

# Forschungsschwerpunkte – Prof. Dr. Rupert Huber

---

## Quantenphysik schneller als eine Lichtschwingung

Zeitlupenfilme inspirieren. Modernste laserbasierte Kameras sind so schnell, dass sie selbst Licht beim Schwingen zusehen können. Damit geht ein langgehegter Traum in Erfüllung: Man kann den elementaren Bausteinen der Materie bei ihren Bewegungen direkt zusehen, sie sogar kontrollieren und dabei faszinierende Einblicke in eine neuartige Quantenwelt mit Anwendungspotenzial gewinnen.

Panta rhei. Die Welt befindet sich im Fluss; alles ist in Bewegung. Was bereits antike Philosophen vermuteten, bestätigt die moderne Quantenphysik immer wieder eindrucksvoll. Will man verstehen, wie die Natur eigentlich funktioniert, so reicht es nicht, ihre mikroskopische Struktur abzubilden. Man muss vielmehr beobachten, wie sich die elementaren Bausteine der Materie blitzschnell bewegen und miteinander wechselwirken. Eine enorme Herausforderung angesichts der unvorstellbar kurzen Zeitskalen, auf denen etwa Atome um ihre Ruhelage schwingen oder Elektronen sich durch einen Festkörper bewegen können: Femtosekunden oder gar Attosekunden, der Milliardste Bruchteil einer Milliardstel Sekunde.

Mit neuesten teils selbst entwickelten Ultrakurzpuls-Lasersystemen versucht unsere Gruppe, Elementardynamik auf Zeitskalen zu kontrollieren, die selbst kürzer als eine einzelne Lichtschwingung ist. Lichtimpulse im infraroten Terahertz-Spektralbereich spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie eignen sich unter anderem perfekt für sogenannte Lichtwellen-Elektronik. Die Kernidee besteht darin, Elektronik und Optik geschickt miteinander zu verbinden: Atomar starke Lichtfelder werden als Wechsellspannung in Festkörpern verwendet, um Elektronen ultraschnell zu beschleunigen und die dabei auftretende Quantendynamik in extremer Superzeitlupe zu verfolgen. Diese Experimente vermitteln wichtige Informationen für künftige Hochgeschwindigkeitselektronik, ultimativ schnelle Mikroskopie oder Quanteninformationsverarbeitung der Zukunft, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen sollen.

Moderne Elektronik nutzt winzige Halbleiterstrukturen, in denen elektrische Felder Elektronen zu immer höheren Geschwindigkeiten beschleunigen. Schon bald dürften Feldstärken wie im Inneren von Atomen erreicht sein, die zu völlig neuen Quantenphänomenen führen. Mit intensiven Impulsen aus unserer eigens dafür entwickelten Regensburger Hochfeld-Terahertzquelle konnten wir Felder in der Größenordnung von 10 Milliarden Volt pro Meter mit einer Präzision von Billionstel Sekunden an Halbleiter anlegen und die dabei auftretende Elektrodynamik beobachten. Es zeigte sich, dass Elektronen in derart starken Feldern nicht mehr monoton in eine Richtung laufen, sondern Oszillationen ausführen – sogenannte dynamische

Bloch-Oszillationen. Die Ergebnisse vermitteln einen spektakulären Einblick in ein Quantenregime, das für künftige Halbleiterbauelemente entscheidend ist. Zudem erzeugen Bloch-Oszillationen die breitbandigsten Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich überhaupt – sogenannte Hohe Harmonische.

Die Zeitstruktur dieser Lichtemission förderte ein überraschendes Phänomen zutage: Unmittelbar nach ihrer Anregung durch das starke Lichtfeld ist die Energie der Elektronen nicht eindeutig bestimmt. Sie befinden sich vielmehr in oszillierenden Mischzuständen, die sich je nach Richtung des Lichtfelds gegenseitig auslöschen oder verstärken. Während quantenmechanische Effekte dieser Art meist nur bei minimalinvasiven Messmethoden sichtbar werden, verhält sich das neu entdeckte Phänomen genau umgekehrt: Je stärker das treibende Lichtfeld, desto ausgeprägter ist der Effekt. Die Ergebnisse, die mit Theorieunterstützung durch die Gruppen von Prof. Dr. Mackillo Kira, University of Michigan, und Prof. Dr. Stephan W. Koch, Universität Marburg, entstanden sind, eröffnen nicht nur neue Möglichkeiten für künftige Hochgeschwindigkeitselektronik. Sie zeigen auch, wie in Festkörpern unter Ausnutzung von Kristallsymmetrie ultraviolette Hohe-Harmonische-Wellenformen weit präziser maßgeschneidert werden können als mit konventioneller Attosekundenphotonik in atomaren Gasen.

Ein weiteres Forschungsgebiet ist von der Teilchenphysik inspiriert. Das Standardmodell der Elementarteilchen basiert auf Erkenntnissen aus Kollisionsexperimenten in Teilchenbeschleunigern. Aufgrund der gigantischen Teilchendichte wurden analoge Kollisionsexperimente in Festkörpern bislang für unmöglich gehalten. Jedoch kann die komplexe Wechselwirkung von vielen Teilchen auf einzelne Objekte – sogenannte Quasiteilchen – reduziert werden. Unserer Gruppe gelang es, Quasiteilchen gezielt miteinander zu kollidieren. Zunächst erzeugten wir in einem Lichtblitz Elektron-Lochpaare, die ein oszillierendes Terahertz-Lichtfeld voneinander trennte, um sie schließlich mit hoher Geschwindigkeit zu rekollidieren. Der gesamte Prozess läuft schneller als eine Lichtschwingung ab. Die Kollisionen führen zu Lichtblitzen, die ähnlich wie in Elementarteilchen-Beschleunigern Rückschlüsse auf die Struktur und Dynamik der Quasiteilchen zulassen. Der neue Beschleuniger könnte zur Lösung von Kernfragen der modernen Festkörperphysik, etwa zum Mechanismus der Hochtemperatursupraleitung, beitragen.

Neben elektrischen Strömen können Lichtwellen auch andere Quanteneigenschaften, wie sogenannte Spins und Pseudospins von Elektronen, schalten. Damit ist prinzipiell auch Quanteninformationsverarbeitung bei optischen Taktraten denkbar. Ein ähnlich wichtiger Meilenstein gelang jüngst in Kooperation mit der Gruppe von Prof. Dr. Ulrich Höfer, Universität Marburg. In der modernen Materialklasse sogenannter topologischer Isolatoren können lichtwellenbeschleunigte Elektronen ballistisch, das heißt ohne Streuung und Aufheizen der Umgebung, über makroskopische Distanzen transportiert werden. Damit könnten sehr bald echte

mikroelektronische Bauelemente entstehen, die um viele Größenordnungen schneller und weniger energieintensiv sind als die derzeit schnellsten Computer der Welt.

Die Idee der Lichtwellen-Elektronik lässt sich sogar mit einer Ortsauflösung besser als ein Atomdurchmesser kombinieren. Gemeinsam mit der Gruppe von Prof. Dr. Jascha Repp, Universität Regensburg, konnten wir ein Rastertunnelmikroskop mit Lichtwellen transient vorspannen und ein einzelnes Elektron aus einem definierten Orbital eines einzelnen Moleküls innerhalb weniger Femtosekunden gezielt extrahieren. Die dadurch in Gang gesetzte Molekülbewegung konnten wir im weltweit ersten atomaren Zeitlupenfilm direkt in Ort und Zeit verfolgen. Dieser Ansatz schlägt alle bekannten Alternativkonzepte schneller Mikroskopie um Größenordnungen und dürfte unseren Zugang zum Nanokosmos revolutionieren.

Die Erforschung der ultraschnellen Bewegung elementarer Bausteine auf ihren intrinsischen Zeitskalen ist ein zutiefst interdisziplinäres Anliegen aller Naturwissenschaften. Um etwa Phasenübergänge und chemische Reaktionen optisch zu kontrollieren oder lebenswichtige Prozesse in der Zelle zu verstehen, muss das Wechselspiel nanoskopischer Bausteine direkt in bewegten Bildern orts- und zeitaufgelöst verfolgt werden. Im derzeit neu entstehenden Forschungsbau RUN (Regensburg Center for Ultrafast Nanoscopy) werden wir gemeinsam mit Kollegen aus der Biologie, Chemie und Physik diesen Fragen auf den Grund gehen. Subzyklen-Dynamik dürfte eine überragende Rolle in einem breiten wissenschaftlichen Kontext spielen, der von biochemischen Prozessen des Sehvorgangs bis zur kosmologischen Hawking-Strahlung schwarzer Löcher reicht. Die Wissenschaft hat gerade erst begonnen, an der Oberfläche zu kratzen.