

Der Torus steht beim Exzellenzcluster ct.qmat als Sinnbild für die Topologie und damit die Forschung zu revolutionären Werkstoffen des 21. Jahrhunderts.

Topologie an zwei Standorten

Im Exzellenzcluster ct.qmat arbeiten Forschende aus Würzburg und Dresden zusammen, um besondere Materialeigenschaften mit einem nobelpreisgekrönten Ansatz zu untersuchen.

Kerstin Sonnabend

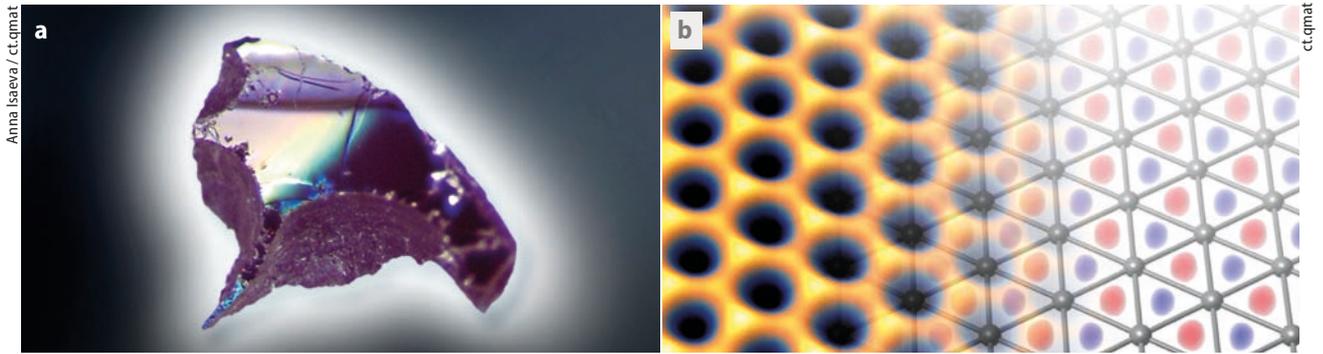
Das Cluster ct.qmat ist das einzige in der Exzellenzstrategie, für das zwei Standorte in verschiedenen Bundesländern gemeinsam einen Antrag gestellt haben. Die Forschenden in Würzburg und Dresden arbeiten an Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien: Sie nutzen die Topologie, ein Teilgebiet der Mathematik, um ungewöhnliche Zustände von Materie besser zu verstehen und gezielt zu erzeugen. Dabei arbeiten Theorie und Experiment eng zusammen und nutzen aus, dass sich die Forschungsschwerpunkte an beiden Orten ergänzen.

Schon die Entfernung von 300 Kilometern Luftlinie zwischen den Partnerinstitutionen des Clusters ist bemerkenswert, doch die eigentliche Schwierigkeit der gemeinsamen Antragstellung lag an ganz anderer Stelle: „Wir mussten die Rahmenbedingungen zweier Hochschulgesetze beachten“, erinnert sich Matthias Vojta, der für die Beteiligten in Dresden spricht. Die Idee zu der außergewöhnlichen Zusammenarbeit ergab sich aus früheren Kollaborationen. „In Würzburg fehlte trotz einer starken Festkörperphysik an

der Universität schlicht die ‚kritische Masse‘, um sich für ein Exzellenzcluster zu bewerben“, ergänzt der Würzburger Sprecher Ralph Claessen. Mit zahlreichen außeruniversitären Einrichtungen traf das auf Dresden zwar nicht zu; die Erfolgsaussichten waren gemeinsam aber deutlich besser. Als wissenschaftliche Basis für den Antrag dienten die Arbeiten aus zwei Sonderforschungsbereichen zu topologischen Materialeigenschaften und zu korreliertem Magnetismus, welche die Deutsche Forschungsgemeinschaft seit 2015 in Würzburg und Dresden finanziert.

Die Exzellenzcluster

In loser Folge stellt das Physik Journal die Cluster der Exzellenzstrategie mit Schwerpunkt in der Physik bzw. starker Beteiligung von Physikerinnen und Physikern vor.



Das maßgeschneiderte Quantenmaterial Mangan-Bismut-Tellurid (MnBi_2Te_4 , a) könnte Bauelemente für die Spintronik ermöglichen. Der Vergleich der gemessenen Elektronenverteilung von Indenen mit seiner Atomstruktur (b) belegt, dass sich die Elektronen (gelb bzw. rot und blau) zwischen den Indium-Atomen (grau) sammeln.

Zwei Standorte, ein Ziel

Entsprechend ergänzt sich die Infrastruktur an den beiden Standorten, insbesondere bei den experimentellen Techniken für die Synthese und Untersuchung von Materialien. So war es beispielsweise möglich, zu Beginn der Laufzeit des Clusters Kristalle des magnetischen topologischen Isolators MnBi_2Te_4 zu erzeugen. Das Innere dieses Materials ist elektrisch isolierend, während seine Oberfläche auch ohne äußeres Magnetfeld ein sehr guter Leiter ist. Basierend auf diesen Arbeiten gelang es kürzlich, zwei weitere Verbindungen aus dieser Materialgruppe zu analysieren: MnBi_4Te_7 und $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$ – synthetisiert in Dresden, erfolgten detaillierte Untersuchungen der Proben mithilfe der Photoelektronenspektroskopie in Würzburg. Die theoretischen Berechnungen einer Dresdner Gruppe zeigten, dass sich eine bestimmte Atomschicht an der Oberfläche befinden muss, um dem Material seine besonderen Eigenschaften zu geben. Nun gilt es, diese Anordnung gezielt bei der Synthese zu erzeugen.

Derzeit arbeiten an den beiden Standorten die Gruppen von 25 Projektverantwortlichen zusammen. Davon gehören 13 der Julius-Maximilians-Universität Würzburg an. Die Dresdner Gruppen finden sich an der Technischen Universität, dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoff-

forschung, den Max-Planck-Instituten für Chemische Physik fester Stoffe und für Physik komplexer Systeme sowie am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. An beiden Standorten hat das Cluster bereits je eine Professur neu besetzt; vier weitere sollen in diesem Jahr folgen. Die Ordnung des Clusters sieht dabei vor, dass zu den Berufungskommissionen mindestens ein stimmberechtigtes Mitglied aus der jeweils anderen Stadt gehört. „Daran haben wir uns trotz der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie immer gehalten“, geben beide Sprecher an. Neben den Projektverantwortlichen tragen 29 assoziierte Mitglieder zur Forschung des Clusters bei.

Forschungsbereiche mit Überlapp

Die Forschungsprojekte des Clusters verteilen sich auf vier Bereiche, die es zum Ziel haben, besondere topologische Eigenschaften unter Alltagsbedingungen nutzbar zu machen. So gelang es, durch maßgeschneidertes Materialdesign „Indenen“ zu erzeugen. Das Atomgitter dieses topologischen Isolators baut sich aus Dreiecken auf, während andere bekannte Vertreter dieser Materialgruppe aus Sechsecken konstruiert sind, beispielsweise Graphen. Die besonderen Eigenschaften eines topologischen Isolators konnte Laurens Molenkamp, Physiker in Würzburg und Gründungsmitglied des Exzellenzclusters, erstmals 2007 für Quecksilber-Tellurid (HgTe) nachweisen und löste damit weltweit einen Forschungsboom aus. Anders als Graphen oder HgTe braucht Indenen keine ultratiefen Temperaturen von einigen mK, um seine topologischen Eigenschaften zu zeigen: Die zweidimensionale Atomlage besitzt diese prinzipiell auch bei Umgebungstemperatur.

Auch im Bereich des Magnetismus treten überraschende topologische Phänomene auf, die das Cluster erforscht. Beispielsweise hat der Dresdner Cluster-Physiker Roderich Moessner schon 2008 magnetische Monopole als emergente Teilchen in Spin-Eis vorhergesagt: ein Meilenstein in der Festkörperphysik. Jetzt untersucht ct.qmat unter anderem Skyrmionen. Die kleinen magnetischen Wirbel können als neuartige Speicherelemente für die Informationstechnologie dienen.

Im Bereich der Topologischen Photonik geht es um topologische Zustände von Licht, die interessante Anwendungen erlauben. Während das Cluster in diesem Bereich

Exzellenzcluster „ct.qmat“

Beteiligte

Institutionen:

JMU Würzburg, TU Dresden, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW), Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe (MPI CPFS), Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme (MPI PKS), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE)

Sprecher:

Ralph Claessen (JMU Würzburg), Matthias Vojta (TU Dresden)

Research Areas:

A: Topological Electrons B: Quantum Magnetism
C: Topological Photonics D: Tailoring Topological Functionality



bereits über ein breites konzeptionelles Wissen verfügt, sollen neue Professuren das experimentelle Know-how in Dresden wie in Würzburg stärken. Bis dahin helfen externe Kollaborationen dabei, die theoretischen Ideen experimentell zu bestätigen. So berechnete Ronny Thomale von der Universität Würzburg, dass es der nicht-hermitesche Oberflächeneffekt erlaubt, in einer mehrere Kilometer langen Glasfaser das Licht an einem beliebigen Punkt zu sammeln. Der experimentelle Nachweis seiner Vorhersage gelang in der Gruppe von Alexander Szameit an der Universität Rostock. Szameit arbeitet eng mit dem Cluster ct.qmat zusammen und betreut beispielsweise auch Doktoranden gemeinsam mit Ronny Thomale.

Für Anwendungen der Materialien mit maßgeschneiderten topologischen Eigenschaften möchten die Forschenden die Erkenntnisse aus den drei anderen Bereichen nutzen und unter anderem topologische Laser realisieren. „Langfristig wollen wir Quantenmaterialien praktisch nutzbar machen. Entscheidend ist es aber, dass wir ergebnisoffen und neugierig bleiben – nur so funktioniert Grundlagenforschung“, stellt Matthias Vojta fest. Im Gegensatz zu den weiteren Clustern, die sich derzeit mit Quantentechnologien beschäftigen, sehen beide Sprecher den Fokus bei ct.qmat bei der Synthese, Beschreibung und Charakterisierung neuer Quantenmaterialien und von deren Phänomenen.

Besondere Förderung

Eine Besonderheit des Clusters sind die Hallwachs-Röntgen-Postdocs. Diese Stellen sollen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler an die Einrichtungen des Clusters locken, die noch keine eigene Gruppe leiten.

Tobias Ritz / ct.qmat; Philipp Stollenmayer / ct.qmat



Matthias Vojta (links) und Ralph Claessen, die Sprecher von ct.qmat, und die Katze Q aus der gleichnamigen Spiele-App

Sie sollen sich an verschiedenen Projekten beteiligen und so effizient eine Brücke zwischen den Standorten schlagen. Anstelle eines Graduiertenprogramms mit der Verpflichtung, bestimmte Kurse zu belegen, bietet das Cluster für Promovierende die Quantum Matter Academy an. Die jungen Forschenden haben hier die Möglichkeit, Sommer Schulen mit selbst gewählten Schwerpunkten zu organisieren und Mitglieder des Clusters für Spezialvorlesungen an ihren Standort einzuladen. Damit in die Dissertationen die Expertise des gesamten Clusters einfließt, kommen die Betreuenden immer aus Würzburg und Dresden. In dieser besonderen Konstellation sorgt die Academy für regelmäßige Treffen und einen regen Austausch zum Stand der Arbeit.





Introducing VALO.

Ultrashort fs lasers.



C-WAVE. Tunable Lasers.



Cobolt. Single & Multi-line Lasers.



C-FLEX. Laser Combiners.

In the Art of Making
High Performance Lasers

C-WAVE. Tunable Lasers.

Cobolt. Single & Multi-line Lasers.

C-FLEX. Laser Combiners.

Um Frauen in der Festkörperphysik und aus angrenzenden Gebieten zusammenzubringen, hat das Cluster das Grete-Hermann-Netzwerk ins Leben gerufen. Neben den Wissenschaftlerinnen des Clusters gehören ihm auch international renommierte Forscherinnen an. „Diese Struktur bietet mehr als ein Vernetzen oder Mentoring“, erklärt Matthias Vojta. Die etablierten Forscherinnen dienen als Vorbilder für den Nachwuchs, und bei den Veranstaltungen sei es möglich, einen Pool von Kandidatinnen für Professuren oder andere Stellen im Cluster aufzubauen. Neben den internen Netzwerkveranstaltungen, zu denen auch Gastaufenthalte untereinander gehören, finden regelmäßig öffentliche Vorträge statt. Die namensgebende Grete Hermann (1901 – 1984) hat mit Werner Heisenberg unter anderem den Zusammenhang von Quantenmechanik und Kantscher Philosophie diskutiert und die Pädagogische Hochschule Bremen aufgebaut und geleitet.

Für das breite Publikum

Die Öffentlichkeitsarbeit nimmt im Cluster ct.qmat einen großen Stellenwert ein. Denn, so Ralph Claessen, „die wirtschaftliche Bedeutung der Festkörperphysik ist vielen nicht klar“. Auch in den Lehrplänen der Schulen komme die Festkörperphysik nur am Rande vor. Daher bietet das „Schaufenster“ auf der Webpage des Clusters mit Videos und gut verständlichen Erklärungen einen ausführlichen Blick in seine Forschung. Eine Sonderausstellung in den Technischen Sammlungen Dresden lädt mit Mitmachexponaten zum Entdecken, Erforschen und Verstehen von Quantenmaterialien ein. Darüber hinaus hat sich das Cluster an der Würzburger Wissenschaftsausstellung „Ins Innerste der Welt“ beteiligt: Ein interaktives Modell, verständliche Texte und ein QR-Code bieten Informationen zum Thema Quantenphysik und Topologische Isolatoren.

Ein besonderes Projekt ist die Spiele-App „Katze Q“, die in Zusammenarbeit mit dem preisgekrönten App-Designer Philipp Stollenmayer entwickelt wurde. Vorbild ist das populäre Gedankenexperiment der Quantenmechanik: Schrödingers Katze. Seit ihrem Erscheinen Mitte Oktober haben weltweit über 80 000 Personen die App installiert, in der mehr als 20 knifflige Denksporträtsel auf Kinder und Jugendliche ab elf Jahren warten. Die Katze Q und Anna,

1) Physik Journal, Februar 2022, S. 10



Wenn nicht alle Atomspins in einem Material den niedrigsten Energiezustand einnehmen können, spricht man von Frustration. Die Mitmach-Ausstellung in den Technischen Sammlungen Dresden verdeutlicht das Prinzip mit Permanentmagneten.

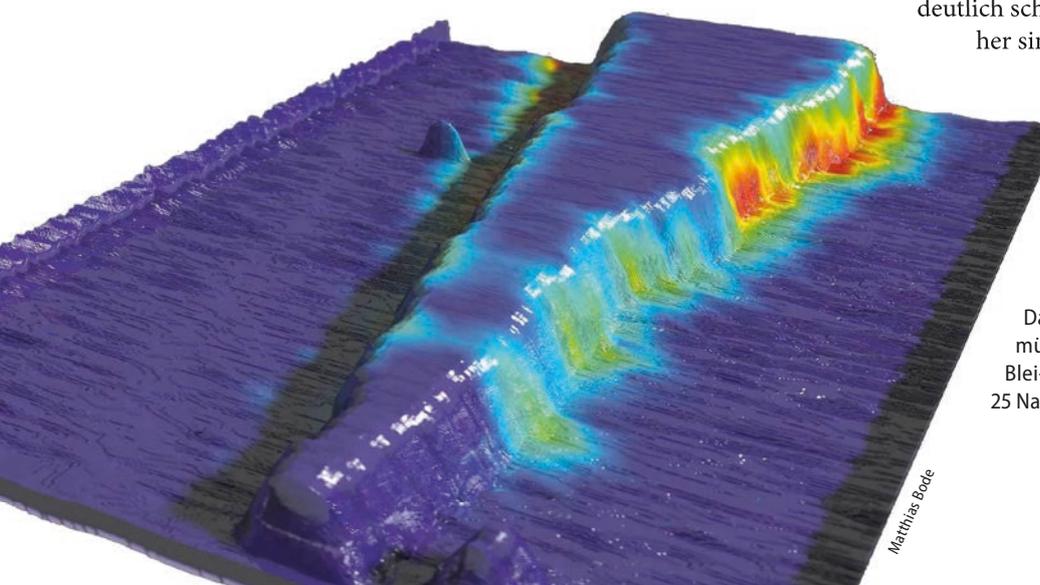
Urenkelin von Erwin Schrödinger, begleiten die Spielenden durch die „verrückte Quantenwelt“, die sich auch ohne Know-how aus Physik und Mathematik erkunden lässt. Umfangreiches Hintergrundwissen präsentiert die „Kit-typedia“ der App: Die allgemeinverständlichen Einträge haben die Forschenden des Clusters erstellt.

Wer ausreichend Rätsel gelöst hat, darf eine persönliche Frage zur Quantenphysik stellen. Die Antworten darauf finden sich im Nachfolgeprojekt „QUANTube – kurze Pause Wissenschaft“: In kurzweiligen Erklärvideos in Schulpausenlänge übt sich der Forschungsnachwuchs des Clusters darin, die Fragen in kind- und jugendgerechter Sprache zu beantworten. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt diese innovative Idee in der Öffentlichkeitsarbeit mit dem erstmals vergebenen Community Prize mit 20 000 Euro.¹⁾

Gemeinsam in die Zukunft

Nach drei Jahren Laufzeit hat das Cluster ct.qmat bereits über die Forschung hinaus Akzente gesetzt. „Die bürokratischen Hürden aus dem gemeinsamen Antrag zu nehmen, hat sich gelohnt“, ist Ralph Claessen überzeugt und verweist auf die Erfolge mit Mangan-Bismut-Tellurid, die so ohne die Zusammenarbeit im Cluster nicht möglich gewesen wären. „Im Cluster lässt sich der Weg von der Idee zu einem Material über seine Synthese und Charakterisierung deutlich schneller gehen“, ergänzt Matthias Vojta. Daher sind beide Sprecher überzeugt, dass sich aus diesen Arbeiten spätestens bei einer Fortsetzung des Clusters erste Anwendungen in der Spintronik und Elektronik ergeben werden.

Damit ihre Oberfläche supraleitend (rot) bleibt, müssen Drähte aus dem topologischen Isolator Blei-Zinn-Selenid mindestens einen Abstand von 25 Nanometer besitzen.



Matthias Bode