

# Neue Materialien aus der Quantenwelt *Novel Materials Created in the Quantum World*

Wolfgang E. Ernst, Werner Schandor

**D**ie Schatten werfen Objekte“, soll der Essayist Karl Kraus einmal über das Verhältnis zwischen Vision und Realität geäußert haben. Kraus' Bonmot trifft auch das junge Forschungsfeld der topologischen Materialien mit ihren außergewöhnlichen Eigenschaften. Ihre Besonderheit: Sie wurden mathematisch aus Konzepten der Quantenmechanik vorhergesagt, ehe sie im Labor hergestellt und experimentell nachgewiesen werden konnten.

Während alle Materie aus Atomen aufgebaut ist, können die Atome in unterschiedlicher Weise angeordnet sein, was bei Verwendung der gleichen Atomsorte zu völlig verschiedenen Materialeigenschaften in Hinblick auf Festigkeit, elektrische Leitfähigkeit oder Magnetismus führen kann. Konzepte zur Beschreibung einer Anordnung von Objekten liefert die Mathematik in den Gebieten Geometrie und Topologie. Physiker erkannten, dass die Topologie eine ausgezeichnete Grundlage zur Beschreibung und Vorhersage quantenphysikalischer Eigenschaften liefert. So konnte der US-Physiker Charles L. Kane 2005 die Möglichkeit von topologischen Isolatoren vorhersagen – von Materialien, die im Inneren als elektrische Isolatoren fungieren, während sie an ihrer Oberfläche die widerstandslose Leitung elektrischer Ladungen ermöglichen. 2007 wurde der erste topologische Isolator an der Universität Würzburg realisiert.

Eine andere Sorte sogenannter Quantenmaterialien basiert darauf, dass gezielt zusammengesetzte Nanoteilchen oder -cluster total unterschiedliche Eigenschaften gegenüber makroskopischen Materialstücken der gleichen Elementkombination aufweisen können.

***S**hadows throw objects”, the essayist Karl Kraus reputedly once said about the relationship between vision and reality. Kraus' witticism also applies to the young research field of topological materials and their unusual features. Their peculiarity is that they were mathematically predicted from concepts in the quantum world before they were produced in the laboratory and experimentally proved.*

*Although all matter is made of atoms, atoms can be organised in different ways, which means that the same kind of atoms can lead to completely different material properties of strength, electrical conductivity and magnetism. Mathematics supplies the concepts to describe an arrangement of objects in the fields of geometry and topology. Physicists have recognised that topology provides an excellent basis for describing and predicting quantum mechanical properties. By using topology, the US physicist Charles L. Kane was able to predict the possibility of topological insulators in 2005 – materials which act in their interior as electrical insulators, but which at the surface enable the resistanceless conduction of electrical charges. The first topological insulator was realised at the University of Würzburg in 2007.*

*Another kind of so-called quantum material is based on the fact that nanoparticles or nanoclusters which have been intentionally composed in a particular arrangement can demonstrate totally different properties compared to macroscopic pieces of material of the same combination of elements. “We've just attempted to put together a cluster of*

„Wir versuchen soeben, einen Cluster aus einigen hundert Atomen zusammensetzen, der eine besonders hohe Magnetisierbarkeit ermöglicht“, sagt Wolfgang Ernst, Leiter des Instituts für Experimentalphysik an der TU Graz.

### Zweckfreies Spiel mit Gleichungen als Ausgang

„Quantenmaterialien haben ihren Ursprung in dem zunächst zweckfreien Spiel mit Gleichungen der Quantenmechanik“, sagt Wolfgang Ernst: „Ihre experimentelle Umsetzung könnte uns den Weg ebnen zu neuen Anwendungen wie der Speicherung oder Verarbeitung von Quanteninformation, widerstandsfreien elektrischen Bauelementen und vielem mehr.“ Bis die neuen atomaren Nanocluster mit den erstaunlichen Eigenschaften für bestimmte Anwendungen nutzbar gemacht werden, werden wohl einige Jahre vergehen. Einstweilen gilt es, das Wissen um diese Materialien zu vertiefen. Das geschieht in internationalen Forschungsnetzwerken, an denen sich auch das Team um Wolfgang Ernst beteiligt.

### Forschungsschwerpunkte und internationale Kooperationen

Am Institut für Experimentalphysik der TU Graz werden inhaltlich zwei Schwerpunkte verfolgt:

1. Die Herstellung gezielter Nanoclusterstrukturen in supraflüssigen Heliumtröpfchen. Um die unregelmäßige thermische Bewegung der Atome zu unterbinden, werden bei tiefsten Temperaturen (0,4 Kelvin) aus einzelnen Atomen und Molekülen neue kalte Aggregate erzeugt und diese mit massen- und laserspektroskopischen Verfahren analysiert. Den Grazern gelang auf diese Weise die gezielte Bildung eines Core-Shell-Nanomaterials, bei dem ein Kern aus Goldatomen mit Silberatomen ummantelt wurde oder umgekehrt. In Kooperation mit dem Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik (FELMI-ZFE) werden die neu erzeugten Strukturen mit atomarer Auflösung sichtbar gemacht (Abbildung 1). >

*several hundred atoms, which should bring about an especially high magnetic moment,” says Wolfgang Ernst, head of the Institute of Experimental Physics at Graz University of Technology.*

### Playing around with equations out of curiosity

*“Quantum materials have their origin in playing around with equations of quantum mechanics without a specific aim,” explains Wolfgang Ernst. “Their experimental implementation could pave the way to new applications, such as storing or processing quantum information, resistanceless electrical components, and many more.” But it may take a few years before new atomic clusters with astonishing properties can be turned into use for specific applications. In the meantime it is necessary to deepen our knowledge about these materials. This is done in international research networks in which the team around Wolfgang Ernst is participating.*

### Research goals and international cooperations

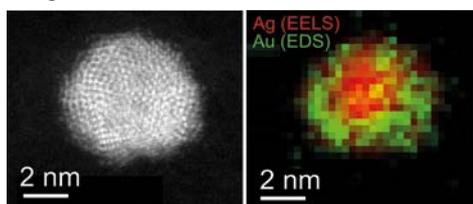
*At the Institute of Experimental Physics of Graz University of Technology, two topics are pursued in this area:*

*1. The production of tailored nanocluster structures in superfluid helium droplets. In order to reduce the internal thermal motion of the atoms, new cold aggregates are created at extremely cold temperatures (0.4 Kelvin) from single atoms and molecules and analysed using mass and laser spectroscopic methods. In this way, the Graz scientists have successfully managed the controlled formation of a core-shell nanomaterial with a core of gold atoms covered by a silver atom layer – and vice versa. In cooperation with the Institute of Electron Microscopy and Nanoanalysis (FELMI-ZFE), the newly created structures were imaged with atomic resolution (Figure 1). >*

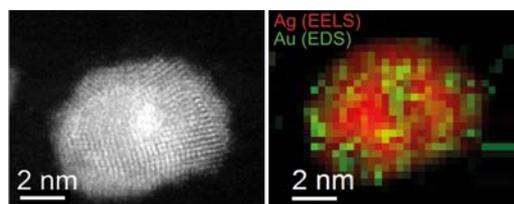
**Abbildung 1:**  
**Elektronenmikroskopieaufnahmen (FELMI-ZFE) speziell zusammengesetzter Nanocluster, Ausmaße ca. 5 nm: links die atomare Gitterstruktur und elementspezifische Markierung eines Single-Core-Clusters (innen Silber, außen Gold); rechts ein Dual-Core-Cluster (zwei Silberzentren, Gold außen und als „Trennwand“).**

*Figure 1:*  
*Electron microscopy images (FELMI-ZFE) of specially composed nanoclusters of approximately 5 nm size. Left: the atomic lattice structure and element-specific labeling for a “single core” cluster (silver inside, gold layer outside). Right: a “dual core cluster with two interior core areas of silver and an exterior shell and internal “separating wall” of gold.*

### Single core



### Dual core



© FELMI-ZFE

2. Das Institut für Experimentalphysik ist ein beliebter internationaler Forschungspartner, wenn es um die Messung der Oberflächeneigenschaften von topologischen Isolatoren geht. In diesem Forschungszweig kooperiert das Team um Wolfgang Ernst schon seit geraumer Zeit mit Giorgio Benedek an der Universität Milano-Bicocca im Rahmen des Universitätennetzwerks „Physics and Chemistry of Advanced Materials“ sowie mit Salvador Miret-Artés vom Institut für Mathematik und Fundamentalphysik des spanischen Wissenschafts- und Forschungsrates.

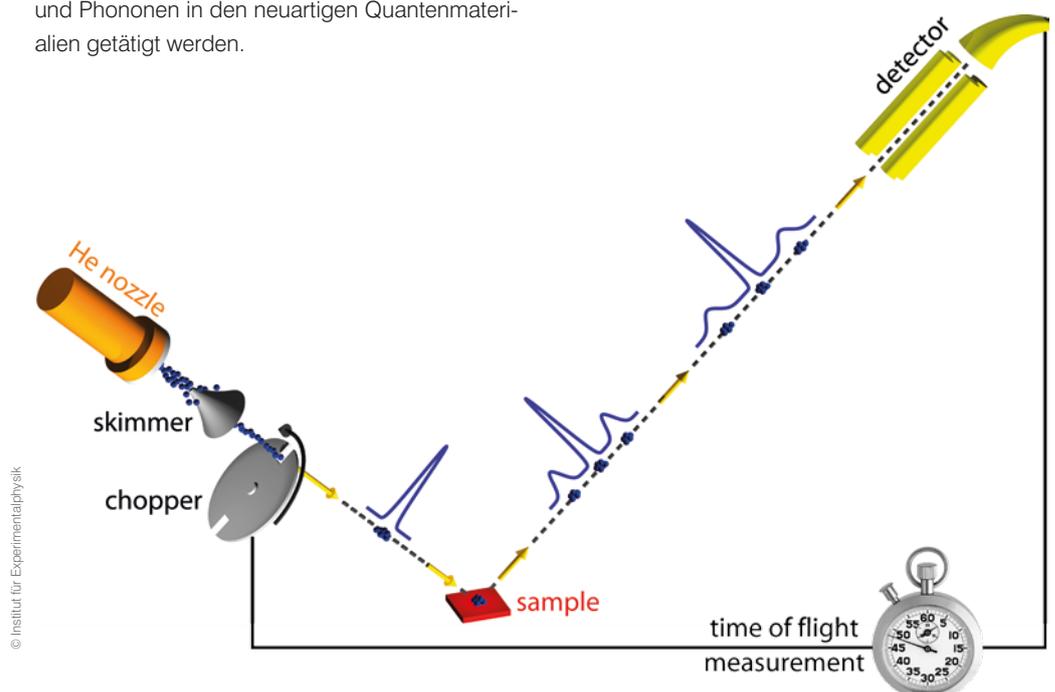
2. The Institute of Experimental Physics is a popular international research partner when it comes to measuring surface properties of topological insulators (TI). In this branch of research, Wolfgang Ernst's team has been cooperating for some time with Giorgio Benedek at the University of Milano-Bicocca in the framework of the Physics and Chemistry of Advanced Materials university network and with Salvador Miret-Artés from the Institute of Mathematics and Fundamental Physics of the Spanish Science and Research Council.

Neu vereinbart wurde im Frühjahr 2015 auch eine Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für chemische Physik fester Stoffe in Dresden, das unter der Leitung von Claudia Felser eine der führenden Einrichtungen für die Herstellung neuer Quantenmaterialien ist. „Die Methode der Heliumatomstreuung erlaubt die gezielte Anregung von Oberflächenschwingungen und die gleichzeitige Vermessung der Elektronenladungsverteilung an der Oberfläche, eignet sich also besonders für die Untersuchung der für TI-Oberflächen charakteristischen Merkmale“, sagt Wolfgang Ernst. In Graz kann die Energie der Gitterschwingungen (Phononen) oberflächenspezifisch gemessen werden, und daraus wiederum können Aussagen über Kopplungsmechanismen zwischen Elektronen und Phononen in den neuartigen Quantenmaterialien getätigt werden.

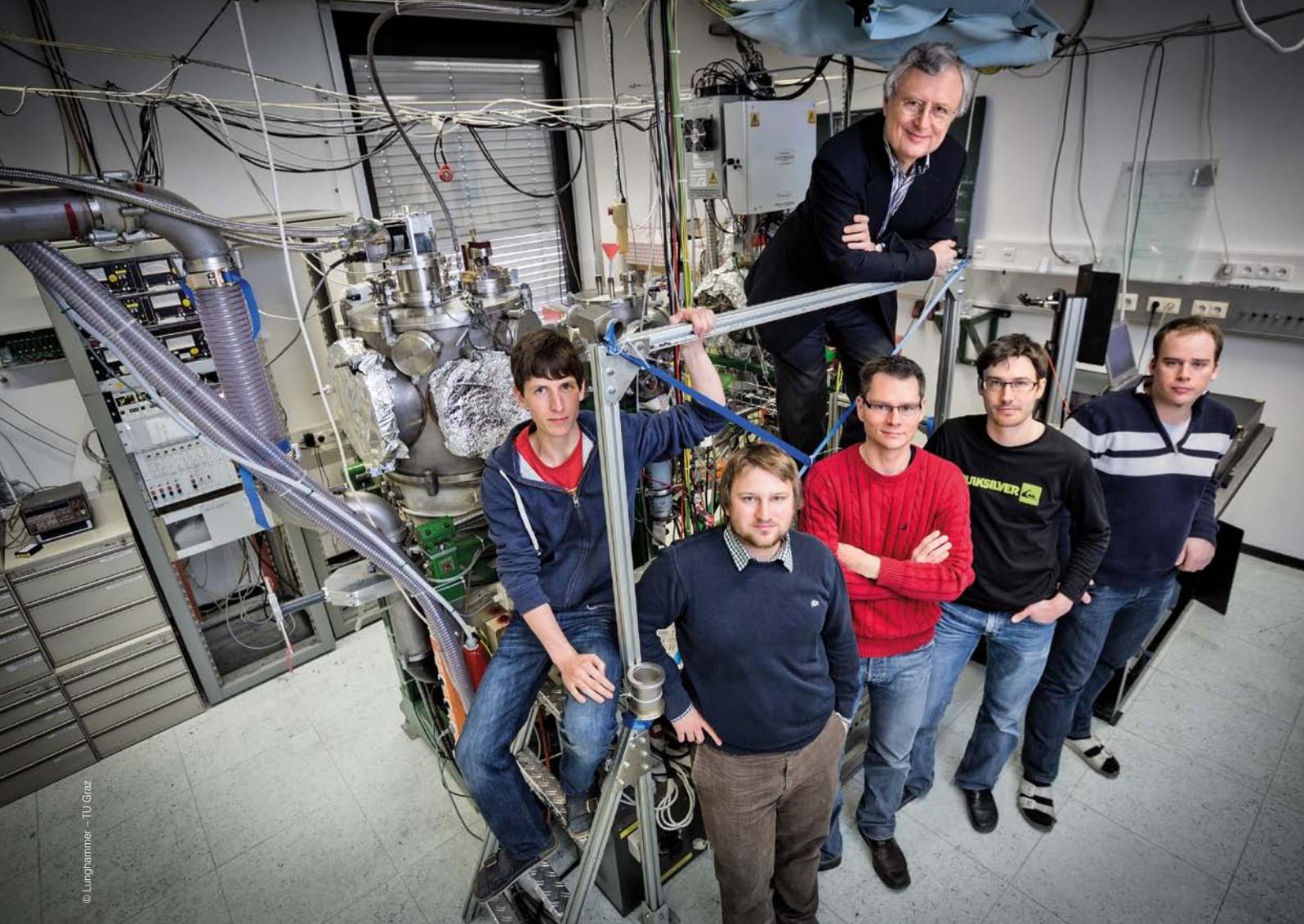
A new cooperation agreement was signed in 2015 with the Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids which, headed by Claudia Felser, is one of the leading institutions for the production of new quantum materials. “The method of helium atom scattering allows the specific excitation of surface vibrations and the simultaneous measurement of the electron charge distribution at the surface. It is thus particularly suitable for investigating the characteristic features of TI surfaces,” continues Ernst. In Graz, the energy of lattice vibrations (phonons) can be measured highly surface specific, and from this, conclusions can be drawn about coupling mechanisms between electrons and phonons in the novel quantum materials.

**Abbildung 2:**  
Ein kurzer Puls von Heliumatomen aus einer Düse tastet die Oberfläche des interessierenden Materials ab. An die Oberfläche abgegebene oder von ihr aufgenommene Energiequanten manifestieren sich in der Geschwindigkeitsverteilung der reflektierten Heliumatome und werden in einer Flugzeitmessung sichtbar.

*Figure 2:*  
A short pulse of helium atoms from a nozzle scans the surface of the material to be examined. Energy quanta emitted or absorbed at the surface manifest in the speed distribution of the reflected helium atoms and can be visualized in a time-of-flight measurement.



© Institut für Experimentalphysik



© Lünghammer – TU Graz

### Zukunftsmusik Anwendungen

In welcher Weise die physikalischen Erkenntnisse eines Tages ihre Umsetzung erfahren, ist noch nicht abzuschätzen. Eines der großen Anwendungsthemen der modernen physikalischen Forschung ist der Quantencomputer, durch den man hofft, die Informationsverarbeitung zu revolutionieren. Oftmals ist die praktische Umsetzung physikalischer Erkenntnisse nicht genau voraussehbar, meint Ernst und verweist zum Beispiel auf die Suche nach immer besseren Zeitnormalen, einer Zeitmessung höchster Präzision, der wir als direkte Folge unser heutiges GPS-Ortungssystem verdanken. In diesem Sinn wird man vielleicht erst in 20 Jahren sehen, welche praktischen Anwendungen die Quantenmaterialien finden werden.

Die Arbeiten wurden vom Land Steiermark und der EU im Rahmen eines EFRE Projekts gefördert. ■

### Applications envisaged for the future

*One of the big application topics of modern physics research is the quantum computer, which is hoped to revolutionise information processing. Wolfgang Ernst thinks that the practical implementation of fundamental physics research is often not accurately predictable and he refers to the example of the search for increasingly better time standards – a measurement of time of the highest precision – something to which we owe as a direct result the GPS positioning system. With this in mind, it may perhaps take another 20 years before we will be able to see all the practical applications of quantum materials.*

*The research was supported by the Province of Styria and the European Union within an ERDF project. ■*

**Abbildung 3:**  
Die Forschergruppe des Instituts für Experimentalphysik an ihrer Clustermaschine.

**Figure 3:**  
The group of researchers at the Institute of Experimental Physics with their cluster machine.

**Film zum Thema/See also the movie on APS-TV:**

[http://www.websedge.com/videos/aps\\_tv\\_2015/#/advancing\\_materials\\_research](http://www.websedge.com/videos/aps_tv_2015/#/advancing_materials_research)