

„Die fachliche Kompetenz und die ausgezeichnete Infrastruktur am WMI ermöglichen es mir, meinen Beitrag zur aktuellen Forschung zu leisten und mich persönlich weiterzuentwickeln.“

Doktorand Lukas Liensberger (r.) baut im WMI-Optiklabor mit einem Teamkollegen eine Probe in einen optischen Messaufbau ein.

Inmitten der zweiten Quantenrevolution: München hat sich zum **führenden deutschen Standort** für die Quantenforschung entwickelt, und die Institute der BAdW spielen eine zentrale Rolle auf dem Weg zum Munich Quantum Valley.

Von **Rudolf Gross**

Faszinierende Welt der Quanten

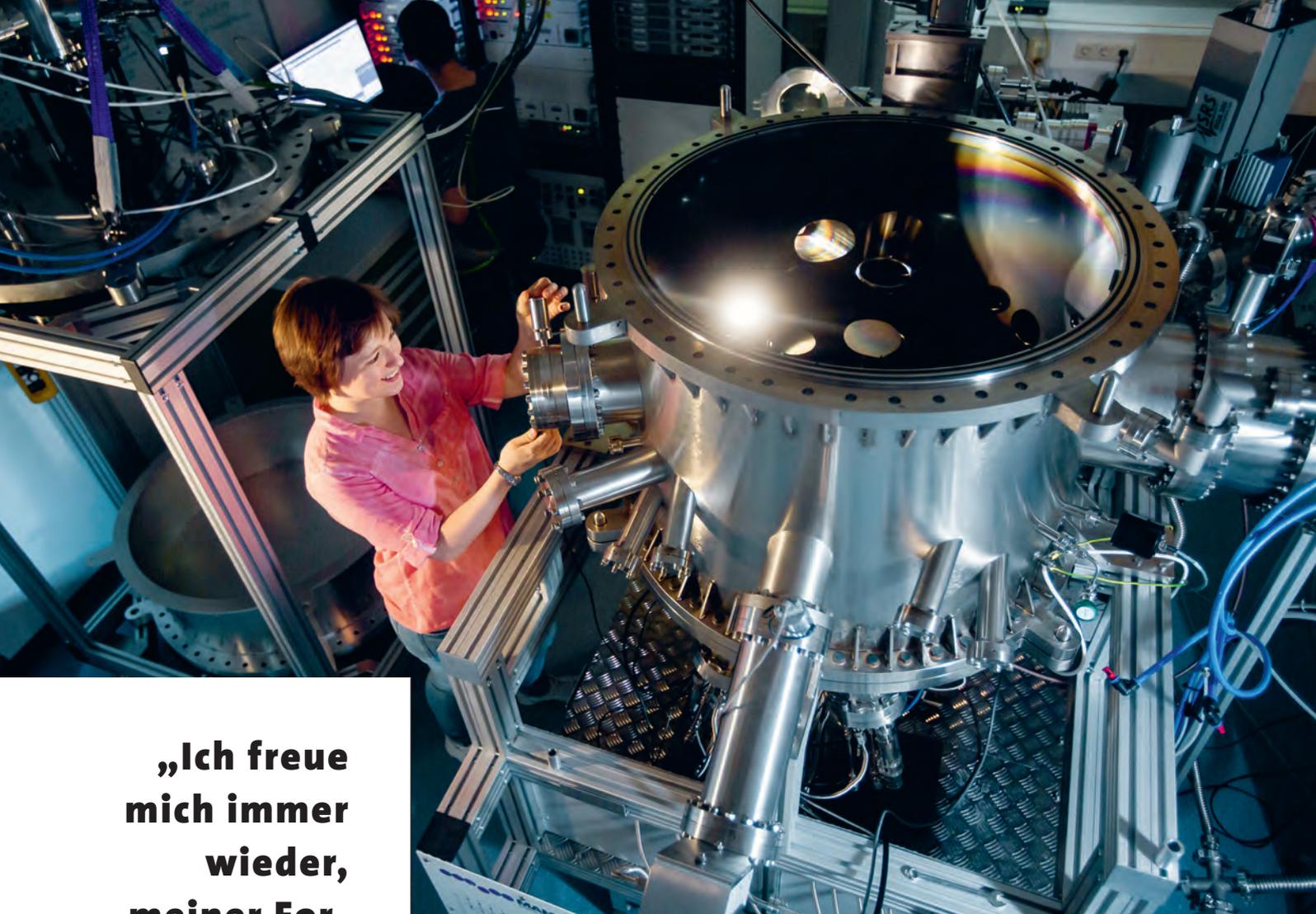
Die Welt der Quanten ist faszinierend, aber für Laien sehr seltsam und fremd. Selbst Albert Einstein wollte nicht wahrhaben, dass unsere Welt so sonderbar ist, wie es die Quantenmechanik vorhersagt. So ist das Besondere an verschränkten Teilchen, dass sie sich in einem gemeinsamen Quantenzustand befinden. Ändert ein Teilchen eine seiner Eigenschaften, dann muss das andere dies im gleichen Moment auch tun – und zwar unabhängig von der Entfernung der beiden Teilchen. Da Einstein in der Relativitätstheorie gezeigt hatte, dass sich nichts schneller als das Licht bewegen kann, glaubte er nicht, dass die Information über die Zustandsänderung des einen Teilchens das andere augenblicklich erreichen kann. Er ging deshalb davon aus, dass die Quantenmechanik falsch oder zumindest

unvollständig ist, und bezeichnete das Phänomen der verschränkten Teilchen als „spukhafte Fernwirkung“. Die Quantenmechanik wurde aber mittlerweile in zahlreichen Experimenten bestätigt. Heute gehen wir sogar einen Schritt weiter: Wir nutzen die speziellen Eigenschaften von Quantensystemen wie etwa die Verschränkung gezielt aus, um interessante Anwendungen zu realisieren. Sie reichen von Quantencomputern über Quantenkryptographie und Quantensensoren bis zu neuen Quantenmaterialien.

Die erste Quantenrevolution

Um das Spektrum der von einem heißen Körper (z. B. einer Herdplatte) emittierten Strahlung zu beschreiben, musste Max Planck im Jahr 1900 annehmen, dass Strahlung mit einer Frequenz ν nur

in kleinen Energieportionen $E = h \cdot \nu$ – sogenannten Strahlungsquanten – abgegeben wird. Die Konstante h wird heute nach Max Planck als Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet. Damit legte er den Grundstein für die Quantenphysik, deren theoretisches Fundament – die Quantenmechanik – später u. a. durch Heisenberg, Born, Jordan und Schrödinger entwickelt wurde. Mit der Quantenmechanik können wir das Verhalten von mikroskopischen Teilchen wie Atomen oder Molekülen verstehen, wir brauchen sie aber auch zur Beschreibung von makroskopischen Festkörpern wie Halbleitern, Supraleitern oder magnetischen Materialien. Die Funktionsweise einer enormen Zahl von Alltagsgegenständen – Computerchips, Laserpointer, Leuchtdioden, Flachbildschirme oder einfache Haftmagnete – beruht auf der Quantenphysik.



„Ich freue mich immer wieder, meiner Forscherneugier in der großartigen Atmosphäre des Instituts freien Lauf zu lassen.“

WMI-Doktorandin **Janine Gückelhorn** trifft Vorbereitungen an einer Ultrahochvakuum-Sputteranlage für die Herstellung hochreiner Metallschichten.

Die zweite Quantenrevolution

In den vergangenen zwei Jahrzehnten entfaltete sich erneut eine Quantenrevolution, da wir gelernt haben, Quantensysteme maßgeschneidert herzustellen, zu kontrollieren und gezielt zu manipulieren. Wir sind also keine passiven Beobachter mehr, die das Verhalten der Natur mit der Quantenmechanik beschreiben, sondern stellen aktiv Quantensysteme her und können damit so faszinierende Dinge wie Quantencomputer realisieren. Dabei nutzen wir gezielt das Phänomen der Verschränkung aus, einer genuinen Quanteneigenschaft ohne klassisches Analogon. Ein wichtiger Aspekt ist nun ist die Verschmelzung von Quantenwissenschaften und Informationstechnik, die beide unsere Welt im 20. Jahrhundert revolutioniert haben, zur neuen Disziplin der Quanteninformationswissenschaften.

Die raschen Fortschritte in der Grundlagenforschung und bei der Entwicklung

von Quantentechnologien machen es heute möglich, Quantensysteme für den Bau von Quantencomputern und Quantenkommunikationssystemen zu nutzen, aber auch, um neuartige Quantensensoren und Quantenmaterialien zu realisieren. Das Anwendungspotential ist entsprechend groß. Man erwartet, dass Quantencomputer komplexe Probleme lösen können, die sich selbst auf den leistungsfähigsten Supercomputern nicht berechnen lassen. Dies eröffnet unvorhergesehene Möglichkeiten bei der Lösung komplexer Optimierungsprobleme, bei der Entwicklung neuer Materialien, maßgeschneiderter chemischer Verbindungen und Pharmazeutika, in der Bewertung von Investmentstrategien und Wirtschaftsentwicklungen im Finanzwesen, aber auch bei Anwendungen im Bereich des Maschinellen Lernens und der Künstlichen Intelligenz. Die Quantenkommunikation wird dank abhörsicherem Schlüsselaustausch ein Kernbestandteil zukünftiger sicherer

Datennetzwerke und Plattformen gegen Cyberangriffe sein. Quantentechnologien werden auch die Entwicklung einer neuen Generation von Sensoren und Uhren möglich machen, mit weitreichendem Einfluss auf Navigation, Medizin, Biologie und Verkehr.

Genauso wie Halbleiter die Technologiebasis für unsere heutige Mikroelektronik bilden, brauchen Anwendungen im Bereich der Quantentechnologien geeignete Hardware-Plattformen. Der Auswahlprozess ist aber noch nicht abgeschlossen. Während beim Quantencomputing Firmen wie IBM, Google oder das finnisch-deutsche Start-up IQM auf supraleitende Systeme setzen, schwört das österreichische Start-up AQT auf in Fallen eingefangene Ionen. Der auch im Bereich der Quantensensorik und -kryptographie vorhandene Wettbewerb alternativer Technologiekonzepte wird wohl noch einige Jahre andauern. Mit dem zunehmenden Transfer der Quantentechnologien in die Industrie werden Aspekte der Systemintegration immer wichtiger. So müssen bei der Entwicklung von Quantencomputern Hardware und Software zusammen mit den Steuerungs- und Kontrollsystemen entwickelt werden, und die Anbindung an klassische Großrechner sowie der Zugang über Cloudsysteme müssen von Anfang an berücksichtigt werden.

Quantenforschung an der BAdW

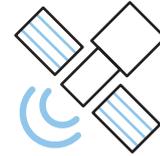
Das Walther-Meißner-Institut (WMI) der BAdW beschäftigt sich seit seiner Gründung im Jahr 1946 mit der Erforschung von Quantenphänomenen, insbesondere in supraleitenden und magnetischen Materialien. Da der nach dem Institutsgründer benannte Meißner-Ochsenfeld-Effekt ein reines Quantenphänomen ist, ist die Quantenphysik quasi im Institutsnamen verankert. Ein frühes, historisch sehr bedeutendes Quantenexperiment am WMI war 1961 der Nachweis der Fluss-Quantisierung in Supraleitern durch Robert Doll und Martin Näbauer. Sie zeigten, dass der in einem supraleitenden Hohlzylinder eingefangene magnetische Fluss in Einheiten von $h/2e$ (h ist das Plancksche Wirkungsquantum, e ist die Elementarladung) quantisiert ist. Mit diesem Experiment wurde erstmals die

Existenz von gepaarten Elektronen – sogenannten Cooper-Paaren – in Supraleitern nachgewiesen. Genauso bedeutend war die Entdeckung des intrinsischen Josephson-Effekts in Hochtemperatur-Supraleitern durch Reinhold Kleiner und Paul Müller im Jahr 1992.

In den letzten 20 Jahren trägt das WMI maßgeblich zur zweiten Quantenrevolution bei, angefangen beim vom WMI koordinierten DFG-Sonderforschungsbereich 631 zu „Festkörperbasierten Quanteninformationssystemen“ (2003–2015), dem ersten SFB zu diesem Thema in Deutschland. Ziel war die Entwicklung der physikalischen Konzepte und die Untersuchung der Materialaspekte für den Einsatz von halbleitenden, supraleitenden, magnetischen und photonischen Materialsystemen in der Quanteninformationstechnologie. Diese Forschungsrichtung ist bis heute hochaktuell, da Festkörpersysteme mithilfe etablierter Technologien wie der Dünnschicht- und Nanotechnologie maßgeschneidert hergestellt werden können und einer Skalierung zu größeren Systemen prinzipiell nichts im Wege steht. Festkörperbasierte Quantensysteme sind deshalb vielversprechende Technologieplattformen für die Quantentechnologien. Die erfolgreichen Forschungen im SFB 631 wurden im Exzellenzcluster „Nanosystems Initiative Munich (NIM)“ (2006–2019) und ab 2019 im Exzellenzcluster „Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)“ fortgesetzt, für den das WMI einen Sprecher stellt. Durch die Zusammenarbeit der beiden Münchner Universitäten mit der BAdW und der Max-Planck-Gesellschaft werden in MCQST Quantenwissenschaften und -technologien in einer Breite und Tiefe bearbeitet, wie es weltweit wohl einmalig ist.

Das WMI hat mit zahlreichen Pionierarbeiten zum Erfolg der Quantenforschung im Großraum München beigetragen. So wurde 2010 in Experimenten, in denen die Wechselwirkung zwischen einem künstlichen Festkörperatom und einzelnen Mikrowellenphotonen untersucht wurde, erstmals eine ultrastarke Licht-Materie-Wechselwirkung erreicht und damit ein neues Teilgebiet der Quantenelektrodynamik eröffnet. Eine starke Kopplung konnte 2013 auch erstmals zwischen Mikrowellenphotonen und

Quantensensorik und -metrologie: zukünftige Anwendungen



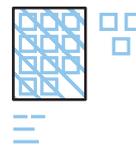
Erdbeobachtung

Sehr genaue Messung von Gravitationskräften, magnetischen und elektrischen Feldern



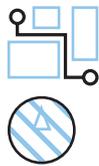
Medizintechnik

Präzisere Sensoren helfen, Krankheiten früher zu erkennen und zu behandeln



Datenspeicherung

Entwicklung von Schreib-Leseköpfen, die Festplatten mit größeren Datenmengen beschreiben



Navigation

Genauere Navigationssysteme für Luft-, Raum- und Schifffahrt sowie autonomes Fahren



Klimaschutz

Präzisere Messung klimatischer Veränderungen für besseren Klimaschutz und frühzeitige Erkennung von Naturkatastrophen



Ultrapräzise Uhren

Synchronisation großer Datennetzwerke oder Radioteleskope, Verbesserung von Zeitskalen, globale Satellitennavigation

Magnonen erzielt und damit der Grundstein für das bis heute stark wachsende Arbeitsgebiet der „Cavity Spintronics“ gelegt werden. Im Bereich magnetischer Quantenmaterialien wurde 2013 in einer Zusammenarbeit mit der Tohoku University in Sendai mit dem Spin-Hall-Magnetwiderstand ein neuer magnetoresistiver Effekt entdeckt, und 2017 wurde am WMI weltweit erstmals der Spin-Nernst-Effekt nachgewiesen. Nicht unerwähnt bleiben sollte eine wichtige technische Entwicklung: Das WMI hat 2002 den ersten „trockenen“ Mischkühler realisiert. Diese neuartigen Kühlsysteme zur Erzeugung von Temperaturen bis nahe am absoluten Nullpunkt kommen ohne flüssiges Helium aus. Sie haben die Kühltechnik revolutioniert, und der Betrieb von supraleitenden Quantencomputern wäre ohne sie wohl nicht möglich.

Eine weltweit führende Stellung nimmt das WMI im Bereich der Quantenkommunikation und der Quantensensorik im Mikrowellenbereich ein. Vor Kurzem wurde am Institut erstmals ein Teleportations-Experiment im Mikrowellenbereich realisiert. Aktuell wird im Rahmen eines EU Quantum Flagship-Projekts ein „Cryolink“ entwickelt, mit dem supraleitende Quantencomputer vernetzt werden können. In einem BMBF-Projekt werden die Grundlagen für ein Quantenradarsystem erforscht.

Mit der Berufung von Stefan Filipp als neuem wissenschaftlichem Direktor 2020 baut das WMI seine Anstrengungen zum Bau eines supraleitenden Quantencomputers stark aus. Diese Hardware-orientierten Aktivitäten werden vom Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) der BAdW, das sich mit der Anbindung von Quantencomputern an Großrechner und die Etablierung eines Benutzerbetriebs beschäftigt, ideal ergänzt. In zwei mit insgesamt 26,6 Mio. Euro geförderten BMBF-Projekten arbeiten WMI und LRZ seit Anfang 2021 an Prozessoren für das Quantencomputing, und vor Kurzem hat der Freistaat Bayern am LRZ das Quantum Integration Center eröffnet.

Das Quantenrennen hat begonnen

Quantentechnologien werden ohne Zweifel langfristig eine große wirtschaftliche

Relevanz erlangen. Alle führenden Industrienationen haben das hohe Innovationspotential dieses Technologiefelds erkannt und Förderinitiativen gestartet. Die USA (National Quantum Initiative Act), die EU (Quantum Flagship), Großbritannien (UK Quantum Technology Program) und vor allem China zählen zu den größten Investoren. Deutschland hat seit einigen Jahren gut strukturierte Förderprogramme zu den Gebieten Quantensensorik und Quantenkommunikation, ist aber erst im vergangenen Jahr mit dem Konjunktur- und Krisenbewältigungspaket und der darin enthaltenen Zuweisung von etwa 2 Mrd. Euro in das internationale Rennen zum Bau eines Quantencomputers eingestiegen. In den USA ist das Feld Quantencomputing durch die Beteiligung großer IT-Unternehmen wie IBM, Google oder Microsoft besonders sichtbar und aktiv. Gleichzeitig haben dort große Investitionen von Venture-Capital-Firmen zur Gründung einer Vielzahl von Start-up-Unternehmen geführt.

Hervorragende Ausgangssituation in Bayern

Deutschland hat eine sehr gut aufgestellte Forschungslandschaft mit einem international hochsichtbaren Zentrum in München sowie eine Vielzahl von Unternehmen mit Erfahrung in der Entwicklung und Integration neuer Technologien. Deutschland ist deshalb für das Rennen um die wirtschaftliche Ausnutzung der Quantentechnologien in einer sehr guten Startposition. Um im internationalen Wettbewerb langfristig bestehen zu können, muss aber jetzt mutig und entschlossen gehandelt werden. Mit der Gründung des Munich Quantum Valley, das bis 2025 mit 300 Mio. Euro gefördert werden soll, hat die bayerische Staatsregierung Anfang des Jahres diesen Mut und Weitsicht bewiesen. Bayern hat sich durch die frühzeitige Positionierung seiner Forschungseinrichtungen und seine vorausschauende Forschungspolitik eine hervorragende Ausgangsposition im internationalen Wettbewerb verschafft. Neben dem Standort München, der das Themengebiet Quantentechnologien so umfassend und kompetent abdeckt wie kein anderer Standort in Deutschland, gibt es auf Teilthemen fokussierte



„Mit meiner Forschung erhoffe ich mir, wichtige Grundbausteine für neuartige Computertechnologien zu entwickeln.“

Korbinian Rubenbauer, Master-Student am WMI, füllt flüssigen Stickstoff in einen Kryostaten (links), um ihn zu kühlen. Der Kryostat enthält einen 3D-Vektor-Magneten, mit dem man Proben magnetisch untersuchen kann.

Zentren an der Universität Würzburg, am Standort Erlangen/Nürnberg (MPI für die Physik des Lichts, Universität Erlangen-Nürnberg, Fraunhofer-Institute IISB und IIS) sowie an den Universitäten Augsburg und Regensburg.

Das Munich Quantum Valley

Während Bayern im Bereich Quantenforschung also sehr gut aufgestellt und gut vernetzt ist, besteht Nachholbedarf hinsichtlich der Einrichtung eines international kompetitiven Zentrums, das Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf potentielle Anwendungsfelder koordiniert, zielgerichtet den Technologietransfer in den industriellen Bereich unterstützt, in wirtschaftlich wichtigen Bereichen Hardware-Entwicklung mit

dem Ziel der Technologiesouveränität betreibt und mit einem Quantentechnologiepark die Gründung von Startup-Unternehmen fördert. Diese Defizite sollen jetzt durch das Munich Quantum Valley beseitigt werden. Durch die Einrichtung eines Zentrums für Quantencomputing & Quantentechnologien, durch die Errichtung eines Quantentechnologieparks und Maßnahmen zur wissenschaftlichen Qualifizierung und Weiterbildung einer neuen Generation von Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Informatikern soll das Munich Quantum Valley einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung einer nationalen und europäischen Strategie leisten und mit internationalen Zentren wie dem Silicon Valley, Boston, Shanghai und Tokyo auf Augenhöhe agieren.

Prof. Dr. Rudolf Gross

ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Physik an der TU München, Mitglied der BAdW und Direktor ihres Walther-Meißner-Instituts. Seine Forschungsschwerpunkte sind Tieftemperatur-Festkörperphysik, Quantentechnologie, Supraleitung, Magnetismus, Spinelektronik und Nanotechnologie. Er ist einer der Sprecher des Clusters „Münchener Zentrum für Quantenwissenschaften und -technologie“ (MCQST).