

Das neue Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ) an der PTB

Nicolas Spethmann¹

Einführung

In den letzten Jahrzehnten hat das rasante Fortschreiten der technologischen Entwicklung zu atemberaubenden Durchbrüchen in der Quantenphysik geführt. Insbesondere die Kontrolle über einzelne Quantenobjekte und das Präparieren, Untersuchen und Manipulieren von wohldefinierten Quanteneffekten ist hierdurch in zunehmendem Maße ermöglicht worden. Diese Meilensteine der Quantenwissenschaften wurden unter anderem durch einige Nobelpreise gewürdigt. Exemplarisch seien hier die Laserkühlung (1997, Cohen-Tannoudji, Philips), der Frequenzkamm (2005, Hall, Hänsch und Glauber) und das Manipulieren einzelner Quantensysteme (2012, Haroche und Wineland) genannt.

Diese Entwicklung an der wissenschaftlichen Front bedeutet auch eine neue Qualität in der Entwicklung von Technologie. Der Übergang – von der Beschreibung und dem Verstehen von existierenden physikalischen Systemen mithilfe

der Quantenphysik hin zur gezielten Ausnutzung von maßgeschneiderten Quanteneffekten und der Kontrolle und Manipulation von einzelnen Quantenteilchen – wird häufig als „2. Quantenrevolution“ bezeichnet. Hierdurch werden neue, mit klassischen Methoden nicht zugängliche Bereiche erschlossen, verbunden mit einem hohen wirtschaftlichen Potenzial für neuartige Anwendungen. Zur Hebung dieses Potenzials ist die Überführung der Quantentechnologie (QT) aus dem Grundlagenforschungslabor in die kommerzielle und großskalige Nutzung notwendig. Diese Aufgabe soll durch das neue QTZ in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung unterstützt werden.

An der PTB sind Quantentechnologien im Rahmen der Grundbeauftragung ein großes und vielfältiges Themenfeld, das sowohl Fragen der Grundlagenforschung als auch industrielle Anwendungsfälle umfasst. Beide Aspekte sind Teil der gesetzlichen Beauftragung der PTB. Insbesondere in der Quantenmetrologie und bei Quantensensoren

¹ Dr. Nicolas Spethmann, Präsidialer Stab/Quantentechnologie-Kompetenzzentrum QTZ und QUEST | Institut an der PTB, E-Mail: nicolas.spethmann@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0002-8983-0873>

Abbildung 1.1: QT an der PTB



ist die PTB dabei eine weltweit führende Institution. Beispiele für diese Spitzenforschung sind hochgenaue Quantenstandards für elektrische Größen, empfindliche Sensoren für medizinische Anwendungen, mikrostrukturierte für Quantensimulation, Quantencomputer und Metrologie zur empfindlichen Messung von Magnetfeldern, Einzelphotonenquellen und -detektoren für die Quantenradiometrie und Quantenkryptografie sowie ultrastabile und genaue optische Uhren (Abbildung 1.1). Diese Bündelung von QT-Infrastruktur und -Expertise unter einem Dach, in Verbindung mit exzellenter Ausstattung und ausgezeichneten, sehr erfahrenen Wissenschaftlern zeichnet die PTB aus.

Themenfelder der QT für die Wirtschaft

Mögliche Anwendungen der QT in der Wirtschaft der Zukunft decken einen weiten Bereich von Themenfeldern ab. Dabei sind die möglichen Anwendungen oft durch ein großes Potenzial für qualitativ und quantitativ neue Möglichkeiten gekennzeichnet, die zu disruptiven Entwicklungen in unserer Ökonomie und Gesellschaft führen können.

Quantencomputer bieten ein großes Potenzial, bestimmte Probleme in deutlich kürzerer Zeit zu lösen, als dies auf klassischen Computern möglich wäre. Die Auswirkungen reichen hier von einem ganz neuen Ansatz für Optimierungsprobleme bis zur Überwindung von klassischen Verschlüsselungsalgorithmen, mit entsprechend weitreichenden Konsequenzen. Allerdings sind bis zu einem einsatzfähigen und tatsächlich effektiv nutzbaren universellen Quantencomputer viele Fortschritte erforderlich, deren Erreichen noch nicht absehbar ist. An der PTB hat die Gruppe von Christian Ospelkaus eine auf einer patentierten Ionenfallentechnologie basierende, skalierbare Architektur entwickelt, die sich durch die Verwendung von Mikrowellen für Quantengatter im Gegensatz zu den üblichen Lasern auszeichnet (siehe [Quantenvielteilchenphysik und Quantencomputer](#) in diesem Heft).

Die **Quantensimulation** stellt demgegenüber durch den „Nachbau“ von spezifischen, oft komplexen Quantensystemen eine spezialisiertere Form zur Lösung von Problemen und der Untersuchung von Quantenphänomenen dar. Hier gibt es eine ganze Reihe an Realisierungen und eine klare Perspektive zur Weiterentwicklung, die die Quantensimulation als Brückentechnologie zwischen klassischen Supercomputern und universellen Quantencomputern interessant macht. An der PTB verfolgen die Gruppen von Tanja Mehlstäubler und Christian Ospelkaus Quantensimulationen basierend auf Ionen, ermöglicht durch die an der PTB entwickelte Ionenfallentechnologie (siehe [Mikrostrukturierte Ionenfallen](#) in diesem Heft).

Ein Bereich, für den bereits diverse Prototypen und erste Produkte existieren, ist die **Quantenkommunikation und -verschlüsselung**. Die Quantenkryptografie nutzt die grundlegende Eigenschaft der Quantenphysik, dass jede Beobachtung ein geeignet präpariertes Quantensystem messbar stört. Hierdurch wird es möglich, das Abhören eines Kommunikationskanals eindeutig feststellbar und diesen damit abhörsicher zu machen. Dies stellt einen Paradigmenwechsel im Vergleich zur aktuellen Technologie dar, die zumindest prinzipiell das Entschlüsseln von Kommunikation erlaubt, gegebenenfalls auch von gespeicherter Kommunikation in der Zukunft. Für die Quantenkommunikation ist in vielen Fällen das Arbeiten mit einzelnen Photonen notwendig. Hierfür ist die entsprechende Metrologie zur Charakterisierung von Einzelphotonenquellen und -detektoren und allen weiteren Komponenten eines solchen Systems zwingend erforderlich, um eine nachweisbar „quantensichere“ Kommunikation zu gewährleisten. Hier bietet die PTB Expertise in der Einzelphotonenmetrologie (siehe [Einzelphotonenmetrologie](#) in diesem Heft).

Quantensensoren erlauben durch das gezielte Ausnutzen von Quanteneffekten und durch die typischerweise ausgezeichnete Kontrolle über das zugrundeliegende Quantensystem neue Anwendungen mit bisher nicht realisierbaren Möglichkeiten. Oft bieten diese Systeme die Perspektive für eine überlegene Sensitivität, die so nicht mit klassischen Systemen erreichbar wäre. Darüber hinaus sind in vielen Bereichen völlig neue und zu klassischen Techniken komplementäre Ansätze möglich, wie beispielsweise die relativistische Geodäsie mithilfe von Atomuhren (siehe [Quantenlogik-Spektroskopie](#) in diesem Heft), Atominterferometrie für die Inertialsensorik (siehe [Quantenmetrologie mit Materiewellen](#) in diesem Heft) und neue Möglichkeiten im Bereich der Quantenmagnetfeldsensoren in der Grundlagenforschung aber auch in der Medizintechnik (siehe [Ultrasensitive magnetometry using quantum-based sensor technology](#) in diesem Heft). Ein weiteres Beispiel sind quantengenaue, arbiträre Wellenformgeneratoren (siehe [PTB-Mitteilungen 3/2016](#)), die durch die universelle Rolle elektrischer Signale in Technik und Forschung sehr großes Potenzial haben.

Die zentrale Idee des im Aufbau befindlichen QTZ ist es, diese an der PTB breit aufgestellte und hervorragende QT-Expertise und -Infrastruktur aufzunehmen und externe Partner aus Industrie und Forschung zu unterstützen, diese in Anwendungen und kommerzielle Produkte weiterzuentwickeln. Dabei soll das QTZ als zentrale Anlaufstelle in Sachen QT für Industrie und Forschung dienen und mit dem Transfer in die QT-Anwendung die Spitzenforschung an der PTB um wichtige Aspekte ergänzen (siehe [Abbil-](#)

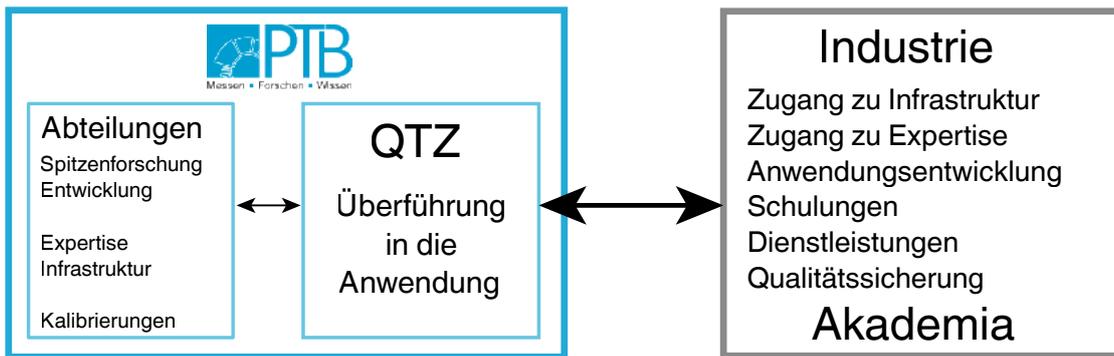


Abbildung 1.2: QTZ als zentrale Anlaufstelle für die QT an der PTB

Abbildung 1.2). Dies ermöglicht es, das Expertenwissen der PTB und Ihre Rolle als nationales Metrologieinstitut für die Ausschöpfung des Potenzials der Quantentechnologien effektiv zu nutzen, um optimalen gesellschaftlichen und ökonomischen Mehrwert zu erzeugen. Der Fokus des QTZ ist dabei die metrologische Begleitung, die wesentlich für alle Themen der QT ist.

Konzept und Aktionsfelder des QTZ

Die vier Hauptaktionsfelder sind in **Abbildung 1.3** illustriert. Das QTZ soll die Entwicklung anwenderfreundlicher und robuster QT-Demonstratoren und -Komponenten fördern, Qualität in der QT durch Dienstleistung und Zertifizierungen sicherstellen und Anwenderplattformen bereitstellen, die externen Partnern aus Industrie und Wissenschaft zugänglich sind. Darüber hinaus wird das QTZ praktische Schulungen und Seminare für Quantentechnologie anbieten und Start-ups unterstützen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vermittlung der Möglichkeiten und Grenzen der QT in der Öffentlichkeit.

Robuste Komponenten und Technologien. Das Ziel dieser Aktionsfelder ist es, die Entwicklung der QT von der Grundlagenforschung weiter in Richtung Anwendung zu treiben. Hierzu sollen vorhandene Apparaturen, die typischerweise eine enge Betreuung von Wissenschaftlern erfordern und sich auf einzelne Laboraufbauten unter sehr gut kontrollierten Bedingungen beschränken, transferiert werden in robuste und anwenderfreundliche QT-Komponenten und

„Geräte“, die auch von Nicht-Experten in weniger gut geschützten Umgebungen genutzt werden können. Damit soll der Einsatz von bereits in der PTB (und anderen Forschungsinstitutionen) etablierten QT-Komponenten (wie beispielsweise Spannungsnormalen, Quantenmagnetfeldsensoren, Frequenznormalen und weiteren) im Praxiseinsatz, z. B. in der rauerer Umgebung eines Industriebetriebes, ermöglicht werden. Dabei ist entscheidend, dass diese Entwicklung in Zusammenarbeit mit Partnern geschieht. Partner mit einem unternehmerischen Hintergrund werden benötigt, um die Entwicklung in eine ökonomisch nutzbare Richtung voranzutreiben. Dadurch wird eine Kombination der komplementären Expertise erreicht: Das QTZ trägt wissenschaftliches und technisches Fachwissen und Infrastruktur aus der Spitzenforschung bei, der Unternehmenspartner steuert beispielsweise Wissen über Systemintegration, Aspekte des Marktes, und effiziente und kosteneffektive Fertigung bei.

Kalibrierungen und Dienstleistungen. Eine wichtige Voraussetzung für die kommerzielle Nutzung sind verlässliche und vergleichbare QT-Komponenten und die Sicherstellung und Zertifizierung von Spezifikationen zur Qualitätssicherung. Hierfür sollen Kalibrierungen und entsprechende Dienstleistungen im Rahmen des QTZ angeboten werden. Als Beispiele seien hier Vergleiche von Uhren und Frequenznormalen im Bereich besser als 10^{-15} , von Spannungsquellen besser als 10^{-9} , sowie die verlässliche Charakterisierung von Ionenfallen für Metrologie und Quantencomputer genannt. In vielen Fällen gibt es



Abbildung 1.3: Hauptaktionsfelder des QTZ

aktuell weder in Deutschland noch darüber hinaus Institutionen, die diese Möglichkeiten anbieten. Die PTB kann hier zudem als unabhängiges, nationales Metrologieinstitut eine wichtige Vertrauensbasis für die QT schaffen. Im Rahmen dieser Aktivitäten können auch Standards für die QT erarbeitet werden, die eine wichtige Voraussetzung für zukünftige QT-Produkte im Markt darstellen. Erste Aktivitäten hierzu finden auf nationaler und europäischer Ebene statt. All diese Aspekte sind entscheidend, um eine nachhaltige und sinnvolle Entwicklung der QT für die Wirtschaft zu gewährleisten, realistische Abschätzungen zum Potenzial der QT zu ermöglichen und auch den teilweise überzogenen Erwartungen an die QT entgegenzustellen. Damit wird eine belastungsfähige Basis für den Weg der QT in den Markt geschaffen.

Hands-on-Training, quantum education, quantum awareness und Unterstützung von Start-ups. Für das Heben des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Potenzials der QT ist es entscheidend, die Menschen bei der Entfaltung der Möglichkeiten der QT mitzunehmen und bei der potenziell disruptiven Entwicklung einzubinden. Dies betrifft einerseits die breite Öffentlichkeit: Es ist wichtig, das Potenzial der QT zu vermitteln und möglichen Wahrnehmungen als „spukhaft“ oder „mysteriös“ entgegenzuwirken und stattdessen klarzumachen, dass die QT auf harter Wissenschaft und ausgezeichnet etablierter Technologie basiert. Auf der anderen Seite ist auch die Ausbildung an Schule und Universität und besonders in der Industrie entscheidend. Technische Infrastruktur und Apparaturen allein sind nicht ausreichend – nur wenn es eine ausreichend große und gut ausgebildete Menge an qualifiziertem Personal gibt, kann die Umsetzung in Anwendung und Nutzung der QT effektiv funktionieren.

Die QT besitzt dabei die besondere Herausforderung, dass mit der Quantenphysik ein sehr Grundlagen-nahes Gebiet mit ingenieurtechnischen Ansätzen verbunden werden muss, um verlässliche, ausentwickelte und auch von Nicht-Wissenschaftlern nutzbare Geräte und Komponenten zu realisieren. Eine Möglichkeit ist es, bei der studentischen Grundausbildung an Universitäten anzusetzen. So werden in jüngster Zeit an einigen Universitäten bereits Quantentechnologie-Studiengänge angeboten (Studiengang *Quantum Engineering* der Universität des Saarlandes, Graduiertenschule *Berlin School of Optical Sciences and Quantum Technology* (BOS.QT) in Berlin und weitere) oder entwickelt (im Rahmen des Exzellenzclusters *QuantumFrontiers* an der LUH und des TUBS). Allerdings sind die so ausgebildeten Fachkräfte erst in einigen Jahren verfügbar, sodass komplementär hierzu auch Angebote für die Weiterbildung von bereits im Berufsleben stehendem Personal erforderlich sind. So können

beispielsweise erfahrene Ingenieure, die bisher keine Berührungspunkte mit der Quantenphysik hatten, an die QT herangeführt werden. Hier setzt das QTZ an. Die in den Anwenderplattformen entstehenden QT-Demonstratoren können genutzt werden, um Training an bewährten und laufenden Apparaturen zu bieten. Die bereits an der PTB bestehenden Verbindungen zu wichtigen Akteuren aus der Industrie bieten einen ausgezeichneten Ausgangspunkt, um zeitnah und nach Bedarf eine *quantum work force* auszubilden.

Eine weitere gute Möglichkeit, das an der PTB vorhandene QT-Know-how in die Anwendung und den Markt zu bringen, besteht in der Anregung und Förderung von Unternehmensgründungen. Gerade für junge Unternehmen und Start-ups besteht eine große Hürde in die QT einzusteigen, da typischerweise komplexe und teure Apparaturen erforderlich sind, die riskante Investitionen erfordern. Hier können die QT-Demonstratoren des QTZ und die Erfahrung der PTB in der QT wertvolle Unterstützung liefern. Start-ups zeichnen sich durch ein hohes Maß an Agilität und Flexibilität aus. Hierzu gibt es im Technologietransfer der PTB langjährige Erfahrungen.

Entstehende Infrastruktur und Anwenderplattformen im QTZ

Ein zentraler Bestandteil für die Verfolgung aller Ziele des QTZ sind die Anwenderplattformen – sie bilden wesentliche Kernkompetenzen der PTB in der QT ab und stellen entsprechende Apparaturen, Messplätze und Demonstratoren zur Verfügung. Der Schwerpunkt liegt, entsprechend der Ausrichtung der PTB, in der Quantenmetrologie und Quantensensorik. Beim Aufbau dieser Messplätze stehen Robustheit und Anwenderfreundlichkeit im Vordergrund, was sie von Aufbauten zur Grundlagenforschung an den Grenzen des technisch Umsetzbaren unterscheidet. Damit soll auch der Betrieb dieser Apparaturen durch Nicht-Experten ermöglicht werden. Diese so zur relativ unkomplizierten Nutzung ausgelegten Messplätze sollen, unterstützt von Personal und Infrastruktur der PTB, von externen Partnern genutzt werden können.

Büroräume (beispielsweise im neu entstehenden Lummer-Pringsheim-Bau) erlauben für diese Partner auch den längeren Aufenthalt am QTZ und die ausgiebige Nutzung der Anwenderplattformen. Das Ziel ist es hier, Partnern eigene Erfahrungen in der QT zu ermöglichen, ohne dass diese selbst die Infrastruktur aufbauen müssen, die gerade in der QT typischerweise sehr hohe Investitionen und Vorlaufzeiten verlangt. Fehlt der Kontakt und mangelnde Erfahrung mit den eingesetzten Techniken bzw. deren zeitaufwendiger Aufbau stellen eine weitere Herausforderung

rung für Unternehmen, insbesondere kleine und mittlere (KMU), dar. Gerade in einem potenziell sehr dynamischen und disruptiven Feld wie der QT kann dies ein großer und schwer aufzuholender Nachteil in der Konkurrenzfähigkeit sein, den das QTZ überbrücken helfen soll. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist es, mögliche oder erwartete Vorteile der QT gegenüber klassischen Lösungen in der Praxis und unterstützt durch das QTZ testen und bewerten zu können.

Im Folgenden werden kurz die bisher im Rahmen des QTZ aufgenommenen Themen und im Aufbau befindlichen Anwenderplattformen und QT-Demonstratoren beschrieben und konkrete Beispiele für die Ansätze und Ziele oben gegeben. Die Anwenderplattformen können hier zu allen oben beschriebenen Aktivitäten (Pfeiler) beitragen und damit auf breiter Front zur Unterstützung der QT genutzt werden.

Elektrische Quantenmetrologie. Die PTB forscht und entwickelt seit vielen Jahren im Bereich elektrischer Quantennormale. Sie verfügt als weltweit einziges nationales Metrologieinstitut über vollständige Fertigungslinien für Supraleiter- und Halbleiter-Quantennormale sowie für elektrische Quantennormale aus Graphenschichten. Die heutige quantenbasierte elektrische Messtechnik deckt nur wenige elektrische Größen über enge Werte- und Frequenzbereiche ab und erfordert kostspielige Apparaturen, zu deren Bedienung ein tiefes Expertenwissen erforderlich ist. Die Industrie wird jedoch mittelfristig von den intrinsischen Vorteilen quantenbasierter elektrischer Messtechnik – hochgenaue Messungen rund um die Uhr ohne durch Rekalibrierung verursachte Ausfallzeiten – nur dann profitieren können, wenn die Betriebsbedingungen vereinfacht werden und die Bedienbarkeit durch Automatisierung erhöht wird. Das QTZ bietet die Möglichkeit, den Einsatz neuer Materialien zur Vereinfachung der Betriebsbedingungen elektrischer Quantennormale systematisch zu untersuchen und zu entwickeln. Ferner wird es das QTZ ermöglichen, die Entwicklung hochinte-

grierter elektrischer Quantenschaltungen dynamisch voranzutreiben und damit deren Größen-, Werte- und Frequenzbereiche zu erweitern sowie in enger Kooperation mit Industriepartnern die Bedienungsfreundlichkeit und die Automatisierung quantenbasierter elektrischer Messtechnik zu verbessern.

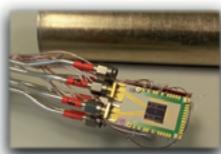
Für diese Zwecke werden aktuell drei Messplätze bzw. QT-Demonstratoren aufgebaut, die im QTZ verfügbar sein werden. Josephson-Tunnelkontakte können eingesetzt werden als Quantenspannungsnormale, also Spannungsreferenzen höchster Genauigkeit für fundamentale und angewandte metrologische Zwecke. Im QTZ wird hierfür der Messplatz „Quantenbasierte elektrische Wechselstrommesstechnik“ beruhend auf dem Einsatz solcher Josephson-Tunnelkontaktschaltungen eingerichtet und für die vorangehend genannten Zwecke kundenorientiert bereitgestellt. Ein weiterer auf Josephson-Kontakten basierender Messplatz (Josephson-Messplatz) bietet Anwendern in Industrie und Forschung die Möglichkeit, an rauscharmen quantenlimitierten Verstärkern und hochempfindlichen Detektoren für elektrische Signale zu arbeiten. Solche Bauelemente sind wichtig in Feldern wie beispielsweise ultrasensitiven Messungen, für Quantencomputer und Quantenkommunikation. Schließlich wird ein Messplatz „Widerstandsnormale“ aufgebaut mit dem Ziel der Ermöglichung von anwenderfreundlicher Quantenwiderstandsmetrologie unter erleichterten Bedingungen, abzielend auf späteren industriellen Einsatz (elektrische Quantenmetrologie *on the workshop floor*).

Ionenfallen stellen eine Schlüsseltechnologie für die QT dar. Auf Ihnen basieren aussichtsreiche Ansätze für Quantencomputer und -simulation, die das sehr hohe Maß an Isolation und Kontrolle über die Ionen als Qubits ausnutzen. Besonders in den USA verfolgen bereits einige Firmen die kommerzielle Realisierung eines einsatzfähigen universellen Quantencomputers mit großem Aufwand. Hier gibt es Initiativen sowohl von Start-ups wie

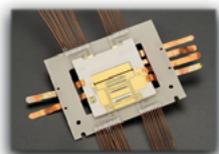
Abbildung 1.4: Am QTZ im Aufbau befindliche Infrastruktur und QT-Demonstratoren

Im Aufbau befindliche QT-Infrastruktur

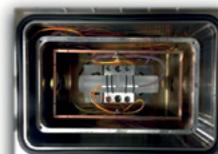
Elektrische QT



Ionenfallen



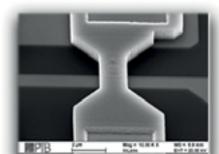
Optische Resonatoren



Einzelne Photonen



Magnetfeldsensoren



Robuste und anwenderfreundliche QT-Metrologie und quantum enabling technology

dem 2015 gegründeten IonQ, als auch Aktivitäten von großen und traditionsreichen Unternehmen wie Honeywell. In Europa ist diese Entwicklung erst in jüngster Zeit zu beobachten mit der jungen Firma *Alpine Quantum Technologies* (AQT) in Innsbruck, gegründet im Jahre 2018 von Rainer Blatt, Thomas Monz und Peter Zoller. Ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Innsbruck-Gruppe arbeitet der Halbleiterhersteller Infineon an der industriellen Herstellung von Ionenfallen.

Weiterhin eignen sich Ionenfallen ausgezeichnet für die Frequenzmetrologie. Einerseits sind hier Frequenzstandards mit allerhöchster Präzision und neue Entwicklungen, wie die Multiionenuhr, möglich (siehe *Mikrostrukturierte Ionenfallen* in diesem Heft). Andererseits wurde diese Technologie erfolgreich an der PTB von einem Konsortium von Industriepartnern und Partnern aus der Forschung im Projekt *opticlock* in die erste nah-kommerzielle optische Atomuhr der Welt umgesetzt (siehe *opticlock*).

Diese Beispiele zeigen, dass Ionenfallen bereits heute in Anwendungen eingesetzt werden, die einer kommerziellen Nutzung sehr nahe sind. Hierbei werden viele verschiedene Ansätze und Techniken angewandt, die einen direkten Vergleich sehr schwierig machen. Weiterhin gibt es keine klaren Vorgaben, auf welchen Eigenschaften solch ein Vergleich aufbauen sollte, ganz zu schweigen von Standards und Normen für Ionenfallen. Für die Bereitstellung einer solchen Charakterisierungs- und Vergleichsmöglichkeit ist ein hohes Maß an Expertise und Infrastruktur wie auch eine unabhängige Stelle notwendig. Dies ist der Ansatzpunkt dieser Anwenderplattform im Rahmen des QTZ, die verlässliche Charakterisierung, Tests und Benchmarks von Ionenfallen als Service anbieten soll und sich dabei unter anderem die Techniken, Erfahrungen und Algorithmen, die seit Jahren an der PTB erfolgreich entwickelt werden, zunutze macht. Hierfür wird mit dieser Anwenderplattform eine Apparatur aufgebaut, die für das schnelle Austauschen von Ionenfallen und automatisierte, effiziente und dabei verlässliche Charakterisierungsmessungen optimiert ist. Über die oben geschilderten Aufgaben hinaus wird damit weiterhin ein „geschlossener Zyklus“ für die Ionenfallenentwicklung geschaffen: Anstatt Prototypen in Forschungsapparaturen so lange wie möglich zu nutzen, sobald sie einmal laufen (*never touch a running system*), soll hier die Möglichkeit genutzt werden, neue Entwicklungen und Methoden an Ionenfallen schnell zu testen, ohne den Forschungsbetrieb an laufenden Apparaturen zu stören. Dies soll es Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der PTB sowie den Industriepartnern ermöglichen, Ionenfallen gezielt und kontrolliert weiterzuentwickeln. Insgesamt wird damit eine in Deutschland und darüber hinaus

einzigartige Möglichkeit für die Entwicklung der Ionenfallentechnologie geschaffen, die einen großen Standortvorteil für die deutsche und europäische Industrie darstellt.

Quantenmetrologie für Zeit und Frequenz und ultrastabile Laser. Die PTB arbeitet weltweit führend an der Entwicklung von optischen Atomuhren und der dazugehörigen Peripherie, wie z. B. mikrostrukturierten Atomfallen, ultrastabilen Lasern und Glasfaserstrecken für Frequenzübertragung und transportablen optischen Uhren (siehe *PTB-Mitteilungen 03/2018 – QT mit Atomen und Photonen Vol I*). Darauf aufbauend wurden im Rahmen von Transferprojekten und dem BMBF-Quantentechnologie-Pilotprojekt „*opticlock – Einzelionenuhr für Anwender*“ bereits einzelne Komponenten wie auch ganze transportable Uhrensyste me zusammen mit deutschen KMU entwickelt. Die deutsche Industrie ist aktuell insbesondere im Bereich der QT-Schlüsselkomponenten (*quantum-enabling technologies*) aktiv, wie beispielsweise in der Entwicklung von Lasern und speziellen aktiven und passiven optischen Elementen (siehe *PTB-Mitteilungen 03/2018 – QT mit Atomen und Photonen Vol I*). Diese Komponenten bilden das Fundament für weite Bereiche der QT, und sind unersetzlich für präzise Messungen, Zeit- und Frequenzmetrologie, und zum Manipulieren von Quantenzuständen. Hier gibt es signifikanten Bedarf an Transfer von Systemkompetenz sowie messtechnischer Unterstützung, Validierung und Charakterisierung der Komponenten auf höchstem Niveau. Relevante Prozesse sind komplex und erfordern neben Expertenwissen eine aufwendige apparative Infrastruktur. Sie können von KMU daher nicht allein umgesetzt werden. Das QTZ versetzt die PTB in die Lage, zusammen mit der Industrie die Entwicklung von zeit- und frequenzbasierten Komponenten voranzutreiben und damit neue Anwendungen zu erschließen. Weiterhin werden Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien weiterentwickelt im Hinblick auf Betriebsfestigkeit, Dauereinsatz und Nutzung durch unerfahrene Anwender, sowie die bestehende Messinfrastruktur und Charakterisierungsmöglichkeiten dieser Komponenten in Abstimmung mit der Industrie ausgebaut. Durch Validierung der Schlüsselkomponenten, Prototypen und kommerziellen Geräten durch die PTB wird die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie in diesem Bereich signifikant gestärkt.

Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie. Die PTB kalibriert Einzelphoton-Detektoren, beispielsweise *Single-Photon-Avalanche-Dioden* sowie supraleitende Nanodrahtdetektoren mit der weltweit kleinsten Messunsicherheit. Darüber hinaus entwickelt die PTB absolut charakterisierte Einzelphotonenquellen als neue Standardstrahlungsquellen für die

Radiometrie und die Quantenkommunikation. Für die flächendeckende Implementierung der Quantenkommunikation und Quantenkryptografie ist die genaue Charakterisierung der verwendeten Quellen, Detektoren und Übertragungskanäle eine unabdingbare Voraussetzung. Für die Verbreitung von industriellen Produkten in diesem Bereich ist daher eine Rückführung auf nationale Standards erforderlich. Das QTZ versetzt die PTB in die Lage, rückgeführte und damit zuverlässige Messungen auf den Gebieten der Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie für Hersteller und Nutzer anzubieten. Darüber hinaus ermöglicht es Anwendern, Komponenten für die Quantenkryptografie zu testen und den Umgang mit ihnen in den Betriebsalltag umzusetzen.

Damit wird das QTZ eine Weiterentwicklung der Metrologie in den Bereichen Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie ermöglichen, die zu einer besseren Charakterisierung der verwendeten Komponenten führen wird. Auch werden neue Einzelphotonenquellen als Standardquellen entwickelt werden, die die metrologischen Grundlagen für eine flächendeckende Implementierung der Quantenkommunikation ermöglichen wird. (siehe [Einzelphotonenmetrologie](#) in diesem Heft).

Quantenmagnetometer. Zwei Quantentechnologien, die sich bereits in der Anwendung befinden, sind supraleitende Quanteninterferometer (SQUID – *Superconducting Quantum Interference Device*) und optisch gepumpte Magnetometer (OPM) zur ultrasensitiven Magnetfeldmessung und der empfindlichen Messung aller physikalischen Größen, die sich in einen magnetischen Fluss wandeln lassen. So werden z. B. SQUID-Magnetometer schon seit Jahren erfolgreich dazu benutzt, die winzigen Magnetfelder zu messen, die von der neuronalen Aktivität des menschlichen Gehirns erzeugt werden (Magnetoenzephalografie, MEG). Weitere neue biomedizinische Analyse- und Diagnosemethoden werden unter Nutzung dieser Quantensensoren u. a. in der PTB vorangetrieben (s. a. [PTB-Mitteilungen 2/2020: Metrology in Medicine, p.15: „New Sensors for Biosignal Detection“](#)). In diesem Bereich kommt den quantenoptik-basierten OPMs eine besondere Bedeutung zu. Durch ihre deutlich kleinere Bauform ermöglichen sie die Messung von Biosignalen auf einem völlig neuen Niveau.).

Neben SQUID-Magnetometern werden in der PTB inzwischen auch SQUID-Stromsensoren für die Quantenradiometrie mit Einzelphotonendetektoren, aber auch für eine Vielzahl von Experimenten im Bereich der Grundlagenforschung entwickelt und Anwendern zugänglich gemacht. Die PTB verfügt in diesem Bereich über eine weltweit einzigartige Infrastruktur sowohl im Bereich

der Supraleiter-Dünnschichttechnologien als auch in Bezug auf die zur Verfügung stehende spezielle Messtechnik. Sie betreibt mit dem BMSR-2 (*Berlin Magnetically Shielded Room 2*) ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Gerätezentrum (2017–2020), um die quantenbasierte Magnetfeldmesstechnik für ultra-niedrige Magnetfelder externen Nutzern zugänglich zu machen.

Supraleitersensorentwicklungen wurden von der PTB bereits im Rahmen eines Technologietransfers in kleinem Umfang kommerzialisiert, um der Nachfrage an entsprechenden Bauelementen und kompletten Systemen zu entsprechen. Mit dem im Bau befindlichen Walther-Meißner-Bau auf dem PTB-Campus Berlin wird diese Infrastruktur weiter ausgebaut. Das QTZ wird einen entscheidenden Beitrag leisten, die Supraleitersensortechnologie konsequent einer breiteren, vor allem auch industriellen Nutzung, zuzuführen und KMU, die in diesem Bereich Produkte entwickeln, zu unterstützen. Eine Hürde ist hier, dass, anders als bei der Halbleitersensorik, die Standardisierung von technologischen Prozessen, elektronischen Parametern, Messverfahren, Kalibriervorschriften und anderem noch in den Kinderschuhen steckt. Das QTZ soll genutzt werden, um Anwendern und Firmen entsprechende Kenntnisse, Messvorschriften, Handling der Sensorik usw. zu vermitteln. KMU, die in diesem Feld tätig sind oder werden wollen, können sich eine sehr aufwendige Infrastruktur mit Fertigungstechnik in Reinräumen, magnetisch oder gegen hochfrequente Felder geschirmten Kabinen, Referenzsystemen, hochpräziser und sensitiver elektronischer Messtechnik zunächst nicht leisten. Für diese Firmen stellt das QTZ einen wertvollen Anlaufpunkt dar, um auf eine entsprechende Infrastruktur bei Bedarf zugreifen zu können und qualifizierte Beratung in Anspruch zu nehmen.

Für die praktische Nutzung ist es nicht entscheidend, einen Sensorchip mit Spitzenwerten sondern ein komplettes robustes und handhabbares Messsystem in die Hand zu bekommen. Deshalb müssen Kompetenzen aus den Bereichen Sensorelektronik, Kühltechnologien, elektromagnetischer Schirmungen und peripherer Messtechnik zusammengeführt werden. Diese Spezialkenntnisse werden im QTZ entwickelt, vorgehalten und vermittelt. (siehe [Ultrasensitive magnetometry using quantum-based sensor technology](#)).

Neue Gebäude und Räumlichkeiten für das QTZ. Als zentrale QT-Anlaufstelle und für die effektive Bündelung der QT an der PTB wird das QTZ sowohl in Braunschweig als auch in Berlin neue Räumlichkeiten beziehen. Insbesondere das Konzept der Anwenderplattformen für externe Nutzer stellt in dieser Form einen neuen Ansatz für die PTB dar, die sich auch in der Auslegung

des neuen Gebäudes in Braunschweig widerspiegelt. So werden bereits im Konzept Büroräume für externer Partner für die ausgedehnte Nutzung der QT-Infrastruktur und ein Schulungs- und Seminarraum vorgesehen. Die fehlende Infrastruktur im Bereich der Messtechnik und Metrologie ist heute in vielen Feldern der Quantentechnologien ein limitierender Faktor für den erfolgreichen Transfer der wissenschaftlichen Entwicklung in den industriellen Bereich. Diese Gebäude werden daher eine wichtige Säule zur Sicherstellung des Erfolgs der Quantentechnologien in Deutschland spielen. In Braunschweig wird der neue Lummer-Pringsheim-Bau (Abbildung 1.4) die meisten Messplätze der Anwenderplattformen in Braunschweig beherbergen, in Berlin werden entsprechende Räumlichkeiten im Walther-Meißner-Bau genutzt werden. Die Vereinigung der oben beschriebenen verschiedenen Themen der QT unter einem Dach soll weiterhin Synergien anregen. Bis zur Fertigstellung der Gebäude (2023 bzw. 2021) werden die neuen Anwenderplattformen zunächst in bestehenden Laboren aufgebaut. Bei Bedarf und wo es Vorteile bringt, werden auch weiterhin bestehende Labore und Räumlichkeiten der PTB mitgenutzt, und umgekehrt die Anwenderplattformen der PTB-Forschung zur Verfügung stehen.

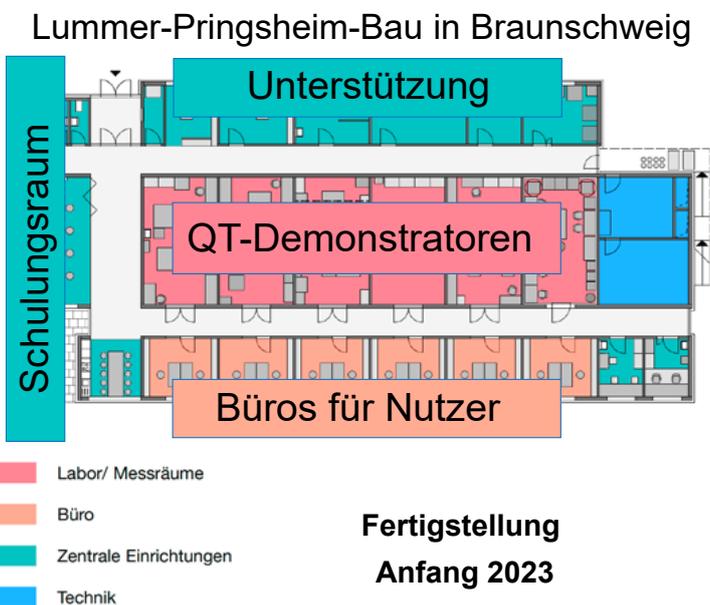
Ausblick

Der Fokus des QTZ liegt bei der Unterstützung der Industrie in der QT. Gleichzeitig ist es das Ziel, die Entwicklung des QTZ so zu betreiben, dass auch die Forschung an der PTB profitiert und ein nutzbringender Austausch zwischen Transfer in die Anwendung im QTZ auf der einen und Grundlagenforschung auf der anderen Seite

erreicht werden kann. So kann beispielsweise der „angewandte Teil“ der Forschung in der PTB durch das QTZ unterstützt werden und somit eine Entlastung bei der Grundlagenforschung erreicht werden. Auch bei Seminaren und Weiterbildungen kann das QTZ unterstützen, beispielsweise durch Organisation und durch die neu entstehenden Räumlichkeiten. Als zentrale Anlaufstelle unter anderem für die Öffentlichkeit kann das QTZ auch in diesem Aspekt unterstützend arbeiten. Ein weiterer Vorteil ist die Entwicklung von robusten, zuverlässigen und anwenderfreundlichen QT-Geräten und Komponenten, die später in der Forschung genutzt werden können und so helfen, mehr Zeit und Ressourcen auf wissenschaftliche (und nicht technische) Probleme verwenden zu können. Darüber hinaus trägt die Umsetzung von Ideen aus den Forschungslaboren in kommerzielle Produkte dazu bei, die eigene Forschung bekannter zu machen. Die im Rahmen des QTZ ermöglichten vertieften Verbindungen und Kooperationen mit Industriepartnern und akademischen Einrichtungen bieten schließlich insbesondere für jüngere PTB Mitarbeiter die Gelegenheit, sich mit potenziellen zukünftigen Arbeitgebern zu vernetzen und Erfahrungen in der Zusammenarbeit zu sammeln. Darüber hinaus können Ausgründungen helfen, um an der PTB entwickelte Technologien marktreif zu machen.

Das wirtschaftliche Potenzial der QT spiegelt sich in diversen nationalen und internationalen Programmen mit teilweise sehr großem Finanzvolumen wider, welche die Nutzbarmachung der QT anregen sollen. In den USA wurde 2018 der *Quantum Initiative Act* auf den Weg gebracht, Großbritannien läuft bereits seit 2014 das *UK Quantum Hub Program* und auf europäischer

Abbildung 1.5: Räumlichkeiten für das QTZ in Braunschweig und Berlin



Räumlichkeiten im Walther-Meißner-Bau in Berlin



Fertigstellung 2021

Ebene das *Quantum Flagship* (seit 2018). In Deutschland wurden 2017 drei Pilotprojekte im Rahmen der Qutega-Initiative gestartet. Eines dieser Projekte, die robuste und anwenderfreundliche optische Atomuhr für Anwender (opticlock), wird gerade an der PTB im Rahmen eines Konsortiums aus Industrie und Forschung realisiert. Weitere Akzente setzte 2018 das Regierungsprogramm im Rahmen der HighTech-Strategie 2025. Diese Programme zeigen die Erwartung, dass die QT in den kommenden Jahren eine dynamische und vor allen Dingen wirtschaftliche relevante Entwicklung nehmen wird. Verlässliche Metrologie auf höchstem Niveau ist dabei unabdingbar für eine solide Entwicklung der QT und gleichzeitig Voraussetzung für die Kommerzialisierung. Hier kann die PTB als nationales Metrologieinstitut die Basis schaffen für den Transfer der QT in den Markt. Das QTZ wird im Rahmen der in diesem Artikel beschriebenen Aktivitäten das Ziel verfolgen, diese Entwicklung zu unterstützen und eine verstärkende und unterstützende Rolle für die Industrie zu spielen. Durch die ausgezeichnete Ausgangslage der PTB in der QT und in Ihrer Rolle als unabhängige und überparteiliche Institution kann das QTZ hier einen großen Beitrag leisten.

