



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut

Mit Metrologie  
in die Zukunft

# Herausforderung Quantentechnologie



# Herausforderung Quantentechnologie

innovativ – technologisch – zukunftsweisend

Wenn die Politik mit großem Geld die Erforschung des Kleinen fördert, dann tut sie dies in der Überzeugung, damit die wirtschaftliche und gesellschaftliche Zukunft gestalten zu können. Mit diesem Kleinen sind die Objekte und Phänomene der Quantenwelt gemeint. Der Wissenschaft gelingt es in immer stärkerem Maße, in dieser Welt gezielt die Regie zu übernehmen. Die Spannweite reicht hier von der Quantenkommunikation mit ihrer inhärent sicheren Datenübertragung über Quantencomputer für ungeahnte Rechenkapazitäten bis zu Quantensimulationen für chemische Reaktionen und Quantensensoren für die medizinische Diagnostik. Auf diesen Feldern wachsen enorme technologische Versprechen mit hohen wirtschaftlichen Potenzialen. Diese Potenziale zu heben, wird auf breiter Basis durch das von der Europäischen Kommission aufgelegte, milliarden-schwere Förderprogramm „Quantum Technologies Flagship“ und darüber hinaus durch flankierende nationale Förderprogramme forciert. Gleichzeitig werden sowohl in großen und traditionsreichen Unternehmen als auch in frischen Start-Ups Entwicklungen vorangetrieben, die ganz neue, auf der Quantentechnologie (QT) basierende Produkte auf den Markt bringen werden.

So wie die PTB mit ihrer Messkunst am Beginn der Quantenmechanik stand, so treibt sie jetzt die messtechnischen Möglichkeiten der Zweiten Quantenrevolution voran – mit den nächsten Generationen von Atomuhren, noch präziseren elektrischen Normalen und innovativen Messmöglichkeiten in der Medizin. Die metrologischen Grundlagenarbeiten münden zugleich in technologische Anwendungen. Um diese Anwendungen für die wirtschaftliche Entwicklung der QT zugänglich zu machen, wurde kürzlich das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum QTZ gegründet.

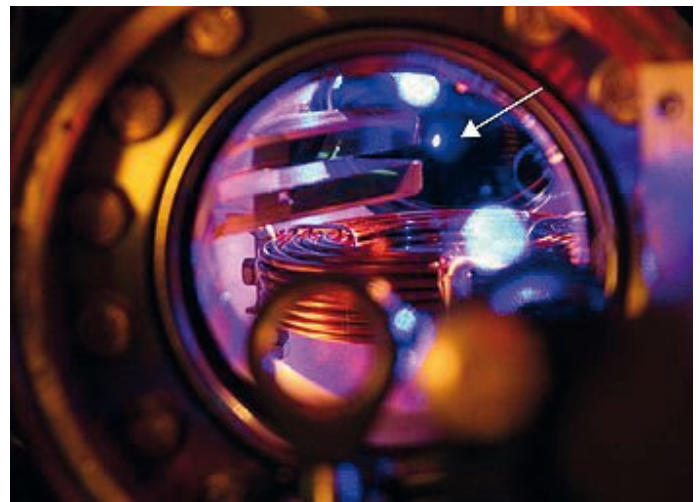
## Die Zeitmesser

Wer bei Uhren an das Verstreichen von Stunden, Minuten und Sekunden denkt, liegt nicht falsch, aber auch nur halb richtig. Denn wer Uhren hat, um die Zeit besonders gut zu messen, kann damit viel mehr tun, als nur die Uhrzeit anzugeben:

- **Navigieren:** In der Satellitennavigation sind Atomuhren im Einsatz. Um sich oder ein Objekt zu lokalisieren, werden die Laufzeiten der ausgetauschten Signale ausgewertet. Prinzipiell gilt: Je präziser die Uhren ticken, umso genauer gelingt die Verortung.
- **Das Schwerefeld der Erde vermessen:** Atomuhren spüren sehr sensibel, wo sie sind. Nach Einsteins Relativitätstheorie beeinflusst die lokal wirkende Gravitation den Gang der Zeit und damit den Gang der Uhren. Eine Atomuhr tickt daher etwa auf Meereshöhe anders als auf einem Berg. Die besten heutigen Uhren registrieren bereits Höhenunterschiede von wenigen Zentimetern.
- **„Neue Physik“ suchen:** Unsere Welt ist, wie sie ist, weil Naturkonstanten sind, was sie sind. Änderten sich Naturkonstanten, änderte sich die Welt. Und so ist es eine fundamentale Frage, ob Naturkonstanten wirklich konstant sind. Da in Atomuhren auch Naturkonstanten eine Rolle spielen und das Zeitmaß beeinflussen, versucht man mit ihrer Hilfe, einer möglichen Änderung der Naturkonstanten auf die Schliche zu kommen.

Wer Forschung an und mit Atomuhren betreibt, hat alle diese Anwendungsfelder vor Augen, sei es in der Satellitennavigation, der Geodäsie, der Kommunikationstechnik oder der Grundlagenforschung.

Die PTB hat eine über Jahrzehnte erarbeitete Expertise beim Bauen und Betreiben von Atomuhren und gehört zu den weltweit prominentesten Zeitorten. Dass die PTB mit ihren Atomuhren die nationale Zeit in Deutschland bereitstellt, ist dabei nur eine kleinere, wenn auch wichtige Aufgabe. Die weit größere ist die Entwicklung von Uhren für morgen. Sogenannte „optische Uhren“, die mit Frequenzen im sichtbaren Spektralbereich statt im Mikrowellenbereich arbeiten, sind hier der entscheidende Schritt zu den nächsten Uhrgenerationen, die etwa mit einzelnen oder einem Ensemble von neutralen oder geladenen Atomen (Ionen) arbeiten.



Zeitgemäß: Angeregtes Atom (leuchtend) in einer optischen Uhr

Die Zeitmessung wird mit diesen optischen Uhren auf ein neues Präzisionsniveau gehoben, von dem alle zu erwartenden praktischen Anwendungen enorm profitieren werden – von den Höhenmessungen in der Geodäsie bis zur Synchronisation von Netzwerken mit hochgenauen Frequenznormalen. Für solche praktischen Anwendungen muss allerdings die äußerst empfindliche Technologie zur Bändigung der zugrundeliegenden Quantenzustände aus dem wohlbehüteten und mit viel Aufwand stabilisierten Grundlagenforschungslabor in die raue Umgebung der Praxis überführt werden, etwa auf freie Feld in der Geodäsie (die Sr-Gitteruhr der PTB ist hier bereits im Einsatz) oder zur Nutzung als Frequenzstandard im Serverraum. Hierzu wurde an der PTB in einem Konsortium aus Industrie- und akademischen Partnern im Projekt „optlock“ die erste und bisher einzige anwenderfreundliche, robuste und nah-kommerzielle optische Atomuhr realisiert.

### Quantenmagnetfeldsensoren

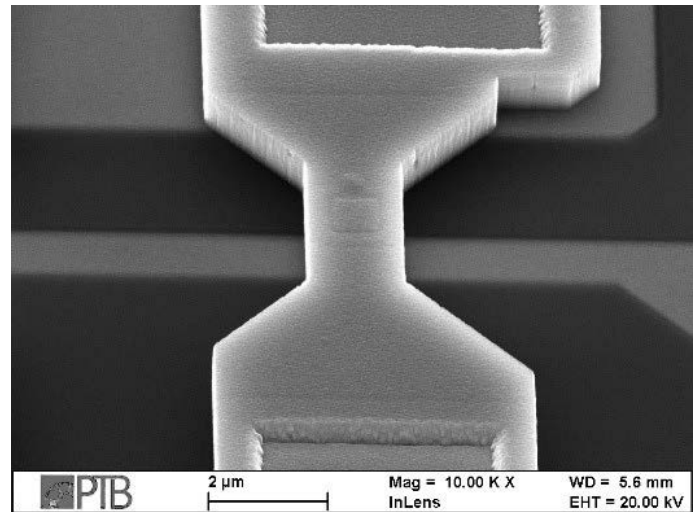
Einen Sinn für Magnetfelder hat homo sapiens nicht. Als homo technicus jedoch bedient sich der Mensch einer großen Anzahl unterschiedlicher technischer Sensoren. Um etwa Magnetfelder im lebenden Organismus zu detektieren oder gezielt in der medizinischen Bildgebung einzusetzen, werden zunehmend Quanteneffekte ausgenutzt, um Informationen zu sammeln, die auf klassischem Wege unerreichbar sind.

- **Medizinische Bildgebung:** Um in den Menschen hineinzusehen (ohne ihn aufzuschneiden), hat die Medizin ein Arsenal an Methoden entwickelt. Eine Möglichkeit, ein Bild des Inneren zu bekommen, besteht darin, die sehr schwachen Magnetfelder zu messen, die unser Gehirn beim Denken oder unser Herz beim Schlagen produziert. Sensoren, die sehr empfindlich auf solche schwachen Magnetfelder reagieren, nutzen Quanteneffekte, beispielsweise die Supraleitung, aus.
- **Medizinische Biomarker:** Manchmal muss die Medizin „Spione“ einsetzen, um herauszubekommen, was im Inneren vorgeht. Werden in den Körper des Patienten etwa Nanopartikel eingeschleust, so kann deren Weg über gewisse Partikeleigenschaften, z. B. deren Magnetismus, verfolgt werden.
- **Quantenkommunikation:** Aber auch jenseits der Medizin können diese extrem empfindlichen Magnetfeldsensoren eingesetzt werden. So lassen sich mit diesen Sensoren einzelne Photonen detektieren – eine wichtige Voraussetzung für die Grundlagenforschung und für Anwendungen der Quantenkommunikation.

Für die Detektion sehr schwacher Magnetfelder sind „Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDs)“ als hochempfindliche Sensoren besonders geeignet. Diese spezielle Quantentechnologie wird in der PTB, zusammen mit der dafür nötigen Kryotechnik, seit Langem auf Spitzenniveau entwickelt, hergestellt und für Messungen verwendet. So werden SQUID-Magnetometer schon seit Jahren benutzt, um etwa die minimalen Magnetfelder zu messen, die von der neuronalen Aktivität des menschlichen Gehirns erzeugt werden. Sowohl bei der Herstellung solcher SQUIDs (per Supraleiter-

Dünnschichttechnologie) als auch bei der darauf aufbauenden Messtechnik nimmt die PTB eine weltweit führende Position ein. Ergänzt wird die SQUID-Technologie in der PTB durch sogenannte „Optically Pumped Magnetometers (OPM)“, bei denen atomare Spins mit Laserlicht „ausgelesen“ werden und die im Gegensatz zu SQUIDs ohne die Kühlung zu tiefen Temperaturen (etwa des flüssigen Heliums) auskommen.

Die Magnetfelder in lebenden Organismen sind derart klein, dass demgegenüber das Erdmagnetfeld oder die Magnetfelder unserer elektrifizierten Welt gigantisch groß sind. Ihre biomagnetischen Referenzmessungen, die dem klinischen Alltag vorgeschaltet sind, führt die PTB daher in einem speziell geschirmten Raum durch, dem „magnetisch stillsten Ort“ der Welt („Berlin Magnetic Shielded Room, BMSR“). Diese Einrichtung und die zugehörige Technik stehen auch externen Partnern aus Industrie und Forschung offen.



Paarweise: Elektronenpärchen tunneln durch eine Barriere in einem SQUID.

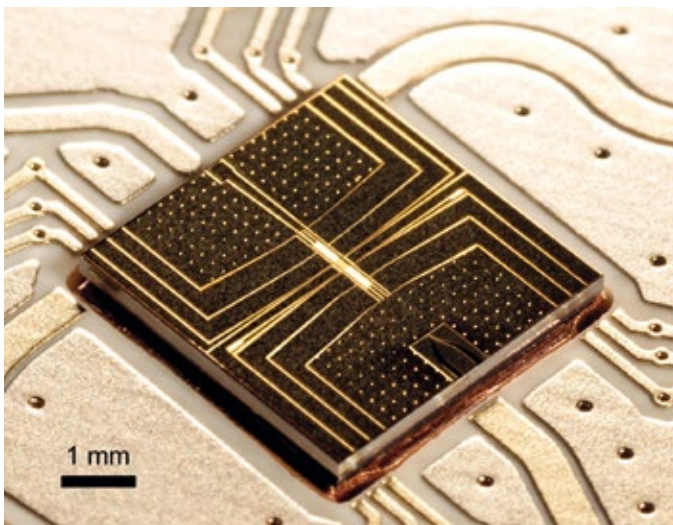
### In die Falle gegangen

Die Entdeckung, dass die Welt quantenmechanisch tickt, ist über 100 Jahre alt. Viele technologische Anwendungen der Quantenphysik – vom Laser über die Halbleitertechnik bis zum Magnetresonanztomografen (MRT) – nehmen wir heute als selbstverständlich hin. Die jetzt aufscheinenden „Quantentechnologien der zweiten Generation“ gehen einen Schritt weiter. Sie erlangen die Kontrolle über einzelne Quantenobjekte und nutzen grundlegende Quanteneffekte gezielt aus – für technologische Innovationen von morgen und übermorgen.

- **Quantencomputer:** Ein klassisches Bit hat entweder den Wert Null oder den Wert Eins. Ein Quantenbit (Qubit) hingegen beschreibt nicht diese eine Alternative, sondern beide Möglichkeiten zugleich. Während ein klassischer Computer mit sehr vielen Bits und mit sehr schnellen Einzelschritten nur sukzessive rechnen kann, arbeitet ein Quantencomputer massiv parallel. Voraussetzung ist allerdings sowohl eine extrem gute Isolation der fragilen Qubits als auch eine außerordentlich gute Kontrolle über die Zustände dieser Qubits. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, könnte ein Quantencomputer bereits ab einer Anzahl von

etwa 50 Qubits spezielle Aufgaben lösen, an denen heutige Supercomputer scheitern.

- **Quantensimulatoren:** Während Quantencomputer als „Universalrechenmaschinen“ konzipiert sind, sind Quantensimulatoren als Spezialisten für konkrete Probleme gedacht – etwa in der Materialforschung, der Quantenchemie oder der Hochenergiephysik. Allerdings müssen sie für jeden Simulationszweck eigens konfiguriert werden, versprechen dann aber eine Lösung von mit klassischen Computern nicht zu bewältigenden Problemen.
- **Grundlagenforschung:** Wer über einzelne Quantenobjekte die Kontrolle erlangt, kann damit den grundlegenden physikalischen Gesetzen sehr nahekommen – für eine tiefere Einsicht in die Prinzipien der Welt.



Gefangen: Chipkonstruktion einer Ionenfalle

Die Frage, welche Objekte oder Systeme die besten Träger der Quanteninformation sein können, ist noch nicht abschließend beantwortet. Die beiden aussichtsreichsten Kandidaten sind derzeit gefangene Ionen im Vakuum oder winzige supraleitende Schaltkreise nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt.

Die PTB verfolgt einen Ansatz für einen skalierbaren Quantenprozessor, der auf selbst entwickelten und gefertigten, patentierten Ionenfallen basiert. Mit dieser Technologie wurden sogenannte Quantengatter realisiert, die den Kern eines jeden Quantencomputers bilden.

Am Quantentechnologie-Kompetenzzentrum der PTB wird derzeit eine Anwenderplattform für externe Partner aufgebaut, um Ionenfallen schnell und verlässlich charakterisieren zu können. Solch eine Einrichtung existiert bisher nirgends, ist aber zwingende Voraussetzung für die kommerzielle Entwicklung eines auf Ionenfallen basierenden Quantencomputers und beispielsweise weiterer Entwicklungen für die hochauflösende Spektroskopie und die Metrologie.

## Elektrische Quantenmetrologie

Im historischen Kontext betrachtet ist es noch nicht so lange her, dass ein Nicola Tesla ein staunendes Publikum mit kontrollierten Blitzen und geisterhaft erscheinenden Lichteffekten beeindruckte und ein Thomas Alva Edison die sich industrialisierende Welt mit seinen Erfindungen elektrifizierte. Die Entdeckung und technische Nutzbarmachung der Elektrizität nahm Ende des 19. Jahrhunderts Fahrt auf und eroberte zunehmend klassisches technisches Terrain, bis – in den späten 1940er Jahren – in den Bell Labs in New Jersey der Transistor erfunden wurde. Mit ihm bekam die Elektrizität erstmals eine quantenmechanische Ausprägung.

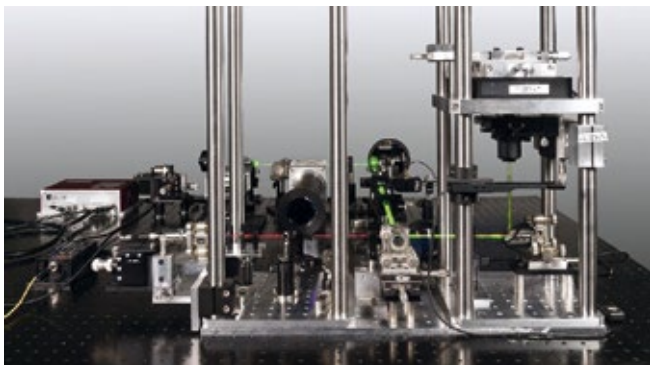
- **Internationale Einheiten:** Wer heute elektrische Ströme, Spannungen oder Widerstände auf bestmögliche Weise messen möchte, nutzt dafür quantenmechanische Effekte aus. Bereits seit vielen Jahren werden diese Messgrößen (die nach einigen der Pioniere der Elektrizität benannt sind: u. a. André Marie Ampère, Georg Simon Ohm und Alessandro Volta) in den nationalen Metrologieinstituten mit Quanteneffekten dargestellt. Mit der grundlegenden Umstellung des Internationalen Einheitensystems (SI) mithilfe von Naturkonstanten basiert nunmehr unser gesamtes Einheitensystem (Ausnahme: die Candela) auf quantenmechanischen Prinzipien.
- **Praktische Quantennormale:** Waren die elektrischen Quantennormale lange Jahre nur in hochspezialisierten Laboratorien der Metrologie zuhause, so gelingt nach und nach der Transferprozess in die Praxis. An der PTB wurde so zum Beispiel ein programmierbares „Quantenvoltmeter“ kommerzialisiert und damit für die Wirtschaft verfügbar gemacht. Als universelles Werkzeug, um Spannungen zu erzeugen und zu messen, wurden Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers (JAWS) entwickelt – für beliebige und spektral reine Wechselspannungen.

In der Welt der elektrischen Quantenmetrologie gehört die PTB zu den internationalen Top-Adressen – und das durchgängig seit vielen Jahrzehnten. Hier erarbeiten Metrologen die wissenschaftlichen Grundlagen für Höchstpräzisionsmessungen der elektrischen Größen, fertigen und charakterisieren Spezialisten die dazu notwendigen Hardwarekomponenten im PTB-eigenen Reinraumzentrum und werden Brücken in die industrielle Praxis geschlagen.

Geht es um die Widerstandseinheit Ohm, so schränkt man die Bewegungsfreiheit der Elektronen in einem Halbleiter ein und nutzt die daraus resultierende, sprunghafte Änderung des Widerstands in einem angelegten Magnetfeld aus – der sogenannte Quanten-Hall-Effekt, für den Klaus von Klitzing den Physiknobelpreis erhielt und der in PTB von der „ersten Stunde an“ metrologisch eingesetzt wurde. Geht es um Spannungen, so verwendet man hier den Josephson-Effekt der Supraleitung, bei dem sich immer zwei Elektronen zu einem Pärchen zusammenfinden. Und geht es schließlich um Stromstärken, so gelingt es in der PTB, die den Strom tragenden Elektronen einzeln zu zählen, während diese – ganz Quantenteilchen – klassisch unüberwindbare Barrieren durchtunneln.

## Weniger Licht! Ein Schlüssel für die Quantenkryptografie

Die Ressource unserer Zeit ist die Information. Riesige Datenmengen werden gesammelt, in Computern verarbeitet und über Glasfaser, Luft oder Satellit ausgetauscht. Wir sind eingesponnen in nie abreißende Informationsflüsse, die kreuz und quer in Lichtgeschwindigkeit um den Globus jagen. Viele dieser Daten müssen auf sicherem Weg zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht werden, denn nicht alles, was kommuniziert wird, darf und soll im Licht der Öffentlichkeit geschehen – angefangen bei Patientendaten in der Medizin über Finanzdaten bei der Kommunikation mit und zwischen Banken bis hin zu hochsensiblen Daten aus Politik und Wirtschaft. Für alle diese Datentransfers sind abhörsichere Kommunikationsformen nötig.



Teilchenweise: Licht als Strom einzelner Photonen

- **Quantenkommunikation und Quantenkryptografie:** Um Daten sicher zu transportieren, werden sie verschlüsselt. Die heutzutage angewandten Verschlüsselungstechniken basieren auf mathematischen Algorithmen, in denen die Primzahlzerlegung großer Zahlen eine entscheidende Rolle spielt – für jeden Computer eine zeitintensive, aber im Prinzip lösbare Aufgabe, sodass sich Verschlüsselungstechnik und Abhörkriminalität ein permanentes Wettrennen liefern. Außerdem könnten gespeicherte sensible Daten später entschlüsselt werden, wenn leistungsfähigere Computer zu Verfügung stehen. Einen inhärent sicheren Datentransport, beispielsweise mit einzelnen Photonen, versprechen dagegen die Prinzipien der Quantenwelt. Mit einer Quantenverschlüsselung, die auf Naturgesetzen statt auf mathematischen Algorithmen basiert, ist es physikalisch unmöglich, unbemerkt „mitzuhören“.
- **Quantenradiometrie:** Ultraschwache Lichtsignale, bis hin zu einzelnen Photonen, spielen eine zentrale Rolle in vielen Feldern der Grundlagenforschung, von der Astronomie über Experimente zu den Grundlagen der Quantenphysik bis zu den Lebenswissenschaften. Weiterhin können die Basiseinheit Candela und die weiteren abgeleiteten Einheiten in der Photometrie und Radiometrie im Prinzip in Form einer bekannten Anzahl von Photonen mit bekannter Wellenlänge ausgedrückt werden.

Wer es nun mit Licht genau nehmen will, kommt unweiger-

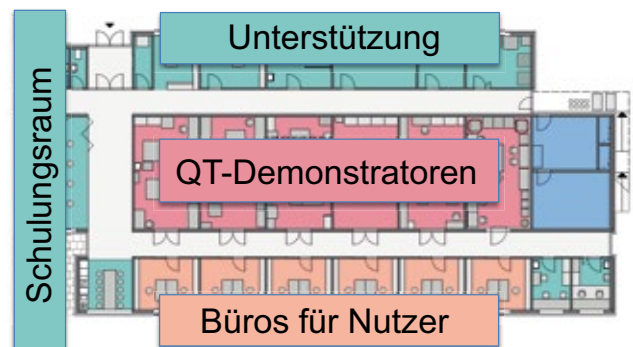
lich zur PTB. Mit weltweit kleinsten Messunsicherheiten ist die PTB in der Lage, selbst ultraschwache optische Signale zu erzeugen und zu detektieren. Für den Einsatz von Quantenkryptografie in der Praxis ist eine sorgfältige Vermessung aller Eigenschaften der zugrundeliegenden Hardware eine unabdingbare Voraussetzung, um tatsächlich die „quantensichere“ Eigenschaft garantieren zu können. Das Arbeitsspektrum reicht dabei von metrologischer Grundlagenforschung und Entwicklung bis hin zum Aufbau von speziellen Kalibrierdienstleistungen. Derzeit untersuchte Einzelphotonenquellen basieren etwa auf Gitter-Fehlstellen (z. B. Farbzentren in Diamanten) oder auf Halbleiterquantenpunkten aus Indium-Gallium-Arsenid.

## Das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ)

An die Phänomene der Quantenwelt haben sich nur wenige gewöhnt. Die Technologien, die daraus erwachsen, sollen hingegen für alle nutzbar sein. Die PTB ergänzt daher gezielt ihre Grundlagenforschung und ihre hochspezialisierten Dienstleistungen um ein anwendungsnahes Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ). Dieses Zentrum wird seit 2019 aufgebaut und wird eine wichtige Basis für die industriellen Entwicklungen der Quantentechnologie schaffen – mit besonderem Fokus auf Start-Ups sowie kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU).

Die Voraussetzungen in der PTB für ein derartiges Kompetenzzentrum sind ideal. Zum einen besitzt die PTB eine international anerkannte, fachliche Kompetenz in diversen Gebieten der Quantentechnologie. Zum anderen ist die Unterstützung der deutschen Wirtschaft im Bereich des Messwesens ein originärer Teil des gesetzlichen PTB-Auftrags. Neben der fachlichen Kompetenz in den verschiedenen Laboratorien kann die PTB auch auf eine exzellente Infrastruktur zurückgreifen, etwa mit dem Reinraumzentrum am Standort Braunschweig und dem Gerätezentrum „Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder“ am Standort Berlin-Charlottenburg.

Mit dem QTZ geht die PTB noch einen Schritt weiter: Zur Unterstützung der Industrie werden Anwenderplattformen



Fertigstellung Anfang 2023

Architekturskizze des QTZ-Neubaus in Braunschweig



mit Apparaturen, Messplätzen und Demonstratoren aufgebaut, ergänzt durch Büros für den temporären Aufenthalt von Partnern und Kunden. Robustheit und Anwenderfreundlichkeit stehen hier im Vordergrund. Diese Messplätze sollen, unterstützt von Personal und Infrastruktur der PTB, von externen Partnern/Kunden zur Entwicklung unterschiedlicher Quantentechnologien genutzt werden können. Darüber hinaus wird das QTZ praktische Schulungen und Seminare für Quantentechnologien anbieten. Weitere wichtige Aspekte sind die Vermittlung der Möglichkeiten und Grenzen der Quantentechnologien in der Öffentlichkeit sowie die Entwicklung technischer Normen.

In Berlin wird es Räumlichkeiten für das QTZ ab 2021 im neu erbauten Walther-Meißner-Bau geben. An der PTB in Braunschweig wird für das QTZ ein neues Gebäude errichtet, dessen Fertigstellung für 2023 geplant ist. Benannt wird es nach zwei Wissenschaftlern der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, die durch ihre Messungen der Strahlung Schwarzer Körper am Ende des 19. Jahrhunderts wesentlich zur Entdeckung der Quantenphysik beigetragen haben: Otto Lummer und Ernst Pringsheim.

Die Inhalte dieses Infoblattes und weitere Informationen finden Sie im Internet unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) > Forschung & Entwicklung > Mit Metrologie in die Zukunft > Herausforderung Quantentechnologie



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Telefon: (0531) 592-3006  
E-Mail: [presse@ptb.de](mailto:presse@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

Stand: 7/2020

## Koordinator des Lenkungskreises Quantentechnologie

Dr. Nicolas Spethmann  
Präsidentialer Stab  
Telefon: (0531) 592-2009  
E-Mail: [nicolas.spethmann@ptb.de](mailto:nicolas.spethmann@ptb.de)

## Mitglieder / fachliche Ansprechpartner

Dr. Jörn Stenger (Lenkungskreis-Vorsitz)  
Mitglied des Präsidiums  
Telefon: (0531) 592-3000  
E-Mail: [joern.stenger@ptb.de](mailto:joern.stenger@ptb.de)

Hon.-Prof. Dr. Uwe Siegner  
Leiter der Abteilung 2 | Elektrizität  
Telefon: (0531) 592-2010  
E-Mail: [uwe.siegner@ptb.de](mailto:uwe.siegner@ptb.de)

Hon.-Prof. Dr. Stefan Kück  
Leiter der Abteilung 4 | Optik  
Telefon: (0531) 592-4010  
E-Mail: [stefan.kueck@ptb.de](mailto:stefan.kueck@ptb.de)

Prof. Dr. Piet Schmidt  
Leiter des Instituts QUEST | Institute for  
Experimental Quantum Metrology  
Telefon: (0531) 592-4700  
E-Mail: [piet.schmidt@ptb.de](mailto:piet.schmidt@ptb.de)

Prof. Dr. Mathias Richter  
Leiter der Abteilung 7 | Temperatur und  
Synchrotronstrahlung  
Telefon: (030) 3481-7312  
E-Mail: [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de)

Dr. Jörn Beyer  
Leiter des Fachbereichs 7.6 | Kryosensorik  
Telefon: (030) 3481-7379  
E-Mail: [joern.beyer@ptb.de](mailto:joern.beyer@ptb.de)

Prof. Dr. Tobias Schäffter  
Leiter der Abteilung 8 | Medizinphysik und  
metrologische Informationstechnik  
Telefon: (030) 3481-7343  
E-Mail: [tobias.schaeffter@ptb.de](mailto:tobias.schaeffter@ptb.de)



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Foto Titelseite: PTB