

Physik auf kurzen Zeit-

In nanostrukturierten Materialien können durch extrem kurze Laserpulse physikalische Prozesse in Gang gesetzt werden, die auf so kurzen Zeit- und Raumskalen ablaufen, dass quantenmechanische Effekte dominieren. Hier werden zum einen prinzipielle Grenzen der klassischen Physik sichtbar, zum anderen eröffnen sich viele Perspektiven für neuartige Anwendungen. Am Physikalischen Institut der Universität Bayreuth befasst sich eine neue Arbeitsgruppe mit der Simulation solcher Vorgänge.

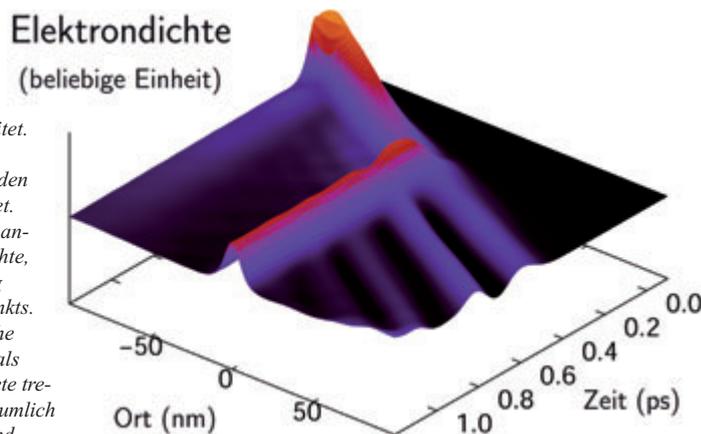
Das Hauptarbeitsfeld der von Prof. Vollrath Martin Axt geleiteten Arbeitsgruppe ist die theoretische Erforschung von physikalischen Prozessen, die in nanostrukturierten Materialien nach der Anregung mit ultrakurzen Laserpulsen ablaufen. Bei entsprechenden Messungen, die von experimentell auf diesem Gebiet arbeitenden Gruppen durchgeführt werden, werden mittlerweile Laserpulse verwendet mit Pulsdauern von nur einigen 10 Femtosekunden. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, von welchen Zeiten hier die Rede ist, hilft folgender Vergleich: 1 Femtosekunde verhält sich zu einer Sekunde in etwa so wie 7 Minuten zum geschätzten Alter des Universums! Auch die räumlichen Skalen,

auf denen die in der Arbeitsgruppe betrachteten Prozesse ablaufen, sind winzig im Vergleich zu aus dem Alltag vertrauten Längen. Ein Großteil der Arbeiten der Gruppe beschäftigt sich beispielsweise mit Halbleiterproben, die bis hinab auf die Ebene einzelner Atomlagen bzw. manchmal sogar einzelner Atome gezielt strukturiert sind. Mit Hilfe so genannter „Nahfeld-Optik“ sind neuerdings sogar optische Anregungen möglich, die räumlich auf derart kleine Bereiche beschränkt sind. Die nahe liegende Frage: „Wozu werden Anregungen auf so extrem kurzen Zeit- und Längenskalen überhaupt benötigt?“ hat viele Antworten. Zum einen dringt man auf ultrakurzen Raum-Zeit-Skalen in ein Regime vor, das dominiert wird von den Gesetzen der Quantenmechanik und in dem viele interessante Phänomene anzutreffen sind, die wesentlich anders sind, als man es von der Alltagserfahrung her gewohnt ist; z.B. zeigen Teilchen auf kurzen Raum-Zeit-Skalen deutlich Eigenschaften von Wellen. Ähnlich wie Wellen der klassischen Physik lassen sich auch die Wellen der Quan-

tenphysik überlagern, wobei sowohl Verstärkungen als auch Auslöschungen der Wellenamplitude möglich sind. Dies lässt sich nutzen, um ein System gezielt in einen bestimmten Zustand zu bringen - eine Vorgehensweise, die als „kohärente Kontrolle“ bekannt ist. So kann man beispielsweise in einem Halbleiter mit einem ultrakurzen Laserpuls extrem schnell Ladungsträgerpaare (so genannte Elektron-Loch-Paare) erzeugen und mit Hilfe der kohärenten Kontrolle durch einen zweiten Laserpuls ebenso schnell wieder verschwinden lassen. Diese und zahlreiche weitere Beispiele für Eigenschaften, die sich durch kohärente Kontrolle gezielt manipulieren lassen, gehören zu den Themen der Gruppe von Professor Axt. Effekte dieser Art können als Grundlage für Anwendungen in der Optoelektronik dienen, z.B. für den Bau extrem schneller optischer Schalter. An dieser Stelle wird auch deutlich, dass es sich hier um ein Arbeitsgebiet handelt, das nicht nur reich an grundsätzlichen Fragestellungen ist, sondern das auch einen Bezug zu bereits realisierten oder auch noch zu realisierenden Anwendungen hat.

Ein Beispiel für eine mögliche zukünftige Anwendung ist der Quantencomputer. Während in herkömmlichen Computern Information in Form von Ja-Nein-Alternativen gespeichert wird, sieht das Konzept eines Quantencomputers eine Überwindung dieser dualen Logik vor und zwar durch Speichern von Information in speziellen quantenmechanischen Überlagerungszuständen, den so genannten Qbits. Im Erfolgsfall könnte durch Verwendung dieser nicht dualen Quanten-

Abb. 1: Das Bild zeigt die raumzeitliche Entwicklung eines elektronischen Wellenpaketes, das sich entlang eines Halbleiter-Quantendrahtes ausbreitet. Die z-Achse gibt den Ort entlang des Drahtes an. Am Ort $z=0$ ist in den Draht ein Quantenpunkt eingebettet. Deutlich zu sehen ist die in den Quantenpunkt eingefangene Elektronendichte, sowie die wellenartige Ausbreitung nach Durchqueren des Quantenpunkts. Sowohl der nicht-monotone zeitliche Verlauf der eingefangenen Dichte als auch die nachlaufenden Wellenpakete treten nur auf, wenn die Elektronen räumlich und zeitlich genügend lokalisiert sind.



und Längenskalen

Prof. Vollrath Martin Axt



logik eine exponentielle Beschleunigung bestimmter Rechenoperationen erreicht werden. Da die Funktionsweise eines Quantencomputers entscheidend von den Möglichkeiten abhängt, kohärente Überlagerungszustände zu erzeugen und über eine gewisse Zeit aufrecht zu erhalten, sind Kohärenzzerstörende Prozesse ein wesentliches Hindernis bei der Realisierung. Ein Forschungsschwerpunkt von Prof. Axt ist die mikroskopische Modellierung solcher Kohärenzzerstörenden Prozesse. Man möchte hierbei nicht nur wissen, welcher Anfangszustand zu welchem Endzustand führt. Um diese Vorgänge wirklich zu verstehen, muß ihr zeitlicher Ablauf studiert werden. Dazu ist es allerdings notwendig, die Dynamik des Systems auf der für diese Abläufe charakteristischen Zeitskala zu untersuchen und dies ist für typische Prozesse in Festkörpern tatsächlich die eingangs beschriebene Ultrakurzzeitskala.

Die Beschäftigung mit Abläufen auf ultrakurzen Zeitskalen ist von theoretischer Seite interessant, da viele ansonsten sehr bewährte theoretische Konzepte hier an ihre Grenzen kommen. So ist es z.B. auf längeren Zeitskalen oft zulässig, sich die Wechselwirkung zwischen mikroskopischen Teilchen (etwa Elektronen) vereinfachend als Stoß vorzustellen, der an einem bestimmten Zeitpunkt stattfindet. Testet man ein System auf hinreichend kurzen Zeiten, so ist zu erkennen, dass die Wechselwirkungen keineswegs auf nur einen Zeitpunkt beschränkt sind; stattdessen haben sie eine endliche Dauer. Die endliche Dauer bedeutet auch, dass das Ergebnis der

Wechselwirkung noch nicht feststeht so lange der Prozess noch nicht abgeschlossen ist. Dies eröffnet Möglichkeiten der kohärenten Kontrolle von Wechselwirkungen wenn während des Ablaufs eines solchen Prozesses auf das System eingewirkt wird. Darüberhinaus treten bei einer mikroskopischen Behandlung Wechselwirkungen häufig mit einer zeitlichen Verzögerung auf. Man spricht von „Gedächtniseffekten“. Auf längeren Zeitskalen können solche Verzögerungen oft vernachlässigt werden. Im Bereich der Ultrakurzzeit-Dynamik gibt es jedoch Beispiele für Wechselwirkungen, bei denen bei Vernachlässigung der Verzögerung der gesamte Effekt verschwinden würde. Solche so genannten „reinen Dephasierungsprozesse“ haben oft weitere ungewöhnliche Eigenschaften, deren Untersuchung auch ein Thema der Arbeitsgruppe von Herrn Axt darstellt.

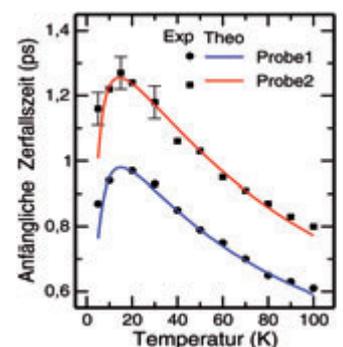
Die vielfältigen Fragen, die sich der Theorie in diesem Bereich stellen, werden in der Gruppe von Herrn Axt mit unterschiedlichen theoretischen Methoden bearbeitet. Neben Standardmethoden der Vielteilchendynamik werden auch eine Reihe selbst entwickelter Methoden verwendet, die teilweise selbst zu Standardmethoden geworden sind und bereits in Lehrbüchern behandelt werden. Die Weiterentwicklung geeigneter theoretischer Methoden und Konzepte ist

Vollrath Martin Axt ist seit September 2007 Leiter einer Arbeitsgruppe an der Universität Bayreuth. Herr Axt wurde 1964 in Düsseldorf geboren und hat an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen studiert. Von der RWTH Aachen wurde ihm sowohl das Diplom als auch der Dokortitel verliehen. Diplom- und Doktorarbeit wurden ausgezeichnet mit der Springorum-Denkmedaille bzw. der Borchers Medaille. Nach der Promotion wechselte Herr Axt an die University of Rochester in Rochester, New York, in den USA. Dieser Forschungsaufenthalt wurde mit einem Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Herr Axt kehrte schließlich nach Deutschland zurück, um sich an der Universität Münster zu habilitieren. Zur Durchführung der Habilitation erhielt er von der Deutschen Forschungsgemeinschaft ein Habilitationsstipendium.

Neben dem Ruf auf eine Professur für Quantentheorie kondensierter Materie an der Universität Bayreuth hatte Herr Axt 2007 zwei weitere Rufe erhalten und zwar einen an die Universität Rostock und einen an die Universität Siegen. Bei der Entscheidung für die Annahme des Bayreuther Rufes spielte das hier vorhandene attraktive Forschungsumfeld eine entscheidende Rolle. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang das breite Themenspektrum aus dem Bereich der Physik der kondensierten Materie, das aktuell am physikalischen Institut der Universität Bayreuth erforscht wird. Ein weiterer Pluspunkt für Bayreuth ist selbstverständlich auch die hohe Lebensqualität, die die Stadt aber auch der Uni-Campus zu bieten haben.

auch ein wichtiges Ziel der Forschung am Lehrstuhl von Prof. Axt. ■

Abb. 2: Der anfängliche Zerfall der in einem Halbleiter-Quantenpunkt induzierten optischen Polarisation ist ein Beispiel für einen Vorgang, der durch das im Text beschriebene „reine Dephasieren“ dominiert wird. Für die Zerfallszeit hatte die Gruppe von Herrn Axt eine sehr ungewöhnliche nicht-monotone Abhängigkeit von der Temperatur vorhergesagt. Das Bild zeigt die für zwei Proben mit unterschiedlich großen Quantenpunkten berechneten Zerfallszeiten zusammen mit Messwerten, die ein Jahr nach der theoretischen Vorhersage in der Gruppe von Frau Prof. Woggon an der Universität Dortmund gemessen wurden.



person & werdegang