder NAND demonstrieren.

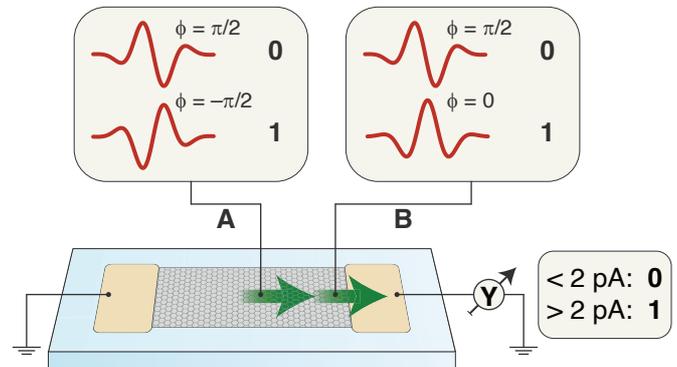


Abb. 3: Eine Graphen-Gold-Struktur wird von zwei Laserimpulsen A und B beleuchtet, die in ihrer jeweiligen TEP ϕ ein logisches Bit 0 oder 1 kodiert haben. In der Wechselwirkung mit der Struktur werden die zwei induzierten Ströme addiert und als logisches Ausgangsbit Y ausgelesen. Auf diesem Weg lassen sich verschiedene ultraschnelle logische Gatter konstruieren. Die hier angedeuteten Impulse sind die Bausteine eines NOR-Gatters.

Stark getriebene Elektronen in Festkörpern stellen ein faszinierendes Forschungsgebiet dar, das ganz neue Möglichkeiten eröffnet hat. So konnte innerhalb von 1 fs die Leitfähigkeit von Glas um 18 Größenordnungen erhöht werden und Glas damit vom Isolator zu einem Halbmetall gemacht werden [4]; es konnte mit ganz neuen Methoden Bandstruktur-Information gewonnen werden [5]; die Erzeugung von Hoher-Harmonischer-Strahlung ist ebenfalls von höchstem Interesse [6]. Die Lichtwellen-Elektronik ist neben den genannten fundamentalen Einsichten und der Strahlungserzeugung eine erste Anwendung, die zu spezialisierten Rechenoperationen führen könnte – erste Schritte haben alle Beteiligten getan, aber das Gebiet steht noch immer am Anfang, und allein die Vielzahl an neuen und hochinteressanten Materialien verspricht eine strahlende Zukunft.

PH dankt all seinen Mitautoren, ohne die die hier berichteten Ergebnisse nicht entstanden wären, insbesondere seinen herausragend guten (ehemaligen) Mitarbeitern Dr. Takuya Higuchi, Dr. Christian Heide und (bald Dr.) Tobias Boolakee sowie seinen Kollegen Prof. Ignacio Franco PhD (Rochester) und Prof. Dr. H. B. Weber (Erlangen). Gefördert durch ERC, DFG, EC und Moore-Stiftung.

Referenzen

- [1] T. Higuchi, C. Heide, K. Ullmann, H. B. Weber & P. Hommelhoff, *Nature* 2017 **550**, 224 – 228.
- [2] T. Boolakee, C. Heide, A. Garzón-Ramírez, H. B. Weber, I. Franco & P. Hommelhoff, *Nature* 2022 **605**, 251 – 255.
- [3] E. Yablonovitch, J. P. Heritage, D. E. Aspnes & Y. Yafet Virtual photoconductivity. *Phys. Rev. Lett.* 1989 **63**, 976 – 979.
- [4] M. Schultze, E. M. Bothschafter, A. Sommer, S. Holzner, W. Schweinberger, M. Fiess, M. Hofstetter, R. Kienberger, V. Apalkov, V. S. Yakovlev, M. I. Stockman & F. Krausz, *Nature* 2013 **493**, 75 – 78.

- [5] J. Reimann, S. Schlauderer, C. P. Schmid, F. Langer, S. Baierl, K. A. Kokh, O. E. Tereshchenko, A. Kimura, C. Lange, J. Gdde, U. Höfer & R. Huber, *Nature* 2018 **562**, 396 – 400.
- [6] C. Heide, Y. Kobayashi, D. R. Baykusheva, D. Jain, J. A. Sobota, M. Hashimoto, P. S. Kirchmann, S. Oh, T. F. Heinz, D. A. Reis, S. Ghimire, *Nat. Phot.* 2022 **16**, 620 – 624.

Prof. Dr. Peter Hommelhoff

Peter Hommelhoff hat Physik in Berlin und Zürich studiert, wo er im Jahr 1999 nach Abschluss seiner Diplomarbeit einen Vortrag von Theodor Hänsch gehört hat, der ihn dazu bewogen hat, von der Teilchenphysik in die Quantenoptik zu wechseln – und sich dazu bei Hänsch an der LMU München im Gebiet der Bose-Einstein-Kondensation ultrakalter Gase zu promovieren. Darauf hat er einen vierjährigen Postdoc-Aufenthalt bei Mark Kasevich in Stanford absolviert, wo er ein neues Experiment zur ultraschnellen Photoemission von Metall-Nanospitzen aufgebaut hat. Für das Angebot, eine unabhängige Forschungsgruppe der Max-Planck-Gesellschaft aufzubauen, ist er im Jahr 2007 von Stanford ans MPQ in Garching gegangen. Dort hat er die ultraschnelle Photoemission von Festkörpern im Starkfeldbereich etabliert und die Grundlagen zum Teilchenbeschleuniger auf einem Chip sowie zu einem Quanten-Elektronen-Mikroskop gelegt. In 2013 sind er und sein Team nach Erlangen an die Friedrich-Alexander-Universität umgezogen, wo die im Beitrag diskutierte Starkfeldphysik in Graphen als jüngstes Forschungsthema hinzugekommen ist. Neben zwei ERC-Grants und anderen Preisen hat Hommelhoff im letzten Jahr den Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preis der DFG erhalten.



Tobias Boolakee

Tobias Boolakee studierte Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Seit 2018 promoviert er an der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) in Erlangen über Starkfeldphysik an niederdimensionalen Materialien. Schwerpunkt seiner Arbeit ist dabei die Ergründung der fundamentalen Mechanismen hinter der Anregung von Graphen-basierten Strukturen mit intensiven und ultrakurzen Laserimpulsen.



ZITATBOX

Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832)

„Der Undank ist immer eine Art Schwäche. Ich habe nie gesehen, dass tüchtige Menschen undankbar gewesen wären.“

„Habt ihr die innern Verhältnisse einer Handlung erforscht? Wisst ihr mit Bestimmtheit die Ursachen zu entwickeln, warum sie geschah, warum sie geschehen musste? Httet ihr das, ihr würdet nicht so eilfertig mit euren Urteilen sein!“

„Mit dem Wissen wächst der Zweifel.“

„Willst du immer weiter schweifen? Sieh, das Gute liegt so nah. Lerne nur das Glück ergreifen: Denn das Glück ist immer da.“

„Eine falsche Lehre lässt sich nicht widerlegen, denn sie ruht ja auf der Überzeugung, dass das Falsche wahr sei. Aber das Gegenteil kann, darf und muss man wiederholt aussprechen.“

„Daran erkenn ich den gelehrten Herrn!
Was ihr nicht tastet, steht euch meilenfern,
Was ihr nicht fasst, das fehlt euch ganz und gar,
Was ihr nicht rechnet, glaubt ihr, sei nicht wahr,
Was ihr nicht wägt, hat für euch kein Gewicht,
Was ihr nicht mnzt, das, meint ihr, gelte nicht.“

„Auch aus Steinen, die einem in den Weg gelegt werden, kann man Schönes bauen.“

„Zu reden ist uns ein Bedürfnis, zuzuhören ist eine Kunst.“

„Die Weisen sagen: beurteile niemand, bis du an seiner Stelle gestanden hast.“

„Der Sprache liegt zwar die Verstandes- und Vernunftsfhigkeit des Menschen zu Grunde, aber sie setzt bei dem, der sich ihrer bedient, nicht eben reinen Verstand, ausgebildete Vernunft, redlichen Willen voraus. Sie ist ein Werkzeug, zweckmäßig und willkürlich zu gebrauchen; man kann sie ebensogut zu einer spitzfindig-verwirrenden Dialektik wie zu einer verworren-verdsternden Mystik verwenden...“

„berhaupt lernt niemand etwas durch bloßes Anhören, und wer sich in gewissen Dingen nicht selbständig bemüht, weiß die Sache nur oberflächlich und halb.“

„Mit einem kritischen Freund an der Seite kommt man immer schneller vom Fleck.“

Quelle: <https://gutezitate.com/autor/johann-wolfgang-von-goethe>