

2020/2021

QUANTUM

ANNUAL REPORT/JAHRESBERICHT

Titelseite: Schematische Darstellung von zwei Diamantkristallen mit Stickstoff-Vakanz-Zentren, die miteinander verschränkt als Qubits für das Quantencomputing genutzt werden können.

Cover page: Schematic representation of two diamond crystals with nitrogen vacancy centers, which can be entangled and used as qubits for quantum computing.

2020/2021

QUANTUM

ANNUAL REPORT/JAHRESBERICHT

INHALTSVERZEICHNIS

Contents

4 VORWORT

Preface

6 INTERVIEW MIT

PROF. DR. DR. OLIVER AMBACHER
UND DR. RALF OSTENDORF

Interview with

*Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher
and Dr. Ralf Ostendorf*

10 FRAUNHOFER STRATEGISCHE
FORSCHUNGSFELDER UND DER
BEITRAG DES FRAUNHOFER IAF
*Fraunhofer Strategic Research
Fields and the contribution of
Fraunhofer IAF*

QUANTENCOMPUTING *Quantum computing*

16 INTERVIEW MIT PROF. DR. TOMMASO CALARCO
UND INGOLF WITTMANN

*Interview with Prof. Dr. Tommaso Calarco
and Ingolf Wittmann*

20 KOMPETENZEN DES FRAUNHOFER IAF
IM QUANTENCOMPUTING

*Quantum computing expertise at
Fraunhofer IAF*

24 WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE

Scientific articles

40 KOMPETENZZENTRUM QUANTENCOMPUTING
BADEN-WÜRTTEMBERG

*Competence Center Quantum Computing
Baden-Württemberg*

45 STARKE VERNETZUNG – UNSERE PARTNER

Strong networks – our partners

QUANTENSENSORIK

Quantum sensing

- 58 INTERVIEW MIT PROF. DR. JÖRG WRACHTRUP
UND DR. XAVIER VIDAL
*Interview with Prof. Dr. Jörg Wrachtrup and
Dr. Xavier Vidal*
- 62 KOMPETENZEN DES FRAUNHOFER IAF IN
DER QUANTENSENSORIK
*Quantum sensing expertise of
Fraunhofer IAF*
- 66 WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE
Scientific articles
- 82 APPLIKATIONSLABOR QUANTENSENSORIK
Application laboratory quantum sensing
- 87 STARKE VERNETZUNG – UNSERE PARTNER
Strong networks – our partners

100 DAS INSTITUT IN ZAHLEN
The institute in figures

102 KURATORIUM
Advisory Board

106 HÖHEPUNKTE 2020
2020 Highlights

112 AUS EINER IDEE WIRD
EIN PRODUKT
From idea to product

113 WIE SIE MIT UNS
KOOPERIEREN KÖNNEN
How you can work with us

114 FORSCHUNGSFABRIK
MIKROELEKTRONIK
DEUTSCHLAND
*Research Fab
Microelectronics Germany*

115 WEITERE KOOPERATIONSPARTNER
Other research partners

116 AUSBILDUNG UND LEHRE
Education and teaching

118 ABSCHLUSSARBEITEN
Theses

121 FAKTEN UND ZAHLEN
Facts and figures

122 PATENTE
Patents

124 ORGANIGRAMM
Organigram

127 FÜR BEWERBER*INNEN
Jobs @ IAF

128 IMPRESSUM
Publication details

VORWORT

Preface



” Die zweite Generation der Quantensysteme mitzugestalten, ist die Mission des Fraunhofer IAF.

Helping to shape the second generation of quantum systems is our mission at Fraunhofer IAF.

Am Fraunhofer IAF betreiben wir originäre Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Quantentechnologien und schaffen durch wissenschaftliche Arbeiten die Grundlagen für Innovationen. Das Fraunhofer IAF will aktiv Verantwortung für den Transfer von Wissen, die Sicherung von Schutzrechten sowie die Verwertung von Forschungsergebnissen in Bezug auf neuartige und leistungsfähige Quantensysteme übernehmen und setzt sich zum Ziel, in Kooperation mit seinen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft die Etablierung einer nationalen »Quantentechnologie-Industrie« zu befördern.

At Fraunhofer IAF we conduct original research and development in the field of quantum technologies and provide the scientific basis to underpin innovation. Fraunhofer IAF is keen to take active responsibility for the transfer of knowledge, the protection of intellectual property rights and the application of research into novel and powerful quantum systems. In cooperation with partners from science and industry, Fraunhofer IAF aims to promote the development of a national quantum technology industry.

Die Quantentechnologien sind ein wichtiges Zukunftsfeld mit großen Entwicklungschancen in vielen Märkten wie z. B. der Medizintechnik, der Informationstechnik, der Sicherheitstechnik, der Chemie, des Finanzwesens und der Logistik. Doch nur, wenn es uns gelingt, zeitnah Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in Demonstratoren und Prototypen zu überführen und damit die Voraussetzungen für Innovationen zu schaffen, können wir langfristig profitieren. Daher ist unser erklärtes Ziel, Quantentechnologien anwendungsbezogen und in enger Kooperation mit Partnern aus Politik, Forschung und Industrie zu erforschen, zu entwickeln und zur Marktreife zu führen. Darüber hinaus sehen wir in der Aus- und Weiterbildung von Studierenden und Berufstätigen im Bereich der Quantentechnologien in Kooperation mit Unternehmen und Universitäten einen entscheidenden Erfolgsfaktor für Deutschland als Quantenforschungsstandort, den wir signifikant stärken wollen. Wir bringen uns ein bei der Beratung von Unternehmen und Entscheidungsträgern aus Gesellschaft und Politik in Bezug auf die Auswahl geeigneter Quantensysteme, deren anwendungsbezogenes und wirtschaftliches Potenzial sowie deren zukünftige Entwicklung.

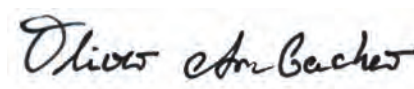
Unsere Forschungsaktivitäten in der Quantensensorik und im Quantencomputing werden durch Leitprojekte der Fraunhofer-Gesellschaft, ländergeförderte Verbundprojekte, Projekte im Rahmen der Forschungsförderung des BMBF, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Europäischen Kommission, aber auch zunehmend durch Projekte der Auftragsforschung vorangetrieben.

Im vorliegenden Jahresbericht möchten wir Ihnen die Zielstellungen des Fraunhofer IAF sowie die laufenden Forschungsprojekte, Aktivitäten und das Netzwerk des Instituts im Forschungsbereich der Quantentechnologien näherbringen. Wir laden Sie herzlich zur Lektüre des Jahresberichts und zur gemeinsamen Erschließung dieses wissenschaftlich hoch spannenden Gebiets ein und bedanken uns bei Ihnen für Ihr Interesse.

Quantum technologies are an important future field with great development opportunities in many markets including medical technology, information technology, security, chemistry, finance and logistics. However, we can only benefit in the long term if we succeed in promptly transferring results from basic research into demonstrators and prototypes, and thus creating the conditions for innovation. It is therefore our declared goal to research and develop quantum technologies and bring them to market in close collaboration with partners from politics, research and industry. In addition, we view work with companies and universities on the education and training of students and professionals in the field of quantum technologies as a decisive factor for the success of Germany as a quantum research location, a location which we want to strengthen significantly. We provide advice to companies and decision-makers from politics and society on the selection of appropriate quantum systems, their potential in terms of application and commercial success and their future development.

Our research activities in quantum sensing and quantum computing are driven forward by Fraunhofer-Gesellschaft lighthouse projects, state-funded collaborative projects, projects within the research funding framework of the German Ministry for Education and Research, the DFG (German Research Foundation) and the European Commission, but also increasingly by contract research projects.

In this annual report we would like to explain the objectives of Fraunhofer IAF and provide an overview of our ongoing research projects and activities, and the institute's quantum technologies network. We hope you enjoy reading the annual report and exploring this tremendously exciting area of science with us. Thank you for your interest.



IM GESPRÄCH ZUR QUANTENTECHNOLOGIE

A conversation about quantum technology

Im Interview sprechen Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher, Institutsleiter des Fraunhofer IAF, und Geschäftsfeldleiter Dr. Ralf Ostendorf über die Forschung und Entwicklung im Bereich der Quantentechnologien am Fraunhofer IAF.

In this interview, Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher, Director of Fraunhofer IAF, and Business Unit Manager Dr. Ralf Ostendorf talk about research and development in the field of quantum technologies at Fraunhofer IAF.

WAS IST DIE VISION UND DIE MISSION DES FRAUNHOFER IAF IN DER QUANTENTECHNOLOGIE?

Ambacher — Quantentechnologien sind ein wichtiges Zukunftsfeld mit großen Entwicklungschancen in vielen Märkten. Als solches hat sie die Fraunhofer-Gesellschaft als Strategisches Forschungsfeld identifiziert, mit der Vision, neuartige und leistungsfähige Quantensysteme der zweiten Generation zu entwickeln und den Transfer von Wissen, die Sicherung von Schutzrechten sowie die Verwertung von Forschungsergebnissen in diesem Bereich zu fördern.

Ostendorf — Unsere Aufgabe als Fraunhofer-Institut ist es dabei, das große Potenzial der Quantentechnologie nutzbar zu machen und in innovative, industrietaugliche Verfahren und Anwendungen in der Quantensensorik und im Quantencomputing umzusetzen. Wir verfügen dazu bereits über eine exzellente Forschungsinfrastruktur und Expertise, die wir noch gezielt ausbauen werden, um diese Herausforderungen anzugehen. Wichtig wird auch sein, die Chancen der Quantentechnologie Industriepartnern und der breiten Öffentlichkeit zu vermitteln. Mit dem Applikationslabor Quantensensorik und dem Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg haben wir hier schon gute Voraussetzungen geschaffen und können in diesem Bereich noch einmal intensive Entwicklungen vorantreiben.

WHAT IS FRAUNHOFER IAF'S VISION AND MISSION IN RELATION TO QUANTUM TECHNOLOGY?

Ambacher — Quantum technologies are an important future field with major development opportunities in a wide range of markets. As such, the Fraunhofer-Gesellschaft has identified it as a Strategic Research Field with the vision to developing innovative and powerful second-generation quantum systems and to promoting the transfer of knowledge, the acquisition of intellectual property rights and the exploitation of research results in this field.

Ostendorf — Our task as a Fraunhofer Institute is to harness the vast potential of quantum technology and translate it into innovative, industrially viable quantum sensing and quantum computing processes and applications. We already have the expertise and an outstanding research infrastructure for this purpose, which we will continue to expand in order to address these challenges. It will also be important to communicate the opportunities presented by quantum technology to industrial partners and the general public. Our application laboratory quantum sensing and the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg already represent a great environment for work in this field and will allow us to drive forward intensive developments.



Dr. Ralf Ostendorf (links) und Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher (rechts)

Dr. Ralf Ostendorf (left) and Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher (right)

WAS SIND DIE BESONDEREN KOMPETENZEN DES FRAUNHOFER IAF?

Ostendorf — Quantentechnologie ist im Grunde genommen nichts Neues für das IAF. Jeder Transistor, jeder Diodenlaser ist ein Bauelement, das auf Quanteneffekten beruht und damit letzten Endes Quantentechnologie. Unsere langjährigen Erfahrungen in den Bereichen Opto- und Mikroelektronik sowie der Materialentwicklung speziell im Diamantwachstum sind eine entscheidende Grundlage für die Entwicklung von Quantentechnologien im Sinne der zweiten Quantenrevolution. Auch dank unserer ausgezeichneten Infrastruktur in den Laboren und dem Reinraum sind wir in der Lage, Quantenzustände wie z. B. Farbzentren in Diamant definiert zu präparieren und zu adressieren, was eine Grundvoraussetzung sowohl für die Sensorik als auch das Quantencomputing ist.

Ambacher — Aber es ist wichtig, hier nicht nur von unseren Kompetenzen zu sprechen. Es ist die starke Forschungslandschaft in Deutschland mit einem reichen Ökosystem an Forschergruppen, Start-ups, KMUs und großen Unternehmen mit weitreichenden Fähigkeiten, mit der wir gemeinsam das Forschungsfeld ausbauen können. Klar ist: Nur mit einer gemeinsamen Initiative, in der wir unsere Kompetenzen bündeln, lassen sich erfolgreich europäische Quantensysteme entwickeln.

WHERE DOES THE SPECIFIC EXPERTISE OF FRAUNHOFER IAF LIE?

Ostendorf — Quantum technology is basically nothing new for IAF. Every transistor, every diode laser is a device based on quantum effects and thus ultimately quantum technology. Our many years of experience in the fields of opto- and microelectronics and material development, particularly diamond growth, are a key mainstay for the development of quantum technologies in the context of the second quantum revolution. Our excellent laboratory and clean room infrastructure means that we are able to prepare and address quantum states such as color centers in diamond in a defined way, which is a basic requirement for both quantum sensing and quantum computing.

Ambacher — But it is important that we don't focus exclusively on our own expertise here. It is by working within the strong research landscape in Germany, with a rich ecosystem of research groups, start-ups, SMEs and large companies with wide-ranging capabilities, that we will be able to expand the field. One thing is clear: European quantum technologies can only be developed successfully through a joint initiative where we pool our expertise.



WAS WURDE AM FRAUNHOFER IAF BEREITS ERREICHT?

Ambacher — Ein großer Erfolg im Jahr 2020 war es, gemeinsam mit IBM und dem Fraunhofer IAO das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg ins Leben zu rufen. Damit haben wir einen wichtigen Grundstein für die Aus- und Weiterbildung im Bereich der Quantentechnologien in Deutschland gelegt. So können wir die nötigen Fachkräfte für kommende Anwendungen des Quantencomputings bei uns ausbilden. Durch den Standort des Quantencomputers in Ehningen ist garantiert, dass alle Daten, die auf dieser Plattform bearbeitet werden, nach deutschem Recht behandelt werden. Das ist ein entscheidender Schritt in Richtung einer unabhängigen Quantenforschung in Deutschland.

Ostendorf — Wir sind bereits in zahlreichen Forschungsprojekten zur Quantensensorik aktiv, wobei der Schwerpunkt unserer Aktivitäten auf der Verwendung von Diamant mit Stickstoff-Vakanz-Zentren für die Quantenmagnetometrie liegt. Von den Erkenntnissen, die wir hier

WHAT HAS FRAUNHOFER IAF ACHIEVED SO FAR?

Ambacher — A great success in 2020 was the establishment of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg together with IBM and Fraunhofer IAO. With this, we have laid an important foundation for education and training in the field of quantum technologies in Germany. It enables us to train the specialists that will be needed to develop applications of quantum computing in the future. The location of the quantum computer in Ehningen guarantees that all data processed on this platform will be handled in accordance with German law. This is a decisive step towards independent quantum research in Germany.

Ostendorf — We are already participating in numerous quantum sensing research projects, with our activities focused on the use of diamond with nitrogen vacancy centers for quantum magnetometry. Our planned work on quantum computing hardware will also benefit from our findings relating to material development and the optical addressing of vacancy centers. In order to bundle the different project activities and to take advantage of the synergies at IAF, in 2020 we founded the business unit »Quantum Systems«, which brings the two areas together and acts as an interface with industry.

AND WHERE IS STILL POTENTIAL FOR FURTHER DEVELOPMENT?

Ambacher — We are already in the middle of the second generation of quantum technologies and we are now considering research questions such as: Where is room for further improvement? What does industry need? What other applications can we develop? A major weakness of today's quantum systems is their susceptibility to failure, which requires, among other things, cooling to extremely low temperatures. We are working intensively on being able to use quantum sensors and quantum computing even at room temperature. This would broaden the fields of application and facilitate integration into industrial processes.

in der Materialentwicklung und der optischen Adressierung der Vakanz-Zentren machen, werden auch die geplanten Arbeiten zur Hardware des Quantencomputings profitieren. Um die unterschiedlichen Projektaktivitäten zu bündeln und die Synergien am IAF zu nutzen, haben wir 2020 das Geschäftsfeld »Quantensysteme« gegründet, das beide Themenbereiche vereint und darüber hinaus als Schnittstelle zur Industrie dient.

UND WO GIBT ES NOCH MÖGLICHKEITEN ZUR ENTWICKLUNG?

Ambacher — Wir befinden uns ja schon mitten in der zweiten Generation der Quantentechnologien und stellen uns jetzt Forschungsfragen wie: Wo ist noch Raum für weitere Verbesserungen? Was braucht die Industrie? Welche weiteren Anwendungen können wir erschließen? Eine große Schwachstelle der heute gängigen Quantensysteme ist deren Störungsanfälligkeit, die u. a. eine Kühlung auf extrem niedrige Temperaturen erfordert. Wir arbeiten intensiv daran, Quantensensoren und Quantencomputing auch bei Raumtemperatur einsetzen zu können. Das würde die Anwendungsfelder verbreitern und die Integration in Industrieprozesse erleichtern.

Ostendorf — Ganz konkret forschen wir im Bereich der Quantensensorik zurzeit daran, die Empfindlichkeit von Diamant-basierten Magnetmesssystemen zu steigern, indem der Diamant als laseraktives Medium in einer Kavität verwendet wird. Die Ergebnisse, die dieses Jahr im Labor am Fraunhofer IAF erzielt wurden, sind sehr vielversprechend und könnten schon bald in kompakten Magnetometern Hirnstrommessungen verbessern. Darüber hinaus haben wir dieses Jahr zwei Rastersondensysteme beschafft, in denen wir mittels Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamantspitzen Strom- und Magnetfeldverteilungen auf einer Nanometerskala vermessen und abbilden werden. Es gibt also noch viel zu erforschen und zu entwickeln!



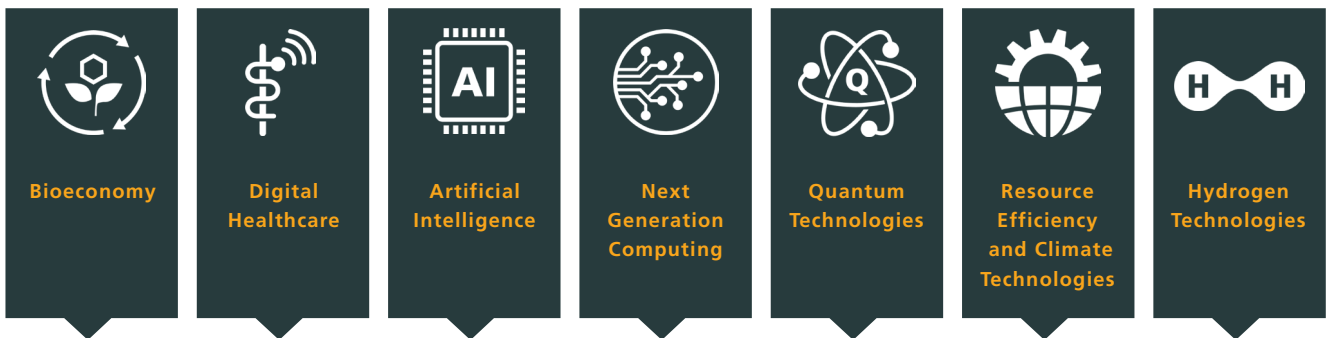
Ostendorf — Specifically, we are currently conducting research in the field of quantum sensing to increase the sensitivity of diamond-based magnetic measurement systems by using the diamond as an active laser medium in a cavity. The results obtained this year in the laboratory at Fraunhofer IAF are very promising and could soon improve measurements of brain waves in compact magnetometers. We have also acquired two scanning probe systems this year, in which we will measure and image current and magnetic field distributions on a nanometer scale using nitrogen vacancy centers in diamond tips. So there still is a lot to do and to develop!

FRAUNHOFER STRATEGISCHE FORSCHUNGSFELDER

Fraunhofer Strategic Research Fields

2020 hat die Fraunhofer-Gesellschaft ihre Forschungsstruktur neu aufgesetzt. Sieben Fraunhofer Strategische Forschungsfelder (FSF) bilden nun die Schwerpunkte des Forschungsportfolios – insbesondere mit Blick auf die Märkte und Bedarfe von morgen. In diesen Feldern konzentriert sich die exzellente Vorlufforschung auf Vorhaben mit hohem Verwertungspotenzial und befördert so einen gesellschaftlichen und branchenübergreifenden Impact. Dabei stehen die Stärkung der Wirtschafts- und Innovationsstandorte Deutschland und Europa, die Technologiesouveränität und nachhaltige Wertschöpfung stets im Mittelpunkt. Das Fraunhofer IAF unterstützt mit seiner Forschung die FSF »Next Generation Computing«, »Quantentechnologien« sowie »Ressourceneffizienz und Klimatechnologien«.

In 2020, the Fraunhofer-Gesellschaft reorganized its research structure. Seven Fraunhofer Strategic Research Fields now form the core of the research portfolio, specifically addressing needs and markets that will shape our future. Within these fields, outstanding precompetitive research focuses on projects that have high commercial potential, thereby enhancing our impact on society and across multiple sectors. The aim is to continuously strengthen the roles of Germany and Europe as key business and innovation hubs while fostering technological sovereignty and promoting sustainable value creation. Fraunhofer IAF supports the Fraunhofer Strategic Research Fields »Next Generation Computing«, »Quantum Technologies« as well as »Resource Efficiency and Climate Technologies«.



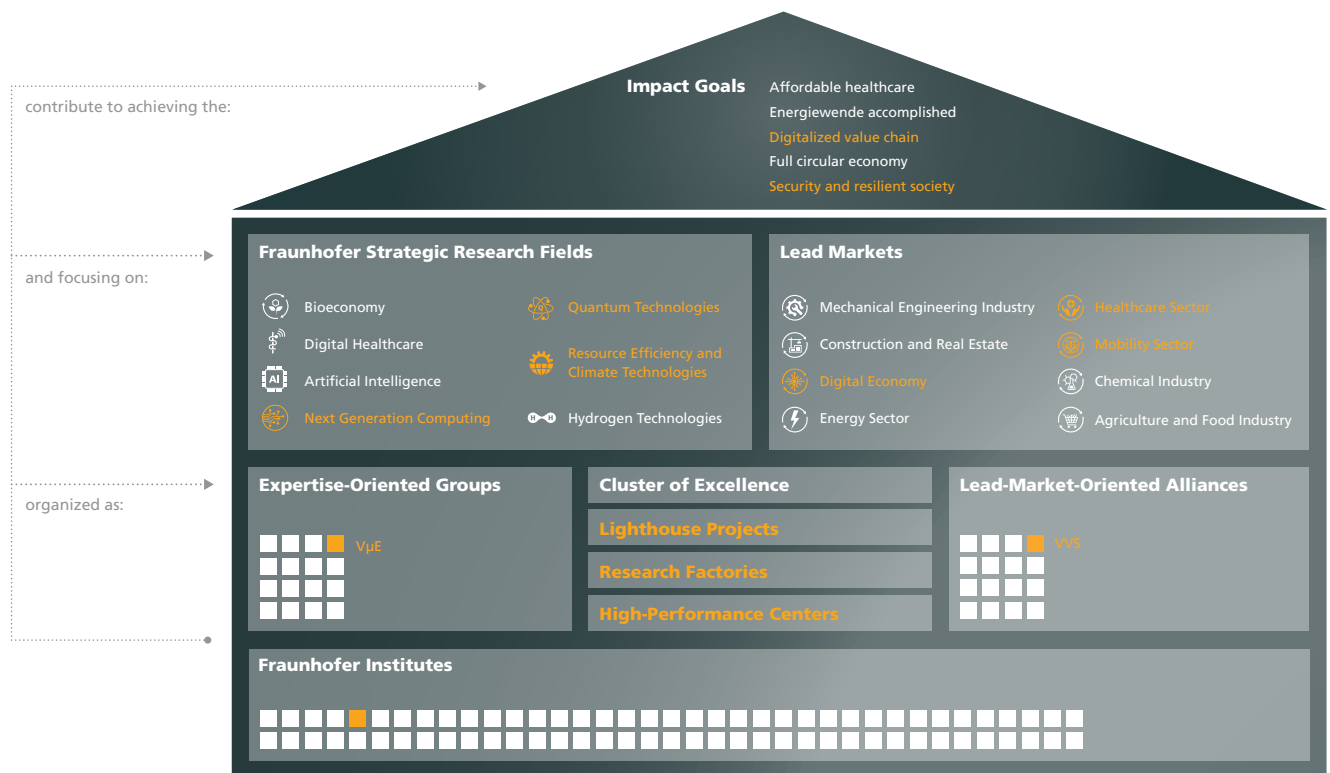
Die sieben Fraunhofer Strategischen Forschungsfelder
The seven Fraunhofer Strategic Research Fields

Mit unserer Forschung am Fraunhofer IAF unterstützen wir schwerpunktmäßig die FSF »Next Generation Computing«, »Quantentechnologien« sowie »Ressourceneffizienz und Klimatechnologien«. Über unsere Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien – darunter vornehmlich das Quantencomputing und die Quantensensorik – möchten wir Sie in diesem Jahresbericht näher informieren. Unsere vielseitigen Projekte zeigen wir Ihnen ab S. 24 (Quantencomputing) bzw. S. 66 (Quantensensorik). Außerdem koordinieren wir zusammen mit dem Fraunhofer IAO das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg – mehr dazu auf S. 40 – und bieten interessierten Parteien Zugang zu Quantenmagnetometern in unserem Applikationslabor Quantensensorik (S. 82).

Die FSF sind in die übergeordnete Forschungsstruktur der Fraunhofer-Gesellschaft eingebettet. Das Fraunhofer IAF als fünftes Institut der Fraunhofer-Gesellschaft bringt sich auf allen Ebenen im »Fraunhofer-Powerhouse« ein:

Our research at Fraunhofer IAF mainly supports the Fraunhofer Strategic Research Fields »Next Generation Computing«, »Quantum Technologies« as well as »Resource Efficiency and Climate Technologies«. In this annual report, we would like to provide you with more detailed information about our activities in the field of quantum technologies – primarily quantum computing and quantum sensing. Our diverse range of projects is shown starting on p. 24 (quantum computing) and p. 66 (quantum sensing). Together with Fraunhofer IAO, we also coordinate the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg – find out more on p. 40 – and provide access to a number of quantum magnetometers in our application laboratory for partners who are interested in quantum sensing (p. 82).

The Fraunhofer Strategic Research Fields are embedded in the superordinate research structure of the Fraunhofer-Gesellschaft. As the fifth institute of the Fraunhofer-Gesellschaft, Fraunhofer IAF is involved at all levels in the Fraunhofer powerhouse:



Darstellung der Organisations- und Forschungsstrukturen der Fraunhofer-Gesellschaft und Beiträge des IAF innerhalb der einzelnen Ebenen (in orange)

Illustration of the organization and research structures of the Fraunhofer-Gesellschaft with IAF contributions to the individual levels (in orange)

Das »Powerhouse« stellt die Organisations- und Förderstruktur der Fraunhofer-Gesellschaft dar. Von unten nach oben ist zu sehen, wie sich die einzelnen Institute innerhalb von kompetenzorientierten Verbänden und leitmarktorientierten Allianzen organisieren und hierbei innerhalb von Clustern of Excellence, Leitprojekten, Forschungsfabriken oder Leistungszentren gefördert werden. Ein besonderer Fokus liegt auf den Strategischen Forschungsfeldern, die von Fraunhofer als besonders zukunftssträftig erachtet werden, sowie den Leitmärkten, die ganzheitliche Lösungen für die Wirtschaft bereitstellen. Hiermit will die Fraunhofer-Gesellschaft einen signifikanten Beitrag zur Bewältigung wichtiger gesellschaftlicher Fragen leisten (diese bilden das Dach aller Tätigkeiten).

The »Powerhouse« shows the organizational and funding structure of the Fraunhofer-Gesellschaft. From the bottom up, it depicts how the individual institutes are organized within competence-based groups and lead market-based alliances, and how they are funded within clusters of excellence, lighthouse projects, research factories and high-performance centers. It places special focus on the strategic research fields that Fraunhofer considers to be particularly promising for the future, as well as on lead markets that provide holistic solutions for industry. In this way, the Fraunhofer-Gesellschaft aims to make a significant contribution to important social issues (shown in the roof).

BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER IAF

Verbünde

- Verbund Mikroelektronik VμE
- Fraunhofer-Leistungsbereich für Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS

Förderformate

- Geplantes Cluster Quantencomputing
- Leitprojekte: QMag – Quantenmagnetometrie, ZEPOWEL – Towards Zero Power Electronics, ElKaWe – Elektrokaloische Wärmepumpen
- Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD)
- Leistungszentrum Nachhaltigkeit

Fraunhofer Strategische Forschungsfelder

- Next Generation Computing
- Quantentechnologien
- Ressourceneffizienz und Klimatechnologien

Leitmärkte

- Digitalwirtschaft
- Gesundheitswirtschaft
- Mobilitätswirtschaft

Damit leisten wir wichtige Beiträge zu den Fraunhofer-Impact-Zielen einer digitalisierten Wertschöpfung und einer sicheren und resilienten Gesellschaft.

CONTRIBUTION OF FRAUNHOFER IAF

Groups

- Group for Microelectronics VμE
- Group for Defense and Security VVS

Funding programs

- Planned cluster on quantum computing
- Lighthouse projects QMag – Quantum magnetometry, ZEPOWEL – Towards Zero Power Electronics, ElKaWe – electrocaloric heat pumps
- Research Fab Microelectronics Germany
- Sustainability Center Freiburg

Fraunhofer Strategic Research Fields

- Next Generation Computing
- Quantum Technologies
- Resource Efficiency and Climate Technologies

Lead markets

- Digital Economy
- Healthcare Sector
- Mobility Sector

In this way, we make important contributions to the Fraunhofer impact goals of digitized value creation and a secure and resilient society.

QUANTENCOMPUTING

Quantum computing



” Beim Quantencomputing geht es nicht nur darum, Probleme schneller zu lösen. Es geht auch darum, sie auf anderen Wegen zu lösen, indem man die Regeln der Quantenphysik anwendet. Dies eröffnet viele Möglichkeiten, aber auch neue Fragen. In naher Zukunft werden wir sehen, wie die Prototypen von Quantencomputern immer leistungsfähiger werden, und wir sind gespannt auf die neuen Anwendungen, die sie uns bieten werden, sowie auf die Überraschungen, die sich daraus ergeben werden. Auf jeden Fall sind wir Zeugen einer wissenschaftlichen und technologischen Revolution, die unsere Gesellschaft auf lange Sicht sicherlich verändern wird.

Quantum computing is not just about solving problems faster. It is also about solving them in different ways, using the rules of Quantum Physics. This opens up many possibilities, but also new questions. In the near future we will see how quantum computer prototypes become more and more powerful, and we are excited about the new applications they will offer us, as well as the surprises that will come up. In any event, we are witnessing a scientific and technological revolution that will surely transform our society in the long run.

Prof. Dr. Ignacio Cirac | Director at the Max-Planck-Institute for Quantum Optics

- 16 IM GESPRÄCH ZUM QUANTENCOMPUTING**
A conversation about quantum computing
- 20 UNSERE KOMPETENZEN IM BEREICH QUANTENCOMPUTING**
Our expertise in quantum computing
- 24 ENTWICKLUNG EINER SKALIERBAREN QUANTENCOMPUTER-ARCHITEKTUR**
Development of a scalable quantum computer architecture
- 28 HOCHFREQUENZELEKTRONIK ALS SCHLÜSSEL-TECHNOLOGIE FÜR QUANTENCOMPUTER**
High frequency electronics as key technology for quantum computing
- 32 KRYOGENE MESSTECHNIK – DER WEG ZUM QUANTENRAUSCHLIMIT**
Cryogenic measurement technology – the way to quantum noise limits
- 36 QUANTENSOFTWARE UND -ALGORITHMEN**
Quantum software and algorithms
- 40 KOMPETENZZENTRUM QUANTENCOMPUTING BADEN-WÜRTTEMBERG**
Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg
- 43 STIMMEN UNSERER PARTNER**
Voices from our partners
- 45 STARKE VERNETZUNG – UNSERE PARTNER**
Strong networks – our partners

IM GESPRÄCH ZUM QUANTENCOMPUTING

A conversation about quantum computing

Dass man das Unmögliche, das Udenkbare erforscht – buchstäblich, denn man kann sich kein mentales Bild eines Quantensystems machen –, das fasziniert Prof. Dr. Tommaso Calarco, Institutsleiter »Quantum Control« am Forschungszentrum Jülich, mehr als alles andere an der Quantentechnologie. Im Interview spricht er mit Ingolf Wittmann, Geschäftsfeldleiter »Quantensysteme« am Fraunhofer IAF.

Investigating the impossible, the unthinkable – literally, because one cannot form a mental picture of a quantum system – fascinates Prof. Dr. Tommaso Calarco, Head of the »Quantum Control« institute at Forschungszentrum Jülich, more than anything else about quantum technology. In this interview he talks to Ingolf Wittmann, Head of the business unit »Quantum Systems« at Fraunhofer IAF.

WIE SIND SIE EIGENTLICH »ZU DEN QUANTEN GEKOMMEN« ?

Calarco — Als ich Diplomand war, existierte das Forschungsfeld Quantentechnologie noch gar nicht. Es hieß »Grundlagen der Quantenmechanik« und man hatte so gut wie keine Karriereperspektive. Als ich am Ende meines Studiums war, hatten Peter Zoller und Ignacio Cirac aus Innsbruck die ersten Ideen zu einem Quantencomputer mit Ionen. Da war mir klar, dass sich aus diesen »Spielereien« mit Quantensystemen wirklich etwas bauen lässt.

Wittmann — An der Uni habe ich »Operations Research« studiert und hätte mir niemals träumen lassen, dass ich das jemals wieder brauchen würde, um z. B. ein »Traveling Salesman«-Problem auf einen Quantencomputer zu mappen. Aber genau so kam es, als Ende 2016 das IBM Q System als Open-Source-Projekt mit freiem Zugriff für jedermann angekündigt wurde. Ich war damals bei IBM und habe schnell das Potenzial erkannt, aber auch, dass wir eine technische Organisation in den Ländern brauchen, um die Kunden vor Ort zu unterstützen.

HOW DID YOU ACTUALLY GET STARTED WITH QUANTA ?

Calarco — When I was a graduate student, the research field of quantum technology did not even exist. It was called »Fundamentals of Quantum Mechanics« and there were almost no career prospects. When I finished my studies, Peter Zoller and Ignacio Cirac from Innsbruck had the first ideas of a quantum computer using ions. That was when it became clear to me that something could really be built by »playing« with quantum systems.

Wittmann — I studied »Operations Research« at university and never dreamed that I would ever need it again, for example to map a traveling salesman problem on to a quantum computer. But that's exactly how it happened when the IBM Q System was announced at the end of 2016 as an open source project with free access for everyone. I was at IBM at the time and quickly realized the system's potential, but also that we needed a technical organization in the different countries to support customers locally.



Ingolf Wittmann (links) und Prof. Dr. Tommaso Calarco (rechts)

Ingolf Wittmann (left) and Prof. Dr. Tommaso Calarco (right)

WIE WICHTIG SIND DABEI KOOPERATIONEN?

Calarco — Sehr wichtig! Über die letzten 15 Jahre habe ich viel Energie hineingesteckt, die Quantentechnologie-Forschung in Europa zu koordinieren und eine gemeinsame Zukunftsvision zu entwickeln. Daraus entstand das Quantum Flagship. In Deutschland steht uns das noch bevor. Die Bundesregierung möchte eine einheitliche Strategie, aber die Forschung ist hier noch nicht ausreichend koordiniert. Deutschland hat enorme Fähigkeiten im Quantencomputing, aber keine Organisation, keine Forschungsgruppe und kein Land kann das alleine schaffen. Kooperation ist immer das Schlüsselement.

Wittmann — Dem stimme ich absolut zu. Fraunhofer hat den Auftrag, Forschung für die Industrie handhabbar zu machen. Durch unsere vielfältigen Partner und Kontakte sind wir prädestiniert dafür, die Industrie zu befähigen, Quantentechnologien in den Unternehmen einzuführen und mit ihnen gemeinsam an zukünftigen Lösungen im Hardware- und Softwarebereich zu arbeiten, um auch in Zukunft wettbewerbsfähig in Europa und der Welt zu bleiben.

HOW IMPORTANT ARE COLLABORATIONS?

Calarco — Very important! Over the last 15 years I have put a lot of energy into coordinating quantum technology research in Europe and developing a common vision of the future. This resulted in the Quantum Flagship, which is still ahead of us in Germany. The Federal Government wants a uniform strategy, but research here is not yet sufficiently coordinated. Germany has enormous capabilities in quantum computing, but no organization, research group or country can do it alone. Collaboration is always the key element.

Wittmann — I completely agree. Fraunhofer's mission is to make research manageable for industry. Our many partners and contacts mean we are ideally placed to empower industry to introduce quantum technologies to companies and to work with them on future hardware and software solutions that will enable them to remain competitive in Europe and the world going forwards.



I. Wittmann, Geschäftsfeldleiter »Quantensysteme«
I. Wittmann, Head of business unit »Quantum Systems«

WAS KÖNNEN WIR IN ZEHN JAHREN ERREICHEN?

Calarco — In zehn Jahren gibt es voraussichtlich die ersten fehlerkorrigierten Quantencomputer. Mit ihnen kann man dann nicht mehr nur einige 100 Berechnungen durchführen, sondern die Rechenzeit deutlich nach oben skalieren. Da wird es dann für komplexe industrierelevante Anwendungen interessant. Bisher können wir schon einfache Probleme lösen, aber in zehn Jahren könnten wir in den Produktionsmodus kommen.

Wittmann — Ich habe lange bei IBM gearbeitet, daher denke ich natürlich auch jetzt noch eher in kurzfristigen Zyklen (lacht). Der universelle Quantenrechner wird sicherlich noch einige Jahre auf sich warten lassen. Ich sehe aber durchaus eine Chance, dass wir in drei bis fünf Jahren erste Industrielösungen und Anwendungen mit hybriden Hardwarelösungen als »Black Box« oder im Softwarebereich sehen werden.

WHERE WILL WE BE IN TEN YEARS' TIME?

Calarco — In ten years, the first error-corrected quantum computers will probably be available. They will enable us to perform not only a few hundred calculations, but to scale up the computing time significantly. This will make it interesting for complex industrial applications. So far, we solve simple problems, but in ten years we could enter production mode.

Wittmann — I worked at IBM for many years, so of course I still think more in short-term cycles (laughs). The universal quantum computer will certainly take a few more years. But I do see a chance that in three to five years we will see the first industrial solutions and applications with hybrid hardware solutions as a black box or in the software sector.

AND IN 50 YEARS?

Wittmann — When I look at the research we are doing here at IAF in the area of diamond, where we are leaving behind the cold range of millikelvin qubits and considering operations close to room temperature, I can imagine miniature accelerators, first as plug-in cards in computers and later as modules in mobile devices.

Calarco — If all goes well, quantum computers will accelerate artificial intelligence to such an extent that there will be applications that we cannot even imagine today.

WHICH PEOPLE INSPIRE YOU IN YOUR WORK?

Wittmann — One of my passions is to help young people develop and advance their careers. In the process, I have met two people who have really impressed me. Firstly, Paul Martynenko, who has accompanied me for many years as a boss and mentor and has set up an excellent support program for young technical colleagues. And secondly, Prof. Barry Dwolatzky from Wits University in South Africa, who built up the university with so much passion in a

UND IN 50 JAHREN?

Wittmann — Wenn ich mir ansehe, was wir hier am IAF im Diamantbereich machen, wo wir den kalten Bereich der Millikelvin-Qubits verlassen und an einen Betrieb nahe Raumtemperatur denken, kann ich mir Miniacceleratoren vorstellen, welche zuerst als Steckkarten in Rechnern und später als Modul in mobilen Geräten zu finden sind.

Calarco — Wenn alles gut geht, dann wird künstliche Intelligenz durch die Quantencomputer so beschleunigt, dass es Anwendungen gibt, die wir uns heute gar nicht vorstellen können.

WELCHE MENSCHEN INSPIRIEREN SIE BEI IHRER ARBEIT?

Wittmann — Eine meiner Passionen ist es, junge Menschen in ihrer Karriere weiterzuentwickeln und zu fördern. Dabei habe ich zwei Menschen kennengelernt, die mich wirklich beeindruckt haben. Erstens Paul Martynenko, der mich über viele Jahre als Chef und als Mentor begleitet hat und ein hervorragendes Förderprogramm für junge technische Kollegen aufgesetzt hat. Und zweitens Prof. Barry Dworkatzky von der Wits University in Südafrika, der mit so viel Passion die Universität für junge, eher benachteiligte Menschen in einer schwierigen Umgebung über viele Jahre aufgebaut hat.

Calarco — Oh, da muss ich gar nicht nachdenken. Mein Vorbild ist ganz eindeutig Peter Zoller aus Innsbruck. Er hatte vor 25 Jahren die ersten Ideen zur technologischen Umsetzung von »Quantenspinnereien«. Ich war Post-Doc bei ihm. Er ist für mich auch ein Vorbild in seiner Fähigkeit, verschiedene Gesichtspunkte, verschiedene Akteure und verschiedene Strömungen in der Community zusammenzuhalten.



Prof. Dr. T. Calarco forscht zum Thema Quantenkontrolle
Prof. Dr. T. Calarco researches quantum control

difficult environment over many years to cater for young disadvantaged people.

Calarco — Oh, I do not even have to think about it. My role model is definitely Peter Zoller from Innsbruck. He had the first ideas for the technological implementation of these »crazy quantum ideas« 25 years ago. I was a post-doc with him. He is also a role model for me in his ability to hold together different viewpoints, different actors and different currents in the community.



READ THE FULL
INTERVIEW



UNSERE KOMPETENZEN IM BEREICH QUANTENCOMPUTING

Our expertise in quantum computing

Am Fraunhofer IAF forschen wir im Bereich der kryogenen Elektronik und des Diamanten für das Quantencomputing. Unsere Ziele sind es, Fortschritte in der Performance von verschränkten Qubits und Quantenspeichern beizusteuern, mit neuartiger Quantenhardware die Fehlerraten zu reduzieren sowie die erreichbaren Rechenzeiten von Quantencomputern zu erhöhen. Dabei decken wir die gesamte Wertschöpfungskette ab: von der Entwicklung neuartiger Materialstrukturen und Prozesstechnologien über die begleitende Analytik bis hin zu neuartigen Aufbau- und Verbindungstechniken sowie zur Demonstration leistungsfähiger Quantenspeicher und prozessierender Komponenten.

At Fraunhofer IAF, we conduct research in the field of cryogenic electronics and diamond for quantum computing. Our goal is to contribute advances in the performance of entangled qubits and quantum memories, and to use innovative quantum hardware to reduce error rates and increase the computing times achievable with quantum computers. We cover the entire value chain, from the development of new material structures and process technologies through the associated characterization and packaging technologies as well as the demonstration of powerful quantum memories and processors.

MATERIALIEN

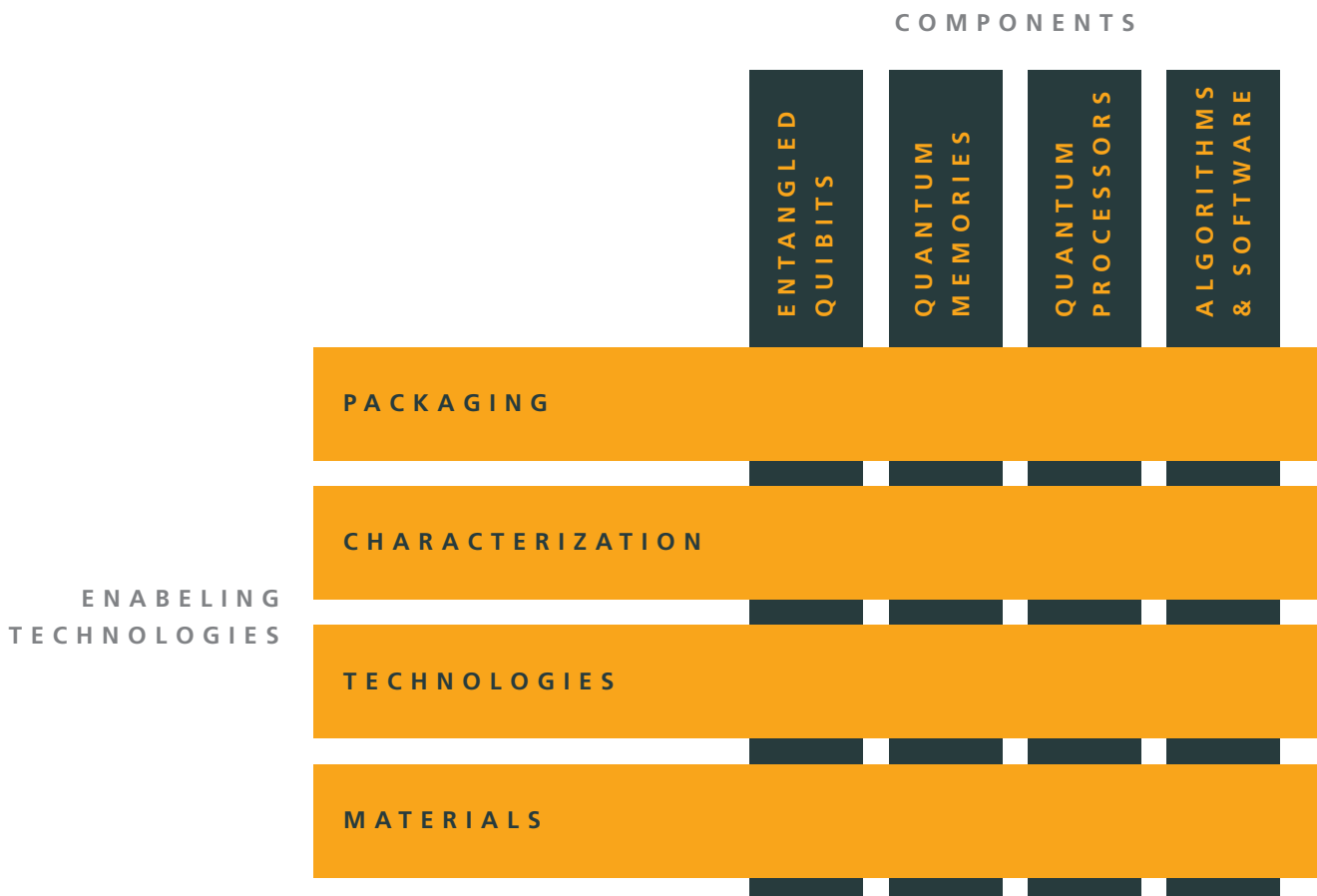
Isotopenkontrollierte Synthese von Halbleitern mit großer Bandlücke

Für die Bauelemente-Entwicklung spielt die Materialsynthese von Halbleitern mit großer Bandlücke (Diamant oder SiC) eine entscheidende Rolle. Durch die Synthese mittels Plasma-unterstützter Gasphasenabscheidung (PECVD) ist es möglich, maßgeschneiderte Materialeigenschaften von Diamant zu erzeugen, die für die Realisierung von Farbzentren-basierten Qubits essentiell sind. Für ein skalierbares Quantencomputer-Konzept sollen zukünftig insbesondere Farbzentren in isotopenkontrollierte Diamantschichten eingebettet werden. Das isotopenkontrollierte Wachstum dient dazu, die Kernspindichte, z. B. von ^{13}C -Atomen, in dem Kristallgitter zu minimieren oder gezielt einzustellen.

MATERIALS

Isotope controlled synthesis of wide-bandgap semiconductors

The material synthesis of semiconductors with a wide band-gap (diamond or SiC) plays a key role in device development. Using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) for synthesis makes it possible to generate customized material properties in diamond, which are essential for the realization of color center based qubits. For a scalable quantum computer concept, especially color centers will be embedded in isotopically controlled diamond layers in the future. The isotope-controlled growth serves to minimize or selectively adjust the nuclear spin density, e.g. of ^{13}C atoms, in the crystal lattice.



Das Fraunhofer IAF forscht an zahlreichen Basistechnologien und Komponenten, um Quantensysteme zu demonstrieren
Fraunhofer IAF researches a wide range of enabling technologies and components to demonstrate quantum systems

KOMPONENTEN

Mikrowellenquellen (1–5 GHz)

Für die Steuerung und Kontrolle der Qubits in Quantencomputern werden Signalquellen benötigt, die für jedes Qubit maßgeschneiderte Signale erzeugen. Zukünftige Quantencomputer benötigen integrierte Signalquellen, um eine weitere Skalierbarkeit der Anzahl an Qubits zu ermöglichen.

Kryogene Elektronik

Rauscharme Verstärker im Frequenzbereich von etwa 5 GHz sind zentrale Komponenten im Ausleseschaltkreis von Quantencomputern und werden aktuell bei etwa 4 K (ca. -269 °C) betrieben. Die mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF ist speziell für die Entwicklung von ultra-rauscharmen Verstärkern und den Betrieb bei tiefen Temperaturen optimiert. Dadurch ist es möglich, Verstärker zu realisieren, die Rauschigenschaften nahe des physikalischen Limits besitzen.

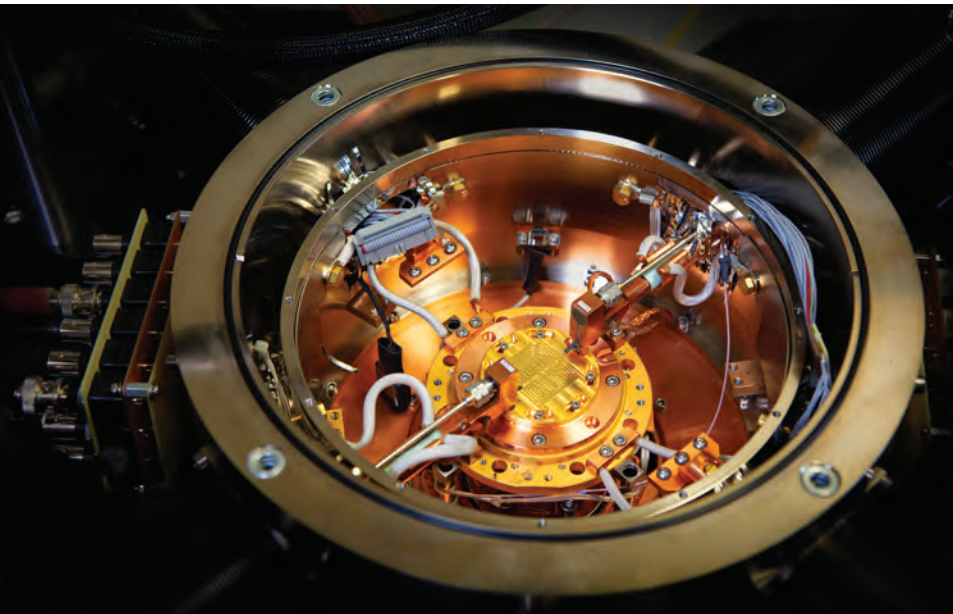
DEVICES

Microwave sources (1 – 5 GHz)

In order to control and monitor qubits in quantum computers, signal sources are needed that generate tailor-made signal pulses for each qubit. Future quantum computers will require integrated signal sources to enable further scalability of the number of qubits.

Cryogenic electronics

Low-noise amplifiers in the frequency range of about 5 GHz are central components in the quantum computers' readout circuit and are operated in current systems at temperatures of about 4 K (approx. -269 °C). Fraunhofer IAF's mHEMT technology is specially optimized for the development of ultra-low noise amplifiers and operation at low temperatures. Thus, it is possible to realize amplifiers with noise properties close to physical limits.



Kryogene Messstation
Cryogenic probe station

ANALYTIK

Kryo-Messtechnik

Das Auslesen des verschränkten Zustandes von Qubits erfordert kryogene Temperaturen. Die kryogene Probestation des Fraunhofer IAF ermöglicht DC-Messungen sowie Streuparameter- und Rauschtemperaturmessungen von kryogen gekühlten Einzelbauelementen und integrierten Schaltkreisen innerhalb einer Kryokammer bis zu Temperaturen von 5 K (ca. $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$). Mittels der erhobenen Messdaten kann die Performance elektronischer und optischer Bauelemente bestimmt und weiter verbessert werden.

AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIK

Der Betrieb von Komponenten nahe des absoluten Nullpunkts erfordert eine spezielle Aufbau- und Verbindungstechnik. Das Fraunhofer IAF hat die Erfahrung, um einerseits die mechanischen Anforderungen zu gewährleisten und andererseits die Ableitung der entstandenen Wärme aktiver Bauelemente zu ermöglichen. Weiterhin arbeiten wir an neuartigen Ansätzen, um eine höhere Integrationsdichte von (opto-)elektronischen Bauelementen in zukünftigen Quantencomputern zu erlauben.

CHARACTERIZATION

Cryogenic Measurement Technology

Providing a read-out of the entangled state of qubits requires cryogenic temperatures. The Fraunhofer IAF cryogenic sample station enables DC measurements and measurements of scattering parameters and noise temperatures for cryogenically cooled single components and integrated circuits within a cryogenic chamber up to temperatures of 5 K (approx. $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$). The data collected allows the performance of electronic and optoelectronic devices to be determined and further improved.

PACKAGING TECHNOLOGY

The operation of components at temperatures close to absolute zero requires special assembly and connection technology. Fraunhofer IAF has the experience to guarantee the mechanical requirements on the one hand and to enable the dissipation of the heat generated by active components on the other. We are also working on novel approaches to allow a higher integration density of (opto-) electronic devices in future quantum computers.

VERSCHRÄNKTE QUBITS

1-Qubit- und 2-Qubit-Gatter (10-nm-Technologie auf 4"-Substraten)

Die Qubits sollen deterministisch erzeugt werden und zueinander in Abständen von 25 nm in einem Array positioniert werden. Je nach Kopplungsgrad können dann verschiedene Qubits untereinander verschränkt und 1-Qubit- und 2-Qubit-Gatteroperationen durchgeführt werden.

Spin- und Photonen-basierte Qubit-Arrays

Hierfür werden Farbzentren in nur wenige Nanometer dicken Diamantschichten erzeugt. Einzelne Qubit-Arrays werden mithilfe von Photonen-basierten Komponenten verschränkt, um die Skalierbarkeit der Qubit-Architekturen zu ermöglichen.

QUANTENHARDWARE

Als Quantenspeicher können ^{13}C -Kernspins genutzt werden, welche über ein benachbartes Farbzentrum gesteuert und ausgelesen werden.

Wir entwickeln Lichtquellen, Wellenleiter und Detektoren für polarisiertes Licht.

QUANTENALGORITHMEN UND -SOFTWARE

Wir erforschen Fragen wie: Mit welchen Mikrowellenpulsen müssen Qubits angesteuert werden, um Quantengatter programmieren zu können? Mit welchen Verfahren können die auf der Quantencomputerhardware auftretenden Fehler charakterisiert und modelliert werden? Welche Quantenalgorithmen sind besonders resistent gegenüber Fehlern?

ENTANGLED QUBITS

1-qubit and 2-qubit gates (10 nm technology on 4" substrates)

The qubits will be generated deterministically and positioned in an array at distances of 25 nm from each other. Depending on the degree of coupling, different qubits can then be interleaved and 1-qubit and 2-qubit gate operations can be performed.

Spin- and photon-based qubit arrays

Color centers are generated in diamond layers of only a few nanometers. Individual qubit arrays are interlaced with each other using photon-based components to enable scalable qubit architectures.

QUANTUM HARDWARE

We use ^{13}C nuclear spins as quantum memory. These nuclear spins can be controlled and read out via an adjacent color center.

We develop light sources, waveguides and detectors for polarized light.

QUANTUM ALGORITHMS AND SOFTWARE

We research questions such as: Which microwave pulses are required to address qubits in order to program quantum gates? Which methods can be used to characterize and model the defects occurring on quantum computer hardware? Which quantum algorithms are particularly resistant to errors?

ENTWICKLUNG EINER SKALIERBAREN QUANTENCOMPUTER-ARCHITEKTUR

Development of a scalable quantum computer architecture

Quantencomputer haben das Potenzial, die Grenzen herkömmlicher Rechensysteme um ein Vielfaches zu überschreiten. Medizin, Logistik, Materialentwicklung und Kryptographie sind nur einige der Felder, die durch Quantencomputer enorme Fortschritte erfahren können. Obwohl es bereits eine Vielzahl verschiedener Ansätze für Quantencomputer gibt, existieren derzeit nur wenige anwendungsrelevante Gesamtsysteme, vor allem im Bereich industriekompatibel herstellbarer Konzepte mit hohem Skalierungspotenzial. Neben der Entwicklung von Software und Algorithmen auf der Basis der IBM-Quantencomputer-Plattform »Q System One« ist zur Stärkung und Sicherung der zukünftigen deutschen und europäischen Technologiesouveränität die Entwicklung von eigenen Technologien entscheidend.

Quantum computers have the potential to exceed the limits of conventional computing systems many times over. Medicine, logistics, material development and cryptography are only some of the fields that can make huge progress with the aid of quantum computers. Although there are already a multitude of different approaches to quantum computers, there are currently only a few overall systems with practical application, especially in relation to manufacturable concepts that are compatible with industry and have high scalability. In addition to the development of software and algorithms based on the IBM quantum computer platform »Q System One«, the development of proprietary technologies is crucial to strengthen and secure the future technological sovereignty of Germany and Europe.



Künstlerische Darstellung eines Quantencomputer-Prozessors

Artistic depiction of a quantum computer processor

Das öffentliche Interesse an Quantencomputern (QCs) und an deren Logik hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Die zurzeit verfügbaren kommerziellen QC-Konzepte konnten jedoch die erwartete Überlegenheit im Vergleich zu bestehenden klassischen Systemen (z. B. Supercomputer) noch nicht erreichen. Dies begründet sich vor allem in der geringen Anzahl (< 64) an reell adressierbaren und nutzbaren Qubits. Die in kommerziellen QCs verwendeten Qubits basieren auf sogenannten supraleitenden Josephson-Kontakten und werden bei sehr niedrigen Temperaturen (im Millikelvin-Bereich) in sehr aufwendigen Messaufbauten betrieben. Sie zeigen bis heute funktionseinschränkende Eigenschaften, welche sich in einer hohen Fehlerrate, einem niedrigen Verschränkungszustand von mehreren Qubits und daraus folgend in der begrenzten Skalierbarkeit äußern.

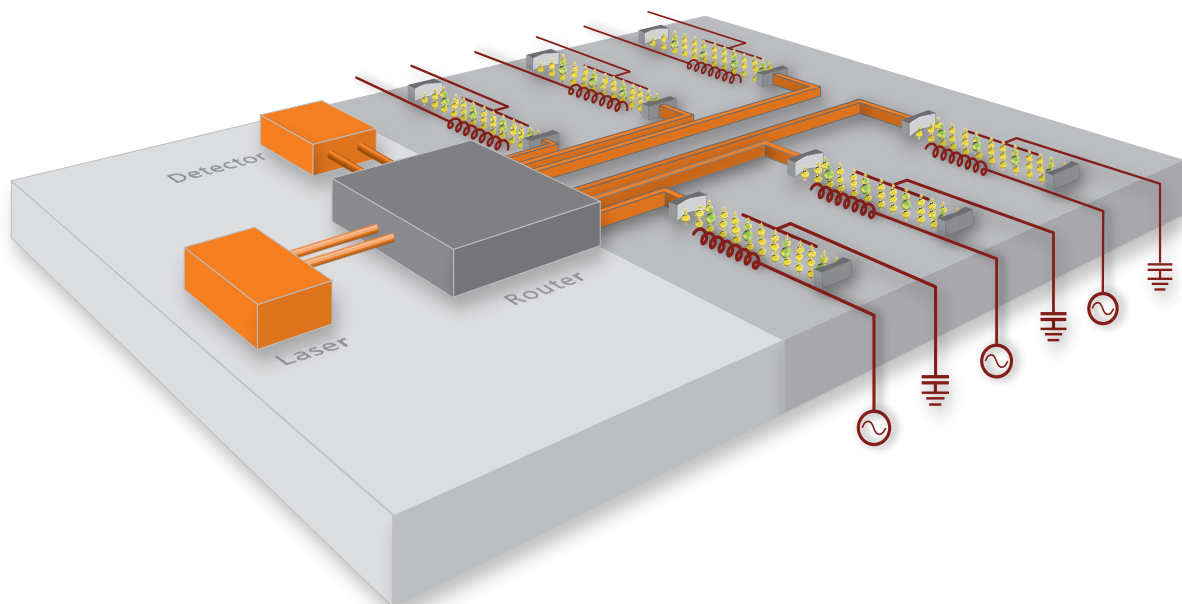
Public interest in quantum computers (QCs) and their logic has increased dramatically in recent decades. However, the commercial QC concepts currently available have not yet achieved the anticipated superiority over existing traditional systems (e.g. supercomputers). This is mainly due to the small number (< 64) of real addressable and usable qubits. The qubits used in commercial QCs are based on so-called superconducting Josephson contacts and are operated at very low temperatures (in the mK range) in highly complex measurement setups. So far they have demonstrated function-limiting properties, which manifest themselves in a high error rate, a low entanglement state for a number of qubits, and consequently limited scalability.

QUBIT-TECHNOLOGIEN BASIEREND AUF HALBLEITERN MIT GROSSEM BANDABSTAND

Schon heute ist absehbar, dass die Anzahl verfügbarer Qubits und ihre Fehlerraten in QCs mit aktiven Bauelementen aus supraleitenden Josephson-Kontakten zwar die wichtige Evaluation des Anwendungspotenzials von QCs erlauben, die technischen Spezifikationen aber nicht ausreichend sind, um viele potenzielle industrielle Anwendungen mit komplexen Fragestellungen mit der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu beantworten. Neben den bereits kommerziell zugänglichen supraleitenden Qubits gibt es weitere vielversprechende Qubit-Technologieansätze, z. B. ultra-kalte Atome in Ionenfallen oder photonische und spintronische Qubits.

QUBIT TECHNOLOGIES BASED ON WIDE-BANDGAP SEMICONDUCTORS

It is already apparent that the number of available qubits and their error rates in QCs with active components made up of superconducting Josephson contacts will, importantly, allow the application potential of QCs to be evaluated, but that the technical specifications are insufficient to deal with the complexity of many potential industrial applications with the required accuracy and reproducibility. In addition to the superconducting qubits that are already commercially available, there are other promising qubit technology approaches, e.g. ultra-cold atoms in ion traps and photonic and spintronic qubits.



Schema eines skalierbaren Quantenprozessors
Schematic drawing of a scalable quantum processor

Das Fraunhofer IAF hat sich das strategische Ziel gesetzt, sich auf die QC-Entwicklung basierend auf spintronischen Qubits zu fokussieren. Hierbei liegt die Stoßrichtung in der Implementierung einer skalierbaren QC-Hardware-Plattform, welche funktionalisierte Farbzentren (Dotierungsspins) und ^{13}C -Kernspins in Diamant als potenzielle Qubit-Technologie nutzt. Die verwendete Materialplattform Diamant ermöglicht durch die hohe Bandlücke herausragende Kohärenzeigenschaften der Dotierungsspins. Die eigentlichen physikalischen Qubits werden über ^{13}C -Kernspins realisiert, welche über den Elektronenspin eines naheliegenden Farbzentrum manipuliert und gesteuert werden. Die darüber erzeugten Einzel- und Zwei-Qubitgatter bzw. Multi-Qubit-Verschrankungen, welche für Quantenalgorithmen benötigt werden, zeichnen sich besonders durch eine sehr hohe Güte aus.

Die Funktionalität und Skalierbarkeit der QC-Hardware-Plattform soll weitergehend dadurch gezeigt werden, dass einzelne Registerzellen (eingebettet in optische Resonatoren) über ein klassisches optisches Routernetzwerk miteinander verbunden werden. Die Registerzellen werden einzeln mithilfe einer Kombination aus Mikrowellen bzw. HF- und Laser-Pulssequenzen optoelektronisch angesteuert. Die Entwicklung am Fraunhofer IAF sieht vor, diese Ansteuerung in einem hybriden Ansatz zu realisieren, welcher den QC-Prozessor und die Initialisierungs- und Auslese-Elektronik miteinander vereint. Im Zuge dieser Tätigkeiten steht die Entwicklung eines Messaufbaus bei tiefen Temperaturen ($< 4\text{ K}$) für den methodischen Nachweis des Verschrankungsgrades und die Ausführung von Gatteroperationen im Vordergrund. Die Umsetzung beinhaltet weiter das Design von Screening-Methoden (Lokalisierung der umliegenden ^{13}C -Kernspins (schwach und stark gekoppelt)) und die Erarbeitung von Pulssequenzen zur Realisierung der elementaren Gatteroperationen. Es wird erwartet, dass in den ersten beiden Entwicklungsphasen (drei bis vier Jahre) eine Quantencomputer-Architektur mit 100 Qubits und darüber hinaus erreicht werden kann.

Fraunhofer IAF has set itself the strategic goal of focusing on QC development based on spintronic qubits. This includes the implementation of a scalable QC hardware platform using functionalized color centers (doping spins) and ^{13}C nuclear spins in diamond as potential qubit technology. The wide bandgap of the diamond material platform used, enables the doping spins to have outstanding coherence. The actual physical qubits are realized via ^{13}C nuclear spins, which are manipulated and controlled by the electron spin of a nearby color center. The single and double qubit lattices and multiqubit entanglement that are required for quantum algorithms are characterized by a very high quality.

The functionality and scalability of the QC hardware platform will be further demonstrated by connecting individual register cells (embedded in optical resonators) via a classical optical router network. The register cells are individually optoelectronically controlled using a combination of microwaves or RF and laser pulse sequences. The development at Fraunhofer IAF aims to realize this control in a hybrid approach, combining the QC processor and the initialization and readout electronics. The priority with these activities is the development of a measurement setup at low temperatures ($< 4\text{ K}$) that will provide methodological proof of the degree of entanglement and execution of gate operations. Implementation also includes the design of screening methods (localization of the surrounding ^{13}C nuclear spins (weakly and strongly coupled)) and the development of pulse sequences in order to realize elementary gate operations. It is expected that the first two development phases (three to four years) will deliver a quantum computer architecture with 100 qubits and more.

HOCHFREQUENZELEKTRONIK ALS SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR QUANTENCOMPUTER

High frequency electronics as key technology for quantum computing

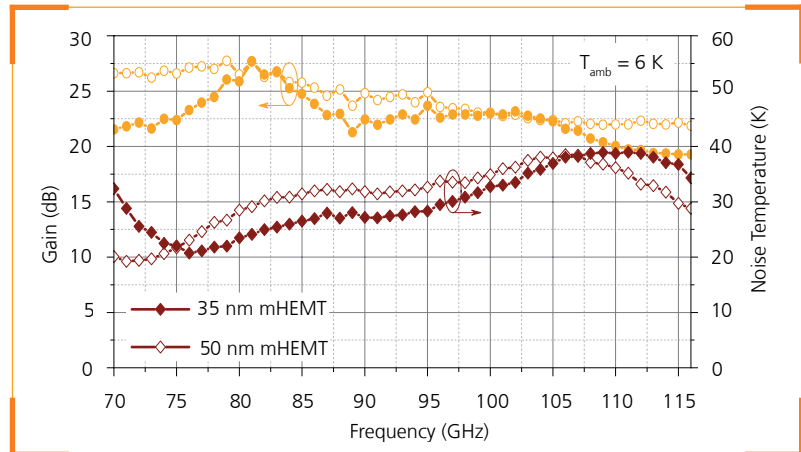
Für den Betrieb heutiger Quantencomputer wird neben den Quantenbits (Qubits) eine Vielzahl an Komponenten der Hochfrequenz-Elektronik eingesetzt. Sowohl bei der Steuerung von Qubits als auch beim Auslesen wird eine zielgenaue Signalkontrolle bzw. Nachverstärkung benötigt. Eine der wesentlichen Herausforderungen ist hierbei die rauscharme Verstärkung der sehr geringen Signalpegel, die von den Qubits ausgesendet werden. Daher forscht das Fraunhofer IAF an ultra-rauscharmen Verstärkern basierend auf High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs), die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben werden. Darüber hinaus wird die Skalierung der Anzahl an Qubits eine der zentralen Fragen der Zukunft des Quantencomputings sein. Hierbei stoßen die heutigen Konzepte für Kontroll- und Ausleseelektronik an ihre Grenzen. Das Fraunhofer IAF arbeitet hierfür an neuartigen Lösungsansätzen, um die Leistungsfähigkeit und Integrationsdichte heutiger Systeme weiter zu verbessern.

In addition to quantum bits (qubits), a large number of high-frequency electronics components are used to operate today's quantum computers. Precise signal control and amplification is required, both for the control of qubits and for the readout of signals. One of the main challenges here is low-noise amplification of the very low signal levels emitted by the qubits. This is why Fraunhofer IAF is researching ultra-low noise amplifiers based on high electron mobility transistors (HEMTs), which operate at temperatures close to absolute zero. Another central question for the future of quantum computing will be how to scale the number of qubits – current concepts for control and readout electronics are reaching their limits. Fraunhofer IAF is working on novel approaches to further improve the performance and integration density of the systems we have today.

Quantencomputer bieten gegenüber klassischen Computern einzigartige Möglichkeiten. Hochkomplexe Rechenaufgaben können wesentlich ressourcensparender und dadurch schneller bearbeitet werden. Die Information der Qubits ist in der Verschränkung ihrer Quantenzustände enthalten. Diese Verschränkung ist allerdings so schwach, dass bereits die Energie der Umgebungstemperatur ausreicht, die Verschränkung aufzubrechen. Daher müssen die Qubits auf wenige Millikelvin gekühlt werden, um die Zeitspanne, die sogenannte Dekohärenzzeit (in welcher der Verschränkungszustand wieder verloren geht), soweit zu vergrößern, dass die Rechenoperationen mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit durchgeführt werden können.

ELEKTRONIK, INTEGRATIONSDICHTEN UND SKALIERBARKEIT

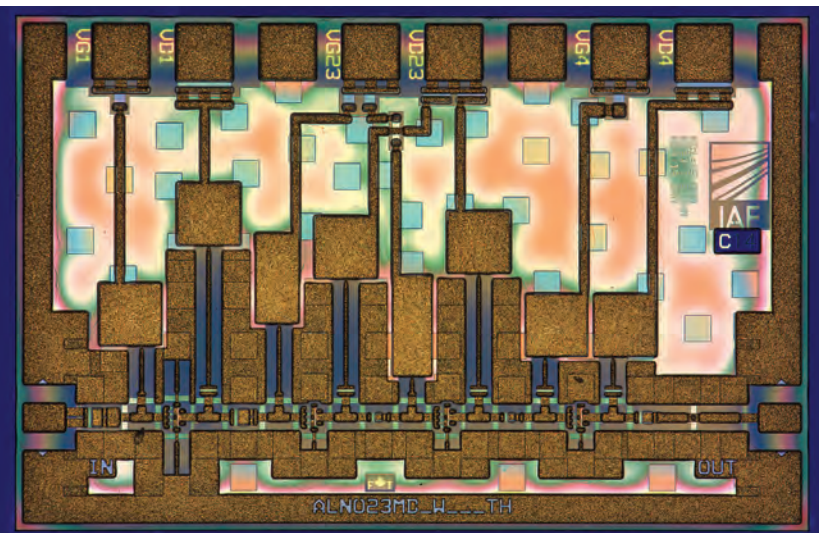
Heute im Einsatz befindliche supraleitende Qubits arbeiten in einem Frequenzbereich von etwa 5 GHz. Für das Auslesen der Qubits wird eine Kette an Nachverstärkern benötigt. Hierbei ergeben sich mehrere Herausforderungen. Erstens: Die Ausgangssignale der Qubits sind so schwach, dass sie mit einem Ausleseschaltkreis nahe des Quantenrauschlimits verstärkt werden müssen. Das Quantenrauschlimit beschreibt dabei die Grenze, die sich durch die Unsicherheit aufgrund der Quantisierung der Energie ergibt, und nimmt mit steigender Frequenz linear zu. Es ist wichtig, dass der Ausleseschaltkreis ein möglichst hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) aufweist, da es die Auslesezeit maßgeblich mitbestimmt. Die Auslesezeit muss dabei deutlich unterhalb der Dekohärenzzeit bleiben. Je näher das Eigenrauschen des Ausleseschaltkreises am Quantenrauschlimit ist, desto besser ist dessen SNR.



Gemessene Leistung von rauscharmen Verstärkern, die eine Rauschtemperatur von nur dem Fünffachen des Quantenrauschlimits erreichen

Measured performance of low-noise amplifiers reaching a noise temperature of only five times the quantum noise limit

Quantum computers offer unique potential possibilities compared with conventional computers, enabling highly complex computing tasks to be processed much more resource-efficiently and therefore faster. The information of the qubits is contained in the entanglement of their quantum states. This entanglement is so weak, however, that the energy of the ambient temperature alone is sufficient to break the entanglement. Qubits thus have to be cooled down to just a few millikelvin to lengthen the time period before the entanglement state is lost again, the so-called decoherence time, to such an extent that the arithmetic operations can be performed with sufficient probability.



Ein rauscharmer Verstärker (70 – 116 GHz) mit einer durchschnittlichen Rauschtemperatur von 30 K, hergestellt mit der 35-nm-HEMT-Technologie des Fraunhofer IAF

A low-noise amplifier (70 – 116 GHz), with an average noise temperature of 30 K, produced with Fraunhofer IAF's 3.5 nm metamorphic HEMT technology

Zweitens: Die Qubits werden bei Temperaturen von wenigen Millikelvin betrieben. Aufgrund der stark begrenzten Kühlleistung ist ein Einsatz von aktiven Bauelementen wie Transistoren nicht möglich. HEMT-basierte rauscharme Verstärker werden bei einer Umgebungstemperatur von 1–4 K eingesetzt. Dabei muss zwischen der Temperaturstufe der Qubits und der HEMT-Verstärker ein Isolator eingesetzt werden.

Drittens: In heutigen Quantencomputern werden die beschriebenen Hochfrequenz-Komponenten (HF-Komponenten) wie Isolatoren oder Verstärker mit einzelnen Modulen und HF-Verbindungen realisiert. Eine weitere Skalierung der Anzahl an Qubits erfordert dabei immer mehr

ELECTRONICS, INTEGRATION DENSITY AND SCALABILITY

Superconducting qubits in use today operate in a frequency range of about 5 GHz. A chain of post-amplifiers is needed to read out the qubits. This poses several challenges. Firstly, the output signals of the qubits are so weak that they have to be amplified with a readout circuit close to the quantum noise limit. The quantum noise limit is the limit resulting from the uncertainty arising from the quantization of the energy and increases on a linear basis with increasing frequency. It is important that the readout circuit has a signal-to-noise (SNR) ratio that is as high as possible, since this has a significant influence on the readout time. The readout time must remain well below the decoherence time. The closer the inherent noise of the readout circuit is to the quantum noise limit, the better its SNR will be.

Secondly, qubits are operated at temperatures of only a few millikelvin. Due to the very limited cooling capacity, it is not possible to use active components such as transistors. HEMT-based low-noise amplifiers are used at an ambient temperature of 1–4 K. An insulator has to be inserted between the temperature stage of the qubits and the HEMT amplifiers.

Thirdly, in today's quantum computers, radio frequency (RF) devices such as insulators or amplifiers are realized with individual modules and RF connections. Further scaling of the number of qubits requires more and more RF components. This principle of system integration is increasingly reaching its limits. Two fundamental limits must be overcome. On the one hand, several RF devices such as low-noise HEMT amplifier arrays and switches must be integrated in the readout circuit of a single chip. On the other hand, the integration density at system level must also be improved. Fraunhofer IAF is therefore researching, alongside others in the EU project »SEQUENCE«, both the monolithic integration of ultra-low

HF-Komponenten. Dieses Prinzip der Systemintegration stößt zunehmend an seine Grenzen. Zwei fundamentale Grenzen gilt es zu überwinden. Einerseits müssen mehrere HF-Komponenten wie rauscharme HEMT-Verstärker-Arrays und Schalter im Ausleseschaltkreis auf einem Chip integriert werden. Andererseits muss auch die Integrationsdichte auf Systemebene verbessert werden. Daher forscht das Fraunhofer IAF u. a. im EU-Projekt »SEQUENCE« sowohl an der monolithischen Integration ultra-rauscharmer Verstärkerketten als auch an neuartigen Konzepten für eine 3D-Integration von mehreren Ebenen eines Quantencomputers, um eine weitere Skalierung der Anzahl an Qubit zu ermöglichen.

ERGEBNISSE ULTRA-RAUSCHARMER VERSTÄRKER DES FRAUNHOFER IAF

Rauscharme Verstärker, wie sie in Ausleseschaltkreisen von Quantencomputern zum Einsatz kommen, werden am Fraunhofer IAF in unterschiedlichen Frequenzbereichen realisiert. Für den derzeitigen Frequenzbereich um etwa 5 GHz hat das Fraunhofer IAF integrierte Schaltungen (MMICs) demonstriert, die eine mittlere Rauschtemperatur von etwa 2,5 K erzielen. Eine Skalierung zu einer höheren Betriebsfrequenz hätte an mehreren Stellen des Quantencomputers Vorteile. Zum einen würde es eine höhere Umgebungstemperatur des Qubit-Chips erlauben und so die Temperatur der Qubit-Ebene näher an die der HEMT-Verstärker bringen. Zum anderen verringert sich der Platzbedarf einzelner Komponenten mit steigender Frequenz, was eine Steigerung der Integrationsdichte erleichtert. Das Bild links zeigt einen kürzlich am Fraunhofer IAF realisierten MMIC, der im Frequenzbereich 70–116 GHz eine mittlere Rauschtemperatur von etwa 30 K erreicht und mit 20 K Werte aufweist, die gerade einmal dem fünffachen Quantenrauschlimit entsprechen (siehe Grafik S. 29).

noise amplifier chains and novel concepts for 3D integration of several layers of a quantum computer to enable further scaling of the number of qubits.

RESULTS OF ULTRA-LOW NOISE AMPLIFIERS OF FRAUNHOFER IAF

Low-noise amplifiers, as they are used in readout circuits of quantum computers, are realized at Fraunhofer IAF in different frequency ranges. For the current frequency range of around 5 GHz, Fraunhofer IAF has demonstrated integrated circuits (MMICs) that achieve an average noise temperature of about 2.5 K. Scaling up to a higher operating frequency would have advantages at several points of the quantum computer. Firstly, it would allow a higher ambient temperature of the qubit chip, bringing the temperature of the qubit plane closer to that of the HEMT amplifiers. In addition, the space requirement of individual devices would decrease with increasing frequency, which would facilitate an increase in integration density. The image on the left shows an MMIC recently realized at Fraunhofer IAF, which achieves an average noise temperature of about 30 K in the 70–116 GHz frequency range and has values of 20 K (see graphic p. 29), just five times the quantum noise limit.

KRYOGENE MESSTECHNIK – DER WEG ZUM QUANTENRAUSCHLIMIT

Cryogenic measurement technology – the path to quantum noise limits

Um die niedrigen Signale supraleitender Quantenbits (Qubits) heutiger Quantencomputer auslesen zu können, werden extrem rauscharme Verstärker benötigt. Die weltweit rauschärmsten Transistor-Technologien verwenden einen InGaAs-Kanal mit hoher Elektronenmobilität (HEMTs). Bei Raumtemperatur konnte die metamorphe HEMT-Technologie des Fraunhofer IAF bereits Rekordrauschzahlen demonstrieren. Das niedrigste Verstärkerrauschen erreicht man jedoch bei kryogenen Temperaturen von wenigen Kelvin. Um Kryo-optimierte Schaltungen zu entwickeln, ist die exakte Kenntnis des Verhaltens von Bauelementen bei Tiefsttemperaturen notwendig. Das Fraunhofer IAF verfügt über eine exzellente Messtechnik, um Transistoren und Hochfrequenzschaltungen bei Temperaturen von nur 6 K zu vermessen. Anhand der Messdaten können exakte Simulationsmodelle extrahiert werden, mit deren Hilfe die metamorphe HEMT-Technologie für kryogenen Betrieb optimiert sowie Kryo-Schaltungen entwickelt werden.

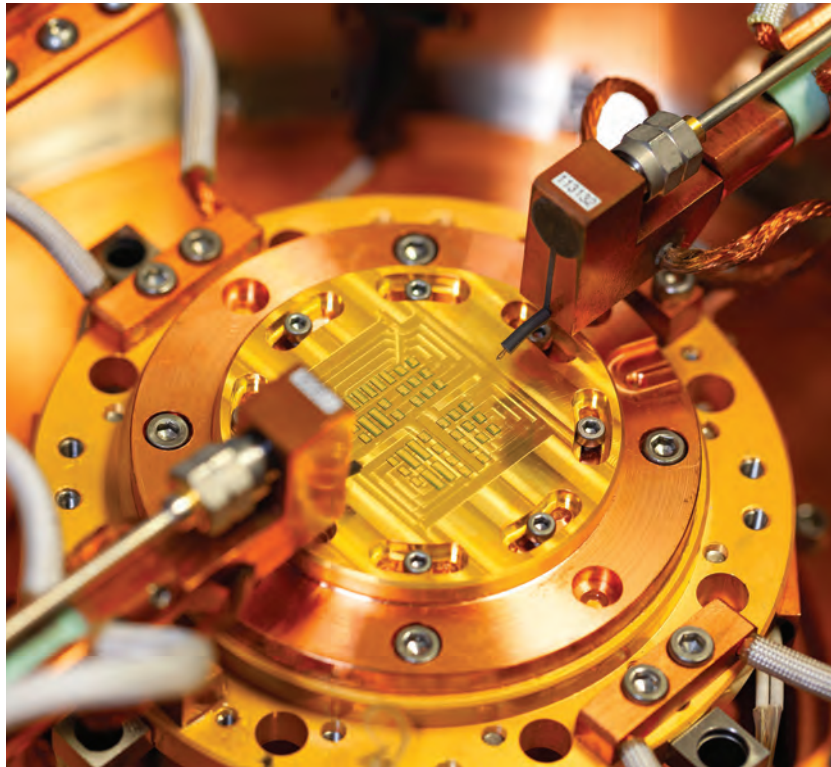
Extremely low-noise amplifiers are required in order to read out the low signals of superconducting quantum bits (qubits) emitted by today's quantum computers. The world's lowest noise transistor technologies use an InGaAs channel with high electron mobility (HEMTs). Fraunhofer IAF's metamorphic HEMT technology has already demonstrated record noise figures at room temperature. The lowest amplifier noise, however, is achieved at cryogenic temperatures of just a few Kelvin. In order to develop cryo-optimized circuits, exact knowledge of the behavior of devices at cryogenic temperatures is necessary. Fraunhofer IAF has excellent measurement equipment that enables transistors and high-frequency circuits to be measured at temperatures as low as 6 K. Based on such measurement data precise simulation models can be extracted to optimize the metamorphic HEMT technology for cryogenic operation and develop cryogenic circuits.

Innenansicht des Kryostaten mit auf der Kälteplatte aufgebrauchten Teststrukturen und zwei Probearmen

Interior view of the cryostat with test structures applied to the cold plate and two probe arms

Das Streben nach höherer Rechenleistung zur Lösung komplexer Probleme erfordert ein Umdenken der Rechnerarchitekturen. Quantencomputer haben das Potenzial, Rechenprobleme zu lösen, die herkömmliche Computer nicht berechnen können. Um den verschränkten Zustand der Qubits auslesen zu können, müssen sie bei wenigen Millikelvin betrieben werden. Ansonsten wäre bereits das thermische Rauschen der Umgebung um ein Vielfaches höher als das Nutzsignal, wodurch dieses nicht mehr zu erkennen wäre. Die Signale der Qubits werden aus dem Kryostaten herausgeleitet und weiterverarbeitet, wozu sie zunächst verstärkt werden. Die Verstärkung solch niedriger Signalpegel stellt extreme Anforderungen an das elektrische Rauschen, das jeder reale Verstärker dem Nutzsignal hinzufügt. Dieses muss so niedrig sein, dass das Qubit-Signal noch vom Rauschen zu unterscheiden ist. Höheres Rauschen führt zu längeren Auslesezeiten, was ein fehlerhaftes Auslesen der Qubits wahrscheinlicher macht. Daher werden rauscharme Verstärker kontinuierlich weiterentwickelt, um näher an das physikalische Limit – das Quantenrauschlimit – zu gelangen.

Das niedrigste Verstärkerrauschen lässt sich durch gekühlte Verstärker erreichen, die speziell für den kryogenen Betrieb entwickelt wurden. InGaAs-Transistoren mit hoher Elektronenmobilität (HEMTs) sind die rauschärmsten Transistoren weltweit und daher ideal für diese Anwendungen geeignet. Um die metamorphen HEMT-Verstärker des Fraunhofer IAF für tiefstes Rauschen bei kryogenen Bedingungen zu optimieren, werden diese bei 6 K vermessen und aus den Messdaten genaue Simulationsmodelle extrahiert. Mittels der erhobenen Daten werden sowohl Technologieparameter als auch das Schaltungsdesign für den kryogenen Betrieb optimiert.



The pursuit of higher computing power to solve complex problems requires a rethinking of computer architectures. Quantum computers have the potential to solve computational problems that conventional computers cannot calculate. In order to read out the entangled state of qubits, they must be operated at just a few millikelvin, since otherwise the thermal noise of the environment would be many times higher than the useful signal, making it unrecognizable. The qubit signals are fed out of the cryostat for further processing, for which purpose they are first amplified. The amplification of such low signal levels places extreme demands on the electrical noise added to the useful signal by any amplifier. This must be low enough for the qubit signal to still be distinguishable from the noise. Higher noise leads to longer readout times, which makes faulty reading of the qubits more likely. Therefore, low-noise amplifiers are continuously improved to get closer to the physical limit – the quantum noise limit.

nicht verfügbar. Die von HEMTs erreichten Rauschleistungen sind so gering, dass sie nicht in einer direkten Messung bestimmt werden können. Stattdessen werden zwei bekannte Eingangsrauschleistungen vom zu testenden Bauteil verstärkt und die resultierenden Ausgangsleistungen gemessen. Dadurch lassen sich die lineare Verstärkung sowie die Rauschleistung des Verstärkers bestimmen. Hierbei müssen sehr niedrige Signalpegel ausgewertet werden, was – analog zum Auslesen der Qubits – rauscharme Breitbandverstärker erforderlich macht. Links sehen Sie das Chipfoto eines am Fraunhofer IAF entwickelten Wanderwellenverstärkers mit einer Bandbreite von 2–60 GHz. Durch die breitbandige Verstärkung bleibt das Messsystem flexibel für bandübergreifende Rauschmessungen.

KRYOGENE MESSERGEBNISSE DES FRAUNHOFER IAF

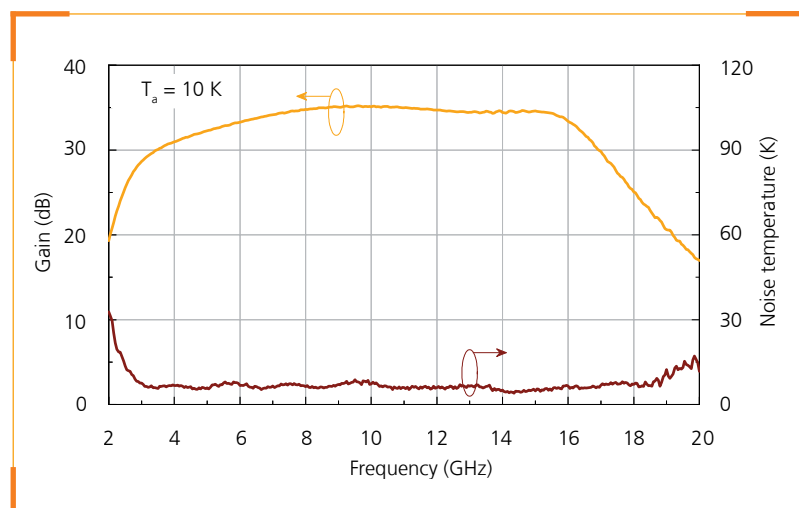
Die umfassende kryogene Charakterisierung metamorpher HEMTs ermöglicht Verbesserungen sowohl im Schaltungsentwurf als auch in der Technologie. So konnte das Fraunhofer IAF durch Anpassungen der Epitaxie den Strombedarf der gekühlten mHEMTs bei gleichbleibender Verstärkung halbieren, was auch das Eigenrauschen deutlich verbessert. Untenstehend sehen Sie die Messung eines ultra-rauscharmen Verstärkers (4–16 GHz) in 50-nm-mHEMT-Technologie bei 10 K. Mittels Daten aus der hochgenauen, kryogenen Messtechnik entwickelt das IAF seine ultra-rauscharme Technologie noch weiter und bringt die erreichten Rauschleistungen näher an das Quantenrauschlimit.

Verstärkungs- und Rauschtemperaturmessung eines ultra-rauscharmen mHEMT-Verstärkers bei 10 K Umgebungstemperatur
Gain and noise temperature measurement of an ultra low noise mHEMT amplifier at 10 K ambient temperature

determined. For this purpose, very low signal levels have to be evaluated, which – like the qubit readouts – requires low noise broadband amplifiers. On the left can be seen the chip photo of a travelling wave amplifier developed at Fraunhofer IAF with a bandwidth of 2 to 60 GHz. The broadband amplification means that the measurement system remains flexible for noise measurements across bands.

CRYOGENIC MEASUREMENT RESULTS OF FRAUNHOFER IAF

The comprehensive cryogenic characterization of metamorphic HEMTs enables improvements in both circuit design and technology. For example, Fraunhofer IAF was able to halve the power consumption of cooled mHEMTs with the same gain by adjusting the epitaxy, which also significantly improves the inherent noise. Below is a depiction of the measurement of an ultra low noise amplifier (4–16 GHz) in 50 nm mHEMT technology at 10 K. Fraunhofer IAF is using the data derived from high-precision cryogenic measurement techniques to further develop its ultra-low noise technology and bring the achieved noise performance closer to the quantum noise limit.

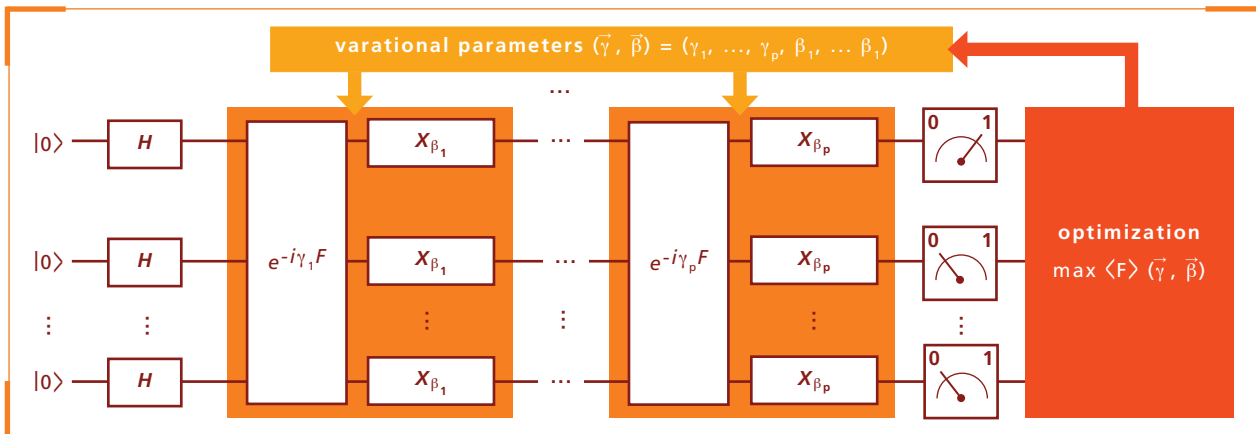


QUANTENSOFTWARE UND -ALGORITHMEN

Quantum software and algorithms

Um die praxisbezogene Anwendung von Quantencomputern voranzutreiben, ist eine gemeinsame, aufeinander abgestimmte Entwicklung von Hardware und Software unerlässlich. Am Fraunhofer IAF wird daher eine neue Gruppe »Quanteninformation« aufgebaut, die sich mit Themen an der Schnittstelle zwischen Hardware und Software beschäftigt. Hierbei gilt es einerseits, die auf der Quantenhardware auftretenden intrinsischen Fehler genau zu charakterisieren und diese so weit wie möglich zu reduzieren. Andererseits müssen Algorithmen entwickelt werden, welche ein gewisses Maß von Fehlern verkraften können. Indem wir damit die zentrale Herausforderung des Quantencomputings angehen, komplexe und praktisch relevante Quantenalgorithmen auf eine resiliente Art und Weise auf inhärent unzuverlässiger Quantenhardware auszuführen, wollen wir dazu beitragen, eine frühzeitige anwendungsrelevante Nutzung von Quantencomputern zu ermöglichen.

In order to advance the practical application of quantum computers, a joint, coordinated approach to development of hardware and software is essential. For this reason, Fraunhofer IAF is establishing a new Quantum Information research group »Quantum Information«, which will deal with topics at the interface between hardware and software. On the one hand, it is important to precisely characterize the intrinsic errors occurring on the quantum hardware and to reduce them as far as possible. On the other hand, algorithms have to be developed which can cope with a certain amount of errors. By addressing the central challenge of quantum computing, namely the resilient execution of complex and practically relevant quantum algorithms in a resilient manner on inherently unreliable quantum hardware, we aim to contribute to an early application-relevant use of quantum computers.



Quantenschaltkreis des QAOA-Algorithmus mit klassischer Optimierung der Parameter $\vec{\gamma}$ und $\vec{\beta}$
Quantum circuit of the QAOA algorithm with classical optimization of the parameters $\vec{\gamma}$ and $\vec{\beta}$

Quantencomputer haben das Potenzial, bestimmte Aufgaben wesentlich effizienter zu lösen als klassische Computer. Bekannte Beispiele hierfür sind die Dekodierung von Public-Key-Verschlüsselungen (Shor-Algorithmus), die Lösung linearer Gleichungssysteme (HHL-Algorithmus) oder das Auffinden eines gesuchten Eintrags in einer unstrukturierten Datenbank (Grover-Algorithmus). Ihre Überlegenheit gegenüber den leistungsfähigsten klassischen Algorithmen ist jedoch nur unter der Annahme bewiesen, dass eine genügend große Anzahl quasi fehlerfrei operierender Quantenbits (Qubits) zur Verfügung steht. In der Praxis ist dies eine enorme Herausforderung, da die in den Quantenberechnungen verwendeten quantenmechanischen Superpositionszustände gegenüber selbst kleinsten Störungen extrem empfindlich sind. Dies führt zu einer intrinsischen Fehleranfälligkeit, welche im Prinzip jede Quantenhardware betrifft – seien es die in den IBM Q Systemen verwendeten supraleitenden Qubits oder die am Fraunhofer IAF erforschten Farbzentren-Qubits in Diamant. Konzepte zur vollständigen Eliminierung dieser Fehler mittels Quantenfehlerkorrektur existieren zwar, diese erfordern jedoch einen hohen Aufwand und werden in den nächsten Jahren aller Voraussicht nach noch nicht für den praktischen Einsatz zur Verfügung stehen.

Quantum computers have the potential to solve certain tasks much more efficiently than traditional computers. Well-known examples are the decoding of public-key encryptions (Shor algorithm), the solving of linear systems of equations (HHL algorithm) or finding an entry in an unstructured database (Grover algorithm). However, their superiority over the most powerful traditional algorithms is only proven under the assumption that a sufficiently large number of quasi error-free quantum bits (qubits) are available. In practice, this is an enormous challenge, since the quantum mechanical superposition states used in quantum computations are extremely sensitive to even the smallest disturbances. This leads to an intrinsic susceptibility to errors, which in principle affects all quantum hardware – be it the superconducting qubits used in IBM Q systems or the color center qubits in diamond researched at Fraunhofer IAF. Concepts for the complete elimination of these errors by means of quantum error correction do exist, but they require a great deal of effort and will in all probability not be available for practical use in the next few years.



Dr. Thomas Wellens erforscht Quantenalgorithmen
Dr. Thomas Wellens researches quantum algorithms

SYNERGIEN ZWISCHEN HARDWARE- UND SOFTWAREENTWICKLUNG

Mit Hinblick auf eine möglichst frühzeitige Nutzung des Potenzials von Quantencomputern empfiehlt es sich also, die oben beschriebene intrinsische Fehleranfälligkeit der Quantenhardware von vorneherein bei der Entwicklung der Algorithmen zu berücksichtigen. Dies ist ein spannendes Thema aktueller Forschung, welches mehrere Herausforderungen beinhaltet: Die Grundlage bildet hierbei ein möglichst genaues Verständnis der tatsächlichen Funktionsweise der Quantenhardware durch Quantifizierung und Charakterisierung der bei der Durchführung der Quantengatter (d. h. der elementaren Operationen des Quantencomputers) auftretenden Fehler. Darauf basierend gilt es dann, einerseits verbesserte Methoden zur möglichst weitgehenden Reduzierung dieser Fehler zu finden sowie andererseits Quantenalgorithmen

SYNERGIES BETWEEN HARDWARE AND SOFTWARE DEVELOPMENT

If we are to exploit the potential of quantum computers as early as possible, it will be advisable to take into account from the outset the intrinsic susceptibility of quantum hardware to errors described above when developing the algorithms. This is an exciting topic for current research, which brings with it a number of challenges: The basic requirement is to understand the actual functioning of the quantum hardware as accurately as possible by quantifying and characterizing the errors that occur during the execution of the quantum gates (i.e. the elementary operations of the quantum computer).

Based on this, it is then necessary to improve methods for reducing these errors as far as possible and to further develop quantum algorithms so that they are as resistant as possible to the remaining errors. In order to research these questions, we at Fraunhofer IAF, together with other Fraunhofer institutes, universities and interested companies, will initially use our access to the IBM quantum computer in Ehningen. At the same time, we will use the knowledge gained from this for the development of new quantum hardware based on defect centers.

QUANTUM OPTIMIZATION WITH ROBUST ALGORITHMS

A promising candidate for realizing »quantum advantage« (i.e. superiority over classical computers) in the near future is the »Quantum Approximate Optimization Algorithm« (QAOA). This is a »hybrid« algorithm that combines traditional and quantum computations and can be used to solve complex optimization problems, e.g. in finance or

dahingehend weiterzuentwickeln, dass sie gegenüber den noch verbleibenden Fehlern möglichst resistent sind. Zur Erforschung dieser Fragen werden wir am Fraunhofer IAF gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten, Hochschulen und interessierten Unternehmen zunächst unseren Zugang zum IBM-Quantencomputer in Ehningen nutzen. Gleichzeitig werden wir die dabei gewonnenen Erkenntnisse für die Entwicklung neuer, auf Defektzentren basierender Quantenhardware einsetzen.

QUANTENOPTIMIERUNG MIT RESILIENTEN ALGORITHMEN

Ein vielversprechender Kandidat zur Realisierung eines »Quantenvorteils« (d. h. Überlegenheit gegenüber klassischen Computern) in naher Zukunft ist der »Quantum Approximate Optimization Algorithm« (QAOA). Es handelt sich hierbei um einen »hybriden« Algorithmus, welcher klassische und Quantenberechnungen miteinander kombiniert und zur Lösung von komplexen Optimierungsproblemen z. B. in der Finanzwirtschaft oder Logistik eingesetzt werden kann. In einem gemeinsamen Projekt mit den Universitäten Konstanz, Tübingen, Stuttgart und der Dualen Hochschule Baden-Württemberg in Ravensburg sowie assoziierten Unternehmen werden wir am Fraunhofer IAF diesen Algorithmus hinsichtlich seiner Fehlerresilienz weiterentwickeln und die dadurch verbesserten Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Portfoliooptimierung erforschen. Damit wollen wir einen Beitrag dazu leisten, die frühzeitige Nutzung von Optimierungsverfahren auf Quantencomputern für die Finanzwirtschaft und andere Branchen zu ermöglichen.



Quantenalgorithmen können z. B. im Finanzwesen die Vorhersagen verbessern

Quantum algorithms can improve predictions, e.g. in finance

logistics. In a joint project with the Universities of Konstanz, Tübingen, Stuttgart and the Baden-Württemberg Cooperative State University in Ravensburg and with associated companies, Fraunhofer IAF will further develop this algorithm with respect to its error resilience and explore the resulting improved application potential for portfolio optimization. With this, we want to contribute to the early use of optimization processes on quantum computers for in the financial sector and other industries.

KOMPETENZZENTRUM QUANTEN- COMPUTING BADEN-WÜRTTEMBERG

Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg

Um die anwendungsnahe Forschung zum Quantencomputing voranzutreiben, ist in Baden-Württemberg 2020 das Kompetenzzentrum Quantencomputing gestartet. Es wird gemeinsam vom Fraunhofer IAF und dem Fraunhofer IAO koordiniert. Ab Januar 2021 wird ein IBM-Quantencomputer in Ehningen in Betrieb genommen, der unter deutschem Recht operiert. Er befindet sich auf dem höchsten Stand der Technik und bietet der hiesigen Wirtschafts- und Innovationslandschaft eine Vielzahl an anwendungsbezogenen Entwicklungen.

The Competence Center Quantum Computing was launched in Baden-Württemberg in 2020 in order to drive forward application-oriented research on quantum computing. It is jointly coordinated by Fraunhofer IAF and Fraunhofer IAO. From January 2021, an IBM quantum computer will start operating in Ehningen under German law. It is state-of-the-art and offers the local economy and innovation landscape a wide range of developments with practical application.

ZUGANG ZUM QUANTENCOMPUTER

Wir bieten für alle interessierten Nutzer – unabhängig von ihrem Bundesland – Zugriff auf den IBM-Quantencomputer. Der Zugriff unterliegt einem Nutzungsvertrag und einer Exportkontrolle. Wir arbeiten mit einem Ticketmodell, bei dem Sie sich pro Ticket einen Kalendermonat Zugriff auf den Quantencomputer sichern. Dabei gelten die folgenden (vorläufigen) Preise:

- für Verbundprojektpartner: 9.770 € / Kalendermonat
- für externe Kunden: 11.621 € / Kalendermonat

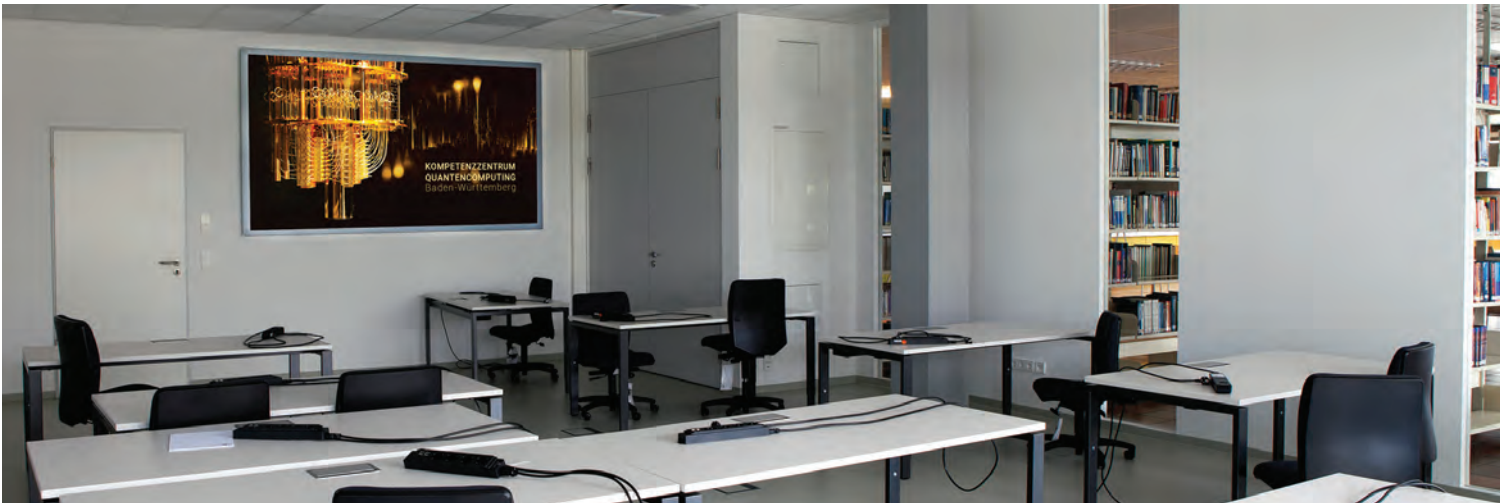
Die Preise verstehen sich zzgl. MwSt. und pro Nutzer. Möchten mehrere Nutzer einer Organisation auf den Quantencomputer zugreifen, so ist für jeden ein individuelles Ticket zu erwerben. Wir empfehlen Ihnen, zusätzlich von unserem Schulungsangebot Gebrauch zu machen (siehe rechts).

ACCESS TO THE QUANTUM COMPUTER

We offer access to the IBM quantum computer to all interested users regardless of where they are based. The computer operates under German law. Access is subject to a user contract and export controls. We work with a ticket model whereby each ticket purchased secures you a calendar month's access to the quantum computer. The following (provisional) prices apply:

- for project partners: 9,770 € / calendar month
- for external customers: 11,621 € / calendar month

Prices are exclusive of VAT and are quoted per user. If several users in an organization wish to access the quantum computer, each user must purchase an individual ticket. Tickets cannot be shared or transferred. We recommend that you also make use of our training courses (see right).



SCHULUNGSANGEBOT

Am Fraunhofer IAF und Fraunhofer IAO gibt es jeweils einen leistungsfähigen Computer-Pool, bestehend aus zehn Workstations und einem klassischen Hochleistungscomputer für Trainings- und Schulungszwecke, die an die IBM-Quantencomputer angeschlossen sind. Die folgenden Anwendungsgebiete eignen sich besonders, um sie im Rahmen unseres Schulungsangebots zu bearbeiten:

- Optimierung logistischer Prozessabläufe
- Koordination und Organisation komplexer automatisierter Produktionsstrecken
- Ressourcenoptimiertes Management von Fahrzeugflotten und autonomen Fahrzeugen
- Prognose von Finanzentwicklungen
- Simulation von Molekülen und chemischen Reaktionen

SCHULUNGSMODALITÄTEN

Die Schulungen sind nutzer- und interaktionszentriert und finden am Fraunhofer IAF und Fraunhofer IAO oder online statt. Je nach Vorkenntnissen können Sie zwischen den Varianten »Basic« und »Advanced« wählen. Dies ermöglicht Ihnen, erste Erfahrungen mit IBM-Quantencomputern zu sammeln oder Ihre vorhandene Expertise weiter auszubauen, indem Sie Ihre eigenen Anwendungsbeispiele einbringen.

TRAINING OFFERS

Fraunhofer IAF and Fraunhofer IAO each have their own computer pool. These consist of ten workstations and a conventional high-performance computer for training and education purposes, which are connected to the IBM quantum computers. The following areas of application are particularly interesting to be dealt with within the scope of our training offer:

- Optimization of logistical process flows
- Coordination and organization of complex automated production lines
- Resource-optimized management of fleets and autonomous vehicles
- Financial development forecasting
- Simulation of molecules and chemical reactions

TRAINING MODALITIES

Training courses are user- and interaction-centred and are held at Fraunhofer IAF and Fraunhofer IAO or online. Depending on previous knowledge, you can choose between »basic« and »advanced« courses. This enables you to gain initial experience with IBM quantum computers or to expand your existing expertise by contributing your own application examples.

VERBUNDPROJEKTE
COLLABORATIVE PROJECTS

Innerhalb des Kompetenzzentrums Quantencomputing werden Verbundprojekte durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert. In der ersten Projektlaufzeit 2021–2022 werden sechs Projekte gefördert, drei davon mit Beteiligung des Fraunhofer IAF.

Within the Competence Center Quantum Computing, projects are funded by the Ministry of Economics, Labor and Housing Baden-Württemberg. Six projects will be funded in the first project period 2021–2022, three of them with the participation of Fraunhofer IAF.

Q O R A



M O R E
I N F O



Für Unternehmen wird die Fähigkeit, schnell optimale Entscheidungen zu treffen, zunehmend zu einem maßgeblichen Wettbewerbsvorteil. Quantencomputer können perspektivisch konventionelle Rechner bei Optimierungsverfahren übertreffen. Im Projekt werden daher solche Optimierungs-Algorithmen entwickelt und in der Praxis erprobt.

For companies, the ability to make optimal decisions quickly is increasingly becoming a decisive competitive advantage. Quantum computers can perspectivevly outperform conventional computers in optimization processes. The project is therefore developing such optimization algorithms and will test them in practical settingse.

Partners: Fraunhofer IAF, DHBW Ravensburg, Universität Tübingen, Universität Konstanz, Universität Stuttgart

Q C - 4 - B W



M O R E
I N F O



Ziel ist die Entwicklung eines Diamant-basierten, spintronischen Quantenregisters für einen skalierbaren Quantenprozessor. Dafür wird ein 10-Qubit-Quantenregister entwickelt, das als einziges bisher realisiertes Register auch über einen integrierten Quantenspeicher verfügen soll.

The goal is to develop a diamond-based spintronic quantum register for a scalable quantum processor. For this purpose, a 10-qubit quantum register is being researched. This is the only register realized so far which will also have a quantum memory.

Partners: Fraunhofer IAF, Fraunhofer ICT, KIT, Universität Stuttgart, Universität Ulm, Universität Konstanz

S E Q U O I A



M O R E
I N F O



Im Projekt werden neue Methoden, Werkzeuge und Vorgehensweisen für Quantencomputing erforscht, entwickelt und erprobt, um zukünftig die industrielle Nutzung zu ermöglichen. Im Fokus stehen Anwendungen und Algorithmen, ein Quantensoftware-Komponentenbaukasten und ein Software-Engineering-Modell.

The project is researching, developing and testing new methods, tools and procedures for quantum computing in order to enable future industrial use. The focus is on applications and algorithms, a quantum software component kit and a software engineering model.

Partners: Fraunhofer IAO, Fraunhofer IPA, Fraunhofer IAF, FZI, Universität Stuttgart, Universität Tübingen

STIMMEN UNSERER PARTNER

Voices from our partners



Prof. Dr. Guido Burkard
*Chair of Theoretical Solid State Physics
and Quantum Information, University
of Konstanz*

” Mit dem Kompetenzzentrum erhalten wir die Chance, den in Baden-Württemberg vorhandenen Sachverstand im Bereich Quantencomputing zu bündeln und auszubauen und Lücken zwischen Grundlagenforschung und Anwendung zu schließen. Die Forschung spielt hierbei eine wichtige Rolle. Denn während die ersten Prototypen bereits verfügbar sind, ist der Wettbewerb um die besten Ideen zur Realisierung und Nutzung von Quantencomputern weiterhin in vollem Gang.

The Competence Center gives us the opportunity to pool and expand the expertise in quantum computing available in Baden-Württemberg and to close gaps between basic research and application. Research plays an important role here, because while the first prototypes are already available, the competition for the best ideas for the realization and use of quantum computers is still in full swing.

” Bei JoS QUANTUM entwickeln wir Algorithmen für Quantencomputer, um Risiken in der Finanz- und Versicherungswelt effizient zu berechnen. Darüber hinaus erforschen wir die Anwendung von Quantencomputern für Optimierungen im Energiemarkt. Die Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg ermöglicht uns einen engen fachlichen Austausch mit Partnern aus Industrie und Forschung sowie Diskussionen rund um das Thema Quantencomputer.

At JoS QUANTUM we develop algorithms for quantum computers to efficiently calculate risks in the financial and insurance sectors. In addition, we research the application of quantum computers for optimizations in the energy market. Collaborating with the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg enables us to maintain a close professional exchange with partners from industry and research as well as discussions on the topic of quantum computers.



Thomas Decker
CTO, JoS QUANTUM



Dr. Sebastian Zanker
*CTO and Co-Founder,
HQS Quantum Simulations*

” Wir bei HQS befassen uns mit der Entwicklung von Simulationssoftware, die den Quantencomputer zur Vorhersage von Materialeigenschaften nutzbar macht. Vom Kompetenzzentrum erwarten wir uns enge Kontakte und Kooperationen mit Partnern aus der Wirtschaft, die zu den potenziellen Anwendern unserer Software zählen, als auch Forschungsinstituten, die gemeinsam mit uns an Themen wie z. B. der Fehlerreduktion oder auch effizienten Simulationsalgorithmen arbeiten.

At HQS we are involved in the development of simulation software that allows quantum computers to be used to predict material properties. We expect the Competence Center to facilitate close contact and collaboration with partners from industry, who are potential users of our software and with research institutes, who work with us on topics such as error reduction or efficient simulation algorithms.





STARKE VERNETZUNG

Strong networks

Um das Quantencomputing in Europa zum Erfolg zu führen, bedarf es internationaler und interdisziplinärer Kooperation. Daher vernetzt sich das Fraunhofer IAF aktiv mit zahlreichen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Einige von ihnen stellen sich auf den folgenden Seiten vor.

International and interdisciplinary cooperation is needed to make quantum computing a success in Europe. Therefore, Fraunhofer IAF actively forges networks with a wide range of partners from science and industry. A few of them introduce themselves on the following pages.

QUANTUM BRILLIANCE

Ubiquitous quantum computing, powered by diamond



Available in 2021, the Quantum Development Kit is a quantum computer customers can host in a server room, requiring only mains power and an ethernet connection.

Quantum Brilliance baut Quantencomputer, die bei Raumtemperatur arbeiten, unter Verwendung von Stickstoff-Vakanz-Zentren aus synthetischem Diamant. Erste Einheiten werden ab 2021 für Kunden vor Ort verfügbar sein. Im Gegensatz zu anderen Quantencomputern, bei denen Kryogenik oder komplexe Lasersysteme erforderlich sind, reduziert der Ansatz von Quantum Brilliance die Eintrittsbarrieren und den Energieverbrauch von Quantencomputern erheblich. Quantum Brilliance wurde 2019 gegründet und vermarktet Technologie, die von der Australian National University und der Universität Stuttgart stammt.

Durch Quantum Brilliance schrumpft der Quantencomputer auf die Größe der heutigen Computerbeschleunigerkarten, was ein breites Anwendungsspektrum erschließt. Die Beispiele reichen vom Edge-Quantencomputing (z. B. im Bereich Satelliten, Krankenhäuser, Büros) bis zum parallelisierten Hybrid-Computing (z. B. Supercomputer). Dies ermöglicht Unternehmen und Forschenden, neue Anwendungen zu entdecken, die mit weniger Qubits und geringerer Latenz einen Quantenvorteil bieten.



Dr. Andrew Horsley

Co-founder and CEO
Quantum Brilliance
Canberra | ACT | AUS
Stuttgart | BW | DE
andrew.horsley@quantum-brilliance.com

Quantum Brilliance engagiert sich für den Aufbau der deutschen Diamant-Quantenindustrie und freut sich auf die enge Zusammenarbeit mit lokalen Industriepartnern und Forschungsinstituten zur gemeinsamen Entwicklung von neuem IP, was die lokalen Lieferketten stärken kann.

Quantum Brilliance is building room temperature quantum computers using nitrogen-vacancy centers in synthetic diamond, with the first units available for customers to host on-site in 2021. As most quantum computers requires cryogenics or complex laser systems to operate, Quantum Brilliance's approach greatly reduces the barriers to entry for, and energy consumption of, quantum computers. Quantum Brilliance, founded in 2019, is commercialising technology that originates from the Australian National University and the University of Stuttgart.

Quantum Brilliance's technology pathway shrinks quantum computers to the size of today's computer accelerator cards, which unlocks a wide range of applications. Examples range from edge quantum computing (e.g. satellites, hospitals, offices) to parallelised hybrid computing (e.g. supercomputers). This enables companies and researchers to discover new applications which deliver quantum advantage with fewer qubits and at a lower latency.

Quantum Brilliance is committed to helping build Germany's diamond quantum industry. Quantum Brilliance is looking forward to working closely with local industry partners and research institutes to co-develop new IP which can strengthen local supply chains.



MORE
INFO



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ARBEITS- WIRTSCHAFT UND ORGANISATION IAO

Beneficial use of quantum computers in the future

Das Fraunhofer IAO steht dem Fraunhofer IAF bei der koordinativen Führung des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg als Partner zur Seite. Themen wie Digitalisierung, zukunftsfähige IT-Lösungen, Künstliche Intelligenz sowie die zukunftsweisende Interaktion von Mensch und Technik bilden Forschungsschwerpunkte des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO – immer verbunden mit der Frage, wie Menschen in Zukunft leben und arbeiten.

Im Rahmen des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg untersuchen die Expertinnen und Experten des Fraunhofer IAO, wie Unternehmen Quantencomputer zukünftig nutzbringend anwenden können. Aktuell laufen in Stuttgart die Arbeiten für den Aufbau des Computer-Pools mit Zugang zum IBM-Quantencomputer in Ehningen. Ab 2021 soll es Forschungspartnern sowie Unternehmen ermöglicht werden, mit dem Quantencomputer zu arbeiten. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten befassen sich mit Softwarelösungen und der Programmierung von Quantencomputern sowie den damit verbundenen Algorithmen und Tools. Des Weiteren wird das Fraunhofer IAO Schulungsangebote und Demonstratoren für die Wirtschaft zur Verfügung stellen.

Fraunhofer IAO supports Fraunhofer IAF as a partner in the coordinative management of the Competence Center »Quantum Computing Baden-Württemberg«. Topics such as digitization, IT solutions of the future, artificial intelligence and future-oriented interaction of humans and technology are main research areas at the Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO – always linked to the question of how people will live and work in the future.



Fraunhofer IAO will provide access to the IBM quantum computer at the Center for Virtual Engineering ZVE.

Within the Competence Center »Quantum Computing Baden-Württemberg«, the experts at Fraunhofer IAO research how companies can utilize quantum computers in the future. Work is currently underway in Stuttgart to set up the computer pool with access to the IBM quantum computer in Ehningen. From 2021, research partners and companies will be able to work with the quantum computer. The research and development work targets software solutions and the programming of quantum computers as well as the involved algorithms and tools. Furthermore, Fraunhofer IAO will provide training sessions and demonstrators for industry.



MORE
INFO



Thomas Renner

Institute Director
Fraunhofer IAO

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart
thomas.renner@iao.fraunhofer.de



HIGH-TECH GRÜNDERFONDS

Seed investor for high-tech startups



Der High-Tech Gründerfonds (HTGF) investiert Risikokapital in junge Technologieunternehmen mit dem übergeordneten Ziel, die Bedingungen für Innovationen und ihre Umsetzung in marktfähige Technologien in Deutschland zu stärken. Mit fast 600 Investments hat der HTGF seit 2005 einen Beitrag geleistet, technologische Trends wie Cloud, Immunonkologie oder New Space unternehmerisch zu erschließen. Der HTGF misst der sogenannten zweiten Welle der Quantentechnologien ein sehr hohes Disruptionspotenzial bei. Neue Anwendungen werden durch die gezielte Steuerung der quantenmechanischen Zustände einzelner physikalischer Systeme ermöglicht. Der HTGF hat bislang drei Start-ups aus den Bereichen Quantencomputing, -simulation und -sensorik finanziert:

Die KIT-Ausgründung HQS Quantum Simulations simuliert Materialeigenschaften mithilfe von Quantencomputern. Eine geschickte Abbildung quantenchemischer Prozesse auf einem Quantencomputer sowie proprietäre Fehlerkorrekturalgorithmen ermöglichen es HQS, echte Kundenprobleme auf den fehlerbehafteten Quantencomputern »rechenbar« zu machen. Die kryogenfreie Kühlanlage von kiutra ist eine

Schlüsseltechnologie für Supraleiter- und Ionenfallen-basierende Quantencomputer im Tieftemperaturbereich. Schließlich ermöglichen die hochauflösenden Sensoren von Qnami eine – um Größenordnungen – höhere Sensitivität bei der Messung magnetischer Feldstärken. Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant finden in diesem Bereich besondere Anwendung.

The High-Tech Gründerfonds (HTGF) provides venture capital to young technology companies with the overall goal of strengthening the environment for innovations and their go-to-market in Germany. With almost 600 investments since 2005, HTGF has contributed to the development of technology trends such as the cloud, immuno-oncology and new space. HTGF considers the so-called second wave of quantum technologies to have very high disruptive potential. New applications are enabled by the targeted control and design of the quantum mechanical states of single physical systems. So far, HTGF has financed three start-ups in the fields of quantum computing, simulation and sensor technology:

The KIT spin-off HQS Quantum Simulations simulate material properties with the help of quantum computers. Skilful mapping of quantum chemical processes on a quantum computer as well as proprietary error correction algorithms enable HQS to make real customer problems »computable« on faulty quantum computers. kiutra's cryogen-free cooling system is a key technology for superconductor and trapped ion-based quantum computers in the low temperature range. Finally, the high-resolution sensors of Qnami enable a higher sensitivity – by several orders of magnitude – in the measurement of magnetic fields. Nitrogen-vacancy centers in diamond are particularly important used in this context.



Yann Fiebig

Senior Investment Manager
High-Tech Gründerfonds
Management GmbH
Schlegelstraße 2 | 53113 Bonn
y.fiebig@htgf.de



MORE
INFO



IBM

Leadership in quantum

Ähnlich wie in den 1940er Jahren, als die ersten raumgroßen Computer in Betrieb genommen wurden, ist das ganze Potenzial von Quantencomputern noch nicht abschätzbar. Die Technologie birgt theoretisch so viele Möglichkeiten, die wir aber erst erkennen, wenn wir beginnen, sie zu nutzen. IBM hat als erstes Unternehmen programmierbare Quantencomputer weltweit in die Cloud gebracht. Schon heute nutzen mehr als 100 Kunden, Regierungsorganisationen, Start-ups, Partner und Universitäten sie für mehr als eine Milliarde Rechenoperationen pro Tag.

Die Vereinbarung mit der Fraunhofer-Gesellschaft, das erste unserer Systeme außerhalb der USA in Deutschland zu installieren und der Organisation zur Verfügung zu stellen, eröffnet die Möglichkeit, die Technologie und entsprechende Kompetenzen in Deutschland und in ganz Europa weiterzuentwickeln. Im Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg werden wir gemeinsam Plattformen für Schulungen, Industrie-Workshops und Hackathons anbieten, um eine enge Zusammenarbeit und ein Ökosystem mit wissenschaftlichen, öffentlichen und privaten Institutionen zu schaffen.

Much like when the first room-sized computers were initially turned on in the 1940s, a quantum computer's true potential remains untapped. There's so much wonder and possibility surrounding the platform, but we will never truly know what quantum machines can do unless we use them. IBM was the first company in the world to bring programmable quantum computers into the cloud and has so far made their computing power available to more than 100 client, government, startup, partner, and university members who execute more than 1 billion hardware circuits per day.



An IBM Q System One as presented at CES 2020 where IBM announced the expansion of the IBM Q Network, which now includes over 100 organizations, across multiple industries.

The agreement with the Fraunhofer-Gesellschaft to install the first of our quantum systems outside the USA in Germany and make it available to the organization opens up the opportunity to further develop the technology and skills here in Germany and across Europe. At the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg we will jointly offer platforms for training, industry workshops and hackathons to create a close cooperation and ecosystem with scientific, public and private institutions.



MORE
INFO



Dr. Heike Riel

IBM Fellow, Head Science & Technology,
Lead IBM Research Quantum Europe
IBM Research
Säumerstrasse 4 | 8803 Rüschlikon, CH
hei@zurich.ibm.com



IMPERIAL COLLEGE LONDON

Our QuEST for quantum advantages



Das Imperial College London beherbergt das Interdisziplinäre Zentrum für Quantenmechanik, -wissenschaft und -technologie (QuEST) mit rund 100 Wissenschaftlern und Forschern, die gemeinsam mit Studierenden an verschiedenen Aspekten der Quantenforschung arbeiten. Das Forschungsinteresse des Zentrums reicht von Quantencomputing und Simulationen über Quantensensorik bis hin zu fundamentaler Quantenmechanik.

Auf dem Gebiet der Quantenalgorithmen und -simulationen untersuchen wir minimale Anforderungen zum Nachweis des Quantenvorteils mit etwa < 100 Qubits und unvollkommenen Gateoperationen. Wir entwickeln Technologien, die auf Basis von verrauschten, experimentellen Daten zu einer schnellen Konvergenz hin zu einer optimalen Steuerung führen. Bei unserer Forschung zum Quantencomputing auf Photonenbasis konzentrieren wir uns auf korrelierte nicht-klassische Zustände in verlustarmen Schaltungen, insbesondere bei integrierter Photonik, die eine ideale Plattform für die Realisierung von Anwendungen im universellen fehlertoleranten

Quantencomputing und in der analogen Quantensimulation bieten würden. Wir erforschen auch Festkörpertechnologien für Quantencomputing mit kavitätsgekoppelter Elektronik und atomaren Spin-Zuständen, die sich in Defekten in Diamant und Siliziumkarbid sowie in mit Licht angeregten molekularen Spinzuständen finden. Darüber hinaus arbeiten wir an Quantenphänomenen in molekularen Dünnschichten.

Imperial College London hosts an interdisciplinary center for quantum engineering, science and technology (QuEST) where about 100 members of academic and research staff work with students on various aspects of quantum technology and science. The research interest of the Center range from quantum computing and simulations to quantum sensors as well as fundamental issues of quantum mechanics.

In the field of quantum algorithms and simulations, we study the minimal requirements for demonstrating quantum advantages using around < 100 qubits and imperfect gate operations. We develop control techniques that will result in rapid convergence towards optimal control based on noisy experimental data. Our photonic quantum computation research focuses on large correlated non-classical states in low-loss circuitry, especially in integrated photonics, which would provide an ideal platform for realizing applications in universal fault-tolerant quantum computing and analogue quantum simulation. We also study solid-state quantum computing with cavity-coupled electronic and nuclear spin states, found in impurity defects in diamond and silicon carbide as well as photo-excited molecular spin states. Furthermore, we work on quantum phenomena in molecular thin films.



Prof. Myungshik Kim

Chair in Theoretical Quantum Information Science, Director of QuEST
Imperial College London
South Kensington Campus
London SW7 2AZ, UK
m.kim@imperial.ac.uk



MORE
INFO



IQM

We build quantum computers

Haben Sie sich je die Frage gestellt, wer einen Quantencomputer für Sie bauen könnte? IQM ist der führende europäische Anbieter von supraleitenden Quantencomputern mit Niederlassungen in Finnland und Deutschland. Gemeinsam mit seinen Kunden entwickelt IQM einzigartige Methoden für das Design von anwendungsspezifischen Quantenprozessoren. Die Palette der Anwendungsfälle reicht von einer effizienteren Entdeckung von medizinischen Wirkstoffen bis hin zur Entwicklung von ressourcenschonenden Materialien, intelligenten Systemen und nachhaltigen Industrieverfahren.

Durch die Kombination von Hardware- und Softwaredesign bei der Entwicklung von Quantenprozessoren kann IQM seinen Kunden anwendungsspezifische Rechenkapazitäten bereitstellen. Die Stärke des Co-Design-Ansatzes setzt auf eine effizientere Implementierung von Quantenalgorithmen in spezifisch zugeschnittener Hardware. Durch diesen Vorteil kann der Quantencomputer eine effektiv höhere Rechenleistung mit einer vergleichbaren Anzahl an Qubits erreichen. Man kann also komplexere Probleme effizienter lösen, weil Hard- und Software speziell aufeinander abgestimmt sind. IQM strebt an, mit diesem Co-Design-Ansatz einen Quantenvorteil zu erreichen.

Have you ever wondered who could build a quantum computer for you? IQM is the leading European supplier of superconducting quantum computers with offices in Finland and Germany. Together with its customers IQM develops unique methods for the design of application specific quantum processors. The range of application cases extends



IQM's quantum computer design

from more efficient discovery of medical agents to the development of resource-saving materials, intelligent systems and sustainable industrial processes.

By combining hardware and software design in the development of quantum processors, IQM can provide its customers with application-specific computing capacities. The strength of the co-design approach focuses on a more efficient implementation of quantum algorithms in specifically tailored hardware. This advantage enables the quantum computer to effectively achieve higher computing power with a comparable number of qubits. Thus, more complex problems can be solved more efficiently because hardware and software are specifically tailored to each other. IQM aims to achieve a quantum advantage with this co-design approach.



MORE
INFO

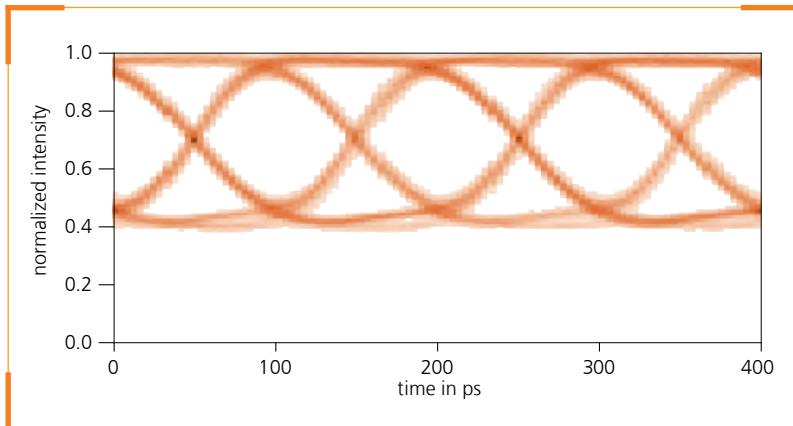


Dr. Jan Goetz
CEO and Co-founder
IQM Quantum Computers
Nymphenburgerstr. 86 | 80636 München
info@meetiqm.com



SWABIAN INSTRUMENTS

The new standard in time-correlated single-photon counting



Eye diagram of a commercial 10 GHz SFP optical transceiver measured with a single-photon random sampling technique using a high resolution single photon detector and a low jitter time-to-digital converter.

Die Detektion einzelner Photonen mit höchster Präzision ist die Grundlage vielfältiger Anwendungen in der Quantentechnologie. Ultra-schnelle optische Messtechnologie wird nicht nur die Kommerzialisierung von Quantentechnologien, sondern auch zentrale Innovationen in der optischen Datenkommunikation maßgeblich vorantreiben. Sie wird ein Schlüsselement sein, um zukünftige Generationen aktiver elektrooptischer Bauteile zu entwickeln, die Frequenzen von mindestens 200 GHz erreichen. Jüngste Erfolge bei der

Entwicklung supraleitender Detektoren rücken optische Messungen in der »THz-Lücke« zwischen etwa 100 GHz und 1 THz in greifbare Nähe. Dafür entwickeln wir schnelle Time-to-Digital-Konverter als integrierte Schaltungen in modernster Siliziumtechnologie. Wir integrieren diese zusammen mit den schnellsten heute verfügbaren supraleitenden Einzelphotonendetektoren in ein marktreifes Messsystem. Mit einer anvisierten Zeitauflösung von 300 Femtosekunden sind wir Wegbereiter für die photonische Quantentechnologie und breitbandige optische Messtechnik von morgen.

The detection of single photons with the highest precision is the basis for many applications of quantum technology. Ultra-fast optical measurement technology will drive not only the commercialization of quantum technologies, but also key innovations in optical data communication. It will be a key element in the development of future generations of active electro-optic components that will reach frequencies of at least 200 GHz. The latest successes in the development of superconducting detectors bring optical measurements in the »THz gap« between 100 GHz and 1 THz within reach. To this end, we develop fast time-to-digital converters as integrated circuits using the latest silicon technology. We integrate these with the fastest superconducting single photon detectors available today in a market-ready measurement system. With a targeted timing resolution of 300 femtoseconds, we are pioneering the photonic quantum technology and broadband optical measurement technology of tomorrow.



Dr. Helmut Fedder

CEO

Swabian Instruments GmbH

Stammheimer Str. 41 | 70435 Stuttgart

helmut@swabianinstruments.com



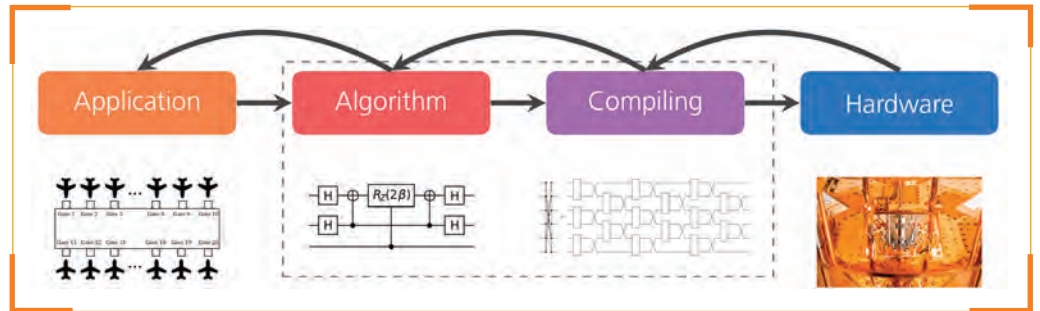
MORE
INFO



DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR)

Quantum algorithms for near-term quantum computers

*Hardware software co-design:
We design quantum algorithms
and quantum hardware together
in order to demonstrate quantum
advantage.*



Die Entwicklung von Quantencomputern hat in den letzten Jahren erstaunliche Fortschritte gemacht. Die gegenwärtigen Maschinen und solche, die es in naher Zukunft geben wird, sind noch nicht für Quantenalgorithmen geeignet, die eine Quantenfehlerkorrektur benötigen. Es gibt jedoch Kandidaten für Quantenalgorithmen, die auf diesen Quantencomputern implementiert werden können und das Potenzial haben, klassische Algorithmen zu übertreffen. Dazu zählen z. B. variationelle Quantenalgorithmen wie der »Quantum Approximate Optimization Algorithm« (QAOA), der kombinatorische Optimierungsprobleme lösen kann, wie sie bei der Planung von Satellitenmissionen oder der optimalen Verkehrsführung auftreten. Die Arbeitsgruppe Quantencomputing des DLR untersucht und entwickelt solche Algorithmen, insbesondere für Anwendungen der kombinatorischen Optimierung, des maschinellen Lernens und der Quantensimulation. Der Fokus liegt dabei auf Luft- und Raumfahrtanwendungen. Darüber hinaus entwickelt die Gruppe Strategien zur Abbildung von Quantenalgorithmen auf Quantencomputern unter Berücksichtigung der signifikanten Hardware-Einschränkungen (Kompilierung). In diesem Zusammenhang ist die Gruppe bestrebt, in einem Hardware-Software-Codesign-Prozess eng mit Hardwareentwicklern zusammenzuarbeiten, und entwickelt Hardware-nahe Softwareschichten für optimale Performanz.

In recent years, various quantum computing devices have become available. At the present time and in the near future these devices are not yet amendable for quantum algorithms which require quantum error correction. However, there are candidates for quantum algorithms that can be implemented on these near-term quantum computers and may outperform classical computers. Prominent examples are variational quantum algorithms such as the Quantum Approximate Optimization Algorithm, which solves combinatorial optimization problems as they occur in satellite mission planning or optimal traffic management. The DLR quantum computing group investigates and develops such algorithms, in particular for applications exploiting combinatorial optimization, machine learning and quantum simulation. The application focus is on aerospace problems. Moreover, the group develops strategies for mapping quantum algorithms onto near-term quantum computers while obeying severe hardware constraints (quantum compiling). In this context, the group aims to collaborate closely with hardware developers in a hardware-/software co-design process and develops close-to-hardware software layers for optimal performance.

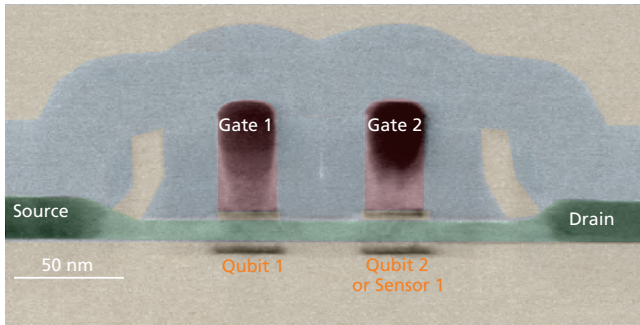
Dr. Tobias Stollenwerk

Leiter der Arbeitsgruppe Quantencomputing
Abteilung High-Performance Computing,
Institut für Softwaretechnologie,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Linder Höhe | 51147 Köln
tobias.stollenwerk@dlr.de



MORE
INFO





TEM picture of elementary building blocks derived from CMOS technology used for qubits characterization – 2 qubits or 1 qubit / 1 sensor.

Das CEA ist ein wichtiger Akteur in der Forschung, der verschiedene Institute und Abteilungen unter einem Dach vereint, und betreibt seit vielen Jahren Grundlagen- und Technologieforschung in den Bereichen Quanteninformation, Quantenphysik und Materialien. Dazu gehören supraleitende Quantenbits, Kernspin-Qubits und CMOS-Qubits. CEA hat bei der Vorbereitung von Anwendungen für das Quantencomputing Pionierarbeit geleistet und 2018 eine »ATOS Quantum Learning Machine« am TGCC-CCRT, einem öffentlich-privaten Rechenzentrum, das auch von 20 Industriepartnern genutzt wird, in Betrieb genommen.

Die CEA-Teams forschen auch in Bereichen, die komplementär und wesentlich für die Entstehung von Quantencomputertechnologien sind: kryogene Elektronik, kontrollierte Nano-Implantation von Ionen in Materialien, Quellen für verschränkte Mikrowellenphotonen und technologische Bausteine, die die Verwendung von Photonen und Elektronen als Quantensysteme ermöglichen (lichtemittierende Quellen

mit einzelnen organischen Molekülen, spintronische Bauelemente im Quantenregime).

Das CEA ist stolz auf viele internationale Kooperationen, insbesondere mit einer Reihe von deutschen Organisationen wie Fraunhofer-Instituten, Max-Planck-Instituten und Mitgliedern der Helmholtz-Organisation.

CEA is a key player in research uniting different institutes and divisions under one roof and has been doing fundamental and technological research on quantum information, quantum physics and materials for many years. This includes superconducting quantum bits, nuclear spin qubits, and CMOS qubits. CEA has also pioneered the preparation of quantum computing applications, in 2018 deploying an ATOS Quantum Learning Machine at CEA's TGCC-CCRT, a public-private computing center used by 20 industrial partners.

CEA teams are also pursuing research in fields complementary and essential to the emergence of quantum computer technologies and quantum engineering: cryogenic electronics, controlled nano-implantation of ions in materials, sources of entangled microwave photons and technological bricks allowing the use of photons and electrons as quantum systems (light emitting sources with single organic molecules, spintronic devices in the quantum regime).

CEA is proud of its many international collaborations on quantum information and technologies, in particular with a number of German organisations such as Fraunhofer Institutes, Max-Planck Institutes and members of the Helmholtz organisation.



Dr. Jean-Philippe Nominé
HPC Strategic Collaborations
Manager CEA DIF
25 rue Leblanc | 75015 Paris, FRA
jean-philippe.nomine@cea.fr



MORE
INFO

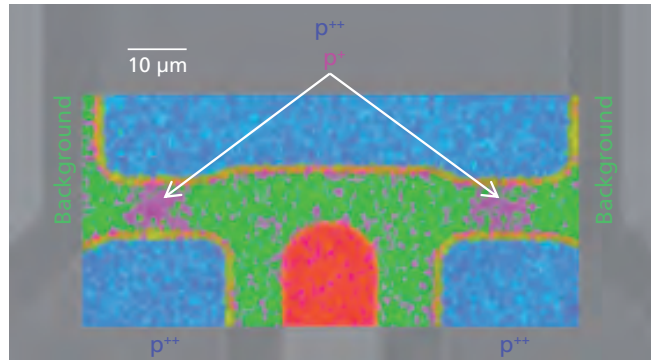


CiS-ANALYTIK-KOMPETENZZENTRUM (CAK)

Modern analysis of semiconductor materials

Moderne Forschung und neue Entwicklungen in technologischen Bereichen der Mikroelektronik, Mikrosensorik oder den Quantentechnologien erfordern den zielgerichteten Umgang mit bestehenden mikrotechnologischen Prozessen und Technologien. Dies umfasst auch die Untersuchung neuer Verfahren und Materialien. Hierbei geben prozessbegleitende Analysen notwendige Einblicke in die Materialsysteme, unterstützen das multiphysikalische Technologieverständnis sowie Simulationen und machen Fehleranalysen und dadurch Qualitätssicherung erst möglich. Hierfür sind Messmethoden wie REM, FIB, (Tiefemperatur-)FTIR, (TT-)PL, RAMAN und 3D-Mikroskopie verfügbar. Bildgebende Methoden und 3D-Analysen von Dotierungen und Verunreinigungen sind dabei besonders wertvoll. Solche werden z. B. durch orts aufgelöste RAMAN-Analysen ermöglicht oder durch SIMS-Messungen, mithilfe derer Dotierprofile mit feiner Masse-/Ladungstrennung in Halbleitermaterialsystemen wie Silizium und Diamant charakterisiert werden. Sämtliche benannten Analysemethoden werden durch das CiS-Analytik-Kompetenzzentrum (CAK) bereitgestellt, einem technologischen Kompetenzbereich in der CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH. CiS ist eine gemeinnützige, wirtschaftsnahe Forschungseinrichtung auf den Gebieten der Mikrosensorik, Mikrosystemtechnik und Silizium-Detektoren.

Modern research and new developments in technological areas of microelectronics, microsensors and quantum technologies require the targeted handling of existing microtechnological processes and technologies. This also includes the investigation of new processes and materials. Here, in-process analyses provide necessary insights into the material systems, support the multiphysical understanding of technology and simulations and make error analyses and thus quality assurance possible in the first place. Measuring methods such as SEM, FIB, (low temperature) FTIR, (LT)



Raman-analysis of a silicon MEMS structure featuring differently doped areas, which can be distinguished by optical microscopy (underlying greyscale). 2D-Raman measurements (pixels: 80x40) and data analysis reaching a similar conclusion (overlying false color image): Identically colored areas feature an identical Raman signature correlated with the different doping levels (e.g. Connection: $[B]=1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, Piezo: $[B]=1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

PL, RAMAN, 3D microscopy are available for this purpose. Imaging methods and 3D analyses of dopants and impurities are especially valuable. These are made possible e.g. through spatially resolved RAMAN analysis or SIMS measurements, which are used to characterize doping profiles with fine mass/charge separation in semiconductor material systems such as silicon and diamond. All of the analytical methods mentioned above are provided by the CiS Analytics Competence Centre (CAK), a technological competence area within the CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH. CiS is a nonprofit, business-oriented research institution in the fields of microsensors, microsystems technology and silicon detectors.



MORE
INFO



Prof. Dr. Thomas Ortlepp

CiS Forschungsinstitut für
Mikrosensorik GmbH
Konrad-Zuse-Str. 14 | 99099 Erfurt
info@cismst.de



QUANTENSENSORIK

Quantum sensing



” Für High-Tech-Unternehmen ist es essentiell, technische Entwicklungen vorherzusagen. Die nächste Revolution wird sich auf dem Gebiet der Quantentechnologie abspielen. Insbesondere Quantensensoren werden innerhalb von fünf Jahren zu bahnbrechenden Neuerungen in so unterschiedlichen Bereichen wie dem Verkehrswesen, der Energie-, Sicherheits- und Medizintechnik oder auch der Seismographie führen. Um unser Wissen auf diesem Gebiet auszubauen, setzen wir auf ein Kooperationsnetzwerk führender Forschungseinrichtungen Europas. Die technologischen Fähigkeiten des Fraunhofer IAF stellen dabei ein Schlüsselement dar.

It is essential that high-tech companies are able to predict technical developments. The next revolution will take place in the field of quantum technology. Within five years, quantum sensors in particular will lead to groundbreaking innovations in fields as diverse as transportation, energy, security, medical technology and seismography. In order to expand our knowledge in this field, we rely on a collaborative network of leading research institutions in Europe. The technological expertise of Fraunhofer IAF is a key factor in this context.

Dr. Thierry Debuisschert | Thales Research & Technology

- 58 IM GESPRÄCH ZUR QUANTENSENSORIK**
A conversation about quantum sensing
- 62 UNSERE KOMPETENZEN IM BEREICH QUANTENSENSORIK**
Our expertise in quantum sensing
- 66 QUANTENMAGNETOMETRIE FÜR DIE MIKRO- UND NANOELEKTRONIK**
Quantum magnetometry for micro- and nanoelectronics
- 70 DIAMANT-HYPERPOLARISATION FÜR EINE VERBESSERTE QUANTENSENSORIK**
Quantum-enhanced sensing: diamond hyperpolarization
- 74 CHARAKTERISIERUNG VON DIAMANT FÜR DIE LASERSCHWELLENMAGNETOMETRIE**
Characterization of diamond for laser threshold magnetometry
- 78 QUANTENSENSORIK ZUR HOCHFREQUENZ-SIGNALAUFLÄRUNG**
Quantum sensors for high frequency signal reconnaissance
- 82 APPLIKATIONS LABOR QUANTENSENSORIK**
Application laboratory quantum sensing
- 87 STARKE VERNETZUNG – UNSERE PARTNER**
Strong networks – our partners

IM GESPRÄCH ZUR QUANTENSENSORIK

A conversation about quantum sensing

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup, Professor am Physikalischen Institut der Universität Stuttgart und Fellow am Max-Planck-Institut für Festkörperphysik, war schon immer fasziniert von physikalischen Fragestellungen, deren Ergebnis sich sehr genau berechnen und mit Theorien vergleichen lässt. Heute ist er einer der meistzitierten Wissenschaftler (HCR) in der Physik, u. a. aufgrund seiner Forschungen über Diamant-Quantensensoren. In diesem Interview spricht er mit Dr. Xavier Vidal, Wissenschaftler am Fraunhofer IAF.

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup, Professor at the Institute of Physics at the University of Stuttgart and Fellow at the Max Planck Institute for Solid State Physics, has always been fascinated by physical questions whose outcome can be calculated with great accuracy and compared with theories. Today, he is one of the most frequently cited scientists (HCR) in physics, among other things due to his research on diamond quantum sensors. In this interview he talks to Dr. Xavier Vidal, scientist at Fraunhofer IAF.

WIE BEEINFLUSSEN QUANTENSSENSOREN BEREITS HEUTE UNSER LEBEN?

Wrachtrup — Gaszellenmagnetometer, die seit 15 Jahren in der Entwicklung sind, revolutionieren gerade die Neurowissenschaften. Sie ermöglichen einen vollkommen neuen Zugang zu neurologischen Untersuchungen, insbesondere unseres Gehirns, und werden zu einer dramatischen Verbreitung dieser Technik führen. Bisher waren solche Untersuchungen nur in wenigen europäischen Zentren möglich, aber plötzlich sind wir auf dem Weg, dass sie praktisch jeder Hausarzt machen kann.

Vidal — Ein weiteres Beispiel ist die Kernspinresonanz (NMR) und ihr bildgebendes Äquivalent, die Magnetresonanztomographie (MRT). MRT-Scanner sind in Krankenhäusern ein gängiges Gerät. Indem sie die Quanteneigenschaften der Protonen des menschlichen Körpers abfragen, können MRTs ein 3D-Bild der inneren Weichkörpergewebe und Organe machen. Ich stelle mir vor, dass Diamant-basierte NMR-Sensoren bald ähnliche Ergebnisse aus nur einem Tropfen einer menschlichen Flüssigkeit oder einem kleinen Stück Gewebe mit hoher Auflösung liefern werden.

HOW IS QUANTUM SENSING ALREADY INFLUENCING OUR LIVES TODAY?

Wrachtrup — Gas cell magnetometers, which have been in development for 15 years, are currently revolutionizing the neurosciences. They enable a completely new approach to neurological examinations, especially of the brain, and will lead to a dramatic spread of this technology. Until now, such examinations have only been possible in a few European centers, but suddenly we are on the way to making them available to practically every family doctor.

Vidal — Another example is nuclear magnetic resonance (NMR) and its imaging equivalent magnetic resonance imaging (MRI). MRI scanners are a common piece of equipment in hospitals. By interrogating the quantum properties of the human body's protons, MRIs can reproduce a 3D image of the inner soft body tissues and organs. I envisage that diamond-based NMR sensors will soon produce similar high-resolution results from just a drop of body fluid or a small piece of tissue.



Dr. Xavier Vidal (links) und Prof. Dr. Jörg Wrachtrup (rechts)

Dr. Xavier Vidal (left) und Prof. Dr. Jörg Wrachtrup (right)

IST DIE QUANTENSENSORIK AUCH DIE QUANTENTECHNOLOGIE, DIE AM NÄCHSTEN AN DER ANWENDUNG IST?

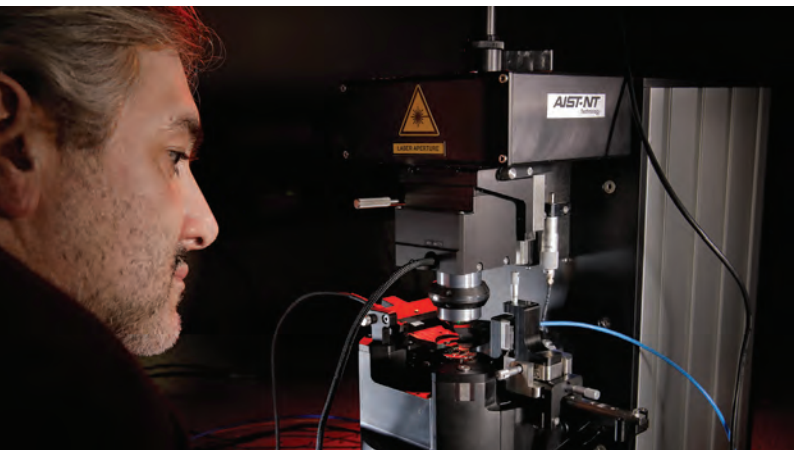
Wrachtrup — Ich würde sagen, die Quantensensorik ist einen Lebenszyklus weiter als das Quantencomputing. Es gibt bereits Start-ups und kleine Unternehmen, die Quantensensoren anbieten. Das ist natürlich noch kein Massenmarkt. Einfache Quantensensoren sind schon in der Anwendung; bei komplexeren Fragestellungen wird sich in den nächsten Jahren herausstellen, ob sie genauso erfolgreich werden und man damit marktaugliche Magnetometer, wie sie heute in Handys und Computern verbaut werden, ersetzen und verbessern kann.

Vidal — Am Fraunhofer IAF erforschen wir Quantensensorik zum Nachweis von Magnetfeldern und Mikrowellenquellen, die in so unterschiedlichen Bereichen wie Nano- und Mikroelektronik, Chemie, Medizin, Materialwissenschaft und Navigation genutzt werden. Die Detektion von Magnetfeldern, Gravimetrie oder Trägheitsnavigation sind weitere marktnahe Anwendungen Diamant-basierter Sensoren. Wer weiß, vielleicht brauchen wir sie irgendwann auch in unseren Handys, wenn wir den Weltraum erkunden wollen.

IS QUANTUM SENSING THE CLOSEST QUANTUM TECHNOLOGY TO APPLICATION?

Wrachtrup — I'd say that quantum sensor technology is one life cycle ahead of quantum computing. Start-ups and small companies are already offering quantum sensors. Of course, this is not yet a mass market. Simple quantum sensors are already in use; for more complex problems, it will become clear in the next few years whether they will be just as successful and whether it will be possible to replace and improve marketable magnetometers such as those currently installed in cell phones and computers.

Vidal — At Fraunhofer IAF, we are currently researching the use of quantum sensing to detect magnetic fields and microwave sources applied in fields as diverse as nano- and micro-electronics, chemistry, medicine, material science, and navigation. Other applications for diamond-based sensors that are close to the market include detection of magnetic fields, gravimetry, and inertial navigation. Who knows, we might need them in our cell phones when we head off to explore space some time.



Dr. Xavier Vidal erforscht Diamant-Quantensensoren
Dr. Xavier Vidal researches diamond quantum sensors

WIE KÖNNEN FRAUNHOFER, START-UPS UND UNTERNEHMEN ZUSAMMENARBEITEN, UM QUANTENSENSOREN ZUM ERFOLG ZU FÜHREN?

Wrachtrup — Meine persönliche Erfahrung ist, dass große Unternehmen, die das Potenzial besitzen, die Quantensensorik in den Markt zu bringen, einen sehr spezifischen Marktansatz haben. Sie wollen den Massenmarkt beliefern. Das bringt natürlich einen gewissen Kostendruck mit sich. Für die Quantentechnologie ist das schwierig, weil zu Beginn der Use Case den Preis nicht rechtfertigt. Kleine Unternehmen und Start-ups können flexibler auf Nischenmärkten agieren. Und wenn sie dranbleiben, können sie einen Technologiewandel anstoßen, von dem am Ende auch Großunternehmen profitieren.

Vidal — Da verbinden Fraunhofer-Institute beide Welten perfekt. Wir sind in der günstigen Position, gleichzeitig Entwicklungen vorantreiben und große Unternehmen davon überzeugen zu können, dass die anfänglichen Kosten später belohnt werden. Außerdem öffnen wir jenen Unternehmen die Tür, die die Möglichkeiten der Quantentechnologien schon in sehr frühen Forschungsstadien ausloten wollen.

HOW CAN FRAUNHOFER, START-UPS AND COMPANIES WORK TOGETHER TO MAKE QUANTUM SENSORS SUCCESSFUL?

Wrachtrup — My personal experience is that large companies that have the potential to bring technologies like quantum sensing to market often have a very specific market approach. They want to supply the mass market and that naturally brings with it a certain cost pressure. This is difficult for quantum technology because at the beginning the use case does not justify the price. Small companies and start-ups can operate more flexibly in niche markets. If they keep at it, they can succeed in initiating a technological change from which, in the end, large companies will also benefit.

Vidal — In this respect, Fraunhofer Institutes are perfect to connect both worlds. We have a unique position to drive forward developments and convince large companies that initial costs will reap rewards later. But Fraunhofer Institutes also open the door for companies that want to explore the potential of quantum technologies at very early stages of research.

HOW IMPORTANT IS INTER-DISCIPLINARY COLLABORATION IN THIS REGARD?

Vidal — It is absolutely essential. There is no project that we are participating in or planning right now that does not require collaboration between different fields and expertise to succeed.

Wrachtrup — To give you an example: The development of gas cell magnetometers took 15 years because there was only one group dedicated to it. We have learned from this that you have to include several levels of development from the very beginning. You have to get application-oriented stakeholders like Fraunhofer and the engineering sciences excited about developments right from the start.

WIE WICHTIG IST DENN INTER-DISZIPLINÄRE KOOPERATION?

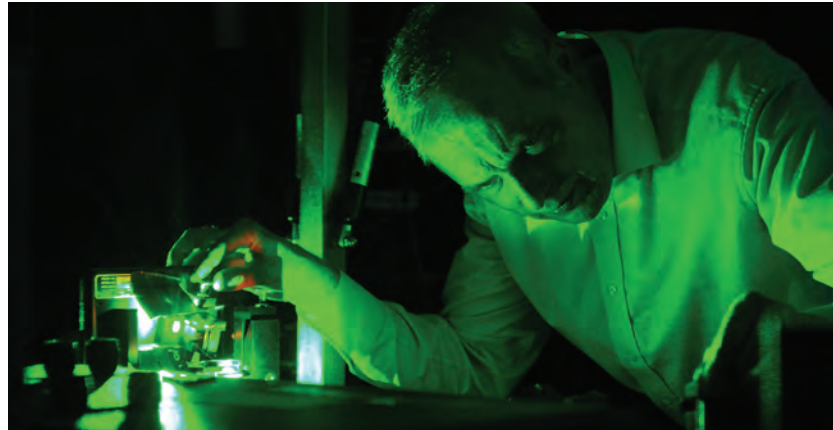
Vidal — Kooperationen sind absolut unerlässlich. Es gibt bei uns kein einziges Projekt, das ohne die Zusammenarbeit verschiedener Bereiche und Fachkenntnisse erfolgreich ist.

Wrachtrup — Ein Beispiel: Die Entwicklung der Gaszellenmagnetometer dauerte 15 Jahre, weil nur eine einzige Gruppe daran arbeitete. Daraus haben wir gelernt, dass man von vornherein anwendungsorientierte Akteure wie Fraunhofer und die Ingenieurwissenschaften miteinbeziehen und begeistern muss.

WAS BRINGT DIE ZUKUNFT DER QUANTENSENSORIK?

Wrachtrup — Ich weiß noch, als ich vor 20 Jahren die ersten Paper gelesen habe und dachte, das sind doch alles Träumereien. Die Anforderungen an solche Systeme sind so hoch, dass sich niemand vorstellen konnte, dass man irgendwann die Technologie dafür beherrschen würde. Und doch existieren heute die ersten funktionierenden Quantensysteme. Deshalb halte ich es für äußerst wichtig, die Quantensensorik weiter zu verfolgen. Ich sage es mal im Geiste Einsteins, der ja auch ein Nonkonformist war: Das wahre Potenzial einer Idee zeigt sich erst mit der Zeit.

Vidal — Ich glaube, dass Quantensensoren in naher Zukunft, in 10 oder 20 Jahren, für uns ganz alltäglich sein werden. Sie sind die Grundlage einer neuen technologischen Revolution und stehen hinter einer faszinierenden neuen Vielfalt von Technologien und Anwendungen. Mit anderen Worten: Uns steht eine aufregende neue Herausforderung bevor, eine Art neue industrielle Revolution.



Prof. Dr. Wrachtrup wollte schon als Kind Wissenschaftler werden
Prof. Dr. Wrachtrup always knew he wanted to be a scientist

WHAT DOES THE FUTURE HOLD FOR QUANTUM SENSORS?

Wrachtrup — I remember when I read the first papers 20 years ago and thought that they were all dreams. The demands placed on such systems were so high that nobody could imagine that one day it would be possible to master this technology. And yet today the first functioning quantum systems exist. Therefore, I believe it is extremely important to pursue quantum sensing. To put it in as Einstein, who was also a nonconformist, would have done – the true potential of an idea only becomes apparent over time.

Vidal — I imagine that quantum sensors will be common tools in our everyday life in the near future, in 10 or 20 years. They are the basis of a new revolution in quantum technologies and underlie a fascinating new range of technologies and applications to come. In other words, quantum sensing might be applied to myriad of fields and it is exciting to realize that many opportunities are in the pipeline.



READ THE FULL
INTERVIEW

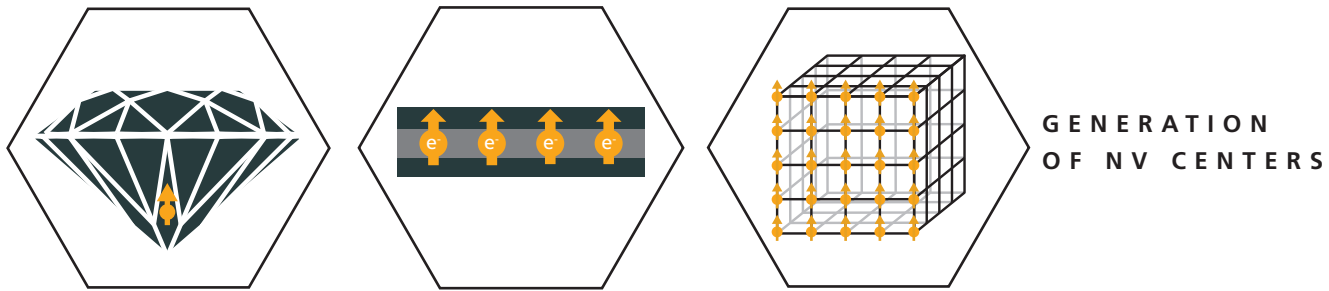


UNSERE KOMPETENZEN IM BEREICH QUANTENSENSORIK

Our expertise in quantum sensing

Quantensensoren erreichen in der Kombination von räumlicher Auflösung und Empfindlichkeit herausragende Eigenschaften. Verschiedene Sensorprinzipien lassen sich miteinander kombinieren und erlauben sehr kompakte Bauformen bis hin zum vollständigen System. Am Fraunhofer IAF entwickeln wir Quantensensoren auf Basis des Materials Diamant, die magnetische und elektrische Felder mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Nanometern bis hin zu einzelnen Elektronen- und Kernspins nachweisen können. Aufgrund seiner herausragenden physikalischen Eigenschaften funktionieren Diamant-Quantensensoren bei Raumtemperatur – ideal für industrielle Anwendungen.

Quantum sensors achieve outstanding properties in the combination of spatial resolution and sensitivity. Different sensor principles can be combined and allow for highly compact designs, up to and including complete systems. At Fraunhofer IAF, we develop quantum sensors based on diamond, which can detect magnetic and electric fields with a spatial resolution of a few nanometers down to single electron and nuclear spins. Diamond's outstanding physical properties mean that diamond quantum sensors function at room temperature – which is ideal for industrial applications.



Das Fraunhofer IAF verfügt über langjährige Expertise im Bereich der Herstellung von Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant für die Quantensensorik

Fraunhofer IAF has many years of expertise in the production of nitrogen vacancy (NV) centers in diamond for quantum sensing

Das Fraunhofer IAF nutzt für die Quantensensorik die langjährige Expertise in der Erzeugung von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant: Diese entstehen, wenn zwei benachbarte Kohlenstoff-Atome entfernt werden und eines durch ein Stickstoffatom ersetzt wird. In die Leerstelle fällt das überschüssige Elektron des Stickstoffatoms hinein. Dieses Elektron besitzt ein magnetisches Moment, welches nach seiner Orientierung als Tastmagnet genutzt werden kann – sogar bei Raumtemperatur.

Dabei umfasst unser Know-how die gezielte Erzeugung von NV-Zentren in verschiedenen Dimensionen:

- Erzeugung eines einzelnen NV-Zentrums für die Quantenmagnetometrie (Rastersondenmikroskop) und für Einzelphotonenquellen
- Erzeugung von 2D-flächigen NV-Zentren in Diamant für die Hyperpolarisation
- Erzeugung von 3D-Volumenflächen mit NV-Zentren für die hochempfindliche Laserschwellenmagnetometrie

Auf den nächsten Seiten zeigen wir Ihnen einige Anwendungsbeispiele.

In the field of quantum sensing, Fraunhofer IAF uses its many years of expertise in the generation of nitrogen vacancy (NV) centers in diamond: These NV centers are created when two adjacent carbon atoms in the diamond lattice are removed and one of them is replaced by a nitrogen atom. The excess electron from the nitrogen atom falls into the void. This electron has a magnetic moment which, once it has been oriented, can be used as a magnet – even at room temperature.

Our know-how includes the generation of NV centers in three dimensions:

- *Generation of a single NV center for quantum magnetometry (scanning probe microscope) and for single photon sources*
- *Creation of 2D NV centers in diamond for hyperpolarization*
- *Generation of 3D volume areas with NV centers for highly sensitive laser threshold magnetometry*

The pages below provide some examples of how the technology is applied.

SENSING PRINCIPLE	SENSITIVITY	SPATIAL RESOLUTION	APPLICATION	TECHNOLOGY READINESS LEVEL
Scanning Probe Magnetometer	low (10^{-9} T)	high (10^{-7} m)	Electronics, Navigation	6
Laser Threshold Magnetometer (theoretical values)	low (10^{-15} T)	low (10^{-3} m)	Medical Diagnostics	4

Am Fraunhofer IAF erforschte Messprinzipien der Quantensensorik sowie ihre Eigenschaften bei Empfindlichkeit bzw. Ortsauflösung und die damit verknüpften idealen Anwendungsgebiete

Different quantum sensing measuring principles and their properties regarding sensitivity and spatial resolution, and, linked with that, ideal fields of application

RASTERSONDEN - QUANTEN - MAGNETOMETRIE

Am Fraunhofer IAF entwickeln wir Diamant mit einem einzelnen Stickstoff-Vakanz-Zentrum für die hochauflösende Rastersonden-Quantenmagnetometrie. Damit bietet sich erstmals die Möglichkeit, auf atomarer Ebene abbildende Magnetfeldverteilungen zu messen, die mit zuvor verfügbaren Verfahren nicht zugänglich sind. Es lassen sich z. B. die Stromflüsse von mikro- und nanoelektronischen Schaltungen hochauflösend darstellen, was für die Fehleranalyse von großem Nutzen ist. Außerdem können solche Quantensensoren für GPS-unabhängige Navigation genutzt werden, was beispielsweise Anwendungen für das autonome Fahren erschließt.

Für die Herstellung von Diamant-Magnetometerspitzen kann das Fraunhofer IAF auf eine exzellente Reinrauminfrastruktur zurückgreifen, die halbindustrielle Herstellungsprozesse erlaubt. Neben hochmodernen Lithographietools wurde in der trockenchemischen Strukturierung von poly- und einkristallinem Diamant ein vertieftes Know-how aufgebaut. In den letzten Jahren konzentrierte sich die Entwicklung am IAF zunehmend auf die Homoepitaxie von extrem reinem Diamant inklusive isotonenreiner ^{12}C -Diamantschichten sowie die p- und n-Dotierung von Diamant. Im Bereich NV-Zentren in Diamant wurden die Technologie zur gezielten Erzeugung dieser Zentren an definierten Stellen in Diamantspitzen

SCANNING PROBE QUANTUM MAGNETOMETRY

At Fraunhofer IAF we are developing diamond with a single nitrogen vacancy center in the tip for high-resolution scanning probe quantum magnetometry. For the first time, it is now possible to measure magnetic field distributions at the atomic level, which has not been possible with previous methods. The current flows of micro and nanoelectronic circuits can be mapped with high resolution, for example, which is very useful for failure analysis. Furthermore, these kinds of quantum sensors can be used for GPS-independent navigation, which opens up applications for autonomous driving, for example.

For the production of diamond magnetometer tips, Fraunhofer IAF has an excellent clean room infrastructure that allows for semi-industrial manufacturing processes. In addition to state-of-the-art lithography tools such as laser lithography and electron beam lithography, extensive expertise has been built up in the dry chemical structuring of poly- and single-crystalline diamond. In recent years, development at Fraunhofer IAF has increasingly focused on the homoepitaxy of extremely pure diamond including isotopically pure ^{12}C diamond layers, as well as p- and n-doping of diamond. In the area of NV centers in diamond, we have developed the technology for the targeted generation of these centers at defined points in diamond tips, and have

entwickelt sowie Trockenätzverfahren für die Herstellung der Diamantspitzen perfektioniert. Gerade diese Fähigkeit zur Einstellung eines definierten Ladungszustandes ist ein Schlüssel für die Realisierung zuverlässiger Quantensensoren auf Basis von NV-Zentren in Diamant.

LASERSCHWELLEN- MAGNETOMETRIE

Als zweites entwickeln wir Volumen von NV-dotiertem Diamant für die Laserschwellemnagnetometrie. Dies ist ein weltweit neuer Forschungsansatz, bei dem ein Material als Lasermedium eingesetzt wird, das über eine optisch detektierbare magnetische Resonanz verfügt. Aufgrund seiner Materialeigenschaften ist Diamant mit einer hohen Dichte an NV-Zentren für den Einsatz als Lasermedium besonders geeignet. Theoretisch können damit höhere Signale und ein höherer Kontrast erzielt werden, was zu wesentlich präziseren Messergebnissen führt. Am Fraunhofer IAF wird an der Umsetzung des Konzepts seit zwei Jahren gearbeitet. Dabei kommen dem IAF die Synergie der drei Kernkompetenzen Diamantwachstum, Optoelektronik bzw. Laser-Technologie und Hochfrequenzelektronik zugute. Mit dem Laserschwellemnagnetometer sollen kleinste Magnetfelder, wie sie z. B. in neuronalen Netzen oder durch Gehirnströme entstehen, gemessen und so der medizinischen Diagnostik neue Türen geöffnet werden.



Prof. Dr. Maximilian Fleischer
*Chief Key Expert, Siemens Energy
Global GmbH & Co. KG*

” Die gezielte Nutzung von Quanteneffekten öffnet das Tor zu physikalischen Sensoren, die um Größenordnungen verlässlicher, genauer und mit höherer Ortsauflösung messen. Ich verspreche mir, dass wir damit mit bisher unerreichter Qualität Materialien charakterisieren und verstehen, Fehler entdecken und die Leistungsfähigkeit von Bauelementen verbessern.

perfected the dry etching processes for the production of diamond tips. It is precisely this ability to set a defined charge state that is key to the realization of reliable quantum sensors based on NV centers in diamond.

LASER THRESHOLD MAGNETOMETRY

Secondly, we develop volumes of NV-doped diamond for laser threshold magnetometry. This is a worldwide new research approach using a material as laser medium that has an optically detectable magnetic resonance. The material properties of diamond with a high density of NV centers make it particularly suitable for use as a laser medium. It can theoretically achieve higher signals and a higher contrast, which leads to much more precise measurement results. Fraunhofer IAF has been working on the implementation of the concept for two years. IAF benefits from the synergy of the three core areas of expertise, namely diamond growth, optoelectronics or laser technology and high-frequency electronics. The laser threshold magnetometer will be used to measure the smallest magnetic fields, such as those generated in neural networks or by brain waves, thus opening new doors in medical diagnostics.

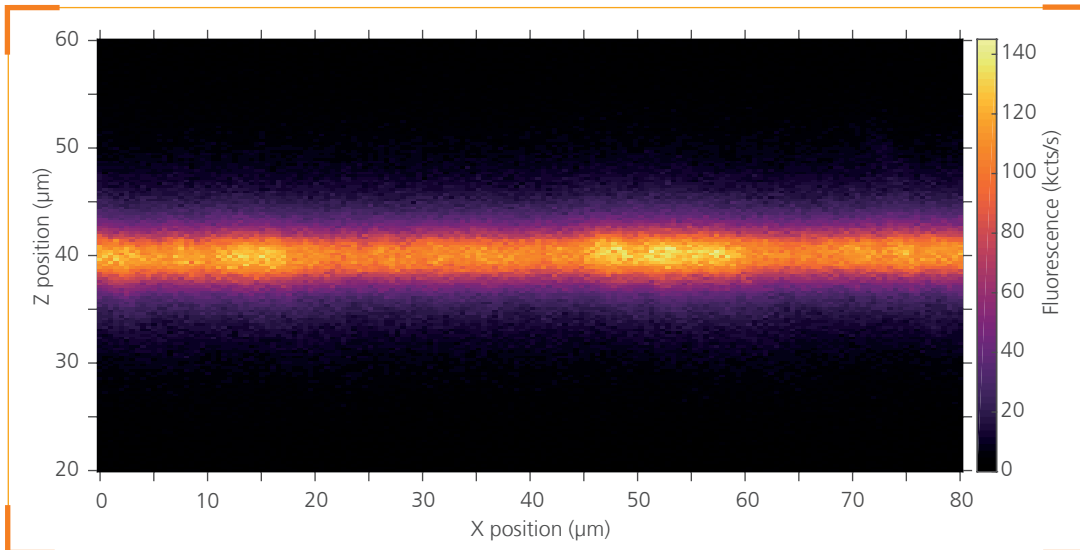
The targeted use of quantum effects opens the door to physical sensors that are orders of magnitude more reliable, more accurate and with higher spatial resolution. I expect that we will achieve unprecedentedly high quality characterization and understanding of materials, detect defects and improve in device performance.

QUANTENMAGNETOMETRIE FÜR DIE MIKRO- UND NANOELEKTRONIK

Quantum magnetometry for micro- and nanoelectronics

Die hochauflösende räumliche Darstellung von Ladungsverteilungen ist äußerst wichtig im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik. Hohe Anforderungen an die Reduzierung der Gategrößen und zunehmende Integrationsdichte führen zu einer erhöhten Fehleranfälligkeit bei der Implementierung neuer Mikrochip-Designs. In der Qualitätskontrolle und der Defektanalyse der Halbleiterindustrie besteht daher eine große Nachfrage nach Messtechnologien, die in der Lage sind, den Stromfluss mit hoher lateraler Auflösung abzubilden, um somit Leckpfade im Nanometerbereich zu identifizieren. Im Rahmen des Leitprojekts »QMag – Quantenmagnetometrie« widmet sich das Fraunhofer IAF daher der Aufgabe, Messungen von elektrischen Ladungsverteilungen mit hoher räumlicher Auflösung mithilfe eines Rasterkraftmikroskops durchzuführen, in das eine Diamantspitze mit NV-Zentrum integriert wird.

High-resolution spatial representation of charge distributions is extremely important in the field of micro- and nanoelectronics. High demands on the reduction of gate sizes and increasing integration density lead to an increased susceptibility to errors when implementing new microchip designs. The semiconductor industry therefore has a great need for innovative quality control and defect analysis, and a high demand for measurement technologies that are able to map current flow with high lateral resolution in order to identify leakage paths in the nanometer range. Within the framework of the Fraunhofer lighthouse project »QMag – Quantum Magnetometry«, Fraunhofer IAF therefore dedicates itself to the task of performing measurements of electrical charge distributions with high spatial resolution using an atomic force microscope with an integrated diamond tip with NV center.



Photolumineszenz-Tiefenprofilmessung einer auf Diamantsubstrat gewachsenen [111]-NV-Schicht
Photoluminescence depth profile measurement of an [111] NV layer grown on diamond substrate

Magnetfelder entstehen sowohl klassisch-physikalisch durch makroskalige elektrische Ströme als auch quantenphysikalisch durch nanoskalige Orbital- und Spin-Momente von Elektronen und Atomkernen. Ein technologischer Ansatz, um solch kleine Magnetfelder mit hoher lateraler Auflösung abzubilden, beruht auf Stickstoff-Vakanz-Zentren-basierten Quantensensoren. Dazu wird in Diamant ein Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom substituiert, in dessen direkter Nachbarschaft sich eine Kohlenstoff-Leerstelle befindet. Im Potenzial der Leerstelle wird das ungebundene Elektron des Stickstoffatoms eingefangen. Das magnetische Moment dieses einzelnen Elektrons kann im Magnetfeld orientiert werden und dient als der kleinstmögliche Tastmagnet bei Raumtemperatur mit atomarer Auflösung. Um diese hohe laterale Auflösung für die Messung von Magnetfeld- und Stromverteilungen nutzbar zu machen, sollen die NV-Zentren in Diamantspitzen erzeugt und in Rasterkraftmikroskopen verwendet werden. Da die magnetische Feldstärke physikalisch direkt mit der elektrischen Stromdichte verknüpft ist, kann eine bildlich erfasste Magnetfeldverteilung stromführender Kanäle somit unmittelbar und quantitativ in eine Stromverteilung umgerechnet werden.

Magnetic fields are generated both traditionally by macro-scale electric currents and quantum physically by nanoscale orbital and spin moments of electrons and atomic nuclei. A technological approach for high lateral resolution imaging of such small magnetic fields is quantum sensing based on nitrogen vacancy (NV) centers. For this purpose, a carbon atom in diamond is substituted by a nitrogen atom, in the immediate vicinity of which there is a carbon vacancy. The unbound electron from the nitrogen atom is trapped in the potential of the void. The magnetic moment of this single electron can be oriented in the magnetic field and serves as the smallest possible magnet at room temperature with atomic resolution. In order to make this high lateral resolution useful for measuring magnetic field and current distributions, the goal is to generate NV centers in diamond tips and use them in atomic force microscopes. Since the magnetic field strength is physically directly related to the electric current density, an imaged magnetic field distribution of current-carrying channels can thus be directly and quantitatively converted into current distribution.



Cantilever mit Diamantspitze

Cantilever with a diamond tip

QUANTENTECHNOLOGIE AUF DIE SPITZE GETRIEBEN

Im Zuge des Projekts werden verschiedene Herangehensweisen untersucht, um funktionstüchtige Nanoschaltkreise zu charakterisieren. Die Arbeiten reichen dabei von der Optimierung der Diamantspitzen und der Kohärenzzeit der NV-Zentren über die Integration in Rastersondenmagnetometer bis hin zur Weiterentwicklung der Messverfahren mittels komplexer Pulssequenzen von Mikrowellenemittern und Anregungslasern, die für die Ansteuerung der NV-Zentren benötigt werden.

Im ersten Jahr des Projekts erreichte das Fraunhofer IAF große Fortschritte in der Optimierung des Kristallwachstums. Mittels homoepitaktischen Wachstums ist es in der ersten Projektphase gelungen, planare Diamantschichten mit NV-Zentren abzuscheiden, die allesamt in [111]-Richtung orientiert sind. Die Fähigkeit, die Ausrichtung der NV-Zentren gezielt bestimmen zu können, ist dabei nicht nur die Grundlage, um die Sensitivität der Diamantspitzen und die Ortsauflösung des Verfahrens weiter zu verbessern, sondern bietet noch Potenzial weit über die Quantenmagnetometrie hinaus. So können solche Proben auch dazu genutzt werden, um Arrays von NV-Zentren zu erzeugen, die als Qubits für Quantenspeicher oder -prozessoren dienen können.

QUANTUM TECHNOLOGY AT THE TIP

In the course of the project, different approaches for the characterization of functional nanocircuits are being investigated. The work ranges from the optimization of the diamond tips and the coherence time of the NV centers to their integration in scanning probe magnetometers and the further development of measurement methods using complex pulse sequences from microwave emitters and excitation lasers, which are required for the control of the NV centers.

In the first year of the project, Fraunhofer IAF has achieved great progress in the optimization of crystal growth. In the first project phase, homoepitaxial growth was used to deposit planar diamond layers with NV centers, all of which are oriented in [111] direction. The ability to specify the orientation of the NV centers not only provides the basis for further improving the sensitivity of the diamond tips and the spatial resolution of the process, but also offers potential going far beyond quantum magnetometry. Such samples can also be used to generate arrays of NV centers that can serve as qubits for quantum memories or processors.

In der Entwicklung unterstützt wird das Fraunhofer IAF durch seine vielfältigen Partner im Leitprojekt »QMag«. So berechnet das Fraunhofer IWM Einflüsse von Oberflächen und Strukturdefekten auf Eigenschaften von NV-Zentren. Des Weiteren arbeitet das Fraunhofer CAP an einer verbesserten Lichtextraktion aus den Diamantspitzen, um die Signalqualität zu erhöhen. Das Fraunhofer IMM stellt magnetische Nanopartikel her, die an der Diamantspitze angebracht werden und die Empfindlichkeit noch einmal erhöhen sollen. Das Fraunhofer IISB entwickelt eine Methode zur gezielten Erzeugung von NV-Zentren, mit der technischen Herausforderung einer möglichst genauen Platzierung der NV-Zentren in der Diamantspitze. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWM wurden außerdem erfolgreich erste Magnetfeldmessungen an einer ermüdeten Stahlkonstruktion durchgeführt. Die Diamantspitzen werden im nächsten Schritt nun in Rastersondenmagnetometer eingebaut, um hochauflösende Stromverteilungen von nano- und mikroelektronischen Schaltungen zu vermessen.

AUFBAU EINES APPLIKATIONS-LABORS

Das Hauptaugenmerk von QMag liegt darauf, den Transfer dieser Quantensensoren in industrielle Anwendungen zu fördern. Die Rastersondenmagnetometer sollen daher speziell für die Nutzung durch Unternehmen optimiert werden und eignen sich so neben der Abbildung nanoskaliger Stromverteilungen vor allem zur Evaluation verschiedenster industrieller Fragestellungen. In diesem Kontext errichtet das Fraunhofer IAF ein Applikationslabor für die Quantensensorik. Damit entsteht eine Plattform für Service- und Auftragsmessungen, um Industriekunden die Leistungsfähigkeit von Quantensensorik im Vergleich mit klassischen Sensorsystemen demonstrieren zu können. Um die Nutzung und Bedienung der Quantensensoren zu erleichtern, sollen ebenso Software-Pakete entwickelt werden, die sich auf die Anforderungen der jeweiligen Applikation anpassen lassen.

Fraunhofer IAF is supported in this development by its various partners in the lighthouse project »Quantum Magnetometry – QMag«. For example, Fraunhofer IWM is calculating the influences of surfaces and structural defects on the properties of NV centers. In addition, Fraunhofer CAP is working on improving light extraction from the diamond tips to enhance signal quality. In addition, Fraunhofer IMM is producing magnetic nanoparticles that are attached to the diamond tip to further increase sensitivity, and Fraunhofer IISB is developing a method for the targeted generation of NV centers, with the technical challenge of locating the NV centers as precisely as possible in the diamond tip. Initial magnetic field measurements have already been successfully performed on a fatigued steel structure in collaboration with Fraunhofer IWM. The next step will see the diamond tips grown at Fraunhofer IAF incorporated into several commercially available scanning probe magnetometers to offer high resolution measurement of current distributions in nano- and microelectronic circuits.

SETUP OF AN APPLICATION LABORATORY

The main focus of QMag is to promote the transfer of these quantum sensors into industrial applications. The aim is therefore to optimize scanning probe magnetometers specifically for use by industrial companies. In addition to imaging nanoscale current distributions, they are especially suited for the evaluation of a range of industrial problems. In this context, Fraunhofer IAF is setting up a quantum sensing application laboratory. This will create a platform for service and contract measurements to demonstrate to industrial customers the performance of quantum sensor technology in comparison with conventional sensor systems. In order to facilitate the use and operation of quantum sensors, software packages will also be developed that can be adapted to the requirements of the applications in question.

DIAMANT-HYPERPOLARISATION FÜR EINE VERBESSERTE QUANTENSENSORIK

Quantum-enhanced sensing: diamond hyperpolarization

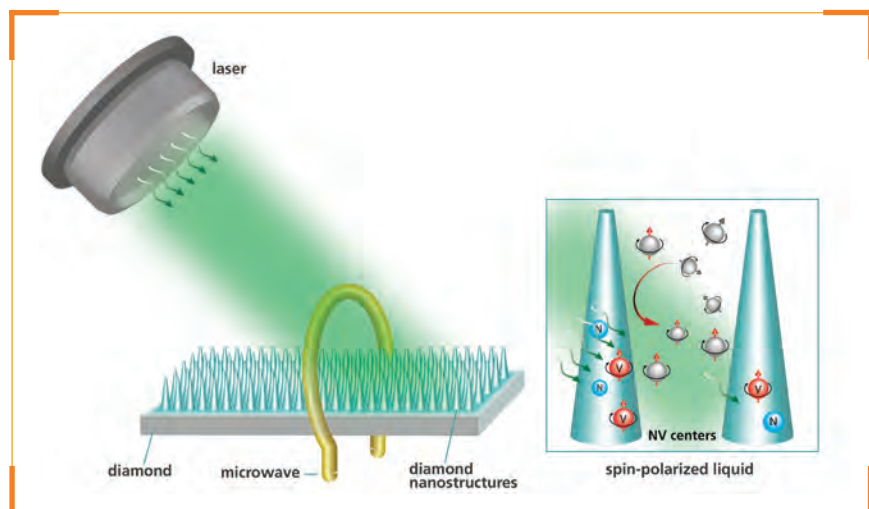
Die Quantensensorik in der Magnetresonanztomographie (MRT) beruht auf der thermischen Polarisation von Kernspins in einem Magnetfeld. Die detektierten Signale sind gering, was insbesondere die Messzeiten erhöht. Aus diesem Grund werden in der MRT oft synthetische Kontrastmittel benötigt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Mit der Hyperpolarisation kann die Spinpolarisation jenseits des thermischen Gleichgewichts z. B. auf Metabolitenmoleküle übertragen werden, was den Kontrast deutlich verbessert. Darüber hinaus ist der hyperpolarisierte Metabolit nachweisbar. Wertvolle Informationen, z. B. über Herz-Kreislauf-Erkrankungen, können so gewonnen werden. Herkömmliche Hyperpolarisatoren sind teuer, sehr groß und werden typischerweise mit teurer Heliumkühlung betrieben. Die einzigartigen Eigenschaften von Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant ebnen den Weg für kostengünstige Tabletop-Geräte, die in der Lage sind, nahe der Raumtemperatur zu arbeiten.

Quantum sensing in magnetic resonance techniques relies on the thermal polarisation of nuclear spins in a magnetic field. Detected signals are therefore low, which particularly increases measurement times. For this reason, magnetic resonance imaging often needs synthetic contrast agents to obtain meaningful results. With hyperpolarization, spin polarization beyond the thermal equilibrium can be transferred e.g. to metabolite molecules, which significantly improve contrast. In addition, the hyperpolarized metabolite is traceable. This enables the collection of valuable information, for instance on cardiovascular disease. Conventional hyperpolarizers are costly, very large and are typically operated using expensive helium cooling. The unique properties of nitrogen vacancy centers in diamond pave the way for low-cost, tabletop devices that are able to operate at close to room temperature.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) hat sich zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel in der modernen medizinischen Diagnostik entwickelt, das Ärzten detaillierte Einblicke in fast alle Teile des menschlichen Körpers ermöglicht. Es handelt sich um eine nicht invasive Technik, ähnlich der Computertomographie (CT), jedoch mit dem Vorteil, dass keine möglicherweise schädliche ionisierende Strahlung eingesetzt wird. Um die Auflösung zu erhöhen, müssen jedoch je nach tomographierter Region Kontrastmittel injiziert werden, was negative Auswirkungen auf den Patienten haben kann. Die Spinpolarisation von Farbzentren in Diamant (Stickstoff-Vakanz-Zentren, NVs), kann zur Erzeugung gutartiger Kontrastmittel verwendet werden. Ein Beispiel sind Metabolitenmoleküle wie Pyruvat. Dadurch wird das Magnetresonanzsignal drastisch erhöht. Für eine effiziente Polarisation müssen die NV-Zentren in Diamant mit hoher Kristallqualität eingebettet werden. Darüber hinaus müssen die Moleküle nahe am NV-Zentrum und damit an der Oberfläche des Materials liegen. Am Fraunhofer IAF wird NV-dotiertes Diamantmaterial von höchster Qualität synthetisiert und in unserem Reinraum zu mikro- oder nanostrukturierten Oberflächen weiterverarbeitet.

Magnetic resonance imaging (MRI) has become an indispensable tool in modern medical diagnosis, providing physicians with detailed information on nearly all parts of the human body. It is a non-invasive technique similar to computer tomography, and has the advantage of not employing potentially harmful ionizing radiation. Nevertheless, in order to boost resolution, contrast agents need to be injected depending on the region of interest, which may have negative effects on the patient. Spin polarization from color centers in diamond, i.e. nitrogen vacancies (NVs), can be used to generate benign contrast agents. One example are metabolite molecules such as pyruvate, which drastically increase the magnetic resonance signal. To achieve efficient polarization the NV centers need to be embedded in diamond with high crystal quality. In addition, the molecules have to be close to the NV center and hence to the surface of the material. NV-doped diamond material of highest quality is synthesized at Fraunhofer IAF and further processed in our clean room to generate micro- and nanostructured surfaces.

Schematische Darstellung der Hyperpolarisation, d. h. der Übertragung der Spinpolarisation, anhand NV-haltiger Nanostrukturen in Diamant
Schematic illustration of hyperpolarization, i.e., transfer of spin polarization, using NV-containing nanostructures in diamond



NANOSTRUKTURIERTER » QUANTUM GRADE « - DIAMANT

Typische Diamantplatten, die kommerziell erworben werden können, haben Abmessungen von etwa 4x4 mm². Um relevante Mengen polarisierter Moleküle in annehmbaren Zeiträumen zu erhalten, sollte die Gesamtoberfläche der Platten so groß wie möglich sein. Es ist daher von Vorteil, einen Stapel von mehreren Diamantplatten zu verwenden. Da die Polarisation nur in der Nähe der Oberfläche auftritt, hat die Vergrößerung der Gesamtoberfläche auch einen enormen Einfluss auf die Menge der polarisierten Flüssigkeit. Dieser Ansatz folgt der gleichen Strategie wie die Natur im menschlichen Gastrointestinaltrakt, wo der Dünndarm eine Oberfläche von etwa 400 m² besitzt. Die Abbildung auf Seite 71 stellt das Konzept der Hyperpolarisation als Schema dar.

Das Fraunhofer IAF hat mittels mehrerer Ansätze einzigartige nanostrukturierte Diamanten entwickelt. Ungeordnete Diamantdrähte in Nanogröße können durch sogenanntes Trockenätzen mit entnetzten Metallpartikeln oder durch ein dichtes Nano-Array, das mittels Elektronenstrahlolithographie kontrolliert hergestellt wird, erhalten werden. Es wurden umfangreiche Arbeiten zur Optimierung der Geometrie der Nanostrukturen für die Quantenoptik durchgeführt. Durch sorgfältige Abstimmung können konische Säulen mit Seitenwandwinkeln bis zu 87° erzeugt werden (siehe rechts), wodurch die Erzeugung von NV-Zentren auf der gesamten Oberfläche entweder durch Ionenimplantation oder stickstoffdotiertes epitaktisches Überwachsen möglich wird. Letzteres ergibt NV-Zentren mit Quanteneigenschaften nahe ihrer theoretischen Grenze.

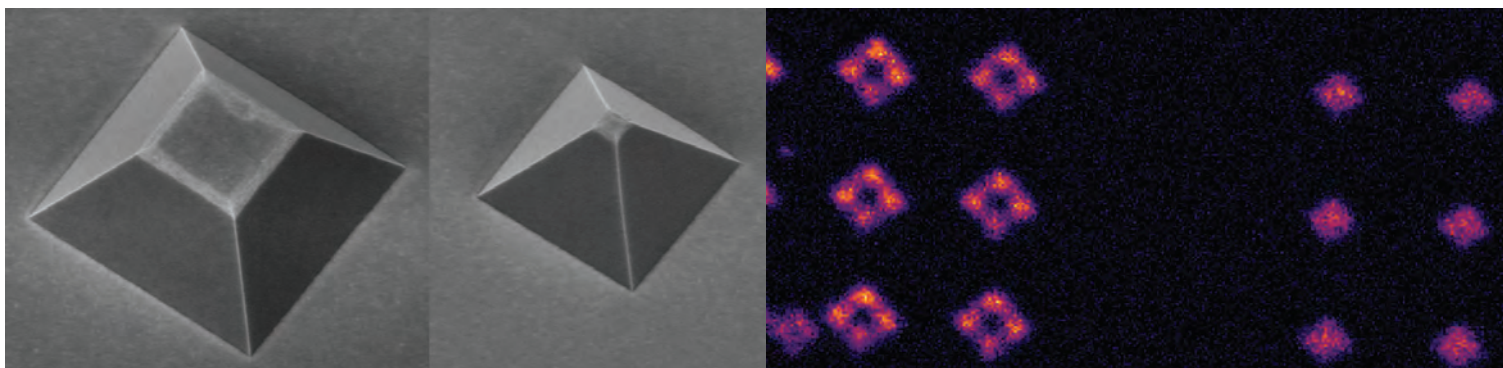
Die Kombination von schneller NV-Polarisation und -Übertragung mit Nanostrukturierung der Diamanten und hoher NV-Kohärenz wird uns in die Lage versetzen, in wenigen Minuten eine >10%ige Polarisation zu erreichen und damit eine bis zu 1.000-fach höhere Empfindlichkeitsgrenze bei der MRT oder der Kernspinresonanz (NMR).

NANOSTRUCTURED QUANTUM - GRADE DIAMOND

Typical diamond plates that can be purchased commercially have dimensions of around 4x4 mm². In order to obtain relevant amounts of polarized molecules in reasonable timeframes, the overall surface area should be as large as possible. It is therefore helpful to use a stack of several diamond plates. As polarization only occurs close to the surface, increasing the overall surface area will also have a significant impact on the amount of polarized liquid. This approach follows the same strategy as nature in the human gastrointestinal tract, where the small intestine has a surface area of around 400 m². The illustration on page 71 depicts the concept of hyperpolarisation.

Fraunhofer IAF has developed several approaches for generating unique nanostructured diamonds. Disordered, nano-sized diamond wires can be obtained using so called dry-etching with dewetted metal particles, or a dense nano-array manufactured in a controlled manner using electron beam lithography. Extensive work has been undertaken on optimizing the geometry of the nanostructures for quantum optics. With careful tuning, conical pillars with sidewall angles of up to 87° can be created (see right), enabling the creation of NVs on the entire surface either by ion implantation or nitrogen-doped epitaxial overgrowth. The latter yields NV centers with quantum properties close to their theoretical limit.

The combination of rapid NV polarization and transfer with nanostructuring of the diamonds and high NV coherence will enable us to reach >10 % polarization in a few minutes, thus pushing the sensitivity limit of MRI or nuclear magnetic resonance (NMR) in most cases by more than 1000 times.



Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme und orts aufgelöste Fluoreszenz eines mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellten Diamant-Nanoarrays

Scanning electron microscope image and fluorescence mapping of a diamond nano-array manufactured by electron beam lithography

MATERIALENTWICKLUNG AM FRAUNHOFER IAF

Aufgrund der sehr starren Struktur von Diamant können die Quanteneffekte von NV-Zentren nahe der Raumtemperatur beobachtet und genutzt werden, im Gegensatz zu supraleitenden Schaltkreisen, die in modernen Quantencomputern die Qubits bilden. Abgesehen von äußeren Einflüssen können jedoch auch innere Defekte in Diamant, insbesondere Kontaminationen, aber auch kristallographische Defekte, die Leistungsfähigkeit dieses Quantenmaterials erheblich verändern. Um solche nachteiligen Effekte zu vermeiden und quantentaugliches Material für die Hyperpolarisation und zukünftige Diamant-basierte Quantentechnologien bereitzustellen, hat das Fraunhofer IAF herausragende Kompetenzen im hochkontrollierten Wachstum von NV-dotierten Diamantsubstraten und Dünnschichten entwickelt. Wir stellen Mittel zur NV-Konzentration und -Positionierung zur Verfügung, wo NV-Zentren lokal auf pyramidenförmigen Strukturen im Mikrometerbereich abgeschieden werden. Darüber hinaus können die Quanteneigenschaften durch Kontrolle des Isotopenverhältnisses von Diamant weiter an ihre Grenzen gebracht werden.

MATERIAL DEVELOPMENT AT FRAUNHOFER IAF

Due to the incredibly rigid structure of diamond, the quantum effects of NV centers can be observed and harnessed at close to room temperature, in contrast to superconducting circuits that form the qubits in state-of-the-art quantum computers. However, apart from external influences, internal defects in diamond, in particular contaminations, but also crystallographic defects, can significantly alter the performance of this quantum material. To avoid such detrimental effects and provide quantum grade material for hyperpolarization and future diamond-based quantum technologies, Fraunhofer IAF has developed outstanding expertise in the highly controlled growth of NV-doped diamond substrates and thin films. We are providing the means for NV concentration and positioning, whereby NV centers are deposited locally on pyramidal micron-sized structures. Quantum properties can be further pushed to their limits by controlling the diamond isotopic ratio.

CHARAKTERISIERUNG VON DIAMANT FÜR DIE LASERSCHWELLENMAGNETOMETRIE

Characterization of diamond for laser threshold magnetometry

Magnetfeldmessungen spielen eine große Rolle in der Medizintechnik, aber auch in der Navigation, E-Mobilität, Industrie und vielen weiteren Bereichen. Dabei bieten Quantensysteme, wie das Stickstoff-Vakanz-Zentrum in Diamant, neue Sensor-Plattformen, mit denen Magnetfelder präziser, robuster und im Gegensatz zu bisherigen hochsensitiven Sensoren bei Raumtemperatur gemessen werden könnten. Das Fraunhofer IAF verfolgt dafür die Umsetzung von Laserschwellemnagnetometrie, d. h. einem Laser aus NV-Zentren, welcher die Sensitivität der besten Magnetometer erreichen könnte. Im Zuge dieses Unterfangens wurden umfangreiche Charakterisierungs-Kapazitäten für NV-Diamant aufgebaut, welche neue Materialentwicklungen ermöglichen. Außerdem wird in Vorexperimenten die Umsetzung mobiler, an optische Fasern gekoppelter NV-Magnetometer für den Einsatz in praktischen Anwendungen verfolgt.

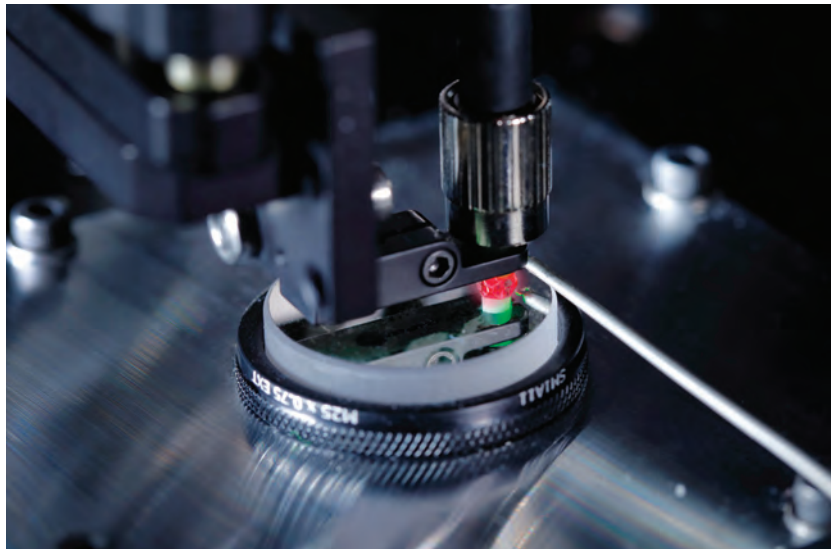
Magnetic field measurements play an important role in medical technology, but also in navigation, e-mobility, industry and many other fields. Quantum systems, such as the nitrogen vacancy (NV) center in diamond, offer new sensor platforms with which magnetic fields can be measured more precisely, more robustly and – in contrast to the highly sensitive sensors that have been in use so far – at room temperature. To this end, Fraunhofer IAF is pursuing the implementation of laser threshold magnetometry, i.e. a laser from NV centers that could achieve the sensitivity of the best magnetometers. In the course of this endeavor, extensive characterization capacities for NV diamond have been established, which allow new material developments. In addition, the implementation of mobile NV magnetometers coupled with optical fibers for practical applications is being pursued in preliminary experiments.

In der Medizin benötigt man ultrasensitive Sensoren, um die schwachen Magnetfelder, welche bei Herz- und Hirnaktivitäten (MKG, MEG) erzeugt werden, zu messen. Da die über Jahrzehnte etablierten SQUID-Sensoren aufwendige kryogene Kühlung benötigen, sind jedoch weiterhin die ungenaueren elektrischen Messungen (EKG, EEG) an Krankenhäusern gängig. Die aktuelle Entwicklung neuer Quantensensoren auf Basis von NV-Zentren in Diamant öffnet hier neue Türen.

Eine wesentliche Verbesserung der Sensitivität von NV-Zentren könnte durch den Einsatz als Lasermedium in einem sogenannten Laserschwellenmagnetometer erreicht werden. Dieser weltweit neue Forschungsansatz wird am Fraunhofer IAF durch das vom BMBF geförderte Projekt »DiLaMag« verfolgt. Dabei soll roter Diamant mit einer hohen Dichte an NV-Zentren in einer optischen Kavität durch grünes Licht gepumpt werden, während gleichzeitig der Elektronenspin-Übergang durch eine Mikrowellen-Antenne angesprochen wird. Das von den NV-Zentren ausgesandte Laserlicht ist dabei eine direkte Indikation der Magnetfeldstärke.

VOR-CHARAKTERISIERUNG UND VERBESSERUNGEN IM HERSTELLUNGSPROZESS

Ein essentieller Teil der Umsetzung neuer Sensoren sind die Vor-Charakterisierung und Verbesserungen im Herstellungsprozess von NV-Zentren in Diamant. Eine hohe Dichte der gewünschten negativ geladenen NV-Zentren ermöglicht starke Signale und damit hohe Messpräzision. Mittels Fluoreszenz-Spektroskopie können wir die sich überlagernden Spektren von NV und des neutralen NV⁰ trennen und so individuelle Dichten quantifizieren. Im gleichen Aufbau kann die Homogenität der Verteilung auf 200x200x200 µm³ in einem Piezoscan bei einer konfokalen Auflösung von ~500 nm untersucht werden. Auch die Identifikation von einzelnen NV-Zentren bzw. Einzelphotonenquellen mittels Hanbury-Brown-Twiss-Analyse ist möglich sowie die Messung der optisch angeregten Lebensdauer von NV-Zentren und Ensembles, welche Informationen über zusätzliche Zerfallskanäle enthält.

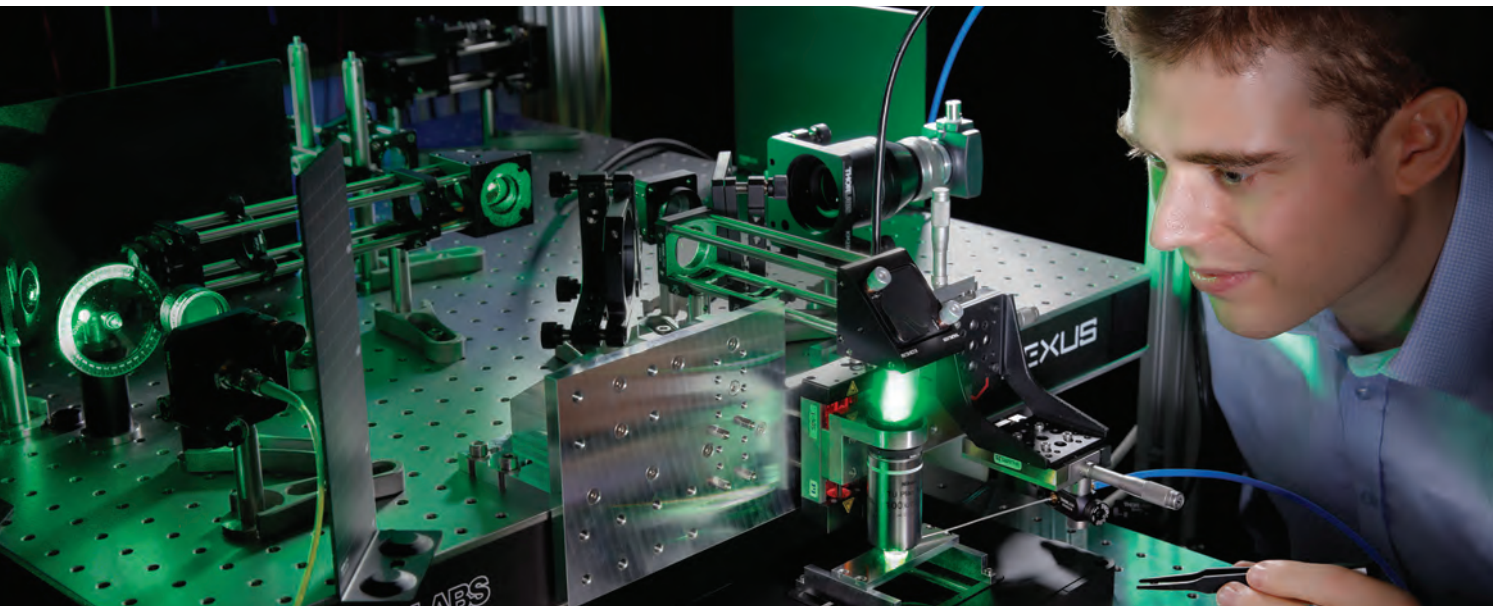


Eine hohe Dichte von NV-Zentren lässt Diamant sichtbar rot fluoreszieren

A high density of NV centers causes visible red fluorescence in diamond

In medicine, ultra-sensitive sensors are needed to measure the weak magnetic fields generated by heart and brain activity (MCG, MEG). However, since SQUID sensors, which have been established for decades, require complex cryogenic cooling, less accurate electrical measurements (ECG, EEG) are still common in hospitals. The current development of new quantum sensors based on NV centers in diamond opens up new possibilities in this context.

A significant improvement in the sensitivity of NV centers could be achieved by using them as laser medium in what is known as a laser threshold magnetometer. This globally new research approach is being pursued at Fraunhofer IAF as part of the project »DiLaMag«, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research. In this project, red diamond with a high density of NV centers in an optical cavity is to be pumped through green light while simultaneously addressing the electron spin transition by means of a microwave antenna. The laser light emitted by the NV centers is a direct indication of the magnetic field strength.



Ein Charakterisierungsaufbau zur Fluoreszenz-Mikroskopie, Spektroskopie, ODMR, Einzelphotonenemitter-Identifikation sowie Lebensdauer- und Kohärenzzeitmessung von NV-Zentren in Diamant

A characterization setup for fluorescence microscopy, spectroscopy, ODMR, single photon emitter identification as well as lifetime and coherence time measurement of NV centers in diamond

PRE-CHARACTERIZATION AND IMPROVEMENTS IN THE MANUFACTURING PROCESS

An essential part of the implementation of new sensors is the pre-characterization and improvements of the process for manufacturing NV centers in diamond. A high density of the desired negatively charged NV-centers enables strong signals and thus high measurement precision. Fluorescence spectroscopy enables us to separate the overlapping spectra of NV and the neutral NV⁰ and thus quantify individual densities. In the same setup the homogeneity of the distribution on 200x200x200 μm³ can be examined in a piezo scan with a confocal resolution of ~500 nm. Single NVs or single photon sources can also be identified using Hanbury-Brown-Twiss analysis, and the optically excited lifetime of NV centers and ensembles, which contains information about additional decay channels, can be measured.

Zur Analyse von Absorptionskoeffizienten und Dichten von NV- und P1-Zentren (Stickstoff als Vorstufe zum NV-Zentrum) nutzen wir UV-VIS-Spektroskopie und FTIR-Spektroskopie. Doppelbrechungs-Imaging erlaubt zudem die Analyse von Verspannungen in Diamant und die dadurch hervorgerufenen optischen Verluste. Klassische Halbleiteranalysen wie Röntgentomographie und -diffraktometrie zur Analyse von Kristallqualität, Defekten und Politurschäden oder Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) zur Analyse von Fremdatomdichten ergänzen das Portfolio am Fraunhofer IAF. Auch die Bearbeitung von Diamant mittels Laserschneiden und Politur bis < 1nm Oberflächenrauigkeit sowie umfangreiche Ätztechniken zum Erzeugen von Diamantstrukturen wie AFM-Spitzen stehen zur Verfügung.

Der Einsatz von Diamant an optischen Faserenden und in Kavitäten erlaubt uns außerdem die Untersuchung des Einflusses verschiedener Materialaspekte auf die Performance, z. B. die quantifizierte Aufschlüsselung des optischen Gesamtverlusts in die verschiedenen Kanäle: Spiegel-Transmission, Oberflächenreflexionen durch Doppelbrechung und Absorption sowie deren Abhängigkeit von optischen Intensitäten und dem benutzten Material. Auch die Vermessung von optischer Verstärkung und Laserkennlinien von kombinierten Lasermedien mit Diamant führen wir auf diese Weise durch, um neue Effekte zu vermessen und Anwendungen zu testen. Für die Entwicklung neuer Quantensensoren steht somit eine umfangreiche Infrastruktur am Fraunhofer IAF zur Verfügung.

We use UV-Vis spectroscopy and FTIR spectroscopy to analyze absorption coefficients, densities of NV and P1 centers (nitrogen as a precursor to the NV center). Birefringence imaging also allows tensions in the diamond and the resulting optical losses to be analysed. Conventional semiconductor analyses, such as X-ray tomography and diffractometry to identify crystal quality, defects and polish damage or secondary ion mass spectroscopy (SIMS) to determine impurity densities, complete the Fraunhofer IAF portfolio. We are also able to process diamond by laser cutting and polishing up to < 1nm surface roughness and to generate diamond structures such as AFM tips by extensive etching techniques.

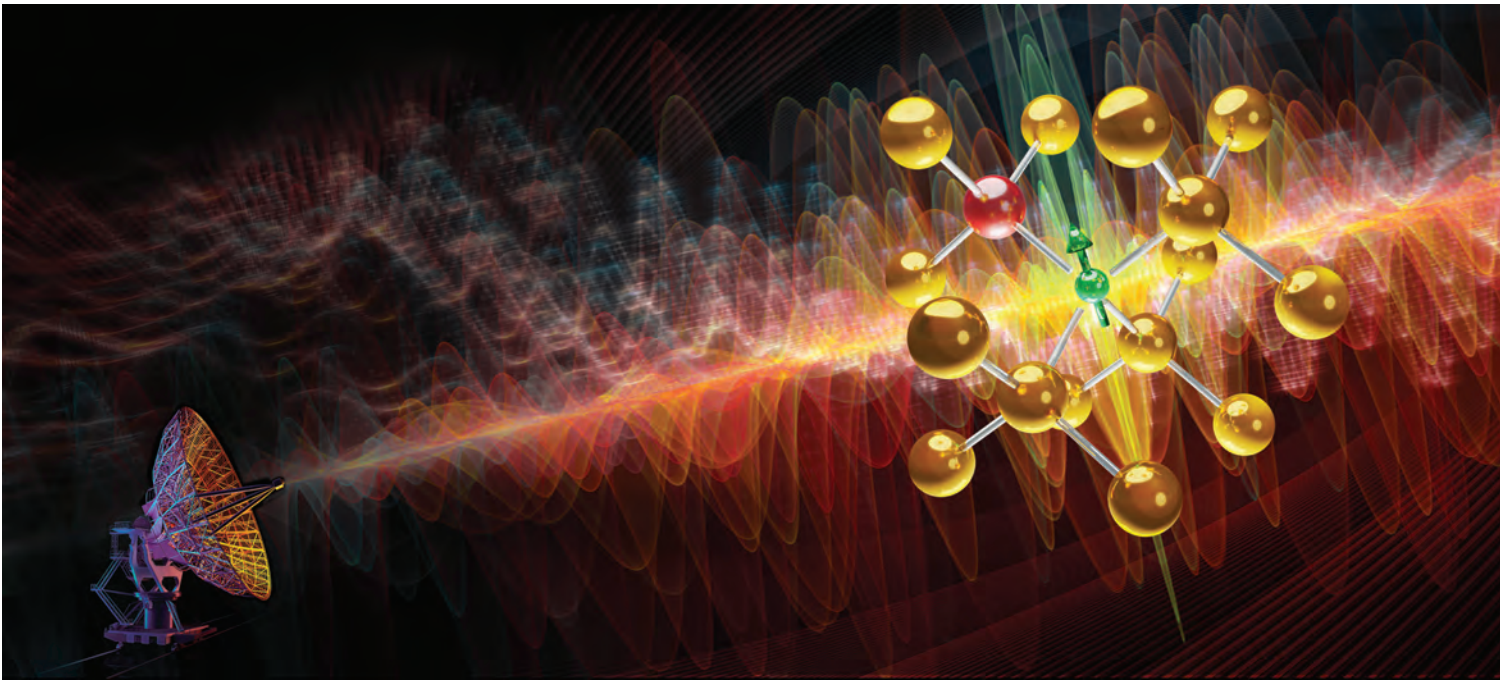
The use of diamond at the ends of optical fibers and in cavities also allows us to study the influence of different material characteristics on performance, e.g. by quantifying total optical loss for the different channels: mirror transmission, surface reflections due to birefringence and absorption and their dependence on optical intensities and the material used. We also use this method to measure optical gain and the characteristics of combined laser media with diamond, measuring new effects and testing applications. Fraunhofer IAF thus has extensive infrastructure for the development of new quantum sensors.

QUANTENSENSORIK ZUR HOCHFREQUENZ-SIGNALAUFKLÄRUNG

Quantum sensors for high frequency signal reconnaissance

Gepulste bzw. frequenzmodulierte Hochfrequenz-Signale (HF-Signale) finden weite Verwendung in der Luftfahrt, der Breitbandkommunikation, bei Radaren und der Telemetrie, z. B. von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs). Im Rahmen der elektronischen Aufklärung wird die Signatur passiv aufgefangener HF-Signale analysiert, um die Signalquelle bzw. die zugrundeliegende Bedrohung zu kategorisieren und zu orten. Infolge der zunehmenden Frequenz und Komplexität moderner HF-Signale sind bestehende Analysetechniken nur begrenzt einsetzbar. Mit der Quantentechnologie zeichnen sich neuartige Ansätze im Bereich der HF-Analyse ab. Das Fraunhofer IAF erforscht hierzu HF-Sensoren auf Basis von Diamant-Ensembles mit Stickstoff-Vakanz-Zentren und bildgebender optischer Auslesung, um z. B. das Frequenz-Zeit-Verhalten komplexer HF-Signale im Bereich 1 – 10 GHz mit hoher Bandbreite in Echtzeit zu analysieren.

Pulsed or frequency modulated radio frequency (RF) signals are widely used in aviation, broadband communication, radar and telemetry, e.g. of unmanned aerial vehicles (UAV). In electronic reconnaissance, the signature of passively intercepted RF signals is analyzed to categorize and locate the signal source or underlying threat. Due to the increasing frequency and complexity of modern RF signals, existing analysis techniques are only of limited use. With quantum technology, new approaches in the field of RF analysis are emerging. In this context, Fraunhofer IAF is researching RF sensors based on diamond arrays with nitrogen vacancy centers and imaging optical readout, e.g. to analyze the frequency-time behavior of complex RF signals in the 1 – 10 GHz range with high bandwidth in real time.



Die Quantensensorik mit NV-Zentren in Diamant bietet einen neuen Ansatz für die Analyse komplexer HF-Signale
Quantum sensing based on NV centers in diamond provides a novel approach for analysing complex RF signals

Die Erfassung und Analyse schnell veränderlicher Hochfrequenz-Signale (HF-Signale), wie sie in modernsten Kommunikations- und Radarsystemen verwendet werden, erfordern Echtzeitbandbreiten im Bereich von mehreren GHz in Verbindung mit ms-Zeitauflösung, um ihr Zeit-Frequenz-Verhalten zu analysieren. Bei direkter Digitalisierung, Filterung und anschließender schneller Fourier-Transformation (FFT) ist die Bandbreite durch den hohen Rechenaufwand und die Performance der A/D-Wandler auf ca. 0,1 GHz begrenzt. Bei Verwendung der heterodynen Abwärtskonvertierung in Verbindung mit einem durchstimmbaren μW -Oszillator ist zwar die Bandbreite ausreichend, aber die Nachweiswahrscheinlichkeit sinkt stark. Beide Techniken sind aufgrund der raschen Fortschritte der HF-Technik für die Anforderungen der elektronischen Aufklärung nur bedingt ausreichend.

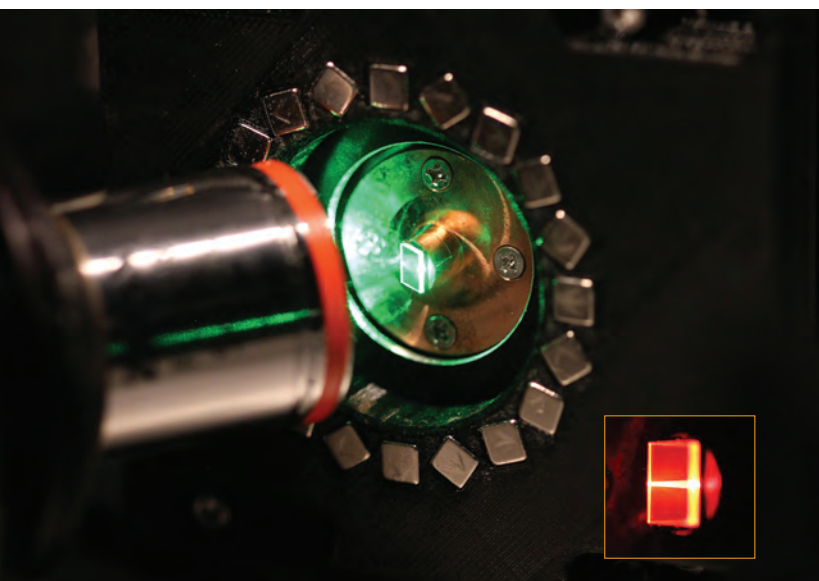
The acquisition and analysis of rapidly changing radio frequency (RF) signals, as used in advanced communication and radar systems, requires real-time bandwidths in the range of several GHz combined with ms time resolution to analyze their time-frequency behavior. Using direct digitalization, filtering and subsequent Fast Fourier Transformation (FFT), bandwidth is limited to approximately 0.1 GHz due to the high computational effort and the performance of the A/D converters. Heterodyne down-conversion used in combination with a tunable μW oscillator gives sufficient bandwidth, but the probability of detection is greatly reduced. Due to the rapid progress in RF technology, both techniques are only partially suited to electronic reconnaissance.

DIAMANT ALS SENSOR FÜR HF-SIGNALE

Mit der Quantensensorik auf Basis von Stickstoff-Vakanzen (NV-Zentren) in Diamant lassen sich statische Magnetfelder mit Empfindlichkeiten im $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ -Bereich vermessen. Die Messung des Magnetfeldes erfolgt dabei durch die »optisch detektierte Magnetresonanzspektroskopie« (ODMR). Unter μW -Einstrahlung kann nach optischem Pumpen die magnetische Resonanz des Triplett-Grundzustandes als Fluoreszenz-Abnahme bei Raumtemperatur sehr empfindlich nachgewiesen werden. Die Magnetfeldstärke wird dabei aus der Resonanzfrequenz ermittelt. Dreht man das Messverfahren nun um, so kann bei bekanntem statischen Magnetfeld die Frequenz eines unbekanntes HF-Signals bestimmt werden. Aufgrund quantenmechanischer Auswahlregeln lassen sich so Mikrowellenquanten mit der ODMR-Technik im optischen Bereich nachweisen. Dieses Verfahren lässt sich somit zur Analyse komplexer, schnell veränderlicher Radar- oder Kommunikations-Signale nutzen.

DIAMOND AS A SENSOR FOR RF SIGNALS

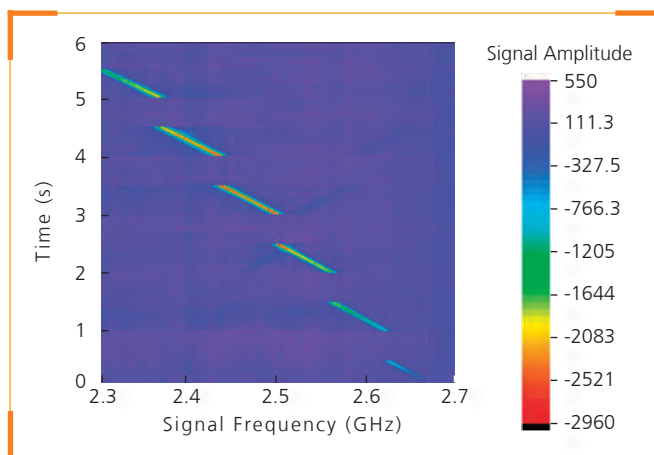
Quantum sensors based on nitrogen vacancy (NV) centers in diamond enable the measurement of static magnetic fields with sensitivities in the $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ range. The magnetic field is measured by »optically detected magnetic resonance spectroscopy« (ODMR). Under μW irradiation, the magnetic resonance of the triplet ground state can be detected with great sensitivity as fluorescence decreases at room temperature after optical pumping. The magnetic field strength is determined from the resonance frequency. Reversing the measuring method, the frequency of an unknown RF signal can be determined if the static magnetic field is known. Due to quantum mechanical selection rules microwave quanta can be detected in the optical range with the ODMR technique. This method can thus be used for the analysis of complex, rapidly changing radar and communication signals.



HF-Sensorchip aus Diamant mit seitlichem Laserpumpen. Einschub: rote NV-Fluoreszenz, die vom Chip emittiert wird
Diamond RF sensor chip with lateral laser pumping. Insert: Red NV fluorescence emitted from the chip

Frequenz- und Amplitudenabhängigkeit eines gepulsten und gechirpten Radarsignals, das von einem am Fraunhofer IAF entwickelten Diamant-Sensorchip erfasst wird

Frequency and amplitude dependence of a pulsed and chirped radar signal detected by a diamond sensor chip developed at Fraunhofer IAF



VERTEILTE NV-ZENTREN ZUR FREQUENZMESSUNG

Gaszellen oder laser gekühlte Atome ermöglichen eine ultimative Empfindlichkeit bei der Messung physikalischer Größen, allerdings mit hohem experimentellen Aufwand und mangelnder räumlicher Auflösung. Demgegenüber können mit NV-Diamant verteilte Quanten-Ensembles applikations-spezifisch hergestellt und bei Raumtemperatur ausgelesen werden. Zur HF-Frequenzanalyse wird ein großflächiger NV-Diamantsensor einem gradienten Magnetfeld ausgesetzt und flächig lasergepumpt. Die aufgefangene HF-Strahlung wird dann mittels einer breitbandigen Nahfeldantenne in den Diamantchip eingekoppelt. Aufgrund des magnetischen Feldgradienten wird auf dem Chip ein Frequenzbereich aufgespannt, in dem aufgefangene HF-Signale nachgewiesen werden können. Bei Verwendung einer optimierten Anordnung starker Nd-Permanentmagnete sind Echtzeit-Bandbreiten im GHz-Bereich möglich. Die Einstellung der Zentralfrequenz auf die militärisch relevanten Frequenzbänder erfolgt über die Zeeman-Verschiebung im statischen Dipol-Magnetfeld, während die Auslesung des Sensorchips bildgebend mittels einer schnellen Zeilenkamera möglich ist (siehe links). Diese quantensensorische Messtechnik hat das Potenzial, komplexe, gepulste Signale, z. B. von Radaren, in Echtzeit zu erfassen und auszuwerten (siehe oben).

DISTRIBUTED NV CENTERS FOR FREQUENCY MEASUREMENT

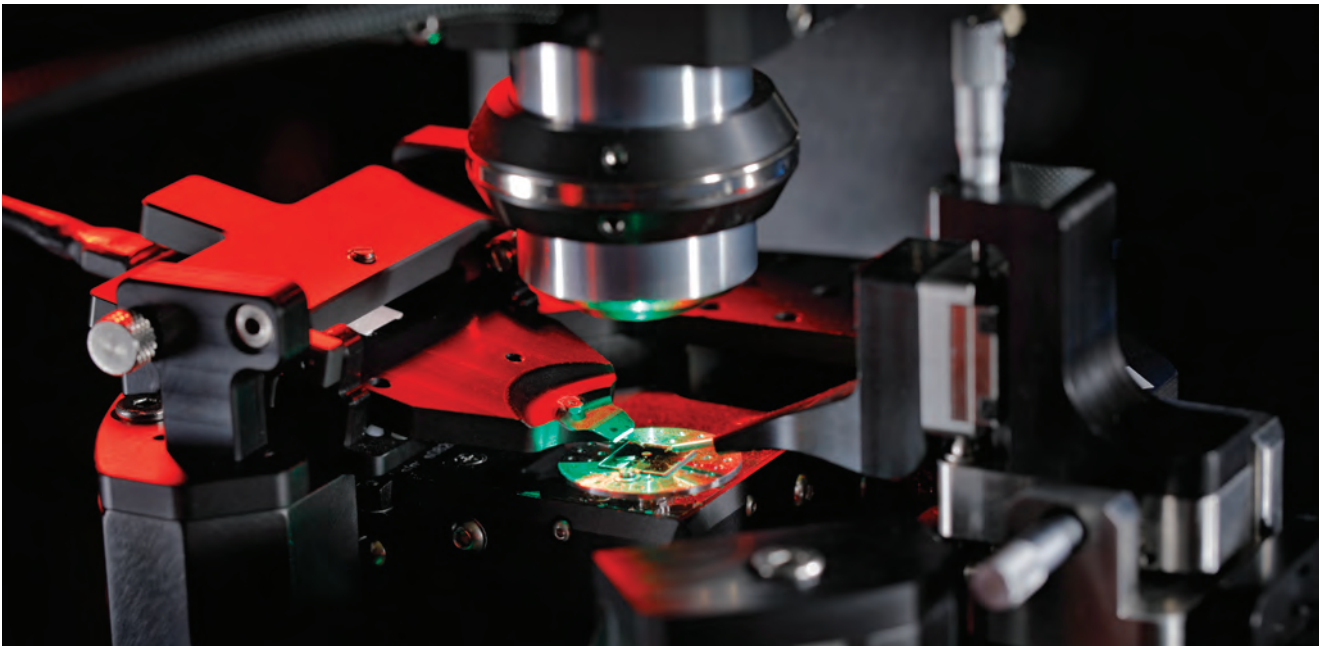
Gas cells or laser-cooled atoms provide ultimate sensitivity when measuring physical quantities, but with high experimental effort and lack of spatial resolution. In contrast, quantum arrays with NV diamond can be fabricated in an application-specific way and read out at room temperature. For RF frequency analysis, a large-area NV diamond sensor is exposed to a gradient magnetic field and laser-pumped over a large area. The RF radiation collected is then coupled into the diamond chip by means of a broadband near-field antenna. Due to the magnetic field gradient a frequency range is spread out on the chip in which the collected RF signals can be detected. Using an optimized arrangement of strong Nd permanent magnets, enables real-time bandwidths to be achieved in the GHz range. The central frequency is adjusted to military frequency bands is achieved by using the Zeeman shift in the static dipole magnetic field, while the readout of the sensor chip is possible by means of a fast line scan camera (see left). This quantum sensor measurement technique has the potential to acquire and evaluate complex, pulsed signals, e.g. from radars, in real time (see top).

APPLIKATIONSLABOR QUANTENSENSORIK

Application laboratory quantum sensing

Um den Transfer von Forschungsentwicklungen in industrielle Anwendungen voranzubringen, wird am Fraunhofer IAF ein Applikationslabor für die Quantensensorik errichtet. Mehrere Quantenmagnetometer stehen voraussichtlich ab Frühjahr 2021 zur Verfügung, damit Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft das Innovationspotenzial von Quantensensoren für ihre spezifischen Anforderungen evaluieren können. Das Applikationslabor entsteht innerhalb des Fraunhofer-Leitprojekts »Quantenmagnetometrie«. Zwei der drei geplanten Magnetometer sind schon installiert, das dritte System wird im ersten Quartal 2021 aufgebaut – auf den nächsten Seiten erhalten Sie mehr Infos dazu. Alle basieren auf Diamantspitzen mit Stickstoff-Vakanz-Zentren. Wir sind sehr interessiert daran, potenzielle Anwender und Fragestellungen kennenzulernen und freuen uns auf Projektideen!

In order to promote the transfer of research developments into industrial applications, a quantum sensing application laboratory will be established at Fraunhofer IAF. Several quantum magnetometers will be available by springtime 2021 to enable partners from science and industry to evaluate the innovative potential of quantum sensors against their specific requirements. The application laboratory is part of the Fraunhofer lighthouse project »Quantum Magnetometry«. Two of the three planned magnetometers are already installed, and the third system will be set up in the first quarter of 2021 – further information is on the following pages. We are very interested in getting to know potential users and hearing questions, and we look forward to receiving project ideas!



Q n a m i P r o t e u s Q

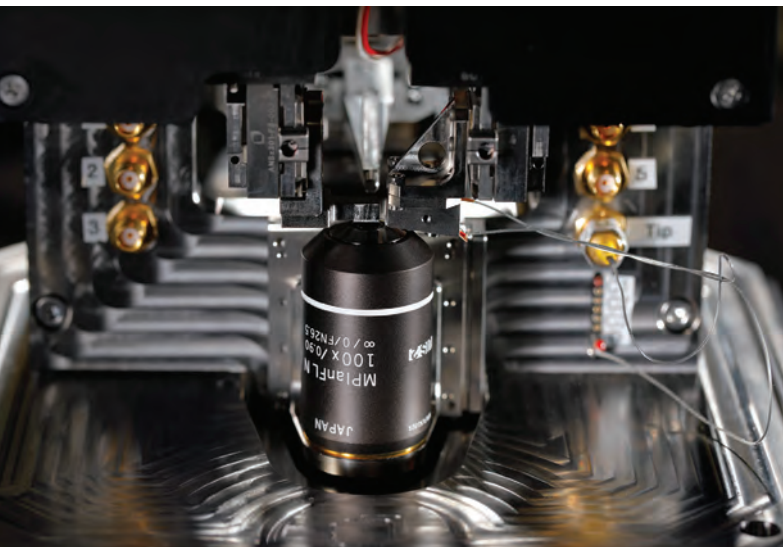
Das Qnami ProteusQ ist ein modifiziertes Rasterkraftmikroskop. Es ist mit der passenden Elektronik und Software ausgestattet und ermöglicht einen unkomplizierten »Plug & Play« Einsatz. Für die Benutzung sind keine besonderen Fachkenntnisse im Bereich der Quantensensorik nötig, da es automatisiert arbeitet und der Spitzen- und Proben-austausch in nur wenigen Minuten möglich ist. Das System misst sehr kleine magnetische DC-Ströme mit atomarer räumlicher Auflösung und eignet sich außerdem sehr gut zur Untersuchung materialwissenschaftlicher Fragestellungen.

The Qnami ProteusQ is an adapted atomic force microscope and a plug & play device, complete with electronics and software. It is not necessary for customers to have special expertise in quantum sensing, since it offers automated operations and the tip and sample exchange takes just a few minutes. The system measures small DC magnetic fields with atomic spatial resolution and is well suited to investigate materials science questions.



MORE
INFO

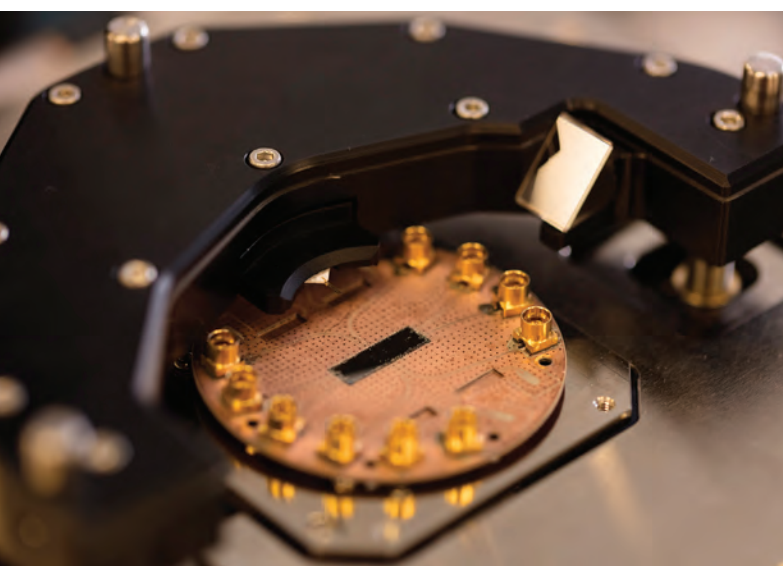




attocube CSFM

Bei diesem System handelt es sich um ein Rasterkraftmikroskop kombiniert mit einem konfokalen Mikroskop, was zu einer extremen Stabilität führt. Am Fraunhofer IAF wird das System zu einem Quantenmagnetometer modifiziert. Dazu werden der Laser, der Einzelphotonendetektor und die Mikrowellenquelle integriert und programmiert. Es wird auch möglich sein, verschiedene Diamantspitzen einzubauen und sowohl DC- als auch AC-Ströme zu messen. Dies macht es zu einem vielseitigen Messgerät, welches sich für verschiedene quantensensorische Anwendungen anpassen lässt.

This system is an atomic force microscope combined with a confocal microscope, which offers extreme stability. At Fraunhofer IAF, the system is modified to a quantum magnetometer. For this purpose, the laser, the single photon detector and the microwave source will be integrated and programmed. It will also be possible to incorporate different diamond tips and measure both DC and AC currents. This makes it a versatile magnetometer that can be adapted to various quantum sensor applications.



QZabre QSM

Dieses System wird ab dem ersten Quartal 2021 zur Verfügung stehen. Es ist ein sofort einsatzbereites Rastersondenmikroskop mit zwei zusätzlichen Funktionen: Magnetometrie von AC-Strömen und den magnetooptischen Kerr-Effekt. Ersteres ermöglicht Messungen, die eine hohe Empfindlichkeit erfordern und die zweite Funktion misst die Magnetisierung der Proben. Da die Mikrowellenantenne in die Diamantsonde integriert ist, eignet sich dieses Magnetometer perfekt für Probenvergleichsstudien.

This system will be available by the first quarter of 2021. It is a plug & play AFM with two additional features: AC magnetometry and the magneto-optical Kerr effect. The first allows measurements that require high sensitivity, the second measures the magnetization of samples. Since the microwave antenna is integrated into the diamond probe, this magnetometer is perfectly suited for sample comparison studies.



Dr. Helmut Angerer
*Senior Manager Failure Analysis
Infineon Technologies Austria AG*

” In der Halbleitertechnologie bereitet die Lokalisierung kleiner Leckströme immer wieder große Probleme. Eine mögliche Konsequenz kann die verspätete Markteinführung von neuen Produkten sein. Die Quantenmagnetometrie eröffnet mit der Visualisierung kleinster Ströme ganz neue Möglichkeiten. Im Applikationslabor haben wir die Möglichkeit, diese neuen Methoden schon jetzt bei der Charakterisierung von neuen Technologien und Produkten einzusetzen.

In semiconductor technology, the localization of small leakage currents always causes major problems. A possible consequence can be the delayed market launch of new products. Quantum magnetometry opens up completely new possibilities with the visualization of smallest currents. The application laboratory enables us to use these new methods right now to characterize new technologies and products.



Martin Horn
Mayor of Freiburg

” Freiburg ist ein bedeutender Wissenschaftsstandort. Die Erkenntnisse der fünf Fraunhofer-Institute ermöglichen in zahlreichen Bereichen wichtige Fortschritte. Ein hervorragendes Beispiel dafür ist die Forschung in der Quantensensorik an den Instituten IAF, IPM und IWM – sie spielt sowohl für die Weiterentwicklung der Medizintechnik als auch für Industrie und Produktion eine bedeutende Rolle. Herzlichen Dank für diese wichtige Arbeit!

Freiburg is an important science location. The findings of the five Fraunhofer Institutes enable important progress to be made in numerous areas. An outstanding example of this is the research in quantum sensor technology at the institutes IAF, IPM and IWM – it plays an important role both in the further development of medical technology and in industry and production. Many thanks for this important work!



Dr. Nils Trautmann
*Head of Quantum Technologies
ZEISS Corporate Research and
Technology*

” Quantentechnologien haben ein bedeutendes wirtschaftliches Potenzial in der Zukunft. Aus unserer Sicht fehlt es aber an Anwendungsentwicklung, um Quantensensoren zum Durchbruch zu verhelfen. Mit dem Applikationslabor für Quantensensorik kann das Fraunhofer IAF einen bedeutenden Beitrag leisten, um diese Lücke zwischen Industrie und Grundlagenforschung zu schließen.

Quantum technologies have significant economic potential in the future. In our view, however, there is a lack of application development to help quantum sensors achieve a breakthrough. With the quantum sensor applications laboratory, Fraunhofer IAF can make a significant contribution to closing this gap between industry and basic research.





STARKE VERNETZUNG

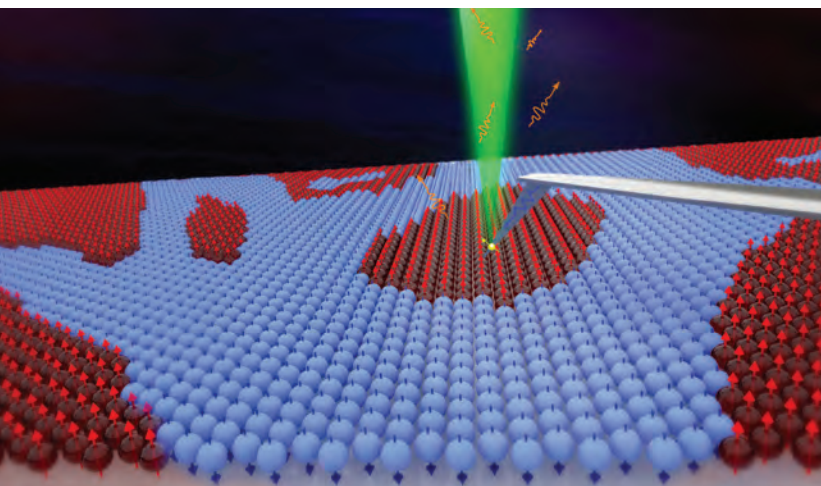
Strong networks

Quantensensoren möglichst schnell vom Labor in die Anwendung zu bringen, ist das erklärte Ziel des Fraunhofer IAF. Dabei ist die Kooperation zwischen Forschung und Industrie unerlässlich, um weltweit wettbewerbsfähig zu bleiben und Technologien auf höchstem Niveau zu entwickeln. Wir sind stolz auf unsere vielfältigen nationalen und internationalen Partner, von denen Sie einige auf den nächsten Seiten kennenlernen können.

It is the declared goal of Fraunhofer IAF to bring quantum sensors from the laboratory to the application as quickly as possible. Collaboration between research and industry is essential if we are to remain globally competitive and to develop technologies at the highest level. We are proud of our diverse national and international partners, some of whom you can get to know in the following pages.

ATTOCUBE SYSTEMS AG

Enabling technology for quantum sensing and metrology



The future of magnetic imaging: By scanning a thin slab of ultra-clean diamond that carries a single defect and acts as an atomic-scale magnetic field sensor, local magnetic fields can be resolved with unprecedented sensitivity and true nanoscale resolution.

Die Aussichten der quantenmechanisch verbesserten Sensorik und Informationsverarbeitung führen zu einem Paradigmenwechsel in verschiedenen Bereichen, von der Medizin bis zu den Materialwissenschaften. attocube systems will auch Nicht-Experten den Zugang zur Quantentechnologie ermöglichen und die Entwicklung für Messanwendungen beschleunigen. Seit mehr als drei Jahrzehnten ist die klassische Rastersondenmikroskopie das Mittel der Wahl, um Oberflächeneffekte auf der Nanoskala zu untersuchen. In den letzten Jahren ist es Pionieren auf diesem Gebiet gelungen, neue Quantensensoren, z. B. solche, die auf NV-Zentren in Diamant basieren, einzusetzen, um die Empfindlichkeit und Auflösung zu verbessern.



Prof. Dr. Khaled Karrai

Scientific Director
Cryogenic Instruments
attocube systems AG
Eglfinger Weg 2 | 85540 Haar
khaled.karrai@attocube.com

Unter den vielen Anwendungsgebieten solcher Sensoren eignen sich NV-Zentren auch, um fehlerkorrigierte Qubitsysteme zu etablieren. attocube systems unterstützt die Bemühungen, diese neuen Technologien für einen breiten Anwenderkreis zu etablieren, indem es einzigartige und benutzerfreundliche Plattformen für die Sensorik sowie zukünftige Diamant-basierte Qubitsysteme bereitstellt. Unsere extrem schwingungsarmen Kryostate, kombinierte Plattformen für Rasterkraft- und konfokale Mikroskopie sowie nanopräzise Positionierer bilden die Grundlage für Spitzenforschung.

The prospects of quantum-mechanically enhanced sensing and information processing are already shifting paradigms in various fields, from medicine to material science. attocube aims to enable the access to quantum technology to non-experts, and to speed up its development for measurement applications. For more than three decades, classical scanning probe microscopy has been the tool of choice for studying surface effects on the nanoscale. Over recent years, pioneers in this field have managed to employ new quantum sensors such as those based on NV centers in diamond to achieve true leaps in sensitivity and resolution.

Amongst the many fields of applications for such sensors, NV centers have also proven to be suitable for establishing error-corrected qubit systems. attocube systems supports efforts to establish these new techniques for a broad range of users by providing unique and user-friendly platforms for sensing as well as future diamond-based qubit systems. Our ultra-low vibration cryostats, combined atomic force, confocal microscopy platforms and nanoprecise positioners form the basis for cutting-edge scientific research.



MORE
INFO



ELEMENT SIX

Perfectly imperfect diamonds, uniquely engineered for quantum applications

Die Herausforderung bei der Entwicklung der Quantentechnologie besteht darin, dass Quantenzustände extrem fragil sind. Im Idealfall wären diese Zustände von ihrer Umgebung isoliert. Damit sie jedoch nutzbar sind, ist eine Form der Interaktion notwendig. Einige Anwendungen können die Zerbrechlichkeit dieser Zustände voll ausnutzen, z. B. hochempfindliche Sensoren zur Messung von Magnetismus, Temperatur und elektrischen Feldern, aber letztlich brauchen die Zustände immer noch ein gewisses Maß an Isolation, um angemessen kontrolliert werden zu können. Ein solches Gleichgewicht zwischen Kontrolle und Wechselwirkung ist eine Gratwanderung, die Quanteningenieurinnen und -ingenieure zunehmend durchlaufen wollen.

Diamant, der durch chemische Gasphasenabscheidung gewachsen wurde, ist aufgrund seiner Eigenschaften und Struktur die perfekte Wirtsplattform für Festkörper-Qubits. Eine Reihe bahnbrechender Studien zeigte, dass Stickstoff-Farbzentren einen Quantenspin besitzen, der mit einfachen optischen Techniken manipuliert und ausgelesen werden kann, sogar bei Raumtemperatur. Diese Farbzentren in Diamant ermöglichen innovative Lösungen, die eine beispiellose Empfindlichkeit und räumliche Auflösung bieten und derzeit aktiv für so unterschiedliche Anwendungen wie Sensoren zur Leistungssteigerung in Elektroautos und effizientere Diagnosegeräte für das Gesundheitswesen erforscht werden.

The challenge of developing quantum technology is that quantum states are extremely fragile. Ideally, these states would be isolated from the surrounding environment, but, for them to be useful, you also need to allow some form of interaction. Several applications can take full advantage of these states' fragility – for example, when developing highly



CVD-grown diamond unlocks applications in a range of industries, from water treatment, lasers and advanced cooling for semiconductors to quantum sensors.

sensitive sensors to measure magnetism, temperature and electric fields – but, ultimately, the states still need a degree of isolation to be adequately controlled. Such balance between control and interaction is the fine line quantum engineers are increasingly determined to traverse.

Diamond grown by chemical vapour deposition (CVD), by the very nature of its properties and structure, provides the perfect host platform for solid-state qubits. A series of remarkable pioneering studies from Stuttgart and Harvard showed that atom-line nitrogen (DNV) colour centres had quantum spin that could be manipulated and read out using simple optical techniques, even at room temperature. These DNV colour centres in diamond enable innovative solutions, which offer unprecedented sensitivity and spatial resolution and are currently actively being explored for applications as diverse as sensors to improve performance in electric cars and more efficient diagnostic tools for healthcare.



MORE
INFO



Dr. Daniel Twitchen

Chief Technologist

Element Six

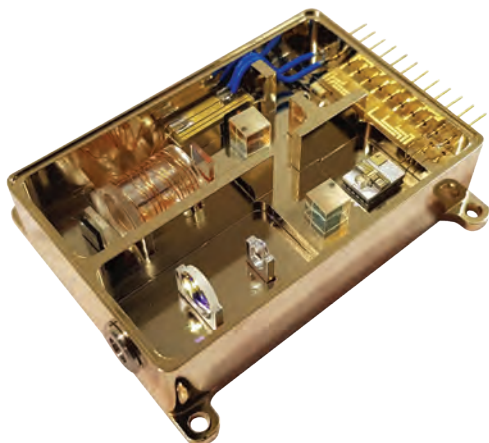
Fermi Avenue | Oxford OX11 9QR, UK

daniel.twitchen@e6.com



FRAUNHOFER CENTRE FOR APPLIED PHOTONICS CAP

Advanced laser technologies for quantum sensing



Compact narrow linewidth laser module for quantum sensing applications, which was developed in a joint project by Fraunhofer CAP and Alter Technology TÜV Nord UK Ltd.

Das »UK Quantum Technology«-Programm legt einen Schwerpunkt auf die Kommerzialisierung und unterstützt 35 Projekte, in denen das Fraunhofer CAP zu einem wichtigen Partner der Industrie geworden ist. Im Bereich der Quantensensorik hat das Fraunhofer CAP Pionierarbeit bei Laserquellen mit hohem TRL zum Einfangen und Kühlen von Atomen und Ionen und der damit verbundenen optischen Steuerungssysteme geleistet. Zu den Anwendungen, für die am CAP praxiserprobte Lasersysteme entwickelt werden, gehören die Magnetfeld- und die Inertialsensorik. Ein Beispiel für einen kommerziellen Erfolg war die Einführung eines kompakten Lasers mit schmaler Linienbreite, der aus einem gemeinsamen Projekt mit Alter Technology TÜV Nord UK Ltd. hervorgegangen ist.

Der Erfolg der Quantentechnologie wird von miniaturisierten, komplexen Bauelementen abhängen. Das Fraunhofer CAP leitet ein ehrgeiziges £10-Millionen-Projekt namens »QT Assemble« mit 14 Projektpartnern, um diese Vision mithilfe

von Wellenleiterschreiben, nanoskaliger Positionierung und monolithischer Integration zu verwirklichen. Selbstverständlich ist die Weiterentwicklung der Quantentechnologie ein Unterfangen von internationaler Tragweite. Daher arbeitet das Fraunhofer CAP mit internationalen Partnern zusammen, darunter die ESA und Partner aus dem gesamten Fraunhofer-Netzwerk, insbesondere das Fraunhofer IAF, Koordinator des »QMag«-Projekts, und viele weitere im Fraunhofer-Leitprojekt »QUILT«.

The UK Quantum Technology program has emphasized commercialization, supporting 35 collaborations in which Fraunhofer CAP has become a key delivery partner with industry. In the field of quantum sensing Fraunhofer CAP have pioneered high TRL laser sources for trapping and cooling atoms and ions and the associated optical control systems. Applications for which field deployable devices are being developed include gravitational field mapping and inertial navigation. An example of the commercial impact has been the launch of a compact narrow linewidth laser which emerged from a joint project with Alter Technology TÜV Nord UK Ltd.

It is clear that the uptake of quantum technology will depend upon small scale complex devices and Fraunhofer CAP is leading an ambitious £10m project, »QT Assemble«, with 14 collaborators, in order to deliver this vision using waveguide writing, nanoscale alignment and monolithic integration. The advancement of quantum technology is an international enterprise and Fraunhofer CAP is engaged with international partners including ESA and partners across the Fraunhofer network, notably Fraunhofer IAF, the coordinator of the »QMag« project, and many others in the lighthouse project »QUILT«.



Dr. Loyd McKnight

Theme Leader Quantum Technology
Fraunhofer CAP
Technology and Innovation Centre (TIC)
99 George Street | Glasgow G1 1RD, UK
loyd.mcknight@fraunhofer.co.uk



MORE
INFO

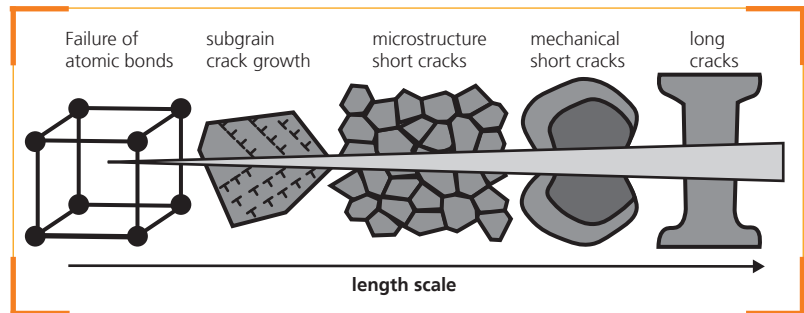


FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

Quantum mechanics of materials

Quantentechnologien bieten für die Materialforschung vielversprechende Zukunftsperspektiven. In der mechanischen Materialprüfung erkennen neuartige Quantenmagnetfeldsensoren mit extrem hoher Signalempfindlichkeit und Ortsauflösung auftretende Schädigungsvorgänge in Werkstoffgefügen schon bei deren Entstehung auf mikroskopischer Skala und nicht erst bei deren Ausbreitung auf makroskopischer Skala. Somit können materialbasierte mechanische Bewertungen von Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer technischer Anlagen deutlich verbessert werden. Für die physikalische Materialmodellierung versprechen neuartige Quantencomputersysteme, komplexe werkstoffmechanische und festkörperphysikalische Problemstellungen, die heute nur mit erheblichen Näherungen lösbar sind, in naher Zukunft viel genauer und schneller lösen zu können. Quantensensoren und Quantencomputer als nützliche Werkzeuge in die Werkstoffmechanik einzuführen, ist ein strategisches Zukunftsthema des Fraunhofer IWM.

Quantum technologies offer very promising prospects for materials research. In mechanical testing of materials, novel quantum magnetic-field sensors with extremely high signal sensitivity and spatial resolution recognize microstructural damage processes in materials already in their state of nucleation on the microscopic scale, well before macroscopic-scale propagation. Hence, materials-based mechanical assessments of the safety, reliability and durability of technical devices



Sketch of relevant length scales for cracks in materials; conventional sensors detect damage processes on the three scales on the right; quantum sensors will extend the detection range to the two scales on the left. [Originator: Martin Boeff, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2016), page 5, figure 1.3]

can be substantially improved. For physical modelling of materials, novel quantum computing systems promise to solve complex problems in mechanics of materials and solid-state physics which today can only be solved on the basis of considerable approximations, much faster and more accurately in near future. One of Fraunhofer IWM's key priorities for the future is to establish quantum sensors and quantum computers as useful tools for the mechanics of materials.



MORE
INFO



Prof. Dr. Christian Elsässer
Scientific Coordinator »Emerging Topics«
Fraunhofer IWM
Wöhlerstr. 11 | 79108 Freiburg
christian.elsaesser@iw.fraunhofer.de



QUANTUM BUSINESS NETWORK

We create the quantum future together!



The aims of the QBN Meetings are in particular the identification and discussion of relevant challenges and trends in R&D and industry as well as the initiation of collaborative innovation.

Als »the deepest of deeptech« bieten die Quantentechnologien künftig Lösungen für viele globale und gesellschaftliche Herausforderungen in unserem digitalen Zeitalter. Sie in reale Anwendungen zu überführen, ist eine gemeinsame Aufgabe.

Die Vision des Quantum Business Network (QBN) ist es, die deutsche und die europäische Quanten-Community zu einer starken Quanten-Industrie zu transformieren. Dazu fördern wir die Vernetzung, die Gründung und die Entwicklung von Organisationen in den Bereichen Quantencomputing, Quantensensorik, -metrologie und -imaging, Quantenkommunikation, Quantensimulation und Quanten-Schlüsseltechnologien.

Die QBN-Meetings zu diesen Subdisziplinen bieten Expertinnen und Experten und potenziellen Anwendern



Dipl.-Phys. Johannes Verst

CEO

Quantum Business Network UG

(haftungsbeschränkt)

Tal 44 | 80331 München

j.verst@quantumbusinessnetwork.de

aus Industrie und Wissenschaft ein vertrauensvolles Umfeld für den fachlichen Austausch und das persönliche Netzwerken sowie die Initiierung und Pflege von Partnerschaften. Den Auftakt machte das äußerst erfolgreiche erste QBN-Meeting zur Quantensensorik, unterstützt vom Fraunhofer IAF, mit dem Fokus auf Diamant-Quantensensorik. Wir schätzen die enge Zusammenarbeit mit den QBN-Mitgliedern sowie die herausragende Expertise, die jedes Mitglied in das junge und stetig wachsende Netzwerk einbringt, sehr.

As »the deepest of deeptech«, quantum technologies will provide future solutions to many global and societal challenges of our digital age. The task of transferring them into real applications is a collective one.

The vision of the Quantum Business Network (QBN) is to transform the German and the European quantum community into a strong quantum industry. To this end, we support networking, business creation and the development of organizations in the fields of quantum computing, quantum sensing metrology and imaging, quantum communication, quantum simulation and quantum enabling technologies.

QBN meetings on these subdisciplines offer experts and potential users from science and industry a trust-based environment for professional exchange and personal networking as well the opportunity to initiate and cultivate partnerships. The first QBN Meeting on Quantum Sensing, supported by Fraunhofer IAF, with a focus on diamond quantum sensing and was a highly successful kick-off event. We very much appreciate the close cooperation with the QBN members and the outstanding expertise that each member brings to this young and constantly growing network.



MORE
INFO



QNAMI AG

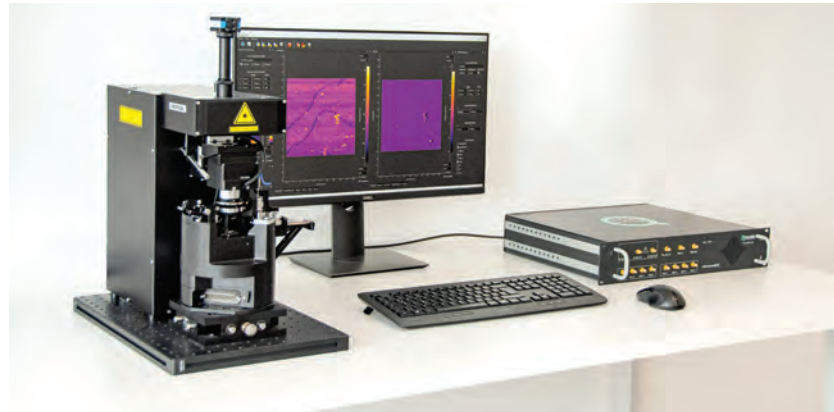
Unlocking quantum technology to enable a better world

Quantensensoren, die auf Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant basieren, können Magnetfelder mit beispielloser Präzision und Auflösung messen. Die extreme Empfindlichkeit der NV-Zentren gegenüber den umgebenden Magnetfeldern beruht auf dem quantenmechanischen Verhalten der NV-Zentren, das selbst bei Raumtemperatur erhalten bleibt und zur »optisch detektierten Magnetresonanzspektroskopie« (ODMR) genutzt werden kann. Die NV-Zentren haben ein gut vorhersagbares und reproduzierbares Verhalten, das eindeutige und quantitative Informationen über die Stärke und Richtung von Magnetfeldern liefert.

Das Qnami ProteusQ kombiniert NV-Diamantsensoren und Rastersondenmikroskopie-Techniken (SPM-Technik) in einer einzigen Plattform. Dies ermöglicht die gleichzeitige Erfassung der Topographie und der Oberflächenmagnetfelder einer Probe mit nanoskaliger Auflösung. Aufbauend auf Komponenten des SPM-Herstellers Horiba und hochreinem Diamant der Firma Element Six hilft das Qnami ProteusQ Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren, nanoskalige Eigenschaften von Proben zu verstehen und die Auswirkungen mikroskopischer Veränderungen in einem Design- oder Herstellungsprozess direkt zu erkennen.

Qnami ist stolz darauf, das Fraunhofer IAF als einen der ersten Kunden für das Qnami-ProteusQ-Mikroskop zu haben.

Quantum sensors based on nitrogen vacancy (NV) centers in diamond can measure magnetic fields with unprecedented precision. The extreme sensitivity of NV centers to surrounding magnetic fields is rooted in the NV's quantum-mechanical behavior – even at room temperature – and is exploited using a technique known as optically detected magnetic resonance



The Qnami ProteusQ allows the simultaneous acquisition of the sample's topography and its surface magnetic fields with nanoscale resolution.

(ODMR) spectroscopy. NV centers have a well predicted and reproducible behavior, which provides unambiguous and quantitative information on the strength and direction of magnetic fields.

The Qnami ProteusQ combines NV diamond sensors and scanning probe microscopy (SPM) techniques in a single platform. This allows simultaneous acquisition of a sample's topography and surface magnetic fields with nanoscale resolution. Building on components from SPM manufacturer Horiba and high purity diamond from Element Six, the Qnami ProteusQ helps scientists and engineers understand the subtle, nanoscale properties of samples and see directly the effect of microscopic changes in a design or fabrication process.

Qnami is proud to have Fraunhofer IAF as one of the first customers for the Qnami ProteusQ microscope.



MORE
INFO



Mathieu Munsch

CEO

Qnami AG

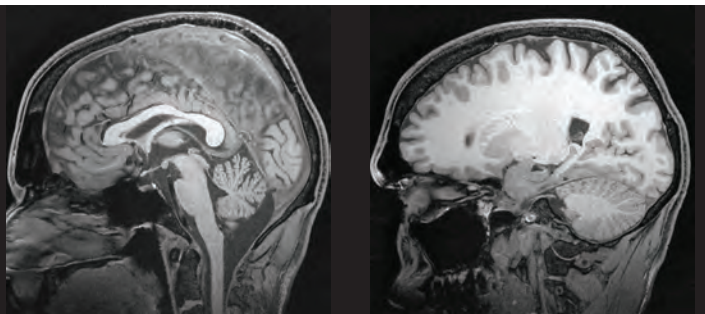
Hofackerstr. 40 B | 4132 Muttenz, CH

contact@qnami.ch



UNIVERSITY CLINIC FREIBURG, DEPT. OF RADIOLOGY, MEDICAL PHYSICS

Quantum sensing for magnetic resonance imaging



Magnetic resonance (MR) image of the head acquired on a 3T MR scanner, showing excellent anatomical detail of brain structures.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist ein hochempfindliches radiologisches Verfahren zur Diagnose und Therapiekontrolle bei einer Vielzahl von Erkrankungen. Tumore, Entzündungen, degenerative Veränderungen oder raumfordernde Prozesse können mit exzellenter Sensitivität und hoher räumlicher Auflösung dargestellt werden. Technisch gesehen stellt die MRT-Aufnahme eine Reihe messtechnischer Herausforderungen.

Die MRT verwendet zur Ortskodierung sogenannte Gradientenfelder, welche bewirken, dass die Resonanzfrequenz der gemessenen Signale ortsabhängig wird. Die Messung eines 2D- oder 3D-Bildes erfordert ein möglichst schnelles Schalten dieser Felder in allen zu kodierenden Raumrichtungen. Durch Imperfektionen der Gradientensysteme selbst oder auch

durch Wechselwirkungen mit der Umgebung (Wirbelströme) entstehen Abweichungen der tatsächlich generierten Felder vom Zielwert. Diese können zu starken Bildartefakten führen, sofern sie bei der Rekonstruktion nicht berücksichtigt werden. Eine dynamische Messung der Gradientenfelder mittels Quantensensoren bietet die Chance der dynamischen Feldmessung in Echtzeit und bildet die Voraussetzung für die Anwendung von neuen, sehr schnellen Messmethoden.

Magnetic resonance imaging (MRI) is a highly sensitive radiological procedure for diagnosis and therapy of degenerative processes and morphological changes. It can detect tumors, inflammations, degenerative changes or space-demanding processes with excellent sensitivity and high spatial resolution.

From a technical point of view, MRI presents a number of metrological challenges. MRI uses so-called gradient fields for spatial encoding, which cause the resonance frequency of the measured signals to become location-dependent. The measurement of a 2D or 3D image requires the coding of the fastest possible switching of these fields in all spatial directions. Imperfections in the gradient systems themselves or interactions with the environment (eddy currents) cause deviations of the actually generated fields for the target value. This can lead to severe image artifacts if they are not taken into account in the reconstruction. A dynamic measurement of gradient fields using quantum sensors offers the opportunity to take real-time dynamic field measurements and is the prerequisite for the application of new, very fast measurement methods.



Prof. Dr. Dr. h.c. Jürgen Hennig

Wissenschaftlicher Direktor
Klinik für Radiologie - Medizinphysik
Uniklinik Freiburg | Killianstr. 5A
juergen.hennig@uniklinik-freiburg.de



MORE
INFO



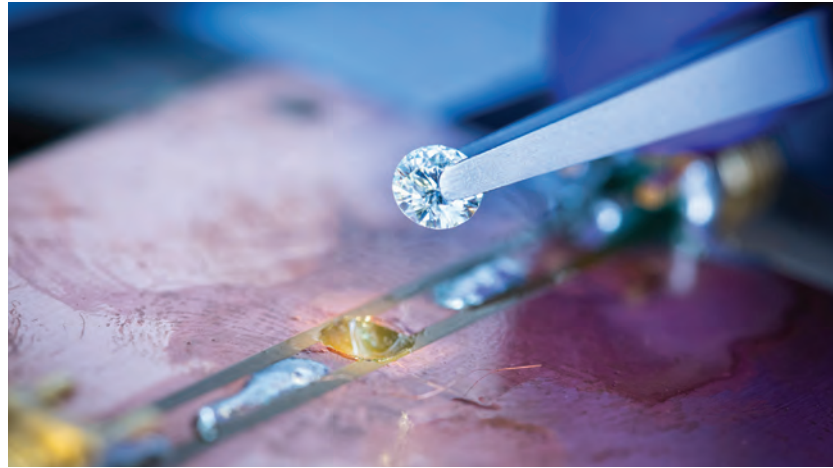
UNIVERSITÄT ULM, INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK

Quantum advantage of sensor systems

Quantensensoren haben das Potenzial, in den nächsten Jahrzehnten zu einer Schlüsseltechnologie für die Gesellschaft zu werden. Quantenzustände von Qubits erlauben es, externe Felder mit bisher unerreichter Genauigkeit und spektraler Auflösung zu messen. Die Quantensensorik unterscheidet sich von anderen Säulen der Quantentechnologien durch die Tatsache, dass die Kontrolle einiger weniger Qubits bereits den Vorteil von Quantensensoren gegenüber ihren klassischen Wettbewerbern bietet und die Schwelle zum Quantenvorteil erreichen kann. Ein Beispiel für Anwendungen sind ultrasensitive Messungen von Magnetfeldern auf der Basis von Farbzentren in Diamant. Farbzentren in Diamant besitzen unter Umgebungsbedingungen eine lange Kohärenzzeit und können optisch ausgelesen werden. Ein externes Magnetfeld beeinflusst den Quantenzustand des Diamant-Qubits und ermöglicht so Sensor-Protokolle.

Unser Team an der Universität Ulm entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF eine Quantensensor-Plattform basierend auf Diamant, die in der Lage ist, unter Umgebungsbedingungen zu funktionieren und eine Präzision zu erreichen, die den Nachweis des Magnetfelds des Gehirns ermöglicht. Weitere Anwendungen dieser Technik finden sich in der Automobilindustrie, in der medizinischen Diagnostik und in der Forschung im Zusammenhang mit Weltraummissionen.

Quantum sensors have the potential to become a key technology for society in the coming decades. Quantum states of qubits allow external fields to be measured with unprecedented accuracy and spectral resolution. Quantum sensing can be distinguished from other pillars of quantum technologies by the fact that control of only a few qubits already offers



Color centers in diamond allow for ultra-sensitive measurements of magnetic fields.

the advantage of quantum sensors over their conventional competitors and can reach the quantum advantage threshold. One example of applications is the ultra-sensitive measurement of magnetic fields based on color centers in diamond. Color centers in diamond have a long coherence time under ambient conditions and can be read out optically. An external magnetic field influences the quantum state of the diamond qubit, enabling sensor protocols.

In collaboration with Fraunhofer IAF, our team at Ulm University is developing a diamond-based quantum sensing platform which is able to function under ambient conditions and can achieve a precision that allows the detection of the magnetic field of the brain. Further applications of this technology can be found in the automotive industry, in medical diagnostics and in research related to space missions.



MORE
INFO



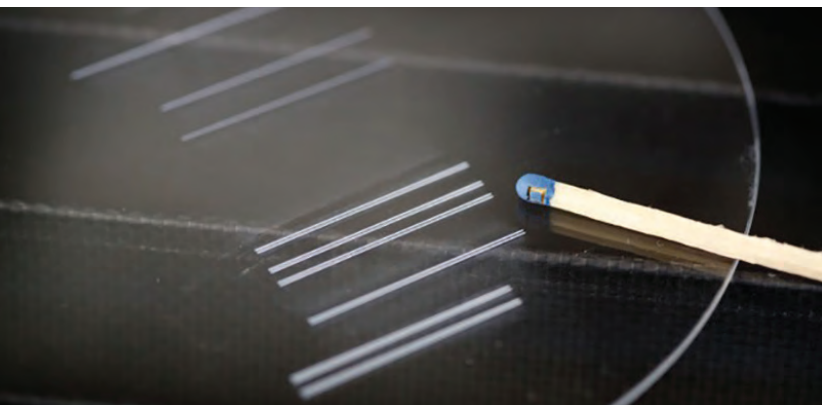
Prof. Dr. Fedor Jelezko

Director, Institute for Quantum Optics
Ulm University
Albert-Einstein-Allee 11 | 89081 Ulm
fedor.jelezko@uni-ulm.de



Q.ANT

Industrial quantum technologies based on photonics



Loss-optimized nonlinear waveguides on a 3" wafer.

Quantentechnologien sind für uns nichts Neues. Ganz im Gegenteil, sie haben das 20. Jahrhundert technologisch maßgeblich mitbestimmt. Zu den Erfolgsgeschichten, welche unseren Alltag nachhaltig verändert haben, gehören z. B. der Halbleiter, die Magnetresonanztomographie oder der Laser. Gleichzeitig haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durch die experimentelle Demonstration von quantenmechanischen Effekten, wie Verschränkung und Superposition, die Grundlage dafür gelegt, die volle Bandbreite der Quantenmechanik in Produkte zu überführen. Durch die gezielte Ausnutzung dieser Effekte werden wir im 21. Jahrhundert technologische Revolutionen auf dem Gebiet des Computings, der Kommunikation, der Bildgebung und der Sensorik erleben. Mit der Gründung von Q.ANT im Jahr 2018 haben wir es uns zur Aufgabe gemacht, einen wesentlichen Teil zu dieser technologischen Revolution beizutragen. Dabei haben wir unseren Fokus in unseren ersten zwei Jahren darauf gelegt, die für viele Quantentechnologien benötigten photonischen und opto-elektronischen Komponenten wei-

terzuentwickeln. Unser Hauptfokus liegt dabei immer darauf, diese Komponenten für den späteren industriellen Einsatz sowohl nach qualitativen als auch fertigungstechnischen Aspekten zu optimieren. Beispiele hierfür sind chipbasierte nichtlineare Wellenleiter oder rauscharme elektrooptische Schaltkreise. Aus diesem so entstandenen Framework haben wir in enger Kooperation mit unseren Partnern bereits begonnen, erste Systeme für die Gebiete Bildgebung und Sensorik zu realisieren.

Quantum technologies are not new. On the contrary, they have played a major role in shaping the technology of the 20th century. Among the success stories that have changed our everyday lives forever are semiconductors, magnetic resonance imaging, and lasers. At the same time, scientists have laid the foundations for transforming the full range of quantum mechanics into products by experimentally demonstrating quantum mechanical effects such as entanglement and superposition. The systematic exploitation of these effects, will lead to technological revolutions in the field of computing, communications, imaging, and sensor technology in the 21st century. With the founding of Q.ANT in 2018, we have made it our mission to make a significant contribution to this technological revolution. In our first two years, we concentrated our efforts on further developing the photonics and optoelectrical components required for a large variety of quantum technologies. Our main focus was to optimize these components for later industrial use from both qualitative and manufacturing aspects. Examples include chip-based nonlinear waveguides and low-noise electro-optical circuits. From this framework we have, working closely with our partners, already started to realize first systems for imaging and sensor technologies.



Dr. Michael Förtsch

Chief Executive Officer

Q.ANT GmbH

Handwerkstr. 29 | 70565 Stuttgart

michael.foertsch@qant.gmbh



MORE
INFO



QZabre GMBH

Nanometer scale magnetic fields made visible with quantum sensing

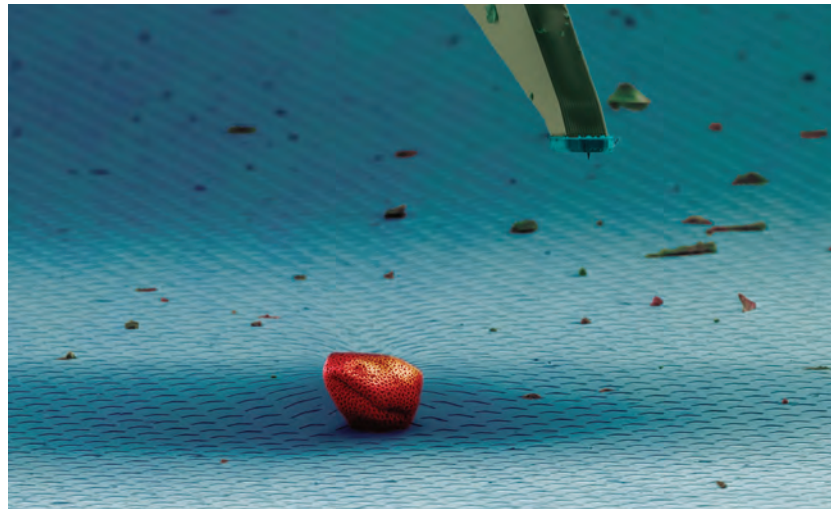
Quantensensoren mit einzelnen NV-Zentren bieten eine neue Methode zur quantitativen Abbildung magnetischer Signale im Nanometerbereich in einem kompakten Gerät unter Standardbedingungen.

Dieser vielseitige Sensor ist nicht auf magnetische Materialien limitiert, sondern ist auch in der Lage, eine Vielzahl anderer Effekte zu messen, wie die räumliche Verteilung elektrischer Stromdichten oder zeitaufgelöste elektrische Signale.

Aufgrund der hohen Komplexität von Scanning-NV-Systemen bieten wir mit dem QSM ein schlüsselfertiges System an, welches es dem Nutzer ermöglicht, sich auf die relevanten Messungen zu konzentrieren. Unsere intuitive Steuerungssoftware erleichtert dem Nutzer zusätzlich das Einstellen und Aufsetzen einer Messung. Durch die optimierte Hardware wird zudem die maximale Sensitivität bereitgestellt, was sich in schnelleren Scans und höherer Qualität der Messungen widerspiegelt.

Im Herzen dieses Systems befinden sich unsere Diamantspitzen, welche von uns kontinuierlich weiterentwickelt werden. Zusätzlich bieten wir Sensoren mit in-plane-NV-Orientierung an – eine Weltneuheit, die es ermöglicht, Messungen durchzuführen, die starke Magnetfelder in der Ebene benötigen.

Quantum sensing with a single nitrogen vacancy center is a novel method that provides quantitative nanometer scale magnetic maps in a compact system in ambient conditions.



The versatile sensor is not limited to magnetic materials, but can also map currents and electric fields, for example, as well as time-resolved electrical signals.

Scanning NV systems are highly complex, which is why we offer the QSM turnkey, which enables users to focus on acquiring data of interest. An intuitive software interface relieves users of standard setup tasks and the optimized hardware provides maximum sensitivity, which translates to fast scanning speeds.

Diamond scanning probes are at the heart of these systems and we continually improve sensitivity. In addition, we also offer a world first: scanning tips with in-plane NV axis, crucial for high magnetic bias measurements.



MORE
INFO



Dr. Jan Rhensius

CEO

QZabre GmbH

HPF

Otto-Stern-Weg 1/F5 | 8093 Zürich | CH

jan@qzabre.com



ANHANG

Appendix



” Die Quantentechnologie hat das Potenzial, Computing, Sensorik und Kommunikation in einem breiten Spektrum von Branchen zu revolutionieren. Keysight Technologies, ein führendes Technologieunternehmen, das Unternehmen, Dienstleistungsanbietern und Regierungen hilft, Innovationen zu beschleunigen, um die Welt zu verbinden und zu sichern, treibt den Fortschritt in der Forschung und Entwicklung von Quantencomputing und -technik voran. Wir freuen uns, mit dem Fraunhofer IAF bei angewandten Anwendungen zusammenzuarbeiten, um Innovationen für Industrie und Forschung zu fördern.

Quantum technology has the potential to revolutionize computing, sensing and communications across a broad range of industries. Keysight Technologies, a leading technology company that helps enterprises, service providers and governments accelerate innovation to connect and secure the world, is driving advancements in the research and development of quantum computing and engineering. We are happy to cooperate with Fraunhofer IAF on applications in order to drive innovation in research and industry.

Jose Luis Preciado, Business Development Manager EMEA | Quantum Engineering Solutions | Keysight Technologies

100 DAS INSTITUT IN ZAHLEN
The institute in figures

102 KURATORIUM
Advisory Board

106 HÖHEPUNKTE 2020
2020 Highlights

112 AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT
From idea to product

113 WIE SIE MIT UNS KOOPERIEREN KÖNNEN
How you can work with us

114 FORSCHUNGSFABRIK MIKRO-
ELEKTRONIK DEUTSCHLAND
Research Fab Microelectronics Germany

115 WEITERE KOOPERATIONSPARTNER
Other research partners

116 AUSBILDUNG UND LEHRE
Education and teaching

118 ABSCHLUSSARBEITEN
Theses

121 FAKTEN UND ZAHLEN
Facts and figures

122 PATENTE
Patents

124 ORGANIGRAMM
Organigram

127 FÜR BEWERBER*INNEN
Jobs@IAF

128 IMPRESSUM
Publication details

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

The institute in figures

Das Fraunhofer IAF rechnet im Jahr 2020 mit einem gegenüber dem Vorjahr um mehr als 8,6 Mio. € höheren Betriebshaushalt, welcher bei ca. 40,0 Mio. € liegen wird. Hierfür sind einerseits deutlich gestiegene Personalaufwendungen und andererseits ein außergewöhnlicher Anstieg der Sachaufwendungen im Zusammenhang mit der vom Land Baden-Württemberg finanzierten Startleasingrate eines Quantencomputers verantwortlich. Letztere liegen bei geschätzten 19,7 Mio. €, wobei der erwähnte Sondereffekt ca. 6 Mio. € ausmacht. Für 2021 sind bezüglich der Personalaufwendungen lediglich Tarifsteigerungen eingeplant, während 2022 bei entsprechender wirtschaftlicher Lage wieder ein realer Anstieg angestrebt wird. Die laufenden Investitionen werden aufgrund bereits 2019 angestoßener, aber erst 2020 realisierter Beschaffungen auf dem Rekordniveau von 10,6 Mio. € erwartet. Zusätzlich werden letztmalig noch 2,8 Mio. € im Rahmen des BMBF-finanzierten Programms »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« für Ausbauinvestitionen verwendet. Aufgrund des aktuell hohen Niveaus sind die Investitionen für die beiden Folgejahre deutlich niedriger geplant.

Ein sehr großer Teil des Gesamthaushalts wird 2020 weiterhin vom BMVg mit einem Anteil von ca. 39 % finanziert, wobei aufgrund des oben erwähnten Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg erstmals der zivile Anteil mehr als 50 % beträgt. Bei den Industrieerträgen wird vor allem bedingt durch die Corona-Krise ein Rückgang von ca. 0,9 Mio. € auf ca. 4,1 Mio. € erwartet, was einen Anteil von ca. 16,4 % an den zivilen Forschungsaktivitäten bedeutet. Deutliche Steigerungen öffentlicher Projekterträge sowie bei der Einwerbung Fraunhofer-interner Mittel fangen den Rückgang zwar auf, jedoch könnte sich erstmals seit langem ein schwach negatives operatives Ergebnis und daher ein ungeplanter Abbau der Institutsreserven ergeben.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten liegt 2020 bei 232. In absoluten Zahlen arbeiten 305 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon sind 32 % weiblich. Von diesen 305 sind 219 direkt in der Forschung und 86 in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. 42 Personen arbeiten an ihrer Doktor- oder Masterarbeit, 4 Personen sind zu ihrer Berufsausbildung beschäftigt bzw. studieren dual.

Fraunhofer IAF expects its operating budget for 2020 to be more than € 8.6 million higher than in the previous year, at about € 40.0 million. This is due to a significant increase in personnel expenses on the one hand and an extraordinary increase in material expenses in connection with the start-up leasing rate of a quantum computer financed by the state of Baden-Württemberg on the other. The latter are estimated to amount to € 19.7 million, with the former accounting for approx. € 6 million. With regard to personnel expenses, only collective wage increases are planned for 2021, with a real increase being awarded in 2022 if the economic situation permits. Current investments are expected to reach the record level of € 10.6 million as a result of procurements initiated in 2019 but not realized until 2020. In addition, € 2.8 million will be used for the last time to fund investment in expansion within the framework of the BMBF-financed program »Research Factory Microelectronics Germany«. Due to their current high level, planned investments are significantly lower for the following two years.

A very large part of the total budget will continue to be financed by the Federal Ministry for Defense in 2020, with a share of approx. 39 %, with the civil share exceeding 50 % for the first time due to the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg mentioned above. Industrial revenues are expected to decrease by approx. € 0.9 million to approx. € 4.1 million, mainly due to the coronavirus crisis, which equates to approx. 16.4 % of civil research activities. Significant increases in public project revenues as well as in the acquisition of internal Fraunhofer funds will compensate for the decline, but for the first time in a long time there could be a slightly negative operating result and therefore an unforeseen reduction in the Institute's reserves.

The number of full-time equivalent employees in 2020 is 232. The absolute number of employees working at Fraunhofer IAF is 305, 32 % of whom are female. Of these 305, 219 work directly in research and 86 in infrastructure and management. 42 individuals are working on their doctoral or master's thesis, 4 are engaged in professional training or are working while studying (dual studies).

**MITARBEITER /
- INNEN** *Employees*

GESAMTHAUSHALT (as of 10/2020)
Total budget

305 50.6 MILLION €

DAVON

Of which

VON DEN 50,6 MILLIONEN €

Of these € 50,6 million

91

Wissenschaftler/-innen
in Fachabteilungen
Scientists in R&D departments

86

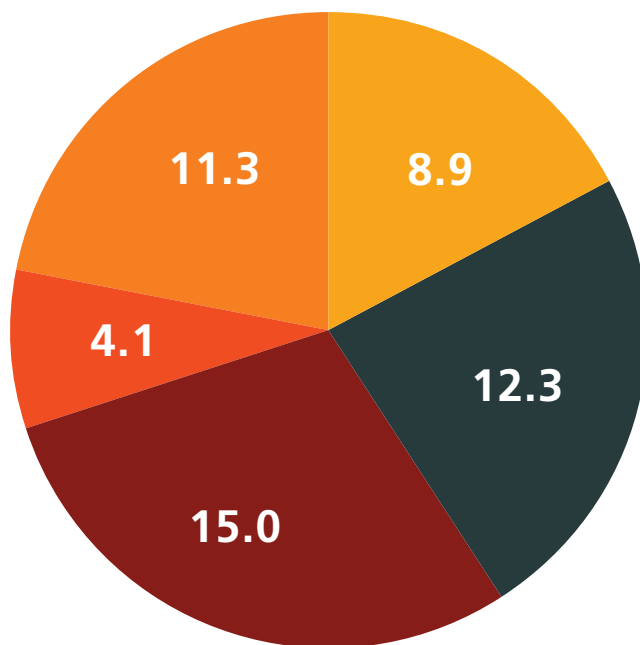
Nichtwissenschaftliche
Mitarbeiter/-innen in
Fachabteilungen
*Other staff in R&D
departments*

42

Masterstudierende /
Doktoranden/-innen
in Fachabteilungen
*Masters & PhD students in R&D
departments*

86

Infrastruktur & Leitung
Infrastructure & management



- BMVg – Grundfinanzierung
MoD basic funding
- BMVg – Projektfinanzierung
MoD project funding
- Zivile Grundfinanzierung
Basic civic funding
- BMBF, EU, Sonstige
MoER, EU, other
- Industrie
Industry

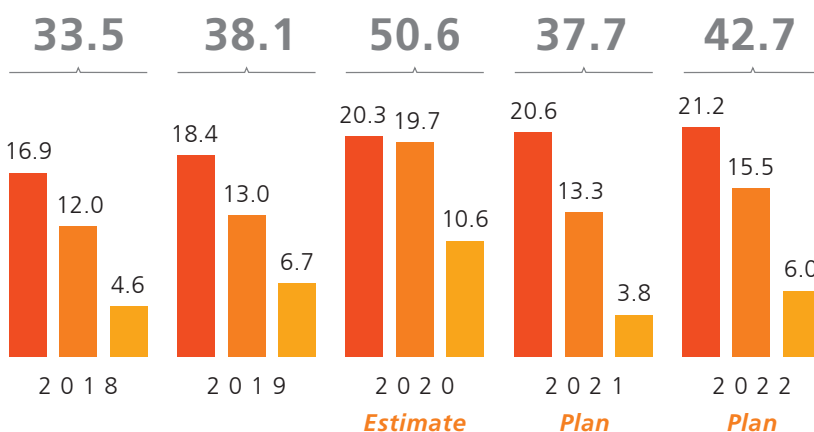
GESAMTHAUSHALTS-AUSGABEN IN MIO. €

Total budget outlay in million €

■ Personalaufwendungen
Personnel costs

■ Sachaufwendungen
Non-personnel costs

■ Investitionen
Investment



KURATORIUM

Advisory Board

Das Kuratorium, ein Expertengremium mit Vertretern aus Industrie, Forschung und Politik, begleitet die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IAF und berät den Institutsleiter sowie den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft.

The Advisory Board is made up of experts from industry, universities, and the Federal Ministries and monitors Fraunhofer IAF's research program, advising the Director and the Executive Board of the Fraunhofer-Gesellschaft.

Dr. Klaus Beilenhoff

United Monolithic Semiconductors GmbH, Ulm

Prof. Dr. Jérôme Faist

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Johannes Koeth

nanoplus GmbH, Gerbrunn

Dr. Jens Kosch

X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt

Prof. Dr. Juerg Leuthold

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Tomas Krämer

Forschungskordinator / Research Coordinator

Fraunhofer-Gesellschaft, München

MinR Dipl.-Phys. Claus Mayer

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und

Wohnungsbau Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Ulf Meiners

Vorsitzender / Chairman

NICHIA Chemical Europe GmbH, Kronberg i. T.

Dr. Thomas Metzger

Qualcomm Germany RFFE GmbH, München

Dr. Thomas Roedle

Ampleon Netherlands B.V., Nijmegen, Niederlande

Dr. Dietmar Schill

Sony Europe B.V., Stuttgart

Andreas Wälti

Evatec AG, Trübbach, Schweiz

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



” Das Fraunhofer IAF – immer wieder einer der besten Ansprechpartner für anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung in Europa.

Dr. Ulf Meiners
NICHIA Chemical Europe GmbH

Fraunhofer IAF – always one of the best contacts for application-oriented research and development in Europe.

” Das Fraunhofer IAF ist eine sehr dynamische, hoch innovative Forschungseinrichtung mit tollen Menschen, die zukunftsweisende Technologien erforschen, Wissensgebiete verbinden und sehr erfolgreich Brücken von der Wissenschaft zur industriellen Anwendung bauen.

Fraunhofer IAF is a very dynamic, highly innovative research institution with great people who explore forward-looking technologies, connect fields of knowledge and successfully build bridges between science and industrial application.

Dr. Jens Kosch
X-FAB Semiconductor Foundries GmbH



” Jeder von uns kommt täglich mit den Technologien, die am IAF entwickelt werden, in Berührung – darum bin ich mit Herzblut als Vertreter der Wirtschaft und als Technologiepartner im Kuratorium.

Andreas Wälti
Evatec AG

All of us come into contact with the technologies developed at IAF on a daily basis – that’s why I’m a passionate member of the Advisory Board, both as a representative of industry and as a technology partner.

” Nach 13 Jahren, davon drei als Kuratoriumsmitglied, freue ich mich auf viele weitere Jahre der vertrauensvollen und grenzverlegenden Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF und seinen kreativen und motivierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

After 13 years, 3 of them as an Advisory Board member, I look forward to many more years of trust and cross-cutting collaboration with Fraunhofer IAF and its creative and motivated staff.

Dr. Thomas Roedle
Ampleon Netherlands B.V.





Als Mitglied des Kuratoriums, aber auch als aktiver Forscher, verfolge ich die Aktivitäten des IAF in Freiburg seit nunmehr 20 Jahren. Dabei begeistere mich immer wieder, wie das IAF Spitzenforschung von den Grundlagen bis zum gereiften Produkt realisiert.

Prof. Dr. Juerg Leuthold
ETH Zürich

As a member of the Advisory Board, but also as an active researcher, I have been following the activities of the IAF in Freiburg for 20 years now. Again and again, I am fascinated by the way IAF realizes top-level research from the basics to the mature product.



Ich bin bereits vier Jahre Kuratoriumsmitglied und verfolge mit großem Interesse, wie sich das IAF zu einem Zentrum für Quantentechnologien in Deutschland entwickelt.

I have been a member of the Advisory Board for four years now and am observing with great interest IAF's development into a center for quantum technologies in Germany.

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup
3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



Das Fraunhofer IAF ist ein dynamisches Institut, das immer wieder für Fraunhofer Zukunftsthemen an vorderster Front erschließt.

Dr. Tomas Krämer
Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer IAF is a dynamic institute that is continually at the forefront of opening up future topics for Fraunhofer.



Ich bin schon seit vielen Jahren eng mit dem IAF verbunden. Aktuell ist das IAF für das Wirtschaftsministerium ein zentraler Ansprechpartner für die Aktivitäten zu Quantentechnologien der zweiten Generation.

I have been closely connected with IAF for many years. IAF is currently a key point of contact for the Ministry of Economics in relation to work on second generation quantum technologies.

MinR Dipl.-Phys. Claus Mayer
*Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und
Wohnungsbau Baden-Württemberg*



”

Aufgrund der durch COVID-19 bedingten Absage der Kuratoriumssitzung 2020 wurde mir nachdrücklich bewusst, wie sehr ich den Informationsaustausch und die Diskussionen schätzen gelernt habe.

As a result of the cancellation of the 2020 meeting of the Advisory Board due to COVID-19, I became keenly aware of how much I have learned to appreciate the exchange of information and the discussions.



Dr. Thomas Metzger

Qualcomm Germany RFFE GmbH

”

Ich bin froh, mit dem IAF und seinen innovationsbegeisterten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern nun schon seit 20 Jahren als Projektpartner, Kunde und in den letzten drei Jahren auch als Mitglied des Kuratoriums zusammenzuarbeiten.

I am happy to have been working with IAF and its innovative staff for 20 years now as a project partner, customer and in the last three years as a member of the Advisory Board.



Dr. Johannes Koeth

nanoplus GmbH

”

Am Fraunhofer IAF begeistert mich jedes Jahr aufs Neue die Verbindung von theoretischer Grundlagenforschung mit deren praktischer Umsetzung mittels modernster Prozesse und Methoden.

Every year at Fraunhofer IAF I am fascinated by the combination of basic theoretical research and its practical implementation using state-of-the-art processes and methods.



Dr. Dietmar Schill

Sony Europe B.V.

”

Das Fraunhofer IAF ist wichtiger Bestandteil unseres Forschungsnetzwerks – wir sind dankbar für die jahrelange intensive und befruchtende Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen beim IAF.

Fraunhofer IAF is an important part of our research network – we are grateful for our years of intensive and fruitful collaboration with our colleagues at IAF.



Dr. Klaus Beilenhoff

United Monolithic Semiconductors GmbH

HÖHEPUNKTE 2020

2020 Highlights



23. Januar 2020

Um im globalen Wettstreit um die »Quantum Supremacy« am Ball zu bleiben, bedarf es europaweiter interdisziplinärer Kooperation. Daher luden das Fraunhofer IAF und der Fraunhofer-Verbund IUK-Technologie am 23. Januar zum Workshop »Quantencomputing«.

Rund 100 Teilnehmer aus Forschung, Politik und Industrie nahmen teil und tauschten ihre Einschätzungen, Angebote und den aktuellen Stand der Technik des Quantencomputings in Europa aus. Es entstand ein reger Dialog zwischen Unternehmen wie BASF, Volkswagen und Bosch, innovativen Start-ups und Vertretern aus Wissenschaft und Politik.

Das komplexe Zusammenspiel von Hardware und Software wurde ebenso intensiv diskutiert wie die nötige Stärkung der Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs. Konsens bestand auch im Verständnis des Quantencomputings als interdisziplinäres Thema, das internationaler Kooperationen bedarf, um Europa als unabhängigen quantentechnologischen Standort zu etablieren.

January 23, 2020

Europe-wide interdisciplinary collaboration is necessary to stay on top of the global competition for quantum supremacy. To this end, Fraunhofer IAF and the Fraunhofer ICT Group hosted a workshop on quantum computing on January 23, 2020.

About 100 participants from research, politics and industry attended the workshop and exchanged views on the latest developments in quantum computing in Europe. A lively dialogue ensued between representatives of large companies such as BASF, Volkswagen and Bosch, but also innovative start-ups, scientists and representatives from politics.

The complex interaction of hardware and software was discussed just as intensively as the need to strengthen the training of young scientists. There was also consensus on the understanding of quantum computing as an interdisciplinary topic where international cooperation is required in order to establish an independent European quantum technology ecosystem.



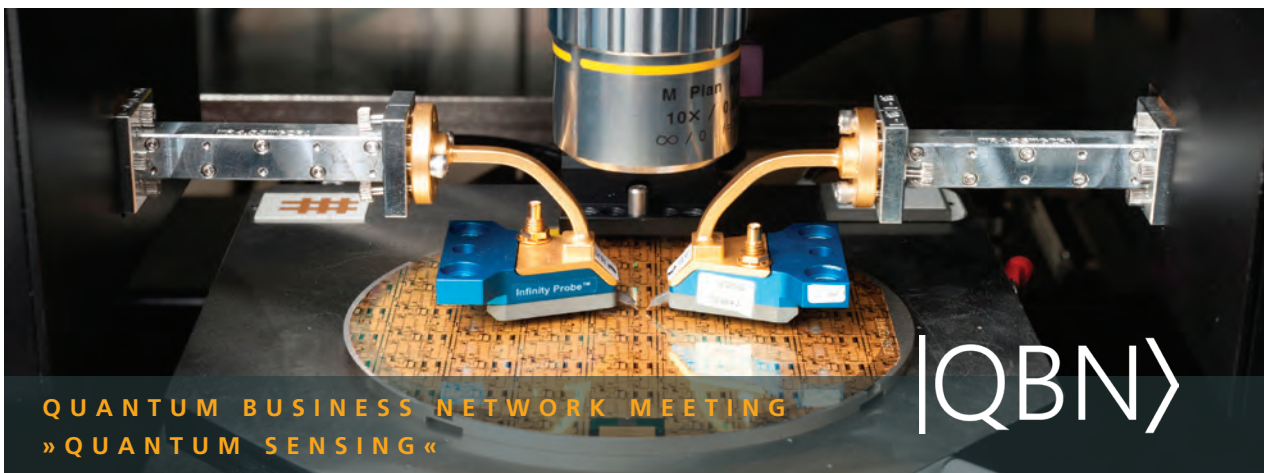
7.–8. Juli 2020

2020 fand die PCIM Europe zum ersten Mal als digitales Event rund um das Thema Leistungselektronik statt. Das Fraunhofer IAF stellte seine innovativen und anwenderfreundlichen hochintegrierten GaN-Spannungswandler der 600-V-Klasse vor. Diese sind sehr kompakt gehäust, arbeiten extrem ressourcenschonend und können modular eingesetzt werden.

July 7–8, 2020

In 2020, PCIM Europe, a power electronics fair, took place for the first time as a digital event. Fraunhofer IAF presented innovative and user-friendly highly integrated GaN voltage converters of the 600 V class in compact packaging, which are extremely resource-efficient and can be used on a modular basis.

WATCH VIDEO



2. Oktober 2020

Unterstützt durch das Fraunhofer IAF fand 2020 das erste QBN-Meeting zur Quantensensorik als digitales Event statt. Führende Expertinnen und Experten tauschten sich in Impuls- und Fachvorträgen darüber aus, wie die Diamant-Quantensensorik Innovationen jenseits der klassischen Grenzen und mit einzigartiger Leistung ermöglichen. Das IAF präsentierte Forschungsergebnisse in der Magnetometrie für Medizintechnik, Neurologie, Mikro-/Nanoelektronik und Materialwissenschaft.

October 2, 2020

Supported by Fraunhofer IAF, the first QBN meeting on quantum sensors took place as a digital event in 2020. In keynote speeches and specialist presentations, leading experts from science and industry exchanged ideas about how diamond quantum sensors enable innovations to go beyond conventional limits and achieve unique performance. IAF presented research results in magnetometry for medical technology, neurology, micro-/nanoelectronics and materials science.



BERUFUNG ZUR »FRITZ-HÜTTINGER-PROFESSUR FÜR ENERGIEEFFIZIENTE HOCHFREQUENZELEKTRONIK«

APPOINTMENT TO THE »FRITZ HÜTTINGER PROFESSORSHIP FOR ENERGY EFFICIENT HIGH FREQUENCY ELECTRONICS«

MORE
INFO



27. August 2020

Mit dem Ziel, die Entwicklung innovativer Technologien im Bereich elektrischer Energien voranzubringen, wurde der stellvertretende Institutsleiter Prof. Dr. Rüdiger Quay auf die neu eingerichtete Namensprofessur für Energieeffiziente Hochfrequenzelektronik am Institut für Nachhaltige Technische Systeme berufen. Ermöglicht wird die Professur durch die großzügige Spende von einer Million Euro über zehn Jahre durch die Fritz Hüttinger Stiftung sowie die Unterstützung des Fraunhofer IAF.

Prof. Dr. Rüdiger Quay möchte mit seiner Professur das Verständnis und die Optimierung der Effizienz und Robustheit elektrischer Komponenten und Systeme mit Anwendungen u. a. in der Energie-, Kommunikations-, Sicherheits- und Sensortechnik erforschen. Für Studierende und Promovierende ergibt sich die Möglichkeit, von der Expertise am IAF sowie dessen hochmoderner Infrastruktur zu profitieren sowie in Projekten mit namhaften Industriepartnern praktische Erfahrungen zu sammeln.

August 27, 2020

With the aim of advancing the development of innovative technologies in the field of efficient electronics, Deputy Institute Director Prof. Dr. Rüdiger Quay was appointed to the newly endowed Professorship for Energy-Efficient Radio-Frequency Electronics at the Department of Sustainable Systems Engineering at the University of Freiburg. This professorship is made possible by the generous donation of one million euros over ten years by the Fritz Hüttinger Foundation and the support of Fraunhofer IAF.

The goal of the professorship is to understand and optimize the efficiency and robustness of electrical components and systems in applications for fields such as energy technology, communications technology, security technology, and sensor technology. Students and doctoral candidates will benefit from Fraunhofer IAF's expertise and state-of-the-art infrastructure. They will also have the opportunity to gain practical experiences and participate in projects with renowned industrial partners.



KOMPETENZZENTRUM
QUANTENCOMPUTING
BADEN - WÜRTTEMBERG

COMPETENCE CENTER
QUANTUM COMPUTING
BADEN - WÜRTTEMBERG



1. Februar 2020

Am 1. Februar 2020 fiel der Startschuss für das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg (KQC), das Zugriff auf den ersten IBM-Quantencomputer auf deutschem Boden bietet. Der Standort ermöglicht den Betrieb dieses Quantencomputers unter deutscher Gesetzgebung und die Erfüllung europäischer Datenschutzerfordernungen. Damit können Großunternehmen, KMUs, Start-ups und Universitäten den anwendungsbezogenen Einsatz des Quantencomputings für Ihre Anwendungen testen.

Interessierte regionale universitäre und außer-universitäre Einrichtungen sowie Unternehmen werden im Rahmen von Verbundprojekten, über die Auftragsforschung oder durch Mitgliedschaften in das Kompetenzzentrum eingebunden. Zusätzlich können Interessierte vom umfangreichen Schulungsprogramm profitieren. Neben dem Fraunhofer IAF wird das KQC vom Fraunhofer IAO koordiniert und vom Land Baden-Württemberg gefördert.

February 1, 2020

On February 1, 2020, the starting signal was given for the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg, which provides access to the first IBM quantum computer in Germany. The location enables this quantum computer to operate under German legislation and to meet European data protection requirements. This allows large companies, SMEs, start-ups and universities to test the application-oriented use of quantum computing for their applications.

Interested regional university and non-university institutions and companies are brought into the Competence Center through collaborative projects, contract research or memberships. In addition, interested parties can benefit from the extensive training program. The Competence Center is jointly coordinated by Fraunhofer IAF and Fraunhofer IAO, and is funded by the state of Baden-Württemberg.

MORE
INFO





NEUE SOFTWARE FÜR DEN REINRAUM

NEW SOFTWARE FOR THE CLEANROOM

Der Reinraum des Fraunhofer IAF bekam 2020 eine neue Software zur Planung und Steuerung der Prozesse – ein sogenanntes MES (»Manufacturing Execution System«). Im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) haben die beteiligten Institute beschlossen, eine gemeinsame Software anzuschaffen, die den institutsübergreifenden Austausch von Daten und Proben erleichtern soll.

Am Fraunhofer IAF startet der Reinraum mit der neuen Software, die alle relevanten Prozessdaten in einer einheitlichen Datenbank zusammenfasst. Nach und nach werden dann auch alle anderen Abteilungen an die Software angeschlossen – das macht die Zusammenarbeit einfacher, Auswertungen schneller und die Prozesse digitaler.

In 2020, the Fraunhofer IAF clean room was given new software for planning and controlling processes – known as an MES (Manufacturing Execution System). Within the framework of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD), the participating institutes have decided to purchase joint software that will facilitate the exchange of data and samples between institutes.

At Fraunhofer IAF, the clean room will start working with the new software, which will combine all relevant process data into a standardized database. Gradually, all other departments will then also be connected to the software – making collaboration easier, evaluations faster and processes more digital.



ERFOLGREICHE RADLER



SUCCESSFUL CYCLISTS

13. September 2020

September 13, 2020

Das Team »Feste Körper« des Fraunhofer IAF gab beim Radrennen »Schauinslandkönig« alles: Bei herrlichem Wetter und vor der traumhaften Schwarzwald-Kulisse erklimmen die Radler den Freiburger Hausberg und legten dabei eine Strecke von 11,5 km und 771 Höhenmetern zurück. Tolle Leistung!

The »Solid States« team from Fraunhofer IAF gave their all at the »Schauinslandkönig« cycle race: in glorious weather and against the fantastic backdrop of the Black Forest, the cyclists climbed Freiburg's local mountain, covering a distance of 11.5 km and gaining 771 meters in altitude. A great achievement!



PREISE



AWARDS

Dr. Thomas Merkle (links) bekam zusammen mit Intracom den »Best Paper Award« der EUCNC 2020 für seine Arbeiten zur THz-Übertragung mit Echtzeit-Beamforming.

Together with Intracom, Dr. Thomas Merkle (left) received the EUCNC 2020 Best Paper Award for his work on THz data links using real-time beamforming.

Dr. Nicolas Kurz' (rechts) Dissertation zur Untersuchung von Aluminium-Scandium-Nitrid für mikroakustische Hochfrequenzfilter wurde mit dem Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchsförderpreis ausgezeichnet.

Dr. Nicolas Kurz' (right) dissertation on aluminum scandium nitride for microacoustic high frequency filters was awarded the Eva Mayr-Stihl Young Talents Prize.

AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT

From idea to product

Bei uns finden Sie unter 200 Expertinnen und Experten genau die, die Sie für Ihr Projekt brauchen. Mit jahrzehntelanger Erfahrung, einer hochmodernen technologischen Ausstattung und starken Kooperationspartnern finden wir innovative Lösungen für Ihre Fragen. Im ständigen Austausch mit unseren Kunden und Partnern entwickeln wir individuelle Verfahren, Demonstratoren und Prototypen oder führen Messungen für Sie durch.

Amongst our 200 experts you will find just the one you need for your project. With decades of experience, state-of-the-art technology and equipment and strong partnerships, we come up with innovative answers to your questions. Constant dialogue with our customers and partners ensures we develop processes, demonstrators and prototypes tailored to your needs and take individualized measurements.

WARUM FRAUNHOFER IAF? WHY FRAUNHOFER IAF?

Zusammenarbeit: maßgeschneidert!

Wir bearbeiten sowohl mehrjährige Großprojekte als auch kleinere Vorhaben, die schnell umgesetzt werden können.

Tailor-made collaboration!

We handle large-scale projects with a time frame of several years as well as smaller projects that can be implemented quickly.

Gebündelte Kompetenzen

Wir bieten Ihnen über verschiedene Material- und Verfahrensgrenzen hinweg bestmögliche Lösungen.

Bundled competences

Our comprehensive portfolio means we provide you with optimum solutions across a range of materials and processes.

Ihre Anfrage im Mittelpunkt

Bei Auftragsforschung gehen wir spezifisch auf Ihre Anfrage ein.

The focus is on your needs

Contract research allows us to provide you with customized responses.

Kostengünstige Lösungen

Zugriff auf unsere Infrastruktur und Prozesse schonen Ihre internen Ressourcen.

Cost-effective solutions

Our research infrastructure and processes mean our partners save on resources.

Geschütztes Umfeld

Vertraulichkeit und der Schutz Ihrer Daten haben bei unserer Arbeit oberste Priorität.

Protected environment

We give top priority to confidentiality and the protection of your data in our work.



MORE
INFO



WIE SIE MIT UNS KOOPERIEREN KÖNNEN

How you can work with us

INDUSTRIEKUNDEN

Industry

Direktaufträge, öffentlich geförderte Projekte in Konsortien, strategische Partnerschaften, Technologietransfer, Lizenzierung - die Möglichkeiten sind vielfältig. Wir beraten Sie gerne.

Direct commissions, publicly funded projects in consortia, strategic partnerships, technology transfer and licensing – the possibilities are endless. We will be happy to advise you.



FORSCHUNGSINSTITUTE

Research Institutes

Bilateral oder mit weiteren Partnern können wir national und international geförderte Gemeinschaftsprojekte bearbeiten sowie vorwettbewerblich forschen.

We are able to work bilaterally or with a range of partners on nationally and internationally funded joint projects and pre-competitive research.



START-UPS

Start-ups

Sowohl die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) als auch Fraunhofer Venture bieten spezielle Förderformate für technologieorientierte Start-ups.

Both the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) and Fraunhofer Venture offer custom funding models for technology-oriented start-ups.



FORSCHUNGSFABRIK MIKROELEKTRONIK DEUTSCHLAND

Research Fab Microelectronics Germany

Die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) bündelt die Expertise und Infrastruktur von 13 Instituten in ganz Deutschland. Sie ermöglicht Kunden den Zugang zu maßgeschneiderten Technologien und Systemen aus einer Hand. Das Fraunhofer IAF bringt seine Expertise im Bereich der Verbindungshalbleiter für Bauelemente und Schaltungen für Frequenzen bis 800 GHz, Leistungstransistoren und optoelektronischen Komponenten ein.

The Research Fab Microelectronics Germany (FMD) brings together the expertise and infrastructure of 13 institutes from across Germany. It provides customers with access to tailor-made technologies and systems from a single provider. Fraunhofer IAF contributes its expertise in compound semiconductors for devices and circuits for frequencies of up to 800 GHz, power transistors and optoelectronic components.

NEUARTIGES LASERMODUL FÜR DIE SPEKTROSKOPIE

2020 startete das Fraunhofer IAF eine Kooperation mit dem Start-up Twenty-One Semiconductors (21s) innerhalb des »FMD Space« – dem High-Tech-Inkubator der FMD. Gemeinsam entwickeln wir ein Lasermodul für die Durchflusszytometrie. Dafür verfolgen wir ein innovatives Laserkonzept, das auf der Idee von 21s basiert: ein »membrane external-cavity surface-emitting laser«, kurz MECSEL. Dieser soll Frequenzen im ultravioletten Bereich effizienter und kompakter erreichen als etablierte Lasermodule. Dabei bringen wir unsere Expertise bei der Optimierung der Aufbautechnik, der Laserkavität und der Entwicklung eines kompakten und stabilen Lasermoduls ein. Innerhalb des einjährigen Projekts soll das Lasermodul die Marktreife erreichen.

INNOVATIVE LASER MODULE FOR SPECTROSCOPY

In 2020 Fraunhofer IAF began collaborating with the start-up Twenty-One Semiconductors (21s) within the »FMD Space« – the high-tech incubator at Research Fab Microelectronics Germany. Together we are developing a laser module for flow cytometry. To this end we are pursuing an innovative laser concept based on the idea of 21s: a »membrane external-cavity surface-emitting laser,« or MECSEL for short. This is designed to reach frequencies in the ultraviolet range more efficiently and more compactly than established laser modules. We are contributing our expertise in optimizing the packaging technology, the laser cavity and the development of a compact and stable laser module, which is expected to be ready for market within the one-year project.



MORE
INFO



WEITERE KOOPERATIONSPARTNER

Other research partners

INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME

Department of Sustainable Systems Engineering

Am INATECH der Universität Freiburg erforschen wir im Rahmen der Professur unseres Institutsleiters nachhaltige mobile Kommunikation.

In the context of our Director's Professorship at INATECH, we conduct research into sustainable mobile communication.



LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT

Sustainability Center

Innerhalb dieser Kooperation zwischen der Universität Freiburg und den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten vor Ort entwickeln wir eine nachhaltige und smarte LED-Beleuchtung für Arbeitsplätze und Büros.

In this collaboration between the University of Freiburg and the five local Fraunhofer institutes, we are developing sustainable and smart LED lighting for workplaces.



FRAUNHOFER-INSTITUTE

Fraunhofer Institutes

Um Komplettlösungen für unsere Kunden zu entwickeln, arbeiten wir mit anderen Fraunhofer-Instituten bilateral und in Verbänden zusammen, beispielsweise mit dem Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow.

We also collaborate with other Fraunhofer institutes, including the Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow, in order to develop all-in-one solutions for our customers.



AUSBILDUNG UND LEHRE

Education and teaching

WISSENSCHAFTLER DES IAF SIND AUCH IN DER LEHRE TÄTIG
Scientists of Fraunhofer IAF are also active in teaching

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

»Verbindungshalbleiter«, »System Design Project«
»Nanobiotechnologie«, »Mechanik«, »Master
Kolloquium«, »Elektrodynamik und Optik«,
»Nanobiotechnologie«, »Bauelemente und
Schaltungen der Leistungselektronik«
Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

»Mechanik« »Elektrodynamik und Optik«
Dr. Josef Rosenzweig, Dr. Klaus Köhler

»RF and Microwave Circuits and Systems«,
»RF and Microwave Devices and Circuits«,
»RF and Microwave Circuits and Systems – Design
Course«, »Power Electronic Circuits and Devices«,
»Schaltungstechnik«
Prof. Dr. Rüdiger Quay

»Theory and Application of X-Ray Diffractometry«
Dr. Lutz Kirste

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Leistungselektronik«
Michael Basler



»Als Professor freue ich mich besonders auf die Interaktion mit den Studierenden, die ich hoffentlich motivieren kann, gemeinsam neue Dinge zu entwickeln.«

» As a professor, I am especially looking forward to interacting with the students, who I hope will be motivated to develop new things together.«



READ THE FULL
INTERVIEW



Prof. Dr. Rüdiger Quay unterrichtet am INATECH
Prof. Dr. Rüdiger Quay teaches at INATECH

»Wissenschaft in all ihren Facetten leistet gerade in herausfordernden und unsicheren Zeiten einen unschätzbaren Beitrag zur Entwicklung unserer Gesellschaft. Die Universität Freiburg und das Fraunhofer IAF verbindet dabei eine enge Partnerschaft: Gemeinsam wollen wir Innovationen und Schlüsseltechnologien der Zukunft auf den Weg bringen. Unsere Doktorandinnen und Doktoranden leisten daran mit ihrer engagierten Forschung im Rahmen ihrer Qualifizierung einen wichtigen Anteil.«

»Science in all its facets makes an invaluable contribution to the development of our society, especially in challenging and uncertain times. The University of Freiburg and Fraunhofer IAF are united by a close partnership. Together we want to set in motion the innovations and key technologies of the future. Our doctoral students make an important contribution to this with their dedicated research as part of their qualification.«



Prof. Dr. Kerstin Krieglstein
Rector of the University of Freiburg

ABSCHLUSSARBEITEN

Theses



»In meiner Dissertation erforsche ich die Charakterisierung von Diamant für die Quantenmagnetometrie mit dem Ziel, sowohl die Materialentwicklung als auch die Anwendung zu verbessern. Ich freue mich darauf, wenn durch meine Forschung in Zukunft Anwendungen in der klinischen Bildgebung realisiert werden können.«

»In my dissertation I am investigating the characterization of diamond for quantum magnetometry with the aim of improving both material development and application. I am looking forward to future applications in clinical imaging as a result of my research.«

Luo Tingpeng promoviert über NV-Zentren in Diamant
am Fraunhofer IAF

*Luo Tingpeng has been doing her PhD on NV centers in diamond
at Fraunhofer IAF*



READ THE FULL
INTERVIEW



PROMOTIONEN
DOCTORAL THESES

Raul Armirpour

High-Q AlGaIn/GaN Varactors for Mobile Communication Systems

University of Freiburg

Alexander Dyck

Development and evaluation of a GaAs based 300 GHz module

University of Freiburg

Jana Ligl

Aluminium Scandium Nitride Grown by Metalorganic Chemical Vapour Deposition

University of Freiburg

Raphael Müller

Leistungsfähige Infrarotdetektoren mit hoher Betriebstemperatur auf Basis antimonidischer Übergitter

University of Freiburg

Sarah Roscher

Reduktive elektrochemische Exfoliation von Graphenflocken

University of Freiburg

Fabian Thome

Monolithic Millimeter-Wave Integrated Circuits for Low-Power Wireless Communication Systems with High Data Rates

University of Freiburg

MASTERARBEITEN
MASTER THESES

Sara Alzalabny

Embedded Programming of 100 GHz Radar Modules

University of Freiburg

Tim Cammerer

Entwicklung eines DC/AC-Wechselrichters mit Galliumnitrid-Leistungstransistoren für die Stromversorgung in der Aviatik

University of Freiburg

Chandran Goodchild

Untersuchung des Einflusses von Mischer-Nichtlinearitäten auf die Qualität orthogonal frequenzmodulierter Radardaten

University of Freiburg

Rohit Gupta

Reliability characteristics of vertical pin diodes on Si and GaN substrates for high-power applications

University of Freiburg

Kilian Huber

Development of a Miniaturized LED-based Endoscopic Light Source

University of Freiburg

Kathrin König

Parallelisierung monolithischer Galliumnitrid Halbbrücken für ein kompaktes 48 V Hochstrom Leistungsmodul

University of Freiburg

Philip Schätzle

Characterization of Wide Bandgap Semiconductors using the Constant Photocurrent Method

University of Freiburg

Mohamed Fadi Yassine Investigation of building blocks for vertical GaN Devices

University of Freiburg

»Während meiner Masterarbeit über monolithische Galliumnitrid-Halbbrücken wurde ich auf die Quantenforschung am Fraunhofer IAF aufmerksam und war sofort fasziniert. Ursprünglich wollte ich nach meinem Abschluss die Welt bereisen, aber die Themen am IAF sind so spannend und die Kolleginnen und Kollegen sind so toll, dass ich für meine Doktorarbeit hier bleibe.«

»While I was writing my master's thesis on monolithic gallium nitride half bridges, I became aware of quantum research at Fraunhofer IAF and was immediately fascinated. I originally wanted to travel the world after graduation, but the topics at IAF are so exciting and the colleagues are so great that I decided to stay here for my PhD.«



READ THE FULL
INTERVIEW



Kathrin König ist nach ihrer Masterarbeit als Doktorandin am Fraunhofer IAF geblieben
Kathrin König stayed on as a PhD student at Fraunhofer IAF after completing her master's thesis

FAKTEN UND ZAHLEN

Facts and figures

FACHGREMIEN

Committees

Das Fraunhofer IAF ist in 23 Fachgremien vertreten, von Mitgliedschaften in Lenkungs- und Programmausschüssen, Facharbeitsgruppen und Kuratorien bis hin zu Gast- und Mitherausgeberschaften von Fachzeitschriften.

Fraunhofer IAF scientists sit on 23 expert committees, ranging from steering and program committees to technical working groups and advisory boards to guest and associate editorships of scientific journals.

23

92

PUBLIKATIONEN

Publications

2020 wurden am Fraunhofer IAF 92 Publikationen wie Dissertationen, Open-Access-Artikel sowie wissenschaftliche Aufsätze und Konferenzbeiträge als Erst- oder Mitautor veröffentlicht.

Fraunhofer IAF scientists authored and co-authored 92 publications in 2020, including dissertations and open access publications as well as journal and conference papers.

AUSBILDUNG AM IAF

Education at IAF

Im Laufe des Jahres 2020 befanden sich insgesamt 51 Personen am Fraunhofer IAF in Ausbildung; darunter Bachelor- und Masterstudentinnen und -studenten, Promovenden sowie Lehrlinge.

During 2020, 51 people were in training at Fraunhofer IAF; including bachelor's, master's and doctoral students as well as apprentices.

51

PATENTE

Patents

Anli Ding und Niclas Feil arbeiten gemeinsam an einem Patent für Oberflächenwellenresonatoren auf Basis von Aluminium-Scandium-Nitrid (AlScN).

Anli Ding and Niclas Feil are collaborating on a patent for aluminum scandium nitride (AlScN) based surface acoustic wave resonators.



Unsere Idee ist, die anisotropen Materialeigenschaften von AlScN für akustische Filter zu nutzen.

Our idea is to use the anisotropic material properties of AlScN for acoustic filters.

Niclas Feil



Dafür mussten wir die Kristallachse des AlScN um 90° kippen.

For this purpose, we had to tilt the crystal axis of AlScN about 90°.

Anli Ding



READ THE FULL
INTERVIEW



PATENTERTEILUNGEN

Patents granted

F. Raay

Matrix Power Amplifier

10,530,316 B2, 07.01.2020; USA
2727767, 23.07.2020; Russland

C. Giese, C. Nebel

Halbzeug, Verfahren zu dessen
Herstellung und damit hergestellte
Komponente

10,564,351 B2, 18.02.2020; USA

K.-F. Becker, A. Hülsmann,

H. von Rosenberg

Millimeterwellen-Radar

10 2012 201 367 B4, 09.04.2020;
Deutschland (DE)

C. Giese, C. Nebel

Sensor und Verfahren zu dessen
Herstellung und Verwendung

3373023, 06.05.2020; GBR
3373023, 06.05.2020; FRA
50 2017 005 092.1, 06.05.2020;
Deutschland

R. Hoffmann, C. Nebel,

S. Roscher

Graphene and the Production of
Graphene

10,662,537 B2, 26.05.2020; USA
2722528; 01.06.2020; Russland

N. Lang, W. Müller-Sebert,

C. Nebel, C. Schreyvogel,

C. Widmann

Substrate Holder and Plasma
Reactor for depositing Diamond
242527, 01.09.2020; Israel

C. Nebel, V. Züribig

Method for producing homo-
epitaxial diamond layers

2575351, 12.10.2020; GBR

M. Cwiklinski

Integrierter Schaltkreis

10 2019 216 400, 22.10.2020;
Deutschland

PATENTANMELDUNGEN

Patent applications

J. Jeske, M. Rattunde,

H-J. Wagner

Sensor und Verfahren zur
Erfassung von zumindest einer
Messgröße

10 2020 204 022.2, 27.03.2020;
Deutschland

A. Bächle, R. Aidam, F. Rutz

Quantenkaskadenlaser und
Verfahren zu seiner Herstellung

10 2020 205 362.6, 28.04.2020;
Deutschland

M. Cwiklinski

Filterschaltung und deren Verwen-
dung sowie HF-Aktivschaltung

10 2020 208 612.5, 09.07.2020;
Deutschland

A. Bächle, R. Aidam, F. Rutz

Verfahren zur Herstellung eines
Halbleiterbauelementes

102020208748.2, 14.07.2020;
Deutschland

M. Basler

Aktive Diodenschaltung

10 2020 121 630.0, 18.08.2020,
Deutschland

S. Leone, C. Manz, H. Menner,

J. Wiegert, J. Ligl

Method and Apparatus for Manu-
facturing a Semiconductor Layer
and Substrate Provided Therewith

20192907.2, 26.08.2020; EP
17/004,302, 27.8.2020; USA

S. Roscher

Method and apparatus for the
expansion of graphite

16/569,264, 12.09.2020, PCT

M. Cwiklinski

Integrierter Schaltkreis

17/077,579, 22.10.2020; USA
20203499.7, 22.10.2020; EP

A. Ding, N. Feil

SAW-Bauelement und Verfahren
zu dessen Betrieb und Verwen-
dung

10 2020 129 294.5; 06.11.2020;
Deutschland

ORGANIGRAMM

Organigram

Stefanie Griesser (komm.)
MARKETING &
COMMUNICATIONS
☎ -214



Prof. Dr. Rüdiger Quay
DIVISION DIRECTOR
BUSINESS UNITS
☎ -843



Dr. Sébastien Chartier
HIGH FREQUENCY
ELECTRONICS
☎ -446



Dr. Michael Mikulla
POWER
ELECTRONICS
☎ -267



Dr. Robert Rehm
PHOTO -
DETECTORS
☎ -353



Dr. Ralf Ostendorf
SEMICONDUCTOR
LASERS
☎ -638



Ingolf Wittmann
QUANTUM
SYSTEMS
☎ -547



KONTAKT / Contact

Sie erreichen uns per E-Mail unter
Vorname.Nachname@iaf.fraunhofer.de
*Contact us via e-mail at
first name.surname@iaf.fraunhofer.de*

☎ +49 761 5159 + Durchwahl / direct dial



Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher
 DIRECTOR
 ☎ -410



Dr. Jutta Kühn
 DIVISION
 DIRECTOR
 DEPARTMENTS
 ☎ -842



Dr. Martin Walther
 DIVISION
 DIRECTOR
 RESEARCH
 INFRASTRUCTURE
 ☎ -434



Dr. Tim Stadelmann
 EPITAXY
 ☎ -385



Anne-Kathrin Hummel
 ADMINISTRATION
 ☎ -259



Dr. Wolfgang Bronner
 TECHNOLOGY
 ☎ -822



Michael Berking
 (komm.)
 TECHNICAL
 SERVICES
 ☎ -494



Dr. Jutta Kühn
 MICRO-
 ELECTRONICS
 ☎ -842



Jörg Seibel
 INFORMATION
 TECHNOLOGY
 ☎ -559



Dr. Marcel Rattunde
 OPTO-
 ELECTRONICS
 ☎ -643

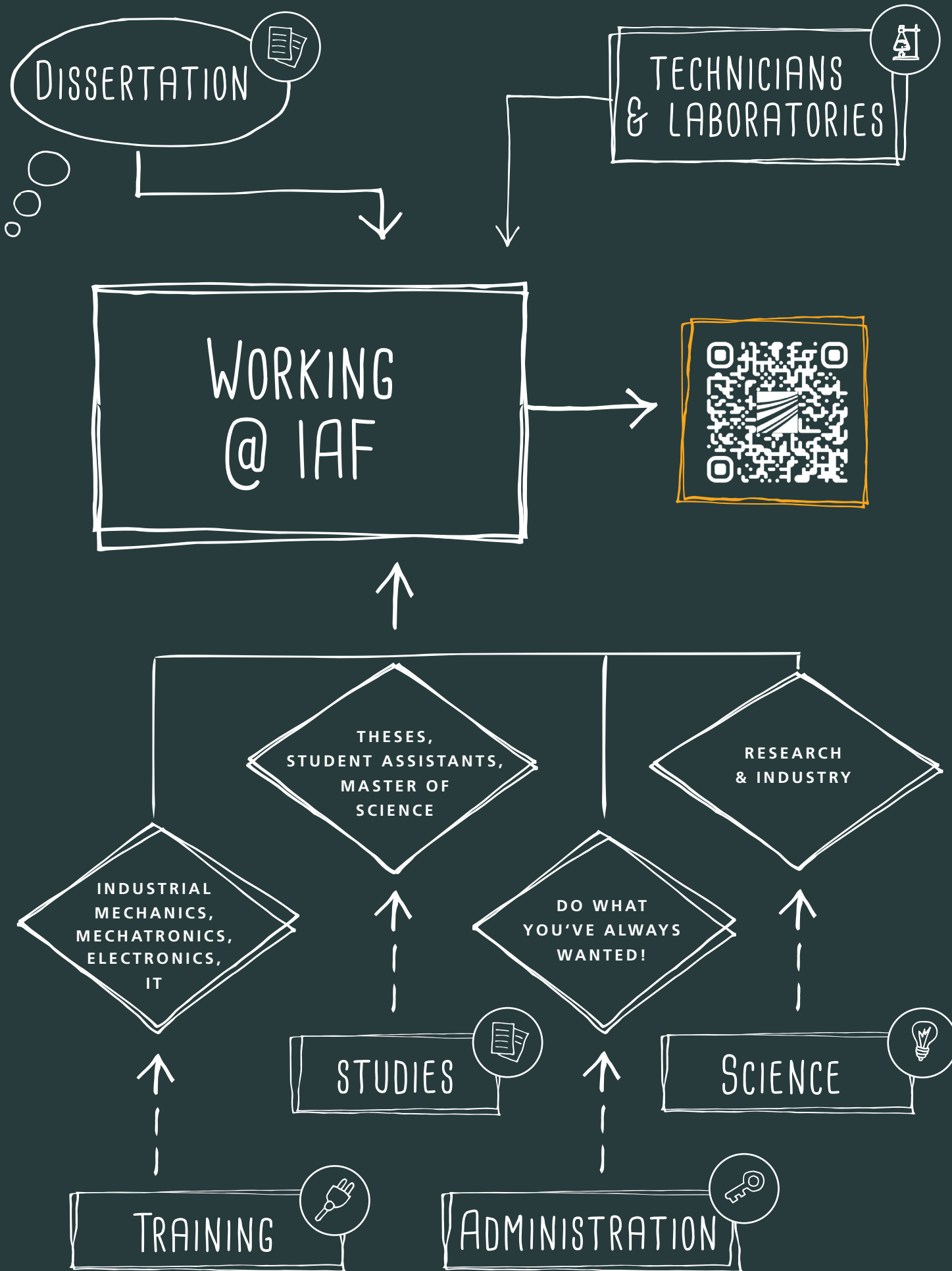


Dr. Harald D. Müller
 QUALITY
 MANAGEMENT
 ☎ -458



Dr. Daniel Hähnel
 QUANTUM
 TECHNOLOGY
 ☎ -246





FÜR BEWERBER*INNEN

Jobs@IAF

Ob Sie während des Studiums, als Berufsanfängerinnen und -anfänger oder mit wertvoller Berufserfahrung bei uns einsteigen – das Fraunhofer IAF bietet Ihnen vielfältige und spannende Aufgaben in wissenschaftlichen, technischen und administrativen Berufen.

Whether you join us during your studies, as a young professional or with valuable work experience – Fraunhofer IAF offers you a wide range of exciting careers in science, technology and administration.



»Virtuelle Konferenzen sind zurzeit sehr wichtig für den Wissensaustausch.«

»Virtual conferences are very important for knowledge sharing at the moment.«



»Wir sind immer vor Ort und stehen unseren Mitarbeitenden mit Rat und Tat zur Seite.«

»We are always there to offer our employees advice and support.«



»Unser Patent ist ein echter Durchbruch für die Halbleitertechnologie.«

»Our patent is a real breakthrough for semiconductor technology.«



»Meine Arbeit am IAF kombiniert Elektronik und Programmierung, genau das wollte ich.«

»My thesis at IAF combines electronics and programming, exactly what I've wanted.«

DAS ERWARTET SIE:

What we offer:

- Ein modern ausgestattetes und international geprägtes Arbeitsumfeld
a working environment with state-of-the-art equipment and an international ambience
- Enge Kontakte zur Industrie und zu öffentlichen Auftraggebern
close contacts and industry and public bodies
- Eigenverantwortliches Arbeiten und kreatives Mitgestalten
independent working with creative involvement
- Persönliche Entwicklungsmöglichkeiten durch Weiterbildungsmaßnahmen
personal development opportunities through training programs
- Vereinbarkeit von Familie und Beruf, z. B. durch ein Mit-Kind-Büro
family friendly working, e. g. a parent-child office
- Wöchentliche Sportangebote zum Ausgleich und zur Fitness
weekly sporting activities for work-life balance and fitness



READ THE FULL
INTERVIEWS WITH
YOUR FUTURE
COLLEAGUES



IMPRESSUM

Publication details

FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF

Tullastrasse 72
79108 Freiburg, Germany
Tel. +49 761 5159-0
Fax +49 761 5159-400
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

MARKETING & KOMMUNIKATION

Marketing & Communications

Stefanie Griesser
Tel. +49 761 5159-214
stefanie.griesser@iaf.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur
mit Genehmigung der Institutsleitung.

*All rights reserved. Reproduction requires
the permission of the Institute Director.*

© Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF,
Freiburg 2021

REDAKTION

Editorial Board

Anne-Julie Maurer, Lukas Kübler,
Stefanie Griesser, Violetta Budak,
Oliver Ambacher

KONZEPT, LAYOUT, SATZ, DRUCK

Design, layout, typesetting, printing

netsyn, Joachim Würger, Freiburg,
subculture urban media, Freiburg
Fraunhofer IRB Verlag

BILDNACHWEISE

Picture credits

© Valadymyr - stock.adobe, title / © Andreas Heddergott, TUM, 14 /
© Helmholtz/Stefanie Herbst, 17 (right) / © Forschungszentrum Jülich,
19 / © James Thew - stock.adobe.com, 25 / © Universität Konstanz; JoS
Quantum; HQS 43 (top to bottom) / © K!NGW!N - stock.adobe, 44–45 /
© QZabre, 46 / © Ludmilla Parsyak/Fraunhofer IAO, 47 (top) / © Fraunhofer
IAO, 47 (bottom) / © HTGF, 48 / © IBM, 49 / © shadowssettle, 50 (top) /
© Imperial College London, 50 (bottom) / © IQM, 51 / © Swabian Instru-
ments, 52 / © Forschungszentrum Jülich, 53 (top) / © DLR, 53 (bottom) /
© CEA, 54 / © CiS, 55 / © Thierry Debuisschert, 56 / © David Ausserhofer,
59 (right) / © Universität Stuttgart, 61 / © Siemens, 65 / © 2018 Andrew
Ostrovsky; Kovalenko I - stock.adobe.com, 79 / © Infineon; Fionn Große;
Nils Trautmann, 85 (top to bottom) / © K!NGW!N - stock.adobe, 86–87 /
© attocube, 88 / © Element Six, 89 / © Alter Technology TÜV Nord UK Ltd.,
90 (top) / © Fraunhofer CAP, 90 (bottom) / © Fraunhofer IWM, 91 (bottom)
/ © QBN, 92 / © Qnami, 93 / © Universität Freiburg, 94 / © Universität Ulm/
Grandel, 95 (top) / © Universität Ulm, 95 (bottom) / © Trumpf, 96 (top) /
© Q.ANT, 96 (bottom) / © Quantum Brilliance, 97 / © Keysight, 98 /
© U. Meiners, X-FAB, Evatec, Ampleon, 103 (top to bottom) / ETH Zürich,
David Ausserhofer, Fraunhofer IAF, C. Mayer, 104 (top to bottom) / T.
Metzger, J. Koeth, D. Schill, K. Beilenhoff, 105 (top to bottom) S 103–105 /
© Mesago Messe Frankfurt, 107 (top) / © Achim Käflein, 107 (bottom) /
© Sandra Meyndt, 108 / © IBM Research / Fraunhofer IAF, 109 /
© Viacheslav Iakobchuk, Adobe Stock; nd3000, Shutterstock; Gorodenkoff,
Shutterstock, 113 (top to bottom) / © K. Krebs, INATECH, 115 (top) /
© Fraunhofer CAP, 115 (bottom) / © J. Gocke, Universität Freiburg, 117 /
© K. Krebs, INATECH, 122

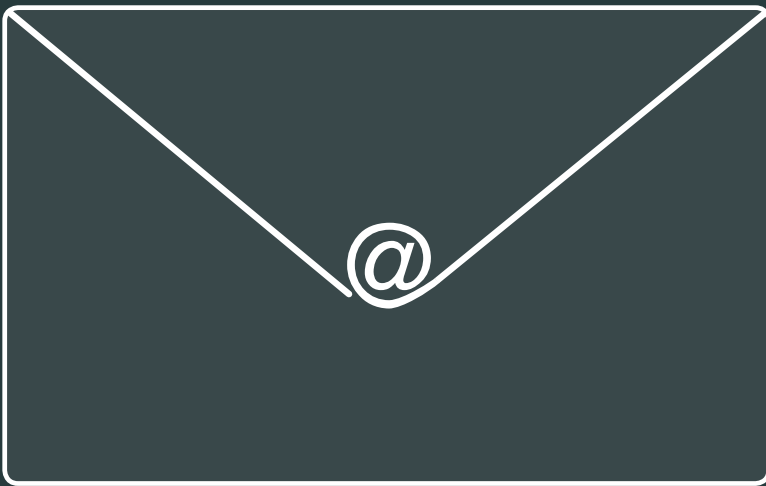
All others © Fraunhofer IAF, Violetta Budak, Liana Marek, Sandra Schneider

NEWSLETTER

Newsletter

Wir informieren Sie über aktuelle Veranstaltungen,
neue Pressemitteilungen und neue Forschungsergebnisse.

*We keep you up to date with current events, new press
releases and latest research results.*



SUBSCRIBE
HERE



**FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

Tullastrasse 72
79108 Freiburg
Germany
Phone +49 761 5159-0
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

Director:
Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF entwickelt elektronische und optoelektronische Bauelemente und Schaltungen auf Basis von Verbindungshalbleitern. Das Institut zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen weltweit auf dem Gebiet der III/V-Halbleiter. Unsere Technologien werden in unterschiedlichen Bereichen wie Sicherheit, Energie, Kommunikation, Gesundheit und Mobilität eingesetzt.

The Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF develops electronic and optoelectronic devices and circuits on the basis of compound semiconductors. The Institute is one of the leading research facilities in the area of III-V semiconductors. Our technologies are used in a variety of areas such as security, energy conversion, communication, health, and mobility.