

Quantenmaterialien
für die Welt von morgen

Quantum materials for
tomorrow's world

Inhalt

Contents

2 Mission

4 Einblicke
Insights

1 Schlaglichter Spotlights

12 Area A
Topologische Elektronen
Topological Electrons

20 Area B
Quantenmagnetismus
Quantum Magnetism

28 Area C
Topologische Photonik
Topological Photonics

36 Area D
Topologische Funktionalität
Tailoring Topological Functionality

2 Köpfe Heads

45 Alexey Chernikov

47 Elena Hassinger

49 Sebastian Klembt

51 Adriana Pálffy-Buß

3 Preise **Awards**

- 54 Claudia Felser
- 55 Karl Leo
- 56 Tobias Meng
- 57 Laurens W. Molenkamp
- 58 Ronny Thomale

4 Eine neue **Wissenschaftsgeneration** **Early career scientists**

- 60 Quantum Matter Academy & Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programm
Quantum Matter Academy & Hallwachs-Röntgen Postdoc Program

5 Tolle Frauen **Great women**

- 64 Grete-Hermann-Netzwerk
Grete Hermann Network

6 FAIRes Prinzip **FAIR principle**

- 68 Forschungsdatenmanagement
Research data management

7 Reichweite **Outreach**

- 73 Katze Q – Ein Quanten-Adventure
Kitty Q – A Quantum Adventure
- 76 QUANTube
Kurze Pause Wissenschaft
QUANTube
Science Break
- 79 Ausstellungen
Exhibitions

8 Anhang **Appendix**

- 83 Ausblick
Outlook
- 85 Ausgewählte Publikationen
Selected publications
- 87 Personen
People
- 89 Impressum

Mission

Das bundeslandübergreifende Exzellenzcluster **ct.qmat** – *Complexity and Topology in Quantum Matter* erforscht und entwickelt neuartige topologische Quantenmaterialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften und untersucht deren Nutzung unter Alltagsbedingungen.

ct.qmat entwirft damit Grundlagen für die Technologien der Zukunft und etabliert fundamental neue Materialkonzepte, die weit über das Siliziumzeitalter hinausreichen.

*The Cluster of Excellence **ct.qmat** – Complexity and Topology in Quantum Matter – explores and develops new types of topological quantum materials with specially tailored properties, and also studies their use under everyday conditions.*

***ct.qmat** is thus forging the foundations for tomorrow's technologies and establishing fundamentally new materials concepts going far beyond the Silicon Age.*



ct.qmat is based at two universities in Germany – Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg and Technische Universität (TU) Dresden – and connects research institutions from Dresden, Würzburg, and elsewhere in the world. ct.qmat brings together leading minds in condensed matter physics, photonics, materials science, chemistry and nanoscience.

ct.qmat nurtures both scientific talent and a broad public understanding of quantum technologies. It's a source of creative stimulus for a rising generation of researchers around the world.

ct.qmat ist an der Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg sowie der Technischen Universität (TU) Dresden angesiedelt und vernetzt herausragende Forschungsinstitutionen aus Dresden, Würzburg und weltweit auf eine nachhaltige Weise.

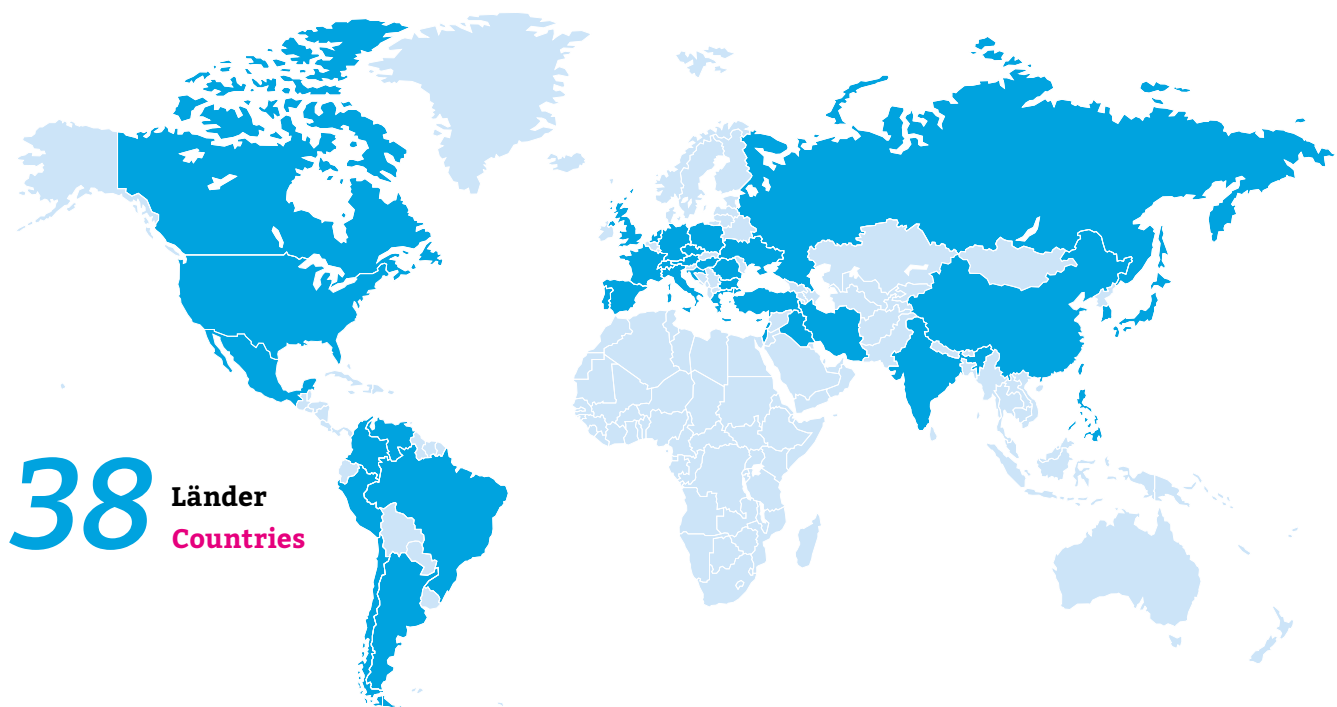
ct.qmat bringt führende Köpfe der Physik der kondensierten Materie, Photonik, Materialwissenschaften, Chemie und Nanowissenschaften zusammen.

ct.qmat fördert wissenschaftliche Talente und ein breites gesellschaftliches Verständnis für Quantentechnologien. Das Exzellenzcluster liefert kreative Impulse für eine nachwachsende Generation von Forschenden rund um den Globus.

Einblicke Insights

Seit 2019 wird das Exzellenzcluster **ct.qmat** durch die Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder gefördert – als einziges bundeslandübergreifendes von 57 Exzellenzclustern in Deutschland. Ralph Claessen und Matthias Vojta, die beiden **ct.qmat**-Sprecher aus Würzburg und Dresden, erläutern anlässlich der Halbzeit der ersten Förderperiode, wie sich das Exzellenzcluster in der Forschungslandschaft positioniert und auf welche Highlights es verweisen kann.

Since 2019, **ct.qmat** has been funded through the German Excellence Strategy of the Federal and State Governments. Of the 57 Clusters of Excellence in Germany, **ct.qmat** is the only one to be located in two different federal states simultaneously. Marking the halfway point in the first funding period, Ralph Claessen and Matthias Vojta, the two spokespersons from Würzburg and Dresden, explain how **ct.qmat** has positioned itself in the research landscape, and list the highlights accomplished so far.



ct.qmat: Mehr als die Summe seiner Teile

ct.qmat: More than the sum of its parts

Die hohe gesellschaftliche Bedeutung der Quantenwissenschaften wurde zum einen durch das Konjunktur- und Zukunftspaket der Bundesregierung 2020 unterstrichen, das eine Förderung von zwei Milliarden Euro für Quantentechnologien auflegte. Zum anderen bewies der Nobelpreis 2022 für bahnbrechende Arbeiten zur Quantenphysik die Relevanz dieses Forschungsbereichs. Welche Themen stehen bei ct.qmat ganz oben auf der Agenda?

Claessen: Komplexität und Topologie stehen bei uns im Fokus und sind ebenfalls aktuelle Leitthemen in der modernen Physik der kondensierten Materie, die neue Blickwinkel ermöglichen und damit auch die Entwicklung völlig neuer Funktionalitäten von Quantenmaterialien eröffnet haben. Unser Konzept ist für sehr unterschiedliche Teilbereiche der Festkörperphysik wie Elektronik & Quantentransport, Quantenmagnetismus sowie Photonik von Relevanz, →



The high relevance of quantum science to society at large was underlined by the German government's 2020 economic stimulus and future package – which provided funding of €2 billion for quantum technologies – and the award of the 2022 Nobel Prize for groundbreaking work on quantum physics. What topics are at the top of the agenda at ct.qmat?

Claessen: We concentrate on complexity and topology, which are currently key topics in modern condensed matter physics. They open up new perspectives and pave the way for the development of totally new functionalities of quantum materials. Our concept is relevant for very different aspects of solid-state physics such as electronics and quantum transport, quantum magnetism, and photonics – and this is reflected in our areas →



Physikalisches Institut, JMU Würzburg

**Ralph
Claessen**



≈ **500**

Publikationen 2019 – 2022
Publications in 2019 – 2022

→ was sich in unseren Forschungsbereichen widerspiegelt. Komplexität und Topologie sind hier verbindende Elemente – mit faszinierendem Potenzial für gegenseitige Synergie. Erfolgreich führt **ct.qmat** zwei der führenden Universitätsstandorte auf diesem Sektor sowie fünf externe Partner zusammen, darunter zwei Max-Planck-Institute, ein Leibniz-Institut und ein Helmholtz-Zentrum. So ist es gelungen, deren komplementäre Kompetenzen trotz der geografischen Entfernung und verschiedener Rahmenbedingungen zu einem funktionierenden Netzwerk zusammenzuschweißen, das gemeinsam mehr ist als die Summe seiner Teile.

Vojta: Und die Zusammenarbeit bei **ct.qmat** macht richtig Spaß! Durch die neuen Kooperationen mit Kolleg:innen vom jeweils anderen Standort, den neuen Input und den inspirierenden Spirit im Team erreichen wir viel mehr! Wir befinden uns gerade in einem goldenen Zeitalter der topologischen Physik. Die Community hat in den letzten 20 Jahren grundlegende Einsichten gewonnen, beispielsweise in die Topologie (S. 16) als ein neues Organisationsprinzip von Materiezuständen. Das wird unserer gemeinsamen Forschung jetzt und mindestens in den kommenden 20 Jahren unzählige neuartige und spannende Phänomene bescheren. Außerdem wird die Physik insgesamt interdisziplinärer und es werden zahlreiche Brücken zwischen den verschiedenen Teilgebieten unseres Fachs gebaut – auch das steht im Zentrum von **ct.qmat**.

Welche Highlights kennzeichnen die bisherige Arbeit des Exzellenzclusters?

Claessen: Zu den Höhepunkten zählt die Entwicklung neuer topologischer Materialien wie Mangan-Bismut-Tellurid (S. 12) oder Heusler-Verbindungen (S. 39), wobei Würzburg und Dresden eng kooperieren. Zukunftsweisend sind die Forschungen im Cluster zu Supraleitung (S. 47) und topologischen Isolatoren (S. 57). Wir sind also auf dem Weg zur Majorana-Physik in Quantenmaterialien (S. 22). Weitere Highlights sind die Arbeiten zu topologischen elektrischen – „topolektrischen“ – Schaltkreisen (S. 58), atomaren Monolagen als topologische Isolatoren, die Realisierung und Abbildung topologisch-magnetischer Nanostrukturen sowie die Fortschritte bei topologischen Lasern (S. 28). →

→ of research. Complexity and topology are unifying elements here with fascinating synergistic potential. **ct.qmat** successfully brings together two of the leading university departments in this sector as well as five external partners, including two Max Planck Institutes, a Leibniz Institute, and a Helmholtz Center. Despite the geographical distance and the different research structures, their complementary expertise has been welded into a functioning network that's more than the sum of its parts.

Vojta: What's more, working together at **ct.qmat** is really fun! We achieve far more thanks to the new collaborations with colleagues from different locations, the new input we get, and the inspirational team spirit. We're currently living in a golden age of topological physics. Over the past two decades, the research community has gained fundamental insights into, for example, topology (p. 16) as a new organizing principle of states of matter. This will uncover untold novel, exciting phenomena into our joint research both now and for at least the next twenty years. In addition, physics as a whole is becoming more interdisciplinary, and many bridges are being built between the various branches of our field. This is also something we focus on at **ct.qmat**.

*What are the highlights of **ct.qmat**'s work to date?*

Claessen: One of our highlights achieved through close co-operation between Würzburg and Dresden is the development of new topological materials such as manganese bismuth telluride (p. 12) and Heusler compounds (p. 39). Research at **ct.qmat** on superconductivity (p. 47) and topological insulators (p. 57) is pioneering – and we're well on the way to Majorana physics in quantum materials (p. 22). Other highlights include our work on "topoelectrical" (topological electrical) circuits (p. 58), atomic monolayers as topological insulators, the creation and imaging of topological magnetic nanostructures, and our progress on topological lasers (p. 28).

Vojta: We've also gained new insights into many-particle dynamics, found new types of quantum phase transitions and new families of materials for quantum spin liquids (p. 20), and discovered new types of topological semimetals displaying novel phenomena. →



≈ **400**
Wissenschaftler:innen
Scientists



Institut für Theoretische Physik, TU Dresden

Matthias
Vojta

→ **Vojta:** Gemeinsam haben wir zudem neue Einsichten in die Vielteilchendynamik gewonnen, neue Typen von Quantenphasenübergängen und neue Materialfamilien für Spinflüssigkeiten (S. 20) gefunden sowie neue Typen von topologischen Semimetallen entdeckt, die neue Phänomene zeigen.

Hat das Cluster seine Ziele bisher erfüllt und wie hat es sich im Hinblick auf die Forschungslandschaft entwickelt?

Claessen: Wir spielen in der Topliga, das beweisen unsere Entdeckungen. Wir sind in vielen Bereichen zusammengewachsen und können eine breite Materialbasis mit

State-of-the-Art-Synthese- und Epitaxieverfahren bereitstellen. In diesem Umfang sind wir weltweit nahezu konkurrenzlos. Doch auch außerhalb unserer wissenschaftlichen Kernarbeit sind wir sehr erfolgreich und sichtbar, denn wir möchten einer breiten Öffentlichkeit vermitteln, wie spannend unsere Forschung ist – für uns eine Herzensangelegenheit (S. 72).

Vojta: Wir haben es geschafft, Würzburg und Dresden als DIE deutschen Standorte für topologische Materialphysik zu etablieren und mit unserer Konferenz CT.QMAT22 die internationale Strahlkraft zu verstärken. Unsere

Quantum Matter Academy für Promovierende gibt den Karrieren des Forschungsnachwuchses Schubkraft und sorgt mit regelmäßigen Klausurtagungen für lebhaften Austausch und den Blick über den Tellerrand (S. 60). Durch das Format der assoziierten Mitgliedschaft binden wir Nachwuchswissenschaftler:innen und -gruppenleiter:innen auf Augenhöhe mit den Principal Investigators ein. Zu unseren Zielen gehört die Erhöhung des Frauenanteils in der Physik und speziell der Quantenphysik (S. 64). Zwei der vier bisher besetzten Cluster-Professuren haben Frauen inne (S. 47, 51) – ein wichtiger Meilenstein auf diesem Weg.

42 Mio. € Gesamtbudget
million € total budget



+10 Mio. € Programm- und
Universitätspauschalen
million € in program
and university funding

→ *Has the cluster achieved its goals so far? And how has it performed with regard to the research landscape?*

Claessen: As our discoveries show, we're playing in the top league. We've grown together in many areas and have a broad material base with state-of-the-art synthesis and epitaxy processes on a scale that's virtually unrivaled worldwide. But outside our core scientific activities, we're very successful and

prominent, too, for we're passionate about conveying to the general public how thrilling our research is (p. 72).

Vojta: We've established Würzburg and Dresden as the leading German centers for topological materials physics. Moreover, our international reputation was reinforced by the CT.QMAT22 conference. Our Quantum Matter Academy for PhD students gives a boost to the careers

of early career researchers and, with regular workshops, ensures lively dialogue and a broader outlook (p. 60). By dint of our associate membership format, junior scientists and group leaders work on equal terms with Principal Investigators. One of our goals is to increase the number of females in physics, especially in quantum physics (p. 64). It's a real milestone that two of the four cluster professors appointed so far at **ct.qmat** are women (p. 47, 51).



Internationale Ausstrahlung _____ International impact

Mehr als zwei Jahre beeinflusste die Corona-Pandemie auch die wissenschaftliche Kooperation, verlagerte viele Treffen ins Internet und veränderte so die Zusammenarbeit. Trotz Social-Distancing-Maßnahmen und Reisebeschränkungen konnte **ct.qmat** seine Forschungsvorhaben erfolgreich realisieren. Nach zahlreichen virtuellen Meetings freute sich die Wissenschaftscommunity dann umso mehr über das persönliche Wiedersehen und den fachlichen Austausch in Präsenz. Ein Höhepunkt



war die Konferenz CT.QMAT22, die vom 25. bis 29. Juli 2022 in Würzburg stattfand. Die Tagung zog 235 Teilnehmer:innen aus 17 Ländern an, unter anderem aus Australien, Chile, Dänemark, Finnland, Frankreich, Japan, Kanada, den Niederlanden, Österreich, der Schweiz, Singapur, der Tschechischen Republik und den USA. 50 Vorträge standen auf dem Programm, zudem fanden 90 Posterpräsentationen statt.

For more than two years, the pandemic also affected scientific cooperation, forcing meetings to be held online and changing the nature of collaborations. Nevertheless, **ct.qmat** advanced its research projects successfully despite social distancing, lockdown, and travel restrictions. Following copious virtual meetings, the scientific community was delighted when face-to-face gatherings and scientific dialogue finally became possible again. One highlight in this regard was the CT.QMAT22 conference, which took place in Würzburg from July 25 to 29, 2022. It was attended by 235 participants from 17 countries, including Australia, Austria, Canada, Chile, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Japan, the Netherlands, Singapore, Switzerland, and the USA. The program included 50 talks and 90 poster presentations.

R TRANSPORT HYDRO
 A- ODER PARAFERMIONEN
 SPIN-BAHN-K
 NEUARTIGE TOPOLOGISCHE MATERIALIEN N
 HYDRODYNAMISCHER TRANSPORT HYDRODYNAMIC TRANSPORT
 MAJORANA- ODER PARAFERMIONEN MAJORANA OR PARAFERMIONS
 SPIN-BAHN-KOPPLUNG SPIN-ORBIT COUPLING
 NEUARTIGE TOPOLOGISCHE MATERIALIEN NOVEL TOPOLOGICAL MATERIALS
 ELEKTRONISCHE KORRELATIONEN ELECTRONIC CORRELATIONS
 HYBRIDE SYSTEME HYBRID SYSTEMS
 AXION-ELEKTRODYNAMIK AXION ELECTRODYNAMICS
 TOPOLOGISCHE SUPRALEITUNG TOPOLOGICAL SUPERCONDU
 ELEKTRONISCHE KORRELATIONEN
 HYBRIDE SYSTEME
 ON-ELEKTRODYNAMIK
 TOPOLOGISCHE
 RELATIONEN
 ME LVD

IMA
PIN-BAHN
NEUARTIGE TO
DYNAMIC TRANSPORT
MAJORANA OR PARAFERMIONEN
KOPPLUNG SPIN-ORBIT COUPLING
NOVEL TOPOLOGICAL MATERIALS

ACTIVITY

ELECTRONIC CORRELATIONS

HYBRID SYSTEMS

AXION ELECTRODYNAMICS

SUPRALEITUNG TO

ELECTRONIC

PHOTONICS

Topologische Elektronen

Topological Electrons

Im Zentrum steht die Entwicklung neuartiger Quantenmaterialien mit topologischen Eigenschaften der elektronischen Bandstruktur. Ziel ist, diese unter Alltagsbedingungen nutzbar zu machen. Ein Forschungsfeld sind topologische Isolatoren.

The overall aim is to develop novel quantum materials that have an electronic band structure with topological properties, so that they can eventually be harnessed for use in everyday conditions. One field of research is topological insulators.



Kristallines Mangan-Bismut-Tellurid – eine Materialrevolution in der Quantenwelt.

Crystalline manganese bismuth telluride – a materials revolution in the quantum world.

#Mangan-Bismut-Tellurid:

Made in Dresden, optimiert in Würzburg, ist dieser maßgeschneiderte Kristall der Vorbote einer Materialrevolution, die das Ende des Siliziumzeitalters in der Informationstechnologie einläuten und verlustarmen Quantenchips den Weg bereiten soll.

#Manganese bismuth telluride:

Made in Dresden, optimized in Würzburg. This bespoke crystal is the harbinger of a materials revolution that's expected to herald the end of the Silicon Age in information technology and pave the way for low-loss quantum chips.

Die Geburt eines Quantenmaterials

A quantum material is born

Atom für Atom: MnBi_2Te_4 heißt die Zauberformel, die 2019 in Dresden das Licht der Welt erblickte. Wissenschaftler:innen des Exzellenzclusters **ct.qmat** entwickelten ein Quantenmaterial namens Mangan-Bismut-Tellurid und stellten es erstmals im Labor her. Der maßgeschneiderte Kristall ist ein magnetischer topologischer Isolator. Er bringt sein Magnetfeld selber mit und besitzt daher anwendungsrelevante Eigenschaften, die andere Materialien erst in starken äußeren Magnetfeldern zeigen. Mit Mangan-Bismut-Tellurid, kurz MnBi_2Te_4 , haben sich die Chancen für neuartige elektronische Bauelemente erweitert, die Informationen magnetisch kodieren und transportieren. Spintronik nennt sich dieser Ansatz und soll die Informationstechnologie künftig energiesparender sowie schneller machen. Seither arbeiten internationale Forschungsteams an unterschiedlichen Facetten dieses Materials. Vor allem bei **ct.qmat** ist man durch die Synergie zwischen dem experimentellen und theoretischen Knowhow von Würzburg und Dresden einen großen Schritt weitergekommen.

Atom for atom: MnBi_2Te_4 is a magic formula that first saw the light of day in Dresden in 2019. Manganese bismuth telluride is a quantum material that was first produced in the laboratory by scientists from **ct.qmat**. This specially tailored crystal is a magnetic topological insulator. It has its own magnetic field, giving it properties suitable for important applications that other materials only exhibit in strong external magnetic fields. The advent of MnBi_2Te_4 is an important step towards developing novel electronic components that can encode and transport information magnetically. Known as spintronics, this branch of physics is expected to one day make information processing faster and more energy-efficient. International research teams are now studying various aspects of MnBi_2Te_4 . This major breakthrough at **ct.qmat** was enabled by the synergy between experimental and theoretical expertise in Würzburg and Dresden.



Bandstruktur

Band structure

... bezeichnet die Verteilung der Elektronen auf die Energiezustände in einem Material. Man spricht von Valenz- und Leitungsbändern. Dies bestimmt, wie sich die Elektronen in verschiedenen Materialien bewegen können. So sind die Elektronen bei Isolatoren an ihre Atome gebunden und können daher keinen elektrischen Strom tragen – im Gegensatz zu elektrisch leitfähigen Metallen, wo die Elektronen im Leitungsband frei durch das Material fließen können. In topologischen Isolatoren sind die Energiebänder anders sortiert, was an ihren Oberflächen kurioserweise zu einer nahezu perfekten Leitfähigkeit führt.

... describes the distribution of electrons among the energy states in a material. There are valence bands and conduction bands. The band structure determines how electrons can move in different materials. For example, in insulators, electrons are bound to their atoms and so can't carry an electric current. By contrast, in electrically conductive metals, electrons in the conduction band can flow freely through the material. In topological insulators, the energy bands are sorted differently, which curiously leads to almost perfect conductivity on their surfaces.

Die Oberfläche entscheidet _____

What counts is the surface

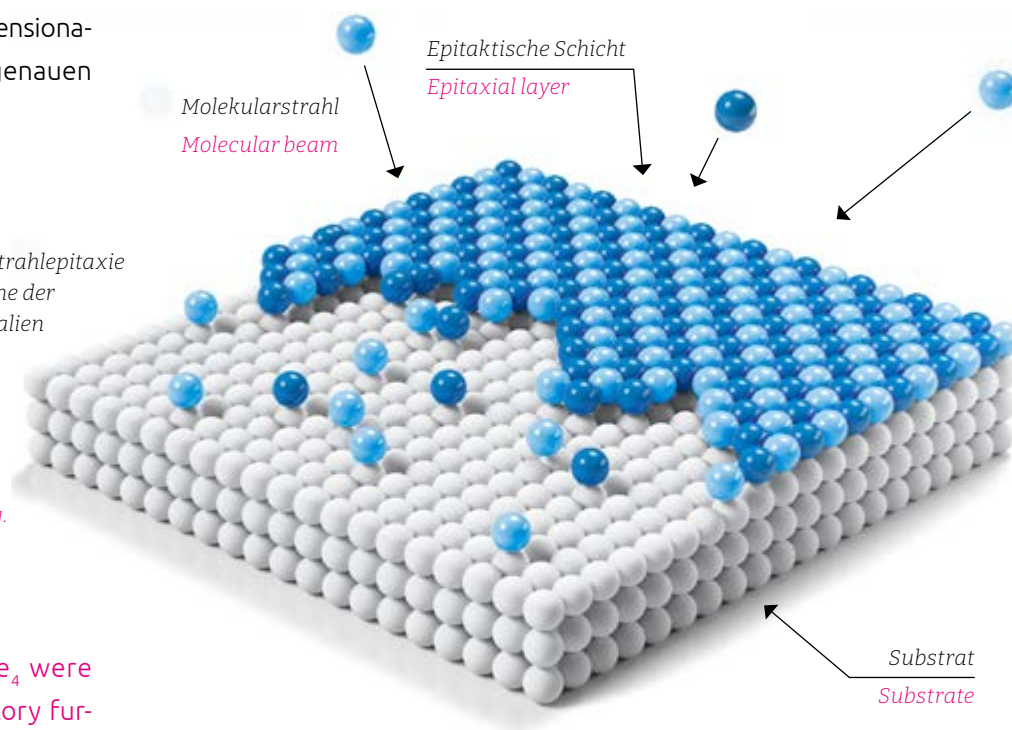
Die in Dresden im Laborofen gezüchteten Kristalle wurden in Würzburg mittels Photoelektronenspektroskopie analysiert. Dabei zeigte sich: Nur ganz bestimmte Oberflächen des Materials mit spezieller atomarer Zusammensetzung entfalten außergewöhnliche Effekte wie das Potenzial zur nahezu verlustfreien Stromleitung. „Deshalb gehen wir von gewachsenen, dreidimensionalen Einkristallen zu atomgenauen

zweidimensionalen Schichten über“, erklärt Hendrik Bentmann von der JMU Würzburg. Die Herausforderung: „Die Oberfläche soll von sehr hoher Qualität, der Atomfilm aber so superdünn wie möglich sein. Wir schaffen es bis auf einen Nanometer – das entspricht einem Millionstel Millimeter.“ Das dafür angewendete Verfahren heißt

Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam Epitaxy, MBE): Im Ultrahochvakuum werden die Ausgangsstoffe über Verdampferöfen in dünnen Schichten auf ein Trägermaterial aufgebracht und wachsen nahezu frei von Verunreinigungen – Atomlage für Atomlage. Maximal 30 Minuten dauert das Herstellen einer 0,5 x 0,5 cm kleinen 2D-Probe.

Atomlage für Atomlage wird bei der Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam Epitaxy, MBE) aufgebracht. Eine der größten MBE-Anlagen für neue Quantenmaterialien steht in Würzburg.

Molecular-beam epitaxy is a fabrication method in which atomic layers are deposited one at a time. One of the biggest MBE systems used for new quantum materials is in Würzburg.



Crystals of MnBi_2Te_4 were grown in a laboratory furnace in Dresden, and then analyzed in Würzburg using photoelectron spectroscopy. This revealed that extraordinary effects such as the potential for almost lossless current conduction are only exhibited by specific surfaces of the material with particular atomic content. “That’s why we’re switching from growing three-dimensional single crystals to two-dimensional

layers whose thickness is a matter of atoms,” explains Hendrik Bentmann from the JMU Würzburg. Apart from ensuring the surface is of very high quality, the main challenge is to create an atomic film that’s as thin as possible: “We’ve managed to get it down to one nanometer – that’s a millionth of a millimeter.” The process employed

is called molecular-beam epitaxy. Working in an ultra-high vacuum, the starting materials are deposited in thin layers on a base material using evaporation furnaces. The crystals grow atomic layer by atomic layer with almost no impurities. It takes no longer than 20 minutes to produce a small 2D sample about 25 square millimeters in size.

“

Erst in den Atom für Atom hergestellten zweidimensionalen Schichten offenbaren sich die interessantesten Erscheinungen, die in unserem neuen Material stecken, darunter die quantisierte Leitfähigkeit der Ränder. Durch Variation der ultradünnen Atomschicht – ein, zwei, drei ... Nanometer – steuern wir die Eigenschaften des topologischen Isolators gezielter. Zudem beobachten wir, wie sich durch Wechselwirkungen mit anderen Stoffen das Verhalten an den Grenzflächen modifizieren lässt. ”

Physikalisches Institut, JMU Würzburg

**Hendrik
Bentmann**

“

It's only in the two-dimensional layers produced atom by atom that the interesting phenomena inherent in our new material are revealed, including the quantized conductivity of the edges. By varying the thickness of the ultrathin atomic layer (one, two, three or more nanometers), we can control the properties of the topological insulator more exactly. We're also observing how the behavior on the surfaces can be modified by interactions with other materials.”

Weiterentwicklung gelungen:

Mit MnBi_4Te_7 und $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$ konnten zwei neue magnetische topologische Isolatoren mit abgewandelten Materialstrukturen identifiziert und exakt hergestellt werden. An diesem Erfolg beteiligt sind neben der Würzburger Mannschaft um Bentmann sowie Forschenden der TU Dresden und vom Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden ebenfalls Arbeitsgruppen aus dem Forschungszentrum Jülich und der Hiroshima University (Japan).



Successful new developments:

MnBi_4Te_7 and $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$ are two new magnetic topological insulators with modified material structures that have been identified and precisely fabricated. Alongside Bentmann's team in Würzburg and researchers from TU Dresden and the Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, this feat also involved groups from the Forschungszentrum Jülich and Hiroshima University in Japan.

i Topologie
Topology

... ist ein Teilgebiet der Mathematik, das seit zwei Jahrzehnten die Physik erobert. Diese symbiotische Verknüpfung eröffnet eine neue Perspektive auf quantenphysikalische Erscheinungen und wurde 2016 mit einem Nobelpreis gewürdigt. Die Topologie befasst sich mit Eigenschaften geometrischer Objekte, die bei kontinuierlicher Verformung erhalten bleiben. Ein Konzept, das sich auch auf elektronische Zustände in Quantenmaterialien ausdehnen lässt. Das soll beispielsweise in Zukunft helfen, die Informationen in Quantencomputern stabil zu speichern.

... is a branch of mathematics that's been making great strides in physics for two decades. This symbiotic combination has opened up new angles on various phenomena in quantum physics and was recognized with a Nobel Prize in 2016. Topology deals with properties of geometric objects that are preserved under continuous deformations. It's a concept that can be extended to electronic states in quantum materials, where its expected benefits include the stable storage of information in quantum computers.

“

In Dresden wurden die faszinierenden Eigenschaften des Materials entdeckt. Gemeinsam arbeiten wir nun daran, die perfekte Rezeptur zu finden“, sagt der Würzburger Doktorand Philipp Kagerer (rechts). „Bis zur konkreten Anwendung in Bauelementen dauert es aber noch!“ An dem Meilenstein im Materialdesign war auch Kagerers Forscherkollege Celso I. Fornari entscheidend beteiligt. „Unsere Zusammenarbeit bedeutete, dass die Dresdner Expert:innen ihr Wissen über Mangan-Bismut-Tellurid in Form von Volumenkristallen mit meinen Kolleg:innen und mir teilten. Mithilfe meines



Hintergrundwissens in der Dünnschichttechnologie haben wir deren Forschung dann auf die nächste Stufe gebracht, indem wir MnBi_2Te_4 -Filme produzierten, die so dünn sind wie eine einzelne Lage des Materials“, so Fornari, der als erster Postdoc im Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programm (S. 62) gefördert wurde.

“

The material's fascinating properties were discovered in Dresden. We're now working together to find the perfect formula," explains Würzburg doctoral student Philipp Kagerer (right). "Mind you, it'll take a while yet to translate the results into electronic components." Kagerer's research colleague Celso I. Fornari was also instrumental in achieving this milestone in materials design. "Our collaboration meant the Dresden experts shared their knowledge of manganese bismuth telluride in bulk crystal form with my colleagues and me. Contributing my background in thin-film technology, we then took this research to the next level by producing MnBi_2Te_4 films as thin as a single layer," says Fornari, who was the first postdoctoral scholar to be supported by the Hallwachs-Röntgen Postdoc Program (p. 62).



Paper highlight

Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator, Nature (2019).

Weitere ausgewählte Highlights Further selected highlights

Interacting topological edge channels, Nat. Phys. (2020).

All topological bands of all nonmagnetic stoichiometric materials, Science (2022).

Any axion insulator must be a bulk three-dimensional topological insulator, Phys. Rev. B (2021).

Design and realization of topological Dirac fermions on a triangular lattice, Nat. Commun. (2021).



Topologische Isolatoren Topological insulators

... sind revolutionäre Quantenmaterialien, die in ihrem Inneren isolierend sind, aber auf ihrer Oberfläche bzw. an ihren Rändern Strom verlustfrei leiten. Damit vereinen sie eigentlich gegensätzliche Eigenschaften. Die erste experimentelle Realisierung dieser neuen Materialklasse gelang der Arbeitsgruppe um Laurens W. Molenkamp in Würzburg – heute einer der **ct.qmat**-Forscher.

... are revolutionary quantum materials. They combine contradictory properties because whereas their interior acts like an electrical insulator, the surface can conduct electricity without loss. This new class of materials was first created in the laboratory by the group in Würzburg headed by Laurens W. Molenkamp – now one of the researchers in **ct.qmat**.



Spintronik Spintronics

... steht für eine neuartige Form der Elektronik, bei der Informationen mithilfe des Elektronen-Spins – das heißt, des eigenen magnetischen Moments der Elektronen – kodiert und nach den Gesetzen der Quantenphysik verarbeitet werden. Der Spin spielt bei topologischen Isolatoren eine entscheidende Rolle.

... represents a new type of electronics in which information is encoded using the spin of electrons – i.e., the electrons' own magnetic moment – and processed according to the laws of quantum physics. Spin plays a key role in topological insulators.

1

Schlaglichter Spotlights

NEUARTIGE MAGNETISCHE QUANTENMATERIALIEN NOVEL MAGNETIC QUANTUM MATERIALS
VERFLOCHTENE ELEKTRONISCHE ORDNUNGEN INTERTWINED ELECTRONIC ORDERS
NANOSTRUKTUREN VON QUANTENMAGNETEN NANOSTRUCTURES OF QUANTUM MAGNETS
QUANTENKRITIKALITÄT QUANTUM CRITICALITY
WECHSELWIRKENDE TOPOLOGISCHE SYSTEME INTERACTING TOPOLOGICAL SYSTEMS
FRUSTRIERTER MAGNETISMUS FRUSTRATED MAGNETISM
SPINFLÜSSIGKEITEN SPIN LIQUIDS
SKYRMIONEN SKYRMIONS
NEUARTIGE MAGNETISCHE QUANTENMATERIALIEN NOVEL
VERFLOCHTENE ELEKTRONISCHE
ENMAGNETEN NANOSTRUKTUREN OF
QUANTENKRITIKALITÄT QUANT
HE SYSTEME INTERACTING
RIERTER MAGNETISMUS
FLÜSSIGKEITEN SPIN
SKYRMIC
ERIALIEN NOVEL
GEN INTERT
TTNTMAGN

MAGNETIC QUANTUM MATERIALS
ORDNUNGEN INTERTWINED ELECTRONIC ORD
QUANTUM MAGNETS
TUM CRITICALITY
TOPOLOGICAL SYSTEMS
FRUSTRATED MAGNETI
LIQUIDS
ONEN SKYRMIONS
MAGNETIC QUAI
WINED ELEC
TTTTTNT NIAN

Quanten- magnetismus

Quantum Magnetism

Zu den Zielen gehören die Entdeckung, Synthese und Untersuchung von neuartigen magnetischen Materialien, die überraschende, von Wechselwirkungen getriebene Phänomene zeigen. Ein Forschungsfeld sind Spinflüssigkeiten.

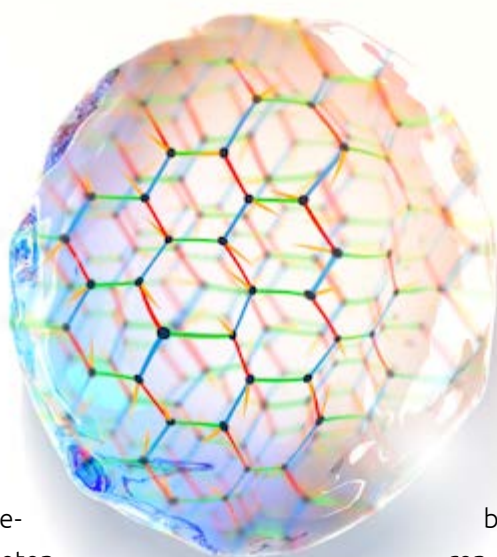
The goals include the discovery, synthesis, and study of novel magnetic materials exhibiting surprising, interaction-driven phenomena. One field of research is spin liquids.

Neuartige Zustände:

Die Wissenschaftler:innen von **ct.qmat** sind auf der Suche nach magnetischen Verbindungen, die überraschende Phänomene aufweisen und nach noch unbekannten Prinzipien funktionieren. Ein Beispiel sind Spinflüssigkeiten.

„Dies sind grundlegend neue Materiezustände von topologischen Magneten, die keine offensichtliche Ordnung aufweisen.“

Vielleicht öffnen uns Spinflüssigkeiten andersartige Wege, elektrische Felder an Magnetismus zu koppeln – das wäre ein Ansatzpunkt für neue Technologien“, sagt Roderich Moessner vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden, der 2013 den



Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis für seine Arbeit zu magnetischen Monopolen erhielt und zu den Gründungsmitgliedern des Exzellenzclusters gehört. Von konkreten Anwendungen sei man aber noch entfernt. Das brauche Zeiträume von vielen Jahren. Zu den Materialien, bei denen am **ct.qmat**-Standort Dresden nach einzigartigen

Merkmale für „neue Physik“ geforscht wird, gehört Rutheniumtrichlorid (RuCl_3). Experimente haben Hinweise auf exotische Anregungen – sogenannte Majorana-Fermionen – gefunden, wie man sie für eine spezielle Art von Spinflüssigkeit erwarten würde.

“

ct.qmat bündelt Exzellenz und die Stärken vieler toller Forscherinnen und Forscher, die gemeinsam über den Tellerrand schauen und an Ergebnissen arbeiten, die sie gemeinsam erreichen können. Grundlagenforschung ist nicht vorhersagbar, aber die richtigen Personen zusammenzubringen als Voraussetzung für bahnbrechende Erkenntnisse – das ist ein sehr guter Ansatzpunkt.“

“

ct.qmat combines excellence with the strengths of many brilliant researchers who think outside the box and work together to achieve results. Although pure research is unpredictable, bringing the right people together is the first step to scientific breakthroughs, and that’s a great way to start.“

Auf der Suche nach „neuer Physik“ _____ In search of “new physics”

Novel states: Scientists at **ct.qmat** are seeking magnetic compounds that display surprising phenomena and function in keeping with previously unknown principles. One example is spin liquids – “fundamentally new states of matter of topological magnets that have no apparent order,” according to Roderich Moessner from the Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden, one of the founding members of **ct.qmat** and winner of the 2013 Gottfried Wilhelm Leibniz Prize for his work on magnetic monopoles. “Spin liquids might open up different ways for us to couple electric fields to magnetism – and

that would be a starting point for new technologies.” However, concrete applications are still many years off, he adds. One of the materials being studied for unique characteristics for “new physics” at **ct.qmat** in Dresden is ruthenium trichloride (RuCl_3). Experiments have revealed evidence of exotic excitations known as “Majorana fermions,” as is to be expected for a particular kind of spin liquid.



Max-Planck-Institut für Physik
komplexer Systeme Dresden

**Roderich
Moessner**

i **Majorana-Fermionen**
Majorana fermions

... bezeichnen Teilchen, die ihre eigenen Antiteilchen sind. 1937 vermutete Ettore Majorana ihre Existenz. In speziell entworfenen Materialien können sie bei tiefen Temperaturen als Quasiteilchen entstehen. Sie könnten in der Zukunft als Bausteine für topologische Quantencomputer dienen.

... are particles which are their own anti-particles. Their existence was postulated by Ettore Majorana in 1937. They can be created as quasiparticles at low temperatures in specially designed materials. One day they may serve as building blocks in topological quantum computers.

Grundlagen erweitern _____

Expanding foundations

“**D**urch die Grundlagenforschung schaffen wir Instrumente, die vorher nicht existiert haben“, erklärt Moessner. Das sei letztlich das Ziel von **ct.qmat**. Bei den Spinflüssigkeiten richte sich das Augenmerk darauf, „einen Materiezustand zu realisieren, der anders als bekannte Magnete reagiert und dessen magnetische Eigenschaften gleichzeitig kontrollierbar sind.“ Vielleicht könne man so zum Beispiel einen magnetischen Wechselstrom erzeugen. Dies sei allerdings rein spekulativ. „Zurzeit ermitteln wir die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich solche komplexen physikalischen Systeme organisieren.“



Im deutschlandweit einzigartigen Hochfeld-Magnetlabor des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf, einer ct.qmat-Partnereinrichtung, erforscht Doktorandin Ena Osmic im Rahmen ihrer Promotion magnetische Phänomene, die künftig ganz neue technische Möglichkeiten eröffnen könnten.

In the high magnetic field laboratory of the Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, a ct.qmat partner facility that's unique in Germany, Ena Osmic is researching magnetic phenomena for her doctorate that could eventually lead to unheralded technical innovations.

“

Basic research enables us to create tools that didn't exist before,” declares Moessner – which is ultimately the objective of ct.qmat. With spin liquids, he explains, the aim is to “realize a state of matter that reacts differently from known magnets, and whose magnetic properties can be controlled.” Perhaps this could be used to generate, say, an alternating magnetic current – although this is only speculative, he adds. “Our current focus is to determine the laws by which such complex physical systems organize themselves.”

**#Grundlagenforschung für
Anwendungen, die man noch nicht kennt:**

Im Exzellenzcluster wird nach seltsamen Materiezuständen gefahndet, sogenannten Spinflüssigkeiten. Chemie, theoretische und experimentelle Physik liefern das Werkzeug. Ein Kandidat ist Rutheniumtrichlorid, $RuCl_3$.

#Pure research for unknown applications:
ct.qmat is searching for strange states of matter known as “spin liquids.” The tools for this are provided by chemistry as well as theoretical and experimental physics. One candidate is ruthenium trichloride, $RuCl_3$.

Der Doktorand Adam McRoberts ist aus Schottland extra nach Dresden gekommen, um am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme bei Roderich Moessner zu promovieren. Er erforscht die Quantentheorie von Magneten.

PhD student Adam McRoberts came all the way from Scotland to Dresden to do his doctorate under Roderich Moessner at the Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme. He's researching the quantum theory of magnets.



**Fermionen
Fermions**

... sind eine Teilchensorte, aus denen die Materie besteht, und wurden nach Enrico Fermi benannt. Dazu gehören unter anderem Elektronen und Neutrinos. Die Lichtteilchen – Photonen – dagegen sind Bosonen.

... are types of particles that make up matter. Named after Enrico Fermi, they include electrons and neutrinos. By contrast, light particles (photons) are bosons.

i **Spinflüssigkeit**
Spin liquid

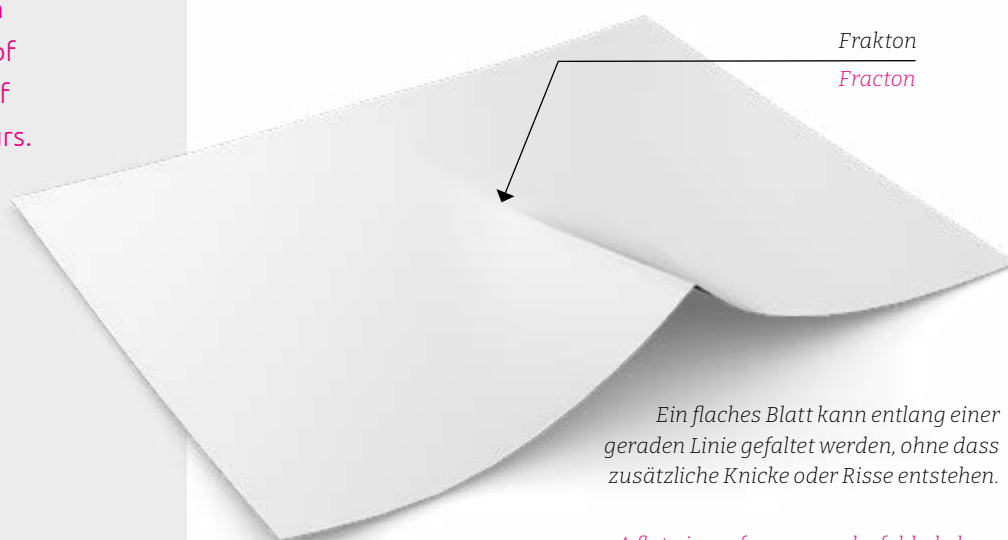
... beschreibt einen Zustand eines Magneten, der auch beim Abkühlen – anders als beispielsweise ein Ferromagnet – keine Ordnung einnimmt. Die Spins fluktuieren also auch bei extrem tiefen Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts. Vor ca. 30 Jahren war noch unbekannt, ob Spinflüssigkeiten überhaupt existieren. Inzwischen kennen Physiker viele Modelle und auch eine Reihe von Materialien, in denen ein solches Verhalten auftritt.

... describes a state of a magnet which, unlike a ferromagnet for example, doesn't assume any order even when it cools down. The spins therefore keep fluctuating even at extremely low temperatures close to absolute zero. About thirty years ago, it still wasn't clear whether spin liquids actually existed or not. In the meantime, physicists are aware of several models and even a number of materials in which this behavior occurs.

Vom Papierfalten

Take a piece of paper ...

Anschaulich wird die komplizierte Physik der zugrundeliegenden Eichtheorien beim Falten von Papier. „Eine Verallgemeinerung der Spinflüssigkeit wird mathematisch durch die gleiche Theorie beschrieben wie gefaltetes Papier“, erläutert Moessner. So stelle man beim Basteln eines Papierfliegers fest, dass sich ein Blatt Papier nur entlang einer geraden Linie sauber falten lasse. Versuche, entlang einer Kurve zu falten, führten schlimmstenfalls zum Riss. „Analog dazu gibt es Teilchen, die sich im dreidimensionalen Raum nicht frei, sondern nur in eine Richtung bewegen können“, beschreibt Moessner. „Gemeinsam mit Forschenden aus dem indischen Bangalore haben wir entdeckt, dass die Falzspitze – der Punkt, an dem der Falz eines teilweise gefalteten Papiers endet – einer elektrischen Ladung mit Vektorcharakter entspricht. Sie ist also nicht einfach positiv oder negativ, sondern eine Ladung mit einer Richtung.“ Damit ist sie bei ihrer Bewegung Beschränkungen unterworfen und kann sich nur in Richtung ihrer Ladung bewegen. „Genau das geschieht beim Falten des Papiers entlang einer geraden Linie. Verletzt man diese Beschränkung, tut das dem Papier nicht gut.“ Eine solche eingeschränkte Bewegung gibt es auch bei Spinflüssigkeiten höherer Ordnung, welche theoretisch vorhergesagt worden sind und nun experimentell gesucht werden.



Ein flaches Blatt kann entlang einer geraden Linie gefaltet werden, ohne dass zusätzliche Knicke oder Risse entstehen.

A flat piece of paper can be folded along a straight line without tearing or additionally creasing it.

The complicated physics of the underlying gauge theories can be illustrated by folding a piece of paper. “A generalization of spin liquidity is described mathematically by the same theory as folded paper,” Moessner explains. When making a paper airplane, a sheet of paper can only be folded neatly along a straight line. Trying to fold it along a curve would be impossible without creasing or even tearing it. “Similarly, there are particles that can’t move freely in three-dimensional space – they can only move in one direction,” says Moessner. “Working with researchers from Bangalore in India, we discovered that the fold tip – the point where the fold of a partly folded piece of paper ends – corresponds to an electric charge with a vector character. Rather than being simply positive or negative, it’s a charge with a direction.” Accordingly, its motion is constrained, for it can only move in the direction of its charge. “This is exactly what happens when you fold paper along a straight line. If you violate this restriction, it won’t do the paper any good.” Restricted motion also exists in higher-order spin liquids, which have been predicted theoretically and are now being sought experimentally.



Paper highlight

Fractonic view of folding and tearing paper: elasticity of plates is dual to a gauge theory with vector charges, Phys. Rev. Lett. (2021).

Weitere ausgewählte Highlights

Further selected highlights

Emergence of mesoscale quantum phase transitions in a ferromagnet, Nature (2022).

Unveiling the three-dimensional magnetic texture of skyrmion tubes, Nat. Nanotechnol. (2022).

Metallic and deconfined quantum criticality in Dirac systems, Phys. Rev. Lett. (2022).

Tunable chirality of noncentrosymmetric magnetic Weyl semimetals in rare-earth carbides, npj Quantum Mater. (2022).



Magnetische Monopole Magnetic monopoles

... sind Teilchen, über deren Existenz Paul Dirac 1931 spekulierte. Moessner war der Erste, der einen Stoff identifizierte, in dem sich magnetische Nord- und Südpole frei bewegen und beliebig weit voneinander entfernen können. Dies geschieht in Spineis – einer Familie von Substanzen, die durch eine besondere Kristallstruktur exotische Eigenschaften entwickeln. Hier sind die Monopole aber keine Elementarteilchen, sondern vielmehr Quasiteilchen, die sich als Ergebnis der Wechselwirkungen der Elektronen im Material bilden. Deren Existenz ist experimentell bestätigt worden.

... are particles whose existence was conjectured by Paul Dirac back in 1931. Moessner was the first scientist to identify a substance in which the magnetic north and south poles move freely and can be any distance apart. This occurs in spin ice – a family of substances that develop exotic properties due to their special crystal structure. Here, however, instead of elementary particles, the monopoles are quasiparticles formed as a result of interactions among electrons in the material. Their existence has been experimentally confirmed.

1 Schlaglichter
Spotlights

TOPOLOGISCHE

TOPOLOGISCHE
LICHTTRICHTER
OPTISCHE BERRY-PHASE

PHOTONISCHE

PHOTONISCHE TOPOLOGISCHE

TOPOLOGISCHE POLARITONEN

POLOGISCHE ELEKTRISCHE

QUANTENNENNETZWERKE

TOPOLOGISCHE

LICHTTRICHTER

OPTISCH

PHOTONISCHE

PHOTONISCHE

OPTISCHE BERRY-PHASE OPTICAL BERRY PHASE

PHOTONISCHE BAUTEILE PHOTONIC DEVICES

PHOTONISCHE TOPOLOGISCHE ISOLATOREN PHOTONIC TOPOLOGICAL INSULATORS

TOPOLOGISCHE POLARITONEN TOPOLOGICAL POLARITONS

ELEKTRISCHE SCHALTKREISE TOPOLOGICAL ELECTRICAL CIRCUITS

CHIRALE QUANTENNETZWERKE CHIRAL QUANTUM NETWORKS

LASER TOPOLOGICAL LASER

FUNNEL OF LIGHT

OPTICAL BERRY PHASE

BAUTEILE PHOTONIC DEVICES

ISOLATOREN PHOTONIC TOPOLOGICAL

TOPOLOGICAL POLARITONS

SCHALTKREISE TOPOLOGICAL

CHIRAL QUANTUM NETWORKS

LASER TOPOLOGICAL

FUNNEL OF LIGHT

OPTICAL BERRY-PHASE

PHOTONIC DEVICES

PHOTONIC TOPOLOGICAL

Topologische Photonik

Topological Photonics

Die Topologie als Organisationsprinzip eröffnet auch in der Photonik neue Möglichkeiten und verspricht revolutionäre Anwendungen durch maßgeschneiderte Materialien sowie hocheffektive photonische Technologien. Ein Forschungsgebiet sind topologische Laser.

Topology as an organizing principle also opens up new prospects in photonics. It holds out the promise of revolutionary applications based on tailored materials and ultraefficient photonic technologies. One area of research is topological lasers.

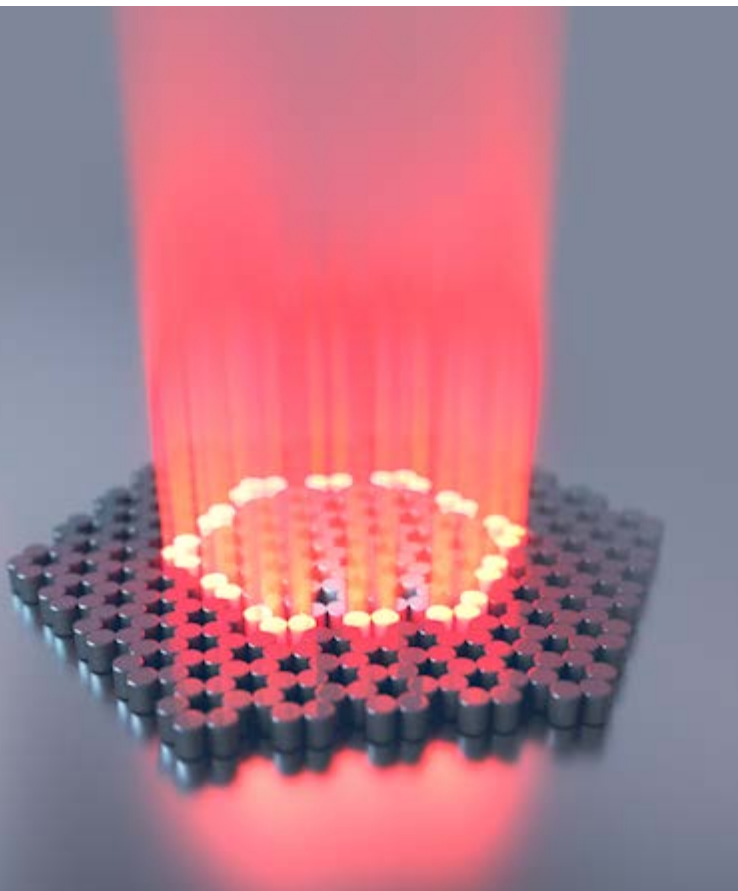


Illustration eines topologischen Lasers, bestehend aus 30 gekoppelten vertikalen Lasern. Alle Mikrolaser entlang einer topologischen Grenzfläche verhalten sich wie ein einziger Laser. Sie strahlen gemeinsam kohärentes Laserlicht aus.

Illustration of a topological laser comprising 30 coupled vertical lasers. All the microlasers arranged along a topological interface behave like a single laser. Together, they emit coherent laser light.

Licht für Zukunftstechnologien:

Mit einem hocheffektiven Lasernetzwerk in Sandkorngröße ist einem israelisch-deutschen Forschungsteam des Exzellenzclusters **ct.qmat** ein wissenschaftlicher Durchbruch in der topologischen Photonik gelungen. Unter Leitung von Sebastian Klembt aus Würzburg und Mordechai Segev vom Technion in Haifa, der mit dem Cluster assoziiert ist, wurde erstmals ein Netzwerk oberflächenemittierender Laser dazu gebracht, gemeinsam wie ein einziger Laser zu agieren. Damit wurde aus diesen kompakten und industriefreundlichen Oberflächenemittern ein topologischer Laser geschaffen.

#Superlaser entwickelt:

Ein israelisch-deutsches Forschungsteam hat erstmals ein Netzwerk oberflächenemittierender Laser dazu gebracht, wie ein einziger Laser zu agieren. Dieser topologische Laser ist ein international beachteter wissenschaftlicher Durchbruch.

#Developing super-lasers:

For the first time, an Israeli-German research team has produced an array of surface-emitting lasers acting like a single laser. This topological laser is an internationally acclaimed scientific breakthrough.

Topologisches Lasernetzwerk in Sandkorngröße

Topological laser array the
size of a sand grain

Light for tomorrow's technologies:

By developing a highly effective laser array the size of a grain of sand, an Israeli-German research team from **ct.qmat** has achieved a scientific breakthrough in topological photonics. Led by Sebastian Klembt from Würzburg and Mordechai Segev (an external member of **ct.qmat**) from the Technion in Haifa, an array of surface-emitting lasers has been made to act like a single laser for the first time. In other words, they've been turned into a topological laser.

Mordechai „Moti“ Segev – der Erfinder der topologischen Photonik

Mordechai “Moti” Segev: The father of topological photonics

“

Als wir mit der Entwicklung topologischer Laser begannen, hat niemand an diese Möglichkeit geglaubt“, erklärt Mordechai Segev. 2013 eröffnete der israelische Wissenschaftler das Forschungsfeld der topologischen Photonik, als er mit Alexander Szameit von der Universität Rostock in einem *Nature*-Artikel den ersten photonischen topologischen Isolator vorstellte. Seitdem hat sich die topologische Photonik zu einem riesigen Gebiet entwickelt, an dem Hunderte von Gruppen forschen. „Vor sechs Jahren habe ich angefangen, mit Sebastian Klembt und Sven Höfling von der JMU Würzburg (beide **ct.qmat**) zusammenzuarbeiten. Mein Team in Haifa ist im Bereich Photonik theoretisch und experimentell sehr stark. Aber wir haben keine Anlagen zur Fabrikation oder für

Tiefenexperimente, wie sie in Würzburg durchgeführt werden. Auch wenn wir persönliche Treffen während der Corona-Pandemie auf Eis legen mussten, haben wir unsere Kooperation erfolgreich fortgesetzt.“ Obwohl die topologische Photonik eigentlich auf das Jahr 2008

und eine Theorie-Arbeit des Nobelpreisträgers Duncan Haldane aus Princeton zurückgehe, entwickle man erst jetzt erste praktische Anwendungen, so Segev. Am aussichtsreichsten sei das 2021 mit Klembt und Höfling in *Science* vorgestellte Lasernetzwerk. „Ein weiteres vielversprechendes Feld ist Quantencomputing, das höchstwahrscheinlich irgendwann auf photonischen Plattformen basieren wird. Da photonische Schaltkreise nicht sehr fehlertolerant sind, werden topologische Methoden benötigt, um sie zu schützen. Mit topologischer Photonik lässt sich auch der Bahndrehimpuls – und damit die Topologie – von Laserstrahlen steuern. Daran arbeiten wir jetzt mit Würzburg.“ Die laut Segev „wohl aufregendste Forschung in der topologischen Physik“ findet zurzeit auf dem Gebiet der photonischen topologischen Isolatoren statt. „Die Oberflächen dieser isolierenden Materialien unterstützen den verlustfreien Photonenfluss und könnten daher für das Quantencomputing interessant sein. In einem *Nature*-Artikel von September 2022 haben wir gemeinsam mit Alexander Szameit – meinem engsten Partner bei **ct.qmat** – die Machbarkeit dreidimensionaler photonischer topologischer Isolatoren demonstriert. Jetzt planen wir besonders anspruchsvolle Experimente mit topologischer Photonik in synthetischen Räumen in

vier oder sogar mehr Dimensionen. Dies könnte uns neue Einblicke in die – kontraintuitive – Physik einer hochdimensionalen Welt geben und Ideen hervorbringen, die uns in unerforschtes Gebiet führen. Das würde die Konstruktion physikalischer Systeme ermöglichen, in denen Wellen auf seltsame und ungewöhnliche Weise transportiert werden.“



Faculty of Physics, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Technion – Israel Institute of Technology Haifa

**Mordechai „Moti“
Segev**

“

When we began developing topological lasers, everyone else said it couldn't be done," recalls Israeli scientist Mordechai Segev. He ushered in research into topological photonics in 2013 when he collaborated with Professor Alexander Szameit from Universität Rostock on a joint paper in *Nature* introducing the first photonic topological insulator. Since then, hundreds of topological photonics research groups have sprung up. "Six years ago, I also started working with Sebastian Klembt and Sven Höfling from JMU Würzburg, both members of **ct.qmat**. My team in Haifa is strong on theory and on experiments in photonics. But we lack the facilities for fabrication and low-temperature experiments, which are conducted in Würzburg. Even though our regular meetings were put on hold during the pandemic, our collaboration continued," says Segev. He explained that although topological photonics actually dates back to 2008 (a theoretical paper by Nobel laureate Duncan Haldane of Princeton), only now are the first practical applications emerging. The most promising one, according to Segev, is the laser array presented with Klembt and Hofling in *Science* in 2021. Another is quantum computing, which will most likely be based on photonic platforms. "However, because photonic circuits aren't very fault-tolerant, topological methods will be required to protect them." And he adds: "Topological photonics can also be used to control the orbital angular momentum (i.e., the topology) of laser beams. This is something we're now working on with Würzburg." According to Segev, "perhaps the most exciting research in topological physics" currently concerns photonic topological insulators. "The surfaces of these insulating materials support the flow of photons without dissipation and could therefore also aid quantum computing. In September 2022, Alexander Szameit (my closest collaborator at **ct.qmat**) and I demonstrated the viability of three-dimensional photonic topological insulators in *Nature*. We're now planning challenging experiments in synthetic space involving topological photonics in four or even more dimensions. This could give us new insights into the (counterintuitive) physics of a high-dimensional world and spark new ideas leading us into uncharted territory. This would allow physical systems to be engineered in which waves are transported in strange and unusual ways."



Physics World Breakthrough of the Year-Award

... ist eine vom britischen Fachjournal *Physics World* vergebene Auszeichnung. Es kommt einem Adelsschlag gleich, als eine von zehn Top-Publikationen für den „Durchbruch des Jahres“ nominiert zu werden. Laut Angaben der Zeitschrift hat das Herausgabeteam für die Nominierungen 2021 Hunderte von Artikeln bewertet, die in dem Jahr erschienen sind. *Physics World* ist die wichtigste Zeitschrift im Verlag des britischen Institute of Physics, einer der ältesten wissenschaftlichen Gesellschaften Europas.

... is an award presented by the British journal *Physics World*. Having a publication declared one of the ten finalists is like being made a knight of the scientific order! According to the journal, the editorial team assessed hundreds of articles published in 2021 before whittling them down to ten finalists for that year's Breakthrough of the Year award. *Physics World* is the flagship journal of the British Institute of Physics, one of Europe's oldest scientific societies.

Von Peking nach Bayern: Die Doktorandin Shiyu Huang hat in Dresden ihren Masterabschluss in Materialphysik gemacht und setzt ihre Karriere bei ct.qmat im Bereich topologische Photonik in Würzburg fort. „Auf dieses Forschungsgebiet wurde ich 2021 durch einen Artikel im Magazin Science aufmerksam. Der von ct.qmat-Mitgliedern verfasste Beitrag wurde in den chinesischen Medien vorgestellt. Das weckte mein Interesse für topologische Isolatoren und für Würzburg, das auf diesem Gebiet einen hervorragenden Ruf genießt und in den letzten Jahren bemerkenswerte Erfolge bei topologischen Lasern erzielt hat“, sagt sie. „Dank der hervorragenden Studierenden und Dozent:innen – und vor allem angesichts der Präsenz von ct.qmat – herrscht ein hervorragendes Arbeitsumfeld.“



From Beijing to Bavaria: PhD student Shiyu Huang did an MSc in material physics in Dresden and is now continuing her career at ct.qmat in Würzburg in the field of topological photonics. “I was first made aware of this area of research in 2021 when a paper written by several members of ct.qmat and published in Science was featured in the Chinese media. As a result, I grew interested in topological insulators and decided to come to Würzburg, which has an excellent reputation in this field and has scored several breakthroughs in topological lasers in recent years,” she says. “Thanks to the outstanding students and faculty – and especially given the presence of ct.qmat – there’s a brilliant working environment here.”

Winzige Systeme für maximale Leistung

Tiny systems for maximum output

Das in israelisch-deutscher Zusammenarbeit entstandene neuartige Lasernetzwerk verbindet vertikale Resonatoren, also sehr kleine optische Systeme. Schon heute sind Mikrolaser – Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) genannt – in der Alltagstechnologie fest verankert, werden für Mobiltelefone, Autosensoren oder die Datenübertragung in Glasfasernetzen genutzt. Doch der Ausgangsleistung, die diese winzigen VCSEL-Bauelemente erzeugen können, waren bislang enge

Grenzen gesetzt. Dieses Projekt verspricht hier neues Potenzial: Durch die geometrische Anordnung der Mini-Laser auf einem Chip entsteht ein photonischer topologischer Isolator. Sein Randzustand koppelt die vielen winzigen VCSEL, die dadurch wie ein zusammenhängender Laser agieren. In der Anzahl der Laserelemente ist er nicht begrenzt, wird weder durch Defekte noch Temperaturschwankungen beeinträchtigt.

The novel laser array created through Israeli-German collaboration combines miniature optical systems known as vertical resonators. VCSELs (vertical-cavity surface-emitting lasers) are microlasers that are already used in everyday tech like cell phones, car sensors, and fiber optic networks. Until recently, the output of these tiny VCSEL elements was very limited. However,

this looks set to change because in this project, the geometric arrangement of the microlasers on a chip creates a photonic topological insulator. Its edge state links up the many minute VCSELs, causing them to act like a coherent laser that isn’t affected by flaws or temperature fluctuations. What’s more, the number of laser elements that can be used is virtually unlimited.

Meilenstein mit Zukunftspotenzial

Milestone with future potential

Bei dem topologischen Lasernetzwerk handelt es sich um eine Methode, nach der die Wissenschaft schon lange gesucht hat und die international für Aufsehen sorgte: Die Arbeit wurde unter die Top-Ten-Nominierungen für den „Physics World 2021 Breakthrough of the Year“-Award gewählt. Die theoretische Ausarbeitung und experimentelle Umsetzung eines solchen Systems durch die israelisch-deutschen Cluster-Wissenschaftler:innen ebnet nun den Weg für eine Reihe künftiger Technologien im Bereich der medizinischen Geräte, der Kommunikation und für eine Vielzahl praktischer Anwendungen. Das topologische Prinzip dieses Lasers kann grundsätzlich für alle Wellenlängen und damit eine Reihe von Materialien funktionieren. Die Größe des Netzwerks lässt sich prinzipiell beliebig weit hochskalieren. Im Exzellenzcluster wird das Konzept jetzt weiterentwickelt und mithilfe des umfangreichen „Werkzeugkastens“ der Topologie an der Verbesserung der Lasereigenschaften gearbeitet.

The topological laser array is a technique that the scientific community has long been looking for. And the publication describing it certainly caused an international sensation, being chosen as one of the ten finalists for the Physics World 2021 Breakthrough of the Year award. The theoretical and experimental demonstration of topological lasers by Israeli and German scientists at **ct.qmat** paves the way for a raft of future technologies in medicine, communications, and many other practical applications. The topological concept of this laser can in principle be applied to all wavelengths and thus a whole host of materials. Moreover, the size of the array can theoretically be scaled up at will. The concept is now being honed at **ct.qmat**, with topology being employed as a versatile toolbox to improving laser properties.



Paper highlight
*Topological insulator
vertical-cavity laser array,*
Science (2021).

Weitere ausgewählte Highlights Further selected highlights

One-dimensional planar topological laser,
Nanophotonics (2021).

*Observation of room temperature excitons
in an atomically thin topological insulator,*
Nat. Commun. (2022).

Polariton condensates for classical and quantum computing,
Nat. Rev. Phys. (2022).

*Experimental observation of Berry phases
in optical Möbius-strip microcavities,*
Nat. Photonics (accepted for publication, 2022).

1

Schlaglichter
Spotlights

TOPOLOGICAL
MANIPULATION
ENTANGLEMENT
TOPOLOGISCHER SCHUTZ
SCHALTUNGEN TOPOLOGISCHER
BAUELEMENTE TOPOLOGICAL
COMPETING MANY-BODY STATES
TRANSPORTS TOPOLOGICAL
MANIPULATION OF FRACTIONALIZED
ENTANGLEMENT OF PROTECTED QUANTUM STATES
PROTECTION IN PHOTONIC DEVICES
TOPOLECTRICAL CIRCUITRY DESIGN
BAUELEMENTE TOPOLOGICAL DEVICES
COMPETING MANY-BODY STATES IN COMPLEX QUANTUM MATERIALS
UND LADUNGSTRANSPORTS TOPOLOGICAL PROTECTION OF SPIN AND CHARGE TRANSPORT
ANREGUNGEN MANIPULATION OF FRACTIONALIZED EXCITATIONS
IN GESCHÜTZTEN QUANTENZUSTÄNDEN ENTANGLEMENT OF PROTECTED QUANTUM STATES
TOPOLOGISCHER SCHUTZ IN PHOTONISCHEN BAUELEMENTEN TOPOLOGICAL PROTECTION IN PHOTONIC DEVICES
ENTWURF TOPOLEKTRISCHER SCHALTUNGEN TOPOLECTRICAL CIRCUITRY DESIGN
TOPOLOGISCHE BAUELEMENTE TOPOLOGICAL DEVICES
KONKURRIERENDE VIELTEILCHENZUSTÄNDE IN KOMPLEXEN QUANTENMATERIALIEN COMPETING MANY-BODY STATES IN COMPLEX QUANTUM MATERIALS
TOPOLOGISCHER SCHUTZ DES SPIN- UND LADUNGSTRANSPORTS TOPOLOGICAL PROTECTION OF SPIN AND CHARGE TRANSPORT

Topologische Funktionalität

Tailoring Topological Functionality

Der Fokus liegt auf dem praktischen Nutzen, den die untersuchten topologischen Effekte und Funktionalitäten bringen könnten. Dabei stehen potenzielle Anwendungen wie zum Beispiel topologisches Quantencomputing im Mittelpunkt.

The emphasis here is on how the topological effects and functionalities studied can be harnessed for practical benefits – especially in applications such as topological quantum computing.



Designerwerkstatt für Quantenmaterialien im Würzburger Labor: In dieser Kammer mit Verdampfern und Oberflächenanalysesystem werden topologische Isolatoren maßgeschneidert.

Designer workshop for quantum matter in a Würzburg laboratory. This chamber fitted with evaporators and surface analysis system is used to tailor topological insulators.

In Dresden wurden neuartige topologische Drucksensoren entwickelt (Foto rechts), die sich vergleichsweise einfach herstellen lassen.

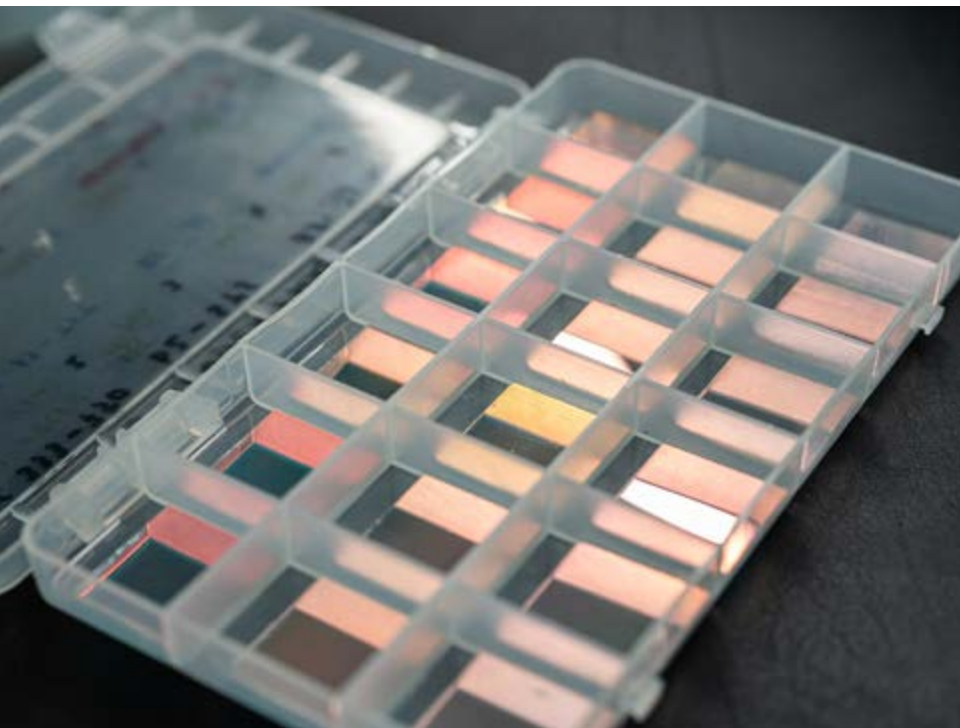
A new type of topological pressure sensor (right) that's comparatively easy to manufacture has been developed in Dresden.

#Zukunftstechnologien gesucht:

Vom verlustfreien Energietransport bis zur eleganten Steuerung der Lichtausbreitung – Forschungsgruppen in Würzburg und Dresden haben den möglichen Nutzen topologischer Quantenmaterialien als Basis für neue Geräte- und Technikkonzepte im Blick.

#In search of tomorrow's technologies:

From loss-free energy transmission to the elegant control of light propagation, research groups in Würzburg and Dresden are exploring the potential benefits of topological quantum materials as the basis for unprecedented new technologies and instruments.



Blick in ein Rastertunnelmikroskop, in dem Quantenmaterialien tiefgekühlt und atomgenau untersucht werden.

View into a scanning tunneling microscope allowing deep-frozen quantum matter to be studied with atomic precision.



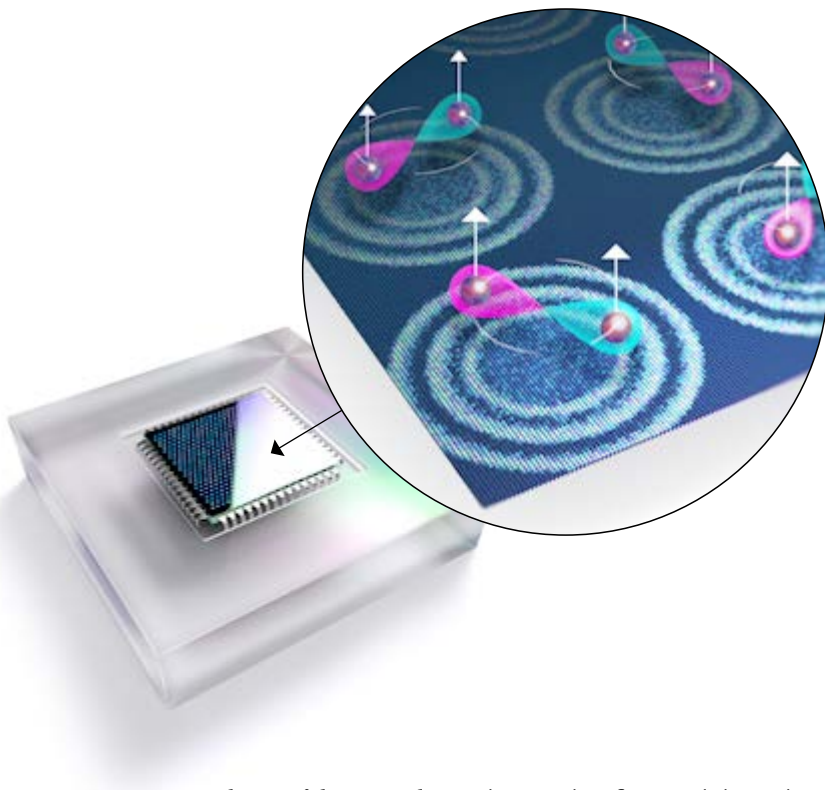
Supraleiter Superconductors

... leiten elektrischen Strom ohne Widerstand. Dadurch erwärmen sie sich beim Stromfluss nicht und es geht keine Energie verloren. Bereits 1911 entdeckte der spätere Nobelpreisträger Heike Kamerlingh Onnes die metallische Supraleitung. Inzwischen sind die unkonventionellen Supraleiter in den Fokus der Forschung gerückt – Materialien, deren Supraleitung neuen Regeln folgt und oft mit Magnetismus in Verbindung steht.

... conduct electricity without resistance. They therefore don't heat up when current flows through them, and no energy is lost. The superconductivity of pure metals was discovered back in 1911 by Heike Kamerlingh Onnes, a future Nobel laureate. Researchers have now turned their attention to unconventional superconductors – materials whose superconductivity follows new rules and is often associated with magnetism.

Topologische Supraleitung: Maßgeschneiderte Effekte

Topological superconductivity for tailored effects



Ohne Widerstand: Mit dem verlustfreien elektrischen Energietransport – der Supraleitung – verbinden sich seit der Entdeckung vor mehr als 100 Jahren große Hoffnungen. Forschende auf der ganzen Welt untersuchen dieses Quantenphänomen, das aber nur bei sehr niedrigen Temperaturen auftritt. Unterhalb der jeweiligen Sprungtemperatur kooperieren die Elektronen und bewegen sich paarweise durch den entsprechenden Festkörper, der dann keinen elektrischen Widerstand mehr besitzt. An der JMU Würzburg arbeitet eine Gruppe um **ct.qmat**-Gründungsmitglied Laurens W. Molenkamp (S. 57) daran, Supraleiter und topologische Isolatoren zu vereinen. Dahinter steht die Erwartung, dass das Material exotische Quantenzustände zeigt, die topologisch robust sind und sich für Quantencomputer oder andere Spintronik-Anwendungen nutzen lassen.

Zero resistance: Ever since it was discovered over a century ago, high hopes have been pinned on superconductivity – lossless electrical transmission. Researchers around the world are studying this quantum phenomenon, which only occurs at extremely low temperatures. Below a superconductor's transition temperature, its electrical resistance disappears, and electrons cooperate and move through it in pairs. A group at JMU Würzburg headed by Laurens W. Molenkamp (p. 57), a founding member of **ct.qmat**, is working on combining superconductors with topological insulators. The resulting materials are expected to exhibit exotic quantum states that are topologically robust and can be used in quantum computing and other spintronics applications.

Theory to practice: Claudia Felser from the Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden (p. 54), another **ct.qmat** founding member, theoretically described a compound consisting of yttrium, platinum, and bismuth (YPtBi) as a promising candidate for topological superconductivity. Using molecular-beam epitaxy, this crystalline material has been precisely fabricated by researchers in Würzburg as an ultrathin film with a suitable structure. The team then further enhanced the quality of the sample. It takes around six hours in an MBE system to grow a 60-nanometer layer with a perfect atomic structure on a wafer 5 millimeters wide and 14 millimeters long. Experiments have already confirmed that the high-quality YPtBi thin film is superconducting.

Hoffnungsträger: Claudia Felser vom Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden (S. 54), ebenfalls ct.qmat-Gründungsmitglied, hatte eine Verbindung von Yttrium, Platin und Bismut (YPtBi) als vielversprechenden Kandidaten für topologische Supraleitung theoretisch beschrieben. Dieses kristalline Material wurde in Würzburg per Molekularstrahlepitaxie (MBE) erfolgreich und präzise als hauchdünner YPtBi-Film in der passenden Struktur hergestellt. Anschließend arbeiteten die Wissenschaftler:innen daran, die Qualität der Dünnschichtprobe noch weiter zu verbessern. Rund sechs Stunden dauert in der MBE-Anlage das Wachstum einer 60 Nanometer feinen, atomar perfekt angeordneten Schicht auf einem fünf Millimeter breiten und 14 Millimeter langen Wafer. Experimentell konnte bereits gezeigt werden, dass die hochwertige YPtBi-Dünnschicht supraleitend ist.

Umzug nach Dresden: Um die Forschungen weiter voranzutreiben, geht ein MBE-System aus Würzburg auf die Reise nach Sachsen. Im Dresdner Labor wird es an das dortige System angebunden sowie mit einem Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunneling Microscopy, STM) gekoppelt, sodass die Proben vollständig im Vakuum transferiert werden können. Die empfindliche Oberfläche der MBE-Schicht würde sonst sofort mit der Umgebungsluft reagieren. Die neuen Messungen sollen Klarheit über die elektronischen Eigenschaften innerhalb und am Rand des dünnen Kristallfilms bringen – und ob es sich tatsächlich um einen topologischen Supraleiter handelt.

Moving to Dresden: To take research to the next level, an MBE system from Würzburg is being relocated to Dresden. On arrival, it will be hooked up to the local system and coupled to a scanning tunnelling microscope. This will enable samples to be transferred completely in vacuum, as otherwise the sensitive surface of the MBE layer would immediately react with air. New measurements will shed more light on the electronic properties both inside and on the edge of the thin crystalline film – and reveal whether it really is a topological superconductor.



Paper highlight

Molecular beam epitaxy of a half-Heusler topological superconductor candidate YPtBi (to be published, 2023).



Sprungtemperatur Transition temperature

... bezeichnet die Temperatur, unterhalb derer Supraleitung in einem Material auftritt.

... is the temperature below which superconductivity occurs in a material.



Jiwoong Kim hat in Südkorea promoviert und arbeitet an einer einzigartigen MBE-Anlage, die für die Herstellung topologischer supraleitender Halb-Heusler-Dünnschichten spezifiziert ist. „Das MBE-System bietet eine präzise Kontrolle über die Entstehung des kristallinen Films. Neben der Geschwindigkeit lassen sich verschiedene Parameter variieren, um ein hochqualitatives Schichtwachstum zu erzeugen“, so der Postdoc.

Having earned a doctorate in South Korea, Jiwoong Kim is now working on a unique MBE system built to fabricate topological superconducting half-Heusler thin films. “The MBE system allows the formation of the crystalline film to be precisely controlled,” the postdoc explains. “Apart from the speed, other parameters can be adjusted to enable high-quality film growth.”

Topologischer Drucksensor: Neue Geräte für vernetzte Anwendungen

Topological pressure sensor: New devices for networked applications



Der Doktorand Jakob Lindenthal präsentiert den neuen topologischen Drucksensor. „Damit wurde ein neuartiges Prinzip für einen optoelektronischen Drucksensor entwickelt“, sagt Lindenthal, der in der Forschungsgruppe um Karl Leo an der TU Dresden arbeitet. „Das topologische photonische System zeigt im Vergleich zu nicht-topologischen Konfigurationen eine deutlich verbesserte Licht-Materie-Wechselwirkung. Der Sensor lässt sich leicht an digitale Schaltkreise anschließen und eignet sich aufgrund seiner Kompaktheit für smarte, vernetzte Messsysteme.“

PhD student Jakob Lindenthal presenting the new topological pressure sensor. “It represents the development of a novel principle for an optoelectronic pressure sensor,” says Lindenthal, who works in Karl Leo’s research group at TU Dresden. “The topological photonic system has much better interaction between light and matter than non-topological configurations. The sensor can be easily connected to digital circuits, and its compactness makes it suitable for smart, networked measuring systems.”

Sensorik gefragt: Elektronische Geräte übernehmen immer mehr Aufgaben, ob in Produktion, Verkehr, Kommunikation oder Gesundheitswesen. Die hochintegrierten, teils komplett autonomen Computersysteme und Datenverarbeitungsnetze stützen sich zur Entscheidungsfindung nicht zuletzt auf Sensoreingaben, um Szenarien zu quantifizieren und zu bewerten. Dies führt zur wachsenden Nachfrage nach kompakten, zuverlässigen und kostengünstigen Sensoren. Bei der automatisierten Datenerfassung – unter anderem durch Industrieroboter oder bei der Ermüdungsüberwachung – spielen speziell die kraftempfindlichen elektronischen Komponenten eine wichtige Rolle. Oft ist die Miniaturisierung bei der Drucksensorik jedoch mit größerer Fertigungskomplexität verbunden, die wiederum die Herstellungskosten deutlich erhöht. Hier setzt das Prinzip eines neuartigen topologischen Drucksensors an, das **ct.qmat**-Forscher Karl Leo (S. 55) an der TU Dresden verfolgt.

Pioneering new sensors: The number of jobs done by electronic systems in areas like production, transport, telecoms, and healthcare is growing all the time. Highly integrated, often fully autonomous computer systems and data processing networks take decisions by quantifying and evaluating scenarios acquired with the aid of sensors. Consequently, the demand for compact, reliable, and cost-effective sensors is growing. In automated data acquisition – for instance in fatigue monitoring and industrial robots – a vital role is played by pressure-sensitive electronic components. However, miniaturization in pressure sensor technology often makes manufacturing highly complex and significantly more expensive. This is where the principle of a novel topological pressure sensor being developed at TU Dresden by **ct.qmat** researcher Karl Leo (p. 55) comes in.

Many applications: The huge potential of this topological pressure sensor lies in its comparatively simple manufacturing process with established thin-film techniques being used to process the organic materials required. The resulting optoelectronic component is very straightforward

Viele Anwendungsfelder: Das große Potenzial dieses topologischen Drucksensors liegt in seinem vergleichsweise einfach gehaltenen Herstellungsprozess. Denn bei diesem optoelektronischen Bauteil werden zum Beispiel organische Materialien verwendet, die mit etablierten Dünnschichttechniken verarbeitet werden können. Das im Grundsatz sehr simple Bauelement kann auf fast jedem Substrat aufgebracht werden. Weil Druckmessungen in vielen Bereichen der Technik und genauso in der Medizin gebraucht werden, ergeben sich zahlreiche Nutzungsmöglichkeiten.

Vernetzte Sensoren der Zukunft: Flexible und skalierbare Monitoring-Lösungen haben ein großes Potenzial, in einer digital vernetzten Infrastruktur die Auslastung zu optimieren und Schäden frühzeitig zu erkennen. Mithilfe des neuen Sensors kann beispielsweise die Überwachung der Belastung von Brücken, in Flugzeugtriebwerken oder tragenden Bauteilen in Maschinen kostengünstig und einfach realisiert werden. Durch sein modulares Aufbauprinzip lässt sich der Sensor auch an älteren Anlagen nachrüsten sowie an verschiedene Belastungsszenarien anpassen.

and can be placed on almost any substrate. Because pressure measurements are needed in many areas of technology and medicine, there are numerous possible applications.

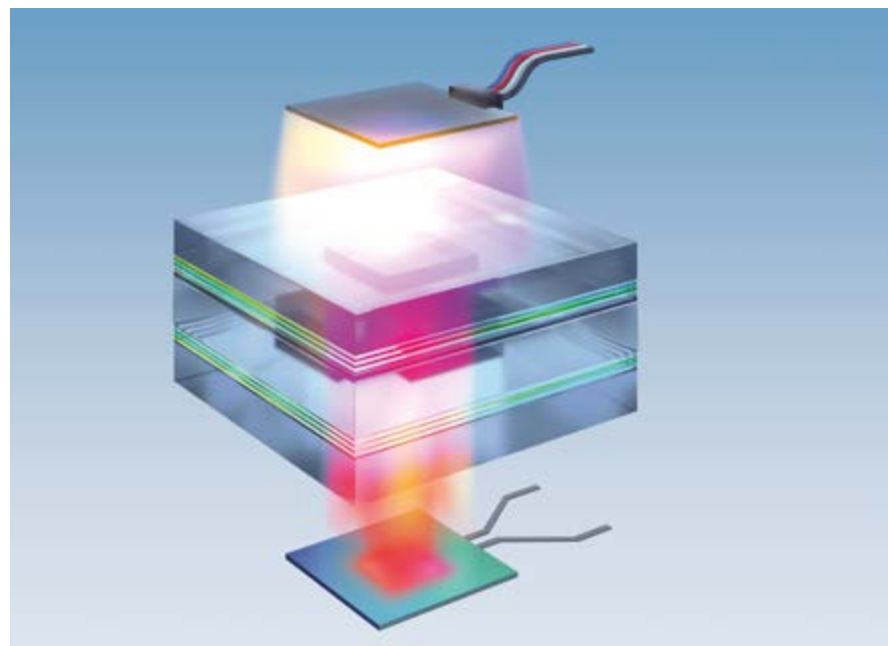
Sensor networks: Flexible, scalable monitoring solutions in a digitally networked infrastructure can be used to great effect to optimize performance and detect damage early on. The new sensor can be used, for example, to easily and cost-effectively monitor the strain on bridges, in aircraft engines, and on load-bearing components in machinery. Thanks to its modular design, the sensor can also be retrofitted to existing systems and adapted to different load scenarios.



Paper highlight

One-dimensional topological interface states: a novel approach for optical pressure sensors (to be published, 2023).

Der Aufbau des in Dresden entwickelten topologischen Drucksensors in einer schematischen Darstellung. Licht schwingt zwischen zwei Spiegeln. Dessen Wellenlänge ist vom Abstand zwischen den Spiegeln abhängig. Der Raum zwischen den Spiegeln ist mit einem kompressiblen Material und mit einem Absorbermaterial gefüllt, wobei Letzteres nur auf einen bestimmten Wellenlängenbereich reagiert. Bei Druck ändern sich die Dicke der kompressiblen Schicht sowie der Abstand zwischen den Spiegeln und das Licht wird absorbiert. Eine Fotodiode misst die Änderung der Lichtdurchlässigkeit, die proportional zum angelegten äußeren Druck ist. Indem für die beiden Spiegel eine spezielle topologische Geometrie verwendet wird, lässt sich das zwischen ihnen gefangene Licht wesentlich besser kontrollieren und damit die Messgenauigkeit des Sensors sehr deutlich verbessern.



Schematic illustration of the topological pressure sensor developed in Dresden. Light oscillates between two mirrors. Its wavelength depends on the distance between the mirrors. The space between the mirrors is filled with both a compressible material and an absorber material, the latter only responding to a certain wavelength range. When pressure is applied, the thickness of the compressible layer (and hence the distance between the mirrors) changes, and light is absorbed. A photodiode measures the change in light transmission, which is proportional to the external pressure applied. By using a special topological geometry for the two mirrors, the light trapped between them can be much better controlled, thus significantly improving the sensor's measuring accuracy.

Lichttrichter: Gesammeltes Licht

Light funnel: Focused light

Erfolgreiches Teamwork: Auf der Suche nach neuartigen physikalischen Phänomenen haben **ct.qmat**-Gründungsmitglied Ronny Thomale (S. 58) von der JMU Würzburg und Alexander Szameit von der Universität Rostock, der mit dem Exzellenzcluster assoziiert ist, einen Durchbruch erreicht. Den Forschungsgruppen ist es gelungen, einen Effekt namens Lichttrichter zu realisieren.

Punktlandung: Durch diesen Effekt werden Lichtsignale in einem zehn Kilometer langen Lichtleiterkabel an einem spezifischen Punkt gesammelt bzw. fokussiert. Dieser Punktlandung liegt ein physikalischer Mechanismus zugrunde, der dissipativer Skin-Effekt genannt wird und zu dessen theoretischem Verständnis Thomale entscheidend beigetragen hat.



Die ct.qmat-Doktoranden Tobias Hofmann (links) und Tobias Helbig von der JMU Würzburg waren an der Entwicklung des Lichttrichters beteiligt: „Wir haben lange überlegt, wie ein Schaltkreis aussehen müsste, bei dem man diesen Effekt beobachten kann. Denn üblicherweise ist ein Material hermitesch, das heißt, es erhält die Energie. Doch bei diesem Experiment handelt es sich um ein nicht-hermitesches System, bei dem ein beliebiger Spannungspuls zum Rand fließt und sich verstärkt – ein grundlegend neuartiges Phänomen, das in der Festkörperphysik bis dahin noch nicht untersucht wurde.“

Two ct.qmat PhD students from JMU Würzburg – Tobias Hofmann (left) and Tobias Helbig – were involved in the development of the light funnel. “We spent a long time wondering what form a circuit would have to take for this effect to be observed. Materials are usually Hermitian, which means they conserve energy. But this experiment involves a non-Hermitian system, in which a random voltage pulse flows to the edge and is amplified. This is a fundamentally novel phenomenon in solid-state physics that hasn’t been studied before.”

Successful teamwork: In the search for novel physical phenomena, the research groups led by **ct.qmat** founding member Ronny Thomale (p. 58) from JMU Würzburg and associate member Alexander Szameit from Universität Rostock have achieved a breakthrough – an effect called a light funnel.

Precision concentration: The light funnel causes light signals in a ten-kilometer optical fiber to be concentrated on a specific point. This precision concentration is based on a physical mechanism called the dissipative skin effect. Thomale’s work has made a decisive contribution to the theoretical understanding of this phenomenon.

Ein Trichter für Licht: Die Illustration zeigt, wie Lichtteilchen in einem Trichter gefangen werden.

A funnel for light. The illustration shows light particles being trapped in a funnel.

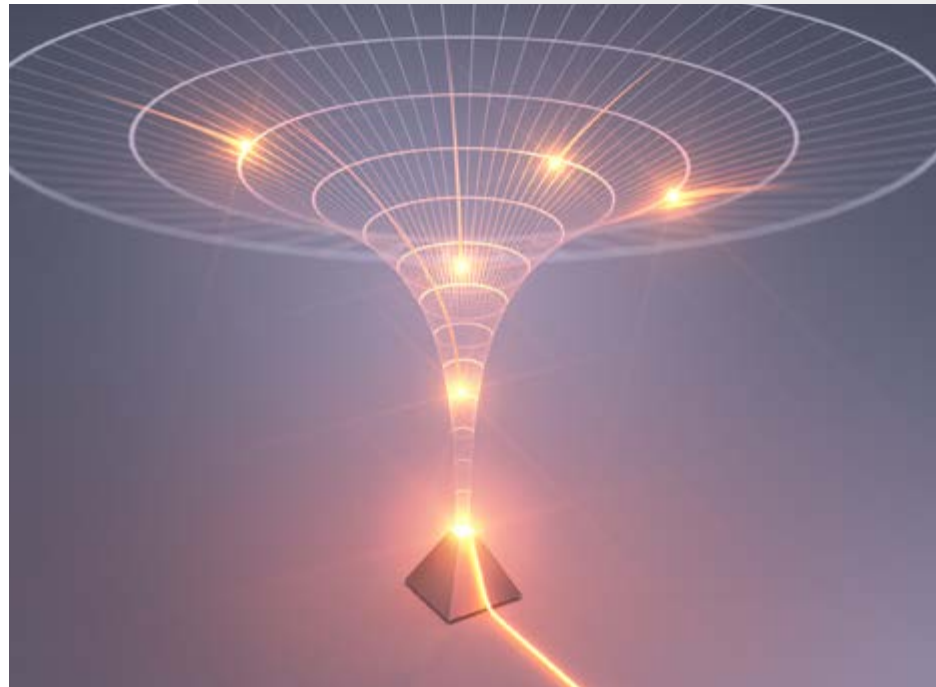
Sensible Detektoren: Das Ziel hinter dem Lichttrichter-Projekt ist die Entwicklung optischer Detektoren mit hoher Empfindlichkeit. Denn die Sammlung der Lichtsignale durch den Lichttrichter kann die Sensitivität solcher Systeme enorm verbessern und so neue optische Anwendungen ermöglichen. Der Lichttrichter ist aber nur ein Beispiel für die zahlreichen Ideen, die im Rahmen des Exzellenzclusters entstehen, um topologische Zustände in der Optik umzusetzen und in Zukunft technologisch nutzbar machen zu können. Dafür werden Synergien genutzt und zum Beispiel **ct.qmat**-Doktoranden an den verschiedenen Standorten der Kooperationspartner eingebunden.

Sensitive detectors: The goal behind the light funnel project is to develop ultrasensitive optical detectors. When a light funnel concentrates light signals, this greatly increases the sensitivity of such systems and enables new optical applications. Yet the light funnel is just one example of the many ideas being generated at **ct.qmat** to implement topological states in optics which might one day be harnessed for technological applications. The synergies exploited to achieve this aim include involving PhD students into the work at other institutions collaborating with **ct.qmat**.



Paper highlight

Topological funneling of light,
Science (2020).



Skin-Effekt Skin effect

... beschreibt eine Eigenschaft von Wechselströmen, die im Zusammenhang mit hoher Leitfähigkeit steht. Bei diesem Effekt werden die Ladungsträger nur nahe der Oberfläche eines Leiters transportiert.

... describes a property of alternating currents that's associated with high conductivity. The charge carriers are transported only near the surface of a conductor.



Dissipativ Dissipative

... ist ein physikalisches System, wenn ihm ständig Energie verloren geht, zum Beispiel durch Reibung oder ohmsche Verluste.

... is the term used for a physical system which is continuously losing energy, for example due to friction or ohmic losses.



2 Köpfe Heads

ct.qmat-Professuren:
Magnet für Exzellenz _____

ct.qmat professorships:
A magnet for excellence

Leuchtende Quasiteilchen für Quantentechnologie

Luminous quasiparticles for quantum technology

In superdünnen Kristallen erscheinen die rätselhaften Quasiteilchen besonders robust, wechselwirken stark miteinander und können durch hohe elektrische und magnetische Felder präzise gesteuert werden. Chernikovs Ziel ist, diese exotischen Teilchen zu verstehen und deren Bewegung zu beeinflussen. Dafür nimmt er sie mit speziellen Mikroskopen in Echtzeit wie ein Video auf. Seine Technik erfasst den Billionsten Teil einer Sekunde, eine Pikosekunde. Denn so ultraschnell bewegen sich die Quasiteilchen. Als Werkzeug nutzt der Wissenschaftler Licht: „Wir aktivieren das Material mit ultrakurzen Lichtimpulsen eines starken Lasers und nehmen dann mit superschnellen Detektoren auf, wann das Licht wo und wie ausstrahlt. So erhalten wir Einsicht in die Zusammensetzung der Quasiteilchen, lernen deren Bewegungsmuster kennen und können Rückschlüsse auf die daraus resultierenden →

Alexey Chernikov bringt Licht ins Dunkel der geheimnisvollen Quantenwelt. Mit seiner Forschung geht er der Frage auf den Grund, wie sich quantenmechanische Quasiteilchen in Nanokristallen, die nur wenige Atome dick sind, sichtbar machen lassen.

Ultraschnelle Mikroskopie und Photonik,
Institut für Angewandte Physik, TU Dresden

Alexey Chernikov



In ultrathin crystals, enigmatic quasiparticles appear to be particularly robust. They interact strongly with each other, and can be precisely controlled by powerful electric and magnetic fields. Chernikov intends to understand these exotic particles and influence their motion. Because the quasiparticles move so fast, he films them in real time using special microscopes with a resolution of a picosecond (a trillionth of a second). The other tool he uses is light: “We activate the matter with ultrashort light pulses from a powerful laser, and then use super-fast detectors to record when, where and how light is emitted. This reveals something about the composition →

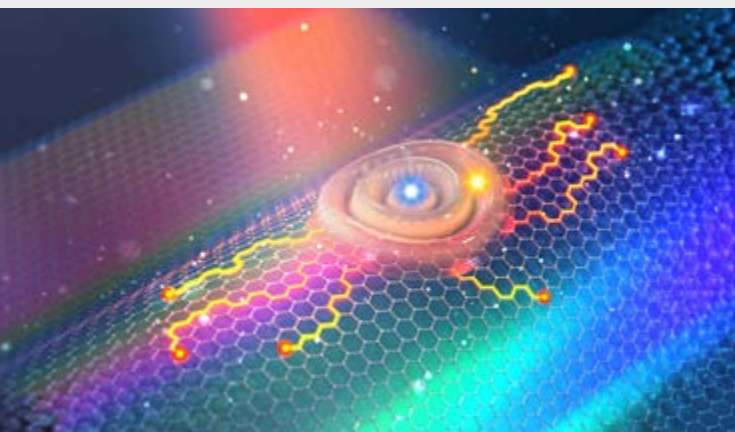
Alexey Chernikov sheds light on the mysterious quantum world. In his research, he studies how quantum mechanical quasiparticles can be exposed in nanocrystals with a thickness of just a few atoms.



Quasiteilchen Quasiparticles

... bestehen aus mehreren Teilchen (zum Beispiel Elektronen), die sich gemeinsam als neues, eigenständiges Objekt verhalten. Sogenannte exzitonische Quasiteilchen können die Aufnahme und Abstrahlung von Licht sowie die Leitung von Strom entscheidend mitbestimmen.

... consist of several particles (e.g., electrons) that behave together as a new, independent object. Excitonic quasiparticles can play a key role in determining the absorption and emission of light as well as the conduction of electricity.



#Ungewöhnlich:

ct.qmat-Forscher weist experimentell nach, dass sich elektronische Quasiteilchen gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen bewegen können.

#Moving in unusual ways:

It's been shown in experiments at ct.qmat that electronic quasiparticles can simultaneously move in opposite directions.

→ Materialeigenschaften ziehen.“ Dabei hat der Forscher gemeinsam mit seinem Team bei den leuchtenden Teilchen unter ultratiefen Temperaturen ein spektakuläres Quantenphänomen beobachtet, das in der Fachwelt für Aufmerksamkeit sorgte: Das Verhalten elektronischer Quasiteilchen, der Exzitonen, in den atomardünnen Halbleitern lässt sich nur durch gleichzeitige Bewegung in entgegengesetzte Richtungen, also einen Überlagerungszustand, erklären. Dieses in zeitaufgelösten Aufnahmen von Licht sichtbare Phänomen verspricht neue Möglichkeiten für den Transport und die Speicherung von Informationen. „Wir möchten die Kontrolle über diese Erscheinungen bekommen. Unsere Forschung könnte Basis für eine neue Technologiegeneration und damit der Schritt von der Elektronik zur Quantentechnologie sein“, so Chernikov, der seit 2021 eine Cluster-Professur innehat. Der Emmy Noether-Stipendiat von 2016 und Heinz Maier-Leibnitz-Preisträger 2018 erhielt vom Europäischen Forschungsrat (ERC) 2021 einen ERC Consolidator Grant für die Erprobung neuartiger Wege zur Kontrolle von Quantenzuständen in Nanostrukturen.

Über einen Nanodraht wird eine atomar-dünne Materialschicht gespannt. Dabei entsteht ein Energiekanal für elektronische Quasiteilchen. Sie werden durch Laserlicht angeregt und bewegen sich entlang des Kanals.

An ultrathin layer of material only a few atoms thick is stretched over a nanowire, creating an energy channel for electronic quasiparticles. They're excited by laser light and move along the channel.

→ of quasiparticles. By learning about their patterns of motion, we can draw conclusions regarding the material's properties.” Together with his team, Chernikov observed a spectacular quantum phenomenon in the luminous particles at ultralow temperatures that surprised the community. The behavior of the electronic quasiparticles, called excitons, in thin semiconductors merely a few atoms thick could only be explained by simultaneous motion in opposite directions, i.e., a state of superposition. This phenomenon visible in time-resolved images of light holds out the prospect of new types of information transmission and storage. “We plan to be able to control these phenomena. Our research could form the basis for a new generation of technology by enabling the leap from electronics to quantum technology,” says Chernikov, who has held a ct.qmat professorship since 2021. Already an Emmy Noether Fellow in 2016 and the winner of the Heinz Maier-Leibnitz Prize in 2018, Chernikov was awarded an ERC Consolidator Grant by the European Research Council in 2021 to explore new ways of controlling quantum states in nanostructures.



Tiefemperaturphysik komplexer
Elektronensysteme, Institut für Festkörper-
und Materialphysik, TU Dresden

Elena Hassinger

Wenn im Labor Eiszeit herrscht, treten die unerwarteten Eigenschaften zutage, nach denen Hassinger sucht. Bis 0,01 Kelvin ($-273,14\text{ }^{\circ}\text{C}$) kühlt sie ihre Materialproben herunter. 2021 ist es der Expertin für Tiefemperaturphysik und ihren Kolleg:innen gelungen, den unkonventionellen Supraleiter CeRh_2As_2 zu entdecken. Ein Quantenmaterial, das zwei supraleitende Zustände aufweist. Üblich ist sonst nur eine supraleitende Phase. Seit Jahrzehnten gehört die verlustfreie Stromleitung zu den Top-Themen in der Festkörperphysik. „Inzwischen sind die unkonventionellen Supraleiter in den Fokus gerückt, weil sie die besten Kandidaten für eine Supraleitung bei Raumtemperatur sind“, erklärt Hassinger. „Durch meine Arbeit möchte ich den Mechanismus besser verstehen, der für die Supraleitung in diesen Stoffen verantwortlich ist.“ Bei CeRh_2As_2 tritt dieses Phänomen unterhalb von 0,25 Kelvin ($-272,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) auf und ist selbst bei Anlegen eines sehr starken Magnetfelds äußerst robust – was neu ist. „Die zweite supraleitende Phase in der CeRh_2As_2 -Verbindung hält ein sehr starkes →

Der Supraleitung
auf der Spur _____

*In pursuit of
superconductivity*

Elena Hassinger will die Rätsel der Supraleitung entschlüsseln. Unter Extrembedingungen wie sehr tiefen Temperaturen, superstarken Magnetfeldern und hohem Druck entlocken die Forscherin und ihr Team neuen Materialien wie Cer-Rhodium-Arsen (CeRh_2As_2) ihre besonderen Phänomene.

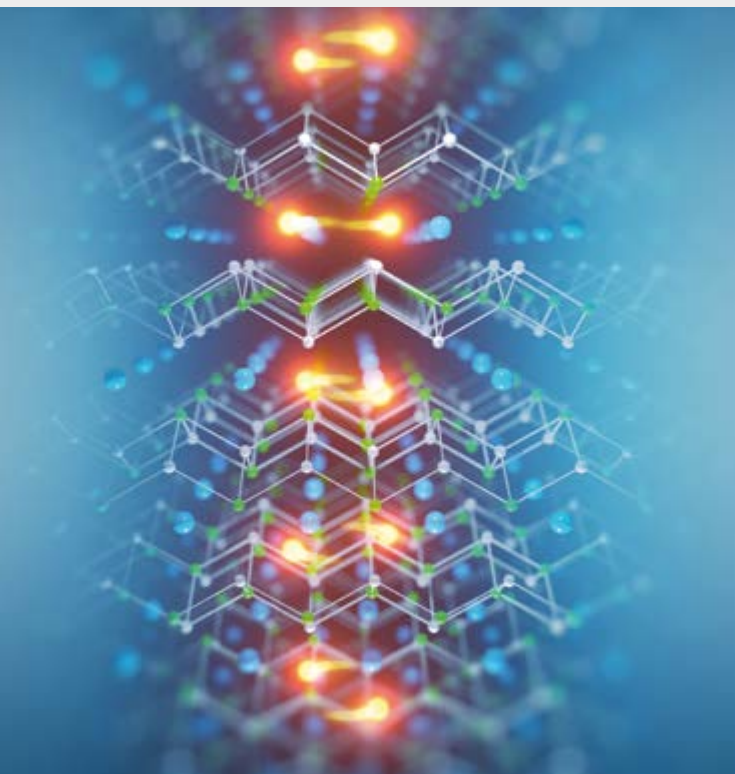
Elena Hassinger is determined to unravel the mysteries of superconductivity. She and her team elicit special phenomena from cerium rhodium arsenic (CeRh_2As_2) and other new materials under conditions such as very low temperatures, super-strong magnetic fields, and high pressure.

Only when it's absolutely freezing in her lab do the unexpected properties sought by Hassinger, a low-temperature physicist, come to light – for she cools samples down to 0.01 Kelvin ($-273.14\text{ }^{\circ}\text{C}$). In 2021, she and her colleagues discovered the unconventional superconductor CeRh_2As_2 – a quantum material with two superconducting states (just one is normally the rule). For decades, lossless current conduction has been one of the foremost topics in solid-state physics. “Unconventional superconductors have now come into focus because they're the best candidates for superconductivity at →

i
Cooper-Paare
Cooper pairs

... entstehen bei sehr tiefen Temperaturen aus jeweils zwei Elektronen und sind eine Voraussetzung für Supraleitung. Sie können im Kollektiv einen Quantenzustand bilden und sich widerstandsfrei durch den Supraleiter bewegen. Namensgeber ist der US-amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Leon Cooper.

... are formed at very low temperatures from two electrons and are a requirement for the occurrence of superconductivity. Collectively, they can form a quantum state and move through the superconductor without resistance. Cooper pairs are named after the US physicist and Nobel Prize laureate Leon Cooper.



Im Kristall des Quantenmaterials Cer-Rhodium-Arsen befinden sich Cooper-Paare (gelb).

Cooper pairs (yellow) can be seen in the crystal of the quantum material cerium rhodium arsenic.

#Unkonventionell:
ct.qmat-Wissenschaftlerin erforscht die genaue Funktionsweise unkonventioneller Supraleiter.

→ Magnetfeld aus, bevor sich der verlustfreie Stromtransport verliert. Dies kann man anhand der besonderen Kristallstruktur erklären“, so Hassinger. „Zunächst untersuchen wir solche Phänomene ganz grundsätzlich. Die gewonnenen Erkenntnisse helfen dann, supraleitende Materialien für technische Anwendungen zu entwickeln.“ Dresden bietet ihr dafür das beste Umfeld: „Hier ist die Welthauptstadt der Festkörperphysik!“, sagt die Wissenschaftlerin, Mitglied im Grete-Hermann-Netzwerk (S. 64), Max Planck Fellow und seit September 2022 Cluster-Professorin. Zu den Meilensteinen ihrer Karriere zählen die Leitung einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden ab 2014 und von 2016 bis 2022 eine Tenure-Track-Professur an der Technischen Universität München.

#Unconventional:
Non-conformist conductors: Establishing exactly how unconventional superconductors work under extreme conditions.

→ room temperature,” explains Hassinger. “Through my work, I hope to improve our understanding of the mechanism responsible for superconductivity in these materials.” In the compound CeRh_2As_2 , superconductivity occurs below 0.25 Kelvin (-272.9°C), and is extremely robust even when a very strong magnetic field is applied – that’s something new. “The second superconducting phase in CeRh_2As_2 withstands a very strong magnetic field before current transmission is no longer lossless. This can be attributed to its special crystal structure,” says Hassinger. “When investigating phenomena like this, we start with the fundamentals. The findings gained aid the development of superconducting materials for technical applications.” Dresden offers her the best environment for this, for as she puts it: “This is the world capital of solid-state physics!” Elena Hassinger is a member of the Grete Hermann Network (p. 64), a Max Planck Fellow, and has been a professor at ct.qmat since September 2022. Milestones in her career include heading a research group at the Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden since 2014 and a tenure-track professorship at TU München from 2016 to 2022.

Forschen mit Licht und Materie

Research with light and matter

Sebastian Klembt arbeitet daran, den Datenaustausch zu revolutionieren. Denn während digitale Informationen bisher durch träge fließende Elektronen in Halbleitern übertragen werden, will er Photonen – also schnelle Lichtteilchen – nutzen.



Licht-Materie-Wechselwirkung
und Topologische Photonik,
Physikalisches Institut, JMU Würzburg

Sebastian Klembt

Das Zusammenspiel von Photonen und Elektronen verspricht außergewöhnliche Funktionalitäten. Deshalb erforscht Klembt die Kopplung von Licht und Materie in 2D-Materialien sowie in elektronischen und photonischen Halbleiternanostrukturen. Im Forschungsbereich „Topologische Photonik“ des Exzellenzclusters (S. 28) spielt er eine tragende Rolle. „Mein Schwerpunkt liegt vor allem darauf, die Konzepte des topologischen Schutzes auf photonische Systeme zu übertragen“, betont der Wissenschaftler, der bereits 2018 an der Entdeckung eines neuartigen

Quantenmaterials beteiligt war: An den Kanten dieses „topologischen Isolators aus Licht und Materie“ bewegen sich Teilchen fort, in denen Photonen und Elektronen eng miteinander verknüpft sind. Mithilfe eines Magnetfelds lässt sich ihre Transportrichtung kontrollieren, →

The interaction of photons and electrons looks set to create extraordinary functionalities. Klembt is therefore investigating what happens when light and matter come together in 2D materials as well as in electronic and photonic semiconductor nanostructures. He plays a leading role in **ct.qmat**'s research area Topological Photonics (p. 28). “My focus is primarily on transferring the concepts of topological protection to photonic systems,” he emphasizes. In 2018, Klembt was involved in the discovery of a →

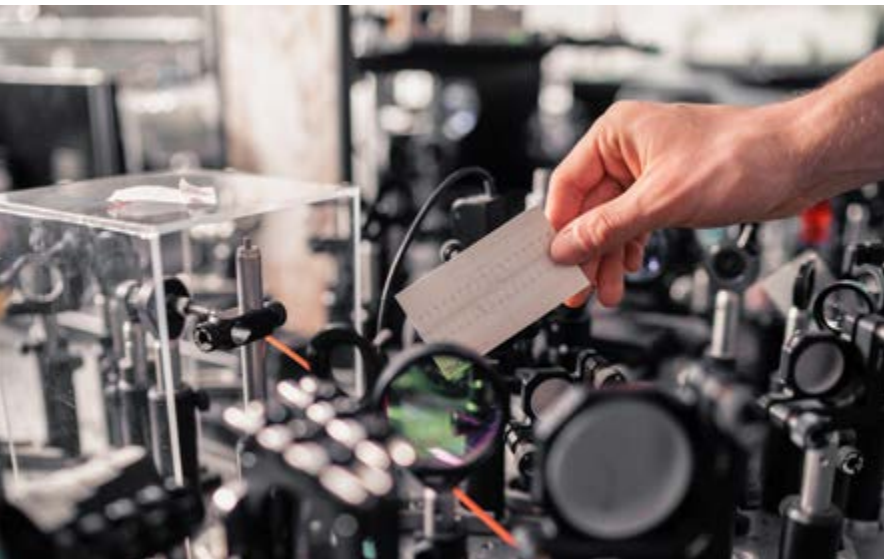
Sebastian Klembt is working on revolutionizing data exchange. But whereas digital information is currently still transmitted by electrons flowing sluggishly in semiconductors, he plans to use photons – very fast light particles.

#Korrelationen:

Ein Forscher des Exzellenzclusters untersucht die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie und sieht Potenzial für lichtgesteuerte Quantencomputer.

#Correlations:

A ct.qmat researcher investigating the interaction between light and matter sees potential for light-controlled quantum computers.



Ganz genau beobachtet wird im Würzburger Photonik-Labor.

The photonics laboratory in Würzburg is the scene of precise observation.

→ was bei reinen Lichtteilchen nicht so einfach möglich ist. Das ist ein Ansatz, den Klemmt und sein Team weiterentwickeln, denn er könnte sowohl für schaltbare elektronische Systeme als auch für Laseranwendungen geeignet sein. „Seitdem haben wir die symbiotische Verbindung von Licht und Materie auf viele andere physikalische Systeme übertragen und kooperieren dafür eng mit internationalen Forschungsgruppen. In diesem schnellen Kontakt zu führenden Köpfen – ob in Würzburg, Dresden oder weltweit – liegt für mich eine Besonderheit des Clusters“, sagt Klemmt, der sicher ist „dass wir in den nächsten Jahren einzigartige Eigenschaften und neue Quantenphänomene entdecken sowie Fortschritte bei der technologischen Umsetzung machen werden.“ Seit November 2020 hat er die erste Tenure-Track-Juniorprofessur des Clusters inne und leitet dessen erste Nachwuchsgruppe.

→ new type of quantum matter. Particles in which photons and electrons are closely linked together move along the edges of this “topological insulator comprising light and matter.” By using a magnetic field, their direction of travel can be controlled – something which is much trickier with pure light particles. Klemmt and his team are continuing to work on this approach as it could be suitable for both switchable electronic systems and laser applications. “Since then, we’ve applied the symbiotic link between light and matter to many other physical systems. To this end, we’re collaborating with international research groups. This rapid contact with leading minds – whether in Würzburg, Dresden or worldwide – is an outstanding feature of the cluster,” says Klemmt. And he’s certain that “we’ll discover unique properties and new quantum phenomena, and also make advances in technological implementation in the coming years.” Sebastian Klemmt has held the cluster’s first tenure-track junior professorship since November 2020 and heads its first junior research group.

Fokus Quantenoptik

Focus on quantum optics

Adriana Pálffy-Buß nutzt extrem kurzwellige Röntgenstrahlung statt sichtbarem Licht, um winzigste Teilchen zu erforschen. Die Wechselwirkung von Röntgenquanten mit Atomkernen soll der Materialforschung ganz neue Optionen eröffnen.

Instead of visible light, Adriana Pálffy-Buß uses extremely short-wavelength X-rays to study the tiniest particles. The interaction between X-ray quanta and atomic nuclei is expected to open up completely new options for materials research.

Theoretische Quanteninformation und
Quantenoptik, Institut für Theoretische
Physik und Astrophysik, JMU Würzburg

Adriana Pálffy-Buß



Als Expertin auf dem jungen Forschungsfeld der Röntgenquantenoptik schreibt Pálffy-Buß im Rahmen von **ct.qmat** die Würzburger Röntgentradition in eine neue Quantenrichtung fort. Ihre quantenphysikalische Grundlagenforschung könnte zum Beispiel zur Entwicklung neuer Anwendungen wie Röntgen-Lasern beitragen. Sie entwickelte theoretische Modelle für die Wechselwirkung von Licht und Materie, die Röntgenstrahlung bzw. Röntgenphotonen anstelle des Laserlichts in den Mittelpunkt stellen. Denn um das Verhalten und die Struktur von Atomkernen zu erforschen, braucht es hochenergetische Lichtteilchen. Während die Elektronen der Atomhülle durch optisches Laserlicht angeregt werden, sind zur Anregung von Atomkernen Röntgenphotonen mit bis zu 150.000-fach größerer Energie notwendig. →

Being an expert in the young research field of X-ray quantum optics, Pálffy-Buß is continuing Würzburg's X-ray heritage in a new quantum direction at **ct.qmat**. Her basic research in quantum physics could, for example, contribute to the development of new applications such as X-ray lasers. She's developed theoretical models for the interaction of light and matter that focus on X-rays and X-ray photons instead of laser light – because high-energy light particles are required to study the behavior and structure of atomic nuclei. Although the electrons of the atomic shell can be excited with optical laser light, X-ray photons with up to 150,000 times greater energy are needed to excite atomic nuclei. Pálffy-Buß and her team are working on X-ray optical components in which, for example, the sensitivity of the scattering of →



Wilhelm Conrad Röntgen

... entdeckte 1895 am Physikalischen Institut der Universität Würzburg bei Versuchen mit Elektronenstrahlen in Vakuumröhren die „X-Strahlen“, heute als Röntgenstrahlung bekannt. Dafür erhielt er 1901 den ersten Nobelpreis für Physik.

... discovered X-rays in 1895 at the Physikalisches Institut of Universität Würzburg while experimenting with electron beams in vacuum tubes. For this he received the first Nobel Prize in Physics in 1901.

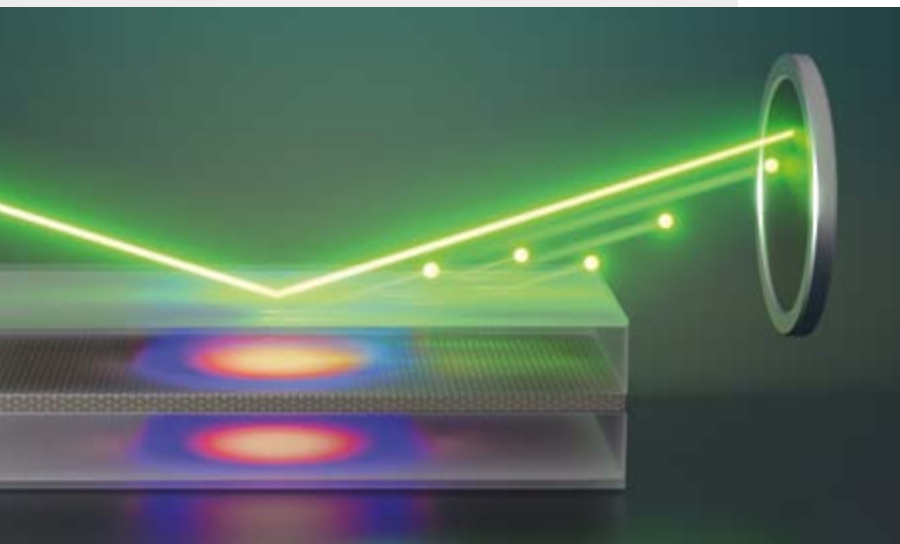
#The X factor:

Investigating effects in the atomic nucleus caused by interaction with X-rays.

#Zusammenspiel:

Wissenschaftlerin des Exzellenzclusters untersucht Effekte, die sich im Atomkern durch die Wechselwirkung mit Röntgenstrahlen ergeben.

→ Pálffy-Buß und ihr Team arbeiten an röntgenoptischen Bauelementen, in denen zum Beispiel eine erhöhte Sensitivität der Streuung von Röntgenphotonen durch Ankopplung an die Atomkerne der verwendeten Materialien auftritt. „Würzburg ist nicht nur die Heimat der Röntgenstrahlung, sondern durch das Exzellenzcluster auch eine unglaublich spannende Forschungsumgebung für die Quantenphysik. Ich freue mich sehr, davon profitieren zu dürfen“, erklärt die Röntgenphysikerin, die 2022 auf eine Cluster-Professur berufen wurde und den Bereich Photonik verstärkt. Direkt zuvor war Pálffy-Buß im Rahmen einer Heisenberg-Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Erlangen-Nürnberg tätig. Für ihre theoretischen Modelle zur Röntgenquantenoptik erhielt sie 2019 den Röntgen-Preis der Justus-Liebig-Universität Gießen und den Hertha-Sponer-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Ihre theoretischen Überlegungen zur „starken Kopplung“ von Röntgenstrahlen und Atomkernen wurden experimentell bestätigt.



→ X-ray photons is increased by coupling them to the atomic nuclei of the matter used. “As well as being the home of X-rays, Würzburg is also an incredibly exciting research environment for quantum physics thanks to **ct.qmat**. I’m very pleased to be able to benefit from this,” explains Pálffy-Buß, who was appointed to a cluster professorship in 2022 and is strengthening the field of photonics in Würzburg. Prior to this, Pálffy-Buß worked at Universität Erlangen-Nürnberg with funding from a Heisenberg grant awarded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft. In 2019, she received the Röntgen Prize from the Justus-Liebig-Universität Gießen and the Hertha Sponer Award

from the Deutsche Physikalische Gesellschaft for her theoretical models of X-ray quantum optics. Her theoretical considerations regarding the “strong coupling” of X-rays and atomic nuclei have been confirmed experimentally.

Röntgenstrahlen werden von einem Quantenmaterial reflektiert.

X-rays are reflected by a quantum material.



3 Preise
Awards

Ausgezeichnete Wissenschaft,
herausragende Persönlichkeiten _____

Award-winning science,
outstanding scientists



Max-Born-Preis
Max Born Prize
2022

Bahnbrechende Beiträge

Pioneering contributions



Max-Planck-Institut für Chemische Physik
Fester Stoffe Dresden

Claudia Felser

ct.qmat-Gründungsmitglied Claudia Felser hat für ihre „bahnbrechenden Beiträge auf den Gebieten von magnetischer und chiraler Topologie, in Vorhersagen, Einkristallzüchtung und experimentellen Beobachtungen“ den Max-Born-Preis 2022 erhalten. Die Festkörperchemikerin gehört zu den weltweit außergewöhnlich oft zitierten Forschenden. Sie ist führend in Design und Entdeckung neuer anorganischer Verbindungen, speziell topologischer Quantenmaterialien. Mit ihrer Arbeit an der Grenze zwischen Chemie und Physik prägt sie die Forschung im Exzellenzcluster.

„Gemeinsam suchen wir nach neuen Konzepten für topologische Materialien“, so Felser. Der nach dem Nobelpreisträger Max Born benannte Preis wird vom britischen Institute of Physics und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft seit 1973 für besonders wertvolle und aktuelle wissenschaftliche Beiträge zur Physik verliehen. Felser ist erst die dritte Wissenschaftlerin, die ihn erhalten hat. 2022 wurde sie zudem mit der Liebig-Denkmünze der Gesellschaft Deutscher Chemiker sowie der Wilhelm-Ostwald-Medaille der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig ausgezeichnet.

Claudia Felser, a founding member of **ct.qmat**, received the 2022 Max Born Prize for her seminal contributions to the fields of magnetic and chiral topology, in prediction, single crystal growth, and experimental observations. A solid-state chemist, she is one of the world's most frequently cited researchers. She's a pioneer in the design and discovery of new inorganic com-

pounds, specifically topological quantum materials. Research at **ct.qmat** is shaped by her work at the frontier between chemistry and physics. "We work together to seek new concepts for topological materials," says Felser. The prize, named after Nobel laureate Max Born, has been awarded by the British Institute of Physics and the Deutsche Physikalische Gesellschaft

since 1973 for particularly valuable and current scientific contributions to physics – and Felser is only the third female winner. In 2022, she was also awarded the Liebig Medal by the Gesellschaft Deutscher Chemiker and the Wilhelm Ostwald Medal by the Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig.



*Europäischer Erfinderpreis
European Inventor Award
2021*

„Neugier und Geduld“ — “Curiosity and patience”

Miterfinder von rund 60 Patentfamilien, viele erfolgreiche Ausgründungen und wegweisende Beiträge zur Weiterentwicklung organischer Halbleiter: Karl Leo wurde mit dem Europäischen Erfinderpreis 2021 des Europäischen Patentamts – einem der renommiertesten Innovationspreise Europas – in der Kategorie „Lebenswerk“ geehrt. Leitmotiv des Physikers: „Neugier und Geduld. Aus jedem Rückschlag kann man lernen!“ Der Ausnahmewissenschaftler gehört zu den Gründungsmitgliedern von **ct.qmat**, wo er vor allem die topologische Photonik auf Halbleiterbasis erforscht. „Durch seine vielen exzellenten Arbeitsgruppen bietet **ct.qmat** eine herausragende Basis für produktive Zusammenarbeit, sowohl im Experiment als auch in der Theorie“, erklärt Leo. Im

Exzellenzcluster erwartet er völlig neue Möglichkeiten, die sich durch topologische Effekte im Bereich der Photonik ergeben, darunter die elegante Steuerung der Lichtausbreitung, die verlustfreie Übertragung und vieles mehr. Zu seinen 22 Auszeichnungen zählt neben dem Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten 2011 auch der bedeutendste deutsche Forschungspreis, der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Leo erhielt ihn 2002 für seine bahnbrechende Arbeit zu organischen Halbleitern und Bloch-Oszillationen.



Institut für Angewandte Physik, TU Dresden

Karl Leo

Karl Leo was presented with the European Patent Office’s 2021 European Inventor Award – one of Europe’s most prestigious prizes for innovation – in the Lifetime Achievement category. Leo is the co-inventor of around 60 patent families and the man behind many successful spin-offs and pioneering contributions to the further development of organic semiconductors. His maxim is: “Curiosity and patience. You can learn from every setback!” This exceptional

scientist is one of the founding members of **ct.qmat**, where he primarily works on semiconductor-based topological photonics. “With its many excellent research groups, **ct.qmat** provides an outstanding framework for productive collaboration in both experimental and theoretical work,” explains Leo. At **ct.qmat**, he foresees the emergence of numerous, entirely new possibilities from topological effects in the field of photonics,

including the elegant control of light propagation and lossless transmission. His 22 awards to date include the 2011 German Future Prize conferred by the President of Germany, and also Germany’s most prestigious research award – the Gottfried Wilhelm Leibniz Prize by the Deutsche Forschungsgemeinschaft – which Leo received in 2002 for his trailblazing work on organic semiconductors and Bloch oscillations.



Heinz Maier-Leibnitz-Preis
Heinz Maier-Leibnitz Prize
2022

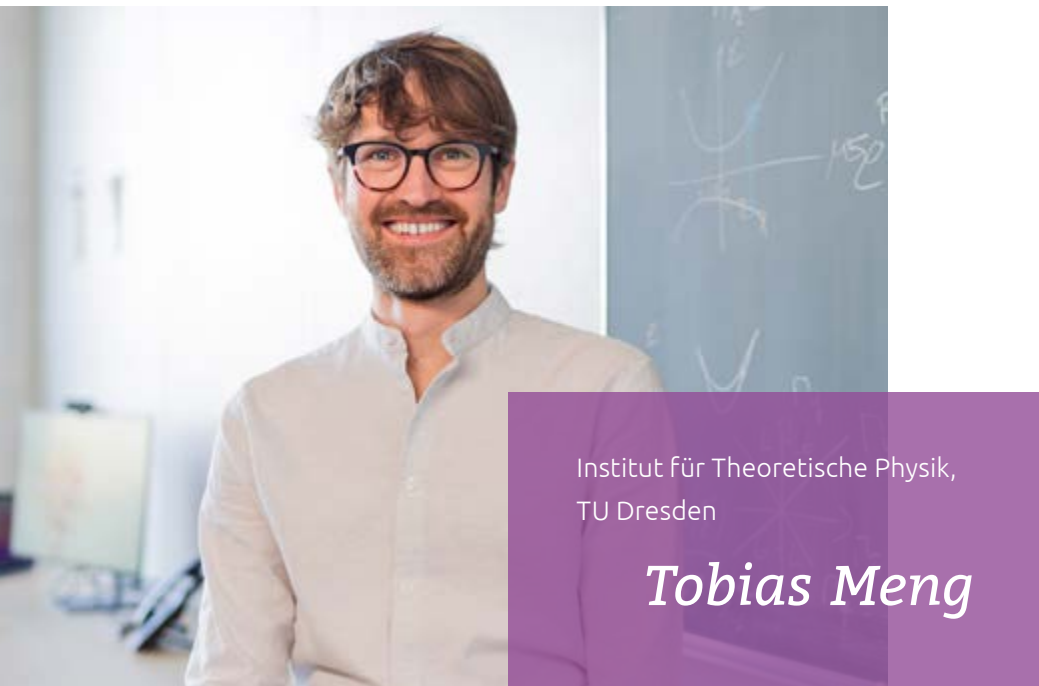
Erforschung sozialer Teilchen — Exploring social particles

Mit theoretischer Festkörperphysik an die Spitze: Für seine außergewöhnlichen Arbeiten zu „Phänomenen der topologischen Physik und dem Verhalten topologischer Quantenmaterialien“ wurde der **ct.qmat**-Forscher Tobias Meng von der Deutschen Forschungsgemein-

schaft und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Heinz Maier-Leibnitz-Preis 2022 gewürdigt. Der seit 1977 vergebene Preis gilt als bedeutendste Auszeichnung für den wissenschaftlichen Nachwuchs in Deutschland. Meng leitet in

Dresden eine Emmy Noether-Gruppe zum Thema Quantum Design. Bei seinen Forschungen taucht er tief in die faszinierende Welt der Elektronen ein und kombiniert die winzigen Teilchen neu. „Elektronen sind soziale Wesen, wechselwirken miteinander. Ich untersuche, wozu wir dieses Sozialverhalten nutzen können“, so Meng, der ein breites methodisches Spektrum nutzt und sich unter anderem mit Supraleitung, Quantenmaterialien sowie -computing befasst. Gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen des Exzellenzclusters entwirft er neuartige Materialien, die als Werkstoffe für revolutionäre, energiesparende Quantentechnologien dienen können. „Der Austausch im Cluster sowie das Zusammenspiel von Theorie und Experiment sind enorm wichtig, um dabei schneller voranzukommen.“

delves deep into the fascinating world of electrons and recombines the tiny particles. “Electrons are social creatures that interact with each other. I’m exploring how we can harness this social behavior,” says Meng, who uses a wide range of methods and works on areas such as superconductivity, quantum materials, and quantum computing. Together with colleagues from **ct.qmat**, he designs novel materials that could be used in revolutionary, energy-saving quantum technologies. “Dialogue within the cluster as well as the interaction between theory and experimentation are enormously important to accelerate progress.”



Institut für Theoretische Physik,
TU Dresden

Tobias Meng

For his extraordinary work on phenomena of topological physics and the behavior of topological quantum materials, **ct.qmat** researcher Tobias Meng was awarded the Heinz Maier-Leibnitz Prize in 2022 by the Deutsche Forschungsgemeinschaft and the German Ministry of

Education and Research. The prize has been awarded since 1977 and is considered the most important award for young scientists in Germany. Meng, a theoretical solid-state physicist, heads an Emmy Noether group on quantum design in Dresden. In his research, he



*Ugo-Fano-Preis
Ugo Fano Prize
2019*

Pionier für topologische Isolatoren

*Pioneer of
topological
insulators*

Laurens W. Molenkamp und sein Team gehören zu den weltweiten Schrittmachern einer Materialrevolution. Als ihnen 2007 in Würzburg der erste experimentelle Nachweis eines topologischen Isolators gelang, begann ein globaler Boom, der bis heute anhält. Für seine Spitzenforschung erhielt Molenkamp zahlreiche Preise. So wurde das **ct.qmat**-Gründungsmitglied 2019 mit der Ugo-Fano-Goldmedaille geehrt, weil seine Experimente zum Design von Quantenmaterialien neue Perspektiven für Quantencomputer eröffneten und die Theorien der italienischen

*Laurens W. Molenkamp and his team are among the global pioneers of a materials revolution. Their first experimental demonstration of a topological insulator in Würzburg in 2007 ushered in a global boom that continues to this day. Molenkamp, a founding member of **ct.qmat**, has received numerous awards for his cutting-edge research. In 2019, for example, he was conferred with the Ugo Fano Gold Medal after his experiments on the design of quantum materials opened up new perspectives for quantum computers and confirmed the theories of Italian physicists Ettore Majorana*



Physikalisches Institut, JMU Würzburg

*Laurens W.
Molenkamp*

and Ugo Fano. In 2017, the Deutsche Physikalische Gesellschaft honored Molenkamp's work with the Stern-Gerlach Medal, its highest award for experimental physics. He also received the Gottfried Wilhelm Leibniz Prize in 2014, the Oliver E. Buckley Prize from the American Physical Society in 2012, and the Europhysics Prize from the

Physiker Ettore Majorana und Ugo Fano bestätigten. 2017 würdigte die Deutsche Physikalische Gesellschaft Molenkamps Arbeit mit der Stern-Gerlach-Medaille, ihrer höchsten Auszeichnung für experimentelle Physik. 2014 bekam er den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis, 2012 den Oliver E. Buckley Prize der American Physical Society sowie 2010 den Europhysics Prize der European Physical Society. Als einer der Väter der Halbleiter-Spintronik ist Molenkamp richtungweisend für die Entwicklung des Exzellenzclusters: „Wir haben eine hervorragende Infrastruktur. Mit unseren Entdeckungen wollen wir die Grundlagen für faszinierende Quantentechnologien schaffen und für leistungsfähige, stromsparende Chips.“

European Physical Society in 2010. As one of the fathers of semiconductor spintronics, Molenkamp is spearheading **ct.qmat**'s development: “We have an excellent infrastructure. By means of our discoveries, we intend to lay the foundations for fascinating quantum technologies and high-performance, power-saving chips.”



Raymond and Beverly Sackler
International Prize
2020

Anerkennung für topolektrische Schaltkreise

Acclaim for topolectrical circuits

Seine Arbeiten an topologischen elektrischen – „topolektrischen“ – Schaltkreisen haben dem Würzburger Physiker Ronny Thomale den Sackler Prize 2020 eingebracht. Die vom **ct.qmat**-Gründungsmitglied Thomale realisierten Stromkreisnetzwerke bilden die Grundlage für die Simulation neuer Materialien mit speziellen topologischen Eigenschaften, die viele technische Anwendungen revolutionieren könnten. Der alle zwei Jahre von einem internationalen Komitee vergebene Preis würdigt herausragende junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter 45 Jahren, die bereits einzigartige Beiträge geleistet haben und zu den weltweit führenden Vertretern ihres Gebiets gehören. „Durch meine Forschungen im Exzellenzcluster lassen sich topologische Phänomene schneller, günstiger und flexibler untersuchen“, so Thomale. „Mein Ziel ist, neue Quantenzustände von Materie vorherzusagen, mögliche Materialkandidaten zu identifizieren und diese mithilfe experimenteller Untersuchungen besser zu verstehen. Die topolektrischen Schaltkreise sind dabei eine Art Simulator

Institut für Theoretische Physik
und Astrophysik, JMU Würzburg

Ronny Thomale

für Ideen, aus denen sich in Zukunft auch außergewöhnliche neue Anwendungen in der Optik ergeben können – zum Beispiel energieeffiziente lichtgesteuerte Computer.“ Für seine Forschungsleistungen erhielt Thomale zudem den Karl-Heinz Hoffmann-Preis 2022 der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Ronny Thomale's work on "topolectrical" (topological electrical) circuits earned him the 2020 Sackler Prize. Thomale is a Würzburg physicist and **ct.qmat** founding member, whose circuits form the basis for the simulation of new materials with special topological properties that could revolutionize many technical applications. The prize is awarded by an international committee every



two years to outstanding scientists aged under 45 who've already made unique contributions and are among the world leaders in their field. "As a result of my research at **ct.qmat**, topological phenomena can be studied faster, cheaper, and more flexibly," explains Thomale. "My goal is to predict new quantum states of matter, identify potential material candidates, and better understand them with the help of experimental investigations. Topolectrical circuits are a kind of simulator for ideas that might in future also lead to extraordinary new applications in optics, such as energy-efficient, light-controlled computers."

Thomale was also awarded the 2022 Karl-Heinz Hoffmann Prize by the Bayerische Akademie der Wissenschaften for his research success.

4 **Eine neue Wissenschaftsgeneration** **Early career scientists**

Schneller vorankommen mit individueller
und strukturierter Betreuung _____

Faster headway thanks to
individual and structured support

Quantum Matter Academy & Hallwachs-Röntgen Postdoc Program

*Die Quantum Matter Academy (QMA) bietet dem Wissenschaftsnachwuchs bundeslandübergreifend clusterbezogene Lehre und Betreuung. Matthias Bode, im **ct.qmat**-Vorstand zuständig für die QMA, zur Philosophie hinter dem Programm.*

*The Quantum Matter Academy (QMA) offers early career scientists cluster-based teaching and support in two German cities. Matthias Bode, who's responsible for the QMA on the **ct.qmat** Steering Committee, talks about the philosophy behind the program.*

Zukunft sichern _____ Safeguarding the future

Wie würden Sie das zentrale Anliegen der QMA umreißen?

Bode: Das reicht von der professionellen institutionellen Betreuung bei der wissenschaftlichen Arbeit und Starthilfe auf dem Karriereweg – auch durch die Vermittlung von Softskills wie Business-Etikette oder Teamfähigkeit – bis zur „Sorgenkiste“, wenn es nicht wie gewünscht läuft. Kurz: Wir kümmern uns! Wir haben zum Beispiel ein Qualitätsmanagement installiert, damit Promotionen im Zeitrahmen bleiben. Gewählte QMA-Repräsentant:innen vertreten die Interessen der jungen Leute in den Cluster-Gremien.

What are the main areas addressed by the QMA?

Bode: They range from professional institutional support for research and assistance when people commence their careers – including teaching soft skills such as business etiquette and teamwork – to providing advice when things don't go as planned. In a nutshell, we lend a helping hand! For example, we've set up a quality management system to keep PhD students on schedule. And elected QMA representatives promote young people's interests on the cluster committees.

Warum ist das so wichtig?

Bode: Wenn wir uns nicht um den akademischen Nachwuchs kümmern, ist die wissenschaftliche Landschaft in 20 Jahren verarmt. Weil etwa die Hälfte unserer Absolvent:innen in die Industrie geht, betrifft dies ebenso die wirtschaftliche Entwicklung.

Welche Highlights gab es bisher in der QMA-Arbeit?

Bode: Unsere Klausurtagungen 2019 in Meißen, 2021 in Erfurt – wo auch unsere erste Herbstschule stattfand – und 2022 in Friedrichroda! Diese Netzwerk-Events werden von Doktorand:innen organisiert und dienen dem Wissensaustausch genauso wie dem Teambuilding. Ein weiteres Highlight ist die Unterstützung herausragender wissenschaftlicher Talente durch das Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programm – unser Flaggschiff im Bereich Nachwuchsförderung, das den Postdoktorand:innen exzellente Arbeitsbedingungen an der JMU Würzburg und der TU Dresden bzw. einer der Partnerinstitutionen von **ct.qmat** bietet.

Physikalisches Institut, JMU Würzburg

Matthias Bode

Why's that so important?

Bode: If we don't look after the next generation of academics, in twenty years' time the scientific landscape will be impoverished. And because about half our graduates go into industry, that would also weaken economic development.

What have been the highlights of QMA's work so far?

Bode: Our retreat meetings in 2019 in Meißen, in 2021 in Erfurt – where our first Fall School took place – and in 2022 in Friedrichroda! These networking events are organized by PhD students and are great for both sharing knowledge and team-building. Another highlight is the support for outstanding junior researchers under the Hallwachs-Röntgen Postdoc Program – our flagship program when it comes to fostering young scientists. It provides postdocs with excellent working conditions at the universities in Würzburg and Dresden or at one of **ct.qmat**'s partner institutions.

Matthias Bode untersucht die Oberflächen von Quantenmaterialien mit modernsten Mikroskopiemethoden – und gibt Nachwuchswissenschaftler:innen in der QMA Starthilfe.

Matthias Bode explores the surfaces of quantum materials using state-of-the-art microscopy techniques – and gives a jump-start to young scientists at the QMA

Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programm

Hallwachs-Röntgen Postdoc Program

#Starthilfe:

In der Quantum Matter Academy werden 250 Nachwuchsforscher:innen von ct.qmat auf erfolgreiche Karrieren vorbereitet. Herausragende Postdocs werden durch das Hallwachs-Röntgen-Programm unterstützt.

#Jump-start:

In the Quantum Matter Academy, some 250 young researchers from ct.qmat are being prepared for successful careers – with additional support for Postdocs from the Hallwachs-Röntgen Program.

Dieses Programm richtet sich an erfahrene Postdoktorand:innen, die den Schritt zur selbstständigen Leitung einer Arbeitsgruppe gehen wollen. Gefördert werden durchgehend bis zu vier Postdocs – die Besten ihres Forschungsfelds. Sie erhalten die besondere Möglichkeit, an beiden Standorten Forschung zu betreiben und so eine Brücke zwischen Würzburg und Dresden zu bilden.

This program is aimed at experienced postdocs who are willing to step up and lead a research group by themselves. Up to four postdocs – the best in their fields – are supported throughout. They're given a special opportunity to conduct research in both Würzburg and Dresden and so build a bridge between the two locations.



„Im Zentrum steht Hilfe zur Selbsthilfe“, sagt Kerstin Brankatschk, die als QMA-Koordinatorin den Wissenschaftsnachwuchs des Clusters betreut. „Die jungen Menschen kommen unter anderem aus der Europäischen Union, Indien, dem Iran oder auch Brasilien. In der QMA lernen sie die gesamte Bandbreite der Forschung kennen und entwickeln Gemeinschaftsgeist.“

“The focus is on helping people to help themselves,” explains Kerstin Brankatschk, who as QMA coordinator oversees the cluster’s junior scientists. “Young people come from, say, the European Union, India, Iran and even Brazil. As well as learning about the entire spectrum of research, the QMA also instils in them a sense of community.”

5 Tolle Frauen Great women

Die Quantenphysik braucht
neue Heldinnen! _____

We need new superwomen
in quantum physics!



Grete Hermann

... war eine deutsche Mathematikerin, Physikerin, Philosophin und Pädagogin (1901 – 1984). Sie hat die moderne Quantenphysik mitgeprägt und war ihrer Zeit weit voraus. So sind ihre Arbeiten zu den Grundlagen und der Interpretation der Quantenmechanik aus den 1930er-Jahren bis heute wegweisend.

... was a German mathematician, physicist, philosopher and teacher (1901–1984). Far ahead of her time, she helped shape modern quantum physics. Indeed, her work on the principles and interpretation of quantum mechanics from the 1930s remains groundbreaking to this day.

Grete Hermann Network

Für Vielfalt und Chancengleichheit in der Wissenschaft setzt sich das Grete-Hermann-Netzwerk ein. Die einzigartige internationale Vereinigung von Forscherinnen auf dem Gebiet der Physik kondensierter Materie wurde vom Exzellenzcluster **ct.qmat** ins Leben gerufen. Vorständin und Physikprofessorin Johanna Erdmenger von der JMU Würzburg erklärt, warum die Quantenphysik mehr Frauenpower braucht.

*The Grete Hermann Network is firmly committed to diversity and equal opportunities in science. This unique international association of female researchers in condensed matter physics was launched by **ct.qmat**. Board member and physics professor Johanna Erdmenger from JMU Würzburg explains why quantum physics needs more female influence.*

*Warum braucht die Physik
das Grete-Hermann-Netzwerk?*

Erdmenger: Wir fördern und vernetzen Wissenschaftlerinnen auf allen Karrierestufen, um deren Sichtbarkeit und Bekanntheitsgrad zu erhöhen, was insbesondere für Berufungen auf Professuren wichtig ist. Nicht zuletzt unterstützen die Frauen sich gegenseitig in ihren akademischen Karrieren, unter anderem als Mentorinnen oder in gemeinsam entwickelten Forschungsprojekten.

Was bringt Frauenförderung in den Naturwissenschaften und speziell in der Quantenphysik?

Erdmenger: Frauen bringen die Forschung weiter – auch in der Quantenphysik! Wissenschaft ist Teamwork auf allen Ebenen. Wie viele andere Bereiche der Gesellschaft profitiert sie von Geschlechterdiversität. Doch gerade in der Physik ist der Frauenanteil niedrig, nicht zuletzt auf höheren akademischen Ebenen. →

Institut für Theoretische Physik
und Astrophysik, JMU Würzburg

**Johanna
Erdmenger**

Wissenschaftlerinnen first! Quantenphysik ist auch Frauensache

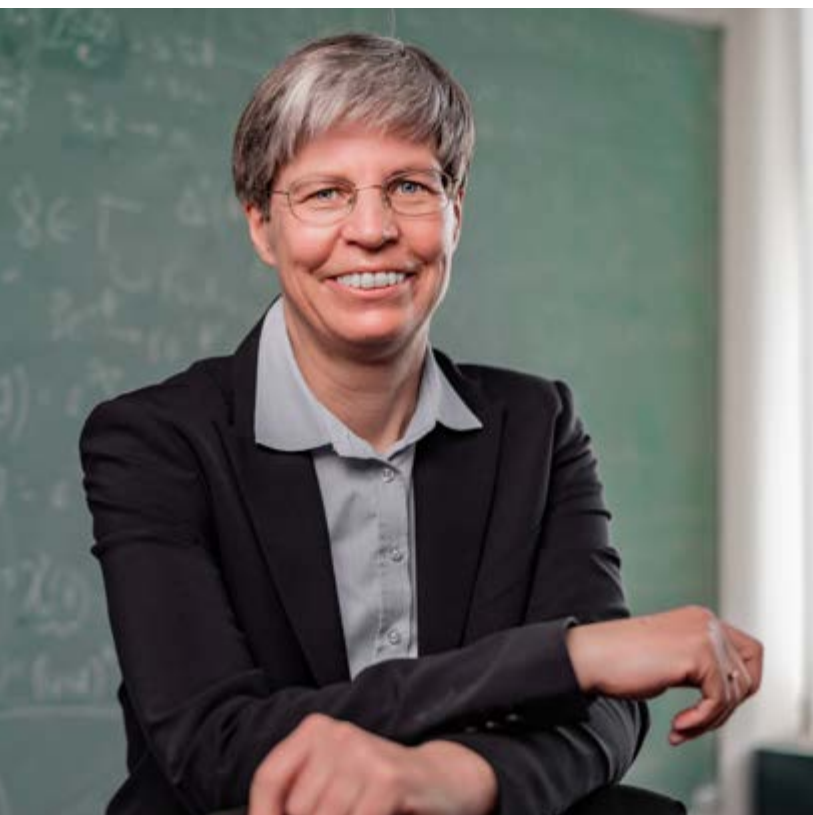
Come on, ladies! Quantum physics isn't just for men

Why does physics need the Grete Hermann Network?

Erdmenger: We support and connect female scientists at all career levels in order to raise their profile – something that's particularly important when it comes to professorial appointments. What's more, the network's members support each other in their academic careers, including as mentors and by working together on joint research projects.

What's the benefit of women's advancement in science, especially quantum physics?

Erdmenger: Women push the research envelope, and that goes for quantum physics, too! Science means teamwork at all levels. And like many other areas of society, it benefits from gender diversity. Sadly, the proportion of females working in physics, especially in senior positions, is low, and as a result a large talent pool is wasted. That's why we need to show girls and young women how many different career paths there are in our field and highlight all the female researchers out there. By spotlighting female role models, we hope more women will choose a career in physics. →



Johanna Erdmenger hat vielbeachtete Forschungsarbeiten zur Physik Schwarzer Löcher und deren überraschende Konsequenzen für das Verständnis von Quantenmaterialien veröffentlicht. Im Grete-Hermann-Netzwerk rückt die Physikprofessorin die wissenschaftliche Kompetenz von Frauen in den Vordergrund.

Johanna Erdmenger has published acclaimed research on the physics of black holes and their surprising consequences for our understanding of quantum materials. She's made women's scientific expertise front and center in the Grete Hermann Network.

#researchHER:

Frauenpower für die Quantenphysik! Das einzigartige Grete-Hermann-Netzwerk verbindet Forscherinnen weltweit. Die Professorinnen, Postdoktorandinnen und Doktorandinnen arbeiten an zukunftsweisenden Fragen der Quantenphysik.

#researchHER:

Superwomen for quantum physics! The unique Grete Hermann Network connects female professors, postdocs and PhD students working on revolutionary aspects of quantum physics.



Alina Markova, Equal Opportunity Coordinator und Administratorin des Grete-Hermann-Netzwerks, will „mehr Sichtbarkeit für Wissenschaftlerinnen, mehr Professorinnen als Vorbilder für junge Frauen, bessere Karrierechancen für weibliche Forschungstalente“ erreichen.

Alina Markova, Equal Opportunity Coordinator and Administrator of the Grete Hermann Network, is determined to bring about “more prominence for female scientists, more female professors as role models for young women, and better career opportunities for female research talent.”

→ Das heißt, ein großer Pool von Talenten bleibt ungenutzt. Deshalb müssen wir den Mädchen und jungen Frauen zeigen, wie viele erfolgreiche Forscherinnen und welche vielfältigen Karrierewege es in unserem Fach gibt. Das schafft weibliche Rollenvorbilder und macht Mut.

Was macht den Weg in die Quantenphysik für Frauen steinig?

Erdmenger: Vor allem fehlen Vorbilder und Netzwerke – schon allein deshalb, weil wir noch viel zu wenige sind. Daher sind zum Beispiel Sprecherinnen auf Fachtagungen und Konferenzen in der Minderzahl. Außerdem fehlt es generell noch an Akzeptanz für Forscherinnen in der Gesellschaft. Mit dem Grete-Hermann-Netzwerk schaffen wir eine internationale Plattform, die Forscherinnen zusammenbringt und zu Wort kommen lässt. Und wir laden unsere männlichen Kollegen ein, bei unseren Fachkolloquien* zuzuhören und mitzudiskutieren. Damit die hochkarätigen Beiträge von Wissenschaftlerinnen präserter und Frauen in der Quantenmechanik künftig zur Normalität werden.

→ *Why do women find it so difficult to break into quantum physics?*

Erdmenger: Mainly because of the lack of models and networks. For one thing, there are still far too few of us, which is why female speakers at symposia and conferences are in the minority. Moreover, there's still a lack of acceptance for female researchers in society. In the Grete Hermann Network, we're creating an international platform that brings women researchers together and lets them have their say. What's more, we invite male colleagues to attend our colloquia.* This boosts awareness of the top-class contributions by female scientists and is paving the way for the equal involvement of women in quantum mechanics.

*Das Grete-Hermann-Netzwerk hat seit dem Kick-off im Juli 2020 zehn Veranstaltungen durchgeführt: acht virtuelle Kolloquien, eine digitale Vortragsreihe und ein Netzwerktreffen in Präsenz. Die Teilnehmerinnen kamen unter anderem aus Brasilien, Frankreich, den Niederlanden, Polen, der Schweiz, Skandinavien und den USA.

*Since it was launched in July 2020, the Grete Hermann Network has hosted ten events: eight virtual colloquia, a digital lecture series, and one face-to-face network meeting. They were attended by women from Brazil, France, the Netherlands, Poland, Scandinavia, Switzerland, the USA, and other countries.



6 FAIRes Prinzip
FAIR principle

Ressourcen nachhaltig nutzen,
revolutionäres Wissen teilen _____

Using resources sustainably
and sharing revolutionary knowledge

Forschungs- datenmanagement

Research data management

Eine nachhaltige Daten-Infrastruktur sorgt dafür, dass das in den Forschungsteams gewonnene Wissen auffindbar ist, in der internationalen Wissenschaftscommunity geteilt werden kann und für nachfolgende Generationen von Forscher:innen nachvollziehbar erhalten bleibt. Damit Ressourcen nicht vergeudet werden.

*A sustainable data infrastructure will ensure that the knowledge harvested by **ct.qmat's** research teams can be found, shared in the global scientific community, and preserved for future generations of scientists – so that valuable resources aren't wasted.*

Datenmassen beherrschen: Experimentelle Messergebnisse, Resultate theoretischer Berechnungen, Bilder, Grafiken, Protokolle und Computerprogramme ... die Wissenschaftler:innen des Exzellenzclusters **ct.qmat** erzeugen große Mengen an Forschungsdaten. Ein wertvolles Gut! Durch ein leistungsfähiges sowie systemoffenes Datenmanagement lässt sich dieser Datenschatz nachhaltig digital nutzbar sowie der globalen

Wissenschaftscommunity langfristig zugänglich machen. In Zusammenarbeit mit dem Rechenzentrum der JMU Würzburg (RZUW) wird eine Plattform geschaffen, die dem FAIR-Prinzip folgt und somit den grundsätzlichen Anforderungen an eine zukunftsorientierte Datenhaltung genügt.

Harnessing data: Scientists from **ct.qmat** generate vast amounts of research data, including experimental

measurement data, results of theoretical calculations, analyses, images, graphics, protocols, and computer programs. This research data is a precious asset. If managed efficiently in an open system, a wealth of data can be made permanently available to the global scientific community. Therefore, working with JMU Würzburg's Information Technology Centre (RZUW), a platform is being set up in line with the FAIR principle to meet the fundamental requirements of future data storage.

Digitaler Datenschatz bringt Forschung voran

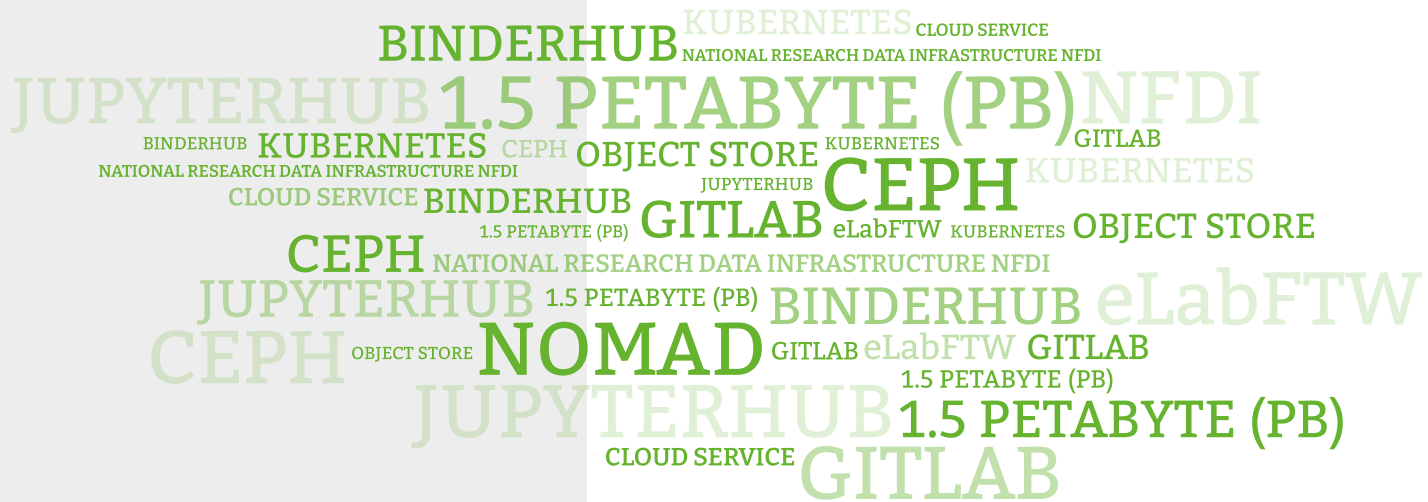
Advancing research with digital data

Verteilt und gemeinschaftlich: Entsprechend der Idee eines „kollaborativen Datenmanagements“ entsteht ein integriertes, benutzerfreundliches System. Dieses ermöglicht den Forschenden des Exzellenzclusters, ihre Daten und Ergebnisse zu teilen, aufzubewahren, zu zitieren, zu analysieren sowie neue Erkenntnisse in den gespeicherten Daten zu entdecken. Generell wird darauf geachtet, hardware- und herstellerunabhängig eine jahrzehntelange Erreichbarkeit zu sichern.

Remote collaboration: An integrated, user-friendly system is taking shape that reflects the idea of collaborative data management. It will enable **ct.qmat**'s researchers to share, save, cite, and analyze their data and results, as well as to discover new findings in the archived information. One key aim is to ensure hardware- and vendor-independent accessibility for a matter of decades.

#Datenmanagement:
Geografisch verteilt, aber dennoch gemeinsam an Forschungsdaten arbeiten, Knowledge-Transfer fördern und neue Erkenntnisse durch Analyse bisheriger Ergebnisse gewinnen – nach dem FAIR-Prinzip.

#Data management:
Collaborating remotely on research data, promoting knowledge transfer, and gaining new insights by analyzing previous findings – according to the FAIR principle.



i FAIR
FAIR

... steht für auffindbare, zugängliche, interoperable und wiederverwendbare Daten – und bezeichnet ein modernes Prinzip der Datenhaltung in den Wissenschaften.

... stands for the findability, accessibility, interoperability, and reusability of data – and denotes a modern principle of data management in scientific research.

i Open-Source-Lösungen
Open-source solutions

... sind Software-Programme, die einem transparenten, offenen sowie für jedermann zugänglichen Entwicklungsmodell folgen, angepasst und weiterentwickelt werden können.

... are software programs following a transparent development model that's accessible to anyone, and that can also be adapted and further developed.

Open Source: Für den Aufbau der Plattform wird auf vorhandene Software wie zum Beispiel Open-Source-Lösungen zurückgegriffen. Außerdem werden etablierte Webdienste sowie aktuelle Speichertechnologien zu einem beim RZUW betriebenen System vereint. Dabei laufen die Webdienste im Hintergrund, um den Forschenden eine bequeme cloudartige Arbeitsbasis mit effizienten Suchwerkzeugen „aus einem Guss“ zu bieten.

Open source: Existing software (such as open-source solutions) are being used to build the platform. In addition, we're combining established web services with the latest storage technology within a system operated at RZUW. The web services used will run in the background so that researchers can access a convenient, uniform, cloud-like system by means of efficient search tools.

High Performance Computing: Nach der ersten Pilotinstallation in Würzburg ist eine weitere Umsetzung in Dresden mit spezifischen Anpassungen geplant. Die genutzte Hardware ist Teil des Hochleistungsrechnersystems (High Performance Computing, HPC) „Julia“ der JMU Würzburg und steht allen **ct.qmat**-Mitgliedern offen. Ziel ist eine deutschlandweit einzigartige, intelligente Plattform für das Management der **ct.qmat**-Daten.

High-performance computing: Following the initial pilot installation in Würzburg, implementation with certain adaptations is also planned in Dresden. The hardware used is part of the JMU Würzburg's Julia high-performance computing cluster and is available to all members of **ct.qmat**. The ultimate objective is to develop a smart platform to manage **ct.qmat**'s data that's unique in Germany.



7 Reichweite
Outreach

Forschung zugänglich machen,
Brücken in die Gesellschaft bauen _____

Opening up research to the public
and forging bonds with society

Neugier wecken auf die verrückte Quantenwelt

Arousing interest in the crazy world of quantum physics

*Forschung braucht Akzeptanz und Sichtbarkeit in der Gesellschaft. Internationale Strahlkraft ist eine Grundvoraussetzung, um im Wettbewerb um die besten Köpfe für Studium, Lehre und Wissenschaft zu bestehen. Deshalb setzt **ct.qmat** auf eine breite Zielgruppenansprache, die bereits bei Kindern und Jugendlichen beginnt.*

*Research needs acceptance and visibility in society. An international reputation is essential to win the competition for the best minds for studying, teaching and research. That's why **ct.qmat** addresses a broad target group that starts with children and teenagers.*



#Quantenwelt erleben:

Mit preisgekrönten Projekten von der verspielten Katze Q bis zur Erklärvideoreihe QUANTube und mit mehreren Ausstellungen zeigt das Exzellenzcluster, wie faszinierend Forschung ist und wie viel Spaß wissenschaftliche Arbeit macht.

#Experiencing the quantum world:

*With award-winning projects from the playful Kitty Q to the QUANTube series of educational videos as well as multiple exhibitions, **ct.qmat** shows how fascinating science is – and how much fun research work can be.*

Katze Q – Ein Quanten-Adventure

Kitty Q – A Quantum Adventure

Eine Katze begeistert für Physik:

Die Spiele-App „Katze Q – Ein Quanten-Adventure“ hat **ct.qmat** gemeinsam mit dem preisgekrönten App-Designer Philipp Stollenmayer entwickelt, um Kinder und Jugendliche ab elf Jahren – speziell Mädchen – mit einer süßen, halb toten Katze als Hauptfigur für Quantenphysik zu begeistern. Denn Deutschland gehört bei der Förderung von Quantentechnologien zwar zu den führenden Nationen, doch der Fachkräftemangel betrifft ebenso die Wissenschaft und hier vor allem die naturwissenschaftlichen Grundlagenfächer: Viel zu wenige Schüler:innen lassen sich für den Physikunterricht gewinnen und bleiben bis zum Abitur dabei. So entstand bei **ct.qmat** die Idee, durch einen niedrighschweligen Ansatz mehr Aufmerksamkeit für das Fach bei dieser Zielgruppe zu wecken. Der Fokus sollte sich hauptsächlich auf Mädchen richten, da Frauen in den Physikstudiengängen unterrepräsentiert sind.

A cat gets a taste for physics:

“Kitty Q – A Quantum Adventure” is a game app that was developed by **ct.qmat** together with award-winning app designer Philipp Stollenmayer. The aim behind it is to get boys and especially girls aged eleven and upwards interested in quantum physics. Curiously, the app revolves around a cute, albeit half-dead cat! Although Germany is one of the leading nations when it comes to funding quantum technologies, the general shortage of skilled workers in the economy as a whole also undermines science. The problem is that too few high school students can currently be persuaded to take physics and other sciences and stick with them until they graduate. To raise awareness of physics among this target group, **ct.qmat** came up with the idea of a low-threshold tactic. And with females underrepresented on physics degrees, it was decided to particularly try and interest girls.



Quantenphysik macht Schule Taking quantum physics into the classroom

Damit Forschungsergebnisse aus der Quantenphysik schnellstmöglich im Schulunterricht ankommen, hat **ct.qmat** gemeinsam mit dem nationalen Excellence-Netzwerk naturwissenschaftlicher Schulen MINT-EC ein Projekt gestartet: In den kommenden zwei Jahren entwickeln Lehrkräfte und Forschende Schulmaterialien mit besonderem Fokus auf Gamification-Ansätzen, also spielerischer Vermittlung. Ausgehend von der Spiele-App „Katze Q“ sollen quantenphysikalische Inhalte schon ab Klasse 7 in die Lehrpläne einziehen.

To make sure quantum physics findings reach the classroom as quickly as possible, **ct.qmat** has launched a project with MINT-EC, the German excellence network of science-oriented schools. Over the next two years, teachers and researchers will develop teaching materials for schools with special emphasis on gamification approaches in order to motivate and engage students. Based on the Kitty Q app, elements of quantum physics are to be included in the syllabus as early as seventh grade.

Ins Schwarze getroffen:

„Wir haben genau analysiert, wann Kinder für Themen im Bereich Mathematik, Informatik, Natur- und Technikwissenschaften (MINT) besonders empfänglich sind und womit sich diese Altersgruppe in ihrem Alltag beschäftigt“, erklärt der Würzburger Clustersprecher Ralph Claessen. „Dabei wurde klar, dass die 11- bis 14-Jährigen bei unserem Konzept im Mittelpunkt stehen sollten, weil in dieser Zeit das Interesse an Physik und Naturwissenschaften geprägt wird und zudem der Physikunterricht startet.“ Dann kam intensive Arbeit. Die Brainstormings fanden vor allem virtuell statt, doch wichtige Meilensteine wie der Kick-off-Workshop, der Beta-Test oder die Pressepreview konnten in Präsenz durchgeführt werden. „Weil durch die Corona-Pandemie die Wissensvermittlung viel mehr als zuvor ins Internet verlagert wurde, haben wir mit unserer digitalen Spiele-App voll ins Schwarze getroffen“, betont der Dresdner Clustersprecher Matthias Vojta.



An app that struck a nerve:

“We analyzed precisely when children are particularly receptive to topics in the STEM subjects – science, technology, engineering, and mathematics – and the things this age group deals with in their everyday lives,”

explains Würzburg cluster spokesperson

Ralph Claessen. “It turned out that we needed to focus on 11- to 14-year-olds, because this is when adolescents develop an interest in physics and other sciences, and also when physics classes start at school.”

Having taken this decision, the hard work started. Although brainstorming sessions were held mainly online, important milestones such as the kick-off workshop, beta testing, and the press preview

were carried out face-to-face. “Because the

coronavirus pandemic shifted teaching to the internet like never before, our game app really struck a nerve,” says Dresden cluster spokesperson Matthias Vojta.

Es rappelt in der Kiste:

„Ding, dong“ hieß es am 13. Oktober 2021: Das Mobile Game um Katze Q, die am Beginn des Quantenabenteuers in ihrer Kiste vor der Tür steht, ist nun im App- und Play-Store in deutscher und englischer Sprache kostenfrei verfügbar. Im Zentrum stehen mehr als 20 Rätsel, die auf wissenschaftlichen Fakten aus der Quantenphysik beruhen. So wird das Konzept des Zufalls eingeführt, kalte Chips und Quantencomputer tauchen auf. „Die topologische Quantenphysik ist relativ jung – und es wird deshalb noch ein paar Jahre

Something stirring in the box ...:

“Ding, dong!” The mobile game was launched on October 13, 2021, and is available free of charge in the App and Play Stores in German and English. At the beginning of the quantum adventure, Kitty Q can be seen standing in her box in front of the door. At the heart of the game are more than twenty puzzles based on scientific facts from quantum physics. For example, the concept of randomness is introduced, while cold chips and quantum computers also make an appearance. “Topological quantum physics is a relatively young field, so it will be a few more years before it reaches regular physics classes. But this period will definitely be shortened by our app!” says Vojta. Yet even though references to quantum physics abound, “The game can be played without any knowledge of math or physics. The main aims are for it to be fun,

dauern, bis sie im regulären Physikunterricht angekommen ist. Diese Lücke verkürzen wir mit der App“, so Vojta. Doch auch wenn die Bezüge zur Quantenphysik ständig vorhanden sind: „Das Spiel lässt sich komplett ohne Mathe- oder Physik-Knowhow spielen! Es soll in erster Linie Spaß machen, Neugier wecken und zum Ausprobieren anregen. Genau darum geht es in der Wissenschaft.“ Umfangreiches Hintergrundwissen ist optional in der Kittypedia abrufbar. „Ein Eintrag wird freigeschaltet, sobald das zugehörige Rätsel gelöst wurde. In dieses allgemeinverständliche Lexikon haben wir viel Arbeit investiert“, sagt Claessen. „Weil unsere Forschung und unser Cluster international aufgestellt sind, war uns außerdem wichtig, das Spiel weltweit zu veröffentlichen.“ Ein Jahr nach Erscheinen knackten die Downloads die 250.000er-Marke und Katze Q hatte zahlreiche Preise gewonnen.

arouse curiosity, and encourage trial and error. After all, that’s what science is all about.” Players can consult the Kittypedia for extensive background knowledge. “Entries are unlocked as soon as the related puzzles have been solved. We spent a lot of time making this encyclopedia easy to understand,” reports Claessen. “Because our research and the cluster are international, it was also important to us to publish the game worldwide.” Within a year of its release, the number of downloads broke the 250,000 mark and Kitty Q won a string of awards.



Preisregen für Katze Q

Shower of awards for Kitty Q

- » Bundesverband Hochschulkommunikation: Let’s get digital-Award 2022
 - » Deutsches Kinder Medien Festival Goldener Spatz 2022: Kindermedienpreis GOLDENER SPATZ im Wettbewerb DIGITAL
 - » Google Play Indie Games Festival: Top 10 der besten europäischen Spiele-Apps 2022 im Play-Store
 - » Games Innovation Award Saxony: 2. Preis in der Kategorie „Bestes Serious Game 2021“
 - » Ideenwettbewerb Internationales Forschungsmarketing 2020 der Deutschen Forschungsgemeinschaft: Preisgeld von 100.000 € für das Konzept
 - » Valencia Indie Summit 2022: „Best Mobile Indie Game“
 - » Nominierungen: Deutscher Computerspielpreis: „Bestes Familienspiel“ 2022, Deutscher Kindersoftwarepreis TOMMI 2021: Kategorien „Bildung“ und „App“
-
- » Bundesverband Hochschulkommunikation: Let’s get digital-Award 2022
 - » German Children’s Media Festival Goldener Spatz 2022: GOLDENER SPATZ children’s media award in the DIGITAL competition
 - » Google Play Indie Games Festival: Top 10 European game apps in the Play Store
 - » Games Innovation Award Saxony: 2nd prize in the category Best Serious Game 2021
 - » International Research Marketing Ideas Competition 2020 of the Deutsche Forschungsgemeinschaft: Prize money of €100,000 for the concept
 - » Valencia Indie Summit 2022: Best Mobile Indie Game
 - » Nominations: German Computer Games Award: Best Family Game 2022, German Children’s Software Award TOMMI 2021: Education and App categories

QUANTube

Kurze Pause Wissenschaft

Science Break

Quantenphysik
einfach erklärt!

Quantum
physics made
simple!

Alle 12 QUANTube-Folgen auf YouTube:
All 12 episodes of QUANTube on YouTube:



Existieren in der Quantenwelt wirklich zwei Realitäten auf einmal? Welche Quanteneffekte kann ich in meinem Zuhause sehen? Und was passiert eigentlich am absoluten Nullpunkt? Physikfragen von Kindern und Jugendlichen aus der ganzen Welt haben Doktorand:innen und Postdocs in der QUANTube-Reihe von **ct.qmat** seit Januar 2022 in kurzweiligen Erklärvideos beantwortet. Die Fragen kamen unter anderem aus Ägypten, Brasilien, China, Indien, Kanada, Kolumbien, Philippinen und Katar genauso wie aus Schweden, der Schweiz, dem Vereinigten Königreich, der Ukraine, den USA und Vietnam.

„Nachgefragt“ im Wissenschaftsjahr 2022: Die Serie mit zwölf YouTube-Videos entstand als Folgeprojekt des Handyspiels „Katze Q“ (S. 73), in dem als Rätsel-Bonus eine Frage an **ct.qmat** gestellt werden konnte. Bei der Beantwortung der Fragen unterstützte ein Physik-Didaktiker. QUANTube wurde passend zum Motto „Nachgefragt“ des Wissenschaftsjahrs 2022 konzipiert. „Wir haben den Wissensdurst der Spieler:innen in den Mittelpunkt gerückt und bei unseren Erklärvideos die Messlatte im Hinblick auf Verständlichkeit sowie kind- und jugendgerechte Sprache sehr hochgelegt“, betont der Dresdner Clustersprecher Matthias Vojta. Das Ziel: Interesse für MINT-Fächer mit Fokus auf Physik wecken sowie Studien- und Berufsoptionen in dem Fach sichtbar machen. „2.000 Fragen sind bei uns angekommen! Über diese Neugier haben wir uns sehr gefreut“, ergänzt der Würzburger Clustersprecher Ralph Claessen.

Do two realities really exist simultaneously in the quantum world? What quantum effects can I see at home? And what actually happens at absolute zero? PhD students and postdocs from all over the world have been answering these and other physics questions in the entertaining instructional videos in **ct.qmat's** QUANTube series since January 2022. Questions have been received from Brazil, Canada, China, Colombia, Egypt, India, the Philippines, Qatar, Sweden, Switzerland, Ukraine, the United Kingdom, the United States, and Vietnam.

Responding to inquiring minds: The series consisting of twelve YouTube videos was created as a follow-up project to the smartphone app Kitty Q

Talente entdeckt: Jede QUANTube-Folge gibt zugleich Einblick in den Wissenschaftsbereich, in dem der Forschungsnachwuchs des Exzellenzclusters und seiner Partnerinstitutionen arbeitet. „Bei der Auswahl der Video-Präsentator:innen haben wir besonderen Wert auf junge Forschende gelegt, die für die Internationalität und Diversität von **ct.qmat** stehen. Die Hälfte der Protagonisten sind Frauen“, unterstreicht Vojta. „Dabei war uns gar nicht klar, wie viele Kommunikationstalente im Exzellenzcluster schlummern.“ Herausfordernd war jedoch, die quantenphysikalischen Ansätze in videotauglicher Kürze unterhaltsam zu erklären. Claessen: „Dadurch haben wir gelernt, aus völlig neuer Perspektive auf unser Forschungsfeld zu blicken.“ Die Videos wurden 2022 jeweils am Monatsende in deutscher und englischer Sprache auf YouTube veröffentlicht sowie in den Social-Media-Kanälen von **ct.qmat** – Twitter, TikTok, Instagram, YouTube – beworben.

(p. 73), in which players who solve puzzles can address questions directly to **ct.qmat**. A physics education expert was consulted to ensure the answers were suitably explained. QUANTube was designed with the theme of Science Year 2022 in mind, which was all about responding to inquiring minds. “We focused on the players’ inquisitiveness and went to great lengths to ensure our videos were comprehensible and used appropriate language for the young target group,” says Dresden cluster spokesperson Matthias Vojta. The goals are to arouse interest in STEM subjects, especially physics, and to point out relevant study and career options. “We’ve received 2,000 questions. We’re thrilled by our viewers’ curiosity!” adds Würzburg cluster spokesperson Ralph Claessen.

ct.qmat’s talented video presenters: Each episode of QUANTube also shines a light on what young researchers at **ct.qmat** and its partner institutions are working on. “When choosing the presenters, we mainly went for young researchers who were representative of **ct.qmat**’s diverse international demographic. Half the presenters are female,” says Vojta. “We’d never dreamed how many talented presenters we had here!” One challenging aspect was to explain the approaches taken in quantum physics in a suitably concise, entertaining manner. Says Claessen: “This taught us to look at our research activities from a completely new angle.” The videos were released in German and English on YouTube at the end of each month in 2022, and promoted on **ct.qmat**’s social media channels (Twitter, TikTok, Instagram, and YouTube).



Community Prize 2021 für Erklärvideos Community Prize 2021 for educational videos

Das Konzept für die QUANTube-Reihe erhielt als eine von sechs ausgezeichneten Projektideen den mit jeweils 20.000 Euro dotierten Preis für Internationales Forschungsmarketing. Der Preis ist ein Wettbewerbsformat von „Research in Germany“, einer Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

The concept for the QUANTube series was one of six project proposals to win the International Research Marketing Award and qualify for funding of €20,000. The competition was held under the banner of Research in Germany, an initiative by the Federal Ministry of Education and Research.



Doktorandin Teresa Tschirmer vom Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden beantwortete in der ersten QUANTube-Folge Fragen zur Quantenphysik.

In the first episode of QUANTube, PhD student Teresa Tschirmer from the Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden answered questions about quantum physics.

QUANTube 2022

Jeden Monat ein neues Erklärvideo
Brand-new video every month



Junge Forschende von ct.qmat und aus den Partnerinstitutionen des Exzellenzclusters beantworteten von Januar bis Dezember 2022 Fragen von Kindern und Jugendlichen aus aller Welt. Sie erklärten, wie verrückt es im Reich der Quanten tatsächlich zugeht – und gaben zugleich Einblick in ihre wissenschaftliche Arbeit. In der letzten Folge im Dezember verrieten die beiden Clustersprecher Ralph Claessen aus Würzburg und Matthias Vojta aus Dresden sowie der App-Designer Philipp Stollenmayer, wie das Spiel „Katze Q“ entstanden ist und welches ihre Lieblingsrätsel sind.

From January to December 2022, young researchers from ct.qmat and its partner institutions answered questions from youngsters all over the world. They explained just how crazy things are in the realm of quanta, and also described some of the things they're working on. In the final episode in December, cluster spokespersons Ralph Claessen from Würzburg and Matthias Vojta from Dresden as well as app designer Philipp Stollenmayer described how the game Kitty Q came about – and what their favorite puzzles are.



Ausstellungen

Exhibitions

*Für mehr Sichtbarkeit von Quantenphysik und **ct.qmat**-Forschung in der Öffentlichkeit hat sich das Exzellenzcluster bereits an mehreren Ausstellungsprojekten beteiligt. Die Faszination für Wissenschaft weiterzugeben, junge Leute zu begeistern und die besten Köpfe zu gewinnen – das hat sich der Forschungsverbund von Beginn an auf die Fahnen geschrieben.*

*To raise the profile of quantum physics in general and the work done by **ct.qmat** in particular, the Cluster of Excellence has already taken part in several exhibitions. From the word go, **ct.qmat** has always been keen to nurture a fascination in science, inspire young people, and attract the best minds.*

Quantenwelt live erleben

Face-to-face with the quantum world

Ins Innerste der Welt

Dauerausstellung, JMU Würzburg, Fakultät für Physik und Astronomie

Die Ausstellung im Institutsgebäude wurde aufgrund der Corona-Pandemie im März 2021 virtuell und im November mit einem Festakt eröffnet – 126 Jahre, nachdem Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg die nach ihm benannten Strahlen entdeckt hatte. Die Präsentation informiert über aktuelle Forschung, darunter Topologie und Quantenphysik.

Into the Heart of the World

Permanent exhibition, JMU Würzburg, Fakultät für Physik und Astronomie

Due to the corona pandemic, the exhibition was first launched online in March 2021 and then opened in the real world at JMU Würzburg eight months later – 126 years after Wilhelm Conrad Röntgen first discovered X-rays in Würzburg. The exhibition provides information on current research, including topology and quantum physics.



**SCHAUFENSTER DER FORSCHUNG:
Quantenmaterialien – der Vorstoß in
neue Dimensionen**

Sonderausstellung, Technische Sammlungen Dresden

Sieben Exponate – vom haarigen Donut bis zum frustrierten Magneten – ermöglichen das spielerische Entdecken, Erforschen und Verstehen quantenphysikalischer Phänomene. Die Eröffnung fand am 12. September 2020 kurz vor dem Corona-Lockdown statt. Trotz der zeitweiligen Schließung blieb die Ausstellung durch Aktionen wie ein Weihnachtsvideo mit dem Weihnachtsmann als nächtlichem Besucher im Gespräch. Inzwischen ist das SCHAUFENSTER DER FORSCHUNG zum beliebten Treffpunkt für ein breites, wissenschaftsinteressiertes Publikum geworden.

**SHOWCASE OF RESEARCH:
Quantum Matter – Advancing to
New Dimensions**

Exhibition, Technische Sammlungen Dresden

Seven enjoyable yet educational exhibits – from a hairy donut to a frustrated magnet – enable aspects of quantum physics to be discovered, explored, and understood. The exhibition was opened on September 12, 2020, just before the COVID-19 lockdown. But despite the temporary closure, public awareness was maintained by campaigns such as a Christmas video featuring a nocturnal visit by Santa Claus. In the meantime, the SHOWCASE OF RESEARCH has become a popular attraction for a broad audience with an interest in science.



Der haarige Donut begeistert nicht nur diese kleine Besucherin.

This young visitor is just one of the many people fascinated by the hairy donut!

Highlights der Physik

Wissenschaftsfestival Würzburg mit Ausstellung

Vom 27. September bis 2. Oktober 2021 gab **ct.qmat** einen Einblick in seine Forschung und zeigte in einer Gaming-Lounge im Wohnzimmerstil eine Preview der Spiele-App „Katze Q“.

Highlights of Physics

Science festival and exhibition in Würzburg

From September 27 to October 2, 2021, **ct.qmat** gave a glimpse of its research by previewing its Kitty Q app in a living room-style gaming lounge.

Wie wollen wir in Zukunft leben?

Open-Air-Wanderausstellung, Netzwerk

DRESDEN-concept

Im Zentrum der sächsischen Landeshauptstadt stellte sich die Dresdner Forschung ab 10. Oktober 2020 in einer interaktiven Freiluftpräsentation vor – **ct.qmat** mit dem Thema „Atom für Atom zu neuen Materialien“. Die Schau wurde danach im Dresdner Kulturpalast, im Dresdner Rathaus und in den Technischen Sammlungen gezeigt. Seit Ende 2021 ist sie in der Station Weißwasser e.V. zu sehen.

Schaufenster – Blick in unsere Forschung

Web-Ausstellung mit YouTube-Hit

Einen populärwissenschaftlichen Einstieg in die Rätsel der Quantenwelt bietet seit November 2020 die deutsch-englische Web-Ausstellung von **ct.qmat**. Entstanden während der Corona-Pandemie, um Arbeit, aktuelle Erkenntnisse und Ziele des Clusters niedrigschwellig zu vermitteln. Dabei ist es sogar gelungen, einen YouTube-Hit zu landen: Die Animation eines Ameisenspaziergangs auf der Klein'schen Flasche brachte das Social Web zum Staunen. Die Klein'sche Flasche ist ein kuriose Objekt, das weder „Innen“ noch „Außen“ hat. Ideal für eine Ameise, denn dadurch kann sie bei einem Spaziergang jeden Punkt erreichen und doch nie gefangen werden. Das fasziniert auch das Netz: Die Ameise ging viral, erreichte bis Herbst 2022 mehr als 4,5 Millionen Views auf YouTube, fast 80.000 Likes, über 3.000 Kommentare und wurde knapp 8.300 Mal geteilt.



What will tomorrow's world look like?

Open-air traveling exhibition,

DRESDEN-concept

Starting October 10, 2020, Dresden's research community held an interactive outdoor exhibition in the city center explaining their activities. The title of **ct.qmat**'s presentation was "Atom by Atom to New Materials." The show was subsequently moved to three indoor venues: Kulturpalast, the City Hall, and Technische Sammlungen, a museum of science and technology. In late 2021, the exhibition was reopened 70 miles away in the town of Weißwasser.

Showcase – Insight into our Research

Internet exhibition with YouTube hit

ct.qmat's web-based exhibition in German and English introducing the mysteries of the quantum world was launched in November 2020. It was set up during the pandemic to straightforwardly explain the work, the latest findings, and the goals of the cluster. It even scored a YouTube hit with the animation of an ant walking on a Klein bottle. A Klein bottle is a curious object with no inside or outside. It's ideal for an ant since this feature means it can reach any point on the bottle and yet never be trapped. The internet was riveted! The ant went viral, racking up more than 4.5 million views, nearly 80,000 likes, and over 3,000 comments on YouTube by fall 2022 – and was shared nearly 8,300 times.



8 Anhang
Appendix

Weiterforschen
für die Quantenrevolution _____

Continuing research for the
quantum revolution

Ausblick Outlook

Früchte ernten, neue Ideen entwickeln _____ Reaping the benefits and developing new ideas

*In der zweiten Hälfte der seit 2019 laufenden Förderperiode baut das Exzellenzcluster **ct.qmat** die Kooperation zwischen Würzburg, Dresden und darüber hinaus weiter aus, erntet deren wissenschaftlichen Früchte. Doch die Potenziale des Konzepts von Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien sind damit noch lange nicht ausgeschöpft. Auch für die Zukunft – und eine zweite Förderperiode – haben sich die Forscher:innen des Clusters viel vorgenommen.*

*Now in the second half of its seven-year funding period which started in 2019, **ct.qmat** is continuing to expand and reap the benefits of cooperation between Würzburg, Dresden and elsewhere. Looking ahead, the concept of complexity and topology in quantum matter has a lot more potential. Indeed, the cluster's researchers have ambitious plans for the future – and for a second funding period.*

Systematik: Auf wissenschaftlicher Ebene wollen die Forschungsgruppen von **ct.qmat** zum systematischen Verständnis der topologischen Physik beitragen. Zu den großen Zielen der nächsten zehn bis 20 Jahre gehört es, revolutionäre Materialien für zukünftige Anwendungen zu entdecken, moderne Forschungsrichtungen zu identifizieren →

Systematics: Scientifically speaking, **ct.qmat's** research groups intend to contribute to the systematic understanding of topological physics. The main goals for the next 10–20 years include discovering revolutionary materials for future applications, and identifying and establishing modern research directions, such as on nanoscale quantum materials in Dresden. **ct.qmat** has proven to be an important point of crystallization for long-term structural and infrastructural expansion at both university locations. New buildings and laboratories have been →

→ built, state-of-the-art equipment acquired, and the course set for the further development of the physics faculties in Würzburg and Dresden.

Networking: In addition to close collaboration between the leading condensed matter research environments in Dresden and Würzburg, **ct.qmat** also plans to involve international research partners more tightly, such as

the Technion in Israel. When appointing future professors, emphasis will continue to be placed on diversity and equal opportunities. Another prominent theme is support for early career scientists and the cluster's alumni, and so the successful activities of the Quantum Matter Academy and the Hallwachs-Röntgen Postdoc Program will be maintained. Meanwhile, to further global outreach and dialogue, additional international congresses are planned. **ct.qmat** has already created a large international network with members from 38 countries.

Opportunities: **ct.qmat**'s researchers are optimistic about the next round of the Excellence Strategy. After all, they've already impressively demonstrated the opportunities forged by **ct.qmat**'s synergetic research. Apart from its scientific productivity and international visibility, this includes aspects of science policy pursued by **ct.qmat** such as supporting scientific careers, promoting diversity, and explaining the fascinating possibilities of quantum physics to the general public. Given this, **ct.qmat** has its eyes set firmly on the future. The second quantum revolution is in full swing worldwide. Novel quantum materials will shape the high tech of the coming decades – and a significant contribution to these scientific advances will be made by **ct.qmat**.

→ und zu etablieren – beispielsweise Nanoscale Quantum Materials in Dresden. Das Exzellenzcluster hat sich dabei als wichtiger Kristallisationskeim für den nachhaltigen strukturellen und infrastrukturellen Ausbau an beiden Universitätsstandorten erwiesen. Neue Gebäude und Labore entstanden, hochmoderne Geräte wurden angeschafft und die Weichen für die Weiterentwicklung der Physikfakultäten in Würzburg und Dresden gestellt.

Ausstrahlung: Neben der intensiven Zusammenarbeit der führenden Forschungsumgebungen für kondensierte Materie, Dresden und Würzburg, plant das Exzellenzcluster, auch internationale Forschungspartner – zum Beispiel das Technion in Israel – enger einzubinden. Bei der Besetzung weiterer Cluster-Professuren werden auch künftig gezielt Schwerpunkte auf Vielfalt und Chancengleichheit gelegt. Ein grundlegendes Thema bleibt die Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie ebenso der Alumni des Clusters. Deshalb wird die erfolgreiche Tätigkeit der Quantum Matter Academy und des Hallwachs-Röntgen-Postdoc-Programms fortgeführt. Um die weltweite Ausstrahlung und den Austausch zu vertiefen, sind weitere internationale Tagungen geplant. Mit Mitgliedern aus 38 Ländern hat sich **ct.qmat** ein großes globales Netzwerk geschaffen.

Chancen: Der nächsten Runde der Exzellenzstrategie schauen die Forscher:innen des Exzellenzclusters optimistisch entgegen. Bisher haben sie eindrucksvoll bewiesen, welche Chancen der synergetische Forschungsansatz von **ct.qmat** bietet – hinsichtlich der wissenschaftlichen Produktivität und internationalen Sichtbarkeit genauso wie im Hinblick auf wissenschaftspolitische Aspekte wie Nachwuchsförderung, Diversität sowie einer breit angelegten Öffentlichkeitsarbeit für die faszinierenden Möglichkeiten der Quantenphysik. In diesem Sinn richtet **ct.qmat** den Blick nach vorn. Die zweite Quantenrevolution ist weltweit in vollem Gange. Neuartige Quantenmaterialien werden die Hochtechnologien der kommenden Jahrzehnte bestimmen – und das Exzellenzcluster leistet dazu einen wesentlichen Beitrag.



Ausgewählte Publikationen

Selected publications

Liste der in diesem Zwischenbericht angegebenen Publikationen:

List of publications cited in this Mid-Term Report:

Area A – Paper highlight

Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator,

M. M. Otrokov, I. I. Klimovskikh, H. Bentmann, D. Estyunin, A. Zeugner, Z. S. Aliev, S. Gaß, A. U. B. Wolter, A. V. Koroleva, A. M. Shikin, M. Blanco-Rey, M. Hoffmann, I. P. Rusinov, A. Y. Vyazovskaya, S. V. Ereemeev, Y. M. Koroteev, V. M. Kuznetsov, F. Freyse, J. Sánchez-Barriga, I. R. Amiraslanov, M. B. Babanly, N. T. Mamedov, N. A. Abdullayev, V. N. Zverev, A. Alfonso, V. Kataev, B. Büchner, E. F. Schwier, S. Kumar, A. Kimura, L. Petaccia, G. Di Santo, R. C. Vidal, S. Schatz, K. Kißner, M. Ünzelmann, C. H. Min, S. Moser, T. R. F. Peixoto, F. Reinert, A. Ernst, P. M. Echenique, A. Isaeva, and E. V. Chulkov, *Nature* **576**, 416 (2019).

Weitere ausgewählte Highlights

Further selected highlights

Interacting topological edge channels,

J. Strunz, J. Wiedenmann, C. Fleckenstein, L. Lunczer, W. Beugeling, V. L. Müller, P. Shekhar, N. T. Ziani, S. Shamim, J. Kleinlein, H. Buhmann, B. Trauzettel, and L. W. Molenkamp, *Nat. Phys.* **16**, 83 (2020).

All topological bands of all nonmagnetic stoichiometric materials,

M. G. Vergniory, B. J. Wieder, L. Elcoro, S. S. P. Parkin, C. Felser, B. A. Bernevig, and N. Regnault, *Science* **376**, 6595 (2022).

Any axion insulator must be a bulk three-dimensional topological insulator,

K. M. Fijalkowski, N. Liu, M. Hartl, M. Winnerlein, P. Mandal, A. Coschizza, A. Fothergill, S. Grauer, S. Schreyeck, K. Brunner, M. Greiter, R. Thomale, C. Gould, and L. W. Molenkamp, *Phys. Rev. B* **103**, 235111 (2021).

Design and realization of topological Dirac fermions on a triangular lattice,

M. Bauernfeind, J. Erhardt, P. Eck, P. K. Thakur, J. Gabel, T. Lee, J. Schäfer, S. Moser, D. Di Sante, R. Claessen, and G. Sangiovanni, *Nat. Commun.* **12**, 5396 (2021).

Area B – Paper highlight

Fractonic view of folding and tearing paper: elasticity of plates is dual to a gauge theory with vector charges,

N. Manoj, R. Moessner, and V. B. Shenoy, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 067601 (2021).

Weitere ausgewählte Highlights

Further selected highlights

Emergence of mesoscale quantum phase transitions in a ferromagnet,

A. Wendl, H. Eisenlohr, F. Rucker, C. Duvinage, M. Kleinhans, M. Vojta, and C. Pfleiderer, *Nature* **609**, 65 (2022).

Unveiling the three-dimensional magnetic texture of skyrmion tubes,

D. Wolf, S. Schneider, U. K. Rößler, A. Kovács, M. Schmidt, E. Dunin-Borkowski, B. Büchner, B. Rellinghaus, and A. Lubk, *Nat. Nanotechnol.* **17**, 250 (2022).

Metallic and deconfined quantum criticality in Dirac systems,

Z. H. Liu, M. Vojta, F. F. Assaad, and L. Janssen, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 087201 (2022).

Tunable chirality of noncentrosymmetric magnetic Weyl semimetals in rare-earth carbides,

R. Ray, B. Sadhukhan, M. Richter, J. I. Facio, and J. van den Brink, *npj Quantum Mater.* **7**, 19 (2022).

Area C – Paper highlight

Topological insulator vertical-cavity laser array,
A. Dikopoltsev, T. H. Harder, E. Lustig, O. A. Egorov,
J. Beierlein, A. Wolf, Y. Lumer, M. Emmerling,
C. Schneider, S. Höfling, M. Segev, and S. Klembt,
Science **373**, 1514 (2021).

Weitere ausgewählte Highlights Further selected highlights

One-dimensional planar topological laser,
A. Palatnik, M. Sudzius, S. Meister, and K. Leo,
Nanophotonics **10**, 2459 (2021).

*Observation of room temperature excitons in
an atomically thin topological insulator*,
M. Syperek, R. Stühler, A. Consiglio, P. Holewa,
P. Wyborski, L. Dusanowski, F. Reis, S. Höfling,
R. Thomale, W. Hanke, R. Claessen, D. Di Sante,
and C. Schneider,
Nat. Commun. **13**, 6313 (2022).

Polariton condensates for classical and quantum computing,
A. Kavokin, T. C. H. Liew, C. Schneider, P. G. Lagoudakis,
S. Klembt, and S. Höfling,
Nat. Rev. Phys. **4**, 435 (2022).

*Experimental observation of Berry phases
in optical Möbius-strip microcavities*,
J. Wang, S. Valligatla, Y. Yin, L. Schwarz,
M. Medina-Sánchez, S. Baunack, C. H. Lee, R. Thomale,
S. Li, V. M. Fomin, L. Ma, and O. G. Schmidt,
Nat. Photonics (accepted for publication, 2022),
arXiv:2206.04485.

Area D – Paper highlights

*Molecular beam epitaxy of a half-Heusler
topological superconductor candidate YPtBi*,
J. Kim, K. M. Fijalkowski, J. Kleinlein,
C. Schumacher, A. Markou, C. Gould, S. Schreyeck,
C. Felser, and L. W. Molenkamp,
arXiv:2211.13106, to be published (2023).

*One-dimensional topological interface states:
a novel approach for optical pressure sensors*,
J. Lindenthal, A. Widulla, J. Benduhn, and K. Leo,
to be published (2023).

Topological funneling of light,
S. Weidemann, M. Kremer, T. Helbig, T. Hofmann,
A. Stegmaier, M. Greiter, R. Thomale, and A. Szameit,
Science **368**, 311 (2020).



Eine Liste aller Publikationen, an denen Forscher:innen des
Exzellenzclusters ct.qmat beteiligt waren, finden Sie hier:
ctqmat.de/de/research/publications

A list of all publications in which ct.qmat researchers
were involved can be found here:
ctqmat.de/en/research/publications

Personen

People

Verantwortliche
Wissenschaftler:innen **ct.qmat**
Principal Investigators of **ct.qmat**

Prof. Dr. Fakher Assaad, JMU Würzburg
Prof. Dr. Matthias Bode, JMU Würzburg
Prof. Dr. Bernd Büchner, IFW Dresden & TU Dresden
Prof. Dr. Alexey Chernikov, TU Dresden
Prof. Dr. Ralph Claessen, JMU Würzburg
Prof. Dr. Vladimir Dyakonov, JMU Würzburg
& ZAE Würzburg
Prof. Dr. Lukas M. Eng, TU Dresden
Prof. Dr. Johanna Erdmenger, JMU Würzburg
Prof. Dr. Claudia Felser, MPI-CPFS Dresden
Prof. Dr. Jochen Geck, TU Dresden
Prof. Dr. Ewelina M. Hankiewicz, JMU Würzburg
Prof. Dr. Elena Hassinger, TU Dresden
Prof. Dr. Sven Höfling, JMU Würzburg
Prof. Dr. Dmytro S. Inosov, TU Dresden
Prof. Dr. Sebastian Klembt, JMU Würzburg
Prof. Dr. Karl Leo, TU Dresden
Prof. Dr. Roderich Moessner, MPI-PKS Dresden
Prof. Dr. Laurens W. Molenkamp, JMU Würzburg
Prof. Dr. Adriana Pálffy-Buß, JMU Würzburg
Prof. Dr. Friedrich Reinert, JMU Würzburg
Prof. Dr. Michael Ruck, TU Dresden
Prof. Dr. Giorgio Sangiovanni, JMU Würzburg
Prof. Dr. Ronny Thomale, JMU Würzburg
Prof. Dr. Björn Trauzettel, JMU Würzburg
Prof. Dr. Jeroen van den Brink, IFW Dresden
& TU Dresden
Prof. Dr. Matthias Vojta, TU Dresden
Prof. Dr. Joachim Wosnitza, HZDR Dresden
& TU Dresden

Assoziierte Mitglieder **ct.qmat**
Associated Members of **ct.qmat**

Dr. Georgy Astakhov, HZDR Dresden
Dr. Hendrik Bentmann, JMU Würzburg
Dr. Sergey Borisenko, IFW Dresden
Prof. Dr. Jan Carl Budich, TU Dresden
Prof. Dr. Hartmut Buhmann, JMU Würzburg
Dr. Alexander Fedorov, IFW Dresden
& Helmholtz-Zentrum Berlin
Dr. Ion Cosma Fulga, IFW Dresden
Prof. Dr. Charles Gould, JMU Würzburg
Prof. Dr. Werner Hanke, JMU Würzburg
Prof. Dr. Bert Hecht, JMU Würzburg
Prof. Dr. Vladimir Hinkov, JMU Würzburg
Dr. Lukas Janssen, TU Dresden
Dr. Tobias Kießling, JMU Würzburg
Prof. Dr. Hans-Henning Klauss, TU Dresden
Prof. Dr. Axel Lubk, IFW Dresden & TU Dresden
Dr. Libo Ma, IFW Dresden
Prof. Dr. Andrew Mackenzie, MPI-CPFS Dresden
Dr. Tobias Meng, TU Dresden
Dr. René Meyer, JMU Würzburg
Dr. Simon Moser, JMU Würzburg
Prof. Dr. Kornelius Nielsch, IFW Dresden & TU Dresden
Prof. Dr. Jörg Schäfer, JMU Würzburg
Prof. Dr. Michael Sing, JMU Würzburg
Dr. Martin Stehno, JMU Würzburg
Dr. Piotr Surowka, MPI-PKS Dresden
Prof. Dr. Carsten Timm, TU Dresden
Prof. Dr. Liu Hao Tjeng, MPI-CPFS Dresden
Dr. Louis Veyrat, IFW Dresden
Dr. Anja Wolter-Giraud, IFW Dresden

Externe Mitglieder **ct.qmat** External Members of **ct.qmat**

Prof. Dr. Mordechai Segev, Technion – Israel Institute of Technology Haifa

Prof. Dr. Alexander Szameit, Universität Rostock

Wissenschaftlicher Beirat **ct.qmat** Scientific Advisory Board of **ct.qmat**

Prof. Dr. Manfred Bayer, Technische Universität Dortmund

Prof. Dr. Hélène Bouchiat, Université Paris-Saclay & CNRS – Centre national de la recherche scientifique (Frankreich)

Prof. Dr. Katharina J. Franke, Freie Universität Berlin

Prof. Dr. Julia S. Meyer, Université Grenoble-Alpes (Frankreich)

Prof. Dr. Jörg Schmalian, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr. Dirk van der Marel, Université de Genève (Schweiz)

Cluster-Professuren **ct.qmat** Cluster professorships at **ct.qmat**

Prof. Dr. Alexey Chernikov, Ultraschnelle Mikroskopie und Photonik | [Ultrafast Microscopy and Photonics](#)

Prof. Dr. Elena Hassinger, Tieftemperaturphysik komplexer Elektronensysteme | [Low-Temperature Physics of Complex Electron Systems](#)

Prof. Dr. Sebastian Klembt, Licht-Materie-Wechselwirkung und Topologische Photonik | [Light-Matter Interaction and Topological Photonics](#)

Prof. Dr. Adriana Pálffy-Buß, Theoretische Quanteninformation und Quantenoptik | [Theoretical Quantum Information and Quantum Optics](#)



Legende häufig verwendeter Abkürzungen | [Abbreviations](#)

HZDR – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

IFW Dresden – Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

JMU Würzburg – Julius-Maximilians-Universität Würzburg

MPI-CPFS Dresden – Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe Dresden

MPI-PKS Dresden – Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme Dresden

TU Dresden – Technische Universität Dresden

ZAE Würzburg – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung Würzburg

Impressum

Herausgeber | **Published by**

Exzellenzcluster **ct.qmat** – Komplexität und Topologie
in Quantenmaterialien

Cluster of Excellence **ct.qmat** – Complexity and
Topology in Quantum Matter

Das Exzellenzcluster wird im Rahmen der Exzellenzstrategie
des Bundes und der Länder gefördert.

The Cluster of Excellence is funded through the German
Excellence Strategy of the Federal and State Governments.

Inhaltliche Verantwortung | **Responsible for content**

Ralph Claessen & Matthias Vojta, Sprecher | **Spokespersons of**
ct.qmat

Redaktion | **Edited by**

Katja Lesser, Referentin für
Wissenschaftskommunikation,
Science Communication Officer,
ct.qmat

Text | **Written by**

Cathrin Günzel, Chris Abbey,
Katja Lesser

Übersetzung | **Translated into English by**

Chris Abbey

Gestaltung | **Layout by**

Jörg Bandmann, pixelwg

Druck | **Printed by**

addprint AG, Bannewitz

Fotos | **Photos by**

Tobias Ritz
außer / except
Daniel Peter (6, 9, 36, 90)
Nitzan Zohar (30)
BKfotofilm (49)
Bilderstolz (51)
Sven Döring (54)
Tristan Vostry (57)

Illustration | **Illustrations by**

Jörg Bandmann, pixelwg
außer / except
Philipp Stollenmayer, kamibox
(73, 74, 77, 78)

Auflage | **Print run**

300



Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Exzellenzcluster **ct.qmat**
Physikalisches Institut
Am Hubland
97074 Würzburg, Germany

Fon +49 931 31-88951
Fax +49 931 31-88951-0
ao.ct.qmat@listserv.dfn.de



Technische Universität Dresden

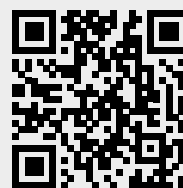
Exzellenzcluster **ct.qmat**
Institut für Theoretische Physik
01062 Dresden, Germany

Fon +49 351 463-33851
Fax +49 351 463-37258
ao.ct.qmat@listserv.dfn.de

ctqmat.de

Der Zwischenbericht 2022 des Exzellenzclus-
ters **ct.qmat** wurde im Dezember 2022 ver-
öffentlicht und steht auf **ctqmat.de/report**
zum Download zur Verfügung.

The Mid-Term Report 2022 of the Cluster
of Excellence **ct.qmat** was published in
December 2022 and can be downloaded from:
ctqmat.de/report





Exzellentes Team

Neben den Principal Investigators als wissenschaftlichem Kernteam von **ct.qmat** stehen ebenfalls die assoziierten Mitglieder für hohe wissenschaftliche Exzellenz, thematische Bandbreite sowie herausragende Forschungsergebnisse.

- 1 Carsten Timm
- 2 Michael Ruck
- 3 Martin Stehno

- 4 Sebastian Klembt
- 5 Michael Sing
- 6 Tobias Meng

- 7 Ronny Thomale
- 8 Giorgio Sangiovanni
- 9 René Meyer

- 10 Björn Trauzettel
- 11 Matthias Vojta
- 12 Johanna Erdmenger



Excellent team

Alongside the Principal Investigators – **ct.qmat**'s scientific core team – the Associated Members also deliver scientific excellence and outstanding findings in a wide range of fields.

13 Jan Carl Budich
14 Ion Cosma Fulga
15 Adriana Pálffy-Buß

16 Tobias Kießling
17 Matthias Bode
18 Ralph Claessen

19 Jeroen van den Brink
20 Fakher Assaad
21 Louis Veyrat

22 Georgy Astakhov
23 Lukas Janssen
24 Friedrich Reinert

