



Blick in die Wissenschaft

35 36

Forschungsmagazin der Universität Regensburg



Forschung an der Universität Regensburg
Gott und die Welt

Theoretische Physik
Filmreife Festkörperforschung

Quantenphysik
Wenn es in Kristallen blitzt

Französische Literatur
Die Verwechslung von Ästhetik und Religion

Kulturanalyse
Politik macht Kleidung?

Juristische Zeitgeschichte
Kommunistenprozesse

Wirtschaftsgeschichte
Börsenkurse und Schlachtenglück

Immobilienwirtschaft
Einfaches Geld und Immobilienmärkte

Medienästhetik
Wovon träumt Alexa?

Wirtschaftsinformatik
Prozessorientiertes Qualitätsmanagement

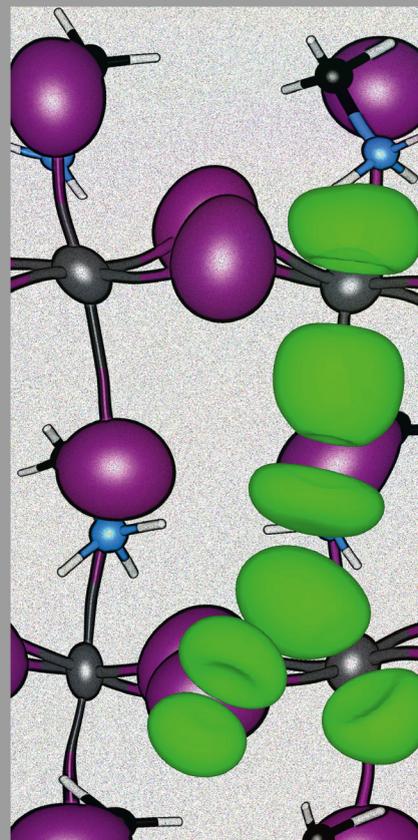
Neurowissenschaften
Sehen mit einem Zentralskotom

Anatomie
Wachsen und Erhalten – Blutgefäße Auge

Pharmazie
Stickoxide können auch anders

Immunologie und Physiologie
Die unerwartete Kraft des weißen Goldes

Mikrobiomforschung
Das Mikrobiom



Heft 35/36 | 26. Jahrgang 2017 | € 14,00 | ISSN 0942-928-X



**Blick in die Wissenschaft
Forschungsmagazin
der Universität Regensburg**

ISSN 0942-928-X
Doppelheft 35/36
26. Jahrgang

Herausgeber

Prof. Dr. Udo Hebel
Präsident der Universität Regensburg

Redaktionsleitung

Prof. Dr. rer. nat. Ralf Wagner

Redaktionsbeirat

Prof. Dr. jur. Christoph Althammer
Prof. Dr. rer. nat. Ferdinand Evers
Prof. Dr. nat. Felix Finster
Prof. Dr. rer. nat. Mark W. Greenlee
Prof. Dr. theol. Andreas Merkt
Prof. Dr. phil. Omar W. Nasim
Prof. Dr. rer. nat. Klaus Richter
Prof. Dr. rer. pol. Guido Schryen
Prof. Dr. med. Ernst Tamm
Prof. Dr. paed. Oliver Tepner
Prof. Dr. phil. Isabella von Treskow

Editorial Office

Claudia Kulke M.A.

Universität Regensburg,
93040 Regensburg
Telefon (09 41) 9 43-23 00
Telefax (09 41) 9 43-33 10

Verlag

Universitätsverlag Regensburg GmbH
Leibnizstraße 13, 93055 Regensburg
Telefon (09 41) 7 87 85-0
Telefax (09 41) 7 87 85-16
info@univerlag-regensburg.de
www.univerlag-regensburg.de
Geschäftsführer: Dr. Albrecht Weiland

Abonnementservice

Bastian Graf
b.graf@univerlag-regensburg.de

Anzeigenleitung

Larissa Nevecny
MME-Marquardt
info@mme-marquardt.de

Herstellung

Universitätsverlag Regensburg GmbH
info@univerlag-regensburg.de

Einzelpreis des Doppelheftes € 14,00

Jahresabonnement

bei zwei Ausgaben pro Jahr
€ 10,00 / ermäßigt € 9,00
für Schüler, Studenten und Akademiker
im Vorbereitungsdienst (inkl. 7 % MwSt)
zzgl. Versandkostenpauschale € 1,64 je
Ausgabe. Bestellung beim Verlag.
Für Mitglieder des **Vereins der Ehemaligen
Studierenden der Universität Regensburg
e.V.** und des **Vereins der Freunde der Uni-
versität Regensburg e.V.** ist der Bezug des
Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag
enthalten.

**Diesem Heft liegt ein Bestellschein
für die Festschrift der Universität
Regensburg bei.**

Spitzenforschung und Talentförderung, wettbewerbsfähig im nationalen und internationalen Vergleich und regelmäßig vordere Plätze in Deutschland-weiten Rankings bei Examensabschlüssen: Mit einigem Stolz kann die gerade einmal 50 Jahre junge Universität Regensburg auf ihre noch kurze Geschichte zurückblicken. Prof. Dr. Udo Hebel, Präsident der Universität Regensburg, konnte jedenfalls bei der Festveranstaltung des Jubiläumjahres im Historischen Reichssaal des alten Rathauses der Stadt Regensburg eine durchweg positive Bilanz ziehen, gilt doch die Universität Regensburg heute als etablierter Spieler im Konzert der internationalen Hochschullandschaft.

„Gott und die Welt sind ihre Forschungsfelder“. So nahm Prof. Hubert Markl, einst DFG Präsident, die Universität Regensburg schon 25 Jahre nach ihrem Gründungsakt wahr. Ausgehend von diesem Zitat beschreibt Prof. Dr. Bernhard Weber, Vizepräsident für Forschung und Nachwuchsförderung, in seinem Beitrag die jüngere Entwicklung des Wissenschaftsstandortes Regensburg. Neben der Bedeutung strukturbildender Sonderforschungsbereiche, außeruniversitärer Forschungseinrichtungen oder EU-Förderungen stellt sein Artikel die jüngeren, oft preisgekrönten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als entscheidend für die Entwicklung der Universität in den Leserkreis.

Ausgewählte Kolleginnen und Kollegen haben fakultätsübergreifend zu dieser Ausgabe beigetragen und ermöglichen so Einblick in die aktuelle Regensburger Forschungslandschaft. Dr. David Egger, erst unlängst mit dem Sofja Kovalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung ausgezeichnet, berichtet davon, wie die unerschöpflichen Energiequellen des Sonnenlichts durch Einsatz neuer Materialien mit spektakulären Wirkungsgraden nutzbar gemacht werden könnten. In seinem faszinierenden Streifzug entlang der Grenze zwischen Physik, Chemie und Materialwissenschaften stellt er die Verfilmung atomarer und elektronischer Prozesse als Grundlage für die Entwicklung effektiverer Solarzellen in Aussicht. „Filmreife Festkörperforschung“ – lesen Sie mal rein. Und lassen Sie sich dann mitreißen zur Quantenphysik, artverwandt und doch ganz anders: Über das was die Welt zusammen hält, was passiert, wenn’s im Festkörper blitzt und die kleinen Teilchen kollidieren.

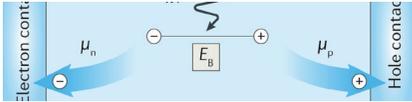
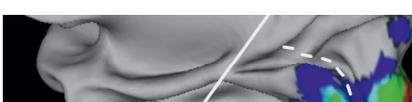
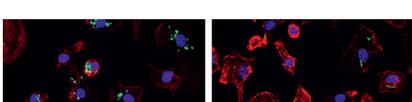


Eine Querschnittsbetrachtung über die Vielfalt der in Regensburg bearbeiteten Forschungsfelder, das war und ist das Leitmotiv für den „Blick in die Wissenschaft“. Mit einem Beitrag zur „Gefahr der Verwechslung von Ästhetik und Religion“, einer Kulturanalyse „Macht Kleidung Politik“, kurzen Reflektionen zur juristischen Zeit- und Wirtschaftsgeschichte, Einblicken in ausgewählte Aspekte der Immobilienwirtschaft, Wirtschaftsinformatik und Medienästhetik sowie Highlights aus Medizin und Lebenswissenschaften zieht diese Ausgabe historische Lehren und stellt diese gemeinsam mit neuen Erkenntnissen aus den experimentellen Fächern in eine Perspektive für unsere Zukunft.

Abschließend noch kurz in eigener Sache: Aufmerksame Leser werden festgestellt haben, dass der Redaktionsbeirat neu formiert, erweitert und durch ein Editorial Office ergänzt wurde – zum einen, um Kolleginnen und Kollegen, die sich in der Vergangenheit ehrenamtlich engagiert haben, zu entlasten, zum anderen, um der Darstellung der erweiterten Forschungsfelder, den Anforderungen an die Mitglieder des Redaktionsbeirates und vor allem auch Ihrem Anspruch an Information und Qualität gerecht zu werden. Ich hoffe, das ist mit dieser Ausgabe in neuer Besetzung gelungen!

Prof. Dr. Ralf Wagner
(Redaktionsleitung)

Inhalt

	Gott und die Welt	3	
	<i>Bernhard H. F. Weber</i>		
	Filmreife Festkörperforschung	9	
	<i>David Egger</i>		
	Wenn es in Kristallen blitzt	14	
	<i>Fabian Langer, Rupert Huber</i>		
	„Nichts ist gefährlicher als die Verwechslung von Ästhetik und Religion“	19	
	<i>Jonas Hock</i>		
	Politik macht Kleidung?	24	
	<i>Melanie Burgemeister</i>		
	Kommunistenprozesse	29	
	<i>Martin Löhnig</i>		
	Börsenkurse und Schlachtenglück	35	
	<i>Tobias A. Jopp</i>		
	Einfaches Geld und Immobilienmärkte	40	
	<i>Gabriel S. Lee</i>		
	Wovon träumt Alexa?	45	
	<i>Christiane Heibach</i>		
	Prozessorientiertes Qualitätsmanagement in Zeiten der Digitalisierung	52	
	<i>Florian Johannsen</i>		
	Sehen mit einem Zentralskotom	58	
	<i>Mark W. Greenlee, Tina Plank</i>		
	Wachsen und Erhalten – Blutgefäße im gesunden und kranken Auge	62	
	<i>Barbara M. Braunger</i>		
	Stickoxide können auch anders	68	
	<i>Jens Schlossmann, Andrea Schramm</i>		
	Die unerwartete Kraft des weißen Goldes	72	
	<i>Jonathan Jantsch</i>		
	Das Mikrobiom	76	
	<i>André Gessner</i>		

Wenn es in Kristallen blitzt

Kollisionen von Quasiteilchen

Fabian Langer, Rupert Huber

Das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt, aus welchen Bausteinen die Materie um uns herum aufgebaut ist und welche Kräfte zwischen ihnen wirken. In fester Materie, wie z. B. Kristallen, treten sehr viele dieser Teilchen miteinander in Wechselwirkung. Dann wird es ziemlich kompliziert. Genau zu beschreiben, wie die Teilchen in Verbindung stehen und welches Verhalten sich daraus ergibt, ist eine große Herausforderung. Gerade dieser Umstand macht die Festkörperphysik so spannend.

In Festkörpern sind unzählige viele Atome dicht aneinander gepackt; in Kristallen folgen sie einer periodischen Ordnung. Dieser strikte Aufbau ist gerade durch die Wechselwirkung der Teilchen miteinander bedingt. Sie gibt vor, in welche Richtungen atomare Bindungen entstehen und wo sich das nächste Atom positioniert. Durch Anordnung und Kombination von verschiedenen Atomsorten entsteht eine Mannigfaltigkeit von Materialien mit ganz unter-

schiedlichen Eigenschaften. Sie leiten zum Beispiel Strom oder Wärme unterschiedlich gut und erscheinen in spezifischen Farben.

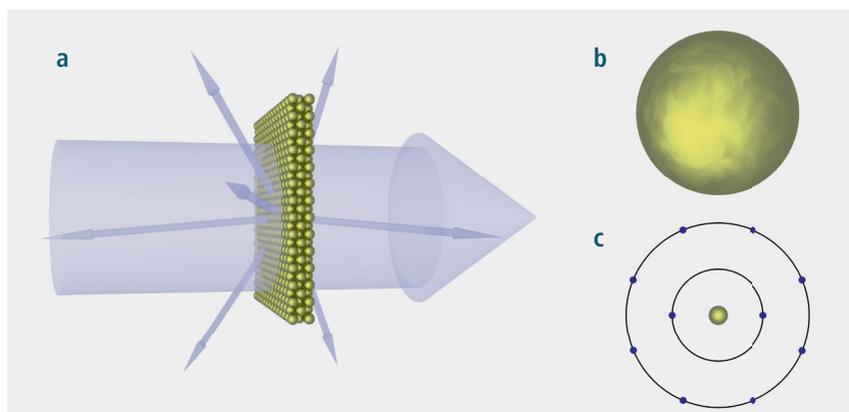
In diesem See von Teilchen in einem Kristall entstehen in vielen Fällen sogar neue Anregungen, die sich wiederum ähnlich wie ein einzelnes Teilchen verhalten können, jedoch eigentlich nur aus der Wechselwirkung aller Partikel bestehen. Dieser eigenartig anmutende Gedanke stammt von Lev Landau, und Physiker nennen diese Anregungen „Quasiteilchen“. Dieses Konzept ist heute ein zentrales Element der Festkörperphysik, denn die Beschreibung der komplexen Prozesse in fester Materie wird dadurch ungemein erleichtert und wesentlich anschaulicher.

Doch wie real sind Quasiteilchen? Handelt es sich dabei in einem gewissen Sinne um „echte“ Teilchen oder doch eher um eine gedankliche Krücke, mit der Physiker sich das Leben erleichtern? Eine raffinierte Methode, diesen

Quasiteilchen auf den Zahn zu fühlen, haben wir in Zusammenarbeit mit Physikern der Universität Marburg und der University of California in Santa Barbara vor Kurzem aufgezeigt.

Atome – wirklich unteilbar?

Atome galten lange Zeit als die kleinsten Bausteine der uns umgebenden Materie. Noch immer verwenden wir das griechische Wort „atomos“, das übersetzt „unteilbar“ bedeutet, um diese Gebilde zu beschreiben. Doch spätestens seit den Arbeiten von Marie Skłodowska-Curie und Henri Becquerel wissen wir, dass Atome aus fundamentalen Bausteinen zusammengesetzt sein müssen. Die Entdeckung des radioaktiven Zerfalls zeigte nämlich deutlich, dass Atome Bruchstücke aus ihrem Inneren aussenden können. Wie die innere Struktur dieser winzigen Konstrukte genauer aussieht, konnte Ernest Rutherford durch seine Kollisionsexperimente auf-



1 Das Rutherford'sche Experiment.

a, Alphateilchen (blau schattierter Pfeil) werden auf eine Goldfolie geschossen und dabei gestreut. **b**, Eine feste Kugel symbolisiert das Atommodell vor dem Rutherford'schen Versuch. **c**, Nach dem Experiment war klar, dass Atome aus einem kleinen, massiven Kern und einer größtenteils leeren Elektronenhülle bestehen.

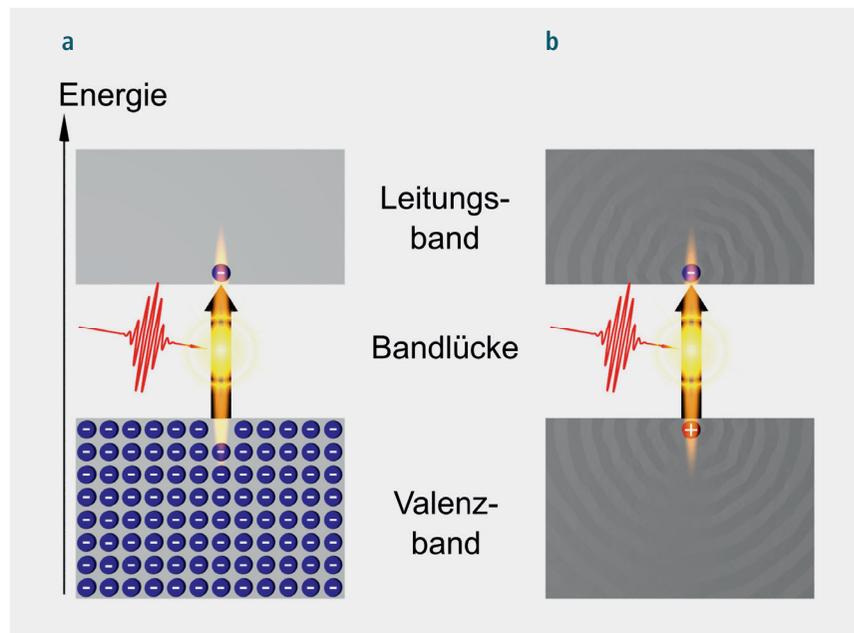
klären. Er verwendete die neu entdeckten Alphateilchen, die beim radioaktiven Zerfall entstehen; dabei handelt es sich im Wesentlichen um zweifach positiv geladene Heliumkerne. Damit beschoss er hauchdünne Metallfolien [1a]. Anstatt nun eine simple Abschwächung des Alphastrahls durch das Material zu beobachten, stellte Rutherford fest, dass die allermeisten Teilchen vollkommen ungehindert durch die Folie hindurchflogen. In einzelnen Fällen jedoch wurde die Richtung der Alphateilchen abgelenkt [1a]. Teilweise kehrte sich ihre Bewegungsrichtung sogar komplett um!

Ernest Rutherford besaß die nötige Kühnheit, um seine bisherige Vorstellung von Atomen [1b] in Frage zu stellen: Er kam zu dem Schluss, dass seine Ergebnisse mit einem atomaren Aufbau der Materie nur in Einklang zu bringen sind, wenn sich Masse und Ladung der Atome in einem äußerst kleinen Volumen konzentriert [1c]. Dieser Kern wird noch durch eine dünne Elektronenhülle zum Atom komplettiert. Diese Erkenntnis von Rutherford hat zur Folge, dass ein jedes Material zum Großteil aus leerem Raum besteht. Eine in der Tat erschreckende Vorstellung, dass alle Materie um uns herum größtenteils aus Nichts aufgebaut ist.

Kollisionsexperimente haben die Erforschung des Teilchenkosmos bedeutend vorgebracht. Angefangen mit den Untersuchungen von Rutherford aus den frühen Tagen, bis hin zu den riesigen Teilchenbeschleunigern von heute, wie dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf, sind es seit über einhundert Jahren Teilchenkollisionen, die uns neue Erkenntnisse über die Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie vermitteln. Die jüngste Entdeckung war das lange theoretisch vorhergesagte Higgs-Teilchen, das in Proton-Proton Kollisionen am LHC gefunden wurde. Es „verleiht“ der Materie ihre Masse. Für ihre Vorhersage dieses Mechanismus wurden François Englert und Peter H. Higgs mit dem Nobelpreis für Physik 2013 geehrt.

Was die Welt im Innersten zusammenhält – Teilchen und Quasiteilchen

Die Interaktionen der Atome untereinander sorgen für die unterschiedlichen Eigenschaften von Materialien. Die Festkörperphysik macht es sich zur Aufgabe,



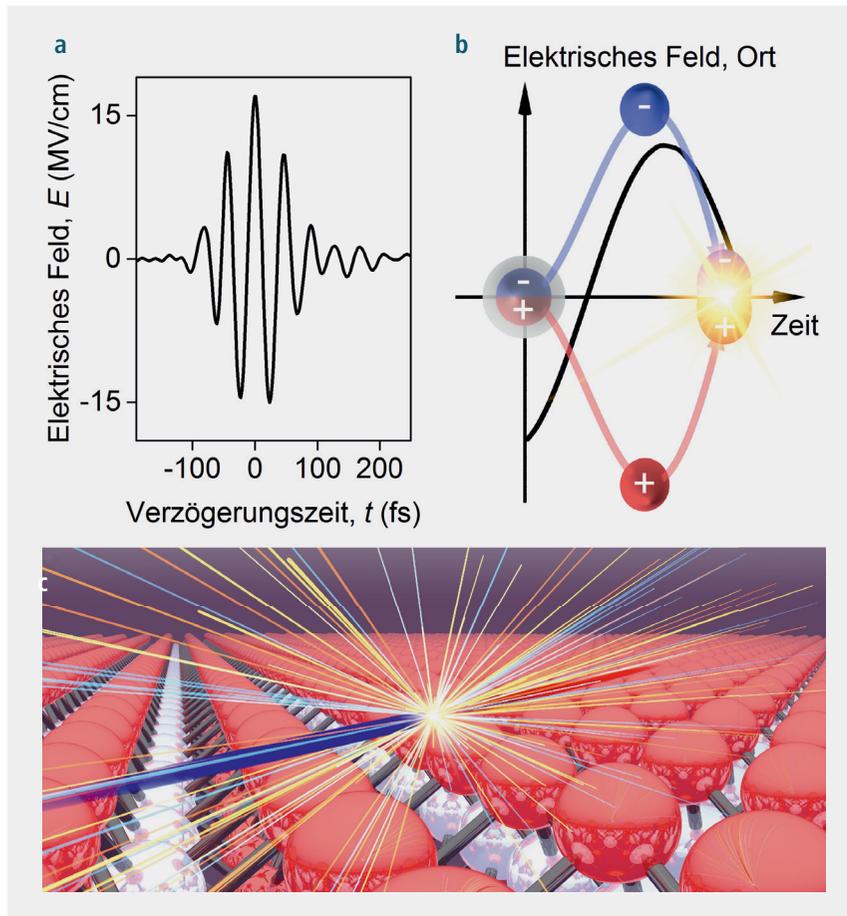
2 Vielteilchenanregung im Festkörper. a, Aus einem Ensemble von gebundenen Elektronen (blaue Kugeln, links) wird durch einen Lichtblitz (rot) ein Elektron aus dem Valenzband in einen mobilen Zustand im Leitungsband angeregt. b, Im Bild der Quasiteilchen entsteht ein neuer Hintergrund (gewellte Fläche, rechts) und der Lichtblitz erzeugt ein Elektron und ein Loch (rote Kugel).

diese Wechselwirkungen und Kräfte in den verschiedenen Stoffen zu verstehen sowie gegebenenfalls zu beeinflussen und in Anwendungen nutzbar zu machen. Kein allzu leichtes Unterfangen, wenn man bedenkt, wie viele Teilchen sich in einem Festkörper aneinander drängen. Grob gesagt beläuft sich die typische Anzahl von Teilchen auf 10^{23} (eine Eins mit 23 Nullen oder Hunderttausend Milliarden Milliarden) pro Kubikzentimeter. Es ist also verständlich, dass die korrekte Beschreibung eines jeden einzelnen Teilchens, das mit allen anderen in Verbindung steht und diese ebenso beeinflusst, sehr aufwändig sein wird. Doch auch hier schafft wieder einmal die geniale Idee eines großen Physikers Abhilfe: Lev Landau führte ein Konzept ein, wie man die Wechselwirkung der vielen Teilchen untereinander als Hintergrund betrachten kann, vor dem ein neues fiktives Teilchen mit veränderten Eigenschaften entsteht. Anstatt ein pointilistisches Gemälde aus abertausend einzelnen Punkten zusammenzusetzen, wird die Leinwand sozusagen von Landau neu grundiert, bevor man einen einzelnen Punkt setzt.

Ein Paradebeispiel für die Anwendung der Quasiteilchen-Idee liefert die Photovoltaik. Solarzellen wandeln Sonnenlicht in elektrischen Strom um: Bei Bestrahlung wird Energie vom Licht auf ein Elektron übertragen. Das Elektron wird in einen mo-

bilien Zustand angeregt. Am Ausgangsort lässt es eine Fehlstelle zurück [2a]. Anstatt die übrigen Elektronen um diese Fehlstelle herum zu beschreiben, wird ein einzelnes, neues Teilchen eingeführt, ein sogenanntes „Loch“. Das Loch trägt beispielsweise eine dem Elektron entgegengesetzte, positive Ladung [2b], hat eine (effektive) Masse und auch einen Impuls. In dieser Weise wird das Vielteilchenproblem von 10^{23} Elektronen extrem vereinfacht; man konzentriert sich auf ein Elektron und ein Loch [2]. Mit nur zwei Teilchen kommen dann auch die Physiker noch gut zurecht.

Ein Großteil der Festkörperphysik beschäftigt sich mit Quasiteilchen und deren Eigenschaften. Sie sind nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für zahllose technologische Anwendungen wie Solarzellen, LEDs oder Computerchips relevant. Jedoch lassen sich Quasiteilchen nicht so einfach untersuchen wie andere Teilchen, denn sie benötigen den Festkörper um sich herum, in dem sie entstehen. Noch dazu handelt es sich in den allermeisten Fällen um sehr kurzlebige Anregungen. Quasiteilchen können nämlich zerfallen, wie man sich am Beispiel mit der Solarzelle verdeutlicht: Wenn das mobile Elektron seinem Loch zu nahe kommt, dann fällt es wieder hinein, d.h. Elektron und Loch „rekombinieren“. Das erschwert eine eingehende Untersuchung.



3 Lichtwelle und Quasiteilchen-Kollision. **a**, Zeitliche Entwicklung des gemessenen elektrischen Felds E einer mittelinfraroten Lichtschwingung. **b**, Entgegengesetzt geladenes Elektron (blau) und Loch (rot) werden durch die Lichtwelle (schwarz) ausgelenkt und nach einer gewissen Zeit kollidiert. **c**, Künstlerische Darstellung einer Quasiteilchen-Kollision vor einem Kristallgitter. Die Energie wird als Licht (farbige Strahlen) freigesetzt.

Ein Beschleuniger aus Licht

Dem Erfolgsrezept von Rutherford und seinen Schülern folgend, erscheint es zunächst naheliegend, Quasiteilchen miteinander kollidieren zu lassen, um mehr über ihren vermeintlichen Teilchencharakter, ihre innere Struktur und Wechselwirkungen untereinander herauszufinden. Konventionelle Beschleuniger können dazu freilich nicht genutzt werden. Eine neuartige Idee ist also notwendig, um Kollisionen der fiktiven Teilchen innerhalb des Festkörpers und noch dazu während ihrer Lebensdauer durchzuführen.

Da Quasiteilchen mit Licht angeregt werden können und deren bisherige Untersuchung auf optischen Methoden basiert hat, ist es ein natürlicher, erster Schritt darauf aufzubauen. Mit einem Lichtblitz können die Quasiteilchen kontrolliert präpariert werden. Doch wie schafft man es, sie anschließend zu beschleunigen, noch bevor sie wieder zerfallen sind? Aufgrund

ihrer aberwitzig kurzen Lebensdauer, reicht es leider nicht aus, wie in einem herkömmlichen Beschleuniger lediglich eine Hochspannung an den Festkörper anzulegen. Die Quasiteilchen „leben“ dazu nicht lange genug, sie existieren nur für wenige Femtosekunden. Diese Zeitspanne ist so kurz, dass selbst Licht in ihr lediglich den hundertsten Teil eines Haardurchmessers zu durchlaufen vermag.

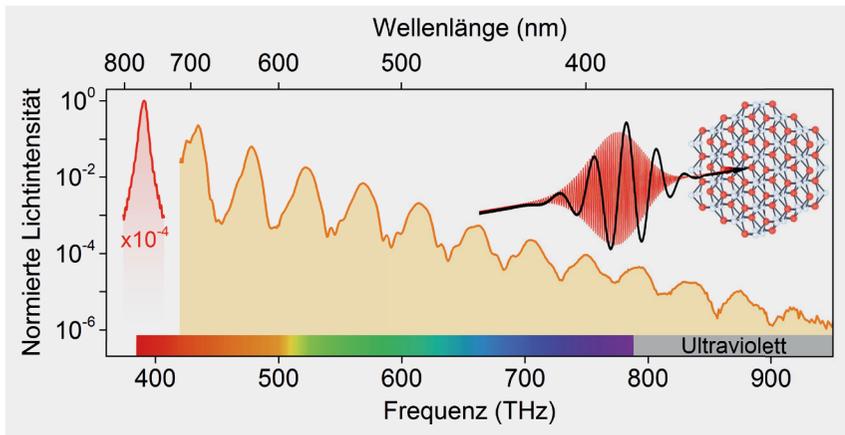
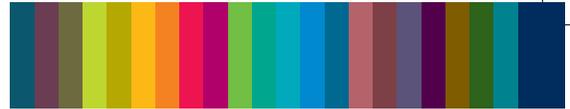
Um der kurzen Lebensdauer gerecht zu werden, muss zur Beschleunigung ein Spannungsimpuls verwendet werden, der genau dann maximal ist, wenn die Quasiteilchen gerade geboren worden sind. Wir brauchen dazu ein Beschleunigerfeld, das zur richtigen Zeit superschnell ein- und ausgeschaltet wird. Das Feld schnell wieder auszuschalten ist dabei sehr wichtig. Denn um die gewünschte Beschleunigung zu erreichen, muss man mit Feldstärken arbeiten, die so hoch sind, dass sie den Kristall zerstören würden, wenn sie zu lange wirken.

Wenn entsprechend schnelle Schalter handelsüblich wären, dann könnten wir auch Ströme in der heutigen Elektronik viel schneller kontrollieren. Wir hätten damit bedeutend leistungsstärkere Computer zur Verfügung. Da es solche Schalter aber nicht zu kaufen gibt, muss man sich etwas Geschickteres einfallen lassen: Man kann sich natürlich auftretende Wechselfelder zu Nutze machen und diese als Schalter einsetzen; das ist unser Ansatz. Licht selbst besteht nämlich aus einem schnell schwingenden elektrischen und magnetischen Wechselfeld. Eine Lichtwelle ist also gewissermaßen der schnellste Schalter, den man sich vorstellen kann.

Das elektrische Feld von Licht **[3a]** schwingt im sichtbaren Bereich etwa eine Billiarde Mal in der Sekunde hin und her. Damit würde sich auch ebenso oft die Richtung ändern, in welche die geladenen Quasiteilchen beschleunigt werden. Was sich hier erst einmal wie ein Nachteil anhört - die Quasiteilchen werden vom Lichtfeld hin- und hergerissen - kann man sich für einen Quasiteilchen-Collider zunutze machen. Denn sobald die erwähnten Paare von Elektronen und Löchern durch Licht produziert worden sind, beschleunigt eine zweite Lichtwelle die unterschiedlich geladenen Partner zunächst voneinander weg und dann im nächsten Halbzyklus der Schwingung aufeinander zu, sodass die Quasiteilchen wie in einem Linearbeschleuniger entlang einer Linie miteinander zur Kollision gebracht werden **[3b und c]**.

Wenn die Quasiteilchen kollidieren, so rekombinieren Elektron und Loch. Das ist der umgekehrte Schritt im Vergleich zu ihrer Produktion. Er ist daher mit einer Lichtemission verbunden. Da aber in der Kollision wegen der Beschleunigung zusätzliche Energie steckt, wird bei der Rekombination höher energetisches Licht ausgesendet, als das, was eingestrahlt wurde. Das Licht ändert seine Farbe im Vergleich zum anregenden Lichtblitz und ist zum Blauen hin verschoben.

Die Zutaten für ein Kollisionsexperiment im Festkörper sind im Bildeinsatz von Abbildung **[4]** dargestellt. Ein Anregungsimpuls (rot) trifft auf einen Halbleiter-Kristall und präpariert Elektron-Loch-Paare. Eine niederfrequente Lichtwelle im infraroten Spektralbereich, auch Terahertz-Bereich genannt, dient als Beschleunigerfeld und verursacht Kollisionen zwischen Elektronen und Löchern. Das Resultat dieses Versuchs, nämlich die Lichtemission, ist in Abbildung **[4]** frequenz aufgelöst aufgetragen. Die



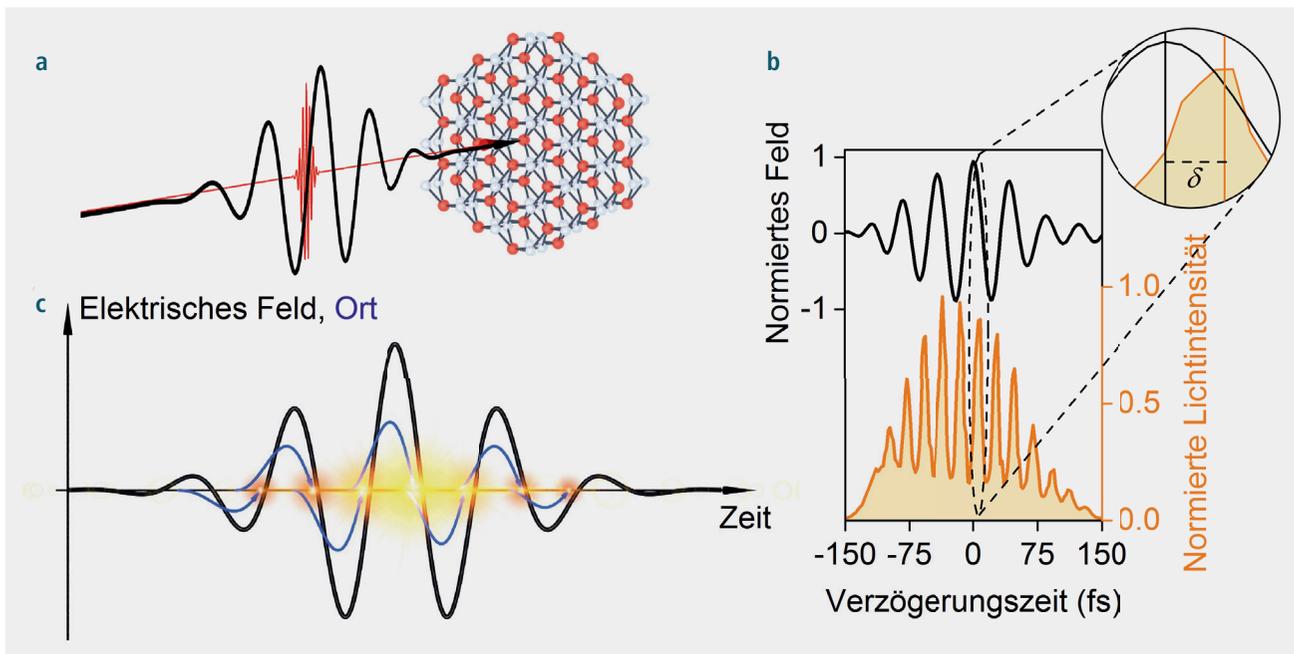
4 Lichtemission durch Elektron-Loch-Kollisionen. Die Quasiteilchen werden mit dem roten Teil des Spektrums angeregt. Wenn das Beschleunigerfeld gleichzeitig anliegt, wird zusätzlich Licht mit kleinerer Wellenlänge, also höherer Frequenz ausgesendet. Dieses Licht wird während einer Kollision frei. Der Bildeinsatz zeigt die experimentelle Geometrie mit Anregungsimpuls (rot), Lichtwelle (schwarz) und Halbleiter-Kristall.

Anregung, d. h. die Produktion der Elektron-Loch-Paare, findet am roten Ende des sichtbaren Spektrums statt. Die Quasiteilchenkollisionen führen zu einer spektral modulierten Emission, die den gesamten sichtbaren Bereich abdeckt und sich sogar noch ins Ultraviolette erstreckt. Diese Spitzen im Spektrum nennt man auch „Seitenbänder“, da sie als spektrale Bänder neben der Anregung, also seitlich dazu, auftreten. In der Form und dem Verhalten dieser Emission steckt bereits viel Information über die

Kollisionspartner, die mit einer quantentheoretischen Modellierung extrahiert werden können. Ähnlich wie in großen Beschleuniger-Anlagen, wo die Teilchen und Zerfallsprodukte, die bei den energiereichen Kollisionen entstehen, untersucht werden, kann man auch hier Details über die Quasiteilchen aus dem ausgesandten Licht ableiten.

Doch um den Quasiteilchen-Collider und seine mikroskopische Dynamik zu verstehen, ist es unverzichtbar, den Prozess in Echtzeit zu verfolgen. Glücklicherweise

stellt die Regensburger Hochfeld-Terahertz-Quelle nicht nur die schnellen Beschleunigerfelder bereit, sondern ermöglicht auch extreme Zeitlupenverfahren dank modernster Lasertechnik. Mit dieser Methodik können die Quasiteilchen-Kollisionen auf ihrer natürlichen Zeitskala ausgetestet werden. Zu diesem Zweck werden Elektronen und Löcher zu einem genau definierten Zeitpunkt während des Beschleunigerfeldes erzeugt [5a]. Dies geschieht mit einem ultrakurzen Laserimpuls. Auf diese Weise kann man herausfinden, zu welchen Zeitpunkten Elektron und Loch generiert werden müssen, sodass diese anschließend durch das Lichtfeld beschleunigt mit hoher Geschwindigkeit kollidieren. Führt man dieses Experiment durch und misst die Lichtemission für verschiedene Verzögerungszeiten zwischen Anregungsimpuls und Beschleunigerfeld, so beobachtet man gute und schlechte Zeitpunkte für die Erzeugung der Elektron-Loch-Paare [5b]: Nur wenn die Quasiteilchen nach dem Maximum des Feldes injiziert werden, kann der darauffolgende Schwingungszyklus Elektron und Loch wieder kollidieren, was dann zu intensiver Lichtemission führt. Startet die Beschleunigung der beiden Quasiteilchen jedoch vor dem Feldmaximum, kann im nächsten Halbzyklus die Bewegung nicht mehr umgekehrt werden, und die



5 Zeitaufgelöste Quasiteilchen-Kollisionen. a, Mit einem ultrakurzen Anregungsimpuls (rot) werden Elektron-Loch-Paare schneller erzeugt, als das Beschleunigerfeld (schwarz) schwingt. b, Die Abbildung zeigt das Beschleunigerfeld (schwarz) und die emittierte Lichtintensität (orange), wenn Elektron-Loch-Paare zu verschiedenen Verzögerungszeiten generiert werden. Nur für bestimmte Zeitpunkte laufen die Kollisionen effizient ab und führen zu intensiver Lichtemission. Der Bildeinsatz zeigt, dass die guten Zeitpunkte um eine Verzögerung δ nach den Maxima des Beschleunigerfeldes liegen. c, Die Elektron-Bewegung relativ zum Loch ist mit blauen Pfeilen dargestellt. Während jeder Lichtschwingung kann ein Elektron vom Loch wegbeschleunigt werden und mit ihm bei hoher Geschwindigkeit anschließend kollidieren. Die Lichtemission (helle Blitze) wird umso energiereicher, je stärker das Beschleunigerfeld (schwarz) ist.

beiden Teilchen treiben auseinander. Diese ballistische Dynamik führt zu einer charakteristischen Verzögerung δ der Lichtemission verglichen mit dem Feld der Lichtwelle [5b]. Sie ist wie ein Fingerabdruck dafür, dass die Seitenbänder tatsächlich durch Quasiteilchen-Kollisionen entstehen. Die Beschleunigungspfade eines Elektrons relativ zum Loch für verschiedene Injektionszeitpunkte sind in [5c] dargestellt. Je intensiver der beschleunigende Schwingungszyklus der Lichtwelle ist, desto energiereicher und heller ist die Kollision mit dem Loch.

Mit diesen Experimenten wird ein Meilenstein in der Untersuchung von Quasiteilchen erreicht. Denn es wird eindeutig demonstriert, dass diese komplexen Gebilde ihren Teilchencharakter auch unter den extremen Bedingungen der Kollision behalten. Sie sind in diesem Sinne real. Die Rezepte, die sich in der Elementarteilchenphysik in den großen Beschleunigern bewährt haben, bleiben auch unter Laborbedingungen im Festkörper erfolgreich.

Das grundlegende Konzept, das wir hier entwickelt haben, ebnet die Bahn für eine große neue Klasse von Experimenten mit Festkörpern. Licht-getriebene Kollisionen können nämlich auch mit Quasiteilchen durchgeführt werden, die weit komplexer sind als Elektronen und Löcher, weil sie eine innere Struktur haben. Würde man zum Beispiel Elektronen in Hochtemperatur-Supraleitern kollidieren, so könnte

man vielleicht aufklären, wie es in diesen Materialien zur Bildung von Cooper-Paaren kommt, die selbst bei vergleichsweise hohen Sprungtemperaturen noch stabil sind. Dies könnte der Schlüssel sein, um das Phänomen der Hochtemperatur-Supraleitung endlich zu verstehen. Wenn es damit gelänge, diese Materialien langfristig gezielt so weit zu optimieren, dass sie bei Raumtemperatur einsetzbar wären, dann könnte man Strom widerstandsfrei, d. h. ohne Leistungsverluste, über beliebig lange Strecken transportieren, um Energie zu sparen.

Immer neue Material-Klassen werden entdeckt und hergestellt, die mit Hilfe Licht-getriebener Kollisionen eingehend untersucht werden könnten. Zum Beispiel gibt es Ansätze, spezielle Anregungen in atomar dünnen Lagen von Übergangsmetall-Dichalkogeniden, wie Molybdändisulfid oder Wolframdiselelenid, für innovative Konzepte zur verlustarmen Signalverarbeitung auszunutzen. Gänzlich neue Möglichkeiten für die Informationstechnologie bieten topologisch geschützte Zustände – eine weitere Entdeckung, die erst kürzlich mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt wurde.

Lichtwellen-Elektronik könnte auch unseren Alltag verändern. Eine Lichtwelle kann die Bewegung von Ladungen im Festkörper auf der Zeitskala der Schwingungsdauer von Licht steuern. Wenn sich diese Idee für die Informationsverarbeitung nutzen ließe, dann wären tausend- bis hun-

derttausendmal höhere Taktraten möglich, als die heutige Elektronik sie umzusetzen vermag. Die Leistungsfähigkeit von Computern könnte so ganz enorm gesteigert werden. Wenn unsere Technologien und damit auch ein Stück Lebensqualität nachhaltig und auf lange Sicht gesichert und ausgebaut werden sollen, dann ist Grundlagenforschung unverzichtbar.

Literatur

Fabian Langer, Matthias Hohenleutner, Christoph P. Schmid, Christoph Poellmann, Philipp Nagler, Tobias Korn, Christian Schüller, Mark S. Sherwin, Ulrich Huttner, Johannes T. Steiner, Stephan W. Koch, Mackillo Kira, Rupert Huber, Lightwave-driven quasiparticle collisions on a subcycle timescale. *Nature* 533 (2016), S. 225–229.

Olaf Schubert, Rupert Huber, Ultraschnell geblitzt. *Quantenphysik auf der Zeitskala einer Lichtschwingung. Blick in die Wissenschaft* 30 (2014), S. 9–15.

Matthias Hohenleutner, Fabian Langer, Olaf Schubert, Matthias Knorr, Ulrich Huttner, Stephan W. Koch, Mackillo Kira, Rupert Huber, Real-time observation of interfering crystal electrons in high-harmonic generation. *Nature* 523 (2015), S. 572–575.

Lev Landau, The theory of a Fermi liquid. *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics* 3 (1957), S. 920–925.

Mackillo Kira, Stephan W. Koch, *Semiconductor Quantum Optics*. 1. Auflage. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.



© Universität Regensburg

M. Sc. **Fabian Langer**, geb. 1990 in Bamberg. Studium der Physik an der Universität Erlangen-Nürnberg und Universität Regensburg im gemeinsamen Forschungsstudiengang bis 2013. Danach Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Regensburg und Promotion am Lehrstuhl von Prof. Huber über Lichtwellen-getriebene Beschleunigung von Quasiteilchen.

Forschungsschwerpunkte: Ultrakurzzeit- und Hochfeldphysik in Festkörpern.

Prof. Dr. **Rupert Huber**, geb. in Traunstein. Studium der Physik an der Technischen Universität München (TUM) und an der UC Berkeley bis 1999. 2000 Forschungsaufenthalt in Hongkong. 2004 Promotion an der TUM über den ultraschnellen Aufbau von Coulombabschirmung. Danach Humboldt-Stipendiat am Lawrence Berkeley National Laboratory bis 2006. Leiter einer Emmy Noether-Nachwuchsgruppe an der Universität Konstanz bis 2010. Seit Oktober 2010 Professor für Experimentalphysik an der Universität Regensburg.

Forschungsschwerpunkte: Ultrakurzzeitphysik und Femtosekunden-Photonik.



© Universität Regensburg