

Mit ultrakurzen Laserimpulsen zu blitzschnellen Computern



Computergestützte Informationsverarbeitung hat eine zentrale Rolle in unserem gesellschaftlichen Zusammenleben eingenommen. Befeuert von aktuellen Entwicklungen wie künstlichen Intelligenzen wächst der Bedarf an immer leistungsfähigerer Computerarchitektur dringlich an – und übersteigt die physikalischen Möglichkeiten aktueller Technologie. Hier zeige ich einen transformativen Ansatz für eine Lichtfeld-gesteuerte Computerarchitektur, die das Potenzial hat, bis zu 100.000-fach schneller als mit heutiger Technologie zu rechnen. Dazu habe ich den Prototypen eines Logikgatters – der kleinsten Einheit digitaler Informationstechnologie – realisiert, der von ultrakurzen Laserimpulsen betrieben wird. Dieses neuartige Konzept rückt erstmals die Grundlagenforschung über die quantenmechanische Kontrolle von Elektronen auf der Attosekunden-Zeitskala in den Fokus des gesellschaftlichen Kernthemas der digitalen Transformation.

Tobias Weitz promovierte an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Fachgebiet Laserphysik.

Tobias Weitz
Deutscher Studienpreis
2. Preis Sektion Natur- und
Technikwissenschaften

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2024 mit dem 2. Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2023 an Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg eingereichten Dissertation „Lightwave electronics in graphene“ von Dr. Tobias Weitz.

Mit ultrakurzen Laserimpulsen zu blitzschnellen Computern

Die Grenzen heutiger Computertechnik

Die Informationsverarbeitung durch Computer ist ein unverzichtbarer Bestandteil unseres Lebens geworden. Große Teile unseres wissenschaftlichen und technologischen Fortschritts hängen maßgeblich von der Weiterentwicklung immer leistungsfähigerer und schnellerer Computerprozessoren ab – ein Trend, der sich durch die rasante Entwicklung in der künstlichen Intelligenz nochmals massiv beschleunigt hat. Gleichzeitig lässt sich allerdings seit etwa zehn Jahren beobachten, dass die Miniaturisierung und Beschleunigung herkömmlicher Computerarchitektur allmählich an harte physikalische Grenzen stößt und damit neue, revolutionäre Lösungen gefragt sind. Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) nimmt an, dass ein Rückgang des Innovationstempos weitreichende Auswirkungen haben könnte – auf die Verlässlichkeit von globalen Klimamodellen bis hin zu einem Mangel komplexer und aussagekräftiger Krankheitsmodelle [1]. Die Verfügbarkeit von Computern mit hoher Rechengeschwindigkeit ist damit ein essenzieller Baustein für die Sicherung und den Ausbau unserer heutigen Lebens- und Gesundheitsstandards.

Transformative Ansätze auf der elementaren Ebene digitaler Informationsverarbeitung sind zwingend notwendig, um die Grenzen der Rechengeschwindigkeit signifikant zu verschieben. Konkret betrachten wir Logikgatter, die die grundlegenden Bestandteile jeder Computerarchitektur bilden. Sie wandeln logische Zustände, 0 oder 1, anhand definierter Regeln in neue Zustände, 0 oder 1, um. Bei typischen Gatterfunktionen wie UND oder ODER werden zwei derartige Eingangssignale in einen resultierenden logischen Ausgangszustand umgewandelt. In Computern sind solche Logikgatter heute fast ausschließlich durch Halbleiterbauelemente wie Feldeffekttransistoren umgesetzt, in denen Informationen mithilfe von Mikrowellenfeldern verschaltet werden. In der aktuellen 5G-Kommunikation erreichen diese Bausteine derzeit etwa Taktraten von 1–10 Gigahertz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$), jedoch ist eine Erhöhung dieser Taktrate nicht in Sicht.

Ein Ausweg: Licht als Taktgeber

In meiner Promotion habe ich die Entwicklung von Lichtfeld-getriebenen Logikgattern adressiert, um eine neuartige und ultraschnelle Computerarchitektur zu ermöglichen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Umsetzung, basierend auf Mikrowellenfeldern, verwende ich das elektrische Feld von Licht als Taktgeber. Sichtbares Licht oszilliert mit Frequenzen im Bereich von 0,1–1 Petahertz ($1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$), sodass eine Beschleunigung der Schalt- und Rechengeschwindigkeit weit über die physikalischen Grenzen der aktuellen Technologie möglich erscheint – im Idealfall 100.000-fach schneller. Die Grundlagen dieser neuen sogenannten Lichtwellen-Elektronik wurden im letzten Jahrzehnt in intensiver weltweiter Forschung rund um die Steuerung der Bewegung von Elektronen in Festkörpermateriale mit Licht gelegt. Trotzdem wurde bisher noch kein einziges logisches Element für die Lichtwellen-Elektronik vorgeschlagen, geschweige denn demonstriert.

Als Grundlage für die Realisierung Lichtfeld-getriebener Logikgatter habe ich das Material Graphen gewählt. Graphen ist ein zweidimensionales Material, das aus einer einzigen Lage Kohlenstoffatome besteht und eine Vielzahl außergewöhnlicher elektrischer und optischer Eigenschaften aufweist. Für uns besonders interessant ist die starke Kopplung von Licht an die Elektronen des Kohlenstoffgitters. Elektronen, die durch einfallendes Licht in einen energetisch höheren Zustand gehoben werden, können sich schier mühelos mit außergewöhnlich hoher Mobilität innerhalb der Graphen-Lage bewegen. Diese Eigenschaft ermöglicht besonders günstige Bedingungen, um einen elektrischen Strom durch Anregung mit Licht zu induzieren.

Um diesen lichtinduzierten Strom zur Verschaltung logischer Information nutzbar zu machen, habe ich mich darauf fokussiert, die quantenmechanischen Abläufe dieser Licht–Materie-Interaktion zu charakterisieren. Ausgestattet mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen, habe ich in einer Serie an Experimenten die Stromerzeugung mit wenigen Femtosekunden kurzen ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) und intensiven Laserimpulsen erprobt und dabei zwei fundamental unterschiedliche Erzeugungsmechanismen entdeckt. Basierend auf diesen Mechanismen habe ich schließlich den Prototyp eines Lichtfeld-getriebenen Logikgatters erdacht und auch sogleich experimentell realisiert, der die Petahertz-schnellen Taktrate von Licht und die hohe Beweglichkeit von Elektronen in Graphen vereint.

Quantenkohärente Kontrolle von Elektronen

Als Schlüssel zu einer solch schnellen Informationsverarbeitung erkannte ich, dass die quantenmechanischen Eigenschaften von Elektronen in Graphen eine entscheidende Rolle spielen. Dazu habe ich ein theoretisches Modellsystem für Elektronen

in der Potenziallandschaft von Graphen, der sogenannten Bandstruktur, entwickelt, um optimale optische Treiberparameter zur lichtinduzierten Stromerzeugung zu finden. Durch analytische und numerische Untersuchung der Systemparameter gelang es mir, ein Regime zu identifizieren, in dem Elektronen ihre quantenmechanische Eigenschaft, Interferenz einzugehen, voll entfalten [2]. Unter Verwendung der richtigen Lichtfrequenz und Intensität lässt sich dabei die Quantenphase der Elektronen durch das anregende Lichtfeld in Form von Intraband-Bewegung und Tunnel-Übergängen zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband präzise kontrollieren. Da die Tunnel-Übergänge innerhalb eines Bruchteils einer Femtosekunde – innerhalb von Attosekunden – ablaufen, haben die Elektronen schlichtweg keine Zeit, sich mit ihren Nachbarn auszutauschen, wobei sie üblicherweise ihre quantenmechanischen Eigenschaften verlieren. In Abgrenzung von supraleitenden Quantencomputern, die erst bei sehr tiefen Temperaturen Zugang zu Quanten-Phänomenen erhalten, versetzte mich diese Erkenntnis in die günstige Lage, die Lichtfeld-getriebenen Logikgatter bei Raumtemperatur zu demonstrieren.

Zwei Mechanismen der Stromerzeugung und ihre Steuerung durch Lichtfelder

Als Plattform zur Erprobung der lichtinduzierten Stromerzeugung fertigte ich mittels lithografischer Methoden Heterostrukturen an, die aus wenigen Mikrometer kleinen Graphen-Streifen, kontaktiert mit zwei Goldelektroden, bestehen. Um ultraschnelle Taktraten bei der Informationsverarbeitung zu erreichen, sind wie bei herkömmlicher Transistor-Elektronik möglichst kurze Übertragungslängen essenziell. Entsprechend spielten die Material-Schnittstellen zwischen Graphen und den Goldelektroden eine entscheidende Rolle für die ultraschnelle Stromdetektion auf atomar scharfen Längenskalen.

Die Entwicklung der logischen Gatter in dieser Struktur basierte auf einer weiteren wesentlichen Erkenntnis, die ich im Rahmen meiner Promotion gewonnen habe: Wenn die Struktur mit intensiven und ultrakurzen Laserimpulsen angeregt wird, können ultraschnelle feldgetriebene Ströme mit einer Einschaltzeit von weniger als einem optischen Zyklus durch zwei grundlegend unterschiedliche Mechanismen induziert werden [3]. Je nach Art dieser Anregungsprozesse unterscheidet sich bei den beteiligten Elektronen zwei Arten von Ladungsträgern: „Reale Ladungsträger“, die nach ihrer Anregung einen Reststrom treiben (Abb. 1a), und „virtuelle Ladungsträger“, die nur während der Laseranregung existieren und nur vorübergehend zu einem Strom beitragen können (Abb. 1b).

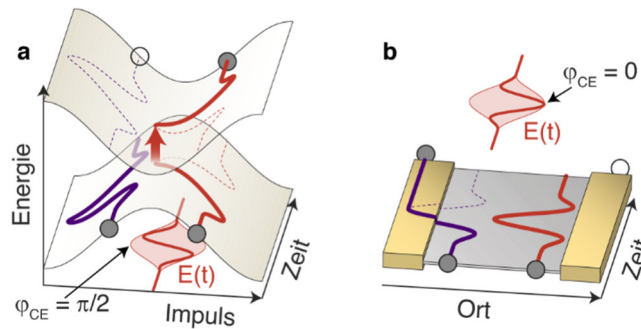


Abbildung 1: Die Schlüsselmechanismen der Doktorarbeit. **a)** Erzeugung von Lichtfeld-getriebenen Restströmen durch „reale Ladungsträger“ in einem Impulsraum-Bild von Graphen. **b)** Erzeugung von feldgetriebener Polarisation durch „virtuelle Ladungsträger“ in einem Ortsraum-Bild einer Gold-Graphen-Gold-Heterostruktur.

Der Schlüssel für die Unterscheidung und präzise Steuerung der beiden Arten von Ladungsträgern und letztlich für das Design der Logikgatter liegt in der zeitlichen Form des elektrischen Lichtfeldes. Charakterisiert durch die sogenannte Träger-Einhüllenden-Phase φ_{CE} (engl. carrier-envelope phase, CEP), lassen sich die Amplitude und die Richtung der einzelnen induzierten Stromkomponenten gezielt steuern.

Strom als Elektronenfluss

Im Szenario der reinen Anregung von Graphen konnte ich experimentell zeigen, dass die Elektronen tatsächlich eine wie zuvor modellierte gekoppelte Dynamik aus Intraband-Bewegung und Tunnel-Übergängen erfahren. Vereinfacht lässt sich dieser Prozess wie Interferenz von Lichtwellen in einem optischen Interferometer verstehen, wobei hier Elektronen als quantenmechanische Wellen in einem Elektronen-Interferometer, aufgespannt durch die Bandstruktur, Interferenz eingehen. Ihre vom Lichtfeld kontrollierte Quantenphase bestimmt, in welchem Ausgang des Interferometers die Elektronen enden: im Valenzband (kein Strom) oder im Leitungsband (Strom ungleich null). Für eine bestimmte Form des Lichtfeldes gelang es mir, als Resultat der Elektronen-Interferenz einen Zustand in der Bandstruktur zu generieren, in dem Elektronen *nach* dem Durchgang des Laserimpulses, also reale Ladungsträger, einen gerichteten Impuls innehaben (Abb. 1a). Dieser Fluss realer Ladungsträger setzt sich zu den Goldelektroden fort, an denen folglich ein elektrischer Strom messbar ist.

Strom durch Verschieben von Elektronen

Einen zweiten Mechanismus zur Stromerzeugung entdeckte ich bei Beleuchtung der Gold-Graphen-Grenzflächen. In diesem Szenario konnte ich zeigen, dass die Elektronenverteilung in dem angeregten Graphen-Streifen *transient*, d.h. nur während

der Interaktion mit einem Laserimpuls, modifiziert werden kann. Mit der richtigen Form des Laserfeldes werden angeregte Elektronen – virtuelle Ladungsträger –, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu den angrenzenden Goldelektroden aufhalten, so ausgelenkt, dass sie in den Elektroden eingefangen werden. Die zeitliche Symmetrie des gewählten Lichtfeldes und damit der Elektronentrajektorien resultiert hierbei in einem ungleichen Einfang von Elektronen an der rechten und linken Elektrode – es wird eine Polarisation induziert (Abb. 1b). Bei diesem Mechanismus tragen die Elektroden demnach die entscheidende Rolle eines ultraschnellen Gleichrichters, der virtuelle Ladungsträger zu einem elektrischen Strom beitragen lässt. Der Name „virtuell“ betont, dass ohne die Material-Schnittstellen die transiente Verschiebung der Elektronen unsichtbar bleiben würde.

Logik mit Lichtfeldern

Auf der Grundlage dieser fundamentalen Beobachtungen demonstrierte ich die Funktionsweise Lichtfeld-gesteuerter Logikgatter. Die Idee besteht darin, zwei logische Zustände, je 0 oder 1, in der Form zweier Lichtfelder A und B, d.h. in ihren jeweiligen Träger-Einhüllenden-Phasen ϕ_A und ϕ_B , zu kodieren, die zeitlich synchronisiert auf die Mitte eines Graphen-Streifens (Laserimpuls A) und auf eine der Gold-Graphen-Schnittstellen (Laserimpuls B) einfallen (Abb. 2). So können je nach gewählter Träger-Einhüllenden-Phasen zwei individuelle Stromkomponenten nur durch reale Ladungsträger (Laserimpuls A) oder nur durch virtuelle Ladungsträger (Laserimpuls B) erzeugt werden, die sich addieren oder gegenseitig aufheben können. Ein logischer Ausgangszustand Y resultiert, indem der Pegel des gemessenen resultierenden Stromsignals ober- (Zustand 1) oder unterhalb (Zustand 0) eines bestimmten Schwellenwerts liegt.

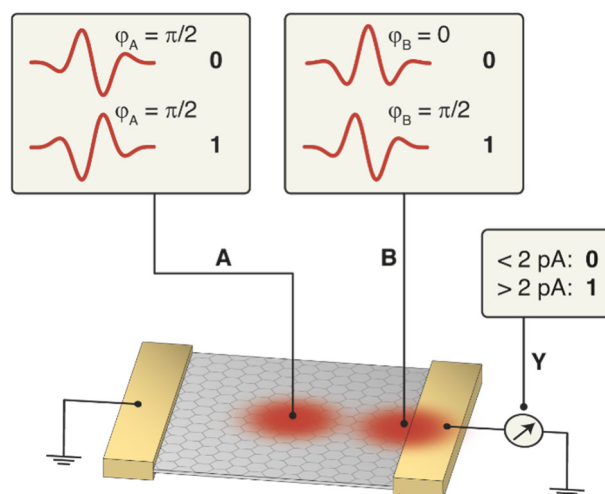


Abbildung 2: Hauptresultat der Doktorarbeit. Prototyp eines Lichtfeld-gesteuerten Logikgatters in einer Gold-Graphen-Gold-Heterostruktur. Die logischen Eingänge A und B werden in den jeweiligen

zeitlichen Formen zweier Laserimpulse kodiert, die auf den Graphen-Streifen (A) sowie eine der Gold-Graphen-Schnittstelle (B) fokussiert werden. An der rechten Elektrode wird die Summe der in den beiden Wechselwirkungszonen induzierten elektrischen Ströme gemessen und einem logischen Ausgangszustand Y zugeordnet. Die hier gezeigte Kodierung stellt ein NICHT-ODER-Gatter dar.

Durch die Kombination der beiden unterschiedlichen Strommechanismen (A: Ladungs-Impuls; B: Ladungs-Polarisation) ermöglicht dieser neuartige Ansatz die erforderlichen Freiheitsgrade zur Realisierung verschiedener logischer Operationen. So konnte ich experimentell das Schaltprinzip der Logikgatter UND, ODER, NICHT-UND sowie NICHT-ODER nachweisen. Das tiefe Verständnis, das ich über die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen gewinnen konnte, erlaubt es mir, als fundamentales Limit der Taktrate die Lichtfrequenz im Bereich von 0,1–1 PHz festzuschreiben. Diese Beobachtung stellt einen Meilenstein dar, hin zu ultraschneller Informationsverarbeitung an atomar scharfen Material-Schnittstellen.

Fazit und Ausblick

Mit dieser Serie von experimentellen Beobachtungen, gepaart mit grundlegenden theoretischen Überlegungen, gelang es mir erstmals, ultraschnelle Quantenkontrolle in einem Festkörpermateriale für die Informationstechnologie nutzbar zu machen. Ich freue mich sehr, mit dem Ergebnis meiner Promotion, einer Lichtfeld-schnellen Implementierung von Logikgattern, einen entscheidenden Beitrag geleistet zu haben, der angesichts seiner Publikation in der renommierten Fachzeitschrift *Nature* und einigen Aufsehens in der Fachwelt als großer Durchbruch angesehen werden kann [3]. Für das EU-Forschungsprojekt PETACom mit Beteiligung von acht europäischen Partnergruppen und dem Ziel der Entwicklung erster Petahertz-schneller integrierter Schaltungen diente der Beitrag als zentraler Baustein. Ein Patent wurde mittlerweile auf das neuartige Konzept der Logikgatter angemeldet [4].

Für eine Integration in eine vollständige Computerarchitektur stehen die Logikgatter gerade erst am Anfang, da meine Ergebnisse buchstäblich die kleinste Einheit der Informationsverarbeitung verkörpern. Um ein breiteres Verständnis für den Design-Spielraum von Lichtwellen-Elektronik zu entwickeln, befasste ich mich während meiner Promotion zusätzlich mit der Nutzung von inhärenten Quantenzuständen, die für eine Vielzahl zweidimensionaler Festkörpermateriale charakteristisch und mit Lichtfeldern nutzbar sind [5]. Komplementär zur Verschaltung logischer Zustände könnten diese Quantenzustände als Speichermedium eine integrierte Architektur ermöglichen. Auch zu diesem Ansatz befindet sich ein Patent in Anmeldung [6]. Um weitere Bausteine zu entwickeln, das Verständnis über integrierte Lichtwellen-Elektronik zu verdichten und schließlich der Gesellschaft nutzbar zu machen,

stehe ich momentan international mit Forscherinnen und Forschern eng in Kontakt.

Ich bin überzeugt davon, dass die Erforschung der Lichtwellen-Elektronik in den kommenden Jahren zunehmen wird. Die Vergabe des Physik-Nobelpreises 2023 an drei Pionierinnen und Pioniere der Attosekundenphysik unterstreicht ganz besonders die Tragweite der ultraschnellen Kontrolle von Elektronen in Festkörpern, indem das Nobelkomitee hier sogar explizit neue Elektronik als Anwendung nennt [7]. Angesichts der gesellschaftlichen Relevanz neuartiger Computer, die die bisherige Technologie ablösen könnten, bin ich zuversichtlich, dass zukünftig auch Akteure der Politik und Industrie der Lichtwellen-Elektronik wachsende Aufmerksamkeit schenken werden.

Literatur

1. OECD, *Artificial Intelligence in Science: Challenges, Opportunities and the Future of Research* (OECD Publishing, 2023).
2. C. Heide*, **T. Boolakee***, T. Higuchi, P. Hommelhoff. Adiabaticity parameters for the categorization of light-matter interaction: From weak to strong driving. *Physical Review A* 104, 023103 (2021).
3. **T. Boolakee***, C. Heide*, A. Garzón-Ramírez, H.B. Weber, I. Franco, P. Hommelhoff. Light-field control of real and virtual charge carriers. *Nature* 605, 251–255 (2022).
4. **T. Boolakee**, P. Hommelhoff, C. Heide. “Logic gate device”, EP 21210695.9, US 2023/0170906 A1 (2023).

Während meiner Promotion habe ich geheiratet und den Namen meiner Frau angenommen, daher mein Namenswechsel von Boolakee auf Weitz.

5. **T. Weitz**, D.M.B. Lesko, S. Wittigslager, Weizhe Li, C. Heide, O. Neufeld, P. Hommelhoff. Lightwave-driven electrons in a Floquet topological insulator. Eingereicht (2024).
6. **T. Weitz**, D.M.B. Lesko, S. Wittigslager, P. Hommelhoff. “Opto-elektronische Methode zur Erzeugung Valley-polarisierter Ströme”, EP 24175546.1, Patentanmeldung eingereicht (2024).
7. The Nobel Prize in Physics 2023, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023>.

* gleicher Beitrag