



Blick in die Wissenschaft

33 34

Forschungsmagazin der Universität Regensburg

Wirtschafts- und Sozialgeschichte

Auskommen und Vorratshaltung seit dem Mittelalter

Kulturgeschichte

Teufelsaustreiber Johann J. Gaßner (1727–1779)

Südosteuropa

Ein Krankenhaus für Galați

Literaturwissenschaft

„Den Schädel auf. Die Brust entzwei.“

Arbeitspsychologie

Chronischer Stress am Arbeitsplatz und Burnout

Interventionelle Immunologie

Die drei Hürden der Tumorimmuntherapie

Mikrobiologie

Die in die Hölle wollen

Quantenphysik

„Ich bin schwarz und dennoch bin ich schön.“

Internationale Politik

Macht und Ordnung

Extremismusforschung

Aufstand der Ausgegrenzten oder Suche nach Sinn?

Liturgiewissenschaft

Dramatische Vergegenwärtigung im öffentlichen Raum

Philosophie der Antike

Der Wald vor lauter Bäumen

Wirtschaftsinformatik

Mobile Business und Social Media

Medienrecht

Präsenz oder Online?

Fachdidaktik

Professionelles Wissen von Lehrkräften

Biologieunterricht

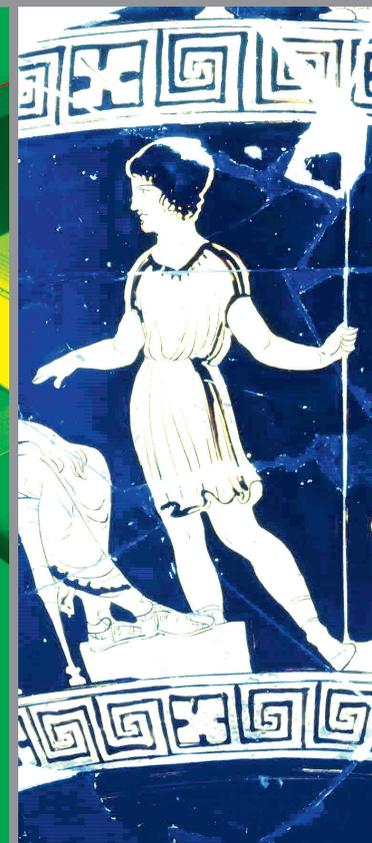
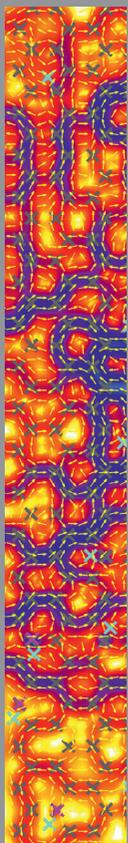
Große Dramen und alltägliche Fragen

2016

Blick in die Wissenschaft 33/34

Forschungsmagazin der Universität Regensburg

Heft 33/34 | 25. Jahrgang 2016 | € 14,00 | ISSN 0942-928-X



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

ISSN 0942-928-X,
Doppelheft 33/34
25. Jahrgang

Herausgeber

Prof. Dr. Udo Hebel
Präsident der Universität Regensburg

Redaktionsbeirat

Prof. Dr. rer. pol. Susanne Leist
Prof. Dr. rer. nat. Christoph Meinel
Prof. Dr. phil. Ursula Regener
Prof. Dr. rer. nat. Klaus Richter
Prof. Dr. phil. Hans Rott
Prof. Dr. med. Ralf Wagner

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 Nevechny
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 **Verains der Ehemaligen
Studierenden der Universität Regensburg
e.V.** und des **Verains der Freunde der Uni-
versität Regensburg e.V.** ist der Bezug des
Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag
enthalten.

In den letzten Jahren hat die Internationalisierung der Universitäten zunehmend an wissenschaftlicher, organisatorischer und strategischer Bedeutung gewonnen. Erklärtes Ziel der UR als forschungsstarker Universität ist es daher, ihre internationale Sichtbarkeit in Forschung und Lehre weiter auszubauen und ihre Funktion als transnationale Drehscheibe zu stärken.

Neben der individuellen Mobilität von Studierenden und Wissenschaftlern sowie der Institutionalisierung von internationalen Aktivitäten durch den Ausbau und die Festigung internationaler Partnerschaften steht die Ausdifferenzierung der Qualifikationsprofile der Absolventen und die Einführung von Studiengängen mit internationaler Ausrichtung zunehmend im Fokus.

Im akademischen Jahr 2015/16 haben mehr Studierende als jemals zuvor mit Unterstützung des International Office (IO) einen Studienaufenthalt an Partneruniversitäten verwirklicht. Umgekehrt ist die UR ein attraktiver Ort für Gastwissenschaftler und Studierende aus mehr als hundert Ländern. Mit dem International Presidential Visiting Scholar Fellowship wurde ein neues Programm zur Steigerung der internationalen Sichtbarkeit und Attraktivität der UR geschaffen. Das erste Fellowship dieser Art ging an Prof. Dr. Steven Tomsovic (Washington State University, USA) für einen Aufenthalt an der Fakultät für Physik im Sommersemester 2016. Durch das neue Welcome Center im Herzen des Campus entstand zudem eine zusätzliche unterstützende Infrastruktur. Das Zentrum zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, das im November feierlich eröffnet wird, komplementiert das Internationalisierungsangebot der UR für diese spezielle Zielgruppe.

Weltweit bestehen mit mehr als 300 Hochschulen Kooperationen, die in jüngster Zeit zielgerichtet ergänzt und weiterentwickelt wurden. Neben den Schwerpunktregionen Europa und Nordamerika rückten Forschungseinrichtungen in Südamerika und Asien in den Fokus: So wurde gerade am 19. Oktober 2016 ein neues Abkommen mit der Universidad Nacional de Colombia in Bogota (UNAL) geschlossen.

An fast allen Fakultäten findet sich mittlerweile ein englischsprachiges Studienangebot, und die Zahl strukturierter englischsprachiger Master- oder Promotionsprogramme konnte in den letzten Jahren von sechs auf zehn erhöht werden. Derzeit werden sechs Double-Degree-Bachelor-Studiengänge und vier Master-Studien-



gänge mit Doppel- bzw. trinationalem Abschluss angeboten. Doppelabschluss-Studiengänge tragen besonders stark zu einer Intensivierung bestehender Partnerschaften bei, fördern den wechselseitigen Austausch von Lehrenden und Studierenden und treiben die Internationalisierung der Studienprogramme wesentlich voran.

Die thematische Internationalisierung in Forschung und Lehre profitiert in hohem Maße von der nationalen und internationalen Sichtbarkeit einzelner Fachbereiche. Die Ost- und Südosteuropaforschung beispielsweise kann durch die Aufnahme des gleichnamigen Instituts (IOS) in die Leibniz-Gemeinschaft ab 2017 ihre internationale Exzellenz weiter stärken. Durch die geplante Bündelung regionalwissenschaftlicher Forschung und Studiengänge in einem Center für International and Transnational Area Studies (CITAS) werden neue Synergie- und Vernetzungsoptionen geschaffen. Viele weitere eindrucksvolle Beispiele von Forschungsprojekten mit internationalem Bezug und von internationaler Relevanz finden sich natürlich auch in den Beiträgen dieser Ausgabe. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine ertragreiche und anregende Lektüre.

Prof. Dr. Udo Hebel
Präsident der Universität Regensburg

Inhalt

Auskommen und Vorratshaltung seit dem Mittelalter 3

Mark Spoerer, Kathrin Pindl



Teufelaustreiber Johann J. Gaßner (1727–1779) 11

Daniel Drascek



Ein Krankenhaus für Galați 16

Thomas Just, Peter Mario Kreuter



„Den Schädel auf. Die Brust entzwei.“ 23

Marcus Hahn



Chronischer Stress am Arbeitsplatz und Burnout 28

Brigitte Kudielka



Die drei Hürden der Tumormimmuntherapie 33

Philipp Beckhove



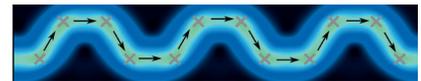
Die in die Hölle wollen 39

Reinhard Wirth



„Ich bin schwarz und dennoch bin ich schön.“ 43

Ferdinand Evers



Macht und Ordnung 49

Gerlinde Groitl



Aufstand der Ausgegrenzten oder Suche nach Sinn? 54

Alexander Straßner



Dramatische Vergegenwärtigung im öffentlichen Raum 58

Harald Buchinger



Der Wald vor lauter Bäumen 63

Sergiusz Kazmierski



Mobile Business und Social Media im Zeitalter der Digitalisierung 71

Bernd Heinrich, Mathias Klier, Susanne Leist



Präsenz oder Online? 77

Jörg Fritzsche, Katharina Ziegler



Professionelles Wissen von Lehrkräften 85

Stefan Krauss, Anita Schilcher

Beeinflusst durch	Eigenschaftsorientierte Persönlichkeitstheorien (etwa ab 1940 auch Persönlichkeitstests)	Behaviorismus (Verhalten des Lehrers)	Kognitivismus (Fokus auf „Denken und Wissen“ des Lehrers)
	Tests und Fragebögen	Unterrichtsbeobachtung	Integration bisheriger

Große Dramen und alltägliche Fragen 93

Arne Dittmer



„Ich bin schwarz und dennoch bin ich schön.“

Quantentechnologien für das 21. Jahrhundert

Ferdinand Evers

Die Quantenwelt ist faszinierend anders. Teilchen sind in ihr wie Wellenkämme; sie bewegen sich in fester Materie fort wie auf einem Ozean, der von den vielen anderen Teilchen gebildet wird. Und ganz wie die Wasserwelle in einem Teich oder die Radiowelle inmitten der Großstadt, so werden auch Teilchenwellen an Hindernissen gestreut, sie überlagern sich und bilden Muster. Diese Interferenz ist ein Markenzeichen der Quantennatur jeder Materie. Freilich ist die Entfernung zweier Wellenberge, die „Wellenlänge“, sehr gering. Für die Ladungsträger in fester Materie, die Elektronen, entspricht sie typischerweise ein Promille der Wellenlänge des Lichtes. Daher ist die Quanteninterferenz experimentell nur schwer aufzuspüren. Infolgedessen sind Quanteneffekte in Materie bisher nur unter Laborbedingungen direkt zu beobachten, d. h. für tiefe Temperaturen und sehr kleine Proben.

Das könnte nun bald anders werden. Die zunehmende Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen im Verein mit dramatischen Fortschritten in der Materialphysik ermöglicht Entwicklungen dergestalt, dass Quanteneffekte bald auch bei Raumtemperatur beobachtbar und vielleicht sogar technologisch nutzbar sein könnten.

Quantenphysik klopft an die Tür: Stromfluss ohne Widerstand

Alle zeitgenössischen elektronischen Geräte basieren auf Strom, also auf dem Fluss von Ladungen, i. e. Elektronen; daher der Name. Zum Beispiel die Informationstechnologie: Elektronen bilden das Medium für

die Formung eines elektrischen Signals, das die Übermittlung eines „bits“ an Information ermöglicht. Oder die Photovoltaik: In Solarzellen wird die Energie eines Lichtteilchen in elektrische Energie umgewandelt, die dann über einen Strom abtransportiert werden kann.

Das Funktionsprinzip dieser Geräte und insbesondere deren Effizienz sind eng daran gekoppelt, wie die Ladungsträger sich im Material bewegen. In einfachen Metallen erwartet man eine „Diffusion“; sie verläuft nach dem gleichen Muster, wie die Verteilung der winzigen Milchtröpfchen im Frühstückskaffee – vorausgesetzt man rührt nicht um. Unter diffusionsartigen Bedingungen ist das Konzept des „Widerstandes“ anwendbar. Es ist vielleicht noch aus der Schulphysik vertraut, verbunden mit dem „Ohmschen Gesetz“: Der Widerstand eines Drahtes wächst proportional zu dessen Länge an. Was aber in der Schulphysik noch unterschlagen werden muss: Ohms Gesetz gilt nicht mehr in der Quantenwelt. Da gelten andere Regeln, zum Beispiel: Strom kann fließen auch ohne Widerstand für Drähte jeder Länge. Die technologischen Möglichkeiten sind im Prinzip jedenfalls enorm.

Materialien für die Informationstechnologie der Zukunft: topologische Isolatoren

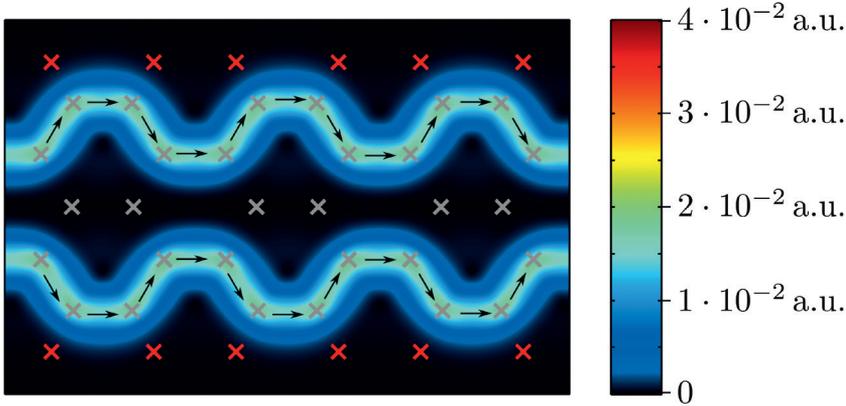
Der Stromfluss ohne Widerstand ist seit langem ein technologischer Traum. Wohlgehegt ist er auf großer Skala, zum Beispiel für die Hochspannungsnetze im europäischen Stromverkehr. Hier gilt wie überall: Widerstand heißt Dissipation, heißt Energieverlust durch unerwünschte Produktion von Wärme („Joulesche Wärme“). Man möchte ihn loswerden.

Weniger bekannt ist, dass elektrische Widerstände und das damit verbundene Aufheizen auch für die Informationstechnologie höchst problematisch sind. In den Schaltkreisen eines modernen Großcomputers wird genügend Abwärme produziert, um damit ein Gebäude zu heizen. Energieeffizienz und Kühlbarkeit sind daher mittlerweile ein extrem wichtiges Kriterium für die Rechnerarchitektur im „high-performance computing“.

Derzeit werden mit Hochdruck neuartige Materialien untersucht, die das Potential haben sollten, an dieser Stelle Abhilfe zu schaffen. Ganz besondere Aufmerksamkeit genießen hier die *topologischen Isolatoren*. Mit konventionellen Isolatoren haben sie lediglich gemein, dass in ihrem Innern (wegen einer „Bandlücke“) kein Strom fließen kann. Wesentlich anders an ihnen ist, dass sie auf ihrer Oberfläche einen Strom tragen und so Signale leiten können. Der eigentliche „clue“ steckt nun im Zusatz „topologisch“: Er weist darauf hin, dass die Oberflächenströme aufgrund einer speziellen Symmetrie des Materials praktisch widerstandsfrei laufen, wenn das Material in sehr dünnen Leiterbahnen auf ein Substrat aufgetragen wird. Diese ganz besondere Eigenschaft geht letztlich zurück auf die Wellennatur der Ladungsträger, die sich in der elektronischen Bandstruktur niederschlägt.

Computersimulationen und Quantentransport

Was die „spezielle Symmetrie des Materials“ eigentlich ist, die den Widerstand so unterdrückt, kann hier nur vage bleiben. Der Grund dafür liegt in der Natur der Quantentheorie; durch sie hindurch führt uns die Mathematik. Was wir Physiker An-



1 Stromfluss durch einen Kohlenstoff-Draht „graphene nanoribbon“, GNR mit Breite 5 C-Atom-Reihen (graue Kreuze). Absättigung der Bindungen der randständigen C-Atom durch H-Atome (rote Kreuze). Drähte mit Breiten 8, 11, 14, .. zeigen ähnliche Muster mit 3, 4, 5, .. Hauptstrompfaden, siehe 2. Farbskala gibt Stromintensität in atomaren Einheiten (atomic units, „a. u.“), siehe Legende Abbildung 2.

schauung heißen und Intuition, wird auf der Ebene der Quanten gelenkt und präzisiert durch eine mathematische Struktur. Deswegen nimmt es nicht Wunder, dass mathematische Berechnungen und Computersimulationen unabdingbar sind für Verstehen, Gestalten und Design. Bedauern muss man das nicht – die Mathematik nimmt uns bei der Hand und führt uns in die Welt hinaus, weit hinaus über diejenigen kategorischen Schranken, die Kant seinerzeit zu sehen glaubte.

Die notwendigen mathematischen Berechnungen werden heute häufig mit numerischen Methoden bewerkstelligt. Das hängt damit zusammen, dass die Modellsysteme, die sich noch mit Bleistift und Papier berechnen lassen, für Praktisches oft nicht genau genug sind. Die Rolle von Computersimulationen für die Anwendungen der Quantentheorie lässt sich am besten durch ein Beispiel illustrieren.

Ein wichtiges Ziel der Forschungen zu topologischen Isolatoren ist es, das Material so zu konfektionieren, dass der widerstandslose Stromfluss nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch in einem elektronischen Bauelement unter Realbedingungen gewährleistet werden kann. Wie dazu die verschiedenen chemischen Elemente am besten zu kombinieren wären, die das Material bilden, das ist kaum zu erraten. Computergestützte Rechnungen spielen daher für die Materialoptimierung eine zunehmend bedeutsame Rolle, denn sie sind viel billiger und schneller durchführbar, als die Materialsynthese im Labor. Motiviert durch solche Überlegungen werden derzeit weltweit Bemühungen intensiv vorangetrieben, riesige Datenbanken aufzubauen, z. B. die *Mate-*

rials Genome Initiative in den USA oder das *NoMaD-CoE* Projekt in Europa. Sie sollen computergenerierte Materialparameter für eine große Vielfalt an Materialsystemen vorhalten, die einen potentiellen Nutzen für Industrie und Wissenschaft haben könnten.

Abgesehen von diesen anwendungsorientierten Erwägungen spielen numerische Simulationen aber auch eine immens wichtige Rolle für die Grundlagenforschung. Weil die Quantenmechanik sich immerzu der im Alltag erprobten Anschauung zu entziehen scheint, kann sie stetig mit neuen Überraschungen aufwarten, gerade auch wenn es um den Transport von Ladung, Energie und Information auf atomarer Skala geht („Quantentransport“). In diesem Zusammenhang nehmen Computersimulationen eine Schlüsselfunktion wahr. Einerseits sind sie ein verlässlicher Weg, neue Konzepte auf atomarer Skala zuverlässig zu testen. Ebenso häufig sind sie aber auch das Instrument dafür, neue Entdeckungen zu machen. Im Idealfall liefern sie konkrete Angaben dazu gleich mit, wie eine experimentelle Verifikation vorstattengehen könnte.

Stromschlangen und -wirbel in der Molekularen Elektronik

Es folgt ein Beispiel für eine Entdeckungstour aus jüngerer Zeit im Themenkreis des Quantentransportes. Ob die Neuentdeckung eine technologische Relevanz besitzt, muss sich erst noch herausstellen, zugegeben; man würde es jedoch erwarten. Denn wie genau ein Strom durch ein Bauelement fließt, das

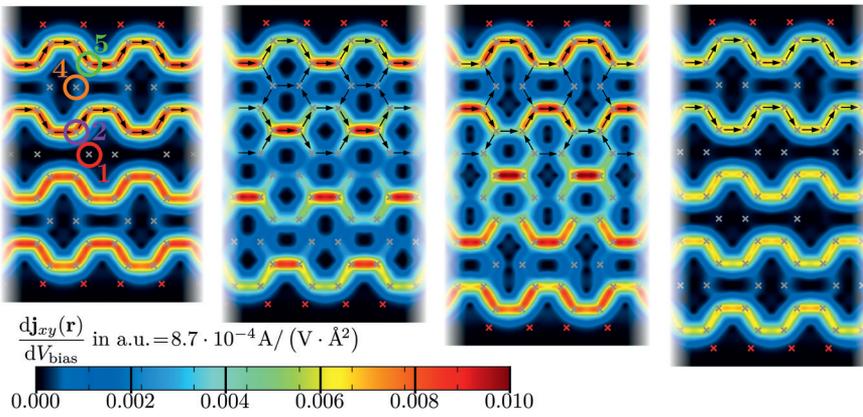
ist schließlich ein wichtiges Thema für die Nanotechnologie. Wo befinden sich die stromtragenden Regionen, wie groß sind sie und wo fließt eventuell gar kein Strom? Diese Fragen sind bedeutsam, weil sich gerade die Regionen mit starkem Fluss besonders aufheizen und so die Eigenschaften des Bauteils, z. B. dessen Lebensdauer, stark mitbestimmen. Aufgrund solcher Überlegungen haben wir den Stromfluss durch eine molekulare Nanostruktur simuliert.

Perfekte Nanodrähte

Abbildung **[1]** zeigt als typische Nanostruktur einen Draht aus Kohlenstoff, ein „graphene nanoribbon“ (GNR5). Er ist mit seinen fünf Atomreihen etwa so breit ist wie der Bindungsabstand von vier Kohlenstoffatomen, also ca. 1 Millionstel Millimeter. Man betrachtet solche Drähte, weil sie evtl. als Verbindungselemente einer auf Kohlenstoff basierenden „Molekularen Elektronik“ dienen könnten. Aus diesem Grund werden sie derzeit auch experimentell intensiv untersucht.

Abbildung **[1]** ist zu entnehmen, dass der Stromfluss (hellblau) durch den Draht keineswegs gleichmäßig verteilt ist, sondern ein ausgeprägtes Schlangenmuster bildet. Vor allem fließt durch die Kohlenstoff-Atome in der Drahtmitte (Symbol **X** in Abbildung **[1]**) überhaupt kein Strom. Das ist zunächst durchaus überraschend, weil doch wenigstens vom chemischen Standpunkt aus gesehen alle Kohlenstoffatome vergleichbar sind. Ohne Simulation hätte man dieses merkwürdige Verhalten wohl kaum erraten.

A posteriori erkennt man darin eine Manifestation der Wellennatur der Elektronen: Sie bilden in der Querrichtung zum Strom infolge von Quanteninterferenz eine stehende Welle aus. Diese kann in der Ladungsdichte nicht beobachtet werden, weil sich die Ladung als Summe von Beiträgen sehr vieler Elektronen ergibt, die alle ganz unterschiedliche Wellenlängen haben. Im Gegensatz dazu sind an der Netto-Strombilanz letztlich aber nur ganz wenige Elektronen beteiligt, nämlich die mit der höchsten Energie. Somit wird im Stromfluss eine ganz bestimmte Wellenlänge selektiert. Dieser Mechanismus zur Auswahl von Wellenlängen ist im Prinzip für jede Probenbreite wirksam, und nicht nur für die in Abbildung **[1]** gegebene. Deswegen erwartet man Strommuster auch für breitere Drähte,



2 Abbildung ähnlich wie zuvor, hier für Nanodrähte der Breite 11–14 Kohlenstoff-Atome. Teilabbildung (a) zeigt die fünf Positionen mit verschiedener Symmetrie.

und zu recht, siehe Abbildung [2]. Wo die selektierte Wellenlänge am besten zur Drahtbreite passt, da ist das Schlangenmuster am stärksten ausgeprägt.

Nanodrähte mit Verunreinigungen und Gitterfehlern

Der perfekte Nanodraht ist schwer herzustellen. Deswegen ist es naheliegend zu fragen, welchen Effekt Defekte, also z. B. Verunreinigungen und Gitterfehler, auf den Stromfluss haben würden. Es wird sich dabei herausstellen, dass die Quanteninterferenz erneut mit einer interessanten Überraschung aufwartet.

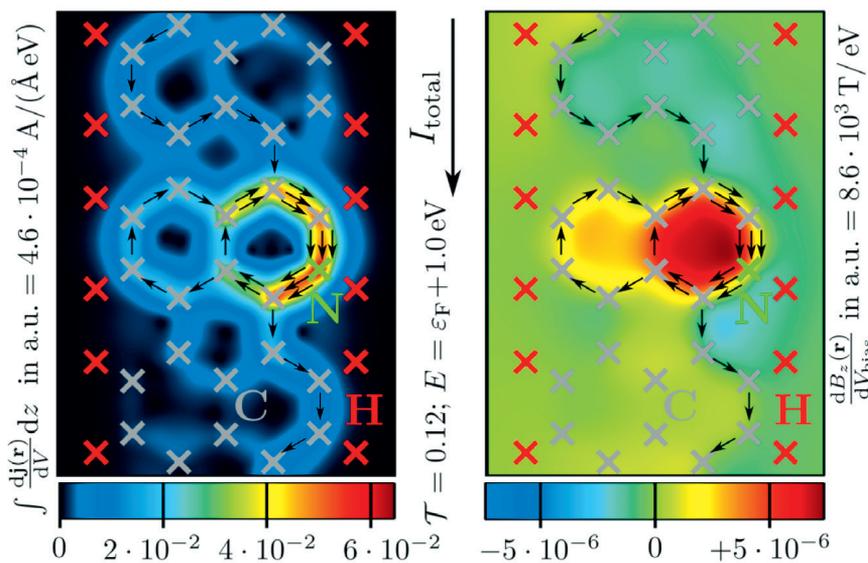
Wie gesagt: Als Folge der schlangenartigen Stromführung tragen einige Kohlenstoff-Atome (Positionen 1 und 4 in Abbildung [2a]) gar keinen Strom. Wenn eine Verunreinigung, z. B. eine OH-Gruppe, an diese Kohlenstoff-Atome anbinden würde, dann sollte der Stromfluss davon vollkommen unbeeindruckt sein. Das ist auch so, wie Berechnungen der Leitfähigkeit gezeigt haben. Andere Atome hingegen liegen voll im Stromfluss (Positionen 2 und 5 in Abbildung [2a]). Was geschieht, wenn hier ein Defekt eingebracht wird? Die gleichen Leitwertrechnungen ergeben hier: Der Stromfluss bricht zusammen. Nun, das überrascht vielleicht nicht sehr. Interessant ist aber, welches Muster sich im Strom ergibt. Das ist in Abbildung [3], links gezeigt,

wo im Hauptstrompfad ein Defekt eingebaut wird, indem ein Kohlenstoff-Atom durch ein Stickstoff-Atom ausgetauscht wurde.

Die Erwartung wäre wohl, der Defekt würde den lokalen Fluss verringern und der Reststrom flösse um ihn herum. Doch das Gegenteil ist der Fall: Im Defekt ist der Fluss um das Dreifache erhöht, und der Rückfluss erfolgt anderswo. Es bilden sich so „Stromwirbel“.

Wiederum handelt es sich dabei um einen Effekt der Quanteninterferenz. Sie macht den Stromfluss auf der Nanoskala so ganz verschieden von dem, der uns in den Flüssen und Strömen unseres Alltagslebens begegnet.

Eine naheliegende Frage wäre nun, ob Wirbelströme „wichtig“ sind: Sind sie für die Funktionsweise einer auf Kohlenstoff basierenden Elektronik potentiell relevant? Für eine abschließende Antwort ist es noch zu früh. Aber eine interessante Beobachtung kann schon hier gemacht werden: Kreisströme sind nämlich stets mit Magnetfeldern verbunden; das ist schon aus der Schulphysik bekannt. Das Feldmuster zu den Wirbelströmen im Nanodraht kann leicht berechnet werden; es ist in Abbildung [3], rechts abgebildet. Es zeigt sich, dass die auftretenden magnetischen Feldstärken (10– 100mT pro Volt) in gewissem Sinne groß sind. Sie könnten nämlich ausreichen, das magnetische Moment des Elektrons, seinen „Spin“, zu drehen. Es ergibt sich damit für ein aktuelles Forschungsgebiet, die Spin-Elektronik (*Spintronik*), unter Umständen ein Problem, weil dessen Technologieentwurf den Spin als Signalträger für Informationen benutzen möchte.



3 links: Stromfluss durch GNR5 (von oben nach unten); ein Kohlenstoff-Atom wurde durch ein Stickstoff-Atom (grünes Kreuz, N) substituiert, wodurch ein Stromwirbel entsteht. Rechts: lokales Magnetfeld, das durch den Stromwirbel erzeugt wird.

Quantenturbolenz in Nanofilmen

Wegen seiner Wellennatur wäre es irreführend, einem Quantenteilchen eine genaue Position zuzuordnen zu wollen. Wenn eine Teilchenwelle durch Materie läuft, dann ist sie gewissermaßen überall zugleich. Infolgedessen sind viele Quanteneffekte sehr sensitiv hinsichtlich der Probengeometrie; Quanteninterferenz in dünnen molekularen Drähten und breiten Filmen kann qualitativ sehr unterschiedlich sein. Wenn wir also schon beim Stromfluss durch Drähte etwas Neues finden, was wird dann erst mit Filmen sein?

Mit dieser Motivation betrachten wir nun den Stromfluss durch einen Kohlenstoff-Film [4]. Die elektronischen Eigen-

schaften des abgebildeten Materials („Graphen“) werden seit ca. zehn Jahren weltweit höchst intensiv untersucht, z. B. im Hinblick auf Anwendungen in der Optoelektronik. Für seine Herstellung wurde im Jahre 2010 der Nobelpreis für Physik verliehen. Wir haben diesen Film nun mit Verunreinigungen versehen, indem wir 5 % der Kohlenstoff-Atome mit einem zusätzlichen Bindungspartner, einer OH-Gruppe, ausgestattet haben.

Wie man sieht, ist der resultierende Stromfluss hochkomplex. Klar ersichtlich ist, dass wie bereits beim Quantendraht auch hier Wirbelströme das dominierende Element darstellen. Allerdings überdecken sie viel größere Flächen als zuvor, und vor allem sind noch sehr viel höhere Stromdichten involviert. Diese können eintausend Mal stärker sein, als der mittlere Strom. Das Bild erinnert insofern ein wenig an ein turbulent dahinfließendes Wasser. Ein Fisch, der inmitten des turbulenten Wirbelfeldes voranzukommen sucht, könnte kaum beurteilen, in welche Richtung das Wasser schließlich abzufließen gedenkt. Woran sollte er sich orientieren?

Auch an dieser Stelle kann man wieder danach fragen, wofür die gemachten Beobachtungen relevant sein könnten. Zweierlei Gesichtspunkte wären hier zu nennen. Zum einen gilt Graphen als ein vielversprechendes Material für die Spintronik. Wie bereits im Nanodraht, so gilt auch hier, dass lokale Magnetfelder den Spin eines Elektrons verdrehen und so die Funktionstüchtigkeit des Materials beeinträchtigen könnten. Zum anderen können die Wirbelströme auch zu einer starken lokalen Aufheizung führen. Sie wäre den Material- und Systemeigenschaften ebenfalls nicht zuträglich.

Ein Ausblick auf Exotisches: Verschränkung und Quantum Computing

Während einerseits die Quantentheorie als Quelle für physikalische Konzepte und als praktischer Rechenapparat in Physik und Chemie unverzichtbare Dienste leistet, so sind andererseits ihre erkenntnistheoretischen Grundlagen noch immer Teil einer akademischen Debatte. Diese verzwickte Situation wird auch heute noch als naturwissenschaftliches Vakuum interpretiert, welches zuweilen als vermeintlicher Freiraum für Esoterisches oder Religiöses dienstbar gemacht wird.

Dieser letzte Abschnitt kann als kleine Einführung in die Tiefendimensionen der Quantentheorie dienen. Sie führt hin zum Konzept der „quantenmechanischen Verschränkung“, das Furore gemacht hat – in den 1930er Jahren im Zusammenhang mit dem EPR-Paradoxon und ebenso heute in Verbindung mit dem Quantencomputer.

Exkurs: Quantenphysik und Erkenntnistheorie

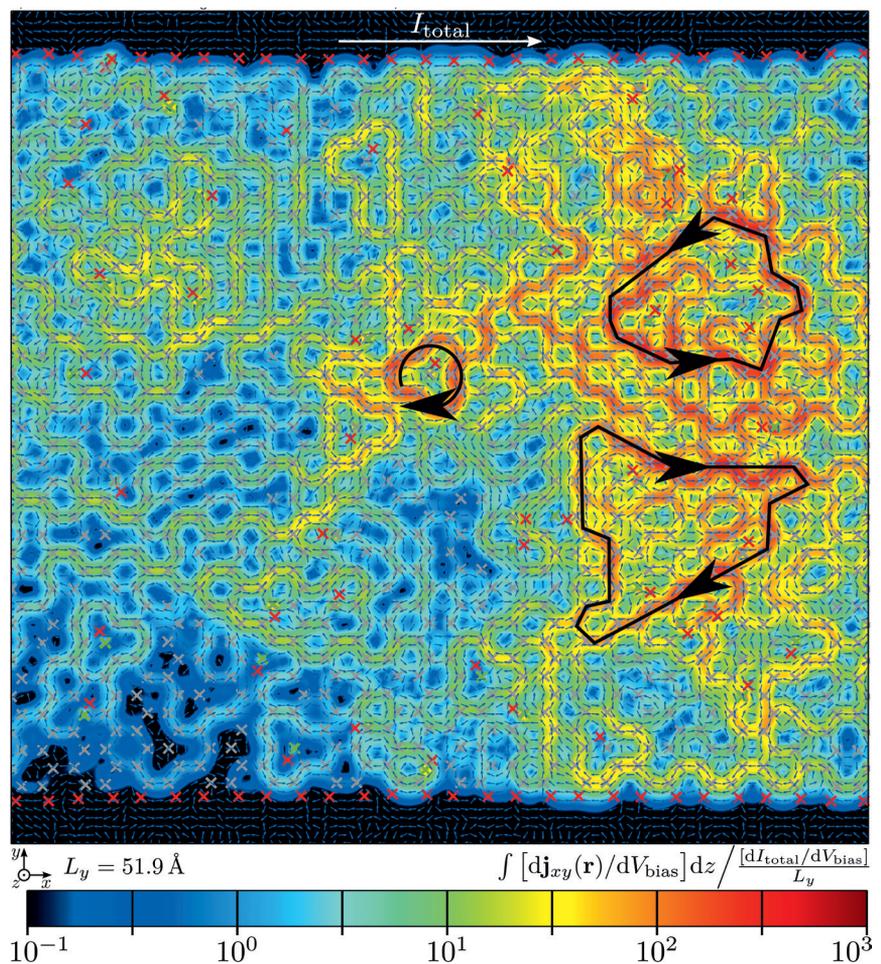
Von allen großen wissenschaftlichen Denkbauwerken der Moderne ist die Quantentheorie wohl das obskureste. Was macht sie so suspekt?

Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist, dass die Quantentheorie eine statistische Theorie darstellt. Man kann mit ihr Mittelwerte berechnen – in unserem Rahmen wären das die mittleren Ladungs- oder Stromdichten, die auftreten, wenn sehr viele Teilchen durch die Probe fließen. Eine

prinzipielle Konsequenz dieses statistischen Elementes ist es nun, dass sich Vorhersagen der Theorie nur in Messreihen überprüfen lassen. Vorhersagen zu Einzelmessungen macht die Quantentheorie streng genommen nicht.

Daran kann nun verstörend sein, dass wir unser Leben als geordnete Abfolge von nicht reproduzierbaren Einzelereignissen erleben – und nicht als Messreihe. Anders ausgedrückt: Unsere erlebte Welt und das Geschehen darin ist für die Quantentheorie nur eine einzige von unzähligen anderen, ebenfalls möglichen Welten. Sie selektiert nicht. Da wir nur eine Welt erleben, so möchte man meinen, dass dann noch etwas anderes existieren muss, das eine Selektion vornimmt. Demnach könnte die Quantentheorie nur eine vorläufige, weil nicht vollständige Theorie sein. Albert Einstein hat diesen Standpunkt nachhaltig vertreten.

Einsteins Widersacher in der Debatte um die Deutung der Quantentheorie, allen voran Werner Heisenberg und Niels Bohr,



4 Stromfluss durch einen Kohlenstoff-Film (Graphen), der mit 5% OH-Atomen funktionalisiert worden ist. Auf atomarer Skala bilden sich großflächige Wirbelströme (schwarze Linien), deren Intensität den mittleren Stromfluss um das Eintausendfache übersteigen kann.

haben dem entgegen gehalten, dass es keinen experimentellen Hinweis auf die von Einstein postulierte vollständigere Theorie gebe. In Anerkennung dieser Tatsache haben sie eine Position formuliert, der zufolge der statistische Charakter der Theorie prinzipiell nicht zu beseitigen ist. Er kommt gewissermaßen durch die Wahl der Messgrößen zustande, die ein Beobachter benutzt, um den Systemzustand zu beschreiben (Kopenhagener Deutung).

Die Kopenhagener Deutung blieb Einstein und auch anderen namhaften Kollegen, wie z. B. David Bohm, zeitlebens suspekt. Ihnen galt als Aufgabe einer physikalischen Theorie die Beschreibung der Realität, oder jedenfalls ganz bestimmter Elemente derselben (objektivistisch; ontologisch). Die heute etablierte Standardinterpretation folgt demgegenüber weitgehend Heisenberg und Bohr, für die eine physikalische Theorie vorranglich ein Instrument zur Ordnung von experimenteller Erfahrung liefert; deren mathematische Objekte bilden nicht notwendig Elemente der Wirklichkeit ab, sondern eher unser Wissen darüber. Physikalische Theorien wären demnach subjektiv (epistemologisch), aber immerhin objektivierbar, insofern als ihre Vorhersagen unabhängig vom Beobachter experimentell überprüfbar sind.

Verschränkung und EPR-Paradoxon

Einstein hat sein Unbehagen an der Quantentheorie seinerzeit (1935) nachhaltig durch die Formulierung eines Gedankenexperimentes zum Ausdruck gebracht, das als Einstein-Podolski-Rosen (EPR)-Paradoxon in die Geschichte eingegangen ist. Es ist gut geeignet, die unterschiedlichen Standpunkte zu verdeutlichen.

Die Hauptrolle beim EPR-Paradoxon spielen zwei Teilchen, die einen gemeinsamen Quantenzustand eingenommen haben. Dieser „verschränkte“ Zustand ist so präpariert, dass er insgesamt keinen Drehimpuls (Spin) trägt. Das bedeutet Folgendes: Wenn eines der Teilchen in einen Detektor läuft, der für dieses Teilchen einen Spin nach oben misst, dann kann der Spin des anderen Teilchens nur nach unten zeigen. Misst man für das erste Teilchen einen Spin nach rechts, dann zeigt der Spin des zweiten Teilchens notwendig nach links und so fort.

Um die Pointe des EPR-Paradoxons herauszustellen, müssen noch zwei Informa-

tionen gegeben werden. Erstens kann nach den Regeln der Quantenmechanik jeder Detektor nur zwei Ergebnisse anzeigen, plus oder minus. Zweitens können beide Teilchen auseinanderfliegen, so dass sie sich zum Zeitpunkt des Experimentes beliebig weit voneinander entfernt haben. Im Prinzip könnte also ein Teilchen sich auf dem Mars befinden, während das andere auf der Venus weilt. Wenn Herr Mars sich dann entschlösse, den Spin in irgendeine Richtung zu vermessen, dann wäre das Messergebnis von Frau Venus sofort nach dieser Messung festgelegt – unabhängig vom Abstand zwischen Venus und Mars.

Einstein hat versucht, aus dem globalen, instantanen „Kollaps“ des ursprünglichen, verschränkten Quantenzustandes, der als Resultat der ersten Messung eintritt, einen Widerspruch zu konstruieren. Die Quantentheorie sei aufgrund der Möglichkeit zur Verschränkung von zwei Teilchen nicht lokal; also existiere ein Widerspruch zur Relativitätstheorie, der zufolge eine Fernwechselwirkung mit Überlichtgeschwindigkeit ja unmöglich sei. Heisenberg und Bohr zufolge liegt hier ein Missverständnis vor. Sie interpretieren den Quantenzustand, d. h. die „Wellenfunktion“, als einen Ausdruck für die momentane Kenntnis, über die ein Beobachter verfügt. Ihr entspräche keine materielle Realität, und der Kollaps einer Verschränkung erfordere deswegen auch keine Fernwechselwirkung. Die Quantentheorie sei zwar in der Tat eine nichtlokale Theorie, aber der Hinweis auf die Relativitätstheorie verfange dennoch nicht.

Bisher wurden keinerlei experimentelle Hinweise gefunden, welche die Kopenhagener Deutung in Frage stellen könnten. Dem entsprechend reagiert die Physik auf das Deutungsproblem mittlerweile entspannt pragmatisch, nämlich mit „out-sourcing“: Die Ausarbeitung der erkenntnistheoretischen Implikationen der Quantentheorie wird tendenziell an die Philosophie (z. B. Wissenschaftstheorie, Ontologie, etc.) delegiert.

Quantencomputer und Majorana-Moden

In ihren frühen Tagen hat die wenig anschauliche Verschränkung zweier Teilchen Anlass gegeben zu Einsteins ernsthaften Rückfragen. Deswegen ist es schon bemerkenswert, dass seit längerem Konzepte entwickelt werden, die sich genau diese Kernkompetenz „Verschränkung“ der Quanten-

welt zunutze machen, um ganz neue Generationen von Computern zu konstruieren. Wie genau das vor sich gehen kann, sei hier hintangestellt. Die Grundidee ist jedoch schnell skizziert: Im Wesentlichen wird das statistische Element der Theorie benutzt. Ein Rechengang entspricht der zeitlichen Entwicklung eines Quantenzustandes unter einer kontrollierten Abfolge logischer Operationen. Wo ein Zustand aufgrund seiner Verschränkung gleichzeitig eine ganze Verteilung von möglichen Versuchsausgängen repräsentiert, kann ein einzelner Rechengang eine ganze Verteilung von Rechnungen realisieren. Auf diese Weise arbeitet ein Quantencomputer „massiv parallel“.

Einen Quantencomputer kann man noch nicht kaufen, und das wird für einige Zeit auch noch so bleiben. Eine der technologischen Schwierigkeiten besteht darin, die Zeitentwicklung genügend genau zu kontrollieren, um „Rechenfehler“ zu vermeiden. In diesem Zusammenhang hat sich nun jüngst eine Entwicklung ergeben, die mehr als faszinierend ist, weil sie die Konzepte von Verschränkung und Topologie miteinander zu verbinden versteht. Hier schließt sich also der Kreis.

Wenn man ein Metall abkühlt, z. B. Blei, dann kann bei tiefen Temperaturen eine Situation auftreten, in der ein Strom widerstandsfrei durch das Material hindurchfließen kann, die *Supraleitung*. Der Effekt kommt zustande, weil eine sehr große Zahl von Teilchen sich in einem gemeinsamen Zustand verschränken. Wie sich jüngst herausgestellt hat, können solche Supraleiter unter gewissen Bedingungen Oberflächenzustände aufweisen, die wegen ihrer bemerkenswerten Eigenschaften einen eigenen Namen tragen, die Majorana-Moden. Der Name geht zurück auf die einst von dem italienischen Physiker Ettore Majorana postulierten Teilchen, welche die Besonderheit haben, dass sie ihre eigenen Antiteilchen sind. Das unterscheidet sie z. B. von Elektronen, deren Antiteilchen das Positron ist.

Majorana-Moden haben die ungewöhnliche Eigenschaft, dass sie nur ein halbes Elektron aufnehmen können. Wenn ein Elektron also einen Randzustand des Supraleiters bevölkern möchte, dann muss es sich auf zwei Majorana-Moden verteilen. Auf diese Weise entsteht eine ganz spezielle Sorte von Verschränkung. Ebenso wie die Oberflächenzustände des Topologischen Isolators, genießen auch Majorana-Zustände einen gewissen „topologischen Schutz“: Solange der Supraleiter nicht zer-

stört wird oder solange sie sich nicht gegenseitig annihilieren, bleibt die Verschränkung der Majorana-Moden bestehen.

Wegen dieses topologischen Schutzes gegen einen unkontrollierten Verlust an Verschränkung, so wird schon seit längerem vermutet, sollten Majorana-Moden besonders geeignet sein, um einen Quantencomputer zu bauen. Bisher war das allerdings graue Theorie. Doch seit kurzem gibt es einen Lichtblick. Zwei experimentellen Gruppen ist es erstmals gelungen, Proben herzustellen, in denen sich Majorana-Moden tatsächlich isolieren ließen. In einem nächsten

Schritt kommt es nun darauf an, die Proben so zu bauen, dass sich die Moden auch kontrolliert bewegen lassen. Sobald das gelungen ist, kann mit dem Quantenrechnen begonnen werden. Zunächst wohl mit dem Einmaleins. Aber wenn man das mal hat, dann geht's bergab, wir wissen das. Man darf gespannt sein, ob es klappt.

Literatur

B. Andrei Bernevig, Taylor L. Hughes, *Topological Insulators and Topological Superconductors*. Princeton: Princeton University Press, 2013.

Michael Walz, Jan Wilhelm u. Ferdinand Evers, *Current Patterns and Orbital Magnetism in Mesoscopic dc-Transport*. Physical Review Letters 113 (2014), 136602.

Jan Wilhelm, Michael Walz u. Ferdinand Evers, *Ab-initio quantum transport through armchair graphene nanoribbons: streamlines in the current density*. Physical Review B 89, 195406 (2014).

David Bohm and Basil J. Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. London: Routledge, 1993.

Stevan Nadj-Perge u. a., *Observation of Majorana fermions in ferromagnetic atomic chains on superconductors*. Science 346 (2014), 602.



© Universität Regensburg

Prof. Dr. rer. nat. Ferdinand Evers, geb. 1966 in Neuenkirchen (Steinfurt). Studium der Physik an der TU München (TUM). Promotion zum ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt an der TUM 1995; Habilitation mit Arbeiten zu Anderson-Übergängen in unkonventionellen Symmetrieklassen. Leitung einer Arbeitsgruppe „Computational Condensed Matter Theory“ am Karlsruher Institut für Technologie (2001–2014). Seit 2015 Professur an der Universität Regensburg für Theoretische Physik.

Forschungsschwerpunkte: Mesoskopische Physik, Molekulare Elektronik, Computergestützte Theorie der Kondensierten Materie.

Information Architects®

IA Information Systems AG

Komm zu den Information Architects® und werde:

- Softwareentwickler Java/C#/...
- Lizenzmanager
- IT Architekt



Alte Nürnberger Str. 27D • 93059 Regensburg • 0049 941 585 660 • bewerber@iaag.net • www.iaag.net

Das IT-Systemhaus