

Quantum technologies Quantentechnologien in Berlin | Brandenburg



Contents

Inhalt

Editorials

Vorworte

- 5 Prof. Dr. Günther Tränkle
- 7 Dr. Stefan Franzke

Market overview

Marktübersicht

- 9 Prospects for photonic quantum technologies in the Berlin-Brandenburg region
Berlin-Brandenburg: Zukunftsregion für photonische Quantentechnologien

Partner portraits

Partnerportraits

- 22 Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH
- 23 DLR German Aerospace Center
- 24 Ferdinand-Braun-Institut
- 25 Fraunhofer IZM
- 26 Freie Universität Berlin Dahlem
- 27 GoQuantum
- 28 Heinrich-Hertz-Institut
- 29 Humboldt-Universität zu Berlin
- 30 JCMwave GmbH
- 31 Leibniz-Institut für Kristallzüchtung
- 32 Max-Born-Institut Berlin
- 33 Menlo Systems GmbH
- 34 M Squared Lasers UG
- 35 Optec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e.V.
- 36 Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik
- 37 PicoQuant GmbH
- 38 PTB, Braunschweig und Berlin
- 39 QUARTIQ GmbH
- 40 Technische Universität Berlin
- 41 TOPTICA eagleyard
- 42 Zuse-Institut Berlin



Editorial

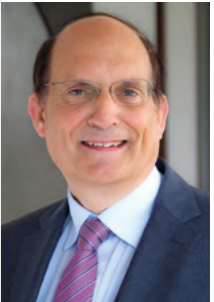
Vorwort

Quantum technologies (QT) can hardly be understood with everyday experience – and yet they determine modern life. The first quantum revolution provided the physical foundations for the digitalization of society, lasers and modern communication technologies. We are now in the middle of the second quantum revolution. With photonic tools, individual quantum particles can be manipulated and controlled in a targeted manner. This opens up a multitude of new applications: For example, communication by means of entangled photons is to be protected against unwanted access and thus enable communication that is tap-proof per se. High-resolution imaging techniques based on QT will advance medical diagnostics. With the help of quantum sensor technology, physical quantities such as the local gravity field of the earth can be measured more precisely than before – and thus provide information on valuable raw materials, among other things. Optical clocks will improve time measurement and thus the accuracy of navigation systems. Quantum computers are expected to score points with gigantic computing power and unprecedented speed. Quantum technologies will therefore be as indispensable in the future as the Internet is today.

In the Berlin-Brandenburg region, a large number of research institutions and innovative companies work with key technologies for QT such as photonics. In Berlin alone, three large universities provide the necessary basic research, while numerous application-oriented research institutes build bridges to innovative companies, which then develop QT products from demonstrators and prototypes. The task now is to exploit this great potential in the region and connect the players in order to generate sustainable added value.

Mit alltäglichen Erfahrungen lassen sich Quantentechnologien (QT) kaum begreifen – und doch bestimmen sie das moderne Leben. Die erste Quantenrevolution lieferte die physikalischen Grundlagen für die Digitalisierung der Gesellschaft, Laser und moderne Kommunikationstechnologien. Inzwischen befinden wir uns mitten in der zweiten Quantenrevolution. Mit photonischen Werkzeugen lassen sich einzelne Quantenteilchen gezielt manipulieren und kontrollieren. Das eröffnet eine Fülle neuer Anwendungen: So soll die Kommunikation mittels verschränkter Photonen vor unerwünschten Zugriffen geschützt werden und damit eine per se abhörsichere Kommunikation ermöglichen. Hochaufgelöste Bildgebungsverfahren auf QT-Basis werden die medizinische Diagnostik voranbringen. Mit Hilfe der Quantensensorik können physikalische Größen, etwa das lokale Schwerfeld der Erde, präziser als bisher vermessen werden – und so unter anderem Hinweise auf wertvolle Rohstoffe geben. Optische Uhren werden die Zeitmessung und damit die Genauigkeit von Navigationssystemen verbessern. Quantencomputer sollen mit gigantischen Rechenleistungen und nie dagewesener Schnelligkeit punkten. Quantentechnologien werden daher künftig so unentbehrlich sein, wie es heute das Internet ist.

In der Region Berlin-Brandenburg arbeiten eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen und innovativen Unternehmen mit Schlüsseltechnologien für die QT – der Photonik, um nur ein Beispiel zu nennen. Alleine in Berlin liefern drei große Universitäten die nötige Grundlagenforschung, zahlreiche anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen schlagen die Brücke zu innovativen Unternehmen, die aus Demonstratoren und Prototypen dann QT-Produkte entwickeln.



*Prof. Dr. Günther Tränkle
Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut für
Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4,
12489 Berlin
Tel.: +49 30 63922601
E-Mail: guenther.
traenkle@fbh-berlin.de*

Editorial

Vorwort

As a new network initiative, the Innovation Forum Photonic Quantum Technologies was launched in early March 2020. Initiated by the Ferdinand-Braun-Institut, 90 representatives of universities, research institutions and SMEs met, presented their activities and explored possibilities for cooperation. The aim is to quickly transfer QT research results into applications and to exploit them economically.

We must now quickly pick up this momentum in order to make Berlin-Brandenburg internationally visible as a QT industry location. Does your company manufacture components and systems for quantum technology? Do you develop software solutions or electronic components that could be used in QT? Get involved and let us shape this exciting field of application together!

Dieses große Potenzial in der Region gilt es nun auszuschöpfen und die Akteure zu vernetzen, um nachhaltige Wertschöpfung zu generieren.

Den Auftakt machte Anfang März 2020 das Innovationsforum Photonische Quantentechnologien. Auf Initiative des Ferdinand-Braun-Instituts trafen sich 90 Vertreterinnen und Vertreter von Universitäten, Forschungseinrichtungen und KMU, stellten ihre Aktivitäten vor und loteten Möglichkeiten der Zusammenarbeit aus. Damit sollen QT-Forschungsergebnisse schnell in Anwendungen überführt und wirtschaftlich verwertet werden.

Diesen Faden müssen wir nun rasch aufgreifen und weiterspinnen, um den Standort Berlin-Brandenburg international als QT-Industriestandort sichtbar zu machen. Ihr Unternehmen fertigt Komponenten und Systeme für die Quantentechnologie? Sie entwickeln Softwarelösungen oder elektronische Bauteile, die in der QT eingesetzt werden könnten? Beteiligen Sie sich und lassen Sie uns dieses spannende Anwendungsfeld gemeinsam gestalten!

As one of Europe's most innovative regions, Germany's capital region plays a leading role in several forward-looking technologies and continues to attract young skilled workers and technology companies from around the world. Berlin has become a hub for digital transformation processes in production, mobility and health care as well as a test area for disruptive technologies and applications. The region's potential is driven by its diverse research landscape, strong IT reputation and its long tradition of promoting key technologies such as photonics, microelectronics and materials science.

As the location in which research, industry and startup culture meet, Berlin offers the ideal development conditions for fields of technology on the threshold of industrial leveraging. The city attracts young talent from around the globe who find here a perfect interdisciplinary environment for the transfer of new research-driven knowledge to industry. Most recently, the first quantum technology startups, a number of relocations and Berlin-Brandenburg's InnoQT initiative have laid the cornerstone of a new, dynamic quantum community, to which this brochure is dedicated.

Once again, Berlin is where we are already working on the answers to tomorrow's questions. The field of quantum technology stands out here because, for many of us, the questions it poses as well as the answers it delivers surpass our imagination. Nonetheless – or perhaps precisely because it does so – the capital region is the right location for this field. Weil es geht in Berlin.

Die deutsche Hauptstadtregion gehört zu den innovativsten Regionen Europas, nimmt in vielen zukunftsweisenden Technologien eine führende Position ein und hat eine große Anziehungskraft auf junge Fachkräfte und Technologie-Unternehmen. Berlin ist heute ein Zentrum digitaler Transformation in der Produktion, der Mobilität und im Gesundheitswesen sowie Testfeld für disruptive Technologien und Applikationen. Es schöpft sein Potenzial aus der vielseitigen Forschungslandschaft, einer starken IT-Kompetenz und der konsequenten Förderung von Schlüsseltechnologien wie der Photonik, der Mikroelektronik oder der Materialwissenschaften.

Berlin vereint Forschungs-, Industrie- und Startup-Kultur an einem Standort und bietet damit ideale Entwicklungsvoraussetzungen für ein Technologiefeld an der Schwelle zur industriellen Nutzung. Die Stadt zieht junge Talente aus aller Welt an, die an den interdisziplinären Schnittstellen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ideale Rahmenbedingungen für den Transfer neuen Wissens von der Forschung in die Industrie vorfinden. In der jüngsten Vergangenheit haben erste Quantentechnologie-Startups, Ansiedlungen und die InnoQT-Initiative in Berlin Brandenburg einen wichtigen Baustein für eine neue, dynamische Quantencommunity gelegt, der diese Broschüre gewidmet ist.

Berlin ist damit einmal mehr ein Ort, an dem wir heute schon an den Antworten auf die Fragen von morgen arbeiten. Das Feld der Quantentechnologie ragt dabei heraus, weil hier nicht nur die Fragen, sondern auch die Antworten die Vorstellungskraft der meisten von uns übersteigen. Trotzdem – oder gerade deshalb – ist die Hauptstadtregion der richtige Ort. Weil es geht in Berlin.



Dr. Stefan Franzke
Geschäftsführer
Berlin Partner
für Wirtschaft und
Technologie GmbH
Fasanenstr. 85
10623 Berlin
www.berlin-partner.de



Prospects for photonic quantum technologies in the Berlin-Brandenburg region

Berlin-Brandenburg: Zukunftsregion für photonische Quantentechnologien

Quantum technology is a promising field of research that brings completely new technical ideas from academia to industry, medicine and everyday life. The implementation of these ideas requires a suitable environment: academic as well as technical expertise is needed, multi- and interdisciplinary cooperation must be supported. People who are willing to drive innovation are essential, as are investments and companies to build new supply chains. Close national and international networking is crucial.

Photonic technologies are at the core of most quantum technologies. With a network of research institutions, small and large companies, the Berlin-Brandenburg region is excellently positioned to fully exploit the potential of photonics for quantum technologies.

Mit den Quantentechnologien können völlig neue technische Ideen aus der physikalischen Grundlagenforschung in die Industrie, die Medizin und auch den Alltag der Menschen gebracht werden. Die Umsetzung dieser Ideen setzt ein passendes Umfeld voraus: Sowohl akademische als auch technische Fachkompetenz ist gefragt, multi- und interdisziplinäre Zusammenarbeit muss unterstützt werden. Es braucht Menschen, die bereit sind, Innovationen voranzutreiben, genauso wie Investitionen und Firmen, die sich am Aufbau neuer Lieferketten beteiligen. Eine enge nationale und internationale Vernetzung ist dabei unerlässlich.

Im Kern der meisten Quantentechnologien sind photonische Technologien involviert. Mit einem Netzwerk von Forschungseinrichtungen, kleinen und großen Firmen ist die Region Berlin-Brandenburg hervorragend positioniert, um die Möglichkeiten der photonischen Technologien für die Quantentechnologien voll auszuschöpfen.

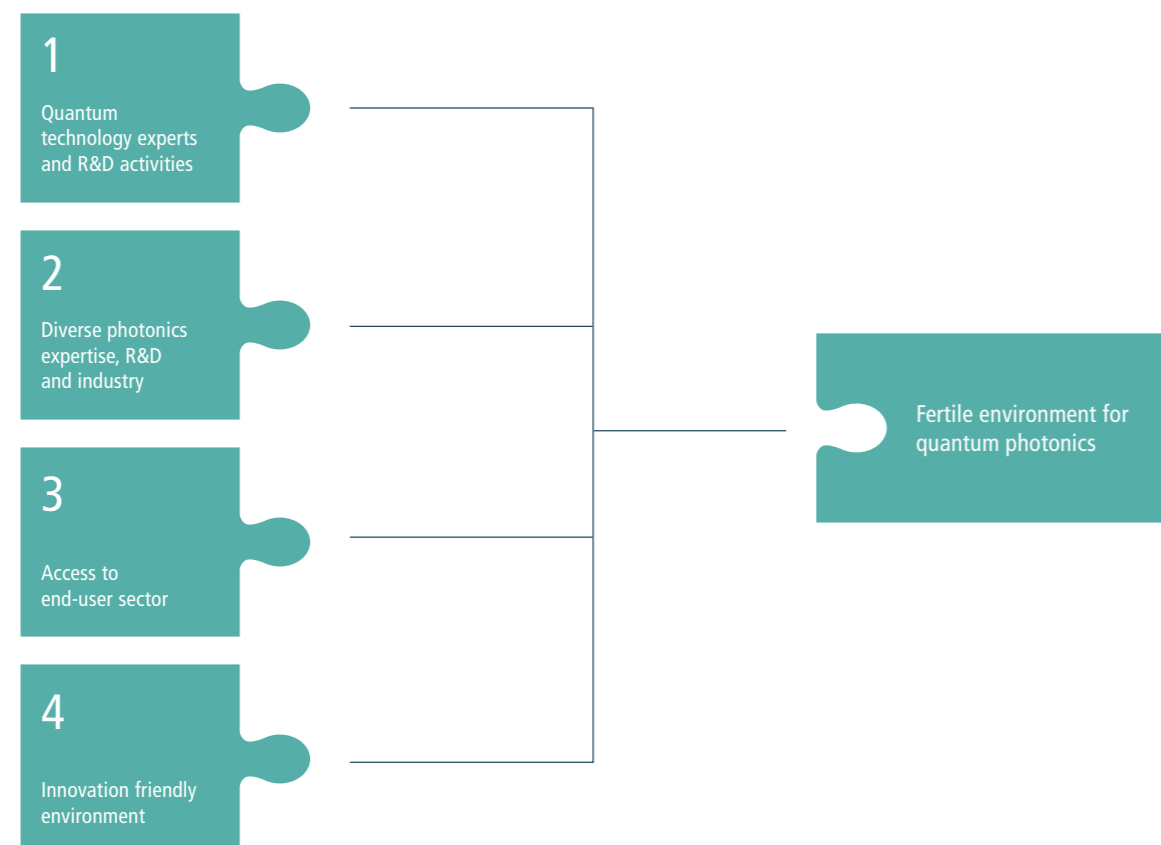
*Dr. Anke Lohmann
c/o Humboldt-
Innovation GmbH
Ziegelstraße 30
10117 Berlin
E-Mail: anke.lohmann@
anchoredin.uk*

Quantum technology – a short introduction

Quantum phenomena have been used for decades and form the basis of modern technologies such as lasers and computers. In the new age of quantum technologies, also known as the second quantum revolution, we speak of the “crazier” elements of quantum physics. These concepts are more difficult to understand because they seem counterintuitive.

They include, for example, the entanglement of two particles, in which certain properties are closely intertwined. When one state of one particle changes, the state of the other changes as well, even if they are far apart. However, their entanglement collapses when the state of one of the two particles is examined.

Positive factors for quantum photonics



Quantentechnologie – eine kurze Einführung

Quantenphänomene werden seit Jahrzehnten genutzt und bilden die Grundlage für moderne Technologien wie Laser- und Computertechnik. Im neuen Zeitalter der Quantentechnologien, das auch als zweite Quantenrevolution bezeichnet wird, sprechen wir von den „verrückteren“ Elementen der Quantenphysik. Diese Konzepte sind schwieriger zu verstehen, da sie kontraintuitiv erscheinen.

Dazu zählt etwa die Verschränkung zweier Teilchen, bei der bestimmte Eigenschaften eng miteinander verflochten sind. Wenn sich nun der Zustand des einen Teilchens ändert, ändert sich auch der Zustand des

This peculiarity can be exploited for secure communication, where simple tests can be used to find out whether the information of the entangled photons has been intercepted: If this was the case, the photons are no longer entangled.

Another equally unusual phenomenon is the superposition of states of a particle: a particle can be in several states at once. Quantum computers exploit this phenomenon to achieve higher computing speeds. Quantum sensors can make use of it to measure much more sensitively.

The particles used in quantum technologies can be of different types: atoms, ions, photons and electrons. Each type requires a different technology with its own technical challenges.

The novel technologies are divided into four major areas of application:

- Quantum sensing, metrology and imaging
- Quantum computing
- Quantum communication
- Quantum simulation

Quantum technological competence in Berlin and Brandenburg

The Berlin-Brandenburg region has the advantage of being home to numerous world-class universities and research institutions. It is therefore not surprising that research in the field of quantum physics and technologies is actively pursued in several institutions.

Currently, four universities and 14 research and technology institutions are involved in quantum technologies.

anderen, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind. Ihre Verschränkung kollabiert jedoch, wenn der Zustand eines der beiden Teilchen gemessen wird.

Diese Eigenart lässt sich für eine sichere Kommunikation ausnutzen, bei der sich durch einfache Tests herausfinden lässt, ob die Informationen der verschränkten Photonen abgefangen wurden: Wenn dies der Fall war, sind die Photonen nicht mehr verschränkt.

Ein weiteres, ebenso ungewöhnliches Phänomen ist die Überlagerung von Zuständen eines Teilchens: Ein Teilchen kann sich in mehreren Zuständen gleichzeitig befinden. Quantencomputer nutzen dieses Phänomen aus, um höhere Rechengeschwindigkeiten zu erreichen. Quantensensoren können dadurch deutlich empfindlicher messen.

Die in den Quantentechnologien verwendeten Teilchen sind unterschiedlicher Art: Man nutzt Atome, Ionen, Photonen und Elektronen. Jeder Typ von ihnen erfordert eine andere Technologie mit ihren eigenen technischen Herausforderungen.

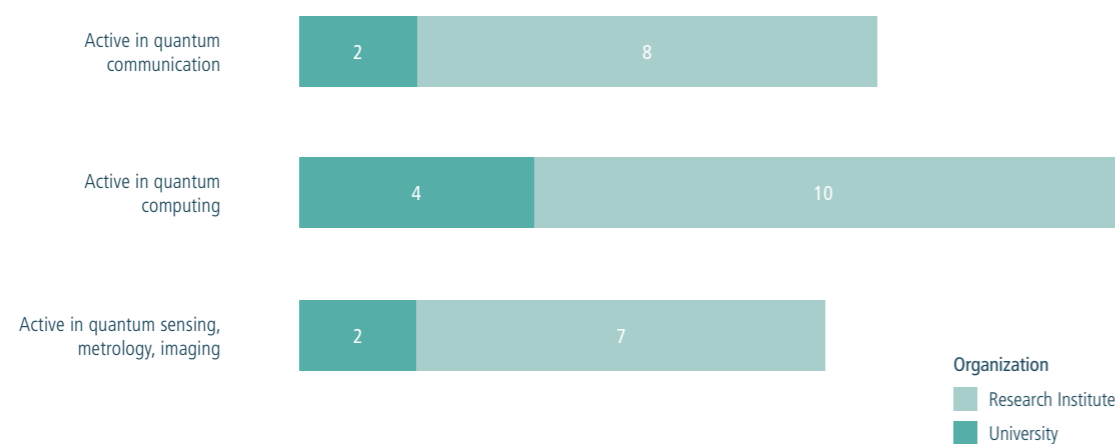
Die neuartigen Ansätze aus den Quantentechnologien werden in vier Anwendungsfelder aufgeteilt:

- Quantensensorik, -metrologie und -bildgebung
- Quantencomputing
- Quantenkommunikation
- Quantensimulation

Quantentechnologische Kompetenz in Berlin-Brandenburg

Die Region Berlin-Brandenburg hat den Vorteil, dass sie zahlreiche Hochschul- und Forschungseinrichtungen von Weltrang beherr-

Quantum technology activities in the region Berlin-Brandenburg



A study on “Market and location analysis regarding existing and missing competences in the field of quantum technology” for the Berlin-Brandenburg region was commissioned during the project “Innovationsvorhaben Photonische Quantentechnologien”. It showed that the regional players are active in all areas of quantum technology, some of them even in several segments. Most activities are in the field of quantum computing, closely followed by quantum communication and sensor technology, metrology and imaging. Such solid research base is a good starting point for knowledge and technology exchange, especially with such a large number of research institutes with close links to industry.

bergt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Forschung auf dem Gebiet der Quantenphysik und -technologien in mehreren Institutionen und Universitäten aktiv betrieben wird. Gegenwärtig beschäftigten sich hier vier Universitäten und 14 Forschungs- und Technologieorganisationen mit Quantentechnologien.

Eine im Rahmen des Vorhabens „Innovationsforum Photonische Quantentechnologien“ angefertigte Studie „Markt- und Standortanalyse bzgl. vorhandener und fehlender Kompetenzen im Bereich Quantentechnologie“ für die Region Berlin-Brandenburg ergab, dass die regionalen Akteure in allen Bereichen der Quantentechnologien aktiv sind, einige von ihnen sogar in mehreren Segmenten. Die meisten Aktivitäten liegen im Bereich des Quantencomputings, dicht gefolgt von Quantenkommunikation und -sensorik, -metrologie und -bildgebung. Eine derart solide Forschungsbasis ist ein guter Ausgangspunkt für den Wissens- und Technologieaustausch, insbesondere mit einer so großen Zahl von Instituten für angewandte Forschung mit engen Verbindungen zur Industrie.

Photonics is in the core of quantum technology

Most quantum technologies are based on photonics – either directly due to the quantum properties of photons or indirectly by using light for controlling or probing. Some photonic technologies are already ready for industrial use, while others still require significant research and development efforts.

Quantum communication

Quantum communication is one of the technology areas with a high “Technology Readiness Level”. There have been several successful experiments via fiber optics and satellites. For a wide uptake of this technology, however, a seamless integration into existing communication technology and infrastructure is required. Key challenges include the improvement of data rates, ranges and redirection. Faster single-photon sources and detectors are needed. Another problem with long-distance data transmission over fiber is the need for amplification, since conventional amplification destroys the entanglement. Fully operational quantum repeaters are needed as a solution.

Quantum sensors and clocks

Most quantum sensor technologies are based on atoms, single ions, ion arrays or trapped charges in semiconductors. Here, photonics plays a crucial role in the activation and readout of states and in the active control of the particles. Depending on the type of particle, this requires lasers with different wavelengths, often with very narrow line widths. Pulse shape, beam profile and polarization must be precisely controlled. Some lasers have to work with powers that are not readily available. In order to achieve a wide range of applications, quan-

Photonik als Wegbereiter der Quantentechnologie

Die meisten Quantentechnologien stützen sich auf die Photonik – entweder direkt dank der Quanteneigenschaften von Photonen oder indirekt, indem Licht zur Manipulation oder Detektion von Quantenzuständen eingesetzt wird. Einige photonische Technologien eignen sich bereits zum industriellen Einsatz, während andere noch einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufweisen.

Quantenkommunikation

Die Quantenkommunikation ist einer der Technologiebereiche mit hohem „Technology Readiness Level“. Es gab mehrere erfolgreiche Versuche über Glasfaser und Satelliten. Für eine breite Einführung ist jedoch eine nahtlose Integration in die bestehende Kommunikationstechnologie und -infrastruktur erforderlich. Zu den zentralen Herausforderungen gehören die Datenrate, die Reichweite und die Umleitung von Informationen. Man benötigt schnellere Einzel-Photonen-Quellen und -Detektoren. Ein weiteres Problem bei der Langstreckendatenübertragung über Glasfaser ist die Notwendigkeit der Verstärkung, da eine herkömmliche Verstärkung die Verschränkung zerstört. Als Lösung werden funktionierende Quanten-Repeater benötigt.

Quantensensoren und -uhren

Die meisten Quantensensortechnologien basieren auf Atomen, einzelnen Ionen, Ionenarrays oder gefangenen Ladungen in Halbleitern. Hier spielt die Photonik eine entscheidende Rolle bei der Aktivierung und beim Auslesen von Zuständen sowie bei der aktiven Manipulation der Teilchen. Dies erfordert je nach Teilchenart verschiedene

tum sensors and clocks must become much more compact, stable, energy-efficient and cost-effective.

Quantum imaging

Quantum technologies for imaging can significantly improve existing methods for optical 2D and 3D imaging. They increase the signal-to-noise ratio and thus enable imaging at lower light intensities. Further advantages are imaging through scattered media and in spectral ranges where detector technologies are limited or inefficient, such as in the terahertz or mid-infrared range. Quantum imaging uses correlated and entangled photon pairs or so-called "squeezed light". It is inherently based on photonic technologies.

Quantum computing and simulation

Several different quantum computers and quantum simulation technologies are currently under development. Photonic technologies play an essential role in at least two parts of a quantum computer: First, in the actual quantum data layer, where qubits perform the operations, and second, in the control and readout layer.

There is a wide range of photonic tools necessary for quantum technology. However, much development is still needed to bring these technologies from the laboratory to the market.

Berlin-Brandenburg photonics expertise in research and industry

With around 400 local photonics companies and several research organizations¹, the Berlin-Brandenburg region is an ideal place to meet these challenges. The existence of OpTecBB, the regional competence cluster

Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen, oft mit sehr schmaler Linienbreite. Pulsform, Strahlprofil und Polarisation müssen dabei genau kontrolliert werden. Einige Laser müssen mit Leistungen arbeiten, die nicht ohne weiteres verfügbar sind. Um eine breite Palette von Anwendungen zu erzielen, müssen Quantensensoren und -uhren noch wesentlich kompakter, stabiler, energieeffizienter und preisgünstiger werden.

Quanten-Bildgebung

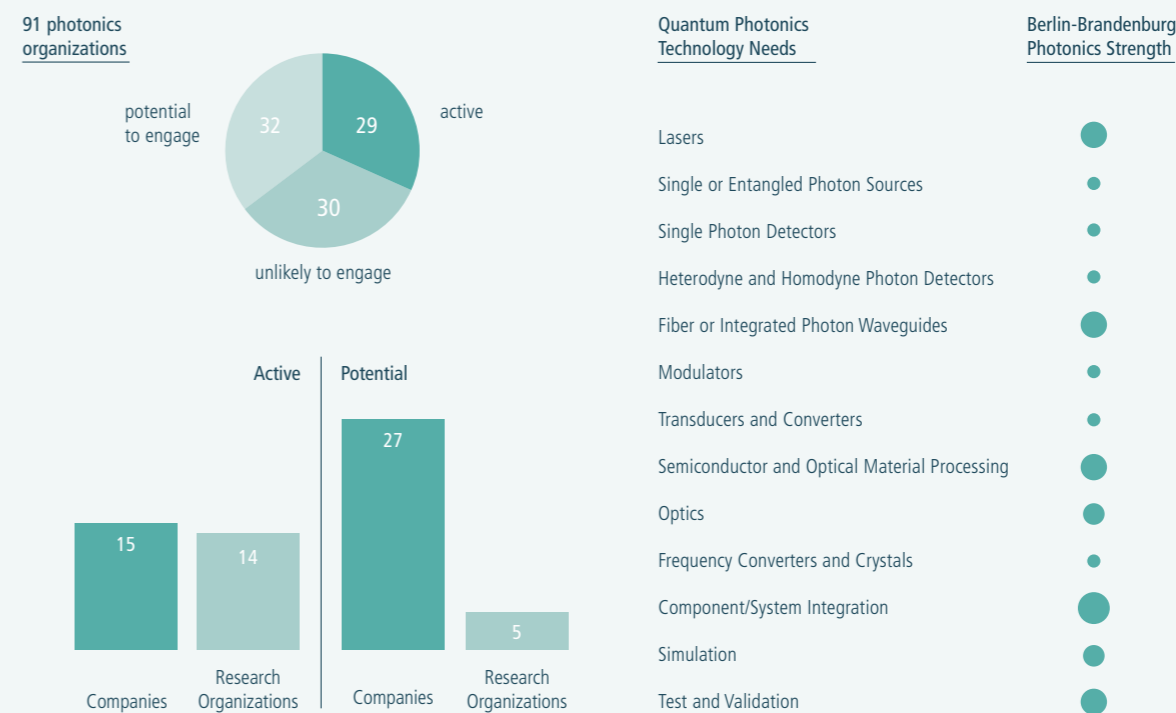
Quantentechnologien für die Bildgebung können bestehende Verfahren für die optische 2D- und 3D-Bildgebung erheblich verbessern. Sie erhöhen das Signal-Rausch-Verhältnis und ermöglichen so Aufnahmen bei geringeren Lichtstärken. Weitere Vorteile sind die Bildgebung durch gestreute Medien und in Spektralbereichen, in denen Detektortechnologien begrenzt verfügbar oder ineffizient sind, etwa im Terahertz-Bereich oder im mittleren Infrarot. Die Quanten-Bildgebung nutzt korrelierte und verschränkte Photonenpaare oder setzt sogenanntes „gequetschtes Licht“ ein. Sie basiert von Natur aus auf photonischen Technologien.

Quantencomputing und -simulation

Derzeit sind verschiedene Quantencomputer und Quantensimulationstechnologien in Entwicklung. Photonische Technologien spielen eine wesentliche Rolle bei mindestens zwei Teilen eines Quantencomputers: erstens in der eigentlichen Quantendatenebene, in der Qubits die Operationen ausführen, und zweitens in der Steuer- und Ausleseebene.

Es gibt es eine große Bandbreite an photonischen Werkzeugen, die für die Quantentechnologien notwendig sind. Es ist aber

Berlin-Brandenburg has great potential to become a global player in quantum photonics



for photonics and optics with more than 100 members, underlines the economic importance of this industry.

Based on a sample of more than 90 regional organizations, we found that 2/3 of them either already address or could address these needs (see results in the figure)

End-user sector strength

Quantum technology is an emerging, disruptive technology. The areas most likely to benefit from it are:

- Telecommunications
- Medical technologies
- Mining and exploration
- Finances
- Transport
- Security
- Chemical and process industry

However, access to these markets requires a good understanding of the respective needs. Interdisciplinarity across sectors is the key here.

noch viel Entwicklung erforderlich, um diese Technologien aus dem Labor auf den Markt zu bringen.

Berlin-Brandenburger Photonik-Kompetenz in Forschung und Industrie

Die Region Berlin-Brandenburg ist mit rund 400 lokalen Photonik-Unternehmen und mehreren Forschungsorganisationen¹ ein idealer Ort, um sich diesen Herausforderungen zu stellen. Die Existenz von OpTecBB, dem regionalen Kompetenzcluster für Photonik und Optik mit mehr als 100 Mitgliedern, unterstreicht die wirtschaftliche Bedeutung dieser Branche. Anhand einer Stichprobe von über 90 regionalen Organisationen wurde in der Studie „Markt- und Standortanalyse bzgl. vorhandener und fehlender Kompetenzen im Bereich Quantentechnologie“ festgestellt, dass 2/3 von ihnen Technologien für die Quantentechnologien entweder bereits anbieten oder anbieten könnten (siehe Ergebnisse in der Abbildung).

¹Cluster Report Optics and Photonics in the Capital Region Berlin Brandenburg, 2019

Sectoral strengths in Berlin and Brandenburg

Berlin-Brandenburg has world-class medical research and a strong medical technology industry. With the Charité, a world-class university research hospital and Europe's third-largest clinic, and established links to the region's photonics community, the opportunities for cross-sectoral work are diverse.

Telecommunications has a long tradition in the region. Several manufacturers of telecommunication technologies are based in Berlin. A number of institutes and university departments are working on the latest technologies for a variety of communication solutions – a fertile ground also for quantum communication technology.

Another strong area is the transport technology sector, including aerospace, automotive and railway. For example, the Berlin-Brandenburg region is one of the three leading industrial German aerospace centers, especially in the field of small and nanosatellites. It has research centers and a flourishing industry in both areas. In addition, Berlin-Brandenburg is driving innovation in the transport sector, which should provide the perfect basis for the introduction of quantum technologies.

These strengths are reflected in the application areas targeted by the regional photonics community. This is crucial, as companies are more likely to embrace new technologies if they can implement them with established customers.

For these three regional sectors, we have listed some of the key opportunities that quantum technologies can offer them.

Stärke des Endnutzer-Sektors

Die Quantentechnologie ist eine aufstrebende, disruptive Technologie. Die Bereiche, die am ehesten davon profitieren werden, sind:

- Telekommunikation
- Medizinische Technologien
- Bergbau und Exploration
- Finanzen
- Verkehr
- Sicherheit
- Chemische Industrie und Prozessindustrie

Der Zugang zu diesen Märkten setzt jedoch ein gutes Verständnis der jeweiligen Bedarfe voraus. Sektorübergreifende Interdisziplinarität ist hier der Schlüssel.

Branchenstärke Berlin-Brandenburg

Berlin-Brandenburg verfügt über medizinische Forschung von Weltrang und eine starke Medizintechnologiebranche. Mit der Charité, einem Universitätsforschungskrankenhaus von Weltrang und Europas drittgrößter Klinik sowie etablierten Verbindungen zur Photonik-Gemeinschaft der Region sind die Möglichkeiten für sektorübergreifendes Arbeiten vielfältig.

Die Telekommunikation hat in der Region eine lange Tradition. Mehrere Hersteller von Telekommunikationstechnik haben ihren Sitz in Berlin. Eine Reihe von Instituten und Universitätsabteilungen arbeitet an neuesten Technologien für eine Vielzahl von Kommunikationslösungen – ein fruchtbarer Boden auch für die Quantenkommunikationstechnologie.

Ein weiterer starker Bereich ist der Verkehrssektor, einschließlich Luft- und Raum-

The most advanced market sector is quantum communications, including ground- and satellite-based communications. Here, applications in the security sector and in telecommunications are expected.

Another area with strong market demand is medical imaging, where helium-cooled magnetic sensors are being replaced by quan-

fahrt, Automobil und Eisenbahn. So gehört die Region Berlin-Brandenburg zu den drei führenden industriellen deutschen Luft- und Raumfahrtzentren, insbesondere im Bereich der Klein- und Nanosatelliten. In beiden Bereichen verfügt sie über Forschungszentren und eine florierende Industrie. Darüber hinaus treibt Berlin-Brandenburg Innovationen im Verkehrssektor voran, was die perfekte

End-user sectors

| | | | |
|------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| Transport & navigation | Telecommunication | Security | Pharma & chemical |
| Medical | Life sciences | Others | Safety |
| Manufacturing | Energy & renewable | Security | Safety & quality control |
| | | Building infrastructure | AR/VR |

End-user markets

| | Sensing, metrology and imaging | Communications | Computing and simulation |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Telecommunication | Clocks for synchronization | Cryptography | Network optimization |
| Medical technology | New brain and heart diagnostic tools | Protecting patient data long-term | Faster AI & machine learning for imaging and pathology |
| Transport | GPS-aided navigation | Cryptography for connected vehicles | Battery material simulation; traffic optimization |

End-user sectors: Treemap of number of regional photonics organization by target end-user sectors. Data based on 53 organizations that are members of OpTecBB

End-user markets: Example applications for quantum technologies, partially based on the OSA OIDA Quantum Photonics Roadmap

tum magnetic sensors operating at room temperature. Scanners using these quantum sensors will replace expensive scanners at a quarter of the cost.

Quantum sensors are needed for navigation when satellite navigation fails. Systems based on optical clocks and quantum gravimeters are under development and first devices are on the market. Currently, initial cost and size limit their use, for example in the aerospace sector, which is interested in this technology. Great demand for quantum sensors also comes from the space sector. There is significant activity in the development of airborne gravimeters.

A regular quantum computer sold in large numbers is still some time away. However, there is significant global activity in this area, attracting enormous investment, from countries, from multinational companies and from venture capital funds. In addition to programs already planned, Germany announced in June 2020 that it would invest 2 billion euros in two quantum computers, among other things.

The most important market sector for quantum technologies is currently the research market. Governments around the world are investing billions of euros in this sector. National and European programs for the rapid development of quantum technology will also have a positive impact on Berlin-Brandenburg's activities in the field of quantum photonics.

Berlin-Brandenburg attracts innovation

Innovation benefits from people who work across disciplines. Therefore, Berlin and Brandenburg support several strategic clus-

Grundlage für die Einführung von Quantentechnologien bieten dürfte.

Diese Stärken spiegeln sich in den Anwendungsbereichen wider, auf die die regionale Photonik-Community abzielt. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Unternehmen eher bereit sind, neue Technologien aufzugreifen, wenn sie sie mit etablierten Kunden umsetzen können.

Für diese drei regionalen Sektoren haben wir einige der wichtigsten Möglichkeiten aufgelistet, die die Quantentechnologien ihnen bieten können.

Der am weitesten fortgeschrittene Marktsektor ist die Quantenkommunikation, einschließlich boden- und satellitengestützter Kommunikation. Hier werden Anwendungen im Sicherheitsbereich und in der Telekommunikation erwartet.

Ein weiterer Bereich mit einem ausgeprägten Marktbedarf ist die medizinische Bildgebung, bei der Helium-gekühlte Magnetfeldsensoren durch bei Raumtemperatur arbeitende Quantenmagnetsensoren ersetzt werden. Scanner, die diese Quantensensoren verwenden, werden teure Scanner zu einem Viertel der Kosten ersetzen.

Quantensensoren werden für die Navigation benötigt, wenn die Satellitennavigation versagt. Systeme, die auf optischen Uhren und Quantengravimetern basieren, sind in der Entwicklung, und erste Systeme sind auf dem Markt. Ihre anfänglichen Kosten und ihre Größe begrenzen derzeit ihren Einsatz zum Beispiel im Luft- und Raumfahrtsektor, der an dieser Technologie interessiert ist. Große Nachfrage nach Quantensensoren kommt auch aus dem

ters, including those in the key industrial sectors mentioned above: telecommunications, medicine and transport.

But not all new technologies are brought to market by established companies. Emerging technologies carry a high risk because the markets are not fully understood or not yet developed. Or there is a lack of resources to launch a completely new product line. This situation is an opportunity for start-ups. There have been several start-ups in the field of quantum technology in recent years, especially in the fields of quantum communication and information technology, and new supply chains have formed.

The Berlin-Brandenburg region is very successful in establishing start-ups, with significant investments being made here. According to the Start-up Barometer Germany from January 2019, the region received over 58% of all financing for Germany, a total of 2.6 billion euros. With this track record and the German government's pledge of comprehensive support for quantum start-ups², a number of new quantum companies can be expected to settle in Berlin or Brandenburg.

In its "Regional Innovation Scoreboard", an instrument for assessing regional innovation, the European Commission has classified Berlin as an innovation leader. The positive conditions in research, networking and infrastructure leads to the conclusion the region of Berlin-Brandenburg is well positioned to advance quantum photonics and to be one of the key global players in this emerging technology sector.

Raumfahrtsektor. Es gibt bedeutende Aktivitäten zur Entwicklung von luftgestützten Gravimetern.

Ein massenverfügbarer Quantencomputer ist noch einige Zeit entfernt. Es gibt jedoch weltweit bedeutende Aktivitäten hierzu, die enorme Investitionen anziehen, sowohl von Ländern und multinationalen Unternehmen als auch von Risikokapitalfonds. Zusätzlich zu bereits geplanten Programmen kündigte Deutschland im Juni 2020 an, 2 Milliarden Euro unter anderem in zwei Quantencomputer zu investieren.

Der wichtigste Marktsektor für Quantentechnologien ist derzeit der Forschungsmarkt. Dafür werden derzeit von Regierungen weltweit Milliardenbeträge investiert. Die nationalen und europäischen Programme für die schnelle Entwicklung der Quantentechnologien werden sich auch positiv auf die Berlin-Brandenburger Aktivitäten im Bereich der Quantenphotonik auswirken.

Innovationsfreundliches Umfeld

Innovation profitiert von Menschen, die interdisziplinär arbeiten. Berlin und Brandenburg unterstützen dafür mehrere strategische Cluster, darunter Cluster in den drei erwähnten Schlüsselindustriesektoren Telekommunikation, Medizin und Transport.

Aber nicht alle neuen Technologien werden von etablierten Unternehmen auf den Markt gebracht. Aufstrebende Technologien bergen ein hohes Risiko, weil die Märkte nicht vollständig verstanden werden oder noch nicht entwickelt sind. Oder es mangelt an Ressourcen, um eine völlig neue Produktlinie aufzuziehen. Diese Situation ist eine Chance für Start-ups. Es gab in den letzten

Jahren mehrere Neugründungen im Bereich der Quantentechnologien, insbesondere auf dem Gebiet der Quantenkommunikation und der Informatik, wobei sich neue Lieferketten bilden.

Die Region Berlin-Brandenburg ist sehr erfolgreich bei der Gründung von Start-ups, hier werden erhebliche Investitionen getätigt. Laut dem Start-up-Barometer Deutschland vom Januar 2019 erhielt die Region über 58 % aller Finanzierungen für Deutschland, insgesamt 2,6 Milliarden Euro. Sie verfügt über ein blühendes Innovations-Ökosystem. Mit dieser Erfolgsbilanz und der zugesagten umfassenden Unterstützung für Quantentechnologie-Start-ups durch die deutsche Bundesregierung² erwarten wir, dass sich hier einige neue Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien ansiedeln werden.

Die Europäische Kommission hat in ihrem „Regional Innovation Scoreboard“, einem Instrument zur Bewertung regionaler Innovation, Berlin als Innovationsführer eingestuft. Die Situation in der Forschung, bei Vernetzung und Infrastruktur lassen den Schluss zu, dass Berlin-Brandenburg gut aufgestellt ist, die Quantenphotonik voranzutreiben und zu den entscheidenden globalen Akteuren in diesem aufstrebenden Technologiesektor zu gehören.

²„Eckpunkte des Konjunkturpakets: Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken“, Bundesministerium der Finanzen, Juni 2020





Partner portraits

Partnerportraits



The Photonics Cluster at Berlin Partner

Der Cluster Optik und Photonik bei Berlin Partner

-  Quantum communication
-  Quantum sensing
-  Quantum computing
-  Quantum simulation

Optical technologies have a long tradition in the Berlin-Brandenburg region and are represented by more than 400 companies and research facilities. Simultaneously, local stakeholders are defining new topics and setting strong accents in top-level research and applications. This increases Berlin's appeal for specialists from all over the world. The development of new quantum technologies (QT) promises great potential for future communication and sensor technologies. This can be seen in the increasing number of QT start-ups and the settlement of new companies.



The regional networking helps with the development of innovative technologies.

The Photonics Cluster at Berlin Partner, Berlin's central economic development agency, actively supports the trend in QTs. They are anchored as a key topic in the cluster's master plan, i.e. the strategic development of the Berlin-Brandenburg region. We connect stakeholders from industry and science, help with the search for project partners, provide information about funding opportunities, accompany the proposal application process, support young entrepreneurs with their start-ups and support existing companies in their growth.

Optische Technologien haben eine lange Tradition in Berlin und Brandenburg und werden durch über 400 Unternehmen und Wissenschaftseinrichtungen repräsentiert. Gleichzeitig gelingt es der regionalen Branche, kontinuierlich neue Themenfelder zu erschließen und sowohl national als auch international starke Akzente in Spitzenforschung und Anwendung zu setzen. Dies steigert die Attraktivität des Standortes Berlin auch für Fachkräfte aus der ganzen Welt. Die Entwicklungen in der Quantentechnologie (QT) sind hierbei ein Beispiel, das mit Blick auf die Zukunft in den Bereichen Kommunikation und Sensorik großes Potential verspricht. Erkennbar ist dies in der steigenden Anzahl von QT-Startups im Umfeld der Forschungseinrichtungen und der Ansiedlungsdynamik neuer Unternehmen, welche von der Nähe zur Wissenschaft profitieren.

Der Cluster Optik und Photonik bei Berlin Partner, der zentralen Wirtschaftsförderinrichtung Berlins, unterstützt aktiv diesen Trend in den Quantentechnologien. Diese sind als Schwerpunktthema im Masterplan des Clusters, d.h. der strategischen Entwicklung aus Sicht der Länder Berlin und Brandenburg, verankert. Wir bringen Akteure aus Industrie und Forschung zusammen, sind Ansprechpartner, wenn es um Fördermöglichkeiten für Projektvorhaben geht, und unterstützen bei der Suche nach Konsortialpartnern sowie der Antragstellung. Wir unterstützen junge Unternehmer bei ihren Neugründungen und helfen bestehenden Firmen, ihr Wachstum voranzutreiben.

Gerrit Rössler
Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH
Cluster Optik und Photonik
Ludwig-Erhardt-Haus
Fasanenstraße 85
10623 Berlin
www.optik-bb.de

Quantum technology for space

Quantentechnologie für den Weltraum

The DLR-Institute of Optical Sensor Systems develops active and passive optical sensor systems for spaceborne and airborne applications as well as for robotic systems. Data processing, also using artificial intelligence, is a main component of these sensors. Our vision is to develop autonomous optical sensor systems in analogy and extension of the human visual perception.

The institute is involved in numerous national and international cooperations and space projects for Earth observation, planetary research and security. Examples are the DESIS hyperspectral imager onboard the ISS, the MERTIS infrared spectrometer for ESA mission to Mercury and focal plane units for several high-resolution Earth observation satellites.







Testing of space hardware at the DLR-Institute of Optical Sensor Systems.

Quantum technologies are vital for the institute's mission. The research activities cover novel quantum materials, sensors and detectors with quantum-limited sensitivity. Regarding 2nd generation quantum technologies our interest is on quantum light sources and quantum memories, as well as on applications thereof in quantum communication and computing.

Das DLR-Institut für Optische Sensorsysteme erforscht und entwickelt aktive und passive optische Sensorsysteme für die Raumfahrt, für fliegende Plattformen und für robotische Systeme. Die Datenprozessierung, auch mit Methoden der künstlichen Intelligenz, ist integraler Bestandteil der Sensoren. Unsere Vision ist die Entwicklung autonomer optischer Sensorsysteme in Analogie und Erweiterung der visuellen menschlichen Wahrnehmung.

Das Institut ist an zahlreichen nationalen und internationalen Kooperationen und Weltraumprojekten in der Erdbeobachtung, der Planetenforschung und der Sicherheitsforschung beteiligt. Beispiele sind das abbildende Hyperspektralinstrument DESIS auf der ISS, das Infrarotspektrometer MERTIS für die ESA-Mission zum Merkur und zahlreiche Fokalebenensysteme für Satelliten zur hochauflösenden Erdbeobachtung.

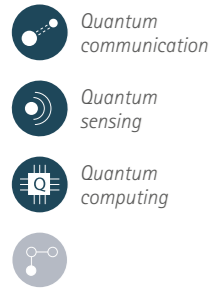
Quantentechnologien sind wesentlich für die Mission des Instituts. Wir untersuchen und entwickeln neuartige Quantenmaterialien sowie Sensoren und Detektoren mit Quanten-begrenzter Empfindlichkeit. Hinsichtlich der Quantentechnologien der zweiten Generation liegt der Forschungsschwerpunkt auf grundlegenden Methoden, etwa Quantenlichtquellen und Quantenspeichern, sowie deren Anwendungen in Quantenkommunikation und Quantencomputing.

-  Quantum communication
-  Quantum sensing
-  Quantum computing
-  Quantum simulation

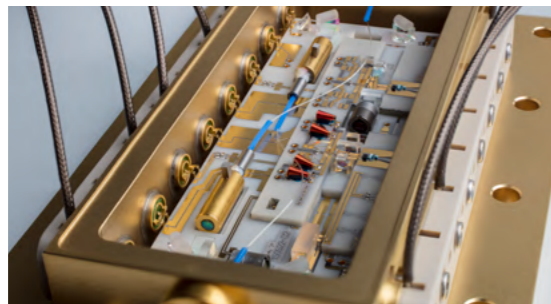
Prof. Dr.
Heinz-Wilhelm Hübers
DLR German Aerospace Center
DLR-Institute of Optical Sensor Systems
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin
www.dlr.de/os

Integrated quantum technology at FBH

Integrierte Quantentechnologien am FBH



FBH carries out R&D activities to bring quantum technology from proof-of-concept demonstrations to industry. Our applications include quantum sensing, quantum communication and quantum computing. FBH builds on its core competencies, III-V semiconductor, microwave and diode laser technology, and extends its technology portfolio where necessary. Activities cover the development of photonic components and hybrid micro-integrated photonic modules with emphasis on narrow and ultra-narrow line width lasers.



Hybrid micro-integrated diode laser module for space-based optical clocks. Copyright: FBH/schurian.com

Further, we develop quantum sensors based on high-precision spectroscopy of atomic systems. Here, miniaturization of the physics packages for optical frequency references is important. Other research focuses on nanostructured diamond systems to enable strong light-matter interaction at the single-photon level for future quantum communication platforms. Our staff also develops low-loss quantum nonlinear optical devices. These rely on chip-based optical components that enable strong coupling of the guided light to quantum emitters. The activities include R&D for space applications.

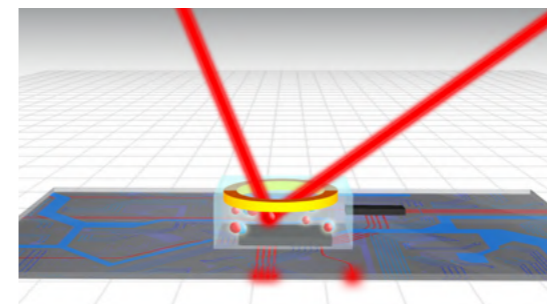
Ziel der R&D-Aktivitäten des FBH ist es, bei den Quantentechnologien den Schritt von Proof-of-Concept-Demonstrationen hin zu industrietauglichen Lösungen zu ermöglichen. Anwendungsfelder sind die Quantensensorik, die Quantenkommunikation und das Quantencomputing. Dafür nutzt das FBH seine Kernkompetenzen im Bereich der III-V-Halbleiter-, der Mikrowellen- und der Diodenlaser-Technologie und erweitert dieses Portfolio nach Bedarf.

Unsere Tätigkeiten umfassen die Entwicklung von photonischen Komponenten und hybriden mikrointegrierten photonischen Modulen, insbesondere von schmalbandigen und ultra-schmalbandigen Lasermodulen, etwa für die Quantensensorik. Ferner entwickeln wir integrierte Quantensensoren, die die Methoden der Präzisionsspektroskopie an Atomen nutzen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Miniaturisierung der Geräte für den Einsatz in Feldsensoren und optischen Frequenzreferenzen. Nanostrukturierte Diamantsysteme werden mit dem Ziel erforscht, eine starke Licht-Materie-Wechselwirkung für einzelne Photonen zu erreichen und diese an Diamant-basierte Quantenspeicher zu koppeln. Diese Arbeiten sind für die Realisierung künftiger Quantenkommunikationssysteme relevant. Wir entwickeln auch verlustarme chipbasierte optische Komponenten, um eine starke Kopplung des geführten Lichts an Quantenemitter zu ermöglichen. Nichtlineare optische Quantenbauelemente werden künftig in der Quanteninformationsverarbeitung zum Einsatz kommen.

Quantum photonic system integration

Systemintegration für photonische Quantensysteme

Fraunhofer IZM has been harnessing innovative techniques for photonic system integration and miniaturization to tackle the challenges posed by quantum technologies (QT). In this way, we seize their enormous potential to overcome the inherent limitations of current technology.



Fraunhofer IZM's vision of a highly integrated, cold-atom based quantum sensor.

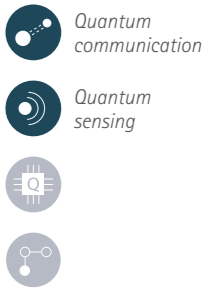
We pursue several solutions in the development of all-glass quantum chips:

- Hermetic connection of glasses for the scalable production of passive micro-UHV chambers
- Glass metallization and structuring of vias and conductor paths to integrate electric functionalities (DC and HF)
- Integration of optical waveguides inside the glass walls of UHV chambers
- Design and production of “optical chips” on glass (passive waveguide structures like splitters, beam combiners, resonators)
- Adapted processing for custom refractive indices of glass-integrated waveguides for vacuum feedthroughs, creation of strong evanescent fields in the vicinity of quantum emitters (e.g. nitrogen-vacancy centres), trapping of neutral atoms in the evanescent field, decoupling of guided optical beams
- Fiber-optical interconnections

Das Fraunhofer IZM hat einen Schwerpunkt auf innovativen Techniken zur photonischen Systemintegration und Miniaturisierung und wendet dies auf die Herausforderungen in den Quantentechnologien an.

Wir verfolgen insbesondere die folgenden Lösungsansätze auf dem Weg zu glasbasierten Quantenchips:

- Hermetische Verbindungen von Gläsern für die skalierbare Fertigung von passiven Mikro-UHV-Kammern
- Metallisierung von Gläsern und Strukturierung von Durchkontaktierungen und Leiterbahnen zur Anbringung der elektrischen Funktionalität (DC und Hochfrequenz)
- Integration optischer Wellenleiter direkt in die gläsernen Wände von UHV-Kammern
- Design und Herstellung von „optischen Chips“ auf Glas (passive Wellenleiterstrukturen wie Splitter, Strahlkombinierer, Resonatoren)
- Designgerechte Prozessierung für maßgeschneiderte Brechzahlprofile von Wellenleitern im Glas für Vakuumdurchführungen, Erzeugung von starken evaneszenten Feldern in der unmittelbaren Nähe von Quantenemittern, Fangen von Neutralatomen im evaneszenten Feld, Auskopplung der geführten optischen Leistung in einen Freistrahl und Strahlformung
- Assemblierung von Mikrooptiken innerhalb von UHV-Kammern
- Integration von Lichtquellen samt Steuer Elektronik auf die Glassubstrate und Einkopplung von Licht in die Wellenleiter
- Hocheffiziente Kopplung optischer Glasfasern mit Hilfe innovativer Verbindungstechniken



Theory for quantum technologies

Theorie für die Quantentechnologien

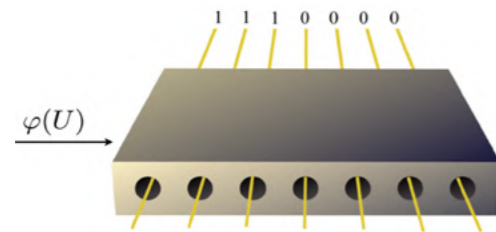
Quantum communication



Quantum computing

Quantum simulation

Quantum technologies promise new applications of different types, including secure communication, computing beyond classical capabilities and simulation of complex quantum systems. What applications these ultimately are, however, has not yet been satisfactorily explored. The starting point of our research is the premise that their full potential waits to be unleashed. We ask in what way realistic quantum computers can actually solve problems and how one can expect a quantum advantage. Quantum error correction allows for the reliable computation in the presence of errors.



A schematic depiction of a quantum sampling device designed to outperform classical computers.

In known schemes the overheads are too large, however. We analyze what specific problems quantum simulators can address. We also pose questions about what kinds of quantum communication protocols can be conceived and how we can develop a vision of the quantum internet. A recurrent theme is the issue how one can certify the correct functioning of components. Despite our research being pursued with theoretical, often mathematical, methods, our work is often linked to quantum optical experiments.

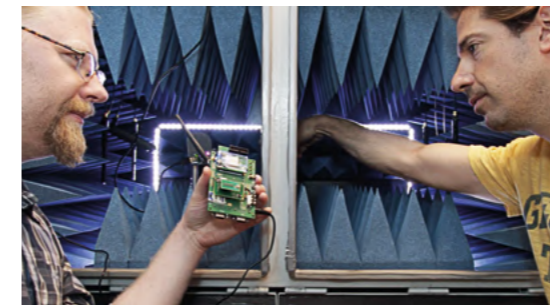
Quantentechnologien versprechen neue Anwendungen unterschiedlicher Art, von sicherer Kommunikation über Berechnungen jenseits des klassisch Möglichen bis hin zu Simulationen komplexer Quantensysteme. Welche Anwendungen dies genau sind, ist allerdings noch nicht hinreichend untersucht. Ausgangspunkt unserer Forschung ist, dass das volle Potential von Quantentechnologien noch nicht bekannt ist. Wir untersuchen, in welcher Weise realistische Quantenrechner Probleme lösen können und wie man einen Quantenvorteil erwarten kann. Quanten-Fehlerkorrektur erlaubt Quantenrechnen auch unter realistischen Fehlern, allerdings sind die bekannten Arten des Kodierens noch zu aufwendig. Wir analysieren, welche Probleme Quantensimulatoren adressieren können, etwa von ultrakalten Atomen. Ebenso untersuchen wir, welche Quantenkommunikationsprotokolle es geben kann und wie man sich tatsächlich die Vision eines Quanteninternets vorstellen kann. Eine häufig wiederkehrende Frage ist die, wie sich das korrekte Funktionieren der Komponenten von Quantentechnologien zertifizieren lässt. Auch wenn wir mit theoretischen, oft mathematischen, Methoden arbeiten, ist die Arbeit häufig eng an Experimente gekoppelt, vor allem an quantenoptische Experimente.

Prof. Dr. Jens Eisert
Freie Universität
Berlin Dahlem
Center for Complex
Quantum Systems
Arnimallee 14
14195 Berlin-Dahlem
www.physik.fu-berlin.de

GoQuantum: Secure communication for today powered by quantum-tech

GoQuantum: sichere Kommunikation unterstützt durch Quanten-Tech

GoQuantum is a startup which began as an R&D initiative on secure communications of QIN Technology in Santiago, Chile. Its founders, Raúl Zuleta (Electronics and Telecommunications Engineer, MSc Statistics) and José Brito (Physicist, PhD in Quantum Communications) envisioned bringing quantum technologies closer to the current standards in communication security. After three years of development with the support of local grants and V.C. investment,



Among others, GoQuantum develops devices for radio communications using quantum-safe technologies.

GoQuantum started its activities in Berlin, a strategic hub for the developments of technology startups, with a growing ecosystem in communication and quantum technologies. Currently, GoQuantum is focused on the development of connectivity devices for post-quantum communication, using algorithms not affected by quantum computers, which could break standard encryption. An important feature is the use of quantum random number generators for extra-secure keys as well as custom implementations of security mechanisms tailored for the low-level radio access network for 5G and IoT.

GoQuantum ist ein Start-up für Kommunikationssicherheit und wurde 2016 als R&D-Initiative von QIN Technology in Santiago, Chile, ins Leben gerufen. Die Gründer, Raúl Zuleta (Elektronik- und Telekommunikationsingenieur, MSc Statistik) und Dr. José Brito (Physiker, Quantenkommunikation) wünschten sich eine engere Bindung zwischen Datensicherheit und Quantenkommunikation. Drei Jahre später startete GoQuantum in Deutschland. Der Standort Berlin ist als Start-up-Hub und Entwicklungsraum für Quanten- und Kommunikationstechnologie besonders attraktiv. Derzeit setzt GoQuantum auf die Entwicklung von Konnektivitätsgeräten mit Post-Quanten-Kryptographie. Dabei kommen Algorithmen zum Einsatz, die die gängigen Verschlüsselungsverfahren vor Angriffen von Quantenrechnern schützen und so die Datensicherheit garantieren. Eine wichtige Eigenschaft dieser Technologien ist die Nutzung von Quantenzufallszahlengeneratoren für besonders sichere Schlüssel sowie maßgeschneiderte Sicherheitsimplementierungen für Low-Level-Radionetzwerke (z.B. 5G, IoT).

Quantum communication



Quantum computing

Quantum simulation

Dr. José Brito
GoQuantum
c/o Factory Works GmbH
Rheinsberger Str.76/77
10115 Berlin
www.goquantum.tech

Innovative photonics for applied quantum technologies

Innovative Photonik für angewandte Quantentechnologien



Quantum communication



Quantum sensing

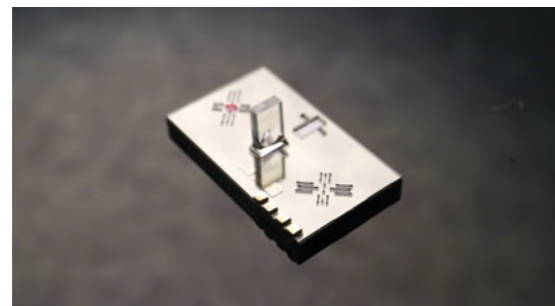


Quantum computing



Quantum simulation

Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute continuously expands its comprehensive experience and expertise for designing, developing and prototyping photonic components and systems towards quantum communication and sensing. Our foundries offer rapid and flexible development and fabrication of photonic integrated circuits (PICs) and components based on InP, polymer, graphene, and SiN according to customer needs. With our innovative PolyBoard platform, we offer hybrid integration of low loss free-space sections and bulk materials, such as Faraday rotators and nonlinear crystals for quantum applications, into PICs via micro-optical benches. We fabricate vertically illuminated and waveguide-integrated InP detectors with single photon sensitivity in the O- and C-band. These components we implement in fiber and free-space optical systems for secure quantum communication and sensing. For R&D purposes we offer a quantum test-bed facility comprising optical free-space and fiber links.



Photonic integrated PolyBoard chip.
Copyright: HHI

We are looking forward to sharing our facilities and expertise and shape together the future of quantum technologies.

Aufbauend auf unserer langjährigen Erfahrung und umfassenden Expertise im Design und der Entwicklung photonischer Komponenten, Systeme und Anwendungen orientiert sich das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut zunehmend auf den zukunftsreichen Markt photonischer Quantentechnologien für Kommunikation, Sensorik und Metrologie.

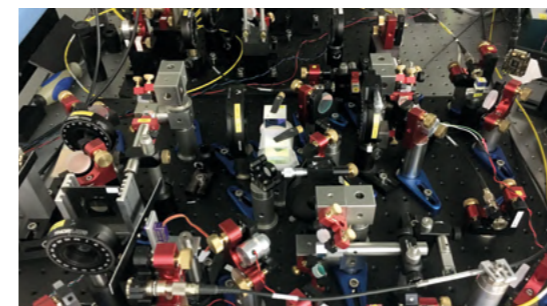
Mit unseren hausinternen Produktionsanlagen bieten wir eine schnelle, flexible und kundenspezifische Herstellung und Entwicklung von photonisch-integrierten Schaltkreisen (PICs) und Komponenten auf Basis von InP, Polymer, Graphen und SiN an. Unsere innovative PolyBoard-Plattform für mikrooptische Bänke ermöglicht die hybride und verlustarme Integration von freistrahl-optischen Komponenten wie Faraday-Rotatoren und nichtlinearen Kristallen für Quantenanwendungen in PICs. Wir fertigen vertikal beleuchtete und Wellenleiter-integrierte InP-Detektoren mit Einzelphotonempfindlichkeit im O- und C-Band. Auf Basis dieser Komponenten implementieren wir Systeme für Quantensensorik und abhörsichere Quantenkommunikation über Freistrah und Glasfaser. Für Forschungs- und Entwicklungsprojekte stellen wir ein Quanten-Testbett mit optischen Freistrah- und Glasfaserverbindungen bereit.

Wir freuen uns auf Ihr Interesse an unseren Angeboten und unserer Expertise, um gemeinsam zukünftige Quantentechnologien zu gestalten.

Quantum technology and modeling of complex photonic systems

Quantentechnologie und Modellierung komplexer photonischer Systeme

Research and teaching at the Institute of Physics at Humboldt-University concern quantum information technology in many ways. On the experimental side, there is expertise in quantum optics with hybrid systems, where the specific properties of atom(-like) emitters are combined with enhanced light-matter interaction in photonic nanostructures. Quantum light sources and quantum non-linearity are realized to provide novel functionalities in future quantum technology modules for quantum communication, processing and imaging. We perform quantum-enhanced optical precision measurements and develop ultra-stable optical systems to test fundamental physics, even in space.



Details of a compact setup to perform quantum information processing with single photons. Copyright: O. Benson, HU Berlin

On the theoretical side, there is ample expertise in modelling of complex photonic systems. We devise powerful computational methods to reveal light-matter interactions with emphasis on photons in confined geometry, quantum control and quantum simulation. A comprehensive educational program for bachelor, master and doctoral students offers specialization in optical science and quantum physics.

Forschung und Lehre am Institut für Physik der Humboldt-Universität befassen sich in vielerlei Hinsicht mit der Quanteninformationstechnologie. Auf der experimentellen Seite haben wir Expertise in der Quantenoptik mit Hybridsystemen, die die spezifischen Eigenschaften von Atomen oder atomähnlichen Emittern mit einer verstärkten Licht-Materie-Wechselwirkung in photonischen Mikro- und Nanostrukturen kombinieren. Quantenlichtquellen und Quantenichtlinearität werden realisiert, um neue Funktionalität in zukünftigen Quantentechnologiemodulen bereitzustellen, insbesondere für Anwendungen in Quantenkommunikation, Quantenrechnen und Quantenbildgebung. Wir führen quantenverstärkte optische Präzisionsmessungen durch und entwickeln ultrastabile optische Systeme, um grundlegende Physik auch im Weltraum zu testen.

Auf der theoretischen Seite haben wir exzellente Fachkenntnisse in der Modellierung komplexer photonischer Systeme. Wir entwickeln auch leistungsstarke numerische Methoden, um klassische und Quanten-Licht-Materie-Wechselwirkungen mit Schwerpunkt auf Photonen in begrenzter Geometrie, Quantenkontrolle und Quantensimulation aufzudecken. Ein umfassendes Bildungsprogramm für Bachelor- und Masterstudenten und Doktoranden ermöglicht eine Spezialisierung in den optischen Wissenschaften und der Quantenphysik.



Quantum communication



Quantum sensing



Quantum computing



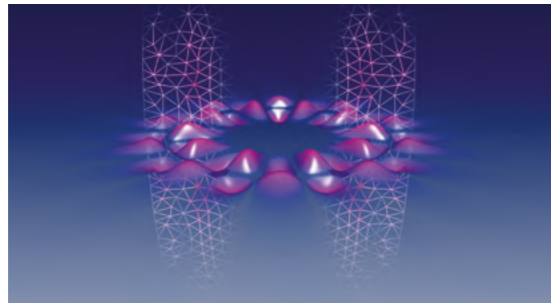
Quantum simulation

JCMwave: Simulation and design for optical quantum technologies

JCMwave: Simulationen und Design für optische Quantentechnologien

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

JCMwave develops software for the simulation and design of complex nanooptical systems. Typical application areas are, e.g. lithography, metrology, solar cells, light sources, including single photon sources, and nanostructured materials.



Resonance modes help to understand the complex interplay of quantum systems with their environment.

For the use in quantum technologies the software comprises special features such as the simulation of quantum dot light sources, the determination of the Purcell effect, or the calculation of resonator field modes.

Our team of physicists, mathematicians and computer scientists is continuously improving our software to support current and future (quantum) optical applications. To this end, we conduct research projects with universities and research institutes, support our industrial users in the investigation of novel problems, and develop user-specific tools. For this, we make use of our accurate and efficient simulation methods as well as advanced machine learning technologies.

The sky's the limit and we certainly will not limit ourselves to classical computing, but we are also striving to port our software to future quantum computers.

Die JCMwave GmbH entwickelt und vertreibt eine Softwareumgebung für die Simulation und das Design komplexer nanooptischer Systeme. Zu den typischen Anwendungsgebiete zählen unter anderem die Simulation lithographischer Vorgänge und optischer Messverfahren sowie das Design von Solarzellen, LEDs, VCSELn, Einzelphotonenquellen und funktionellen Metaoberflächen.

Für den Einsatz in optischen Quantentechnologien stehen spezielle Funktionen wie die effiziente Simulation von Punktlichtquellen (Quantenpunkten), die Bestimmung des Purcelleffekts oder die Berechnung der Feldmoden optischer Nanoresonatoren zur Verfügung.

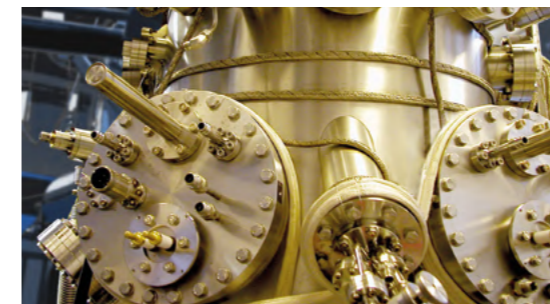
Das Ziel unseres Teams aus Physikern, Mathematikern und Informatikern ist es, unsere Softwaretechnologien immer weiter zu entwickeln, um aktuelle und zukünftige (quanten-)optische Anwendungen zu unterstützen. Dazu führen wir Forschungsprojekte mit Universitäten und Forschungsinstituten durch. Ebenso unterstützen wir unsere industriellen Anwender bei der Untersuchung neuartiger Problemstellungen und entwickeln anwenderspezifische Tools. Dabei greifen wir auf unsere hochgenauen und effizienten Simulationsmethoden sowie fortschrittlicher Verfahren des maschinellen Lernens zurück.

Auch beim klassischen Computer wollen wir nicht Halt machen, sondern planen schon jetzt, unsere Software auch auf kommende Quantencomputer zu portieren.

Crystal growth for quantum computers

Kristallzüchtung für Quantencomputer

Due to their scalability, spin qubits in semiconductor materials are promising candidates as basic elements for quantum computers. For this reason, at Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) isotopically enriched thin strained ^{28}Si layers are grown between SiGe barriers by molecular beam epitaxy. Such a Si layer forms a quantum well for a two-dimensional electron gas. Top gates on such semiconductor structures electrostatically form the quantum dots which are hosting single electrons for spin manipulation.



Molecular beam epitaxy (MBE) cluster tool.

Three major factors determine the quantum suitability of the Si layer: structural perfection, a low content of electrically active impurities (not more than 10^{14} cm^{-3}), and a low content of ^{29}Si isotopes. The technology to grow highly enriched ($>99.99\%$) and purified ^{28}Si bulk crystals developed by the IKZ for the former Avogadro project will be used here to get the necessary ^{28}Si evaporation sources. The research is carried out in cooperation with many partners, e.g. the Institute for Quantum Information (IQI), Aachen, and University of Nizhny Novgorod (UNN), Russia.

Spin-Qubits in Halbleitermaterialien sind als funktionelle Grundelemente aufgrund der nachgewiesenen Skalierbarkeit vielversprechende Kandidaten für die Realisierung von Quantencomputern. Aus diesem Grund werden am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) Isotopen-angereicherte, dünne, verspannte ^{28}Si -Schichten zwischen SiGe-Barriere-Schichten mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) aufgewachsen. Eine solche Si-Schicht bildet einen Quantentopf für ein zweidimensionales Elektronengas. Top-Gates auf derartigen Halbleiterstrukturen formen elektrostatisch Quantenpunkte, die einzelne Elektronen zur Spin-Manipulation beherbergen.

Drei Hauptfaktoren bestimmen die Eignung der Si-Schichten für diese Anwendungen: die strukturelle Perfektion, ein geringer Gehalt an elektrisch aktiven Verunreinigungen (nicht mehr als 10^{14} cm^{-3}) und ein minimaler Anteil an ^{29}Si -Isotopen. Die vom IKZ für das frühere Avogadro-Projekt entwickelte Technologie zur Züchtung hochangereicherter ($>99,99\%$) und extrem reiner ^{28}Si -Bulkkristalle wird eingesetzt, um das notwendige ^{28}Si -Verdampfungsmaterial für die MBE zu erhalten. Die Forschung wird in Zusammenarbeit mit vielen nationalen und internationalen Partnern durchgeführt, darunter das Institut für Quanteninformation (IQI) der RWTH Aachen und die Universität Nischni Nowgorod (UNN) in Russland.

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

Dr. Torsten Boeck
Leibniz-Institut für
Kristallzüchtung
Max-Born-Straße 2
12489 Berlin
www.ikz-berlin.de

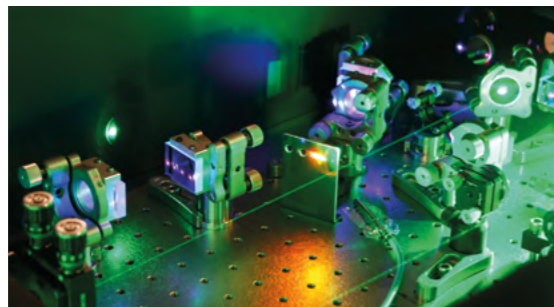
Dr. Philipp Schneider
JCMwave GmbH
Balivarallee 22
14050 Berlin
www.jcmwave.com

Reprogrammable optical chips

Reprogrammierbare optische Chips

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

The Max-Born-Institute is a member of the Leibniz association conducting basic research on laser-matter interaction, thereby offering unique insights on how light can be exploited to permanently modify the local properties of transparent solids. In glasses such as fused silica, optimizing the course of the laser-matter interaction makes it possible to fabricate optical chips made of complex networks of waveguides. In that sense, such optical chips are a direct optical analogue of the traditional printed electronic circuit boards (PCBs). At the same time, a judicious chip design can force light to propagate in exotic ways, which has no counterpart in the electronic realm.



Light source (optical parametric amplifier) used to manufacture networks of waveguides in glasses.

Taming these unusual propagation scenarios offers unprecedented opportunities wherever optical quantum effects can be exploited. In the next years, the femtosecond-laser microprocessing group together with the group for theoretical optics & photonics will focus on making such chips reprogrammable, holding the promise to provide versatile optical circuits for classical and quantum-based applications.

Dr. Alexandre Mermillod-Blondin
Max-Born-Institut Berlin
Max-Born-Straße 2a
12489 Berlin
www.mbi-berlin.de

Das Max-Born-Institut (MBI) betreibt Grundlagenforschung auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik und Kurzezeitdynamik bei der Wechselwirkung von Materie mit Laserlicht und verfolgt daraus resultierende Anwendungsaspekte. Hierzu entwickeln und nutzen wir ultrakurze und ultraintensive Laser und laserbasierte Kurzpuls-Lichtquellen in einem breiten Spektralgebiet in Verbindung mit Methoden der nichtlinearen Spektroskopie und zeitaufgelösten Strukturforschung. Unsere Forschung erlaubt direkte Einblicke in mikroskopische Wechselwirkungen, die den makroskopischen Eigenschaften transparenter Festkörper zugrunde liegen. Dazu gehören auch einmalige Einblicke in die dauerhafte Strukturmodifikation in Gläsern. Dies erlaubt die Herstellung von optischen Chips mit komplexen Netzwerken von Wellenleitern – ein direktes optisches Analog zu traditionellen elektronischen Schaltkreisen.

Elaboriertes Design der optischen Chips kann Licht zu exotischen Propagationsarten zwingen. Hierzu gibt es in der Elektronik kein Analog mehr. Daher ermöglichen optische Chips einmalige Möglichkeiten für die Nutzbarmachung von Quanteneffekten. Im Moment fokussiert sich unsere Forschung auf die Produktion von reprogrammierbaren optischen Chips, die sich in vielen Bereichen der Quantentechnologien einsetzen lassen.

Laser systems for optical clocks and quantum computing

Lasersysteme für optische Uhren und Quantencomputer

Menlo Systems provides complete laser systems for cold atom experiments, which are necessary for optical (lattice) clocks and quantum simulation or computing experiments based on cold atoms or ions.

The system consists of a cavity-stabilized laser for sub-Hz line width, an optical frequency comb in the visible and infrared. The comb transfers the narrow line width and stability throughout the entire spectrum and to CW lasers which are locked to the comb for all required transitions for cooling, repumping, and clock transitions.



(Left) Rack-mounted Strontium Lattice Laser System
(Right) Benjamin Sprenger, Menlo Systems Berlin.

Strontium lattice clocks based on the Hz-level transition in neutral Sr-87 at 698 nm require six lasers in the red region for cooling, repumping, and as a lattice laser. The complete Menlo laser system includes all of these with sub-Hz line width in three 19" racks, and can immediately be connected to the physics package via optical fibers.

Menlo Systems has been building optical frequency combs, cavity-stabilized lasers, femtosecond lasers, and terahertz systems for nearly two decades in Munich. Recently, we opened a small office in Adlershof in Berlin.

Menlo Systems bietet komplette Lasersysteme für Experimente auf dem Gebiet der kalten Atome an. Das Anwendungsgebiet umfasst optische Uhren sowie Quantensimulatoren oder Quantencomputer, die auf kalten Atomen und Ionen basieren.

Das System besteht aus einem ultrastabilen Laser mit unter 1 Hz Linienbreite, einem optischem Frequenzkamm im sichtbaren und nah-infraroten Bereich. Der Kamm überträgt die schmale Linienbreite und Stabilität des ultrastabilen Lasers auf den gesamten spektralen Bereich und auf die CW-Laser, die die atomaren Übergänge treiben und alle auf dem Kamm stabilisiert sind.

Strontium-Gitter-Uhren basieren auf dem Hz-schmalen Übergang in neutralem Sr-87 bei 698 nm und benötigen sechs Laser im roten Bereich für das Kühlen, Rückpumpen und als Gitterlaser. Das komplette Menlo-Lasersystem beinhaltet alle Laser mit Sub-Hz-Linienbreite in drei 19-Zoll-Racks, und kann direkt an die Atomfalle per Faser angeschlossen werden.

Menlo Systems entwickelt und produziert seit fast zwei Jahrzehnten Frequenzkämme, ultrastabile Laser, Femtosekunden-Laser, und Terahertz-Systeme in der Zentrale in München. Kürzlich haben wir zudem ein kleines Büro in Adlershof in Berlin eröffnet.

- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

Dr. Benjamin Sprenger
Menlo Systems GmbH
Rudower Chaussee 17
12489 Berlin
www.menlosystems.com

M Squared – Realising the potential of the new quantum age

M Squared erschließt das Potential des neuen Quantenzeitalters



Quantum sensing



Quantum computing



M Squared is a multi-award-winning photonics and quantum technology company. For over a decade, it has provided the world's purest light to enable scientific progress and power industry – helping to address some of society's greatest challenges. Its laser systems and applications are working to improve healthcare, provide the scientific understanding to help halt climate change, and realize the potential of the coming quantum age. The company is already at the heart of the international quantum supply chain, developing components, sub-systems, and sensors for commercial quantum applications including quantum gravimetry, navigation and quantum computing via its dedicated quantum division.



M Squared developed the UK's first commercial quantum accelerometer for navigation applications.

M Squared has established itself as one of Europe's most innovative, disruptive technology businesses, recognised by the Deloitte Technology Fast 50, The Sunday Times Fast Track 100 and Export Track 100, and the Queen's Award for Enterprise in Innovation and International Trade. Founded in Scotland, M Squared currently employs over 100 people and has offices in the UK, Germany and USA.

M Squared ist ein mehrfach ausgezeichnetes Photonik- und Quantentechnologie-Unternehmen. Unsere Mission es ist, Lichtwerkzeuge höchster Güte einzusetzen, um wissenschaftlichen Fortschritt und die nachfolgende industrielle Anwendung zu ermöglichen und auf diese Weise drängende gesellschaftliche Probleme zu lösen. Das Kerngeschäft besteht in der Entwicklung von extrem stabilen und robusten Lasern sowie von vollintegrierten Quanten-, Biophotonik- und chemischen Sensorsystemen. M Squared unterstützt seit 2006 die Quantentechnologien-Gemeinschaft und nimmt hier inzwischen eine Führungsrolle in der internationalen Wertschöpfungskette ein. Die Firma entwickelt Komponenten, Subsysteme und Sensoren für kommerzielle Quantenanwendungen wie Quantengravimetrie, Navigation und Quantencomputer.

M Squared hat sich als eines der innovativsten und bahnbrechendsten Technologieunternehmen Europas etabliert und erhielt Auszeichnungen wie den Deloitte Technology Fast 50, den Sunday Times Fast Track 100 und Export Track 100 sowie den Queen's Award for Enterprise in Innovation and International Trade. M Squared wurde in Schottland gegründet und beschäftigt weltweit über 100 Mitarbeiter mit Niederlassungen in Großbritannien, Deutschland und den USA.

Dr. Thomas Laurent
M Squared Lasers UG
IGZ-Adlershof
Rudower Chaussee 29
12489 Berlin
www.m2lasers.com

OpTecBB: Regionally rooted, networking competences

OpTecBB: Regional verankert, Kompetenzen vernetzen

OpTec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e.V. is the competence network for optical technologies and microsystems technology in the Berlin-Brandenburg region. OpTecBB is an initiative of companies and scientific institutions in Berlin-Brandenburg with the aim of jointly researching and using these technologies. OpTecBB was founded in 2000 by companies, research institutions, universities and associations with the support of the responsible state ministries of Brandenburg and the Berlin Senate. Today the association has around 115 institutional members.



(c) OpTecBB e.V.: Berlin Photonics

OpTecBB is active in (1) photonics and quantum technologies for communication and sensor technology, (2) optical analysis, (3) lighting technology, (4) biophotonics and ophthalmic optics, (5) laser technology, (6) microsystems technology.

OpTecBB supports its partners in (a) the securing of skilled workers, (b) foreign trade promotion / trade fairs / internationalization, (c) start-up support, (d) location marketing, PR, and (e) political consulting and lobbying.

OpTec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e.V. ist das Kompetenznetz für Optische Technologien und Mikrosystemtechnik in den Ländern Berlin und Brandenburg. OpTecBB ist eine Initiative von Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen in Berlin und Brandenburg, die gemeinsame Wege zur Erschließung und Nutzung dieser Technologien gehen wollen. OpTecBB wurde im Jahr 2000 von Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Universitäten und Verbänden mit Unterstützung der zuständigen Landesministerien Brandenburgs und des Senats von Berlin gegründet. Heute hat der Verein rund 115 institutionelle Mitglieder.

OpTecBB ist aktiv in den Bereichen (1) Photonik und Quantentechnologien für Kommunikation und Sensorik, (2) Optische Analytik, (3) Lichttechnik, (4) Biophotonik und Augenoptik, (5) Lasertechnik, (6) Mikrosystemtechnik.

OpTecBB unterstützt seine Partner bei (a) Fachkräftesicherung, (b) Außenwirtschaftsförderung / Messen / Internationalisierung, (c) Start-up support, (d) Standortmarketing, PR, sowie (e) Politikberatung und Lobbying.



Quantum communication



Quantum sensing



Dr. Frank Lerch
OpTec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e.V.
Rudower Chaussee
12489 Berlin
www.optecbb.de

Quantum bits from nanostructures

Quantenbits aus Nanostrukturen

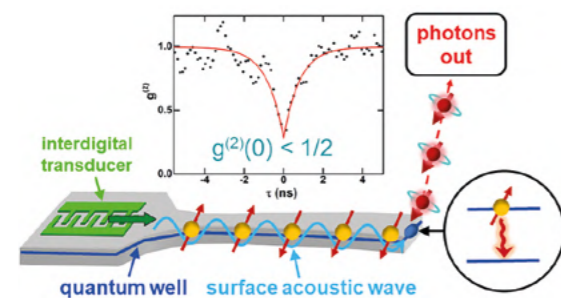
Quantum communication



Quantum computing



Research on quantum technology at PDI builds on our expertise in the epitaxy of semiconductor nanostructures as well as in phononics, quantum photonics and transport, and single-atom manipulation. Highlights combining these aspects are our hybrid opto-mechanical single-photon sources and spin processors based on surface acoustic waves, which transport spin-polarized electronic excitations and inject them into two-level centers, where they recombine and emit single photons.



Controlled transport of spin-polarized electronic excitations and emission of single photons.

In a related project, we aim at the realization of on-chip quantum circuits with a focus on the interconnections between quantum bits. Our qubits are built from lateral quantum dots and interconnected coherently in on-chip hybrid devices via electronic, phononic or photonic fields. To enhance quantum coherence by further miniaturization, we apply atom-by-atom fabrication using scanning tunneling microscopy. The latter allows us to build atomic-scale quantum structures on semiconductor surfaces and fully control their properties, with the ultimate goal to implement them in quantum information technology.

Die Forschung zu Quantentechnologien am PDI beruht auf unserer Expertise in der Epitaxie von Halbleiter-Nanostrukturen sowie in Phononik, Quantenphotonik, Quantentransport und der Manipulation einzelner Atome. Zu den Highlights, die diese Aspekte der Quantentechnologie kombinieren, gehören unsere hybriden opto-mechanischen Einzel-Photonen-Quellen und Spin-Prozessoren. Diese basieren auf akustischen Oberflächenwellen, die spinpolarisierte elektronische Anregungen transportieren und diese in Zentren mit zwei Zuständen injizieren, wo sie dann rekombinieren und einzelne Photonen aussenden.

In einem damit verwandten Projekt streben wir an, Quanten-Schaltkreise auf einem Chip zu realisieren, wobei wir unseren Fokus auf die Verbindungen zwischen Quanten-Bits legen. Unsere Qubits bestehen aus lateralen Quantenpunkten, die kohärent in hybriden Bauelementen auf einem Chip durch elektronische, phononische oder photonische Felder verbunden werden. Um die Quantenkohärenz durch weitere Miniaturisierung zu erhöhen, setzen wir Rastertunnelmikroskopie ein, mit der wir Strukturen Atom für Atom aufbauen. Dies erlaubt uns, Quantenstrukturen auf Halbleiteroberflächen auf atomarer Skala herzustellen und ihre Eigenschaften vollständig zu kontrollieren. Unser Ziel ist hierbei, solche Strukturen künftig in der Quanten-Informationstechnologie zu implementieren.

Dr. Carsten Hucho
Paul-Drude-Institut für
Festkörperelektronik,
Leibniz-Institut im
Forschungsverbund
Berlin e.V.
Hausvogteiplatz 5-7
10117 Berlin
www.pdi-berlin.de

Detection and (time-resolved) processing of single photons

Detektion und (zeitaufgelöste) Verarbeitung einzelner Photonen

PicoQuant is a world leading supplier of instrumentation for single photon detection and timing, i.e. devices which are crucial for the implementation of many optical quantum technologies. Our product portfolio encompasses single photon detectors from the UV to the NIR as well as time taggers, that can record absolute signal arrival times on several detection channels in parallel with picosecond resolution. Such time tags can be evaluated in fundamental methods such as photon coincidence detection, coincidence correlation and coincidence counting. Typical examples are Hanbury-Brown-Twiss set-ups to study single photon sources, quantum communication and quantum key distribution (QKD), Bell state measurements, or experiments on quantum gates towards the development of quantum computers.



MultiHarp 150, a time tagger for up to 16 detection channels with 10 picosecond timing resolution.

PicoQuant also hosts an annual International Symposium on "Single Photon based Quantum Technologies" that provides an interdisciplinary platform for the exchange of experience and information as well as sharing recent findings in the field of single photon based quantum technologies.

PicoQuant ist ein weltweit führender Hersteller von Instrumenten für die Detektion und Zeitmessung einzelner Photonen, d.h. von Komponenten, die für die Implementierung vieler optischer Quantentechnologien entscheidend sind.

Unser Produktportfolio umfasst Einzelphotonen-Detektoren vom UV bis zum NIR sowie Time-Tagger, mit denen absolute Signalkunftszeiten auf mehreren parallelen Detektionskanälen mit Pikosekunden-Zeitauflösung aufgezeichnet werden können. Solche Zeitstempel („time tags“) lassen sich dann mit grundlegenden Methoden wie Photonenkoinzidenzdetektion, Koinzidenzkorrelation und Koinzidenzzählung auswerten. Typische Beispiele sind Hanbury-Brown-Twiss-Messungen zur Untersuchung von Einzelphotonenquellen, Quantenkommunikation und Quantenschlüsselverteilung (QKD), Messungen von Bell-Zuständen oder Experimente an Quantengattern zur Entwicklung von Quantencomputern.

PicoQuant veranstaltet darüber hinaus ein jährliches internationales Symposium über „Single Photon based Quantum Technologies“, das eine interdisziplinäre Plattform für den Erfahrungs- und Informationsaustausch sowie für die gemeinsame Nutzung neuester Erkenntnisse auf dem Gebiet der auf Einzelphotonen basierenden Quantentechnologien bietet.

Quantum communication



Quantum sensing



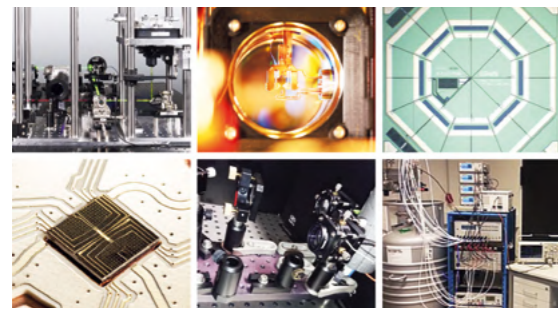
Dr. Andreas Bültner
PicoQuant GmbH
Rudower Chaussee 29
12489 Berlin
www.picoquant.com

Quantum Technology Competence Center (QTZ) at PTB

Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ) an der PTB

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

PTB as the National Metrology Institute of Germany has been contributing to the development of quantum physics from the very beginning and performs top-level research in several fields of quantum technology (QT), with a focus on quantum sensing and metrology. This expertise in QT, together with its mission to support industry as a governmental body, puts PTB into an ideal and natural position to transfer quantum technology from science to application in collaboration with industry and academia. For this task, the PTB Quantum Technology Competence Center has recently been established.



QT at PTB: single photons, optical clocks, ions traps, magnetometry, cryosensing, el. metrology.

At PTB's site in Berlin QT activities focus on quantum magnetometry and cryogenic sensors, employing for instance highly sensitive SQUIDs and optical magnetometry for metrology, fundamental research, medical applications and beyond. In the DFG-funded Core Facility "Metrology of Ultra-Low Magnetic Fields" PTB provides an exceptionally well controlled environment for sensing of smallest magnetic fields. This infrastructure, sensing systems and expertise are also accessible for external partners.

Die PTB als nationales Metrologieinstitut Deutschlands hat von Beginn an zur Entwicklung der Quantenphysik beigetragen und betreibt Forschung auf dem höchsten Niveau in diversen Gebieten der Quantentechnologie (QT), mit dem Fokus auf Quantensensorik und -metrologie. Unter anderem entwickeln und erforschen wir Einzelphotonenquellen und -detektoren, optische Atomuhren, Ionenfallen auf Chipstrukturen, Magnetometer, kryogene Sensoren und auf dem Josephson-Effekt basierende Spannungsnormale. Die damit verbundene Expertise in der QT, zusammen mit der gesetzlichen Aufgabe der PTB zur Unterstützung der Industrie, versetzt die PTB in eine ideale und natürliche Lage, die Quantentechnologie in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung von der Grundlagenforschung in die Anwendung zu überführen. Für diese Aufgabe wurde kürzlich das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ) an der PTB eingerichtet.

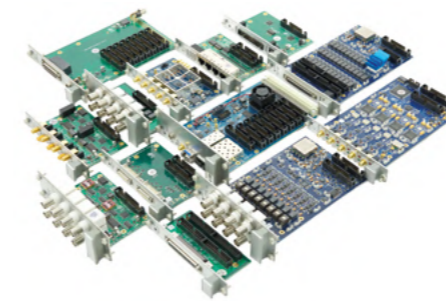
Am Berliner Standort der PTB liegt der Fokus auf Quantenmagnetometrie und kryogenen Sensoren, wie beispielsweise SQUIDs und optischer Magnetometrie für Metrologie, Grundlagenforschung, Anwendungen in der Medizin und darüber hinaus. Mit dem DFG-geförderten Gerätezentrum „Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder“ bietet die PTB etwa eine äußerst gut kontrollierte Umgebung für Messungen kleinster Magnetfelder. Diese Infrastruktur, zusammen mit vor Ort vorhandenen Sensorsystemen und der dazugehörigen Expertise, ist auch für externe Partner zugänglich.

QUARTIQ: Open tools for open physics

QUARTIQ: Open Tools for Open Physics

With the two projects ARTIQ and Sinara, QUARTIQ pioneers an international effort to develop open hardware and software in quantum technology applications. Its mission is to create algorithms and components for distributed high-performance measurement and control tasks that enable use of quantum technology at an industrial scale.

QUARTIQ builds on comprehensive research and consulting expertise in software, gateway, and hardware development. It has a long history of translating between novel scientific ideas and robust engineering capabilities.



The open hardware modules in the Sinara ecosystem support all areas of QT. Copyright: 2020 QUARTIQ GmbH

We supply dozens of universities as well as national research and metrology institutes worldwide with custom solutions and lead the control system design, development and integration in collaborative industrial research projects such as the transportable and robust optical atomic clock "opticklock".

Mit den beiden Projekten ARTIQ und Sinara führt die QUARTIQ GmbH ein internationales Netzwerk zur Entwicklung offener Hardware und Software für Anwendungen in der Quantentechnologie an. Unsere Mission ist es, Algorithmen und Komponenten für anspruchsvolle verteilte Mess- und Steuerungsaufgaben zu schaffen, die den Einsatz von Quantentechnologie im industriellen Maßstab ermöglichen.

QUARTIQ baut auf umfassender Erfahrung in der Forschung und Beratung zu Software-, Gateway- und Hardware-Entwicklung auf und übersetzt erfolgreich neue wissenschaftlichen Ideen in robuste technische Lösungen.

Wir beliefern weltweit Dutzende von Universitäten sowie nationale Forschungs- und Metrologieinstitute mit kundenspezifischen Lösungen und leiten die Entwicklung und die Integration von Steuerungssystemen in Verbundforschungsprojekten wie der transportablen und robusten optischen Atomuhr „opticklock“.

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

Dr. Robert Jördens
QUARTIQ GmbH
Rudower Chaussee 29
12489 Berlin
www.quartiq.de

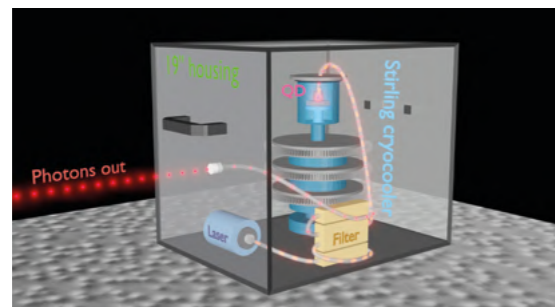
Dr. Nicolas Spethmann
Physikalisch-Technische
Bundesanstalt PTB
Braunschweig und Berlin
QTZ an der PTB
Abbestraße 2-12
10587 Berlin
QTZ: qtz.ptb.de
Core Facility: cf.ptb.de

Optoelectronics and devices for quantum-photonic technologies

Optoelektronik und Bauelemente für quantenoptische Technologien

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

Quantum optical technologies play a crucial role in quantum information technology. We expect a world in which quantum communication will be common and quantum computers will outperform classic computers. Research and teaching at the Institute of Solid State Physics at the Technical University of Berlin deal in many ways with the underlying phenomena. Professor Reitzenstein's group develops, for example, highly efficient



Schematic of a compact plug'n'play single-photon source as realized in a Berlin-Polish R&D project.

light sources for quantum applications. The components are optimized using precise numerical methods and are based on quantum dots and novel 2D materials as single-photon emitters. The infrastructure of the Center of Nanophotonics at the TU Berlin is available for their nanofabrication. The devices as well as their physical properties are studied in detail in quantum-optics laboratories. Another focus is on the development of quantum networks in the junior working group of Dr. Tobias Heindel. In addition to our interest in the basic physics of quantum devices, we are interested in R&D projects with industrial partners.

Quantenoptische Technologien spielen eine entscheidende Rolle in der Quanteninformationstechnologie. Wir erwarten eine Welt, in der eine vollkommen abhörsichere Datenübertragung der Standard sein wird und Quantencomputer klassische Rechner in ihrer Leistungsfähigkeit übertreffen werden. Forschung und Lehre am Institut für Festkörperphysik der Technischen Universität Berlin befassen sich in vielerlei Hinsicht mit der zugrundeliegende photonischen Quanteninformationstechnologie. Die Arbeitsgruppe von Professor Reitzenstein entwickelt und realisiert beispielsweise hocheffiziente Lichtquellen für quantentechnologische Anwendungen. Die Bauelemente werden über präzise numerische Methoden optimiert und basieren auf Halbleiter-Quantenpunkten und neuartigen 2D-Quantenmaterialien als Einzelphotonenemitter. Für ihre Herstellung steht die umfangreiche Infrastruktur des Zentrums für Nanophotonik der TU Berlin zur Verfügung. Die Performance der Bauelemente sowie die zugrundeliegenden physikalischen Eigenschaften und Phänomene werden über quantenoptische Messverfahren in hochmodernen quantenoptischen Laboratorien evaluiert und detailliert studiert. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Entwicklung von Quantennetzwerken in der Junior-Arbeitsgruppe von Dr. Tobias Heindel. Neben einem großen Interesse in der Quantentechnologie-Grundlagenforschung sind wir beständig an R&D-Projekten mit Industriepartnern interessiert, um unsere Technologien in die Marktphase zu überführen.

Prof. Dr.
Stephan Reitzenstein
Technische Universität
Berlin
Institut für
Festkörperphysik
Hardenbergstrasse 36
10623 Berlin
www.ifkp.tu-berlin.de

Semiconductor lasers for quantum technology

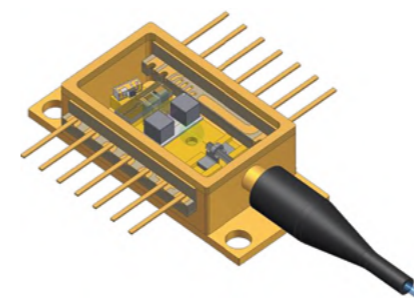
Halbleiterlaser für die Quantentechnologie

- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum computing
- Quantum simulation

TOPTICA eagleyard develops and manufactures high power laser diodes and amplifiers – the key components for next generation laser systems.

These laser diodes are produced in close cooperation with the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, and cover wavelengths from 630 to 1120 nm.

For quantum technology applications we offer single frequency lasers with a line width down to below 1 MHz.



Laser radiation can excite, detect or manipulate atoms in spectroscopy.

As subsidiary of TOPTICA Photonics AG (Munich) we have access to extensive expertise in quantum technology, which we use to develop our products to meet future requirements of emerging markets. The certified development, production and marketing processes are subject to rigorous quality standards required by ISO 9001:2018.

TOPTICA eagleyard entwickelt und produziert Hochleistungslaserdioden und Verstärker – die Schlüsselkomponenten für Lasersysteme der nächsten Generation.

Diese Laserdioden stammen aus Forschungsleistungen des renommierten Ferdinand-Braun-Instituts, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, und decken den Wellenlängenbereich von 630 – 1120 nm ab.

Für die Quantentechnologie bieten wir Single-Frequency-Laser an, deren Linienbreite bis zu unter 1 MHz liegt.

Als Tochterunternehmen der TOPTICA Photonics AG (München) nutzen wir das Expertenwissen, um Produkte für die Anforderungen entstehender Märkte zu entwickeln. Unser Unternehmen ist nach ISO9001:2018 zertifiziert.

Jörg Muchametow
TOPTICA eagleyard
Rudower Chaussee 29
12489 Berlin
toptica-eagleyard.com

Computational Nano Optics at Zuse Institute Berlin

Computational Nano Optics am Zuse-Institut Berlin



Quantum communication



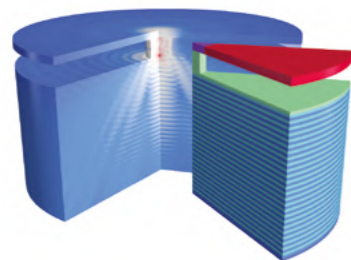
Quantum computing



Quantum simulation

Zuse Institute Berlin (ZIB) is an interdisciplinary research institute for applied mathematics and high-performance computing. The research focuses on modeling, simulation and optimization.

The Computational Nano Optics group investigates and applies numerical methods for the simulation of light-matter interactions in nanoscale devices. In particular, we investigate adaptive finite element methods to solve Maxwell's equations as well as methods for design optimization and for solving inverse problems in reconstructions.



Quantum-dot based single photon emitter: Model and light field [TU Berlin, JCMwave, ZIB]

Applications in collaborations with industry, institutes and universities in Berlin and worldwide include optical meta-materials, optical chirality, plasmonics, nano-structured waveguides, photovoltaics, optical nano-metrology, and the design of light-emitting devices.

A highly topical field of application is optical quantum technology: modeling and simulation are used for the interpretation of experimental results as well as for the effective design of future technologies, such as quantum communication and quantum computers.

Das Zuse-Institut Berlin (ZIB) ist ein interdisziplinäres Forschungsinstitut für angewandte Mathematik und datenintensives High-Performance-Computing. Die Forschung konzentriert sich auf die Modellierung, Simulation und Optimierung in Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Kooperationspartnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Der Schwerpunkt der Arbeitsgruppe Computational Nano Optics liegt in der Untersuchung und Anwendung numerischer Methoden zur Simulation von Licht-Materie-Wechselwirkungen in nanoskaligen Bauelementen. Vor allem untersuchen wir adaptive Finite-Elemente-Methoden zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen und Methoden zur Design-Optimierung und zur Lösung inverser Probleme in Rekonstruktionsaufgaben.

Zu den Anwendungen in Kollaborationen mit Firmen, Instituten und Universitäten aus Berlin und weltweit, zählen optische Meta-Materialien, optische Chiralität, Plasmonik, nanostrukturierte Wellenleiter, Photovoltaik, optische Nanometrologie, und das Design von Licht-emittierenden Bauelementen.

Ein hochaktuelles Anwendungsgebiet ist die optische Quantentechnologie: Modellierung und Simulation werden für die Interpretation experimenteller Ergebnisse und für ein effektives Design von zukünftigen Technologien, wie etwa optische Quantenkommunikation und optische Quantencomputer, eingesetzt.



Kontakt:

Dr. Markus Krutzik
Ferdinand-Braun-Institut
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin

Humboldt-Universität zu Berlin
Institute of Physics
Newtonstr. 15
12489 Berlin

E-Mail: info@qt-berlin.de
www.qt-berlin.de

Umsetzung: THOSS Media GmbH
Redaktion: Dr. Dirk Eidemüller
Layout und Satz: ehlers//kohfeld
Druck: trigger.medien.gmbh
Bildnachweise:

Titel: Julia Pahl/Humboldt-Universität zu Berlin
Seite 9: Adobe Stock, Quardia Inc.



www.qt-berlin.de