



Fraunhofer-Institut für Angewandte
Festkörperphysik IAF



Collaborations

Jahresbericht – Annual Report 2022 / 2023

*Kollaborationen sind in der angewandten Forschung **die** Antwort auf die vielfältigen Herausforderungen. Nur mit unseren starken Partnern sind wir in der Lage, unser breites Forschungs- und Entwicklungsportfolio aus Leistungs-, Hochfrequenz- und Optoelektronik sowie den Quantentechnologien auf weltweitem Spitzenniveau abzudecken und den Transfer von der Forschung in die Anwendung zu leisten. Mit unseren nationalen wie internationalen Kooperationen in Forschung, Industrie und Politik realisieren wir gemeinsam die Technologien von morgen.*

*In applied science, collaborations are **the** answer to the multiple challenges. Only with our strong partners are we able to cover our broad research and development portfolio of power, high-frequency and optoelectronics as well as quantum technologies at the highest level and to transfer from research to application. With our national and international collaborations in research, industry and politics, we jointly realize the technologies of tomorrow.*

Collaborations



Jahresbericht – Annual Report 2022 / 2023

Vorwort

Preface

Vertrauensvolle Kollaborationen sind die Lösungen für die zahlreichen Herausforderungen, deren sich das Fraunhofer IAF für die Wiederbelebung und Neuausrichtung der Wirtschaft nach der Pandemie, für die nachhaltige Überwindung der Energiekrise und für Antworten auf die globalen Verschiebungen im Zuge des Ukraine-Krieges bedient. Dank der engen Kooperationen mit Partnern in Baden-Württemberg im Rahmen der neuen Initiative Quantum^{BW}, in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland mit dem neuen Netzwerk FMD-QNC und zukünftig auch im European Chips Act trägt das Fraunhofer IAF dazu bei, neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in innovative technologische Anwendungen zu übertragen, die ökologische, soziale wie ökonomische Verbesserungen ermöglichen.

Das Fraunhofer IAF pflegt Kooperationen mit Unternehmen aller Größen, mit Universitäten und wissenschaftlichen Einrichtungen innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft und mit nationalen wie internationalen öffentlichen Einrichtungen. Zum Beispiel jährte sich 2022 die Ausgründung des Fraunhofer CAP in Schottland zum zehnten Mal. Ein Beispiel für unsere zahlreichen Weltraumaktivitäten feiert 2023 ebenfalls zehnjähriges Jubiläum: Am 7. Mai 2013 wurde erstmals eine europäische Galliumnitrid-Schaltung des Fraunhofer IAF in einem Satelliten der ESA ins All geschossen. Mit der niederländischen Forschungseinrichtung TNO stehen wir 2023 im 30. Jahr der Zusammenarbeit. Die jüngste Kooperation erfolgt im Rahmen des neuen paneuropäischen Netzwerks »Qu-Test« in den Bereichen Quantencomputing und Quantensensorik.

Zugleich suchen wir unablässig nach neuen vielversprechenden Kooperationswegen. Die internationalen Kollaborationen nehmen dabei weiter zu. Europa ist eine solide Basis, von der aus wir neue Kooperationen beispielsweise in den USA, in Asien oder in Australien suchen. Seit Jahresbeginn 2022 arbeiten unsere Forschenden etwa Tür an Tür mit einem Team des deutsch-australischen Start-ups Quantum Brilliance an der Entwicklung eines skalierbaren Verfahrens zur Erzeugung von

Challenges are best overcome with trusting collaborations, which Fraunhofer IAF are utilizing in order to revive and reorient the economy after the pandemic, to sustainably overcome the energy crisis, and to find answers to the global shifts in the wake of the Ukraine war. Thanks to close collaborations with partners in Baden-Württemberg in the new Quantum^{BW} initiative, in the Research Fab Microelectronics Germany with the new FMD-QNC network, and in the future also in the European Chips Act, Fraunhofer IAF contributes to transferring the latest scientific findings into innovative technological applications that enable ecological, social as well as economic improvements.

Fraunhofer IAF maintains collaborations with companies of all sizes, with universities and scientific institutions within and outside the Fraunhofer-Gesellschaft, and with national and international public institutions. For example, 2022 marked the tenth anniversary of the spin-off of Fraunhofer CAP in Scotland. One example of our numerous space activities also celebrates its tenth anniversary in 2023: On May 7, 2013, a European gallium nitride circuit from Fraunhofer IAF was launched into space for the first time in an ESA satellite. And with the Dutch research institution TNO, we will be in our 30th year of cooperation in 2023. The latest cooperation is in the framework of the new pan-European network Qu-Test in the fields of quantum computing and quantum sensing.

At the same time, we are constantly looking for promising new avenues of cooperation and our international collaborations are continuing to grow. Europe is a solid base from which we are seeking new collaborations in the USA, Asia and Australia, for example. Since the beginning of 2022, for example, our researchers have been working door to door with a team from the German-Australian start-up Quantum Brilliance on the development of a scalable process for generating nitrogen-vacancy centers in diamond. By providing office and laboratory space within the institute, a daily personal exchange is possible, which promotes fresh ideas and knowledge transfer.



Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant. Durch die Bereitstellung von Büro- und Laborräumen innerhalb des Instituts ist ein täglicher persönlicher Austausch möglich, der zu frischen Ideen anregt und den Wissenstransfer fördert.

Das Fraunhofer IAF ist thematisch ein äußerst vielseitiges Institut, dessen Portfolio Hochfrequenz-, Leistungs- und Optoelektronik sowie Quantenbauelemente und -systeme umfasst, die in Kommunikations-, Mobilitäts-, Sicherheits-, Industrie- wie auch Gesundheitsanwendungen zum Einsatz kommen. Diese Spannweite können wir nur dank unserer starken und weltoffenen Partnerschaften auf Dauer professionell abdecken. Zugleich verbessern und vertiefen wir auf diesem Weg die europäischen Wertschöpfungsketten. Um den wachsenden Anforderungen in Systemen gerecht zu werden, kooperieren wir immer tiefer und weiter beim Teilen von Equipment in Europa, bei der Ermöglichung und Absicherung von Fertigungsketten, bei der Übernahme von Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung, bei der Professionalisierung und der Gesamtintegration von Schaltungen und Modulen – und damit bei der Sicherung der europäischen Unabhängigkeit in einer multipolaren Welt.

Der vorliegende Jahresbericht gibt Einblick in die vielfältigen Formen unserer Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen, innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft sowie im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte. Er stellt Ergebnisse vor, zeigt die bisherigen Wege der Kooperation auf und lässt unsere Partner selbst zu Wort kommen.

Für die bestehenden erfolgreichen Kooperationen sind wir sehr dankbar. Gleichzeitig blicken wir mit großer Freude auf die kommenden gemeinsamen Veranstaltungen und Projekte voraus: Nutzen wir deren Chancen und Möglichkeiten, trotz oder gerade wegen all der Veränderungen in der Welt.

Mit herzlichen Grüßen

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Fraunhofer IAF is thematically an extremely versatile institute whose portfolio includes high-frequency, power and optoelectronics as well as quantum devices and systems used in communication, mobility, security as well as industrial and health applications. We can only cover this range professionally in the long term thanks to our strong and cosmopolitan partnerships. At the same time, we are improving and deepening European value chains. To meet the growing demands in systems, we are cooperating ever more deeply and further in sharing equipment in Europe, in enabling and securing production chains, in adopting findings from basic research, in professionalizing and integrating circuits and modules as a whole—and thus in securing European independence in a multipolar world.

This annual report provides an insight into the many different forms of our collaboration with industrial companies and scientific institutions, within the Fraunhofer-Gesellschaft and in the context of various research projects. It presents results, shows the paths of cooperation to date, and features the voices of our partners.

We are very grateful for the existing successful collaborations. At the same time, we look forward with great pleasure to the upcoming joint events and projects: Let us take advantage of the opportunities and possibilities, despite or precisely because of all the changes in the world.

Sincerely,

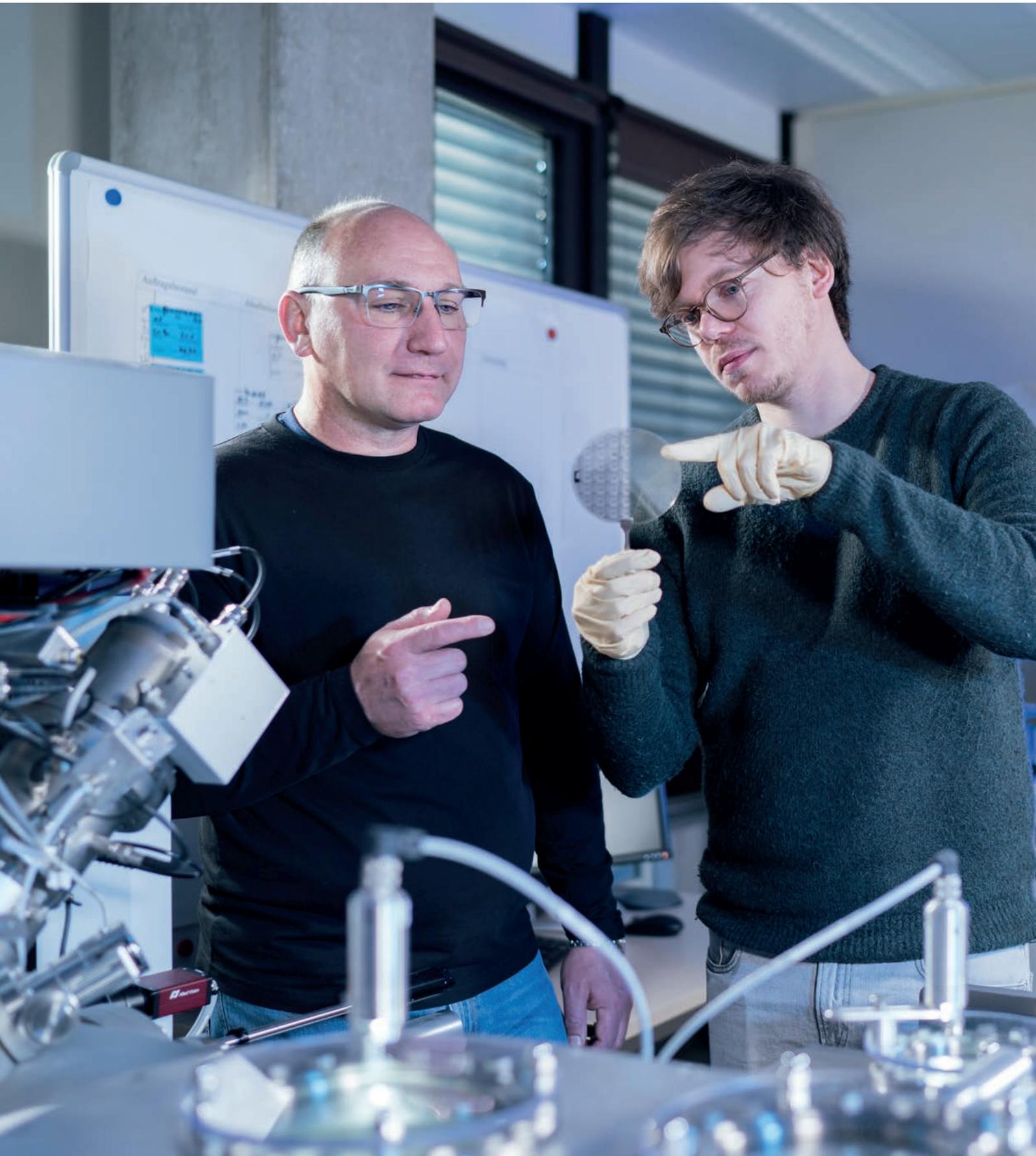
Prof. Dr. Rüdiger Quay

Inhaltsverzeichnis

Contents

Kooperieren in der Fraunhofer-Gesellschaft	
Collaborating within the Fraunhofer-Gesellschaft	7
Die Fraunhofer-Gesellschaft	
The Fraunhofer-Gesellschaft	8
Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland	
Research Fab Microelectronics Germany	10
Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg	
Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg	16
Fraunhofer-Leistungsbereich Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS	
Fraunhofer Segment for Defense and Security VVS	26
Fraunhofer UK Research Ltd.	28
Kooperieren mit der Industrie Collaborating with industry	31
Quantum ^{BW} Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg	32
Open6GHub 6G for Society and Sustainability	34
6G-RIC 6G Research and Innovation Cluster	35
QBN Quantum Business Network	36
iQuSense Innovative Quantum Sensing	37
EPIC European Photonics Industry Consortium	38
Photonics BW Innovation Network Optical and Quantum Technologies	39
MATQu Materials for Quantum Computing	40
ASCENT+ European Nanoelectronics Access	41
Q.AX Quantum & AI Experience Center	42
Kooperation mit Quantum Brilliance Collaboration with Quantum Brilliance	44
Kooperieren in der Wissenschaft Collaborating in science	49
Universität Freiburg – INATECH University of Freiburg—INATECH	50
Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg (LZN) Sustainability Center Freiburg (LZN)	54
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Karlsruhe Institute of Technology (KIT)	55
Universität Stuttgart University of Stuttgart	56
RMIT University	57
Feature: Kooperation mit TNO Collaboration with TNO	58

Kooperieren in Projekten Collaborating in projects	63
Fraunhofer-Leitprojekte Fraunhofer lighthouse projects	
QMag – Quantum magnetometry	65
EKaNWe – Power electronics for heat pumps	68
6G SENTINEL – HF electronics for mobile communication	70
Verbundprojekte Joint projects	
SPINNING – Quantum computing hardware	73
NeuroQ – Quantum magnetometry for medical science	77
KONFEKT – GaN for 6G mobile communication	80
BEACON – HF electronics for satellite communications	82
GrodiaQ – Scalable diamond growth for quantum devices	84
BiCam – Infrared technology for traffic safety	86
Feature: Kooperation mit der ESA Collaboration with ESA	88
Wissenswertes Things to know	92
Das Institut in Zahlen The institute in figures	94
Organisationsstruktur Organizational structure	96
Kuratorium Advisory Board	97
Auszeichnungen 2022 Awards 2022	98
Patente Patents	99
Ausbildung und Lehre Education and teaching	100
Abschlussarbeiten Theses	101
Höhepunkte 2022 Highlights 2022	102
Berufliche Chancen Career opportunities	106
Impressum Publication details	112





Kooperieren in der Fraunhofer-Gesellschaft

Collaborating within the Fraunhofer-Gesellschaft

Wir engagieren uns in Leitmärkten und strategischen Forschungsfeldern der Fraunhofer-Gesellschaft und arbeiten dabei eng mit nationalen wie internationalen Fraunhofer-Instituten zusammen.

We are committed to lead markets and strategic research fields of the Fraunhofer-Gesellschaft and work closely with national and international Fraunhofer institutes.

Um gemeinsam Lösungen für unsere Kunden zu finden, bringen wir unsere modernen Anlagen und langjährige Expertise zum Beispiel in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland ein

In order to find solutions for our customers, we contribute our modern facilities and many years of expertise, for example in the Research Factory Microelectronics Germany

Die Fraunhofer-Gesellschaft

The Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiserin und Impulsgeberin für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit werteorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 30 000 Mitarbeitende, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,9 Milliarden Euro. Davon fallen 2,5 Milliarden Euro auf den Bereich Vertragsforschung.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Stand der Zahlen: Januar 2022

The Fraunhofer-Gesellschaft based in Germany is the world's leading applied research organization. Prioritizing key future-relevant technologies and commercializing its findings in business and industry, it plays a major role in the innovation process. It is a trailblazer and trendsetter in innovative developments and research excellence. The Fraunhofer-Gesellschaft supports research and industry with inspiring ideas and sustainable scientific and technological solutions and helps shaping our society and our future.

The interdisciplinary research teams of Fraunhofer-Gesellschaft turn original ideas into innovations together with contracting industry and public sector partners, coordinate and complete essential key research policy projects and strengthen the German and European economy with ethical value creation. International collaborative partnerships with outstanding research partners and businesses all over the world provide for direct dialogue with the most prominent scientific communities and most dominant economic regions.

Founded in 1949, the Fraunhofer-Gesellschaft currently operates 76 institutes and research units throughout Germany. Over 30,000 employees, predominantly scientists and engineers, work with an annual research budget of €2.9 billion. Fraunhofer generates €2.5 billion of this from contract research.

The impact of applied research goes far beyond its direct benefits to clients: Fraunhofer institutes enhance businesses' performance, improve social acceptance of advanced technology and educate and train the urgently needed next generation of research scientists and engineers.

Figures as of: January 2022

Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

Research Fab Microelectronics Germany

Das Fraunhofer IAF bringt seit der Gründung der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) 2017 seine Expertise und einzigartige Infrastruktur im Bereich der Verbindungshalbleiter ein. Die FMD ist eine Kooperation des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik mit den Leibniz-Instituten FBH und IHP. 2022 verzeichnete die FMD gleich mehrere Highlights; darunter der Start zweier Großprojekte in den Bereichen grüner Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Quantentechnologien – »Green ICT @ FMD« und »FMD-QNC« – sowie die Grundsteinlegung der Mikroelektronik-Akademie, um dem Fachkräftemangel in Deutschland entgegenzuwirken.

Fraunhofer IAF has been contributing its expertise and unique infrastructure in the field of compound semiconductors to the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) since its foundation in 2017. FMD is a cooperation of the Fraunhofer Group for Microelectronics and the Leibniz Institutes FBH and IHP. In 2022, FMD recorded several highlights, including the launch of two major projects in the fields of green information and communications technology (ICT) and quantum technologies—Green ICT @ FMD and FMD-QNC—as well as the laying of the foundation stone for the Microelectronics Academy to counteract the shortage of skilled workers in Germany.



Die FMD ist der zentrale Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die Mikro- und Nanoelektronik in Deutschland und Europa. Sie bietet Kunden und Partnern einen einfachen Zugang zu neuen Anwendungen und Hochtechnologien auf internationalem Spitzenniveau. Als Vorreiterin für standort- und technologieübergreifende Zusammenarbeit gibt die FMD wichtige Impulse zur Entwicklung von elementaren Innovationen für die Welt von morgen. Mittlerweile bringen mehr als 4500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ihr Know-how ein. Damit ist die FMD weltweit einer der größten Zusammenschlüsse dieser Art auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung.

Ob Quantencomputing, 6G, energieeffiziente Informations- und Kommunikationstechnik oder Terahertz-Technologien für Kommunikation und Sensorik – das Fraunhofer IAF arbeitet im Rahmen der Forschungsfabrik an der Realisierung bedeutender Zukunftstechnologien. Neben modernen Fertigungsanlagen bietet das Freiburger Institut eine breite Palette an Dienstleistungen wie Epitaxie, Schaltungsdesign und -entwicklung, Quantencomputing-Simulationen und -Software sowie verschiedene Messungen von Halbleitermaterialien, Heterostrukturen und den aus ihnen prozessierten Bauelementen und Systemen. Mit dem Fraunhofer IAF stehen Kunden und Partnern der FMD nachhaltige technologische Möglichkeiten offen, gemeinsam neue Lösungen für die Anwendungen der Zukunft zu (er)finden.

FMD is the central point of contact for all issues relating to micro- and nanoelectronics in Germany and Europe. It offers customers and partners easy access to new applications and high technologies at the highest international level. As a pioneer for cross-site and cross-technology cooperation, the FMD is actively addressing the current and future challenges of electronics research, providing key impulses for the development of elementary innovations for the world of tomorrow. Currently, more than 4,500 employees contribute their expertise to the research and development of micro and nanosystems. The FMD is thus one of the largest R&D associations of its kind in the world.

Whether quantum computing, 6G, energy-efficient information and communications technology or terahertz technologies for communication and sensor technology—Fraunhofer IAF is working on the realization of significant future technologies within the framework of the Research Fab. In addition to modern manufacturing facilities, the institute located in Freiburg offers a wide range of services such as epitaxy, circuit design and development, quantum computing simulations and software as well as various measurements of semiconductor materials, heterostructures and the devices and systems processed from them. With Fraunhofer IAF, sustainable technological opportunities are open to customers and partners of FMD to jointly discover new solutions for the applications of the future.

*Der 3D-Showroom der FMD macht das gebündelte Wissen der 13 Institute in einer eigenen digitalen Welt erlebbar
The FMD 3D showroom enables visitors to experience the enormous knowledge and expertise of the 13 institutes bundled in a dedicated digital world*

Start von Großprojekten für nachhaltige Elektronik und neuartige Rechentechnologien

Aufbauend auf den im Rahmen der FMD geschaffenen Kompetenzen, Strukturen und Angeboten wurden im Jahr 2022 zwei neue Großprojekte – »Green ICT @ FMD« und »FMD-QNC« – auf den Weg gebracht.

Im Projekt »Green ICT @ FMD« realisieren die in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland kooperierenden Fraunhofer- und Leibniz-Institute zusammen mit dem Fraunhofer ISI ein standortübergreifendes Kompetenzzentrum für eine ressourcenbewusste Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Hier können die spezifischen Fragestellungen zur grünen IKT gebündelt bearbeitet und technologieübergreifende IKT-Gesamtlösungen bis zu einem hohen technischen Reifegrad Partnern in Wirtschaft und Wissenschaft angeboten werden – alles aus einer Hand. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt das im August 2022 gestartete Vorhaben im Rahmen der Initiative »Green ICT«, die ein Bestandteil des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung ist.

Um die in Deutschland vorhandene mikroelektronische Forschung und Entwicklung in Bezug auf Quanten- und neuromorphes Computing zu bündeln und auszubauen, startete die FMD zusammen mit vier weiteren Fraunhofer-Instituten, dem Forschungszentrum Jülich und der AMO GmbH im Dezember 2022 ein gemeinsames Vorhaben: Die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland – Modul Quanten- und neuromorphes Computing«. Ziel der deutschlandweiten Kooperation »FMD-QNC« ist, Forschende und Unternehmen bei der Entwicklung von maßgeschneiderter Mikroelektronik und skalierbaren Fertigungs- und Integrationsverfahren für die neuen Rechentechnologien bestmöglich zu unterstützen. Der dafür benötigte gerätetechnische und strukturelle Aufbau wird vom BMBF gefördert.

Major projects launched for sustainable electronics and new computing technologies

Building on the competences, structures and services created within the framework of the FMD, two new major projects — Green ICT @ FMD and FMD-QNC — were launched in 2022.

As part of the Green ICT @ FMD project, the Fraunhofer and Leibniz Institutes cooperating in the Research Fab Microelectronics Germany, together with the Fraunhofer ISI, are setting up a cross-location competence center for resource-conscious information and communication technology (ICT). Within this framework, specific issues regarding green ICT can be addressed comprehensively and cross-technology solutions up to a high level of technical maturity can be provided to partners in industry and research — all from a single source. This project, launched in August 2022, is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the Green ICT Initiative, which in turn is part of the Federal Government's Climate Action Program 2030.

To bring together and expand the existing microelectronic research and the developments related to quantum and neuromorphic computing carried out in Germany, the FMD together with four further Fraunhofer institutes, the Research Center Jülich and AMO GmbH launched a joint project in December 2022: The Research Fab Microelectronics Germany — Module Quantum and Neuromorphic Computing (FMD-QNC). FMD-QNC is a nationwide collaboration aimed at supporting researchers and companies in developing customized microelectronics and scalable manufacturing and integration processes for new computing technologies. The equipment and structural setup required for this is being funded by the BMBF.



Aufbau einer Mikroelektronik-Akademie

Im Rahmen der Vorhaben »Green ICT @ FMD« und »FMD-QNC« soll in den kommenden drei Jahren zudem eine deutschlandweite Mikroelektronik-Akademie entstehen. Im Dezember 2022 fiel der Startschuss für die Konzeptualisierungsphase und damit verbunden für die Realisierung der Akademie und die Schaffung moderner Ausbildungsangebote im Bereich Mikro- und Nanoelektronik. Die aus den beiden Vorhaben abgeleiteten Säulen »Ressourcenbewusste IKT« und »praxisorientierte Halbleitertechnik und -technologie« bilden gemeinsam mit einer weiteren Säule, »Design mikroelektronischer Schaltungen und Systeme«, die thematische Basis der Mikroelektronik-Akademie. Die FMD übernimmt beim Aufbau der Mikroelektronik-Akademie nicht nur die organisatorische Leitung, sondern auch die Programmverantwortung dieser drei fachlichen Säulen. Ziel ist es, die Qualität der Fachkräfteausbildung auf dem Gebiet der Mikroelektronik zu verbessern und langfristig aktiv Bereiche wie Klimaschutz und Nachhaltigkeit, neuartige Rechentechnologien und vertrauenswürdige Halbleiter- und Chip-Entwicklung zu beeinflussen und voranzubringen.

Besuchen Sie den 3D-Showroom der FMD

»FMD.insight« macht das enorme Wissen und Können der 13 FMD-Institute gebündelt in einer eigenen digitalen Welt erlebbar. In dem virtuellen Showroom »FM3D« stellt das Fraunhofer IAF mehrere 3D-Exponate aus verschiedenen Forschungsbereichen des Instituts zu den Themen Kommunikation und Next Generation Computing aus.

Setting up a Microelectronics Academy

As part of the Green ICT @ FMD and the FMD-QNC projects, a Germany-wide microelectronics academy will be established over the next three years. In December 2022, the kick-off of the conceptualization phase took place and with it, the establishing of the Academy and the enabling of modern training opportunities in the field of micro and nanoelectronics. Regarding its thematic foundation, the Academy is structured in three thematic pillars. The first two pillars, Resource-conscious ICT and Practice-oriented semiconductor engineering and technology (both derived from the Green ICT @ FMD and FMD-QNC projects), are further complemented by the third pillar focusing on design of microelectronic circuits and systems. In the process of setting up the Microelectronics Academy, the FMD is not only assuming the organizational management, but also taking responsibility for the three thematic pillars. The overarching goal is to improve the quality of the training for skilled workers in the field of microelectronics as well as, in the long term, to actively impact and drive forward areas such as climate protection and sustainability, new computing technologies and trustworthy semiconductor and chip development.

Visit the FMD 3D showroom

FMD.insight enables visitors to experience the enormous knowledge and expertise of the 13 FMD institutes bundled in a dedicated digital world. In the virtual showroom FM3D, Fraunhofer IAF showcases several 3D exhibits from different research areas of the institute on the topics of communication and next generation computing.



Gemeinsame Wertschöpfung in der FMD

Creating shared value within FMD

Gemeinsam bieten die Institute der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) alle für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben relevanten Prozessschritte der Halbleiterfertigung auf höchstem Niveau an.

Bereits vor Gründung der FMD führte das Fraunhofer IAF für seine Galliumnitrid-Technologie die Ionenimplantation am Fraunhofer IISB durch. Diese erfolgreiche Kooperation besteht bereits seit über 15 Jahren. Die FMD intensiviert die institutsübergreifende Zusammenarbeit und erlaubt es, weitere Entwicklungs- und Produktionsschritte aus einer Hand anzubieten.

Die Kooperation zwischen Fraunhofer IAF, ISIT und IISB bei der Herstellung und Bearbeitung von Galliumnitrid-Wafern ist ein hervorragendes Beispiel für den Mehrwert des FMD-Angebots: Jedes Institut bringt einzigartige Fähigkeiten im Bereich bestimmter Prozessschritte ein. Als einziges FMD-Institut kann das Fraunhofer IAF auf einem Durchmesser von 200 mm GaN-Wafer wachsen. Das Fraunhofer ISIT verfügt wiederum über geeignete Prozesstechnologie, um Bauelemente auf GaN-Wafern dieser Größe herzustellen. Das Fraunhofer IISB nutzt die vom Fraunhofer IAF gewachsenen und vom Fraunhofer ISIT prozessierten Wafer im Anschluss für seine Aufbau- und Verbindungstechnik und evaluiert erste Leistungsmodule.

Der Wafer-Transfer zeigt exemplarisch, wie das produktive Zusammenspiel der Fähigkeiten einzelner Institute unter dem organisatorischen Dach der FMD gemeinsame Wertschöpfung hervorbringt.

The institutes of the Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) jointly offer all process steps of semiconductor manufacturing relevant for research and development tasks at the highest level.

Even before FMD was founded, Fraunhofer IAF performed ion implantation for its gallium nitride technology at Fraunhofer IISB. This successful cooperation has existed for more than 15 years. FMD intensifies the cooperation across institutes and allows to offer further development and production steps on a one-shop basis.

The collaboration between Fraunhofer IAF, ISIT and IISB in the fabrication and processing of gallium nitride wafers is an excellent example of the added value of the FMD: each institute contributes unique capabilities in the area of specific process steps. Fraunhofer IAF is the only FMD institute that can grow GaN wafers on a diameter of 200 mm. Fraunhofer ISIT in turn has suitable process technology to produce devices on GaN wafers of this size. Fraunhofer IISB subsequently uses the wafers grown by Fraunhofer IAF and processed by Fraunhofer ISIT for its packaging technology and evaluates first power modules.

The wafer transfer exemplifies how individual institutes' capabilities productively interact, creating shared value under the organizational umbrella of FMD.



*8-Zoll-GaN-Wafer
des Fraunhofer IAF
8-inch GaN wafer
of Fraunhofer IAF*

Kooperationen zu erneuerbaren Energien für nachhaltige Halbleiterforschung

Collaborations on renewable energies for sustainable semiconductor research

2022 gelang es dem Fraunhofer IAF, ohne Verluste in Qualität oder Quantität von Arbeitsergebnissen signifikant Energie zu sparen. Doch die kommenden Anforderungen an moderne Spitzenforschung in der Nanotechnologie werden weiterhin erhebliche Energiemengen erfordern. Daher arbeitet das Institut mit Partnern aus Politik, Energiewirtschaft und Fraunhofer-Gesellschaft daran, seine Energieversorgung systematisch auf erneuerbare Energien umzustellen.

Dank verschiedener Modernisierungsmaßnahmen im Bestandsgebäude und mit der Einweihung der neuen Forschungsgebäude im Jahr 2022 konnte der Ressourcenverbrauch des Fraunhofer IAF trotz hohen Maschinenbetriebs signifikant reduziert werden. In den Neubauten, die der Bund, das Land Baden-Württemberg sowie das BMVg unterstützten, stehen dem Institut ressourceneffiziente Systeme zur Verfügung. Eine kontinuierliche Modernisierung der gesamten Forschungsinfrastruktur soll die Energiebilanz des Instituts weiter verbessern. Für unabhängige F&E-Arbeiten des Fraunhofer IAF ist eine breite Absicherung der primären Energieversorgung von elementarer Bedeutung. Chancen zur Aufrechterhaltung und zum Ausbau dieser Unabhängigkeit bieten drei kollaborative Maßnahmen, die das Institut 2022/23 begonnen hat:

- Das Institut soll an ein neues Fernwärmenetz angeschlossen werden, das die Stadt Freiburg und ein lokaler Energieversorger errichten. Dieses soll ab dem Jahr 2026 (beinahe) CO₂-neutral große Energiemengen bereitstellen.
- In Zusammenarbeit mit der Fraunhofer-Gesellschaft und dem Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik wird die Vergabe der Energiebeschaffung langfristig diversifiziert und gesichert.
- Im Austausch mit der Fraunhofer-Gesellschaft sollen Möglichkeiten zur Eigenerzeugung von Energie geregelt und genutzt werden.

Ziel aller Maßnahmen ist es, für Kunden und Partner dauerhaft, nachhaltig, kosteneffizient und unabhängig forschen zu können – ab 2030 klimaneutral.

In 2022, Fraunhofer IAF succeeded in saving significant amounts of energy without any loss in quality or quantity of work results. However, the coming requirements for modern cutting-edge research in nanotechnology will continue to require significant amounts of energy. Therefore, Fraunhofer IAF is working with partners from politics, energy industry and Fraunhofer-Gesellschaft to systematically convert its energy supply to renewable energies.

Thanks to various modernization measures in the existing building and with the inauguration of the new research buildings in 2022, the resource consumption of Fraunhofer IAF could be significantly reduced despite high machine operation. In the new buildings, which were supported by the federal government, the state of Baden-Württemberg and the MoD, resource-efficient systems are available to the institute. Continuous modernization of the entire research infrastructure is expected to further improve the institute's energy balance. For independent R&D activities of Fraunhofer IAF, a broad protection of the primary energy supply is of vital importance. Opportunities to maintain and expand this independence are offered by three collaborative measures that the institute started in 2022/23:

- The institute is planned to be connected to a new district heating network being built by the city of Freiburg and a local energy supplier. This is to provide large, (almost) CO₂-neutral amounts of energy from 2026.
- In cooperation with the Fraunhofer-Gesellschaft and the Fraunhofer Group for Microelectronics, the awarding of energy procurement contracts will be diversified and secured in the long term.
- In exchange with the Fraunhofer-Gesellschaft, possibilities for self-generation of energy are to be regulated and utilized.

The aim of all measures is to be able to conduct research for customers and partners in a sustainable, cost-efficient and independent manner — by 2030 climate-neutral.

Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg

Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg

Um die anwendungsnahe Forschung zum Quantencomputing voranzutreiben, hat die Fraunhofer-Gesellschaft ein nationales Netzwerk auf Basis von regionalen Kompetenzzentren gegründet. Teil dieses Fraunhofer-Kompetenznetzwerks ist das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW), in dessen Rahmen der erste IBM-Quantencomputer auf deutschem Boden installiert wurde. Dieser steht Industrieunternehmen, kleinen und mittelständischen Unternehmen, Start-ups sowie akademischen Einrichtungen für den anwendungsbezogenen Einsatz zur Verfügung. Das KQCBW wird vom Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF gemeinsam koordiniert. Damit Quantencomputer schnellstmöglich in den industriellen Einsatz kommen und um den Wissenstransfer in die Industrie zu fördern, bietet das Kompetenzzentrum zudem eine Schulungsreihe an.

In order to advance application-oriented research on quantum computing, the Fraunhofer-Gesellschaft has established a national network based on regional competence centers. Part of this Fraunhofer competence network is the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW). In its framework, the first IBM quantum computer on German soil was installed, available to industry, small and medium-sized enterprises, startups as well as academic institutions for application-related use. The KQCBW is jointly coordinated by the Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO and the Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF. In order to get quantum computers into industrial use as quickly as possible and to promote the transfer of knowledge, the competence center also offers a series of trainings.

Die Projektleiter an den beiden Fraunhofer-Instituten, Dr. Thomas Wellens und Dr. Christian Tutschku, sprechen im Interview über das dynamische Forschungsfeld des Quantencomputings. Dabei blicken sie auf eine erste erfolgreiche Förderphase des Kompetenzzentrums durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg zurück und schauen gemeinsam voraus.

In this interview, the project leaders at the two Fraunhofer Institutes, Dr. Thomas Wellens and Dr. Christian Tutschku, talk about the dynamic research field of quantum computing. In doing so, they look back on a first successful funding phase of the Competence Center by the Ministry of Economics, Labor and Tourism Baden-Württemberg and look ahead of what is to come.

Zur Schaffung eines fundierten Wissenstransfers, wurde im Verbundprojekt »SEQUOIA« des KQCBW eine umfangreiche Studie zum aktuellen Forschungsstand des angewandten Quantencomputings herausgebracht.

In order to provide a well-founded knowledge transfer, a comprehensive study on the current state of research in applied quantum computing was published in the joint project SEQUOIA of the KQCBW.



*Dr. Christian Tutschku leitet das Team Quantencomputing am Fraunhofer IAO
Dr. Christian Tutschku, Head of Team Quantum Computing at Fraunhofer IAO*



In den Medien ist oft die Rede von Durchbrüchen im Quantencomputing. Wie erlebt ihr die aktuelle Forschungslandschaft?

Wellens — Ich habe diesen Hype auch wahrgenommen und es ist wirklich ein sehr interessantes und vielversprechendes Forschungsgebiet. Aber es ist wichtig, dass man nicht zu viel verspricht. Aus meiner Sicht ist noch einiges an Grundlagenforschung nötig, bevor das Quantencomputing in die Anwendung kommen kann. Man liest häufig, dass sich alles Mögliche durch Quantencomputing revolutionieren wird – Stichwort Big Data –, aber oft ist noch gar nicht klar, in welchen Fällen es einen wirklichen Vorteil bringen wird. Das gilt es noch herauszufinden.

Tutschku — Genau wie Thomas sagt: News, die eine falsche Erwartungshaltung schaffen, sind insbesondere im anwendungszentrierten Quantencomputing immer schwierig. Es gibt zwar ständig Durchbrüche: Das Quantenvolumen steigt zum Beispiel kontinuierlich und neue Techniken wie »Circuit knitting« bringen uns näher an einen echten Quantenvorteil heran, aber man muss dabei immer Expectation Management betreiben. Auch wenn sich in den letzten Jahren sowohl seitens Software- als auch Hardware-Entwicklung unfassbar viel getan hat, können wir die Welt heute noch nicht mit Quantencomputing verändern.

The media often talk about breakthroughs in quantum computing. How do you experience the current research landscape?

Wellens — I have also noticed this hype and it really is a very interesting and promising field of research. But it is important not to promise too much. From my point of view, there is still a lot of basic research to be done before quantum computing can be put to use. One often reads that quantum computing will revolutionize all sorts of things—keyword Big Data—, but often it is not at all clear in which cases it will provide a real advantage. That has yet to be figured out.

Tutschku — Just as Thomas says, news that create false expectations are always difficult, especially in application-oriented quantum computing. While there are breakthroughs all the time: The quantum volume is continuously increasing, for example, and new techniques like circuit knitting are getting us closer to real quantum advantage, one always has to manage expectations. Even though there has been an incredible amount of progress in both software and hardware development in recent years, we still cannot change the world with quantum computing today.



*Dr. Thomas Wellens leitet die Gruppe Quanteninformation am Fraunhofer IAF
Dr. Thomas Wellens, Head of Group Quantum Information at Fraunhofer IAF*

Was steht einem echten Quantenvorteil noch im Weg?

Tutschku — Wir befinden uns beim Quantencomputing in der sogenannten NISQ-Ära (Noisy Intermediate-Scale Quantum), das heißt, die Systeme sind fehleranfällig und noch nicht mit großer Rechenleistung verfügbar. Das macht es schwierig, einen echten Quantenvorteil zu beweisen. Wir können bisher mit Heuristiken arbeiten, um auf der Softwareseite einen Vorteil zu zeigen.

Wellens — Hinzu kommt, dass es erst noch die Algorithmen zu finden gilt, die einen tatsächlichen Vorteil darstellen. Es gibt zwar Algorithmen, wie den Shor-Algorithmus, bei dem ein Quantenvorteil theoretisch bewiesen ist, aber lediglich unter der Annahme, dass keine Rechenfehler auftreten – davon sind wir noch weit entfernt. Eine Herausforderung ist es daher, herauszufinden, ob wir trotz der fehlerbehafteten Hardware bereits in näherer Zukunft einen Quantenvorteil in der Anwendung erreichen können. Gleichzeitig besteht auf Seiten der Hardware die Herausforderung darin, die Fehler zu reduzieren und die Quantenfehlerkorrektur zum Laufen zu bringen.

Tutschku — Dabei ist es wichtig, ein Hardware-Software-Co-Design zu betreiben, also sowohl die Fehler als auch die Skalierbarkeit auf Hardwareseite immer mitzudenken. Außerdem muss bei der Problemformulierung ein Umdenken stattfinden – von einem klassischen, deterministischen Denken hin zu probabilistischen Lösungsstrategien, die von Anfang an ›Quantum‹ gedacht werden. Man kann das Quantencomputing nicht einfach auf bestehende Problemformulierungen anwenden, sondern muss diese entsprechend anpassen.

Was zeichnet das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg aus?

Tutschku — Das Quantencomputing bildet ein sehr großes Ökosystem, in dem viele kleine Zahnräder ineinandergreifen. Diese Forschung voranzubringen, ist eine Aufgabe, die keine Gruppe allein bewältigen kann und nur gemeinsam zu lösen ist. Das ist die Grundidee des Kompetenzzentrums: alle Parteien von Anfang an mitnehmen und in enger Zusammenarbeit das Forschungsfeld vorantreiben. Wir vereinen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedensten Branchen, von der Grundlagenforschung an den Universitäten hin zu anwendungszentrierten Forschungsgruppen der Fraunhofer-Gesellschaft. Hinzu kommen Unternehmen als assoziierte Partner, und schließlich steht hinter allem die Politik des Landes Baden-Württemberg, die das Kompetenzzentrum maßgeblich unterstützt und unsere Vorhaben fördert. Nur so ist es möglich, in dem dynamischen Forschungsfeld nicht abgehängt zu werden.

What stands in the way of true Quantum Advantage?

Tutschku — We are in the so-called NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) era in quantum computing, which means the systems are error-prone and not yet available with great computing power. This makes it difficult to prove a true quantum advantage. So far, we can work with heuristics to show an advantage on the software side.

Wellens — In addition, we still have to find the algorithms that actually provide an advantage. There are algorithms, such as the Shor algorithm, for which a quantum advantage has been theoretically proven, however, only under the assumption that no computational errors occur, which is far from the state of the art. One challenge, therefore, is to find out whether we can already achieve a quantum advantage in applications in the near future, despite the error-prone hardware. At the same time, on the hardware side, the challenge is to reduce the errors and get quantum error correction to work.

Tutschku — In this context, it is important to practice hardware-software co-design, in other words, to always think about both errors and scalability on the hardware side. In addition, the problem formulation must be rethought— from classical, deterministic thinking to probabilistic solution strategies that are thought ›quantum‹ from the start. One cannot simply apply quantum computing to existing problem formulations, but must adapt them accordingly.

What characterizes the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg?

Tutschku — Quantum computing forms a very large ecosystem in which many small gears mesh together. Advancing this research is a task that no group can accomplish alone. It can only be done together. That is the basic idea behind the competence center: bringing all parties together from the beginning and working closely together to advance the research field. We gather scientists from a wide range of sectors, from basic research at universities to application-centered research groups at the Fraunhofer-Gesellschaft. In addition, there are companies as associated partners, and finally, behind everything, there is the state of Baden-Württemberg, which significantly supports the competence center and our projects. This is the only way to avoid being left behind in this dynamic research field.

Wie funktioniert die Zusammenarbeit in einem so interdisziplinären Forschungszentrum wie dem KQCBW?

Wellens — Die Zusammenarbeit läuft gut und es findet Austausch über die Projektgrenzen hinaus statt. Die einzelnen Fraunhofer-Institute und Universitäten sind teilweise in mehreren Projekten vertreten, woraus sich Synergien ergeben. Manche Forschungsfragen tauchen in mehreren Projekten auf, wie zum Beispiel Fehlermitigation oder Optimierung des QAOA-Algorithmus, wodurch letztlich alle voneinander profitieren können.

Tutschku — Eine Besonderheit der Zusammenarbeit im KQCBW ist vor allem der Spirit. Die Leute im Kompetenzzentrum arbeiten eng und mit einer besonderen Motivation zusammen. Sie nehmen den Ist-Zustand an und verbessern ihn gemeinsam. Dabei arbeiten alle sehr offen und eng miteinander, was nicht selbstverständlich ist, da man sich in der Forschung vor Veröffentlichungen sonst oft bedeckt hält und ein Konkurrenzdenken herrscht. Im Kompetenzzentrum besteht ein besonderes Vertrauen zueinander – man teilt Ideen und spricht offen über diese. Das bildet ein sehr innovatives Umfeld.

Rückblickend auf fast drei Jahre Kompetenzzentrum: Was ist euer Highlight?

Wellens — Wir haben starke Konsortien gebildet, in denen viele Parteien zusammenkommen, um gemeinsam in Verbundprojekten zu forschen. Diese Grundlage geschaffen zu haben, ist ein Highlight für mich. In den Projekten selbst haben wir viele Fortschritte gemacht und ich hoffe darauf, dass wir weiter interessante Ergebnisse bekommen, die sichtbar machen, wie groß die Kompetenzen sind, die wir aufgebaut haben. Das »eine« große wissenschaftliche Highlight steht zwar noch aus, aber wir sind auf dem Weg dahin.

Tutschku — Wir hatten viele Highlights, aber die Developer Conference, die wir im Herbst 2021 veranstaltet haben, war für mich etwas ganz Besonderes. So eine Konferenz gab es in dieser Form meines Wissens noch nicht, weder in Baden-Württemberg noch in Deutschland. Die Teilnehmenden aus den Forschungsbereichen Quantencomputing Soft- und Hardware sind sich an zwei Tagen offen begegnet. Den Spirit an der Veranstaltung zu fühlen, wie über 80 höchstausgebildete Forschende zusammenkommen und an einem Strang ziehen, das war großartig und hat mir gezeigt: Es ist nicht eine Frage ob, sondern nur wann im Quantencomputing in Baden-Württemberg etwas ganz Großes geht.

How does collaboration work in an interdisciplinary research center such as the KQCBW?

Wellens — Collaboration is going well and exchanges are taking place beyond the project boundaries. The individual Fraunhofer institutes and universities are in some cases part of several projects, which results in synergies. Some research questions arise in different projects, such as error mitigation or optimization of the QAOA algorithm, which ultimately allows everyone to benefit from each other.

Tutschku — A special feature of the cooperation in the KQCBW is, above all, its spirit. The people in the competence center work together closely and with a special motivation. They accept the current state of the technology and improve it together. In the process, everyone works very openly and closely with each other. This is not to be taken granted, since people in research often keep a low profile before publications, and a competitive mentality prevails. In the competence center, there is a special trust in each other—people share ideas and talk openly about them. This creates a very innovative environment.

Looking back on almost three years of Competence Center: What is your highlight?

Wellens — We have formed strong consortia in which many parties come together to conduct joint research in collaborative projects. To have laid this foundation is a highlight for me. In the projects themselves, we have made a lot of progress. I hope that we will continue to get exciting results that showcase how great the competences are that we have built up. The »one« big scientific highlight is still to come, but we are on the way.

Tutschku — We had many highlights, but the Developer Conference that we held in the fall of 2021 was very special for me. As far as I know, there has never been a conference like this before, neither in Baden-Württemberg nor in Germany. Quantum computing researchers from software and hardware met openly over two days. Feeling the spirit at the event, how more than 80 highly educated researchers gathered and pulled together, was amazing. Being part of this showed me that it is not a question of if, but when something really big is going to happen in the field of quantum computing in Baden-Württemberg.

Die fünf Verbundprojekte des KQCBW

The five joint projects within the KQCBW

Zum Jahresbeginn 2023 startete die zweite Förderphase des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW). Darin werden fünf Verbundprojekte durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert. In den Vorhaben arbeiten Forschende aus insgesamt sechs Fraunhofer-Instituten gemeinsam mit 17 weiteren Universitäts-, Hochschul- und außeruniversitären Einrichtungen des Landes sowie 56 assoziierten Unternehmenspartnern aus Baden-Württemberg und Deutschland zusammen, um mithilfe der Quantencomputing-Ressourcen des Kompetenzzentrums die Forschung und Entwicklungsarbeiten in verschiedenen Themenstellungen voranzutreiben.

The second funding phase of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) started at the beginning of 2023. Five collaborative projects are being funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economics, Labor and Tourism. Within the projects, researchers from a total of six Fraunhofer institutes are working together with another 17 university, college and non-university institutions in the state, as well as 56 associated corporate partners from Baden-Württemberg and Germany. The partners are jointly advancing research and development work on various topics using quantum computing resources from the competence center.





SEQUOIA End-to-End

Wesentliches Ziel des Verbundforschungsprojekts ist es, die heutigen Engpässe im gesamten Quantensoftware-Entwicklungsprozess transparent zu machen und durch ganzheitliches Quantensoftware-Engineering performante, automatisierte und steuerbare End-to-End-Lösungen für industrielle Anwendungsfälle zu erforschen und bereitzustellen.

The essential goal of the collaborative research project is to make the current bottlenecks in the entire quantum software development process transparent and to explore and provide performant, automated and controllable end-to-end solutions for industrial use cases through holistic quantum software engineering.



SiQuRe II

Das Forschungsvorhaben behandelt die Frage, unter welchen Bedingungen ein gekoppeltes Spinsystem, bestehend aus Stickstoff-Vakanz-Zentren und einigen ¹³C-Atomen, robuste Quantenzustände aufweist, die sich als Qubit-System für den Aufbau von festkörperbasierten Quantencomputern nutzen lassen. Die Ergebnisse sollen im Hinblick auf ihre Skalierbarkeit erforscht werden.

The research project addresses the question under which conditions a coupled spin system consisting of NV centers and some ¹³C atoms exhibits robust quantum states that can be used as a qubit system for the construction of solid-state-based quantum computers. The results will be explored in terms of scalability.



QuEST+

Ziel des Projekts ist die Erforschung von Simulationen elektrochemischer Prozesse zur Realisierung nachhaltiger Energieträger. Im Zentrum stehen dabei die Anwendung von Fehlermitigationsstrategien sowie die Weiterentwicklung von Quantencomputing-Algorithmen und die Lösung partieller Differentialgleichungen.

The aim of the project is to research simulations of electrochemical processes for the realization of sustainable energy sources. The focus is on the application of error mitigation strategies as well as the further development of quantum computing algorithms and the solution of partial differential equations.

QC4BW II – Skalierbare Diamant-basierte Quantenhardware

QC4BW II—scalable diamond-based quantum hardware

Quantencomputer bieten innovative Lösungsmethoden, die über die Leistungsfähigkeit klassischer Computer hinausgehen und damit neue Möglichkeiten eröffnen. Im Verbundprojekt »QC4BW II« des Kompetenzzentrums für Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW) wird ein innovativer Ansatz für Qubits, das grundlegende Element eines Quantencomputers, auf Basis von Farbzentren in hochreinem Diamant verfolgt. Das spintronische Quantenregister, das in der ersten Projektphase entstanden ist, basiert auf ^{13}C -Kernspins, während das Auslesen über den Elektronenspin eines Farbzenters realisiert wird.

Forschende des KQCBW haben in der ersten Phase des Projekts »QC4BW II« erfolgreich einen Quantenprozessor entwickelt, der aus einem Register aus Kernspin-basierten Qubits besteht. Der elektronische Spin eines Farbzenters diente dazu, das aus ^{13}C -Kernspins bestehende Quantenregister zu adressieren und auszulesen. In der experimentellen Demonstration eines drei-Qubit-Quantenregisters konnten durchschnittliche Gatterfehler für Ein-Qubit-Gatter und Zwei-Qubit-Gatter kleiner als 0,1 realisiert werden.

In der zweiten Phase des KQCBW sollen die bisherigen Fortschritte und Erkenntnisse weiterentwickelt und ausgebaut werden. Die vier Schwerpunkte der zweiten Projektphase sind darauf ausgelegt, die Leistungsfähigkeit des Quantenprozessors durch Hardware-Weiterentwicklung und effizientere Quantenalgorithmen zu steigern. Zudem sollen essentielle Quantenalgorithmen im Bereich der Simulation von Supraleitern und quantenchemischen Prozessen entwickelt werden, die auf dem Quantenprozessor ausgeführt werden.

The innovative problem-solving techniques provided by quantum computers outperform those of traditional computers, thereby creating new opportunities. A novel strategy for qubits, the central component of a quantum computer, based on color centers in high-purity diamond is pursued in the collaborative project QC4BW II within Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW). The readout is accomplished by the electron spin of a color center, while the spintronic quantum register, developed during the first project phase, is realized with ^{13}C nuclear spins.

Researchers from KQCBW successfully developed a quantum processor with a register of nuclear-spin qubits in the project's initial phase. The quantum register consisting of nuclear spins of ^{13}C atoms was addressed and read out using the electronic spin of a color center. Average gate errors for single-qubit gates and two-qubit gates in the experimental demonstration of a three-qubit quantum register were both below 0.1.

This solid foundation will now be further developed and expanded in the second phase of the KQCBW. The second project phase's four primary goals are intended to boost the quantum processor's performance through the development of more effective hardware and quantum algorithms. In addition, essential quantum algorithms in the area of superconductor simulation and quantum chemical processes will be developed to be executed on the quantum processor.

- Fraunhofer ICT
- Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Theorie der Kondensierten Materie
- Karlsruher Institut für Technologie, Physikalisches Institut
- Universität Konstanz, Fachbereich Physik
- Universität Stuttgart, 3. Physikalisches Institut
- Universität Ulm, Institut für Quantenoptik

Die zweite Projektphase konzentriert sich auf vier Hauptziele:

1. Verbesserung des Spin-basierten Quantenprozessors: Steigerung der nutzbaren Qubitanzahl auf neun Qubits und Einsatz als Quantenregister oder Quantenspeicher
2. Skalierungspotential durch NV-NV-Kopplung: Untersuchung der dipolaren Kopplung zwischen benachbarten NV-Zentren als alternative Skalierungsstrategie
3. Algorithmen: Optimierung des Trotter-Algorithmus, Fortführung der Arbeiten zu Teilroutinen und Algorithmen für quantenmechanische Berechnungen an NISQ-Systemen
4. Applikation: Anwendung der entwickelten Algorithmen, einschließlich des Variational Quantum Eigensolver (VQE) und quantenchemischer Verfahren, auf den Spin-basierten Quantenprozessor und den IBM Quantum System One, um die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Quantencomputing-Architekturen zu vergleichen

Die erfolgreiche Umsetzung dieser Ziele erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Forschungseinrichtungen und die Integration der Ergebnisse aus der ersten Projektphase. Die Anpassung der entwickelten Algorithmen an die spezifische Architektur der NV-Zentren-basierten Quantencomputer und die Verbesserung der Fehlermitigationsprotokolle werden entscheidend für den Erfolg der zweiten Phase sein.

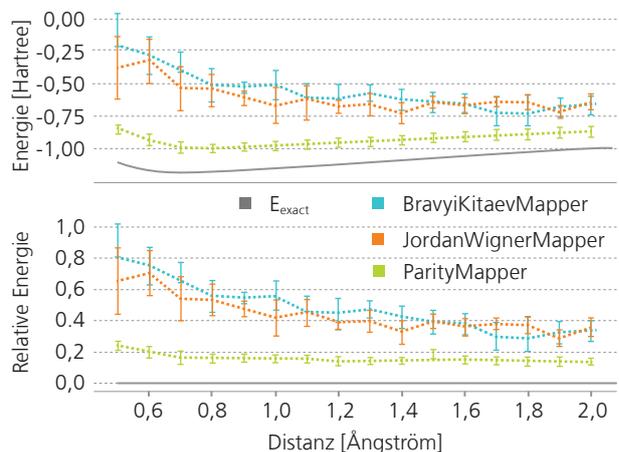
Dissoziationsprofil von molekularem Wasserstoff berechnet auf einem Simulator eines IBM-Quantencomputers mit verschiedenen Mappern. Der Parity-Mapper benötigt aufgrund von Symmetriebetrachtungen zwei Qubits weniger, weshalb die Quantenschaltkreise kleiner sind als die Schaltkreise bei den anderen Mappern. Dadurch ergibt sich der geringere Fehler in der Energieberechnung.

Potential-energy surface of molecular hydrogen calculated with a simulator of an IBM quantum computer using different mappers. Due to symmetry considerations, the parity mapper needs two qubits less which results in shorter quantum circuits than for the other mappers. This in turns leads to smaller errors for the calculation of the potential energy.

The second project phase focuses on four main objectives:

1. Improvement of the spin-based quantum processor: Increasing the number of usable qubits to nine and using them as a quantum register or quantum memory.
2. Scaling potential through NV-NV coupling: Investigation of dipolar coupling between neighboring NV centers as an alternative scaling strategy.
3. Algorithms: Optimization of the Trotter algorithm, continuation of work on subroutines and algorithms for quantum mechanical calculations on NISQ systems.
4. Application: Implementation of the developed algorithms, including the Variational Quantum Eigensolver (VQE) and quantum chemical methods, on the spin-based quantum processor and the IBM Quantum System One, to compare the performance of different quantum computing architectures.

Close collaboration between the participating research institutions and integration of results from the first project phase are essential for the successful execution of these objectives. The success of the second phase will largely depend on the ability to adapt the developed algorithms to the unique architecture of NV center-based quantum computers and to enhance error mitigation protocols.



QORA II – Quantenoptimierung mit resilienten Algorithmen

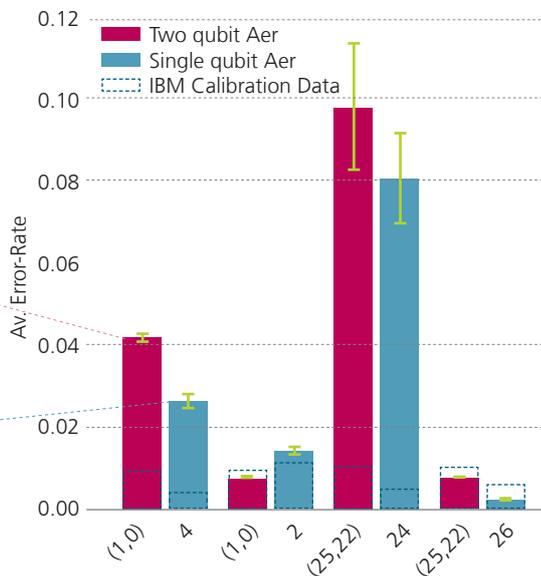
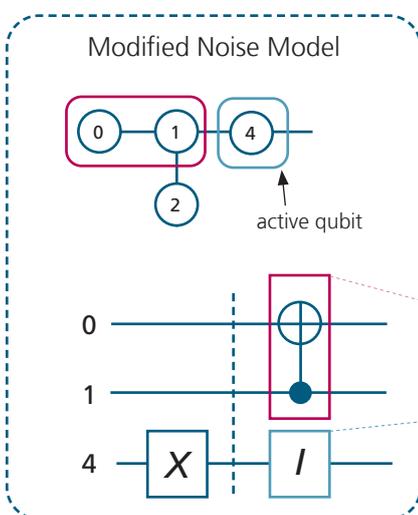
QORA II — Quantum optimization with resilient algorithms

Quantencomputer, die heute schon genutzt werden, wie der vom KQCBW koordinierte IBM Quantum System One in Ehningen, befinden sich noch in der NISQ-Ära (Noisy Intermediate-Scale Quantum). Ihre Prozessorarchitekturen sind in der Größe begrenzt und ihre Ergebnisse verrauscht, also durch Störeinflüsse fehlerbehaftet. Um ihr Potenzial dennoch zu nutzen, werden resiliente Algorithmen benötigt, wie sie in »QORA II« erforscht werden.

Quantum computers already usable today, such as the IBM Quantum System One in Ehningen coordinated by KQCBW, are still in the so called Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) era. Their processor architectures are limited in size and their results are noisy, meaning error-prone due to interferences. In order to exploit their potential, resilient algorithms are needed, as they are being researched in QORA II.

Unternehmen – auch außerhalb der Finanzbranche – sind immer mehr mit der Notwendigkeit konfrontiert, große und komplexe Portfolios zu verwalten, die bereits jetzt einen massiven Einsatz von Informationstechnologie erfordern. Dabei wird die Fähigkeit, schnell optimale Entscheidungen zu treffen, zunehmend zu einem maßgeblichen Wettbewerbsvorteil. Quantencomputer bieten die Perspektive, konventionelle Rechner bei den einschlägigen Optimierungsverfahren zu übertreffen und so portfoliobezogene Entscheidungen zu beschleunigen.

Companies — even outside the financial sector — are increasingly confronted with the need to manage large and complex portfolios that already require massive use of information technology. In this context, the ability to make optimal decisions as fast as possible is increasingly becoming a decisive competitive advantage. Quantum computers offer the prospect of outperforming conventional computers in the relevant optimization procedures and thus accelerating portfolio-related decisions.



Skizze des in QORA entwickelten Crosstalk-fähigen Rauschmodells, das verbesserte Leistung im Vergleich zu einem Standard-Rauschmodell liefert
Outline of the crosstalk-aware noise model developed in QORA, which provides improved performance compared to standard noise model

- Fraunhofer IAO
- Duale Hochschule Baden-Württemberg, Ravensburg
- Universität Konstanz, Fachbereich Physik
- Universität Stuttgart, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologie
- Universität Stuttgart, Institut für Technische Informatik
- Universität Tübingen, Institut für theoretische Physik

Die praxisrelevante Nutzbarkeit von Quantencomputern wird jedoch zurzeit wesentlich von der Fehleranfälligkeit der in ihnen verwendeten Qubits beschränkt. Für eine möglichst frühzeitige Nutzung des vollen Potenzials von Quantencomputern ist demnach die Weiterentwicklung von Fehlerkorrekturverfahren sowie von fehlerresistenten Quantenalgorithmen von entscheidender Wichtigkeit. Deswegen zielt das Projekt »QORA II« des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW) darauf ab, komplexe und praktisch relevante Quantenalgorithmen auf eine resiliente Art und Weise auf inhärent unzuverlässiger Quantenhardware auszuführen. Dazu werden Optimierungsverfahren, die in der ersten Projektphase basierend auf dem »Quantum Approximate Optimization Algorithm« (QAOA) erprobt wurden, weiterentwickelt und auf dem in Ehningen bei Stuttgart von der Fraunhofer-Gesellschaft betriebenen Quantencomputer IBM Quantum System One erprobt.

Zu diesem Zweck werden auf die fehleranfällige Hardware des Quantenrechners zugeschnittene Verfahren zur Charakterisierung und Korrektur der darauf auftretenden Fehler entwickelt sowie neue, über die bislang im Zentrum des Vorgängerprojekts stehenden QAOA-Ansätze hinausgehende algorithmische Konzepte verfolgt. Ein bisheriges Ergebnis ist die Charakterisierung und Modellierung des Crosstalks von supraleitenden Transmon-Prozessoren. Dieser in »QORA« entwickelte Ansatz ermöglicht es die Fehler der NISQ-Systeme, die sich in Korrelationen zwischen gleichzeitig ausgeführten Quantengattern manifestieren, genauer zu analysieren und bildet damit die Basis für die Entwicklung präziserer Simulationen aktueller Quantencomputer-Hardware und die Entwicklung neuer und besserer Protokolle zur Fehlerunterdrückung und -minderung.

Die hinsichtlich ihrer Fehlerresistenz optimierten Quantenalgorithmen werden neben der Portfoliooptimierung schließlich auch auf weitere für den Finanzbereich relevante Fälle, wie zum Beispiel für Kredit scoring, Clustering von Kundendaten oder Risikomodellierung angewendet.

The practical usability of quantum computers is currently significantly limited by the error-proneness of the qubits used. To exploit the full potential of quantum computers as early as possible, the further development of error correction methods as well as error-resistant quantum algorithms is therefore of crucial importance. The project QORA II of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) aims at executing complex and practically relevant quantum algorithms in a resilient manner on inherently unreliable quantum hardware. For this purpose, optimization methods that were tested in the first project phase based on the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) will be further developed and tested on the quantum computer IBM Quantum System One operated by the Fraunhofer-Gesellschaft in Ehningen near Stuttgart.

To achieve the project goal, methods tailored to the error-prone hardware of the quantum computer will be developed for characterizing and correcting the errors occurring on it, and new algorithmic concepts will be pursued. One result to date is the characterization and modeling of the crosstalk of superconducting transmon processors. This approach, developed in QORA, allows to analyze in more detail the errors of NISQ systems manifested in correlations between concurrently executed quantum gates. It forms the basis for the development of more accurate simulations of current quantum computing hardware and for the development of new and better protocols for error suppression and mitigation.

The quantum algorithms, which are optimized with respect to their error resistance, will eventually be applied not only to portfolio optimization but also to other cases relevant for the financial sector, such as credit scoring, clustering of customer data or risk modeling.

Kooperationen, die schützen: Fraunhofer VVS

Collaborations that protect: Fraunhofer VVS

Die zwölf Institute des Fraunhofer-Leistungsbereich Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS forschen für Schutz und Sicherheit gegenüber militärischer, technischer, terroristischer, natürlicher und krimineller Bedrohung. Dabei bringt das Fraunhofer IAF seine umfassende Infrastruktur und spezifischen Fähigkeiten in der Erforschung und Entwicklung festkörperbasierter Technologien, Komponenten und Systeme ein.

Über den Fraunhofer VVS

Im Fraunhofer VVS haben sich zwölf Institute zusammenschlossen, um ihre Kompetenzen und Leistungen in den Gebieten Verteidigung und zivile Sicherheit zu bündeln. Auf nationaler wie internationaler Ebene bietet der Fraunhofer VVS anwendungsnahe Lösungen bis hin zu operativer Unterstützung. In der Verteidigungsforschung entwickeln die Institute Technologien und Systeme für das Bundesministerium der Verteidigung, seine nachgeordneten Behörden und die Bundeswehr. Auf europäischer Ebene bringen sie sich in Projekten ein, die vom European Defence Fund der Europäischen Kommission gefördert werden. Für die zivile Sicherheit entwickeln die Institute des Fraunhofer VVS technische Lösungen und Systeme, um die Gesellschaft bestmöglich zu schützen, immer im Hinblick auf aktuelle und künftige Bedrohungslagen wie beispielsweise Hyperschall-Waffensysteme. Durch gegenseitige Unterstützung, fachliche Ergänzung, Aufgabenteilung und abgestimmte Schwerpunktsetzung stiften die Institute gemeinsamen Nutzen.

The twelve institutes of Fraunhofer Segment for Defense and Security VVS pursue research for protection and security against military, technical, terrorist, natural, and criminal threats. Fraunhofer IAF contributes its comprehensive infrastructure and specific capabilities in the research and development of solid-state technologies, components, and systems.

About Fraunhofer VVS

Twelve institutes have joined forces in the Fraunhofer VVS to bundle their competences and services in the fields of defense and civil security. At both national and international level, Fraunhofer VVS offers application-oriented solutions as well as operational support. In defense research, the institutes develop technologies and systems for the German Ministry of Defence, its subordinate agencies and the German Armed Forces (Bundeswehr). At the European level, they are involved in projects funded by the European Defence Fund of the European Commission. For civil security, the Fraunhofer VVS institutes develop technical solutions and systems to protect society in the best possible way, always with regard to current and future threats such as hypersonic weapon systems. Through mutual support, complementary expertise, division of labor, and co-ordinated focus, the institutes create joint benefits.



Der Fraunhofer VVS orientiert seine Forschungsarbeiten an aktuellen und zukünftigen Anforderungen, wie zum Beispiel der Detektion und Abwehr von Hyperschall-Flugkörpern

Fraunhofer VVS orients its research work to current and future requirements, such as the detection and defense of hypersonic missiles

Einsatzszenario für einen GaN-Hochleistungsverstärker: Radarantenne eines mobilen Luftabwehrsystems

Application scenario for a GaN high-power amplifier: radar antenna of a mobile air defense system



Fraunhofer IAF innerhalb des Leistungsbereichs

Im Rahmen des Fraunhofer VVS bietet das Fraunhofer IAF Forschungs- und Entwicklungsleistungen für Schutz-, Aufklärungs- und Sicherheitsanwendungen. Aufgrund der hochmodernen Forschungsinfrastruktur des Instituts und der Expertise seiner Forschenden umfasst das Portfolio Leistungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette für III/V-Verbindungshalbleiter und synthetischen Diamant in Bereichen der Elektronik, Optoelektronik und Quantentechnologien.

In der Hochfrequenz- und Leistungselektronik realisieren Forschende des Fraunhofer IAF beispielsweise festkörperbasierte Verstärkersysteme und Module für breitbandige Kommunikationsverbindungen mit hoher Reichweite oder Störsender mit hoher Ausgangsleistung im Millimeterwellenbereich. Das Angebot im Bereich Optoelektronik reicht von Detektormatrizen für hochauflösende und reichweitenstarke Sensorsysteme bis hin zu verschiedenen Infrarot-Lasern, die in der abstandsfähigen Echtzeit-Gefahrstoffdetektion oder zur Durchführung gerichteter Gegenmaßnahmen eingesetzt werden. Ferner arbeitet das Fraunhofer IAF an Quantentechnologien, die perspektivisch GPS-unabhängige Navigation (Quantensensorik) und abhörsichere Kommunikation (Quantenkryptografie) ermöglichen sollen.

Fraunhofer IAF within the segment

Within the Fraunhofer VVS, Fraunhofer IAF offers research and development services for safety, security and reconnaissance applications. Due to the institute's state-of-the-art research infrastructure and the expertise of its researchers, the portfolio covers services along the entire value chain for III-V semiconductors and synthetic diamond in areas of electronics, optoelectronics and quantum technologies.

In the field of high-frequency and power electronics, researchers at Fraunhofer IAF realize, for example, solid-state-based amplifier systems and modules for broadband communication links with long ranges or jammers with high output power in the millimeter wave range. The optoelectronics portfolio ranges from detector for high-resolution and long-range sensor systems up to various infrared lasers used in distance-capable real-time detection of hazardous substances or for implementing directed countermeasures. Furthermore, Fraunhofer IAF is working on quantum technologies with the potential to enable GPS-independent navigation (quantum sensing) and tap-proof communication (quantum cryptography).

Partner

- Fraunhofer IAF
- Fraunhofer ICT
- Fraunhofer FHR
- Fraunhofer FKIE
- Fraunhofer EMI
- Fraunhofer INT
- Fraunhofer IOSB
- Fraunhofer IIS
- Fraunhofer IESE
- Fraunhofer IVI
- Fraunhofer LBF
- Fraunhofer IOF

Zehnjähriges Jubiläum der Zusammenarbeit mit Fraunhofer UK Research Ltd.

Ten-year anniversary of collaboration with Fraunhofer UK Research Ltd.

Die Fraunhofer UK Research Ltd. mit Sitz in Glasgow, Schottland, bündelt die Fraunhofer-Aktivitäten im Vereinigten Königreich. Der Fraunhofer UK rechtlich zugeordnet ist das Fraunhofer Center for Applied Photonics CAP, das 2012 als Ausgründung des Fraunhofer IAF entstand. Die enge Zusammenarbeit der Einrichtungen jährte sich 2022 zum zehnten Mal. Anlässlich der Feier zum zehnjährigen Jubiläum in der Royal Society in London am 14. Juni 2022 gratulierte der kommissarische Institutsleiter des Fraunhofer IAF, Prof. Dr. Rüdiger Quay, persönlich.

Fraunhofer UK Research Ltd., based in Glasgow, Scotland, pools Fraunhofer activities in the UK. The Fraunhofer Center for Applied Photonics CAP, which was founded in 2012 as a spin-off of Fraunhofer IAF, is legally assigned to Fraunhofer UK. The year 2022 marks the tenth anniversary of the close collaboration between the two institutes. Prof. Dr. Rüdiger Quay, acting institute director of Fraunhofer IAF, personally congratulated on the occasion of the tenth anniversary celebration at the Royal Society in London on June 13, 2022.

Fraunhofer UK und Fraunhofer CAP

Seit ihrer Gründung 2012 in Glasgow haben die Fraunhofer UK und das Fraunhofer CAP wertvolle Beiträge zur technologischen Entwicklung im Vereinigten Königreich geleistet. Durch die produktive Zusammenarbeit mit britischen wie globalen Forschungseinrichtungen und Wirtschaftsunternehmen konnten sich die Einrichtungen aktiv an den internationalen Wissens- und Technologietransfers beteiligen. Dabei trägt das

Fraunhofer UK and Fraunhofer CAP

Since their founding in Glasgow in 2012, Fraunhofer UK and Fraunhofer CAP have made valuable contributions to technological developments in the UK. Through productive collaboration with both UK and global research institutions and commercial enterprises, the institutions have been able to actively participate in international knowledge and technology transfer. Fraunhofer CAP is developing state-of-the-art



Wir hatten das große Privileg, Fraunhofer UK im Jahr 2012 mithilfe des Fraunhofer IAF, der schottischen Regierung, ihrer Behörden und der Universität Strathclyde gründen zu können. Unsere zahlreichen Partner und Kunden sind ein Beweis für die erfolgreiche Umsetzung des Fraunhofer-Modells in Großbritannien.«

"We were hugely privileged to have the opportunity to establish Fraunhofer UK in 2012 with help from Fraunhofer IAF, Scottish Government, her agencies and the University of Strathclyde. Our many partners and customers are testament to the successful operation of the Fraunhofer model in the UK."

Simon Andrews
Executive Director Fraunhofer UK



Fraunhofer CAP mit der Entwicklung modernster Laser und optischer Systeme für Anwendungen in den Bereichen Energie, Sicherheit, Umwelt, Sensorik, Raumfahrt, Life Sciences und Quantentechnologien maßgeblich dazu bei, die technologische Souveränität und das gesellschaftliche Zusammenleben Europas nachhaltig zu verbessern. Die Bedeutung des Fraunhofer CAP für das britische Quanten-Ökosystem wurde im jüngsten Quantentechnologie-Strategiepapier des britischen Ministeriums für Wissenschaft, Innovation und Technologie wiederholt hervorgehoben.

Kooperation in der Optoelektronik und in den Quantentechnologien

Fraunhofer IAF und CAP bündeln ihre Kompetenzen bei der Realisierung laserbasierter Messsysteme und der Entwicklung hochpräziser Quantenmagnetometer. Auf der LASER World of PHOTONICS 2022 stellte das Fraunhofer IAF ein gemeinsam entwickeltes integrierbares Infrarotspektroskopie-Messsystem vor, das kontaktloses und schnelles Scannen im Millisekundenbereich ermöglicht. Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts »QMag«, das vom Fraunhofer IAF koordiniert wird, entwickelt das Fraunhofer CAP zudem Diamantmikrooptiken und Wellenleiter zur Adressierung von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant und nutzt optische Charakterisierungsmethoden zur Bewertung der NV-Zentren für die Magnetometrie. Damit leistet es eine wesentliche Vorarbeit zur Realisierung des Projektziels: einem bildgebenden Rastersondenmagnetometer auf Basis von NV-Zentren in Diamant.

lasers and optical systems for applications in the fields of energy, security, environment, sensors, space, life sciences and quantum technologies. Thereby, it contributes to sustainably improving Europe's technological sovereignty and society. The importance of Fraunhofer CAP to the UK's quantum ecosystem was highlighted repeatedly in the UK's most recent quantum technology strategy document.

Cooperation in optoelectronics and quantum technologies

Fraunhofer IAF and CAP combine their competences in the realization of laser-based measurement systems and the development of high-precision quantum magnetometers. At LASER World of PHOTONICS 2022, Fraunhofer IAF presented a jointly developed integrable infrared spectroscopy measurement system that enables contactless and fast scanning in the millisecond range. As part of the Fraunhofer lighthouse project QMag, which is coordinated by Fraunhofer IAF, Fraunhofer CAP is also developing diamond micro-optics and waveguides for addressing nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond and using optical characterization methods to evaluate NV centers for magnetometry. It thus performs essential preliminary work for the realization of the project goal: an imaging scanning probe magnetometer based on NV centers in diamond.



Das Fraunhofer CAP ist seit seiner Gründung von Jahr zu Jahr gewachsen und hat in über 200 Projekten mit über 100 Unternehmenspartnern zusammengearbeitet. Die Kooperation mit dem Fraunhofer IAF und dem Institut für Photonik der Universität Strathclyde ist für beide Seiten von großem Nutzen.«

"Fraunhofer CAP has grown year-on-year since its inception and has worked on over 200 competitively won projects with over 100 company partners. The Centre has enjoyed much mutually beneficial collaboration with Fraunhofer IAF and the Institute of Photonics, University of Strathclyde."



Prof. Martin Dawson
Head of Fraunhofer CAP





Kooperieren mit der Industrie

Collaborating with industry

In Netzwerken und Hubs zu Nanoelektronik, Photonik und Quantentechnologien sind wir mit Partnern im Austausch, um gemeinsam Technologien voranzubringen und Innovationen zu beschleunigen.

In networks and hubs on nanoelectronics, photonics and quantum technologies, we are in dialogue with industrial partners to jointly advance technologies and accelerate innovations.

Direkter Austausch unter einem Dach: Das Start-up Quantum Brilliance arbeitet in eigenen Räumen am Fraunhofer IAF eng mit den Forschenden des Instituts zusammen

Direct exchange under one roof: The start-up Quantum Brilliance works closely with the institute's researchers in its own rooms at Fraunhofer IAF

Quantum^{BW}

Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg

Die Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg (Quantum^{BW}) bündelt die einzigartige wissenschaftliche und wirtschaftliche Kompetenz in Europas führender Innovationsregion Baden-Württemberg, um die Quantenrevolution mitzugestalten. Quantum^{BW} ist eine Innovationsinitiative des Landes mit dem Ziel, den Transfer quantentechnologischer Forschung in Anwendungen zu fördern, um verschiedene Lebensbereiche zu verbessern und Märkte disruptiv zu verändern.

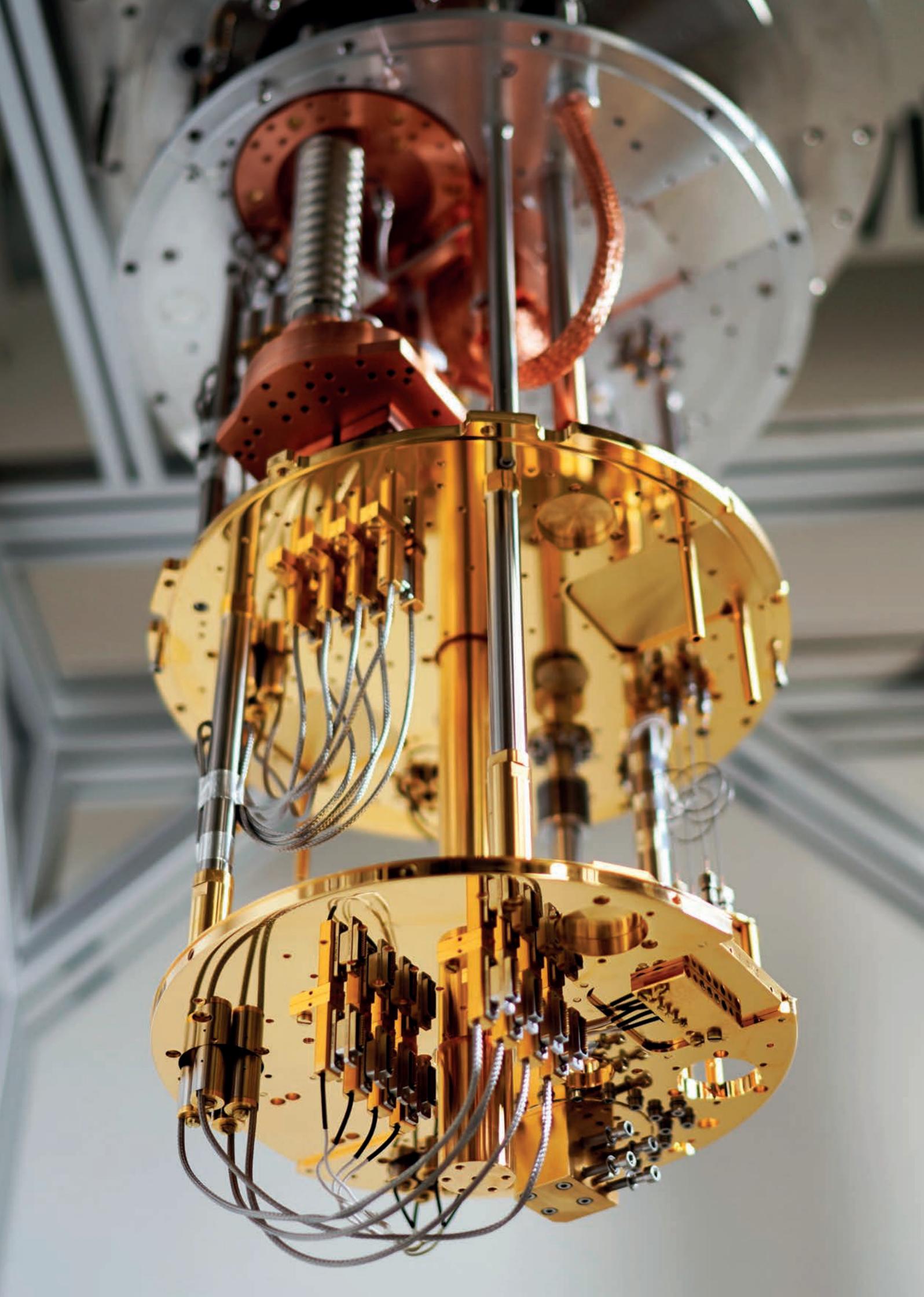
In Quantum^{BW} schließen sich führende Forschungseinrichtungen und Unternehmen an verschiedenen Standorten des Landes zusammen und treiben die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Zukunftsthemen Quantensensorik und Quantencomputing voran. Die Geschäftsstelle Quantum^{BW}, die die Aktivitäten der Innovationsinitiative koordiniert und die erste Anlaufstelle für bestehende und zukünftige Stakeholder bildet, wird durch das Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST) der Universität Stuttgart und der Universität Ulm zusammen mit den Instituten Fraunhofer IAF und IAOführt. Gemeinsam fördern die baden-württembergischen Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus die Initiative.

Quantum^{BW} zielt auf alle Bereiche des Quantentechnologie-Ökosystems ab. Sie beschleunigt Innovationen durch anwendungsorientierte, kooperative Forschungs- und Entwicklungsvorhaben und schafft die dafür notwendigen leistungsfähigen Infrastrukturen für Kooperationen zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Investoren. Gleichzeitig unterstützt sie die Qualifizierung von Fach- und Nachwuchskräften für Wissenschaft und Unternehmen und kreiert Voraussetzungen für eine lebendige Gründerszene, die das Entstehen neuer Unternehmen im Land begünstigt.

The Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg (Quantum^{BW}) bundles the unique scientific and economic expertise in Europe's leading innovation region Baden-Württemberg to help shaping the quantum revolution. Quantum^{BW} is an innovation initiative of the state with the goal of promoting the transfer of quantum technology research into applications to improve various areas of life and disruptively change markets.

In Quantum^{BW}, leading research institutions and companies at various locations in the state join forces to drive research and development work in the future research fields of quantum sensing and quantum computing. The Quantum^{BW} office, which coordinates the activities of the innovation initiative and is the first point of contact for existing and future stakeholders, is managed by the Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST) of the University of Stuttgart and the University of Ulm together with the institutes Fraunhofer IAF and IAOführt. The Baden-Württemberg Ministries of Science, Research and the Arts and of Economic Affairs, Labor and Tourism jointly support the initiative.

Quantum^{BW} targets all areas of the quantum technology ecosystem. It accelerates innovations through application-oriented, cooperative research and development projects and creates the necessary high-performance infrastructures for cooperation between science, industry and investors. At the same time, it supports the qualification of specialists and junior staff for science and companies and creates a lively start-up scene that favors the emergence of new companies in the state.



Open6GHub



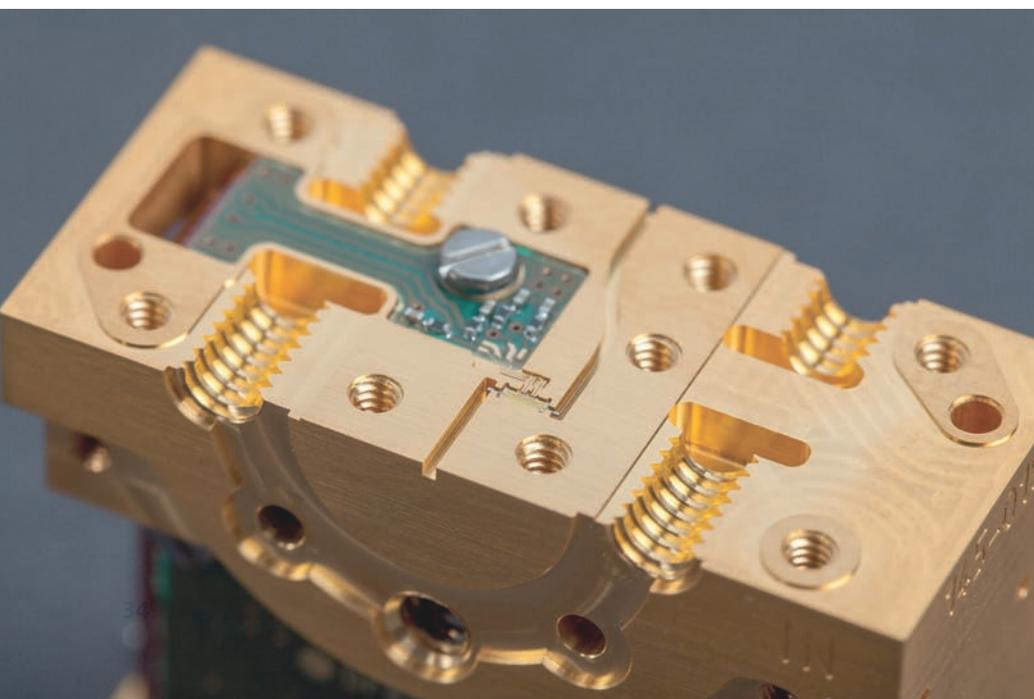
6G for Society and Sustainability

Der Open6GHub wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit und die technologische Souveränität sowie die Position Deutschlands und Europas im internationalen Wettbewerb um 6G zu stärken. Innerhalb des Hubs sollen Kooperationen zwischen Forschung, Industrie und Anwendern in Form eines offenen Innovationssystems gefördert werden.

Ein Forschungsschwerpunkt in der Entwicklung einer 6G-Gesamtarchitektur sind Terahertz-(THz-)Übertragungsverfahren – ein Bereich, in dem das Fraunhofer IAF langjährige Erfahrung besitzt. Aufbauend auf der am Institut entwickelten Hardware für 300-GHz-Funkverbindungen, die an eine bestehende Richtfunkinfrastruktur angeschlossen werden kann, soll die Entwicklung der THz-Übertragungstechnologien vorangetrieben werden. Diese und weitere 6G-Schlüsseltechnologien werden im Open6GHub zusammengeführt.

Open6GHub is funded by the Federal Ministry of Education and Research and aims to strengthen Germany's and Europe's competitiveness and technological sovereignty as well as their position in the international competition for 6G. Within the hub, collaborations between research, industry and users will be promoted in the form of an open innovation system.

One research focus in the development of an overall 6G architecture are terahertz (THz) transmission methods, an area in which Fraunhofer IAF has many years of experience. The development of THz transmission technologies will be advanced based on hardware for 300 GHz radio links developed at the institute. The hardware can be connected to an existing microwave radio relay infrastructure. These and other key 6G technologies will be brought together in the Open6GHub.



300 GHz Leistungsverstärker des Fraunhofer IAF für Terahertz-Funkverbindungen
300 GHz power amplifier of Fraunhofer IAF for terahertz radio links

6G Research and Innovation Cluster

Als Konsortialpartner des 6G Research and Innovation Cluster ist das Fraunhofer IAF Teil des Forschungshubs, der die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die nächste Generation der Mobilkommunikation (6G) auf allen Technologieebenen schaffen soll, vom Funkzugang über Kernnetze bis hin zu Glasfasertransportnetzen. 6G-RIC wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und konzentriert sich auf die Erforschung und Entwicklung einer sicheren, flexiblen und offenen Kommunikationsinfrastruktur als Grundlage für eine erfolgreiche Digitalisierung in der Wirtschaft und allen Bereichen der Gesellschaft.

In dem Netzwerk führender nationaler wissenschaftlicher Einrichtungen beteiligt sich das Fraunhofer IAF mit seiner Erforschung von THz-Funkstrecken mit Strahlschwenkungsfunktion. Dies ist eine Kerntechnologie für den kommenden Mobilfunkstandard, mit der mobile Teilnehmende über eine Entfernung von 50 bis 100 m im geplanten Netz bedarfsorientiert bedient werden können.

Fraunhofer IAF is a consortium partner of the 6G Research and Innovation Cluster. The research hub aims to create the scientific and technical basis for the next generation of mobile communications (6G) at all technology levels, from radio access to core networks and fiber transport networks. 6G-RIC is funded by the German Federal Ministry of Education and Research and focuses on researching and developing a secure, flexible and open communications infrastructure as foundation for successful digitization in business and all areas of society.

In the network of leading national scientific institutions, Fraunhofer IAF participates with its research on THz radio links with beam steering function. This is a core technology for the upcoming mobile radio standard, with which mobile users can be served on demand over a distance of 50 to 100 m in the planned network.



Die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF liefert wichtige Sub-THz-Komponenten. In Kombination mit unseren Algorithmen und Signalverarbeitungsmethoden können wir so die Leistungsfähigkeit unserer Entwicklungen für den Mobilfunk bei Sub-THz-Frequenzen auf Weltspitzenniveau demonstrieren.«

“The collaboration with Fraunhofer IAF provides important sub-THz components. In combination with our algorithms and signal processing methods, we can demonstrate the world-class performance of our developments for mobile communications at sub-THz frequencies.”

Prof. Dr.-Ing. Slawomir Stanczak
Coordinator 6G-RIC



QBN

IQBN

Quantum Business Network

Als Mitglied der ersten Stunde des Quantum Business Networks (QBN) ist das Fraunhofer IAF ein aktiver und gut vernetzter Partner im weltweit führenden Unternehmensnetzwerk für Quantentechnologien. QBN fördert die Vernetzung sowie die Gründung und Entwicklung von Unternehmen und Organisationen aus dem Feld der Quantentechnologien und ihrer Wertschöpfungsketten, um eine starke Quantenindustrie in Europa aufzubauen.

Auf gemeinsamen internationalen Events wie dem Industrieworkshop »QBN Meeting on Quantum Sensing«, der im Oktober 2022 in Freiburg stattfand, oder dem Gemeinschaftsstand auf der »SPIE Photonics West« im Januar 2023 bringt das Fraunhofer IAF seine Expertise im Bereich der diamantbasierten Quantentechnologien ein und profitiert dabei zugleich von dem weitreichenden Netzwerk. Innerhalb von QBN hat das Fraunhofer IAF starke Partnerschaften geschlossen und so den Grundstein für zahlreiche erfolgreiche Projekte gelegt.

Fraunhofer IAF has been a member of the Quantum Business Network (QBN) since its beginning and is an active and well-connected partner in the world's leading business network for quantum technologies. QBN promotes networking as well as the establishment and development of companies and organizations from the field of quantum technologies and their value chains in order to build a strong quantum industry in Europe.

At joint international events such as the industry workshop QBN Meeting on Quantum Sensing, which took place in Freiburg in October 2022, or the joint booth at the SPIE Photonics West in January 2023, Fraunhofer IAF contributes its expertise in the field of diamond-based quantum technologies and benefits equally from the far-reaching network. Within QBN, Fraunhofer IAF has established strong partnerships, laying the foundation for numerous successful projects.



Als Pionier mit weltweit führender Expertise und Infrastruktur in den Diamant-Quantentechnologien ist das Fraunhofer IAF ein überaus geschätzter und gefragter Netzwerk- und Kollaborationspartner im QBN.«

"As a pioneer with world-leading expertise and infrastructure in diamond quantum technologies, Fraunhofer IAF is a highly valued and popular networking and collaboration partner in the QBN."

Johannes Verst, CEO
Quantum Business Network UG



Innovative Quantum Sensing

Als Mitglied des von der EurA AG koordinierten und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) Netzwerks iQuSense ist das Fraunhofer IAF in technologischem Austausch mit über 25 Partnern aus der Industrie und Forschung, um die zweite Generation der Quantensensorik voranzutreiben. Der Fokus des internationalen Netzwerks liegt auf der Entwicklung und industriellen Verwertung von kompakten, robusten und energieeffizienten Quantensensoren und deren Schlüsselkomponenten. Das Fraunhofer IAF besitzt eine breite Expertise im Bereich der Quantensensorik mittels Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant, im Diamantwachstum sowie in der Laserentwicklung. Über das ZIM-Netzwerk sind starke Partnerschaften entstanden, beispielsweise zwischen der Charité – Universitätsmedizin Berlin und dem Fraunhofer IAF, die im 2022 gestarteten Leuchtturmprojekt »NeuroQ« zusammenarbeiten (mehr ab Seite 76).

Das ZIM-Netzwerk läuft bis Mitte 2025. Im Anschluss ist die Überführung in ein EurA-Quantentechnologie-Ökosystem geplant.

As a member of the ZIM innovation network iQuSense, coordinated by EurA AG and funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), Fraunhofer IAF is in technological exchange with more than 25 partners from industry and research to advance the second generation of quantum sensor technology. The focus of the international network is on the development and industrial exploitation of compact, robust and energy-efficient quantum sensors and their key components. Fraunhofer IAF has a broad expertise in the field of quantum sensing using nitrogen-vacancy centers in diamond, in diamond growth technology as well as in laser development. Strong partnerships resulted from the ZIM network. For example, Charité – Universitätsmedizin Berlin and Fraunhofer IAF joined forces for the lighthouse project NeuroQ, which started in 2022 (more from page 76).

The ZIM network will run until mid 2025. Afterwards, its transfer to a EurA quantum technology ecosystem is planned.

PUSHING QUANTUM TOWARDS INDUSTRY



EPIC



European Photonics Industry Consortium

Als Mitglied des European Photonics Industry Consortium (EPIC) bringt das Fraunhofer IAF seine Forschung im Bereich der Photonik und der Enabling-Technologien im Bereich der Quantentechnologien in den Industrieverband ein, der über 800 internationale Unternehmen umfasst. EPIC fördert ein lebendiges Photonik-Ökosystem, indem es ein starkes Netzwerk unterhält und als Katalysator und Vermittler für technologische und kommerzielle Fortschritte fungiert.

Das große Angebot an professionellen Veranstaltungen rund um Themen der Photonik werden vom Fraunhofer IAF regelmäßig genutzt, um sich über die neuesten Trends und den Stand der Forschung zu informieren, sich zu vernetzen sowie die eigene Forschung in die Community einzubringen. Zahlreiche Kontakte, die im Netzwerk geknüpft wurden, erzeugen anhaltende Synergien und ermöglichen eine fruchtbare Zusammenarbeit.

As a member of the European Photonics Industry Consortium (EPIC), Fraunhofer IAF contributes its research in photonics and enabling technologies in the field of quantum technologies to the industry association, which comprises over 800 international companies. EPIC fosters a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advances.

The wide range of professional events around photonics are regularly used by Fraunhofer IAF to keep up to date with the latest trends and the state of art, to network as well as to contribute their own research to the community. Numerous contacts established in the network create lasting synergies as well as fruitful collaborations.



Es ist großartig, eins der weltweit führenden Forschungsinstitute im Bereich der III/V-Halbleitertechnologien als Mitglied bei EPIC zu haben. Die Kollegen des Fraunhofer IAF nehmen regelmäßig an unseren Sitzungen teil, tragen zur Innovation bei und helfen anderen Mitgliedern, ihre Technologien voranzubringen.«

“It is great to have one of the world leading research institutes in III-V semiconductor technologies as part of EPIC. Colleagues at Fraunhofer IAF regularly attend our meetings, contribute to innovation, and help other members advance their technologies.”

Carlos Lee, Director General
EPIC European Photonics Industry Consortium



Innovationsnetz Optische Technologien und Quantentechnologien

Innovationen entstehen aufgrund der steigenden Komplexität und des Zusammenwirkens unterschiedlichster Disziplinen zunehmend in Netzwerken. Dadurch kommt innovationsfördernden Strukturen durch systematische Netzwerkbildung eine stetig wachsende Bedeutung zu. An dieser Stelle setzt Photonics BW an, um Entwickler, Hersteller und Anwender in der Photonik und den Quantentechnologien gezielt zu vernetzen. Darüber hinaus fördert Photonics BW den steten Austausch zwischen Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft.

Seit 2020 stellen Quantentechnologien einen zusätzlichen Schwerpunkt dar mit dem Ziel, einen langfristigen fachlichen Austausch sowie die Anbahnung von Projekten und Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen anzubahnen. Aktuell vereint Photonics BW rund 90 Mitglieder aus Industrie, kleinen und mittelständischen Unternehmen, Start-ups, Forschung sowie Banken und Beratungseinrichtungen. Mit der langjährigen Erfahrung in der Optoelektronik und der Quantensensorik ist das Fraunhofer IAF als Teil von Photonics BW in bester Gesellschaft, um zur Stärkung der Photonik-Branche in Baden-Württemberg beizutragen.

Due to increasing complexity and the interaction of a wide variety of disciplines, innovations are increasingly created in networks. As a result, structures that promote innovation through systematic networking are becoming increasingly important. This is where Photonics BW comes in, in order to connect developers, manufacturers and users in photonics and quantum technologies. In addition, Photonics BW promotes constant exchange between industry, science, politics and society.

Since 2020, quantum technologies have been an additional focus with the aim of initiating a long-term professional exchange and the initiation of projects and collaborations between companies and research institutions. Currently, Photonics BW unites around 90 members from industry, small and medium-sized enterprises, start-ups, research as well as banks and consulting institutions. With its many years of experience in optoelectronics and quantum sensor technology, Fraunhofer IAF is in good company as part of Photonics BW to contribute to strengthening the photonics industry in Baden-Württemberg.



Das Fraunhofer IAF ist seit fast 20 Jahren als hochinnovatives Forschungsinstitut insbesondere auch zum Zukunftsthema Quantentechnologien geschätztes Mitglied bei Photonics BW. Dafür danken wir und freuen uns sehr auf die weitere Zusammenarbeit!«

“Fraunhofer IAF has been a valued member of Photonics BW for almost 20 years as a highly innovative research institute, especially on the future topic of quantum technologies. We thank them and are very much looking forward to further collaboration!”

Dr. Andreas Ehrhardt, Managing Director
Photonics BW

Coordinator 6G-RIC



MATQu



Materials for Quantum Computing

In dem von der Europäischen Union geförderten Projekt MATQu kommen führende europäische Forschungs- und Technologieorganisationen aus dem Bereich der Festkörper-Quantentechnologien wie beispielsweise das französische Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA-Leti) und das Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) aus Belgien zusammen, um eine europäische Lieferkette für Materialien und Produktionsprozesse zu schaffen.

Mess- und Charakterisierungstechnologien sind ein entscheidender Baustein zur Erreichung dieses Ziels. Hier bringt das Fraunhofer IAF seine Expertise und Infrastruktur auf dem Gebiet der Tieftemperaturmesstechnik ein und bietet durch MATQu europäischen Unternehmen, insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen sowie Start-ups, neben dem notwendigen Know-how auch Zugang zu modernsten Test- und Charakterisierungsgeräten. Diese Schlüsselkompetenz für die Entwicklung von Quanten-Hardware bildet eine Grundlage für den Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette industriell fertiger Quantencomputer.

The MATQu project, funded by the European Union, brings together leading European research and technology organizations in the field of solid-state quantum technologies, such as the French Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA-Leti) and Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) from Belgium, to create a European supply chain for materials and production processes.

Measurement and characterization technologies are a key building block to achieve this goal. Here, Fraunhofer IAF contributes its expertise and infrastructure in the field of cryogenic measurement technology and thus offers European companies, especially small and medium-sized enterprises and start-ups, access to state-of-the-art test and characterization equipment in addition to the necessary know-how through MATQu. This key competence for the development of quantum hardware forms a basis for the establishment of a European value chain of industrially ready quantum computers.



Durch die Förderung des BMBF im Rahmen der Projekte »KryoproPlus« und »QUASAR« verfügt das Fraunhofer IAF über einen der wenigen kryogenen On-Wafer-Prober weltweit, der statistische Vermessung von Qubits auf 8-Zoll- und 12-Zoll-Wafern bei unter 2 K ermöglicht

Thanks to BMBF funding within the projects KryoproPlus and QUASAR, Fraunhofer IAF has one of the few cryogenic on-wafer probers worldwide that enables statistical measurements of qubits on 8-inch and 12-inch wafers at below 2 K

European Nanoelectronics Access

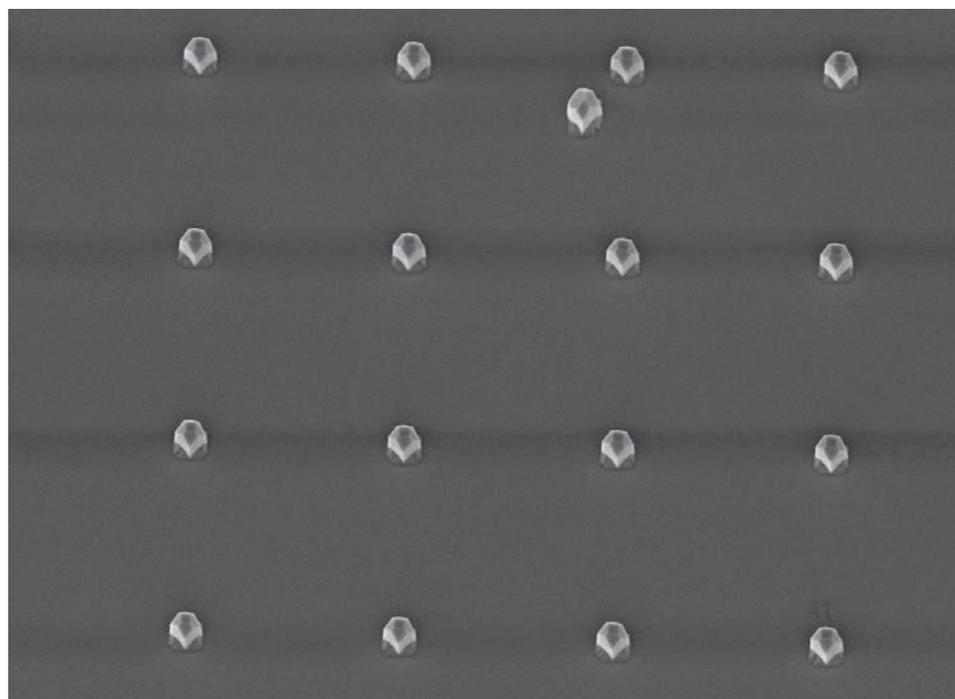
Das von der Europäischen Union geförderte Netzwerk ASCENT+ bringt wichtige europäische Anbieter von Infrastruktur im Bereich der Nanoelektronik zusammen, um den kommenden Herausforderungen in dem Forschungsfeld zu begegnen. Dadurch wird die Entwicklung industrierelevanter und disruptiver Nanoelektronik-Technologien gefördert, indem das Netzwerk den Zugang zu modernster Prozesstechnologie, Modellierungs- und Datenverarbeitungsverfahren, Mess- und Charakterisierungsangeboten sowie Geräten und Testumgebungen bietet.

ASCENT+ ermöglicht seiner Nutzergemeinschaft, die Lücke zwischen wissenschaftlicher Erforschung und Entwicklung von Proof-of-Concept-Technologien zu schließen, um die Innovationsfindung zu beschleunigen. Das Fraunhofer IAF bringt dabei seine hochmoderne Forschungsinfrastruktur auf dem Gebiet der nanostrukturierten Verbindungshalbleiter und Bauelemente aus synthetischem Diamant ein. Im Rahmen des Netzwerks wurden Unternehmen mit qualitativ höchstwertigem Diamantwachstum und -prozessierung vom Fraunhofer IAF unterstützt und gemeinsame Projektkonsortien gegründet.

The ASCENT+ network, funded by the European Union, brings together key European infrastructure providers in the field of nanoelectronics to address upcoming research challenges in this field. This fosters the development of industry-relevant and disruptive nanoelectronics technologies by providing access to state-of-the-art process technology, modelling and data processing, metrology and characterization services as well as equipment and testing environments.

ASCENT+ enables its user community to bridge the gap between scientific research and development of proof-of-concept technologies to accelerate innovation discovery. Fraunhofer IAF contributes its state-of-the-art research infrastructure in the field of nanostructured compound semiconductors and synthetic diamond devices. Within the framework of the network, various companies have been given access to highest quality diamond growth and processing by Fraunhofer IAF. Furthermore, joint project consortia with the institute have been established.

Das Fraunhofer IAF betreibt mehrere Reaktoren für die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Diamant, mit denen auch Nanostrukturen für Quantensensorik-Anwendungen überwachsen werden
Fraunhofer IAF runs several reactors for chemical vapor deposition (CVD) of diamond, which are also used to overgrow nanostructures for quantum sensing applications



Q.AX

Quantum & AI Experience Center

Mit dem Quantum Gardens Ehningen entsteht auf dem heutigen IBM-Areal südwestlich von Stuttgart ein innovativer Wohn-Tech-Campus, der zu einem europäischen Zentrum der Quantenforschung werden und Fachkräfte aus aller Welt anziehen soll. Ziel ist es, ein Epizentrum für Quantenforschung und ein lebendiges Ökosystem zu schaffen.

Ein erster Baustein von Quantum Gardens ist das »Quantum & AI Experience Center« (Q.AX), an dessen Entwicklung das Fraunhofer IAO im Auftrag der Ozean Group GmbH federführend beteiligt ist. Als eine Art Zentrum für Erlebnis, Zusammenarbeit und Vernetzung wird es Technologien wie Quantencomputing, Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz (KI) für die Öffentlichkeit verständlich und erlebbar machen. Es wird Raum für Schulungen, Fachkonferenzen, Events und Co-Innovation bieten und soll zudem die Entstehung eines lokalen und landesweiten Campus-Ökosystems vorantreiben.

Als enger Partner des Fraunhofer IAO im Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW) ist das Fraunhofer IAF auch Partner des Q.AX. Das Freiburger Institut bringt seine Expertise im Bereich des Quantencomputings – Soft- und Hardware – in das Innovationszentrum ein.

With Quantum Gardens Ehningen, an innovative residential tech campus is being built on the current IBM site southwest of Stuttgart, which is to become a European center for quantum research and attract specialists from all over the world. The goal is to create an epicenter for quantum research and a vibrant ecosystem.

A first building block of Quantum Gardens is the Quantum & AI Experience Center (Q.AX). Fraunhofer IAO is playing a leading role in its development on behalf of Ozean Group GmbH. As a center for experience, collaboration and networking, it will make technologies such as quantum computing, machine learning and artificial intelligence (AI) understandable and tangible for the public. It will provide space for training, professional conferences, events and co-innovation, and is also expected to drive the emergence of a local and nationwide campus ecosystem.

As a close partner of Fraunhofer IAO in the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW), Fraunhofer IAF is also a partner of Q.AX. The Freiburg institute contributes its expertise in quantum computing — software and hardware — to the innovation center.

Das Q.AX wird Raum für Schulungen, Fachkonferenzen, Events und Co-Innovation bieten – darunter auch Veranstaltungen des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg.

Q.AX will provide space for training, professional conferences, events and co-innovation — among them events organized by the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg.



Quantum Brilliance: Mitbewohner und Partner

Quantum Brilliance: Roommates and partners

Quantencomputing verfügt als mögliche Schlüsseltechnologie über ein nicht zu überschätzendes Zukunftspotenzial. Um den Weg zur Marktreife zu verkürzen, arbeiten Quantum Brilliance und Fraunhofer IAF im Rahmen des Projekts »DE-Brill« seit Jahresbeginn 2022 unter einem Dach gemeinsam an der Entwicklung neuartiger Quantencomputer-Hardware auf Diamantbasis. Ihr Ansatz zeichnet sich durch wesentliche Vorteile hinsichtlich Effizienz, Stabilität und Bauweise aus.



As possible key technology, quantum computing has a future potential that cannot be overestimated. In order to shorten the path to market maturity, Quantum Brilliance and Fraunhofer IAF have been working together under one roof on the development of novel diamond-based quantum computing hardware as part of the DE-Brill project since the beginning of 2022. Their approach is characterized by significant advantages in terms of efficiency, stability and construction.

Das deutsch-australische Start-up Quantum Brilliance und das Fraunhofer IAF kooperieren im Rahmen mehrerer Projekte, um neuartige Quantencomputer-Hardware auf Diamantbasis zu entwickeln und den Technologietransfer in die Wirtschaft zu leisten. Seit Anfang des Jahres 2022 unterhält Quantum Brilliance hierzu eine Zweigstelle innerhalb des Fraunhofer IAF,

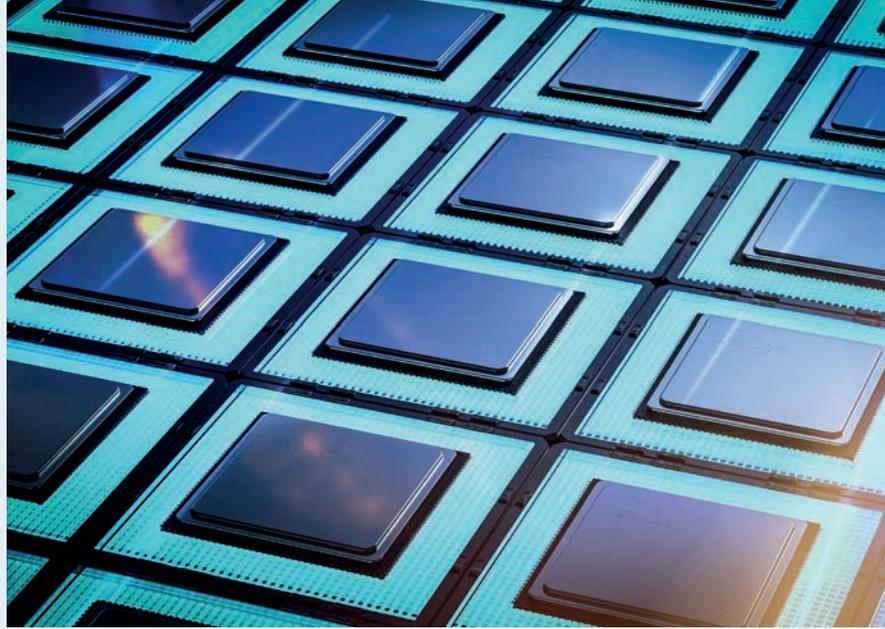
The German-Australian start-up Quantum Brilliance and Fraunhofer IAF cooperate in several projects to develop novel diamond-based quantum computing hardware and to transfer technology to industry. Since the beginning of 2022, Quantum Brilliance has maintained a branch office within Fraunhofer IAF for this purpose, which facilitates direct exchange between



Seit Jahresbeginn 2022 arbeitet ein Team von Quantum Brilliance in eigenen Büro- und Laborräumen am Fraunhofer IAF Tür an Tür mit Forschenden des Instituts zusammen
Since the beginning of 2022, a team from Quantum Brilliance has been working door to door with researchers from the institute in their own office and laboratory space at Fraunhofer IAF

Ziel des Verbundprojekts »DE-Brill« ist es, diamantbasierte Quantenmikroprozessoren zu ermöglichen, die beispielsweise in einer Edge-Computing-Infrastruktur des Internets der Dinge Anwendung finden könnten

The aim of the joint project DE-Brill is to enable diamond-based quantum microprocessors that could be applied, for example, in an edge computing infrastructure of the Internet of Things



die den direkten Austausch zwischen den Forschenden vereinfacht und eine optimale Nutzung der Infrastruktur am Institut ermöglicht. Die Bündelung der spezifischen Stärken des Start-ups und der Forschungseinrichtung schafft Synergien und ein dynamisches Forschungsklima, von dem die Entwicklungsarbeit signifikant profitiert.

Stabile Qubits bei Raumtemperatur

Diamant-Qubits entstehen durch die Quantenverschränkung von quasi-freien Elektronen in Stickstoff-Vakanz-Zentren (»nitrogen-vacancy centers«, NV-Zentren) innerhalb eines Diamantkristallgitters. Dieser noch junge Ansatz zur Erzeugung von Quantenbauelementen bietet intrinsische Vorteile gegenüber anderen Ansätzen: Statt in komplexen Anlagen auf kryogene Temperaturen gekühlt und evakuiert werden zu müssen, funktionieren Diamant-Qubits aufgrund des äußerst stabilen Diamantkristallgitters bei Raumtemperatur und gewöhnlichen Druckverhältnissen. Quantencomputer auf Diamantbasis versprechen folglich entscheidende Vorteile in der praktischen Anwendung: Sie lassen sich energieeffizienter, verlässlicher und kompakter bauen und betreiben als beispielsweise solche, die auf supraleitenden Qubits basieren.

Projektarbeit unter einem Dach

Die Projekte, in denen Quantum Brilliance und das Fraunhofer IAF zusammenarbeiten, decken von der Materialerzeugung über die Entwicklung von Bauelementen und Prozessoren bis hin zur Konstruktion hybrider Rechnerarchitekturen mit Quantenvorteil einen großen Teil der Wertschöpfungskette für Quantencomputer-Hardware ab. Steht im Verbundprojekt »GrodiaQ« die Epitaxie hochreinen (111)-orientierten Diamants auf 4-Zoll-Wafern im Mittelpunkt, erarbeiten die Verbundpartner in den Projekten »QC4BW II« und »DE-Brill« skalierbare Quantenmikroprozessoren (QPUs) auf Diamantbasis und die dafür benötigten Bauelemente. Das Projekt »SPINNING« verbindet diesen Ansatz mit einem Spin-Photonen-System und entwickelt davon ausgehend ein hybrides Konzept, das den Anschluss von Spin-Photonen-basierter Diamant-QPUs an herkömmliche Computer vorsieht (mehr ab Seite 72).

researchers and enables optimal use of the infrastructure at the institute. The bundling of the specific strengths of the start-up and the research institution creates synergies and a dynamic research environment that benefits the development work significantly.

Stable qubits at roomtemperature

Diamond qubits are created by quantum entanglement of quasi-free electrons in nitrogen-vacancy centers (NV centers) within the diamond crystal lattice. This young approach to quantum device creation offers intrinsic advantages over other approaches: Instead of having to be cooled and evacuated to cryogenic temperatures in complex systems, diamond qubits operate at room temperature and ordinary pressures due to the extremely stable diamond crystal lattice. Diamond-based quantum computers consequently promise decisive advantages in practical applications: they can be built and operated more energy-efficiently, reliably and compactly than other qubit approaches such as superconducting qubits.

Project work under one roof

The projects in which Quantum Brilliance and Fraunhofer IAF are collaborating cover a large part of the value chain for quantum computing hardware, from material generation to the development of devices and processors up to the design of hybrid computing architectures with quantum advantage. The focus of the joint project GrodiaQ, for example, is the epitaxy of high-purity (111)-oriented diamond on 4-inch wafers whereas the joint partners in the projects QC4BW II and DE-Brill are developing scalable diamond-based quantum microprocessors (QPUs) and the components required for them. The SPINNING project combines the latter approach with a spin-photon system and, based on this, is developing a hybrid concept for connecting spin-photon-based diamond QPUs to conventional computers (more from page 72).

»Tür an Tür mit den Partnern arbeiten«

“Working door to door with partners”

Seit Februar 2022 leitet Dr. Wolfgang Klesse die Abteilung »Atomic-scale Fabrication of NV Centers in Diamond« der Quantum Brilliance GmbH, die im Rahmen des Projekts »DE-Brill« am Fraunhofer IAF Büros und Labore angemietet hat. Im Interview erläutert er die Gründe der Zusammenarbeit, Besonderheiten der Kooperation und in welche Richtung sich diese entwickeln kann.

Wieso hat sich euer Team gerade am Fraunhofer IAF niedergelassen?

Klesse — Nachdem sich die Gründer von Quantum Brilliance in Europa orientiert und erste Kooperationsmöglichkeiten ausgelotet hatten, war schnell klar, dass sie zum Thema Materialentwicklung mit dem Fraunhofer IAF zusammenarbeiten wollen, da es einige erhebliche Alleinstellungsmerkmale aufweist. Das betrifft sowohl die Infrastruktur als auch die Expertise.

Welche Ziele wollt ihr gemeinsam erreichen und wie oft tauscht ihr euch dazu in der praktischen Zusammenarbeit aus?

Klesse — Das wichtigste aktuelle Ziel ist die Entwicklung von Kapazitäten und Technologie, um in einer skalierbaren Art und Weise NV-Zentren in Diamant zu erzeugen. Wir wollen ganze Ketten oder Gitter von NV-Zentren mit sehr präzisen Abständen zueinander herstellen können, und zwar nicht nur ein bis zwei, sondern Hunderte bis Tausende. Immer wenn es darum geht, Diamanten zu wachsen, zu entwickeln und zu charakterisieren, gibt es einen intensiven täglichen Austausch zwischen den Beteiligten, der durch die räumliche Nähe auch sehr fließend ist.

Since February 2022, Dr. Wolfgang Klesse is head of the department Atomic-scale Fabrication of NV Centers in Diamond of Quantum Brilliance GmbH, which has rented offices and laboratories at Fraunhofer IAF within the project DE-Brill. In this interview, he explains the reasons for the cooperation, special features of the partnership and in which direction it can develop.

Why did your team settle at Fraunhofer IAF in particular?

Klesse — After the founders of Quantum Brilliance had looked around Europe and explored initial cooperation opportunities, it quickly became clear that they want to collaborate with Fraunhofer IAF on the topic of materials development. The institute has some significant unique selling points. This concerns both the infrastructure and the expertise.

What goals do you want to achieve together and how often do you exchange ideas in your practical collaboration?

Klesse — The most important current goal is to develop the capacity and technology to create NV centers in diamond in a scalable way. We want to be able to produce entire chains or lattices of NV centers with very precise spacing from each other, not just one or two, but hundreds to thousands. Whenever it comes to growing, developing and characterizing diamonds, there is an intensive daily exchange between the parties involved, which is also very fluid due to the physical proximity.



Dr. Wolfgang Klesse
Head of Atomic-scale Fabrication
of NV-Centers in Diamond
Quantum Brilliance

Welche Besonderheiten erkennst du in der Kooperation?

Klesse — Ich denke, dass unsere Zusammenarbeit auf mehreren Ebenen ziemlich einzigartig ist. Besonders ist etwa, dass Quantum Brilliance nicht direkt aus dem Fraunhofer IAF ausgegründet wurde. Stattdessen kommen wir als kleines Start-up von außen und können dank der Unterbringung im selben Gebäude Tür an Tür mit den Partnern arbeiten. Das ist meines Wissens beispiellos.

Was können Quantum Brilliance und das Fraunhofer IAF jeweils voneinander lernen?

Klesse — Von unserer Seite aus betrifft das die gesamte technische und wissenschaftliche Expertise. Für uns ist das ein wahrer Schatz, auf den wir hier zugreifen können – und zwar jeden Tag. Auch wichtig ist für uns das Netzwerk des Instituts auf politischer Ebene, etwa wenn es um Partnerschaften und Fördermittelvergabe geht – gerade auch für die Zeit nach »DE-Brill«. Was das Fraunhofer IAF von Quantum Brilliance lernen kann, kann es am besten selbst beantworten. *(Lacht.)*

Welche Perspektive hat die Zusammenarbeit in deinen Augen und was wünschst du dir für die ›Wohngemeinschaft‹ mit den Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IAF?

Klesse — Als Start-up besteht die größte Schwierigkeit natürlich darin abzusehen, wohin die Reise geht. Dass wir hier Labore aufbauen, spricht aber für ein langfristiges Commitment unsererseits. Ich denke, das gilt für beide Seiten. Was ich mir wünschen würde, ist ein bisschen mehr Mut von beiden Seiten: unabhängig von der Projektarbeit einfach mal zu klopfen und sich spontan auszutauschen. Andererseits gibt bereits schöne Beispiele für gelungene Zusammentreffen: Gerade in der Kaffeeküche klappt das sehr gut. Es ist wie auf einer Party: Man trifft sich immer in der Küche. *(Lacht.)*

What special features do you see in the cooperation?

Klesse — I think that our collaboration is quite unique on several levels. For example, it is special that Quantum Brilliance is not a spin-off directly from Fraunhofer IAF. Instead, we come from the outside as a small start-up and, thanks to being housed in the same building, we can work door to door with the partners. To my knowledge, this is unprecedented.

What can Quantum Brilliance and Fraunhofer IAF learn from each other?

Klesse — From our side, this concerns the entire technical and scientific expertise. For us, this is a real treasure that we can access here every day. The institute's network at the political level is also important for us, for example when it comes to partnerships and the allocation of funding—especially for the time after DE-Brill. What Fraunhofer IAF can learn from Quantum Brilliance is best answered by the institute itself. *(Laughs.)*

What are the prospects for the collaboration in your eyes and what would you like to see in the 'shared housing' with your colleagues at Fraunhofer IAF?

Klesse — As a start-up, the greatest difficulty is, of course, to foresee where the journey will take us. But the fact that we are setting up labs here reflects our long-term commitment. I think that applies to both sides. What I would wish for is a bit more courage from both sides: to simply knock and exchange ideas spontaneously, regardless of the project work. On the other hand, there are already nice examples of successful get-togethers: It works very well in the coffee kitchen in particular. It is like at a party: You always meet in the kitchen. *(Laughs.)*





Kooperieren in der Wissenschaft

Collaborating in science

In unseren starken Partnerschaften mit Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sammeln wir neue Erkenntnisse und verfolgen vielversprechende Forschungsansätze.

In our strong partnerships with universities and other research institutions, we gather novel insights and pursue promising research approaches.

*Promovierende am Fraunhofer IAF beteiligen sich intensiv am Wissenstransfer mit verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen im In- und Ausland
PhD students at Fraunhofer IAF participate intensively in knowledge transfer with various scientific institutions in Germany and abroad*

Universität Freiburg: Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)

University of Freiburg: Department of Sustainable Systems Engineering (INATECH)

Die Albert-Ludwigs-Universität Freiburg gehört zu den fünf besten Volluniversitäten Deutschlands und wurde für ihre exzellente Forschung und Lehre mehrfach ausgezeichnet. Durch intensive Kontakte zu herausragenden Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie Kooperationen mit erfolgreichen Industrieunternehmen gestaltet die Universität Freiburg den Transfer von der Grundlagenforschung in die Praxis aktiv mit. Der starke Nachhaltigkeitsbezug der Technischen Fakultät, insbesondere die enge Zusammenarbeit im Rahmen des Instituts für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH), und der gemeinsame Standort machen die Universität Freiburg zum zentralen Kooperationspartner des Fraunhofer IAF.

The University of Freiburg is one of the five best comprehensive universities in Germany and has received several awards for its excellent research and teaching. Through intensive contacts with outstanding universities and research institutions as well as collaborations with successful industrial companies, the University of Freiburg actively shapes the transfer from basic research into practice. The strong sustainability orientation of the Faculty of Engineering, in particular the close cooperation within the framework of the Department of Sustainable Systems Engineering (INATECH), and the shared location make the University of Freiburg the central cooperation partner of Fraunhofer IAF.

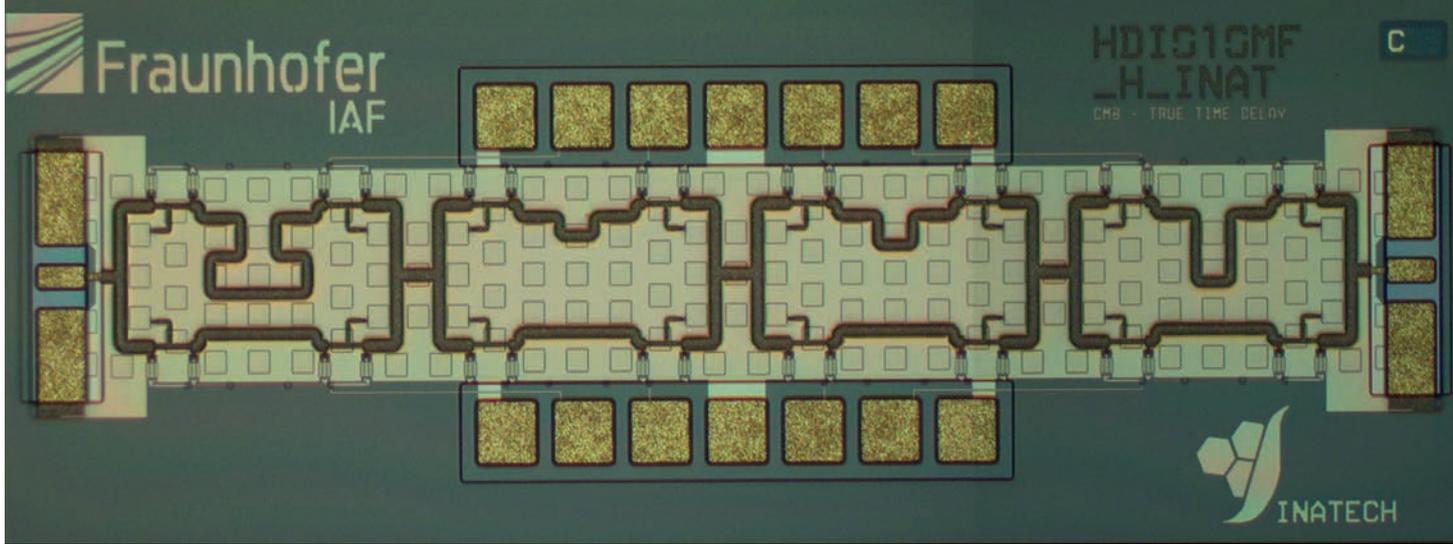


Die Universität Freiburg und die Fraunhofer-Institute leisten im Verbund einen schlagkräftigen Beitrag zur Lösung von Schlüsselfragen der Zukunft. Durch die Kombination ihrer unterschiedlichen Expertisen erlangt die Forschung eine besondere Relevanz für Gesellschaft und Wirtschaft.«

“The University of Freiburg and the Fraunhofer Institutes are making a powerful contribution to solving key issues of the future. By combining their different expertise, their research acquires a special relevance for society and industry.”

Prof. Dr. Kerstin Kriegelstein
Rector University of Freiburg





*True-Time-Delay-Schaltung entstanden aus der Kooperation zwischen INATECH und Fraunhofer IAF
True-time-delay circuit developed in cooperation between INATECH and Fraunhofer IAF*

Innovationscampus Nachhaltigkeit

Weiter voranschreiten soll die Vernetzung im Rahmen des Innovationscampus Nachhaltigkeit, den die Universität Freiburg und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam mit einem europaweiten Partnernetzwerk entwickeln, zu dem auch das Fraunhofer IAF gehört. Für das Jahr 2024 sind erste Pilotprojekte vorgesehen, unter anderem zu den Themen Klimaschutz und Ressourceneffizienz. Dass die Universität Freiburg und das Fraunhofer IAF in diesen Bereichen erfolgreich zusammenarbeiten und innovative Lösungen finden können, unterstreichen aktuelle Kooperationen in Verbundprojekten wie »Open6GHub«, »SEQUOIA End-to-End« oder »EdgeLimit-Green ICT«.

Projektkooperationen

Im »Open6GHub« arbeiten Forschende beider Institutionen gemeinsam daran, die gesellschaftlichen Anforderungen an den Mobilfunk der sechsten Generation (6G) zu analysieren und ressourceneffiziente Hochfrequenzkomponenten zu seiner technischen Realisierung zu entwickeln (mehr auf Seite 34).

Im Projekt »SEQUOIA End-to-End«, durchgeführt im Rahmen des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg, tragen der Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität Freiburg und die Abteilung Quantentechnologie des Fraunhofer IAF dazu bei, Entwicklungsprozesse und Werkzeuge für ganzheitliches Quantensoftware-Engineering zu realisieren (mehr auf Seite 21).

Das Vorhaben »EdgeLimit-Green ICT« zielt darauf ab, energiesparendere Mobilfunkbasisstationen zu realisieren, die den CO₂-Fußabdruck unserer Wissensgesellschaft senken sowie ihre globale Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Die Forschenden entwickeln hierzu gemeinsam mit den Projektpartnern ein energieeffizientes Edge-Cloud-Mobilfunksystem auf der Grundlage Aluminiumscandiumnitrid-(AlScN)-basierter Komponenten und bedarfsgerechter, von Künstlicher Intelligenz (KI) unterstützter Steuerung.

Innovation Campus Sustainability

The Innovation Campus Sustainability is to further progress the networking which the University of Freiburg and the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) are developing together with a Europe-wide partner network, which also includes Fraunhofer IAF. The first pilot projects are planned for 2024, among others on the topics of climate protection and resource efficiency. Current collaborations in joint projects such as Open6GHub, SEQUOIA End-to-End or EdgeLimit-Green ICT underline that the University of Freiburg and Fraunhofer IAF can successfully work together in these areas and find innovative solutions.

Project collaborations

In the Open6GHub, researchers from both institutions are working together to analyze the societal requirements for sixth-generation mobile communications (6G) and to develop resource-efficient radio-frequency components for its technical realization (more on page 34).

In SEQUOIA End-to-End, carried out within the framework of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg, the Chair of Theoretical Physics at the University of Freiburg and the Department of Quantum Technology at Fraunhofer IAF contribute to the realization of development processes and tools for holistic quantum software engineering (more on page 21).

The EdgeLimit-Green ICT project aims to realize more energy-efficient mobile base stations that reduce the carbon footprint of our society and increase its global competitiveness. To this end, the researchers are working with project partners to develop an energy-efficient edge cloud mobile communications system based on aluminum scandium nitride (AlScN) based components and on-demand control supported by artificial intelligence (AI).

»Ein heiteres Geben und Nehmen«: Im Gespräch mit Cristina Maurette Blasini

“A cheerful give and take”: Interview with Cristina Maurette Blasini

Cristina Maurette Blasini ist Doktorandin am INATECH. Im Interview spricht sie über die alltägliche Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF und erklärt die Vorteile der Kooperation über institutionelle Grenzen hinweg.

Cristina Maurette Blasini is a PhD student at INATECH. In this interview, she gives insight into the everyday collaboration with Fraunhofer IAF, and explains the benefits of cooperating across institutional boundaries.



Woran genau forschst du am INATECH?

Blasini — Ich untersuche die hohe Linearität in Frequenzumrichtern bis 300 GHz. Deshalb arbeite ich derzeit mit Galliumnitrid-(GaN-)Schaltungen und baue mit den Modellen und der Technologie des Fraunhofer IAF Frequenzumrichter und Mischer bei etwa 140 GHz. Die Ergebnisse können dazu beitragen, effizientere Schaltungen bei höheren Frequenzen zu realisieren, die zum Beispiel in der Kommunikation eingesetzt werden können.

What exactly are you researching at INATECH?

Blasini — I am researching the high linearity in frequency converters up to 300 GHz. Therefore, I am currently working with gallium nitride (GaN) circuits. Using the models and the technology from Fraunhofer IAF, I build frequency converters and mixers at around 140 GHz. This contributes to having more efficient circuits at higher frequencies, which can be used in communications, for example.

Welche Berührungspunkte zwischen dem INATECH und dem Fraunhofer IAF erlebst du in deinem Arbeitsalltag?

Blasini — Da gibt es viele. (*Lacht.*) Ein wichtiger Punkt ist die intensive Betreuung von Dr. Sébastien Chartier und Professor Rüdiger Quay. Ein weiterer Punkt ist die Tatsache, dass wir die Technologie des Fraunhofer IAF nutzen. Wir stehen zum Beispiel in sehr engem Kontakt mit der Gruppe Modelle und in meiner Arbeit mit GaN werde ich stark von Dr. Dirk Schwantuschke unterstützt.

Wie nimmst du die Zusammenarbeit in der Praxis wahr?

Blasini — Es ist ein heiteres Geben und Nehmen: Wir tauschen sowohl Know-how als auch Infrastruktur aus. Als wir zum Beispiel am INATECH mit dem Aufbau des Messlabors begannen, hat uns das Fraunhofer IAF richtig gut beraten. Im Gegenzug stellen wir diese Aufbauten nun den Kollegen vom Fraunhofer IAF für eigene Messungen zur Verfügung.

Was hat dich in der Zusammenarbeit überrascht?

Blasini — Mich hat die direkte Kommunikation positiv überrascht. Wie bei anderen Kooperationspartnern haben wir nur externe Zugangsrechte, aber in der Praxis sind wir ständig im Austausch mit den Forschenden des Fraunhofer IAF und besuchen uns gegenseitig. Das ist wirklich klasse! Es gibt keinen besseren Weg, um etwas zu lernen.

Welche Impulse können INATECH und Fraunhofer IAF ab 2024 gemeinsam im Rahmen des Innovationscampus Nachhaltigkeit setzen?

Blasini — Wir können vor allem von der bereits geleisteten Zusammenarbeit und den jeweiligen Stärken profitieren. Das Verhältnis zwischen beiden Einrichtungen ist nicht durch Wettbewerb geprägt, sondern durch Wissenstransfer und gegenseitige Hilfe. Dieses gemeinsame Fundament ist ein riesiger Vorteil.

Which points of contact between INATECH and Fraunhofer IAF do you experience in your everyday work?

Blasini — There are a lot. (*Laughs.*) One major point is the intense guidance we receive from Dr. Sébastien Chartier and Professor Rüdiger Quay. Another point is the fact that we use the technology from Fraunhofer IAF. For example, we are in very close contact with the modelling group and I receive a lot of support from Dr. Dirk Schwantuschke in my work with GaN.

How do you perceive the collaboration in practice?

Blasini — It is a cheerful give and take: We exchange both know-how and infrastructure. For example, when we started setting up the measurement laboratory at INATECH, Fraunhofer IAF advised us very well. In turn, we now provide these setups to our colleagues at Fraunhofer IAF for their own measurements.

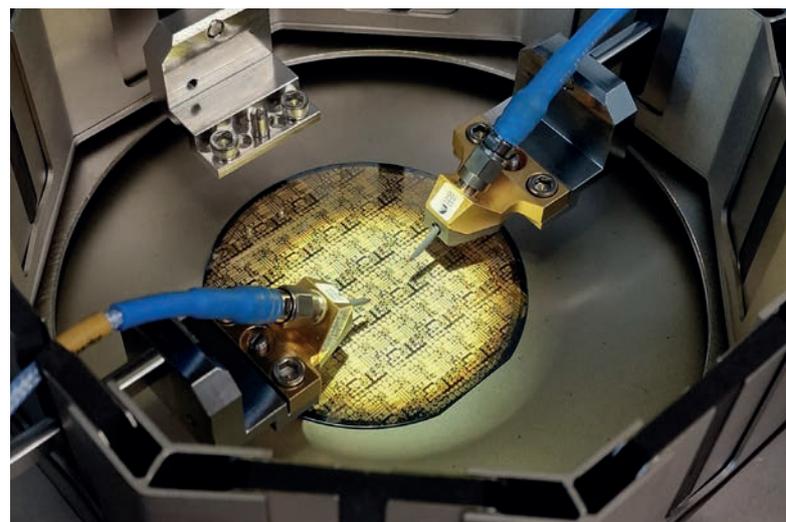
What surprised you in the collaboration?

Blasini — I was positively surprised how direct the communication turned out to be. Like with other cooperation partners, we only have external access rights. But in reality, we are in permanent exchange with the researchers of Fraunhofer IAF and we constantly visit each other. That is really nice! There is no better way to learn.

Starting 2024, which impulses can INATECH and Fraunhofer IAF jointly provide in the Innovation Campus Sustainability?

Blasini — Above all, we can benefit from the collaboration we have already done and each other's strengths. Between both institutions, the focus is not on competition, but the transfer of knowledge and helping each other. This common foundation is a huge advantage.

Messaufbau
am INATECH
Measurement
setup at INATECH



Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg (LZN)

Sustainability Center Freiburg (LZN)

Das LZN ist ein Kooperationsprojekt der Freiburger Fraunhofer-Institute und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Es unterstützt Forschende dabei, ihre wissenschaftlichen Ergebnisse in Innovationen umzuwandeln und bildet eine Anlaufstelle für Unternehmen jeder Größe, Verbände und Netzwerke, die auf der Suche nach fortschrittlichen und neuartigen nachhaltigen Ideen sind. Das LZN verfügt über eine Reihe von Projekt- und Förderformaten, die den Transfer von der Forschung in Wirtschaft und Gesellschaft vereinfacht und beschleunigt.

Seit der Gründung des LZN haben sich Forschende des Fraunhofer IAF an verschiedenen Forschungsprojekten beteiligt, zuletzt etwa in den Bereichen Materialentwicklung, Messtechnik und Beleuchtung. Aktuell kooperiert das Fraunhofer IAF mit dem Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM im Rahmen des LZN-Pilotprojekts »ResAlFat«. Darin entwickeln Forschende selbstverstärkende, intelligente Materialien, deren Widerstandsfähigkeit einen reduzierten Materialeinsatz sowie erhöhte Recyclingquoten in hochbelasteten Anwendungen ermöglichen sollen.

The LZN is a cooperative project of the Freiburg Fraunhofer Institutes and the University of Freiburg. It supports researchers in transforming their scientific results into innovations and forms a contact point for companies of all sizes, associations and networks in search for advanced and novel sustainable ideas. The LZN has a range of project and funding formats that simplify and accelerate the transfer from research to business and society.

Since the founding of the LZN, researchers from Fraunhofer IAF have participated in various research projects, most recently in the areas of materials development, metrology and lighting. Currently, Fraunhofer IAF is cooperating with the Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM in the LZN pilot project ResAlFat. In this project, researchers are developing self-reinforcing, intelligent materials whose resistance should enable reduced material use and increased recycling rates in highly stressed applications.



Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg bildet die Schnittstelle zwischen der Universität und den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten mit dem gemeinsamen Ziel, das Innovationsökosystem in Freiburg und der Region zu Nachhaltigkeitsforschung zu stärken und damit zur Lösung von Herausforderungen im Nachhaltigkeitsbereich beizutragen.«

“The Sustainability Center Freiburg forms the interface between the university and the five Freiburg Fraunhofer Institutes with the common goal of strengthening the innovation ecosystem in Freiburg and the region with regard to sustainability research and thus contributing to the solution of challenges in the field of sustainability.”

Christiane Felder
Central Office Sustainability Center Freiburg
Fraunhofer EMI



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Karlsruhe Institute of Technology

Als Exzellenzuniversität bietet das KIT seinen Studierenden, Forschenden und Beschäftigten einmalige Lern-, Lehr- und Arbeitsbedingungen. Das KIT schafft und vermittelt Wissen für Gesellschaft und Umwelt, um zu den globalen Herausforderungen maßgebliche Beiträge in den Feldern Energie, Mobilität und Information zu leisten. Die Innovationstätigkeit am KIT schlägt die Brücke zwischen Erkenntnis und Anwendung zum gesellschaftlichen Nutzen, wirtschaftlichen Wohlstand und Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen.

Zwischen KIT und Fraunhofer IAF bestehen intensive Kooperationen in der Leistungs- und Hochfrequenzelektronik sowie den Quantentechnologien. An der Entwicklung intelligenter Kommunikationsnetze für den Mobilfunk der sechsten Generation (6G) arbeiten beide Einrichtungen im »Open6GHub«. Das Projekt »SATIRE« hat einen skalierbaren Terahertz-Miniaturradar für die Industrie zum Ziel, das kompakte Sensoren mit bislang unerreichter Auflösung ermöglicht. In den Projekten »SPINNING« und »QC4BW II« entwickeln Teams des KIT und Fraunhofer IAF diamantbasierte Bauelemente für Quantencomputer.

As a university of excellence, KIT offers its students, researchers, and employees unique learning, teaching, and working conditions. KIT creates and imparts knowledge for society and the environment in order to make significant contributions to global challenges in the fields of energy, mobility, and information. KIT's innovative activities bridge the gap between knowledge and application for the benefit of society, economic prosperity, and the preservation of the natural basis of life.

Between KIT and Fraunhofer IAF, an intensive cooperation exists in power and high-frequency electronics as well as quantum technologies. Both institutions are working on the development of intelligent communication networks for sixth-generation mobile communications (6G) in the Open6GHub. The SATIRE project aims to develop a scalable terahertz miniature radar for industry that will enable compact sensors with unprecedented resolution. In SPINNING and QC4BW II, teams from KIT and Fraunhofer IAF are developing diamond-based devices for quantum computers



Ich arbeite seit über 15 Jahren intensiv und gerne zu unterschiedlichen Themen mit dem Fraunhofer IAF zusammen. Besonders begeistert mich dabei die unkomplizierte, kollegiale und freundschaftliche Atmosphäre, die zwischen unseren Instituten und allen Beteiligten herrscht.«

“I enjoy working intensively with Fraunhofer IAF on various topics for more than 15 years. I am particularly enthusiastic about the uncomplicated, collegial and friendly atmosphere that characterizes the collaboration between our institutes and everyone involved.”



Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Thomas Zwick
Director of Institute of Radio Frequency Engineering and Electronics (IHE)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Universität Stuttgart

University of Stuttgart

Als weltweit vernetzte Forschungseinrichtung hat die Universität Stuttgart eine herausragende Stellung inne, die sich in zwei Exzellenzclustern, dem Forschungscampus ARENA 2036, der Beteiligung am Netzwerk »Cyber Valley« sowie in zahlreichen Sonderforschungsbereichen und Graduiertenkollegs spiegelt. Im Forschungsprogramm der Universität Stuttgart fallen die Simulationswissenschaft, die Produktionstechnologie, die Quantentechnologie, Architektur und Adaptives Bauen, Digital Humanities sowie die Bereiche Biomedizinische Systeme und Autonome Systeme besonders auf.

Zwischen der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer IAF besteht eine intensive Zusammenarbeit in den Bereichen der Quantentechnologien sowie der Hochfrequenz- und Leistungselektronik. Forschende beider Einrichtungen entwickeln in diversen Projekten Hard- und Software-Lösungen für Quantencomputer (»QORA II«, »QC4BW II«, »SEQUOIA End-to-End«, »SPINNING«, »QMag«), Kommunikationstechnik für Satelliten und Mobilfunk (»EIVE«, »Open6GHub«) oder leistungsstarke Verbindungshalbleiter-Chips für E-Fahrzeuge und Ladegeräte (»GaNTraction«).

As a globally networked research institution, the University of Stuttgart holds an outstanding position, which is reflected in two clusters of excellence, the ARENA 2036 research campus, participation in the Cyber Valley network, and numerous collaborative research centers and research training groups. Particularly outstanding within the broad research program of the University of Stuttgart are: simulation science, production technology, quantum technology, architecture and adaptive construction, digital humanities, and the fields of biomedical systems and autonomous systems stand out in particular.

There is an intensive cooperation between the University of Stuttgart and Fraunhofer IAF in the fields of quantum technologies as well as high-frequency and power electronics. In various projects, researchers from both institutions are developing hardware and software solutions for quantum computers (QORA II, QC4BW II, SEQUOIA End-to-End, SPINNING, QMag), communication technology for satellites and mobile communications (EIVE, Open6GHub) or high-performance compound semiconductor chips for e-vehicles and chargers (GaNTraction).



Die Kooperation mit dem Fraunhofer IAF, besonders im Bereich Materialwissenschaft, ist essentiell für unsere Forschungsarbeiten.«

"The cooperation with Fraunhofer IAF, especially in the field of materials science, is essential for our research work."

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup
Head of Department
3. Physical Institute University of Stuttgart



RMIT University

Die australische RMIT University genießt internationale Anerkennung für ihre exzellente wissenschaftliche Ausbildung, Forschung und die Kooperation mit Industrie und Gesellschaft. Weltweit führend ist das RMIT unter anderem in den Bereichen Ingenieurwissenschaften, Informatik und Wirtschaftsinformatik. Enge Kooperationsbeziehungen zwischen dem RMIT, dem verbundenen Centre for Nanoscale BioPhotonics (CNBP) des Australian Research Council (ARC) und dem Fraunhofer IAF bestehen auf dem Gebiet der Quantensensorik.

Im Projekt »DiLaMag« arbeiten Forschende der drei Einrichtungen an einem neuen Ansatz für hochsensitive Quanten-Magnetfeldsensoren: Erstmals soll Diamant mit einer hohen Dichte an Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in einem Lasersystem eingesetzt werden und damit erheblich präzisere Magnetfeld-Messungen erlauben, die etwa in der Medizin zur Verbesserung bildgebender Diagnostik zum Einsatz kommen können. 2022 gelang dem Projektverbund mit der weltweit ersten Messung magnetfeldabhängiger stimulierter Emission ein Meilenstein in der Quantensensorik.

RMIT University enjoys an international reputation for excellence in education, research, and engagement with industry and community. RMIT is a world leader in engineering, computer science, and business informatics, among others. Close collaborative relationships exist between RMIT, the associated Centre for Nanoscale BioPhotonics (CNBP) of the Australian Research Council (ARC), and Fraunhofer IAF in the field of quantum sensing.

In the DiLaMag project, researchers from the three institutions are working on a new approach for highly sensitive quantum magnetic field sensors: For the first time, diamond with a high density of nitrogen-vacancy centers (NV centers) is to be used in a laser system, thus allowing considerably more precise magnetic field measurements. These can be used, for example, in medicine to improve imaging diagnostics. In 2022, the project group achieved a milestone in quantum sensor technology with the world's first measurement of magnetic-field-dependent stimulated emission.



Es war eine Freude, mit der Gruppe von Dr. Jan Jeske am Fraunhofer IAF zusammenzuarbeiten. Es hat uns sehr begeistert zu sehen, dass magnetfeldabhängige stimulierte Emission mit NV-Zentren in Diamant möglich ist. Ich freue mich auf zukünftige Kooperationsmöglichkeiten.«

"It has been a pleasure to work together with Dr. Jan Jeske's group at Fraunhofer IAF. We were very excited to see magnetic-field-dependent stimulated emission is possible using NV centers in diamond. I look forward to future collaboration opportunities."



Prof. Dr. Brant Gibson
ARC Centre of Excellence for Nanoscale BioPhotonics
School of Science, RMIT University

30 Jahre gemeinsame Pionierarbeit mit TNO

30 years of joint pioneering research with TNO

Der aktuellen Zusammenarbeit zwischen TNO, der Niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung, und dem Fraunhofer IAF im Bereich der Quantentechnologien geht eine 30-jährige Erfolgsgeschichte voran. Seit Anfang der 1990er Jahre findet eine erfolgreiche Kollaboration zwischen den Institutionen statt. Gleich im ersten gemeinsamen Projekt entwickelten die beiden Forschungseinrichtungen eine Weltneuheit – einen Hochleistungsverstärker für Frequenzen im X-Band mit bis dato unerreichten Eigenschaften. Es folgten weitere innovative Schaltungstechnologien für höhere Frequenzen auf Basis von Galliumnitrid, die entscheidende Verbesserungen bei Radar-, Telekommunikations- und Satellitenanwendungen ermöglichten. Nun geht die Zusammenarbeit in neuen Bereichen weiter.

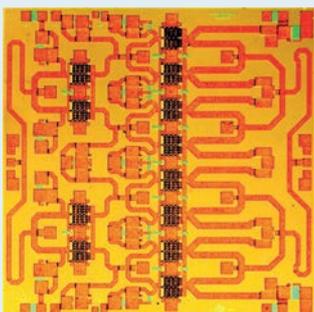


The current collaboration in the field of quantum technologies between TNO, the Netherlands Organization for Applied Scientific Research, and Fraunhofer IAF is preceded by a 30-year success story. A successful cooperation between the institutions has been taking place since the early 1990s. In their very first joint project, the two research institutions developed a world novelty — a high-power amplifier for frequencies in the X band with previously unattained performances. This was followed by further innovative circuit technologies for higher frequencies based on gallium nitride, which enabled decisive improvements in radar, telecommunications and satellite applications. Now, the collaboration continues in new fields.

1993 startete die Zusammenarbeit zwischen TNO und Fraunhofer IAF in einem Projekt zur Entwicklung von GaAs-basierten Hochleistungsverstärkern für Frequenzen im X-Band (8 – 12 GHz), die für Radaranwendungen genutzt werden sollten. Während TNO die Modellierung und den Entwurf des Hochleistungsverstärkers (HPA) durchführte, entwickelte das Fraunhofer IAF die pseudomorphe HEMT-Technologie, die es ermöglichte, den Treiber und den HPA in einen einzigen Chip zu integrieren.

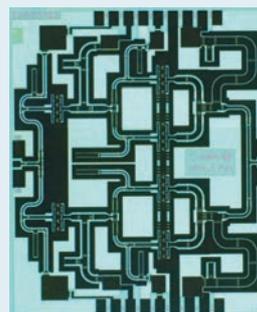
In 1993, the collaboration between TNO and Fraunhofer IAF started in a project to develop GaAs-based high-power amplifiers for frequencies in the X band (8–12 GHz) to be used for radar applications. While TNO performed the modeling and design of the high-power amplifier (HPA), Fraunhofer IAF developed the pseudomorphic HEMT technology, which allowed to integrate the driver and the HPA in a single chip.

1999



Erster europäischer X-Band-Hochleistungsverstärker auf GaAs-Basis mit 9-W-Ausgangsleistung bei einer Power Added Efficiency von 35 Prozent
First European GaAs-based X-band high-power amplifier with 9 W output power at 35 percent power added efficiency

2004



Erste europäische Ka-Band-MMIC mit mehr als 4-W-Ausgangsleistung, designt von TNO in koplanarer Schaltungstechnik
First European Ka-band MMIC with more than 4 W of output power, designed by TNO on coplanar technology

Das Ergebnis dieser gebündelten Kompetenzen war der erste europäische X-Band-Hochleistungsverstärker mit bis dato unerreichten Eigenschaften: eine beeindruckende durchschnittliche Ausgangsleistung von 9 W bei einer Power Added Efficiency von 35 Prozent. Diese vor etwa 30 Jahren entwickelte Verstärker-Technologie bildet die Grundlage für die aktuelle Generation von Leistungsverstärkern auf GaAs- und GaN-Basis.

Mit der Einführung von Galliumnitrid verlagerte sich die Zusammenarbeit zwischen TNO und dem Fraunhofer IAF um das Jahr 2000 auf GaN- und AlGaIn-basierte MMICs (monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen). Dabei erzielten die Projektpartner mehrere herausragende Erfolge bei der Entwicklung von MMICs für Frequenzen im Ka-Band (27–40 GHz) sowie W-Band (75–110 GHz). Das Besondere dabei war, dass alle Entwicklungsstufen von der Epitaxie bis zur Modulintegration komplett in Europa bewältigt wurden. Während sich das Fraunhofer IAF auf die Epitaxie, Prozessierung und Modellierung konzentrierte, übernahm TNO den Entwurf, die Simulation und das Layout der integrierten Schaltungen.

Als Folge der langjährigen erfolgreichen Kooperation ist die Idee entstanden, einen gemeinsamen Messeauftritt für die europäische Hochfrequenz-Forschung zu gestalten: TNO und die beiden Institute Fraunhofer IAF und FHR sind seit Jahren feste Partner und teilen sich einen gemeinsamen Messestand auf der European Microwave Week, die zu den wichtigsten internationalen Mikrowellen-Konferenzen gehört.

Von hohen Frequenzen zu Quantentechnologien

Gleichzeitig geht die gemeinsame Forschungsarbeit weiter und weitet sich auf das Gebiet der Quantentechnologien aus: Seit 2021 sind beide Forschungseinrichtungen Teil des europäischen Konsortiums QLSI. In dem EU-Projekt legen 19 Partner gemeinsam den Grundstein für die industrielle Umsetzung von Halbleiter-Quantenprozessoren in der EU und stärken damit Europa als weltweit führenden Standort für Quantencomputing. Darüber hinaus geht in dem jüngst gestarteten paneuropäischen Netzwerk »Qu-Test« die Kollaboration in den Bereichen Quantencomputing und Quantensensorik weiter.

The result of these combined competences was the first European X-band high-power amplifier with world-leading characteristics: an impressive average output power of 9 W with a power added efficiency of 35 percent. This amplifier technology, developed about 30 years ago, forms the basis for the current generation of GaAs- and GaN-based power amplifiers.

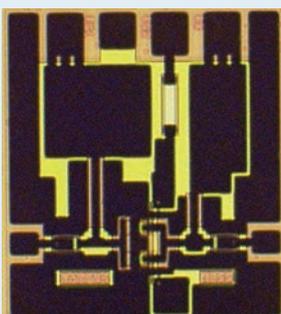
With the introduction of gallium nitride, the collaboration between TNO and Fraunhofer IAF shifted to GaN- and AlGaIn-based MMICs (monolithic microwave integrated circuits) around the year 2000. In the process, the project partners accomplished several outstanding achievements in the development of MMICs for frequencies in the Ka band (27–40 GHz) as well as W band (75–110 GHz). A particular feature was that all development stages from epitaxy to module integration were accomplished completely in Europe. While Fraunhofer IAF focused on epitaxy, processing and modeling, TNO took on the design, simulation and layout of the integrated circuits.

As a result of many years of successful cooperation, the idea was born to create a joint exhibition presence for European high-frequency research: TNO and the two institutes Fraunhofer IAF and Fraun have been partners for years and share a common booth at the European Microwave Week, which is one of the most important international microwave conferences.

From high frequencies to quantum technologies

At the same time, the joint research work continues and expands into the field of quantum technologies: Since 2021, both research institutions are part of the European consortium QLSI. In this EU project, 19 partners are jointly laying the foundation for the industrial implementation of semiconductor quantum processors in the EU, thus strengthening Europe as a world leader in quantum computing. Furthermore, in the recently launched pan-European network Qu-Test, collaboration continues in the areas of quantum computing and quantum sensing.

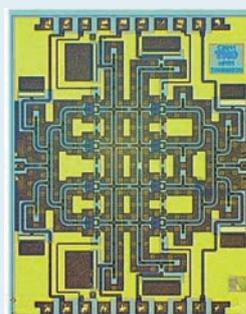
2005



Weltweit erste GaN-MMIC über 100 GHz basierend auf GaN-Technologie mit einer Gate-Länge von 150 nm in Dual-Gate-Technologie

First GaN MMIC beyond 100 GHz worldwide based on GaN technology with a gate length of 150 nm in dual-gate technology

2011



400-mW-W-Band-MMIC in der geredeten koplanaren Übertragungstechnologie für GaN-HEMTs auf SiC-Substraten mit einer Gate-Länge von 100 nm

400 mW W-band MMIC based in grounded coplanar transmission line technology for GaN HEMTs on SiC substrates with a gate length of 100 nm

»Uns verbindet, dass wir hochqualifizierte, enthusiastische Wissenschaftler haben«

“What we have in common are highly-skilled enthusiastic professionals”

Frank van den Bogaart ist leitender Berater bei TNO mit langjähriger Erfahrung in der Erforschung und Entwicklung von Mikrowellenelektronik, Radartechnologie und integrierten Sensorsystemen. Seit Anfang der 1990er Jahre arbeitete er in unterschiedlichen Projekten mit dem Fraunhofer IAF zusammen. Im Interview berichtet er von seinen Erfahrungen.

Frank van den Bogaart is principal consultant at TNO with many years of experience in research and development of microwave electronics, radar technology and integrated sensor systems. Since the early 1990s, he has worked with Fraunhofer IAF on various projects. In this interview, he talks about his experiences.

Wie kam es Anfang der 1990er Jahre zur Zusammenarbeit zwischen TNO und dem Fraunhofer IAF?

Van den Bogaart — Unsere Zusammenarbeit begann um das Jahr 1993 mit einem Projekt mit weiteren Partnern zur Entwicklung GaAs-basierter Hochleistungs-MMIC-Verstärker für Anwendungen im X-Band. Wir nannten es das TA1-Projekt. In diesem Konsortium konzentrierte sich Siemens auf seine robuste MESFET-Technologie, Dassault Electronique (jetzt Thales) und TNO kümmerten sich um Modellierung, Design und Prüfverfahren, und das Fraunhofer IAF hatte damals die revolutionäre Idee, eine pseudomorphe HEMT-Technologie für Hochleistungsanwendungen bei Mikrowellenfrequenzen zu entwickeln und einzusetzen – und diese wurde schließlich sehr erfolgreich. Die Projektpartner sind seither wichtige Akteure in Europa auf diesem Gebiet geblieben und kennen sich noch immer sehr gut. So war es nicht nur ein technologischer, sondern auch ein persönlicher und beruflicher Erfolg.

How did the collaboration between TNO and Fraunhofer IAF start in the early 1990s?

Van den Bogaart — Our collaboration began around 1993 with a project with further partners to develop GaAs-based high-performance MMIC amplifiers for X-band applications. We called it the TA1 project. In this consortium, Siemens concentrated on their robust MESFET technology. Dassault Electronique (now Thales) and TNO on modeling, design, and test techniques, and Fraunhofer IAF at that time came up with the revolutionary idea of developing and using a pseudo-morphic HEMT technology for high-power applications at microwave frequencies — which eventually became very successful. The project partners remained key players in Europe in this field since then and they still know each other very well. In the end, it was not only a technological success, but also a personal and professional one.

Was waren die wichtigsten Meilensteine unserer Zusammenarbeit in den letzten 30 Jahren?

Van den Bogaart — Auch nach mehreren anderen gemeinsamen Projekten denke ich, dass das Ergebnis des TA1-Projektes bislang immer noch der größte Erfolg unserer Zusammenarbeit war. Wir hatten es geschafft, einen 9-W-Hochleistungsverstärker mit einem Wirkungsgrad von etwa 35 % über eine Bandbreite von mehreren GHz im X-Band für Phased-Array-Antennenanwendungen zu entwickeln. Damals war das eine unübertroffene Leistungsfähigkeit! Es war ein TNO-Design in einer Fraunhofer-IAF-pHEMT-Technologie und das Layout gilt immer noch als Benchmark. 25 Jahre lang bildeten dieses

What have been the biggest milestones of our collaboration over the last 30 years?

Van den Bogaart — Although we have collaborated in several other projects, I think the result of the TA1 project is still the greatest achievement of our cooperation. We had managed to develop a 9 W high-power amplifier with about 35 % power-added efficiency over a bandwidth of several GHz in X band for phased-array antenna applications. In those days, these were unrivaled performances! It was a TNO design in Fraunhofer IAF pHEMT technology and the layout is still a benchmark. This design and the pHEMT technology formed the basis for 25 years of first-class, high-performance MMIC developments in Europe enabling industry to develop new radar and communication systems.



Frank van den Bogaart
Principal Consultant at TNO

Design und die pHEMT-Technologie die Grundlage für erstklassige, leistungsstarke MMIC-Entwicklungen in Europa, die es der Industrie ermöglichen, neue Radar- und Kommunikationssysteme zu entwickeln.

Was sind die Gemeinsamkeiten und was die Unterschiede zwischen Fraunhofer IAF und TNO?

Van den Bogaart — TNO in den Niederlanden ist ähnlich wie Fraunhofer in Deutschland, obwohl es natürlich Unterschiede in der Organisationsstruktur, dem Geschäftsmodell und der Förderung gibt. Doch wir arbeiten unterschiedlich. Das Fraunhofer IAF ist technologiegetrieben. Ihr besitzt einen eigenen Reinraum, entwickelt die fortschrittlichsten Technologien und bringt sie auf den Markt. Wir in unserer Abteilung bei TNO hingegen versuchen, das Beste aus den modernsten Technologien für die Interessen unserer Stakeholder herauszuholen. In Wirklichkeit ergänzen wir uns ideal. Was das Fraunhofer IAF und TNO verbindet, ist, dass wir beide von Spitzentechnologien angetrieben werden und hochqualifizierte und sehr enthusiastische Wissenschaftler haben, die zu den besten der Welt gehören.

In welchen Bereichen können wir, Fraunhofer IAF und TNO, gemeinsam noch viel erreichen?

Van den Bogaart — In meiner Abteilung befassen wir uns mit Hochleistungsradaren. Hier könnten die Entwicklungen am Fraunhofer IAF zu Diamantsubstraten einen Durchbruch erzielen. Andererseits liegt der Charme des Fraunhofer IAF darin, dass Ihr euch ständig mit neuen Technologien beschäftigt und auch in sie investiert, so wie bei den Quantentechnologien. Daher freue ich mich sehr, dass wir nun in einem Quantentechnologie-Projekt zu Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant zusammenarbeiten können. So schließt sich der Kreis unserer 30-jährigen Zusammenarbeit: Wir haben damals in der Hochfrequenzelektronik begonnen und treffen uns nun im neuen Bereich der Quantentechnologien wieder. Hoffentlich werden wir da in den nächsten 30 Jahren ähnlich viel erreichen wie mit dem TA1-Projekt damals.

What are the commonalities and what are the differences between Fraunhofer IAF and TNO?

Van den Bogaart — TNO in the Netherlands is similar to Fraunhofer in Germany, although there are of course differences in organizational structure, business model and funding. However, we work differently. Fraunhofer IAF is technology driven. You have your own clean room, develop the most advanced technologies and push them into the market. While we in our unit at TNO try to get the best out of the most advanced technologies for the applications of our stakeholders. It is really a complementary difference. What Fraunhofer IAF and TNO have in common is that we are both driven by advanced technologies and have highly-skilled very enthusiastic professionals being among the best in the world.

In which areas can we, Fraunhofer IAF and TNO, still achieve a lot together?

Van den Bogaart — In my unit, we are concerned with high-performance radars and the developments at Fraunhofer IAF on diamond substrates may be a breakthrough for this purpose. On the other hand, the charm of Fraunhofer IAF is that you are constantly looking at new technologies and also investing in them, including quantum technologies. I am, therefore, very happy that we can start working together in a quantum technology project on nitrogen-vacancy centers in diamond. This completes the circle of our 30-year cooperation: We started then in high-frequency electronics and now meet again in the new field of quantum technologies. Hopefully we will have a similar impact the next 30 years as with the TA1 project back then.



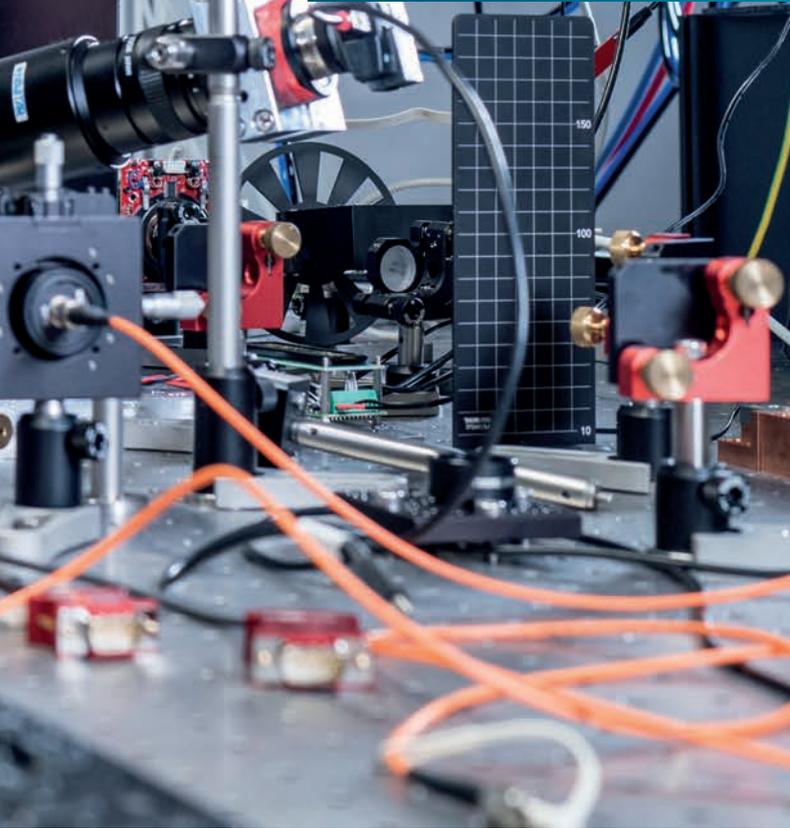


Kooperieren in Projekten

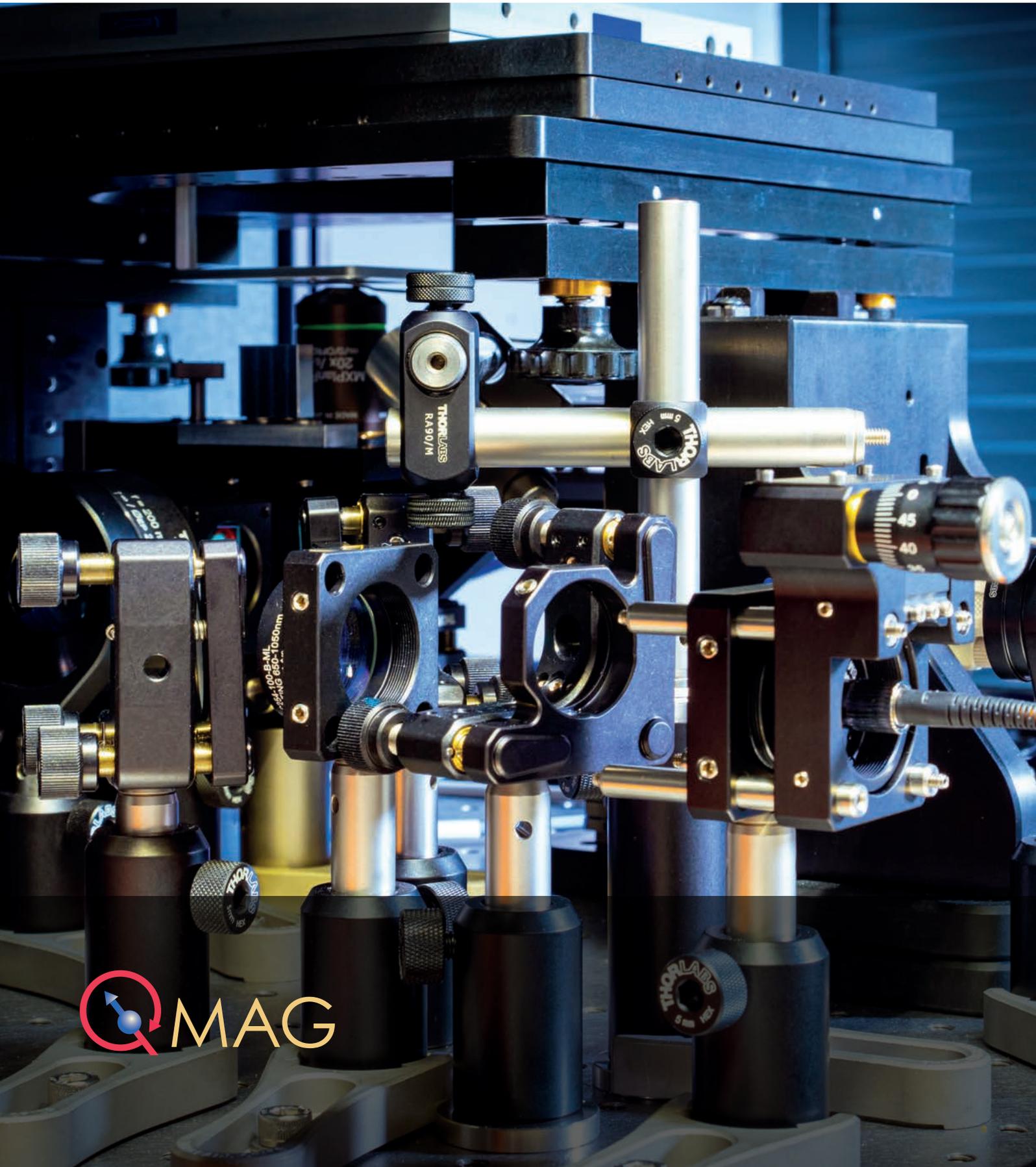
Collaborating in projects

In Verbundprojekten bündeln wir gemeinsam mit Projektpartnern interdisziplinäre Kompetenzen, um neue Lösungen zu erforschen und Innovationen in die Anwendung zu bringen.

In joint projects, we pool interdisciplinary expertise with project partners to research new solutions and bring innovations to application.



In unserem Quantensensorik-Labor erforschen Projektteams Quantenmagnetometer auf Basis von Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant für medizinische und industrielle Anwendungen
In our quantum sensing lab, project teams are researching quantum magnetometers based on nitrogen-vacancy centers in diamond for medical and industrial applications





Quantenmagnetometer für effizientere industrielle Prozesse

Quantum magnetometer for more efficient industrial processes

Fraunhofer-Leitprojekt »QMag«

Für die Prozessanalytik, die Materialprüfung oder Elektroindustrie bieten quantensensorische Messverfahren erhebliche Vorteile. Sechs Fraunhofer-Institute entwickeln Quantenmagnetometer für industrielle Messverfahren, die kleinste magnetische Felder und Ströme mit höchster räumlicher Auflösung beziehungsweise höchster magnetischer Empfindlichkeit bei Raumtemperatur messen können. Das Ziel des Fraunhofer-Leitprojekts »Quantenmagnetometrie«, kurz »QMag«, ist der Transfer der Forschungsergebnisse in konkrete industrielle Anwendungen.

Fraunhofer lighthouse project QMag

Quantum sensory measurement methods offer considerable advantages for process analytics, materials testing or the electrical industry. Six Fraunhofer institutes are developing quantum magnetometers for industrial measurement processes that can measure the smallest magnetic fields and currents with the highest spatial resolution and magnetic sensitivity at room temperature. The goal of the Fraunhofer lighthouse project Quantum Magnetometry, or QMag for short, is to transfer research results into concrete industrial applications.

Partner

- Fraunhofer IPM
- Fraunhofer IWM
- Fraunhofer IMM
- Fraunhofer IISB
- Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP
- University of Colorado Boulder
- Universität Stuttgart

Projektkoordinator

Project coordinator
Prof. Dr. Rüdiger Quay,
Fraunhofer IAF

Mit der Detektion kleinster Magnetfelder lassen sich entscheidende Daten und Informationen über Verfahren in der Prozessanalytik beziehungsweise -messtechnik, mikroskopische Materialschäden oder Fehler in nanoelektronischen Schaltungen gewinnen. Die bislang verfügbaren Magnetsensoren sind für den industriellen Einsatz jedoch nur bedingt geeignet, da ihr Betrieb mit hohen Kosten und technischem Aufwand verbunden ist. Das »QMag«-Konsortium hat sich zum Ziel gesetzt, die Quantenmagnetometrie aus dem Labor in konkrete Anwendungen zu überführen und industriell nutzbar zu machen. Dafür entwickeln die beteiligten Institute Fraunhofer IAF, IPM, IWM, IMM, IISB sowie das britische Fraunhofer CAP in enger Kooperation Quantenmagnetometer mit höchster räumlicher Auflösung beziehungsweise höchster magnetischer Empfindlichkeit.

Die Forschenden konzentrieren sich dabei auf zwei komplementäre Methoden, die beide bei Raumtemperatur funktionieren: zum einen auf Magnetometer auf Basis von NV-Zentren (Stickstoff-Vakanz-Zentren) in Diamant und zum anderen auf Mess-Systeme auf Basis von höchstsensitiven optisch gepumpten Magnetometern (OPMs). In der ersten Projekthälfte lag der Fokus des Projektverbunds auf der Materialentwicklung, dem Systemaufbau und der Evaluierung der Systeme für industrie-relevante Anwendungen.

Den Forschenden ist es hier gelungen, qualitativ hochwertige NV-Zentren in anwendungsspezifisch abgestimmten Wachstumsprozessen auf sehr reinem Diamant herzustellen. Die hohe Dichte der erzeugten NV-Zentren garantiert ein starkes Nutzsignal, und die lange Kohärenz ermöglicht eine sensitive Messung sowie die Möglichkeit, komplexere, gepulste Messungen bildgebend durchzuführen. Auf der Basis von dünnen Schichten von NV-Zentren wurde am Fraunhofer IAF ein Weitfeld-Magnetometer entwickelt, welches die schnelle Erfassung von Magnetfeldverteilungen ermöglicht.

The detection of tiny magnetic fields can be used to obtain crucial data and information about methods in process analytics or metrology, microscopic material damage or defects in nanoelectronic circuits. However, the magnetic sensors available to date are only suitable for industrial use to a limited extent, as their operation is associated with high costs and technical effort. The QMag consortium has set itself the goal of transferring quantum magnetometry from the laboratory to concrete applications and making it suitable for industrial use. The institutes Fraunhofer IAF, IPM, IWM, IMM, IISB and the British Fraunhofer CAP are working closely together to develop quantum magnetometers with the highest spatial resolution and the highest magnetic sensitivity.

The researchers are focusing on two complementary methods, both of which operate at room temperature: first, magnetometers based on nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond, and second, measurement systems based on ultra-sensitive optically pumped magnetometers (OPMs). In the first half of the project, the focus of the project team was on material development, system design and evaluation of the systems for industrially relevant applications.

The researchers have succeeded in producing high-quality NV centers in growth processes — tailored to specific applications — on very pure diamond. The high density of the generated NV centers guarantees a strong useful signal, and the long coherence enables sensitive measurement as well as the possibility to perform more complex pulsed measurements by imaging. Based on thin films of NV centers, a wide-field magnetometer has been developed at Fraunhofer IAF, which allows the fast measurement of magnetic field distributions.



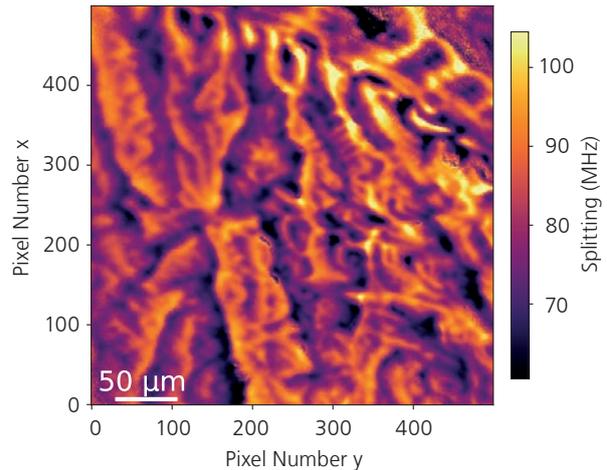
Aufbau des Weitfeld-Magnetometers

im Labor

Setup of the wide-field magnetometer in the laboratory

Weitfeld-Abbildung der lokalen Zeeman-Aufspaltung der Spin-Energieniveaus einer Schicht von NV-Zentren, induziert durch oberflächennahe Streufelder eines FeSi-Blechs

Zeeman splitting induced from magnetic domains measured in a FeSi electrical steel sheet with the NV-based widefield



Im Hinblick auf industrierelevante Applikationsfelder hat das »QMag-Konsortium« den Einsatz der entwickelten Quantenmagnetometer insbesondere in den Bereichen der Prozess- und Durchflussanalytik sowie der Materialprüfung erfolgreich evaluiert. Die Durchflussmessung mit OPMs hat sehr gute Ergebnisse erzielt. Diese vom Fraunhofer IPM vorangetriebenen Arbeiten zur berührungslosen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten haben dadurch bereits das Interesse von Industriepartnern geweckt.

Für die Materialprüfung wurde der Einsatz von beiden Magnetometer-Methoden, OPMs und NV-Zentren, vergleichend evaluiert. Die Arbeiten von Fraunhofer IWM und Fraunhofer IPM zur Detektion von Ermüdungserscheinungen in Stahlproben mittels OPMs zeigen, dass in ferritischen Stählen Schädigungen im Labormaßstab gemessen werden können.

Das Fraunhofer IAF steuert dabei die beiden auf NV-Zentren basierenden bildgebenden Verfahren, Rastersondenmagnetometrie und Weitfeld-Magnetometrie, für den Einsatz in der Materialforschung bei. Gemeinsam mit dem Fraunhofer IWM wird das Potenzial der abbildenden Messungen im Hinblick auf die Charakterisierung nanoskopischer Mikrostrukturen ermittelt. Dazu gehören die Erfassung von Anomalien im lokalen Streufeld ferromagnetischer Materialien, die auf Rissbildung und Schädigungsakkumulation auch im Probeninneren hinweisen, der Nachweis von mikroskopischen Phasenübergängen in Materialien sowie von Defektverteilungen in bestromten Bauteilen. Insbesondere für zerstörungsfreie Prüfungsverfahren sowie für die Schadensmodellierung sind diese Punkte von großer Relevanz.

Oft wirken sich Methoden in der Materialforschung nachteilig auf das Probenmaterial aus. Das Weitfeld-Magnetometer ist eine neue nicht-invasive Methode, die bei Raumtemperatur arbeitet und neue Einblicke in die mikroskopische Magnetfeldverteilung und Spindynamik gibt. Dabei können Materialveränderungen aufgrund von Ermüdung oder Verspannungen mikroskopisch identifiziert werden und auf einen bevorstehenden Zusammenbruch des Materials hinweisen.

With regard to industry-relevant application fields, the QMag consortium has successfully evaluated the use of the developed quantum magnetometers especially in the fields of process and flow analysis as well as material testing. Flow measurement with OPMs has achieved very good results. Thus, this work on the non-contact measurement of flow velocities, which is being driven forward by Fraunhofer IPM, has already attracted the interest of industrial partners. For material testing, the use of both magnetometer methods, OPMs and NV centers, was comparatively evaluated. The work of the institutes Fraunhofer IWM and IPM on the detection of fatigue effects in steel samples using OPMs shows that damage can be measured in ferritic steels on a laboratory scale.

Fraunhofer IAF contributes the two NV center-based imaging techniques, scanning probe magnetometry and wide-field magnetometry, for use in materials research.

Together with Fraunhofer IWM, the potential of imaging measurements with respect to the characterization of nanoscopic microstructures is determined. These include the detection of irregularities in the local stray field of ferromagnetic materials that indicate crack formation and damage accumulation even inside the sample, the detection of microscopic phase transitions in materials, and defect distributions in current-carrying components. Especially for non-destructive testing methods as well as for damage modeling, these points are of great relevance.

Methods in materials research often have a detrimental effect on the sample material. The wide-field magnetometer is a new non-invasive method that operates at room temperature and provides new insights into microscopic magnetic field distribution and spin dynamics. In this process, material changes due to fatigue or distortion can be identified microscopically and indicate an imminent breakdown of the material.

Erforschung effizienter elektrokalorischer Wärmepumpen

Researching efficient electrocaloric heat pumps

Fraunhofer-Leitprojekt »ElKaWe«

Das Fraunhofer-Leitprojekt »ElKaWe« erforscht Festkörper-Wärmepumpen, die als Innovation für die Wärmewende (Heiz- und Kühlanwendungen) zur Senkung von Treibhausgasemissionen auf das Nullniveau beitragen sollen. Zur beschleunigten Umsetzung und Realisierung von Forschungsideen bündeln sechs Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen aus vier Fachgebieten der Ingenieurwissenschaften in besonders multidisziplinärer Kooperation.

Fraunhofer lighthouse project ElKaWe

The Fraunhofer lighthouse project ElKaWe is researching solid-state heat pumps as an innovation for the heat transition (heating and cooling applications) to help reduce greenhouse gas emissions to zero. To accelerate the implementation and realization of research ideas, six Fraunhofer Institutes pool their expertise from four engineering disciplines in a particularly multidisciplinary collaboration.

Projektleitung

Project leader

Dr. Stefan Mönch,
Fraunhofer IAF

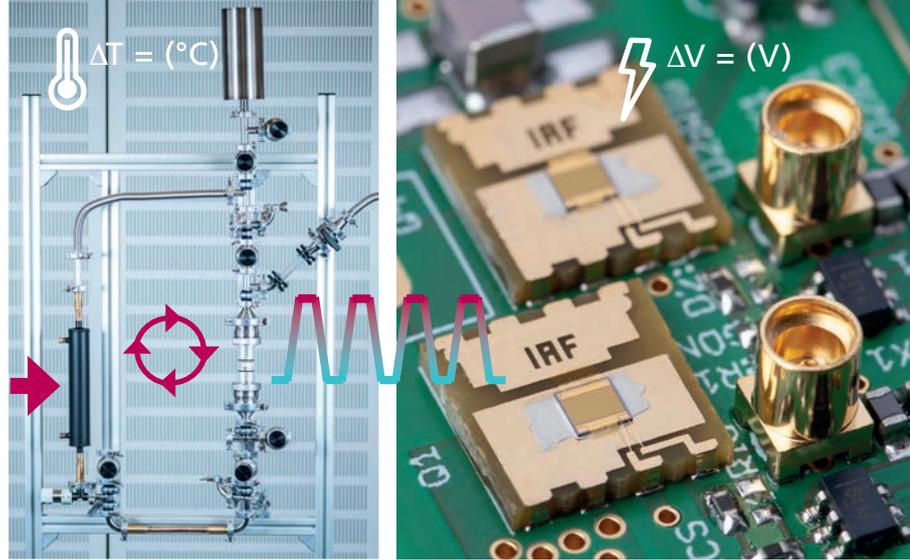
Partner

- Fraunhofer IPM
- Fraunhofer FEP
- Fraunhofer IAP
- Fraunhofer IKTS
- Fraunhofer LBF



Multidisziplinäres Forschungsteam aus vier Fachrichtungen von sechs Fraunhofer-Instituten neben dem Prototyp einer elektrokalorischen Wärmepumpe
Multidisciplinary research team from four disciplines of six Fraunhofer Institutes next to the prototype of an electrocaloric heat pump

Elektrokaloischer Wärmepumpen-Demonstrator (links) und GaN-HEMT-basierte Leistungselektronik zur effizienten elektrischen Ansteuerung (rechts)
Electrocaloric heat pump demonstrator (left) and GaN-HEMT based power electronics for efficient electrical control (right)



Zum Erreichen der Klimaziele ist es essentiell, Anwendungen, die bislang noch fossile Rohstoffe verbrennen, durch neuartige alternative Technologien zu ersetzen. Mehr Elektrifizierung ist ein Lösungsansatz und zum Beispiel in der Mobilität bereits breitenwirksam. Zum Heizen hingegen wird immer noch Öl oder Gas verbrannt, während beim Kühlen meist klimaschädliches Kältemittel benötigt wird. Die Erforschung emissionsfreier Festkörper-Wärmepumpen, betrieben durch erneuerbare elektrische Energie und bei Umgebungstemperatur, ist ein vielversprechender Lösungsansatz für zukünftige Heiz- und Kühlanwendungen.

»EIKaWe« ist eine multidisziplinäre Kooperation von Forschenden mehrerer Fachgebiete der sechs beteiligten Fraunhofer-Institute. In den Materialwissenschaften werden elektrokaloische Festkörpermateriale erforscht, um in Wärmepumpen ohne Kältemittel auszukommen; das Ziel ist es, die Wärmepumpen-Leistungszahl näher an das physikalische Carnot-Limit zu bringen. Mit Maschinenbau und Wärmetechnik werden Systemkonzepte mit schnellem Wärmeübertrag für eine hohe Leistungsdichte realisiert. Die Elektrotechnik und Halbleitertechnologie ermöglichen die Ansteuerung der elektrokaloischen Wärmepumpen höchsteffizient und lautlos im Vergleich zu mechanischen Dampf-Kompressoren.

Das Fraunhofer IAF erforscht dazu Galliumnitrid-Bauelemente und neue Halbleitermaterialien wie Aluminiumscandiumnitrid, um die Strom- und Leistungsdichte zu erhöhen. Neue ultraeffiziente Schaltungs-Topologien für Spannungswandler mit über 99,7 Prozent elektrischem Wirkungsgrad wurden erzielt. Die hohe elektrische Effizienz ermöglicht es, die prinzipiell sehr hohe Materialeffizienz auch auf Systemebene zu überführen und somit mit elektrokaloischen Wärmepumpen auch eine hohe System-Leistungszahl zu erreichen.

Gemeinsam arbeiten die Projektpartner daran, eine vollumfängliche Lösung zu erforschen und gleichzeitig die Industrie- und Markttauglichkeit zu berücksichtigen, um Innovationen strategisch in die breite Anwendung zu überführen. Dank der Kompetenzbündelung konnte bereits ein vollständiger Demonstrator aufgebaut werden, der das Potenzial der Technologie für zukünftige effiziente und emissionsfreie Heiz- und Kühlanwendungen aufzeigt.

To achieve the climate goals, it is crucial to replace applications that still burn fossil fuels with new types of alternative technologies. More electrification is one approach to solving this problem and is already having a broad impact in mobility, for example. For heating, on the other hand, oil or gas is still burned, while cooling usually requires climate-damaging refrigerant. Research into zero-emission solid-state heat pumps, powered by renewable electrical energy and operating at ambient temperatures, is a promising approach for future heating and cooling applications.

EIKaWe is a multidisciplinary cooperation of researchers from several disciplines of the six participating Fraunhofer Institutes. In materials science, solid-state electrocaloric materials are being researched to eliminate the need for refrigerants in heat pumps; the goal is to bring the heat pump coefficient of performance closer to the physical Carnot limit. Mechanical engineering and thermal technology are used to realize system concepts with fast heat transfer for high power density. The electrical engineering and semiconductor technology enable the control of the electrocaloric heat pumps in the most efficient and silent way compared to mechanical vapor compressors.

Fraunhofer IAF researches gallium nitride devices and new semiconductor materials like aluminum scandium nitride to increase current and power density. New ultra-efficient circuit topologies for power converters with over 99.7 percent electrical efficiency have been achieved. The high electrical efficiency makes it possible to transfer the material efficiency, which is in principle very high, also to the system level and thus to achieve a high system coefficient of performance with electrocaloric heat pumps.

Together, the project partners are working to explore a fully comprehensive solution while considering industry and market viability in order to strategically transfer innovations into widespread use. As a result of the bundling of competencies, a complete demonstrator has already been set up, showing the potential of the technology for future efficient and emission-free heating and cooling applications.

Schlüsseltechnologien für 6G

Key technologies for 6G

Fraunhofer-Leitprojekt »6G SENTINEL«

Für den zukünftigen 6G-Mobilfunk sind neuartige Technologien gefragt. Um gemeinsam eine technologische Spitzenposition bei der 6G-Forschung einzunehmen, bündeln fünf Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen und entwickeln Schlüsseltechnologien für den kommenden Mobilfunkstandard. Im Mittelpunkt des Fraunhofer-Leitprojekts »6G SENTINEL« stehen Terahertz-Technologien und Lösungen für flexible Netze.

Fraunhofer lighthouse project 6G SENTINEL

The future 6G mobile communications will require novel technologies. In order to take a leading technological position in 6G research, five Fraunhofer institutes are combining their expertise and developing key technologies for the upcoming mobile communications standard. The Fraunhofer lighthouse project 6G SENTINEL focuses on terahertz technologies and solutions for flexible networks.

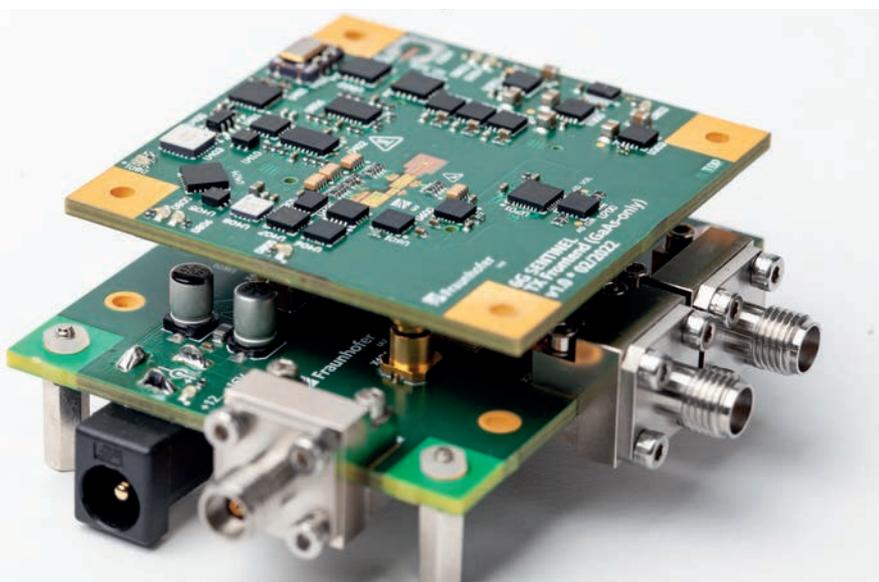
Projektleitung

Project leader

Dr. Michael Mikulla,
Fraunhofer IAF

Partner

- Fraunhofer IIS
- Fraunhofer HHI
- Fraunhofer FOKUS
- Fraunhofer IZM



Am Fraunhofer IAF entwickeltes D-Band-Sendemodul mit integrierten mHEMT-Komponenten für die Signalverarbeitung sowie Galliumnitrid-Leistungsverstärker
D-band transmitter module developed at Fraunhofer IAF with integrated mHEMT components for signal processing as well as gallium nitride power amplifier

6G soll die Leistungsfähigkeit des Mobilfunks in puncto Spitzendurchsatz und Anwenderdatenrate, Zuverlässigkeit und Latenz sowie Energieeffizienz und Lokalisierungs Genauigkeit im Vergleich zu 5G einen deutlichen Schritt voranbringen. 6G beruht auf der konsequenten Weiterentwicklung bisheriger Mobilfunktechnologien und wird gleichzeitig völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Besonderes in der Nutzung von Terahertz-(THz-)Frequenzen ab 100 GHz steckt viel Potenzial, weil sie extrem hohe Datendurchsätze zulassen, die für Anwendungen wie Virtual Reality, digitale Zwillinge, Teleoperation und autonomes Fahren nötig sind.

Dafür arbeiten Fraunhofer-Forschende im Leitprojekt »6G SENTINEL« intensiv an der Entwicklung von Funkkanalmodellen und Link-Level-Simulatoren für den Frequenzbereich zwischen 100 und 300 GHz. Darauf aufbauend entsteht ein Prototyp eines hochintegrierten THz-Moduls, das zusammen mit weiter zu entwickelnden Übertragungsverfahren zur Demonstration mobiler THz-Verbindungen geeignet ist.

Die zweite wichtige Säule des Projekts bilden Softwarelösungen, die eine flexible Gestaltung der Netze entsprechend der Anwendung und der aktuellen Betriebssystemsituation ermöglichen. Grundlegend hierfür ist ein modulares und softwarebasiertes Kernnetz, sichere und vertrauenswürdige Komponenten zur dynamischen Steuerung, eine Integration neuartiger Zugangs- und Backhaul-Netze sowie die Unterstützung einer KI-basierten Netzautomatisierung.

Das Fraunhofer IAF trägt zusammen mit seinen Partnern zur Erforschung und Entwicklung von Sendemodulen bei, die große Bandbreiten und hohe Ausgangsleistungen bei einer Übertragungsfrequenz von 140 GHz ermöglichen. So sollen hohe Datenraten über längere Strecken übertragen werden können. Dafür werden erstmals sowohl mHEMT-Komponenten für die Signalverarbeitung als auch Galliumnitrid-Leistungsverstärker in einem Modul integriert.

Am Ende des Projekts streben die Partner die Entwicklung und Demonstration einer anpassungsfähigen Architektur für heterogene 6G-Netze an und tragen dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in der 6G-Mobilfunkkommunikation zu stärken.

6G is expected to significantly advance mobile performance in terms of peak throughput and user data rate, reliability and latency, as well as energy efficiency and localization accuracy compared to 5G. 6G is based on the consistent further development of previous mobile communications technologies and at the same time will open up completely new possibilities. The use of terahertz (THz) frequencies starting from 100 GHz in particular holds great potential because they permit extremely high data throughputs, which are necessary for applications such as virtual reality, digital twins, teleoperation and autonomous driving.

To achieve this, Fraunhofer researchers in the 6G SENTINEL project are working intensively on the development of radio channel models and link-level simulators for the frequency range between 100 and 300 GHz. Based on this, a prototype of a highly integrated THz module is being developed which, together with transmission methods to be further developed, is suitable for demonstrating mobile THz links.

The second important pillar of the project are software solutions that enable flexible design of the networks according to the application and the current operating situation. Essential to this is a modular and software-based core network, secure and trusted components for dynamic control, integration of novel access and backhaul networks, and support for AI-based network automation.

Together with its partners, Fraunhofer IAF is contributing to the development and research of transmitter modules that provide large bandwidths and high output powers at a transmission frequency of 140 GHz in order to transmit high data rates over longer distances. For this purpose, both mHEMT components for signal processing and gallium nitride power amplifiers are integrated in one module for the first time.

At the end of the project, the partners aim to develop and demonstrate an adaptable architecture for heterogeneous 6G networks and contribute to strengthening Germany's competitiveness in 6G mobile communications.





Mit Diamant zum hybriden Quantenprozessor »Made in Germany«

Using diamond to develop a hybrid quantum processor “made in Germany”

Verbundprojekt »SPINNING«

Die Erarbeitung von Quantencomputern für die Anwendung kann nur mit gebündelten Kompetenzen und einer engen Zusammenarbeit gelingen. Im Projekt »SPINNING« arbeitet ein nationales Konsortium aus 14 Partnern und 14 assoziierten Partnern aus der Hardware-, Firmware- und Software-Entwicklung an einem kompakten, skalierbaren Quantenprozessor. Ihr Ziel ist die Entwicklung und Demonstration eines neuartigen Quantenprozessors, der auf Spin-Qubits in Diamant basiert und sich an klassische Computer anbinden lässt.

Joint project SPINNING

The development of a quantum computer for application can only succeed with bundled competencies and in close cooperation. In the SPINNING project, a national consortium of 14 partners and 14 associated partners from hardware, firmware and software development is working on a compact, scalable quantum processor. Their goal is to develop and demonstrate a novel quantum processor based on spin qubits in diamond that can interface with classical computers.

Partner

- Fraunhofer IISB
- Forschungszentrum Jülich GmbH
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Universität Konstanz
- Universität Heidelberg
- Technische Universität München
- Universität Ulm
- Diamond Materials GmbH
- NVision Imaging Technologies GmbH
- Qinu GmbH
- Universität Stuttgart
- Quantum Brilliance GmbH
- Swabian Instruments GmbH, Stuttgart
- 14 assoziierte Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft

Projektkoordinator

Project coordinator
Prof. Dr. Rüdiger Quay,
Fraunhofer IAF

Mit Quantencomputern lassen sich Rechenprobleme lösen, die klassische Computer nur mit Vereinfachungen, Näherungen oder mit sehr langen Rechenzeiten bewältigen können. Diese Rechenleistung basiert auf dem zentralen Hardwareelement, dem Qubit. Bislang hat sich jedoch kein technologischer Ansatz zur Realisierung von Qubits und Quantencomputern eindeutig durchsetzen können.

Unter der Leitung des Fraunhofer IAF arbeitet das »SPINNING«-Konsortium an einem neuartigen Lösungsansatz zur Entwicklung eines skalierbaren, universellen Quantencomputers: Dieser basiert auf Spin-Qubits in Diamant und zeichnet sich durch ein neuartiges vernetztes sowie hybrides Design aus, das eine hervorragende Konnektivität und flexible Konfigurierbarkeit bietet.

Die in »SPINNING« entwickelte Hardware soll entscheidende Vorteile im Vergleich zu anderen Quantencomputer-Technologien bieten: längere Rechenzeiten, geringere Fehlerraten und geringerer Kühl- beziehungsweise Energiebedarf. Zunächst soll der Quantenprozessor mit 5 beziehungsweise 20, in der Folge mit 100 Qubits und mehr rechnen können und damit in der Lage sein, beispielsweise Produkte komplexer chemischer Reaktionen exakt zu prognostizieren.

Für die Entwicklung des »SPINNING«-Quantenprozessors werden lokale Register, bestehend aus fünf Qubits, durch Kopplung der Farbzentren-Spins an photonische Resonatoren realisiert. In diesem Ansatz werden Kohärenzzeiten, das heißt mögliche Rechenzeiten, bis in den Minutenbereich erreicht (im Vergleich zu wenigen Tausendstelsekunden bei anderen Qubit-Technologien) und gleichzeitig eine hohe Konnektivität des Registers ermöglicht. Diese Register werden über optische Netzwerke zu einem Quantenprozessor verbunden, der die Grundlage für einen voll programmierbaren, skalierbaren und universellen Quantencomputer bilden soll. Auf diese Weise können 2-Qubit-Gatter sowohl lokal, innerhalb eines Registers, als auch global, zwischen zwei Registern, implementiert werden. Mit dieser Architektur werden drei wesentliche Vorteile eines festkörperbasierten Spin-Photonen-Systems kombiniert: hervorragende Quantenkontrolle, ultralange Kohärenzzeit und starke Spin-Photonen-Kopplung.

Mit der langjährigen Erfahrung im Bereich der Diamantepitaxie und -technologie stellt das Fraunhofer IAF zusammen mit seinem Spin-off Diamond Materials das Ausgangsmaterial für die Herstellung der Spin-Register zur Verfügung. Die Diamantreaktoren des Fraunhofer IAF ermöglichen die Herstellung von

Quantum computers can solve computational problems that classical computers can only handle with simplifications, approximations or with very long computation times. This computing power depends on the central hardware element, the qubit. So far, however, no technological approach to the realization of qubits and quantum computers has been able to clearly establish itself.

Under the leadership of Fraunhofer IAF, the SPINNING consortium is working on an alternative approach to develop a scalable, general-purpose quantum computer: It is based on spin qubits in diamond and features a novel networked as well as hybrid design that offers excellent connectivity and flexible configurability.

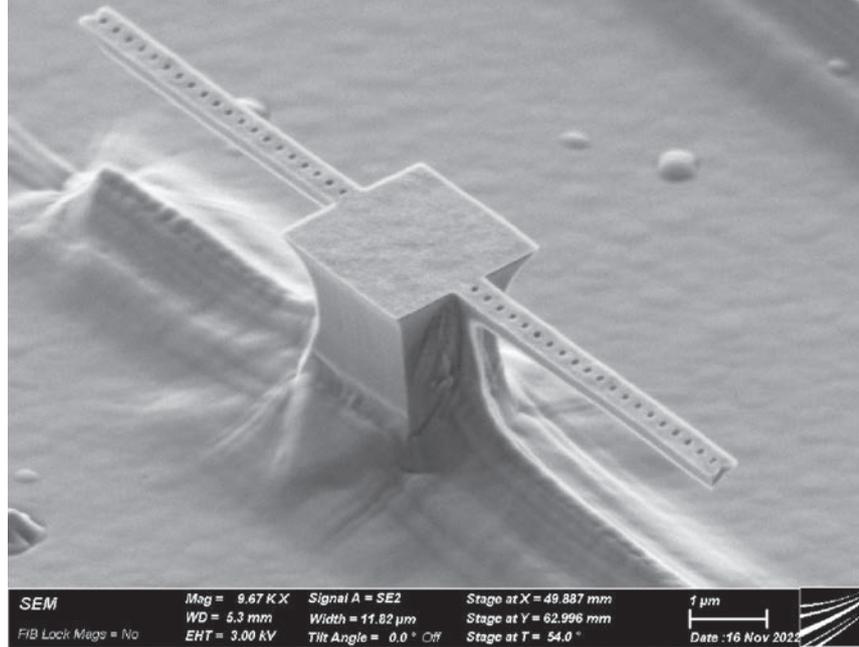
The hardware developed in SPINNING is expected to offer key advantages over other quantum computing technologies: longer computation times, lower error rates, and lower cooling or power requirements. Initially, the quantum processor should be able to calculate with 5 or 20, and subsequently with 100 qubits and more, and thus be able, for example, to accurately predict products of complex chemical reactions.

For the development of the quantum processor, local registers consisting of five qubits are realized by coupling the color center spins to photonic resonators. In this approach, coherence times, that is possible computation times, are achieved up to the minute range (compared to a few thousandths of a second for other qubit technologies) while enabling high connectivity of the register. These registers will be connected via optical networks to a quantum processor that will form the basis for a fully programmable, scalable, and general-purpose quantum computer. Thus, 2-qubit gates can be implemented both locally, within a register, and globally, between two registers. This architecture combines three key advantages of a solid-state-based spin-photon system: excellent quantum control, ultra-long coherence time, and strong spin-photon coupling.

With its many years of experience in the field of diamond epitaxy and technology, Fraunhofer IAF, together with its spin-off Diamond Materials, provides the starting material for the production of the spin-registers. The diamond reactors of Fraunhofer IAF enable the production of diamonds with highest purity. Due to the high process control in chemical vapor deposition (CVD), novel diamond films from nano-scale thicknesses to macroscopically large crystals are realized, dopants are introduced selectively for the first time, for

Am Fraunhofer IAF hergestellte Diamant-Mikrostrukturen zur Demonstration von photonischen Resonatoren. Diese können mit optimierten Designs als Kavitäten in Spin-Registern für Quantencomputer-Hardware genutzt werden.

Diamond microstructures fabricated at Fraunhofer IAF to demonstrate photonic resonators; with optimized designs. These can be used as cavities in spin registers for quantum computing hardware.



Diamanten mit höchster Reinheit. Durch die hohe Prozesskontrolle in der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) werden neuartige Diamantfilme von nanoskaligen Dicken bis zu makroskopisch großen Kristallen realisiert, Dotierstoffe erstmals gezielt eingebracht, um etwa Akzeptor- oder Donator-Dotierungen zu erreichen, sowie Diamanten mit künstlich kontrollierten Isotopenverhältnissen (vor allem ^{13}C) gewachsen. Auf diese Weise können auch Farbzentren in die Diamantfilme eingebracht und dadurch direkt in das Kristallgitter aufgenommen werden. Da hierbei keine größeren Defekte im umgebenden Kristallgitter entstehen, haben solche Farbzentren die höchsten bisher erreichten Kohärenzzeiten erzielt. Zusätzlich wird durch die am Fraunhofer IAF vorhandene Diamanttechnologie die Bereitstellung photonischer Strukturen unterstützt, vor allem die Herstellung der sehr hochwertigen Resonatoren, in die die Spin-Register eingebracht werden.

Konsortium bündelt nationales Know-how

Das Verbundprojekt nutzt das gesamte wirtschaftliche und wissenschaftliche Know-how von sechs Universitäten, drei Forschungseinrichtungen, fünf industriellen Unternehmen (kleinen und mittelständischen Unternehmen sowie Spin-offs) und 14 assoziierten Partnern aus der vorwettbewerblichen Hardware-, Firmware- und Software-Entwicklung.

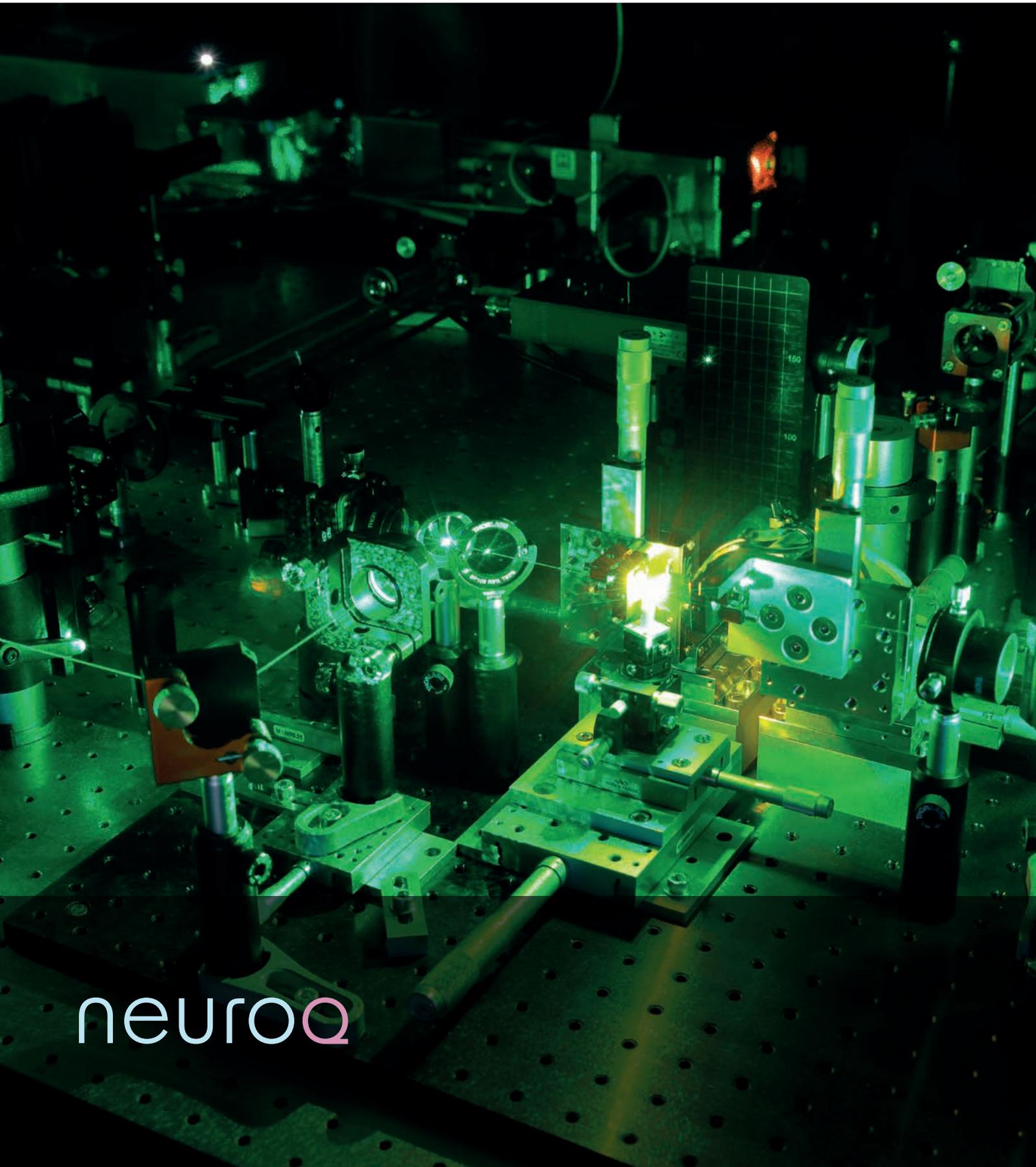
Im »SPINNING«-Konsortium wirken herausragende nationale Experten sowie eine große Anzahl von Unternehmen mit, um die Projektergebnisse in wertschöpfende Produkte umzusetzen, einen zuverlässigen Betrieb eines innovativen Quantencomputers sicherzustellen und eine Peripherie zu schaffen, um die Rechenkapazität und -leistung für eine breite Gruppe von Anwendern, beispielsweise per Cloud-Computing, zur Verfügung zu stellen.

example to achieve acceptor or donor dopants, and diamonds with artificially controlled isotope ratios (especially ^{13}C) are grown. This way, color centers can also be introduced into the diamond films and thus directly incorporated into the crystal lattice. Since no major defects are created in the surrounding crystal lattice, such color centers have achieved the highest coherence times to date. In addition, the diamond technology available at Fraunhofer IAF supports the provision of photonic structures, especially the fabrication of the very high quality resonators into which the spin registers are inserted.

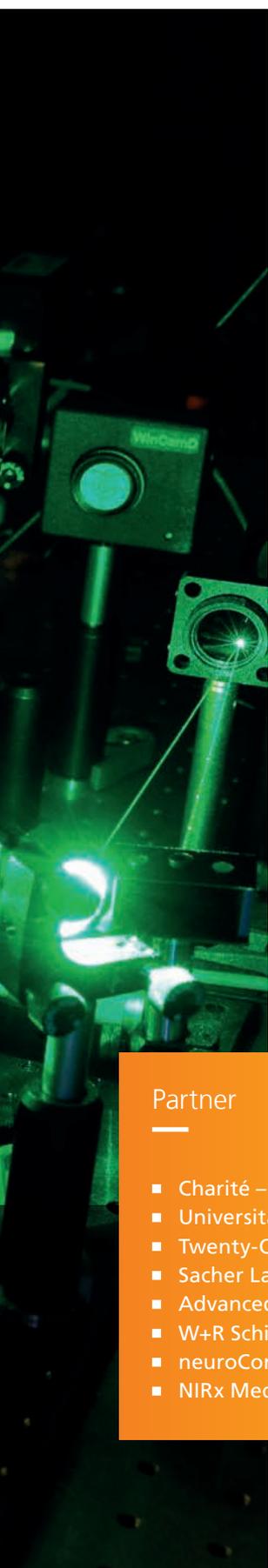
Konsortium pools national know-how

The joint project utilizes the entire economic and scientific know-how of six universities, three research institutions, five industrial companies (small as well as medium-sized enterprises and spin-offs) and 14 associated partners from pre-competitive hardware, firmware and software development.

In the SPINNING consortium, outstanding national experts as well as a large number of companies are involved in order to turn the project results into value-added products, to ensure reliable operation of an innovative quantum computer, and to create a periphery to make computing capacity and performance available to a broad group of users, for example via cloud computing.



neuroQ



Quantenmagnetometer sollen Mobilität gelähmter Menschen steigern

Quantum magnetometers aim to increase mobility of paralyzed people

BMBF-Leuchtturmprojekt »NeuroQ«

Gehirn-Computer-Schnittstellen können gelähmten Menschen durch die Steuerung von Exoskeletten Teile ihrer Bewegungsfähigkeit zurückgeben. Allerdings sind die Sensoren von nicht-invasiven Systemen noch nicht sensitiv genug für komplexere Bewegungen. Dieser Herausforderung hat sich ein Verbund aus Fraunhofer IAF, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Universität Stuttgart und Industriepartnern angenommen: Im kürzlich gestarteten BMBF-Leuchtturmprojekt »NeuroQ« entwickeln die Projektpartner hochsensitive diamantbasierte Quantensensoren, die es Gelähmten ermöglichen sollen, neurale Exoskelette präziser zu steuern.

BMBF lighthouse project NeuroQ

Brain-computer interfaces can restore some of the mobility of paralyzed people through the control of exoskeletons. However, the sensors of non-invasive systems are not yet sensitive enough for more complex movements. Researchers from Fraunhofer IAF, Charité—Universitätsmedizin Berlin, University of Stuttgart and industrial partners have taken up this challenge: In the recently launched BMBF lighthouse project NeuroQ, the project partners are developing highly sensitive diamond-based quantum sensors that will enable paralyzed people to control neural exoskeletons more precisely.

Partner

- Charité – Universitätsmedizin Berlin
- Universität Stuttgart
- Twenty-One Semiconductors
- Sacher Lasertechnik GmbH
- Advanced Quantum GmbH
- W+R Schirmungstechnik GmbH
- neuroConn GmbH
- NIRx Medizintechnik GmbH

Projektkoordinator

Project coordinator

Dr. Jan Jeske,
Fraunhofer IAF

Für Menschen, die beispielsweise aufgrund einer Rückenmarksverletzung, eines Schlaganfalls oder einer anderen Krankheit ihre Hände oder Beine nicht bewegen können, stellen sogenannte Brain-Computer-Interfaces (BCIs) eine große Hoffnung dar: Diese technischen Schnittstellen zwischen dem menschlichen Gehirn und einem Computer ermöglichen die Steuerung eines Gerätes allein mittels Hirnaktivität. Nicht-invasive BCIs ersparen den Patienten sogar eine risikobehaftete Gehirn-Operation, allerdings ist es damit bislang nicht möglich, komplexe Handbewegungen zu steuern, da die Sensitivität der Sensoren nicht ausreicht.

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Leuchtturmprojekt »Laserschwellen-Magnetometer für neuronale Kommunikationsschnittstellen«, kurz »NeuroQ«, entwickeln Forschende deshalb nun hochsensitive Quantensensoren, die kleinste durch Hirnaktivität entstandene Magnetfelder messen und damit eine präzisere Steuerung eines Exoskeletts ermöglichen sollen. Der Projektverbund aus Forschungseinrichtungen, einer klinischen Arbeitsgruppe, Start-ups sowie kleinen und mittleren Unternehmen erforscht diese neuartige Sensortechnologie, die in ein BCI-System integriert und zur Demonstration und Weiterentwicklung im klinischen Umfeld eingesetzt werden soll.

Messung kleinster Magnetfelder

Die Aufgabe des Fraunhofer IAF besteht darin, die Laserschwellen-Magnetometrie (LSM) als Sensortechnologie weiterzuentwickeln. Dieser fundamental neue Ansatz zur Messung kleinster Magnetfelder basiert auf mit Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in hochdotiertem Diamant und nutzt die nicht-lineare Verstärkung einer Laserkavität zur Signal- und Kontrastverstärkung.

For people who cannot move their hands or legs due to, for example, a spinal cord injury, stroke or other illness, so-called brain-computer interfaces (BCIs) offer great hope: BCIs are technical interfaces between the human brain and a computer that enable to control a device using only brain activity. Non-invasive BCIs save patients even from risky brain surgery, but so far it is not possible to use them to control complex hand movements because conventional sensors are not sensitive enough.

In the lighthouse project "Laser Threshold Magnetometer for Neuronal Communication Interfaces" funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), NeuroQ for short, researchers are now developing highly sensitive quantum sensors that measure the smallest magnetic fields generated by brain activity and thus enable more precise control of an exoskeleton. The project network of research institutions, a clinical research group, start-ups, and small and medium-sized enterprises is investigating this novel sensor technology, which will be integrated into a BCI system and used for demonstration and further development in a clinical setting.

Measurement of smallest magnetic fields

The task of Fraunhofer IAF is to further develop laser threshold magnetometry as a sensor technology. This fundamentally new approach to measuring very small magnetic fields is based on nitrogen-vacancy (NV) centers in highly doped diamond and uses the nonlinear gain of a laser cavity to amplify signal and contrast.



Ein Patient testet ein von der Charité – Universitätsmedizin Berlin entwickeltes Brain-Computer-Interface zur Steuerung einer Exoskelett-Hand

Patient testing a brain-computer interface developed by Charité— Universitätsmedizin Berlin to control an exoskeleton hand



Neun Projektpartner erforschen und entwickeln die neue Sensortechnologie und begleiten sie bis zur klinischen Demonstration

Nine project partners are researching and developing the new sensor technology and accompanying it through to clinical demonstration

In einem vorherigen Projekt wurde die LSM erstmals experimentell umgesetzt und damit wesentliche Vorarbeit geleistet: Das Projektteam hat hierbei die weltweit erste magnetfeldabhängige Lichtverstärkung von NV-Zentren gezeigt und einen neuen NV-Zentren-Ensemble-Kontrastrekord mit einer NV-Zentren-Laserkavität erreicht. Ebenso realisierten die Forschenden das erste NV-Zentren-Lasersystem.

Nun arbeitet das »NeuroQ«-Team an der Erhöhung der Sensitivität, die aus dem Ausnutzen der optisch nicht-linearen Verstärkung einer Kavität resultiert: Ein Magnetfeld führt zu einer geringeren Emission der NV-Zentren in die Kavitätsmode und schwächt das Lichtfeld des Lasers. Dies führt wiederum zu einer geringeren stimulierten Emissionsrate und dadurch zu noch weniger Emission. Aus diesem Feedback-Loop der Laserkavität erfolgt eine starke Signaländerung und hohe Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern.

Kombination von zwei Lasermedien

Für das Laserschwellen-Magnetometer werden zwei Lasermedien in einer optischen Kavität genutzt: Diamant, der sich durch eine hohe Dichte von NV-Zentren und geringe Verluste auszeichnet, und ein Membran-Lasermedium (membrane external cavity surface emitting laser, MECSEL). Mit der MECSEL-Technologie soll die Sensitivität der Sensoren weiter gesteigert werden: Ihre extreme Rauscharmut kann das Potenzial der LSM in einem extrem sensitiven Aufbau ausschöpfen. Bei der Entwicklung der MECSEL wird sowohl der spektrale Bereich, die Höhe des optischen Gewinns sowie die Stärke der Pumpabsorption sukzessive optimiert, bis ein ideales Zusammenspiel der beiden Gewinnmedien in der Kavität erreicht ist. Aus der Kombination der beiden Lasermedien soll ein hochsensitives Quantenmagnetometer entstehen, das bei Raumtemperatur sowie in der Anwesenheit des Erdmagnetfelds eingesetzt werden kann. Am Ende der Projektzusammenarbeit soll ein alltagstaugliches Quantenmagnetometer die Basis für ein BCI-System bilden, das die Lebensqualität gelähmter Menschen wesentlich verbessern soll.

In a previous project, laser threshold magnetometry was implemented experimentally for the first time and thus essential preliminary work was done: Here, the project team demonstrated the world's first magnetic field-dependent light amplification of NV centers and achieved a NV center ensemble contrast record with an NV center laser cavity. Also, the researchers realized the first NV center laser system.

The NeuroQ team is currently working to increase the sensitivity that results from exploiting the optically nonlinear gain of a cavity: A magnetic field results in less emission from NV centers into the cavity mode and weakens the light field of the laser. In turn, this leads to a lower stimulated emission rate and thus even less emission. From this feedback loop of the laser cavity results a strong signal change and high sensitivity to magnetic fields.

Combination of two laser media

For the laser threshold magnetometer, two laser media are used in one optical cavity: Diamond, which is characterized by high NV center density and low losses, and a membrane external cavity surface emitting laser (MECSEL). MECSEL technology is intended to further increase the sensitivity of the sensors: Their extreme low noise can exploit the potential of LSM in an extremely sensitive setup. During the development of the MECSEL, both the spectral range, the amount of optical gain, and the strength of pump absorption are successively optimized until an ideal interaction of the two gain media in the cavity is achieved. The combination of the two laser media will result in a highly sensitive quantum magnetometer that can be used at room temperature and in the presence of the Earth's magnetic field. At the end of the project collaboration, a quantum magnetometer suitable for everyday use should form the basis of a BCI system that aims to significantly improve the quality of life of paralyzed people.

Hochleistungsfähige GaN-Module für den 6G-Mobilfunk

High-performance GaN modules for 6G mobile communications

Fraunhofer PREPARE-Projekt »KONFEKT«

Der 6G-Mobilfunk soll spätestens ab 2030 mobilen Anwendungen der Künstlichen Intelligenz, Virtuellen Realität und des Internets der Dinge den Weg in den Alltag bahnen. Dafür wird wesentlich leistungsstärkere Hardware benötigt als für den aktuellen 5G-Mobilfunkstandard. Gemeinsam haben Fraunhofer IAF und Fraunhofer HHI im Projekt »KONFEKT« innovative Funk-Module auf GaN-Basis für die 6G-relevanten Frequenzbereiche oberhalb von 70 GHz entwickelt und deren hohe Leistungsfähigkeit demonstriert.

Partner

Fraunhofer HHI

Fraunhofer PREPARE project KONFEKT

By 2030 at the latest, 6G mobile communications will pave the way for mobile applications for artificial intelligence, virtual reality and the Internet of Things in everyday life. This will require much more powerful hardware than the current 5G mobile communications standard. In the project KONFEKT, Fraunhofer IAF and Fraunhofer HHI have jointly developed innovative GaN-based transmitter modules for the 6G-relevant frequency ranges above 70 GHz and demonstrated their high performance.

Projektleitung

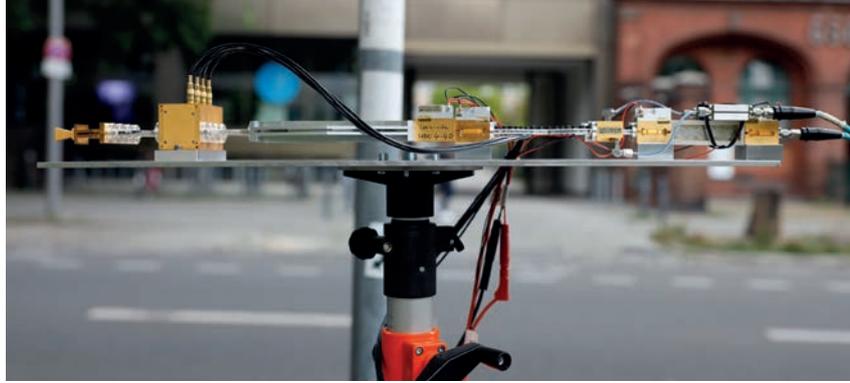
Project leader

Dr. Dirk Schwantuschke,
Fraunhofer IAF



E-Band-Modul auf GaN-Basis für breitbandige Punkt-zu-Punkt-Datenverbindungen über große Entfernungen im 6G-Mobilfunk
GaN-based E-band module for broadband point-to-point data links over long distances in 6G mobile communications

*E-Band-Sender mit GaN-Modul, additiv gefertigter Antenne und Rotman-Linse
E-band transmitter with GaN module,
additively manufactured antenna and
Rotman lens*



Selbstfahrende Autos, Telemedizin, automatisierte Fabriken – vielversprechende Zukunftsanwendungen wie diese sind auf eine Informations- und Kommunikationstechnik angewiesen, die den Leistungsrahmen des aktuellen Mobilfunkstandards der fünften Generation (5G) übersteigt. Der 6G-Mobilfunk verspricht eine Hochgeschwindigkeitsvernetzung für die zukünftig benötigten Datenmengen, da er Datenraten über 1 Tbit/s und Latenzen bis hinab zu 100 µs erreichen kann.

An den für 6G benötigten neuartigen Hochfrequenzbauelementen haben das Fraunhofer IAF und das Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI im Rahmen des von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Projekts »KONFEKT« (»Komponenten für die 6G-Kommunikation«) seit 2019 gearbeitet. Die Forschenden haben Antennenmodule auf Basis des Leistungshalbleiters Galliumnitrid (GaN) entwickelt und in Übertragungsexperimenten erfolgreich demonstriert, mit denen erstmals in dieser Technologie die Frequenzbereiche um 80 GHz (E-Band) und 140 GHz (D-Band) erschlossen werden können.

Bündelung von Kompetenzen ermöglicht innovative Hochfrequenz-Hardware

Aufgrund der hohen Ansprüche an Leistung und Effizienz, die 6G erfordert, kommen insbesondere die Halbleitertechnologien und die Aufbau- wie Antennentechnik auf dem aktuellen Stand der Technik an ihre Grenzen. Für neue Module, die in den Kategorien Ausgangsleistung, Bandbreite und Leistungseffizienz wesentlich bessere Ergebnisse erzielen, haben die Forschenden am Fraunhofer IAF auf GaN-MMICs (monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen) anstelle der bisher gängigen Galliumarsenid- beziehungsweise Silizium-Schaltungen gesetzt. Gezielt realisierten sie damit ein Split-Block-Modul, um eine verlustärmere Architektur zu ermöglichen.

Forschende des Fraunhofer HHI haben neue Technologien zur additiven Fertigung verschiedener Komponenten evaluiert und das SLM-Verfahren (selektives Laserschmelzen) genutzt, um unter anderem Hohlleiter, Leistungsteiler, Antennen- und Antennenanschlüsse deutlich effizienter als bislang herzustellen. Zudem haben sie die finalen Übertragungsexperimente durchgeführt, in denen die hohe Leistungsfähigkeit der gemeinsam entwickelten Komponenten bewiesen wurde.

Durch ihre Kooperation haben Fraunhofer IAF und Fraunhofer HHI Deutschland und Europa auf dem Weg zum Mobilfunk der Zukunft einen wesentlichen Schritt vorangebracht und zugleich einen wichtigen Beitrag zur hiesigen Technologiesouveränität geleistet.

Self-driving cars, telemedicine, automated factories — promising future applications like these in transport, healthcare and industry depend on information and communications technology that exceeds the performance of the current fifth-generation mobile communications standard (5G). 6G mobile communications promises the necessary high-speed networking for data volumes required in the future, with data rates exceeding 1 Tbit/s and latencies down to 100 µs.

Fraunhofer IAF and the Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, HHI have been working on novel high-frequency components needed for 6G mobile communications since 2019 as part of the KONFEKT project (Components for 6G Communications) funded by the Fraunhofer-Gesellschaft. The researchers have developed transmitter modules based on the power semiconductor gallium nitride (GaN) and successfully demonstrated them in transmission experiments. For the first time in this technology, the frequency ranges around 80 GHz (E band) and 140 GHz (D band) can be tapped.

Pooling of competencies enables innovative high-frequency hardware

Due to the high demands on performance and efficiency that 6G requires, current semiconductor technologies and assembly and antenna technology in particular are reaching their limits. The researchers at Fraunhofer IAF used GaN MMICs (monolithic microwave integrated circuits) instead of the previously common gallium arsenide or silicon circuits for new modules that achieve significantly better results in the categories of output power, bandwidth and power efficiency. They purposefully implemented a split-block module to enable a lower-loss architecture.

Researchers at Fraunhofer HHI have evaluated new technologies for additive manufacturing of various components and used the SLM (selective laser melting) process to produce waveguides, power splitters, antennas and antenna connectors, among other things, much more efficiently than before. They also conducted the final transmission experiments, which demonstrated the high performance of the jointly developed components.

Thanks to their partnership, Fraunhofer IAF and Fraunhofer HHI have taken Germany and Europe a significant step forward on the road to the mobile communications of the future, while at the same time making an important contribution to local technological sovereignty.

Extrem rauscharme Datenübertragung in der Satellitenkommunikation

Extremely low-noise data transmission in satellite communications

ESA-Projekt »BEACON«

Um dem weltweit rasant steigenden Datenkonsum und Bandbreitenbedarf gerecht zu werden, soll das W-Band (75–110 GHz) für die Satellitenkommunikation untersucht werden. Gemeinsam mit Forschenden der Firma RPG-Radiometer Physics entwickelt das Fraunhofer IAF nun ein neuartiges W-Band-Empfangsmodul, das rauschärmer ist als alle bisherigen W-Band-Verstärkermodule und damit den Transfer extrem hoher Datenraten durch den Weltraum ermöglicht.

ESA project BEACON

To meet the world's rapidly increasing data consumption and bandwidth needs, the W-band (75–110 GHz) is to be investigated for satellite communications. Together with researchers from the company RPG-Radiometer Physics, Fraunhofer IAF is developing a novel W-band receive module that is lower in noise than all previous W-band amplifier modules and thus enables the transfer of extremely high data rates through space.

Aufgrund der begrenzten Bandbreite wird es zunehmend schwieriger, die steigende Nachfrage nach höheren Datenraten in Satellitensystemen mit sehr hohem Datendurchsatz zu befriedigen. Um dem zunehmenden Bedarf gerecht zu werden, wird die Nutzung höherer Träger-Frequenzen angestrebt. Das W-Band (75–110 GHz) ist für Anwendungen im Bereich der Satellitenkommunikation gut geeignet, jedoch mangelt es bislang an geeigneter Technologie und Hardware.

Gemeinsam mit der RPG-Radiometer Physics GmbH hat sich das Fraunhofer IAF der Herausforderung im Projekt »BEACON – W-band Integrated Active Receive Front-End« der Europäischen Raumfahrtorganisation (ESA) angenommen: Darin entwickeln die beiden Projektpartner ein integriertes aktives W-Band-Empfangsmodul mit einer Betriebsfrequenz von 81 bis 86 GHz, das extrem hohe Datenraten beziehungsweise eine Datenübertragung über eine große Entfernung mit geringem Stromverbrauch ermöglichen soll.

Partner

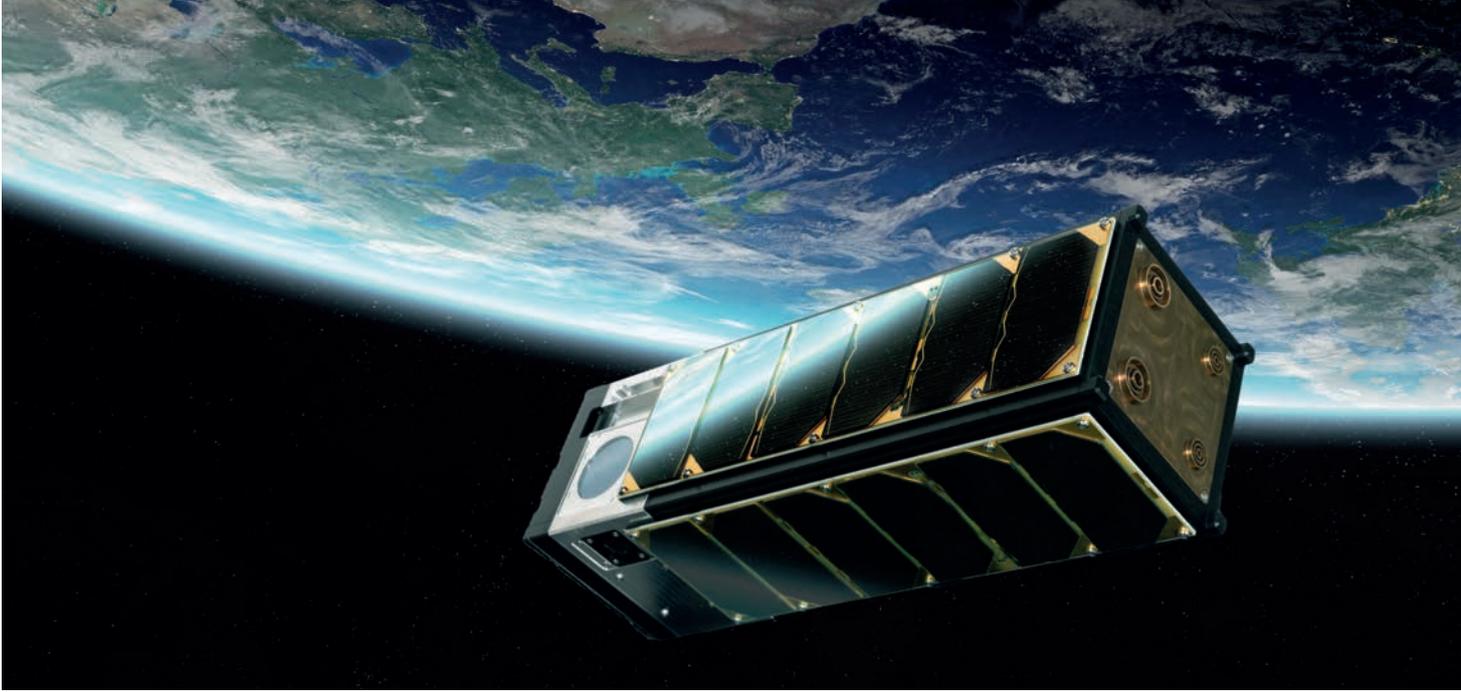
RPG-Radiometer
Physics GmbH

Projektkoordinator

Project coordinator
Dr. Philipp Neining, Dr. Philipp Neining,
Fraunhofer IAF

Due to limited bandwidth, it is becoming increasingly difficult to meet the growing demand for higher data rates in very high throughput satellite systems. To meet the increasing demand, the use of higher carrier frequencies is being targeted. The W band (75–110 GHz) is well suited for satellite communications applications, however, there has been a lack of suitable technology and hardware to date. The Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, together with RPG

Together with Radiometer Physics GmbH, Fraunhofer IAF has taken up this challenge in the project BEACON ("W-band Integrated Active Receive Front-End") which receives funding by the European Space Agency (ESA): The project partners are developing an integrated active W-band receive front-end with an operating frequency of 81 to 86 GHz that will enable extremely high data rates or long-distance data transmission with low power consumption.



Das W-Band-Empfangsmodul soll zukünftig eine rauscharme Datenübertragung in der Satellitenkommunikation ermöglichen – wie beispielsweise in dem Nanosatelliten »W-Cube«
The W-band receive module is intended to enable low-noise data transmission in satellite communications in the future — such as in the W-Cube nanosatellite

Minimales Rauschen bei hohem Datendurchsatz

Das Empfangsmodul basiert auf der extrem rauscharmen MMIC-Technologie (Monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung) des Fraunhofer IAF. In den letzten Jahren haben die Forschenden eine enorme Entwicklungsarbeit im Prozess für metamorphe Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (mHEMT) geleistet und sich eine Kernkompetenz darin erworben, Verstärker mit dem weltweit geringsten Rauschen zu entwickeln. Auf dieser Grundlage wird nun eine Reduzierung der Rauschzahl auf unter 3,5 dB und damit eine erhebliche Verbesserung des Stands der Technik angestrebt.

Das Empfangsmodul ist so konzipiert, dass es die linke und die rechte zirkuläre Polarisation (LHCP und RHCP) trennt und in zwei getrennten Kanälen verstärkt, was einer effektiven Verdoppelung des Datendurchsatzes dient.

Eine große Herausforderung stellt die Integration einer Vielzahl von Komponenten auf der sehr geringen Modulfläche dar: Dazu gehören der Polarisator, die Hohlleiterübergänge zu zwei einzelnen Verstärkern, zwei koaxiale Ausgangsanschlüsse und die zugehörige Gleichstrom-Schaltung. Es ist zu erwarten, dass die Kombination dieser Merkmale – extrem geringes Rauschen, zwei unterschiedliche Polarisierungen und ein innovatives Array – einen erheblichen technologischen Fortschritt im Bereich der W-Band-Komponenten mit sich bringt.

Minimal noise at high data throughput

The receive module is based on Fraunhofer IAF's extremely low-noise MMIC technology (MMIC — monolithic microwave integrated circuit). Over the past years, the researchers have done a tremendous development work in the metamorphic high-electron-mobility transistor (mHEMT) process and have gained a core competence in developing amplifiers with the world's lowest noise. Based on this, the project aims to reduce the noise figure to below 3.5 dB and thus significantly improve the state of the art.

The receive module is designed to isolate left- from right-hand circular polarization (LHCP and RHCP) and amplify them with two separate channels, which serves to effectively double data throughput.

A major challenge is the integration of a large number of components on the very small module area: These include the polarizer, waveguide transitions to two individual amplifiers, two coaxial output connectors and the associated direct current circuitry. The combination of these features — extremely low noise, two different polarizations, and an innovative array — is expected to bring significant technological advancement to W-band components.

Industriell nutzbarer (111)-Diamant für Quantenbauelemente

Industrially usable (111)-diamond for quantum devices

Verbundprojekt »GrodiaQ«

Diamant mit Stickstoff-Vakanz-Zentren gehört zu den aussichtsreichsten Materialien für die Realisierung von Quantentechnologien. Bislang ist die Verfügbarkeit in industriegeeigneter Qualität und Quantität jedoch stark eingeschränkt. Im Projekt »GrodiaQ« entwickelt das Fraunhofer IAF in Kooperation mit fünf deutschen Industrieunternehmen innovative Prozesse und Anlagen, um die industrielle Nutzung von (111)-orientierten Diamant-Substraten und damit eine europäische Lieferkette für Quantenbauelemente zu ermöglichen.

Joint project GrodiaQ

Diamond with nitrogen-vacancy centers is one of the most promising materials for the realization of quantum technologies. So far, however, the availability in industrially suitable quality and quantity is severely limited. In the GrodiaQ project, Fraunhofer IAF is developing innovative processes and equipment in cooperation with five German industrial companies to enable the industrial use of (111)-oriented diamond substrates and thus a European supply chain for quantum devices.

Partner

- Diamond Materials GmbH
- Evatec Europe GmbH
- TRUMPF Hüttinger GmbH & Co. KG
- Q.ANT GmbH
- Quantum Brilliance GmbH

Projektkoordinator

Project coordinator

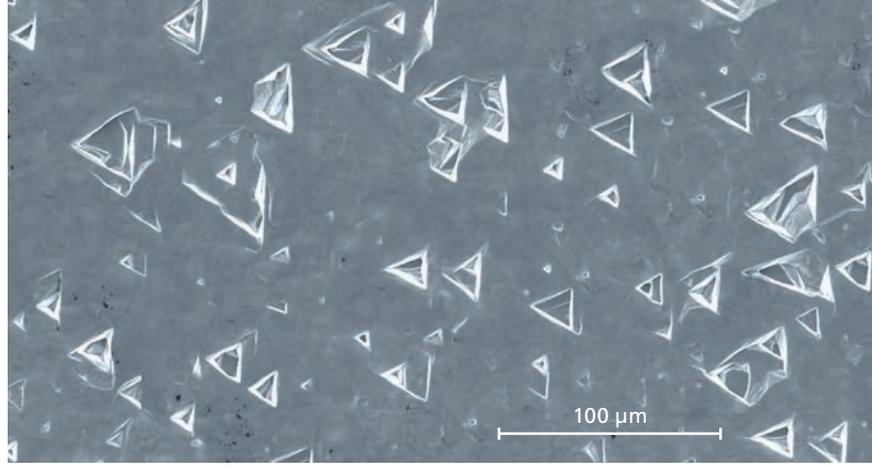
Dr. Peter Knittel,
Fraunhofer IAF



4-Zoll-Iridium-(111)-Epitaxiewafer, der auf einem Aluminiumnitrid/Silizium-Substrat gewachsen wurde

4-inch iridium (111) epitaxial wafer grown on an aluminum nitride/silicon substrate

Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme einer (111)-Diamantoberfläche, die heteroepitaktisch auf einem 2-Zoll-Iridium/Silizium-Wafer unter Verwendung von BEN/CVD-Technologie gewachsen wurde
Scanning electron micrograph of a (111) diamond surface grown heteroepitaxially on a 2-inch iridium/silicon wafer using BEN/CVD technology



Zur Sicherung der Verfügbarkeit hochreiner wie großflächiger Diamant-Wafer für quantentechnologische Anwendungen hat das Projektkonsortium »Großflächige Diamantsubstrate für die Quantentechnologie« (»GrodiaQ«) im Sommer 2022 seine Arbeit aufgenommen. Der Verbund wird vom Fraunhofer IAF koordiniert und besteht außerdem aus fünf Industrieunternehmen mit eigener Expertise in diamantbasierten Quantentechnologien. Ziel ist es, Anlagentechnik und Basismaterialien für Quantenbauelemente zu entwickeln, die wirtschaftlich verwertet werden können. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Vorhaben über drei Jahre.

Ihre Materialeigenschaften ermöglichen es Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant, bei Raumtemperatur stabile Quantenzustände zu bilden. Deshalb zählen NV-Zentren zu den chancenreichsten Ansätzen, um Quantentechnologien in die Anwendung zu bringen, etwa in der Medizintechnik (Quantensensorik) oder Informatik (Quantencomputing). Besonders in Kristallrichtung (111)-orientiert gewachsener Diamant ist ein wichtiges Material für die Herstellung von Quantenbauelementen, da dieses Wachstum sowohl die Erzeugung der NV-Zentren erleichtert als auch deren Kontrollierbarkeit als Qubits verbessert. Problematisch ist aber die Versorgung mit Diamant-Substraten, die die genannten Bedingungen erfüllen.

Europäische Lieferkette für souveräne Materialversorgung

In mehreren Schritten wollen die »GrodiaQ«-Projektpartner industriell nutzbare Diamant-Substrate ermöglichen und den Grundstein einer europäischen Lieferkette für Quantenbauelemente legen. Das Fraunhofer IAF optimiert schwerpunktmäßig das heteroepitaktische Wachstum von (111)-orientiertem Diamant, um funktionale Schichten für quantentechnologische Anwendungen herzustellen. Die Firma Diamond Materials verantwortet die Schleif- und Polierarbeiten bis Rauheiten von unter 2 nm sowie Wachstum und Prozessierung größerer Substratflächen und -mengen.

Evatec Europe konstruiert nach dem Ansatz der spannungsgestützten Diamantnukleation (BEN) einen energieeffizienten Reaktor für die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Diamant, der mit neuen Halbleiter-Mikrowellengeneratoren von TRUMPF Hüttinger industrielle Standards für die Wafer-Beschichtung ab 4 Zoll erreichen soll. Die assoziierten Partner Q.ANT und Quantum Brilliance evaluieren die charakterisierten Substrate im Hinblick auf ihre Anwendungen in Quantensensorik und Quantencomputing und leisten damit den Markttransfer.

To ensure the availability of high-purity as well as large-area diamond wafers for quantum technology applications, the project consortium "Large-area diamond substrates for quantum technology" (GrodiaQ) started its work in summer 2022. The consortium is coordinated by Fraunhofer IAF and consists of five industrial companies with their own expertise in diamond-based quantum technologies. The aim is to develop manufacturing equipment and basic materials for quantum devices that can be commercially exploited. The German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is funding the project for three years.

Specific material properties enable nitrogen-vacancy centers (NV centers) in diamond to form stable quantum states already at room temperature. For this reason, the use of NV centers in diamond substrates is one of the most promising approaches on the way to the application and economic exploitation of quantum technologies, for example in areas such as medical technology (quantum sensing) or computer science (quantum computing). In particular, diamond grown in the (111)-oriented crystal direction is an important material for the fabrication of quantum devices, as this growth both favors the generation of NV centers by facilitating nitrogen incorporation and significantly improves their controllability as qubits. However, the supply of diamond substrate that fulfills the above-mentioned conditions is still problematic.

European supply chain for sovereign material supply

In several steps, the GrodiaQ project partners want to enable industrially usable diamond substrates and thereby lay the foundation for a European supply chain for quantum devices. Fraunhofer IAF focuses on optimizing the heteroepitaxial growth of (111)-oriented diamond in order to produce functional layers for quantum technology applications. Diamond Materials is responsible for grinding and polishing down to roughnesses of less than 2 nm, as well as growth and processing of larger substrate areas and quantities.

Evatec Europe is designing an energy-efficient reactor for chemical vapor deposition (CVD) of diamond, using the approach of bias-enhanced diamond nucleation (BEN), which, in combination with new semiconductor microwave generators from TRUMPF Hüttinger, is intended to achieve industrial standards for wafer coating from sizes of 4 inches. The associated partners Q.ANT and Quantum Brilliance will evaluate the characterized substrates with regard to their applications in quantum sensing and quantum computing, thus providing market transfer.

Bispektrales Kamerasystem für höhere Verkehrssicherheit

Bispectral camera system for increased traffic safety

BMBF-Projekt »BiCam«

Die Früherkennung möglicher Ausfälle und Brände durch die Detektion von überhitzten Bereichen (»Hot Spots«) im Personen- und Gütertransport kann die Sicherheit im Straßen- und Schienenverkehr bedeutend erhöhen. Im Projekt »BiCam« erarbeiten das Fraunhofer IAF und die DIAS Infrared GmbH ein Outdoor-Kamerasystem, das den erweiterten kurzwelligen Infrarot- und nahen Infrarot-Spektralbereich (eSWIR und NIR) verbindet und erstmals fließenden Verkehr kontinuierlich visuell und thermografisch überwachen kann.

BMBF project BiCam

Early detection of possible failures and fires by detecting overheated areas (also known as hot spots) in passenger and freight transport has the potential to significantly increase safety in road and rail traffic. In the BiCam project, Fraunhofer IAF and DIAS Infrared GmbH are developing an outdoor camera system that combines the extended short-infrared and near-infrared (eSWIR and NIR) spectral ranges and, for the first time, enables continuous visual and thermographic monitoring of flowing traffic.

Projektleitung

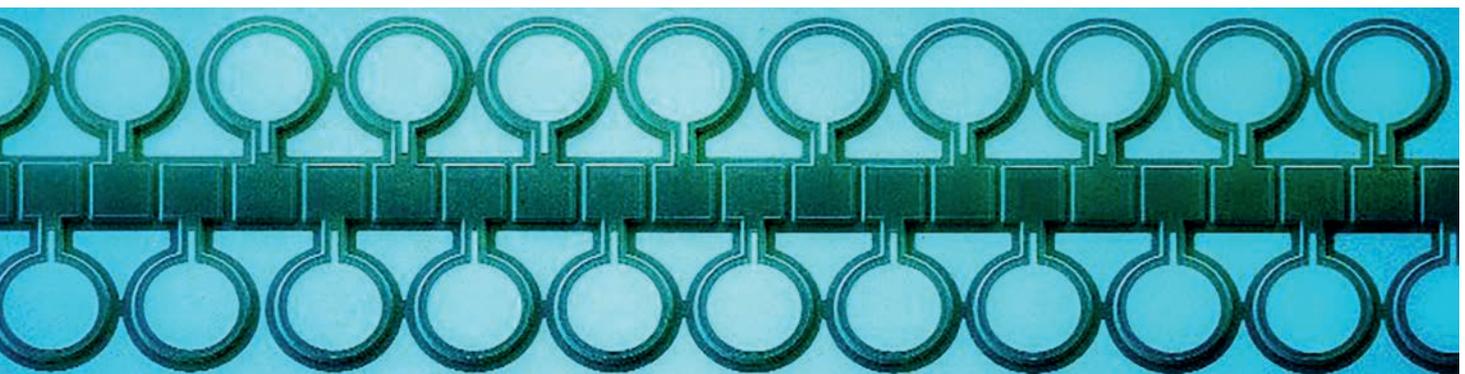
Project leader

Dr. Andreas Wörl,
Fraunhofer IAF

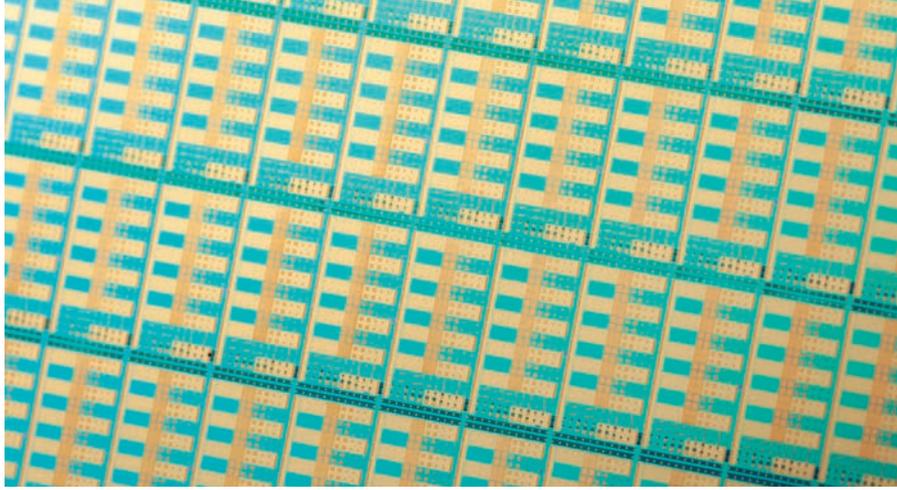
Partner

DIAS Infrared GmbH

Rasterelektronenmikroskopisch aufgenommener Ausschnitt eines exemplarischen Zeilendetektors mit runden Anschlussfeldern
Scanning electron microscope section of an exemplary line detector with round connection fields



*Ausschnitt eines prozessierten
Wafers mit geometrisch variierten
Photodioden zur Prüfung und Bewer-
tung des epitaktisch hergestellten
InGaAsSb-Detektormaterials
Detail of a processed wafer with geome-
trically varied photodiodes for testing and
evaluation of the epitaxially fabricated
InGaAsSb detector material*



Überhitzende Fahrzeugteile und -ladungen («Hot Spots») sind ein Risiko für die Sicherheit im Schienen- und Straßenverkehr. Thermografisches Monitoring ist in der Lage Hot Spots frühzeitig zu erkennen, stellt aber für den Dauereinsatz in der Verkehrsüberwachung hohe Anforderungen an das zugrundeliegende Messsystem. Im Projekt »BiCam – Schnelle Infrarot-Zeilenkamera zur elektronischen Lage- und Temperaturüberwachung« entwickeln das Fraunhofer IAF und die DIAS Infrared GmbH seit Sommer 2022 gemeinsam ein bispektrales Kamerasystem für den Außenbereich. Dieses soll als Komplettlösung erstmals eine berührungs- und lückenlose thermografische und visuelle Überwachung von bewegten Objekten mit hoher Geschwindigkeit erlauben.

Forschende des Fraunhofer IAF entwickeln für das System einen neuartigen Detektorzeilenchip für die Temperaturmessung im erweiterten kurzwelligen Infrarot (eSWIR) auf Basis des quaternären Materialsystems Indiumgalliumarsenantimonid (InGaAsSb). Das mittelständische Unternehmen DIAS Infrared, das sich auf Systeme zur berührungslosen Temperaturmessung spezialisiert hat, kombiniert den Chip mit einem Sensor im nahen Infrarot (NIR) für die detaillierte visuelle Abbildung und überführt ihn in ein Gesamtsystem. Die Verbindung der Signale aus beiden Spektralbereichen ermöglicht eine exakte Ortsbestimmung der Hot Spots im laufenden Verkehr. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt »BiCam« im Rahmen der Fördermaßnahme »KMU-innovativ«.

Widerstandsfähige Lösung für lückenloses Monitoring

Thermografische Kamerasysteme auf dem derzeitigen Stand der Technik weisen jeweils spezifische Schwächen auf, die von der Beschränkung auf einzelne Anwendungsgruppen über die ausschließliche Detektion langsamer Objekte bis hin zu hohem Energiebedarf und Wartungsaufwand sowie mangelnder Sensitivität reichen. Das Kamerasystem, für das Fraunhofer IAF und DIAS Infrared ihre Kompetenzen bündeln, soll hingegen bei hoher räumlicher und Temporaufklärung wetter- und tageszeitunabhängig jedes Fahrzeug mit Geschwindigkeiten bis circa 350 km/h und Temperaturen zwischen 75 °C und 400 °C erfassen. Neben der Verkehrsüberwachung liegt ein weiteres Anwendungsgebiet in der industriellen Qualitäts- und Prozesskontrolle, etwa in den Bereichen Metallurgie und Automotive, da aufgrund des geringen Emissionsgrades von Metallen thermografisches Monitoring im kurzwelligen Infrarot deutlich weniger Messfehler als Systeme im langwelligen Infrarot erzeugt.

Overheating vehicle parts and cargo (hot spots) are a risk to rail and road safety. Thermographic monitoring is able to detect hot spots at an early stage, but places high demands on the underlying measurement system for continuous use in traffic monitoring. In the project BiCam (Fast infrared line scan camera for electronic position and temperature monitoring), Fraunhofer IAF and DIAS Infrared GmbH have been jointly developing a bispectral camera system for outdoor use since summer 2022. As a complete solution, this will for the first time allow contact-free and seamless thermographic and visual monitoring of moving objects at high speed.

Researchers at Fraunhofer IAF are developing a novel detector line chip for temperature measurement in the extended Short-Wavelength Infrared (eSWIR) based on the quaternary material system indium gallium arsenic antimonide (InGaAsSb). The medium-sized company DIAS Infrared, which specializes in systems for non-contact temperature measurement, combines the chip with a sensor in the Near Infrared (NIR) for detailed visual imaging and integrates it into a complete system. Combining the signals from both spectral ranges enables the exact location of hot spots in ongoing traffic. The German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is supporting BiCam as part of the "KMU-innovativ" funding program.

Resilient solution for seamless monitoring

Thermographic camera systems at the current state of the art each have specific weaknesses, ranging from being limited to individual application groups, to the exclusive detection of low-speed objects, to high energy requirements and maintenance efforts, to a lack of sensitivity. The camera system, for which Fraunhofer IAF and DIAS Infrared are pooling their expertise, is designed to record every vehicle at speeds of up to 350 km/h and temperatures of between 75 °C and 400 °C with high spatial and temperature resolution, irrespective of the weather or time of day. In addition to traffic monitoring, another area of application is in industrial quality and process control, for example in the metallurgy and automotive sectors. Due to the low emissivity of metals, thermographic monitoring in the short-wave infrared generates significantly fewer measurement errors than systems in the long-wave infrared.

Zehn Jahre GaN im Weltall mit der ESA

Ten years of GaN in space with ESA

2013 flog erstmals ein europäisches Mikrowellenbauteil auf Galliumnitrid-Basis ins All: Der am Fraunhofer IAF entwickelte Verstärker bewies, dass sich das Halbleitermaterial für den Einsatz im Weltraum eignet. Seitdem hat das Fraunhofer IAF immer wieder Leistungs- oder Hochfrequenzverstärker für den Einsatz in Satelliten für die Europäische Weltraumorganisation (ESA) realisiert.



In 2013, the first European microwave component based on gallium nitride flew into space: The amplifier developed at Fraunhofer IAF proved that the semiconductor material is suitable for use in space. Since then, Fraunhofer IAF has repeatedly realized power or high-frequency amplifiers for use in satellites for the European Space Agency (ESA).

*Weltkarte erstellt aus den Daten von Proba-V
World map created with Proba-V data*



Der Mini-Satellit Proba-V
Mini-satellite Proba-V



Am 7. Mai 2013 schickte die ESA den Satelliten Proba-V ins Weltall. Die Mission bestand aus der Vermessung und Beobachtung der Vegetation auf der Erde. Dafür erfasste der Mini-Satellit alle zwei Tage Bilder vom gesamten Planeten. Die Aufnahmen in unterschiedlichen Wellenlängen zeigen die Veränderungen der Landschaften im Laufe der Jahreszeiten und Jahre, die Auswirkungen von Abholzung und Dürre sowie Stürme und Waldbrände.

Für das Kommunikationssystem von Proba-V hat das Fraunhofer IAF eine Verstärkerschaltung für den Frequenzbereich von 8 bis 8,5 GHz (X-Band) entwickelt. Galliumnitrid-Bauteile sind robust, kompakt und können bei höheren Spannungen und Temperaturen als die bisher benutzten Bauteile betrieben werden. Aufgrund der langen Lebensdauer und Strahlungshärte sind sie ideal für die extremen Bedingungen der Luft- und Raumfahrt geeignet. Das hat die Verstärkerschaltung in Proba-V bis zuletzt bewiesen – als der Mini-Satellit 2021 seine Mission beendete, funktionierte die X-Band-Verstärkerschaltung noch einwandfrei.

Es folgten weitere Projekte mit der ESA, in denen das Fraunhofer IAF Leistungs- oder Hochfrequenzverstärker auch auf Basis anderer Halbleiter für den Einsatz im Weltall entwickelte. Für das Projekt »MetOp Second Generation«, in dem moderne Wettersatelliten das Klima mithilfe von Millimeterwellen erforschen sollen, realisierten die Forschenden rauscharme monolithische Mikrowellenverstärker im Frequenzbereich von 54 bis 243 GHz. Für den Nanosatelliten »W-Cube« entwickelte das Fraunhofer IAF das Sendermodul des Satelliten sowie das Empfängermodul der korrespondierenden Bodenstation. Seit 2021 sendet »W-Cube« erfolgreich Testsignale im Q- und W-Band-Frequenzbereich zur Erde.

Derzeit arbeitet ein Projektteam an einem W-Band-Empfangsmodul für die Satellitenkommunikation, das rauschärmer sein soll als alle bisherigen W-Band-Verstärkermodule und damit den Transfer extrem hoher Datenraten durch den Weltraum ermöglichen soll (mehr auf Seite 82–83).

On May 7, 2013, ESA launched the Proba-V satellite into space. The mission was to measure and observe the vegetation on Earth. For this purpose, the mini-satellite captured images of the entire planet every two days. The images, taken at different wavelengths, show the changes in landscapes over the seasons and years, the effects of deforestation and drought, as well as storms and wildfires.

For the Proba-V communication system, Fraunhofer IAF has developed an amplifier circuit for the frequency range from 8 to 8.5 GHz (X band). Gallium nitride components are robust, compact and can operate at higher voltages and temperatures than previously used devices. Their long life and radiation hardness make them ideal for the extreme conditions of aerospace. The amplifier circuit in Proba-V proved this to the last — when the mini-satellite ended its mission in 2021, the X-band amplifier circuit still worked perfectly.

Further projects with ESA followed, in which Fraunhofer IAF developed power or high-frequency amplifiers also based on other semiconductors for use in space. For the MetOp Second Generation project, in which modern weather satellites are to explore the climate using millimeter waves, the researchers realized low-noise monolithic microwave amplifiers in the frequency range from 54 to 243 GHz.

For the nanosatellite W-Cube, Fraunhofer IAF developed the transmitter module of the satellite as well as the receive module of the corresponding ground station. Since 2021, W-Cube has been successfully transmitting test signals to Earth in the Q- and W-band frequency range.

A project team is currently working on a W-band receive module for satellite communications that will be lower in noise than all previous W-band amplifier modules and thus enables the transfer of extremely high data rates through space (see pages 82–83).

»GaN kann im Weltraum völlig neue Möglichkeiten bieten.«

“GaN can offer game changing capabilities in space.”

Andrew Barnes ist leitender Technikingenieur bei der ESA und betreute die Initiative »GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative« (»GREAT2«), die gemeinsam mit der Forschung und der Industrie eine weltraumtaugliche Lieferkette für GaN-Technologien entwickelte und 2013 das erste europäische GaN-basierte Bauteil im Mini-Satelliten Proba-V ins All schickte. Im Interview erzählt er, wie es dazu kam.

Andrew Barnes is a senior technology engineer at ESA and was in charge of the GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative (GREAT2), which collaborated with academia and industry to develop a space-qualified supply chain for GaN technologies and sent the first European GaN-based component into space in the Proba-V mini-satellite in 2013. In this interview, he tells how this came about.

Wann kam die Idee auf, Galliumnitrid für Weltraumanwendungen zu nutzen?

Barnes — Bereits in den frühen 1980er Jahren arbeitete die ESA mit der europäischen Industrie und der Wissenschaft zusammen, um Grundlagenforschung zu Galliumnitrid zu betreiben und dessen Leistungsfähigkeit für Weltraumanwendungen zu prüfen. Denn als Halbleiter mit breiter Bandlücke besitzt GaN eine hohe Robustheit gegenüber der Strahlungsumgebung im Weltraum und ermöglicht die Entwicklung von kompakten Bauteilen. Das ist beispielsweise für Erdbeobachtungs- oder Telekommunikationsmissionen sehr wichtig, um eine maximale Nutzlastfunktionalität zu ermöglichen.

How and when did the idea arise that gallium nitride might be suitable for use in space?

Barnes — In the early 1980's ESA was already working with European industry and academia to perform fundamental research on gallium nitride to develop its capability for space application. As a wide bandgap semiconductor, GaN offers inherent robustness to the space radiation environment and can allow miniaturized components. This is very important for example in earth observation or telecommunications missions in order to allow maximum payload functionality.

Eigentlich war es nicht geplant, ein Bauelement des Fraunhofer IAF mitzunehmen. Wie kam es trotzdem dazu?

Barnes — Ein wichtiges Ziel der »GREAT2«-Initiative war es, herauszufinden, ob GaN-Bauteile im Weltraum überhaupt zuverlässig betrieben werden können. Dafür mussten umfangreiche Robustheitstests unter Weltraumbedingungen durchgeführt werden. Eines der Testgeräte war ein X-Band-MMIC (monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung), das mit dem GaN25-Verfahren des Fraunhofer IAF hergestellt wurde und eine große Menge an zuverlässigen Daten geliefert hat. Dieser umfangreiche Datensatz gab uns das Vertrauen, den MMIC-Chip als Teil des Kommunikationssystems von Proba-V zu nutzen.

Initially, it was not planned to integrate a component from Fraunhofer IAF. How did it end up in space?

Barnes — A key aim was to understand if there were any issues preventing radio-frequency GaN devices operating reliably in space. This required extensive space environmental robustness tests to be performed. One of the test systems was an X-band MMIC (monolithic microwave integrate circuit) fabricated using the Fraunhofer IAF GaN25 process. It generated a large amount of reliability data from performing tests on ground. This extensive dataset of reliability information gave confidence to consider using the MMIC chip as part of the data telemetry transmitter on Proba-V.



Andrew Barnes
Senior technology
engineer at ESA

Welche Schwierigkeiten gab es zu bewältigen, bis Proba-V mit GaN an Bord starten konnte?

Barnes — Eine Schwierigkeit bestand darin, das Projektteam davon zu überzeugen, dass der erstmalige Einsatz der GaN-Technologie nicht die gesamte Mission gefährden würde, sollte diese ausfallen. Der GaN-Sender wurde schließlich als zusätzlicher dritter Sender integriert, der im Falle eines Senderausfalls als Backup diente. Als der Proba-V-Satellit 2013 in die Umlaufbahn gebracht wurde, war es das erste Mal, dass die ESA eine europäische GaN-Technologie in einer funktionsfähigen Mission eingesetzt hat, und es war möglicherweise sogar die weltweit erste Demonstration eines X-Band-MMIC im Weltraum.

Hat die Proba-V-Mission zu neuen Erkenntnissen über GaN geführt?

Barnes — Es stellte sich heraus, dass der GaN-Sender die GaAs-Technologie, die für den Basissender verwendet wurde, übertraf: Er war kompakter, bot einen besseren Wirkungsgrad und die Möglichkeit, die Ausgangsleistung während eines Bodenstationsdurchgangs leicht anzupassen, um das Link-Budget zu optimieren und die Satellitenressourcen zu maximieren. Der GaN-Sender und die X-Band-Schaltung funktionieren seit dem Start problemlos und mit gleicher Betriebsleistung. Dies war ein großer Erfolg und hat gezeigt, dass GaN-basierte Technologie im Weltraum mit hoher Zuverlässigkeit und ausgezeichnete Leistung betrieben werden kann.

Warum sind Sie persönlich davon überzeugt, dass GaN ins All gehört?

Barnes — GaN bietet völlig neue Möglichkeiten für den Einsatz im Weltraum. Die Technologie ist hier, um zu bleiben.

What difficulties had to be overcome before Proba-V could take off with GaN on board?

Barnes — One of the first problems to overcome was convincing the project team that the introduction of GaN technology for the first time would not risk the whole mission due to a potential failure. The GaN transmitter was eventually integrated as an additional third transmitter that served as a backup in case of transmitter failure. When the Proba-V satellite was launched into orbit in 2013, it was the first time ESA had launched European sourced GaN technology on a fully operational mission, and probably the world's first demonstration of an X-band MMIC in space.

Did the Proba-V mission lead to any new insights about GaN?

Barnes — The GaN-based transmitter proved to outperform the GaAs technology used for the mission baseline transmitter: it offered a smaller size, better efficiency and the ability to easily adjust the output power during a ground station pass to optimize link budget and maximize satellite resources. The GaN transmitter and the X-band MMIC unit have been running seamlessly with no change in operating performance since launch. This has been a major achievement and has shown that GaN technology can be operated in space with high reliability and with excellent performance.

Why are you personally convinced that GaN belongs in space?

Barnes — GaN can offer game changing capabilities in space. The technology is here to stay.

Wissenswertes



Things to know

94	Das Institut in Zahlen <i>The institute in figures</i>
97	Organisationsstruktur <i>Organizational structure</i>
98	Kuratorium <i>Advisory Board</i>
99	Auszeichnungen <i>Awards</i>
100	Patente <i>Patents</i>
101	Ausbildung und Lehre <i>Education and teaching</i>
102	Abschlussarbeiten <i>Theses</i>
106	Highlights 2022
108	Berufliche Chancen <i>Career opportunities</i>
112	Impressum und Bildnachweise <i>Publication details and picture credits</i>

Das Institut in Zahlen*

The institute in figures*

Das Fraunhofer IAF rechnet im Jahr 2022 mit einem Betriebshaushalt, der wie im Vorjahr bei rund 32 Mio. € liegen wird. Gelungene Kompensationsmaßnahmen und die Vertragssituation im energetischen Bereich konnten die befürchtete Sachkostensteigerung verhindern. Aufgrund der guten Ertragslage war geplant, mehr Personal einzustellen als 2022 gelungen ist – hier hat sich der aktuelle Fachkräftemangel bemerkbar gemacht. Somit befinden sich sowohl die Personalkosten i. H. v. 19 Mio. € als auch die Sachkosten i. H. v. rund 13 Mio. € auf dem Niveau des Vorjahres. Das Investitionsvolumen liegt mit rund 4 Mio. € deutlich unter Plan, was neben verlängerten Lieferzeiten bzw. -engpässen in Folge von Pandemie und Krieg auch der Umstellung auf SAP und den damit einhergehenden Prozessverzögerungen im Bestellwesen geschuldet ist.

Für 2023 wird mit einem starken Anstieg des Personalkörpers zzgl. der Tarifsteigerungen geplant – dies erfolgt wegen erwarteter Ertragssteigerungen und dem Ziel, Personal für die noch unbesetzten Stellen aus 2022 zu gewinnen. Die Sachkostensteigerung für 2023 resultiert im Wesentlichen aus der Annahme steigender Energiekosten, da die günstigen Energieverträge Ende 2022 ausgelaufen sind. Für laufende Investitionen sind 9,25 Mio. € eingeplant. Neben Projektinvestitionen sollen insbesondere auch Investitionen im Energiebereich getätigt werden, um den Energiebedarf des Instituts langfristig zu senken.

Ein sehr großer Teil des Gesamthaushalts wurde 2022 weiterhin vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) mit einem Anteil von 49,6 % finanziert, wobei aufgrund der Vielzahl von Projekten im Bereich Quantentechnologien der zivile Anteil im Vergleich zu den Jahren 2019 und früher hoch bleibt. Positiv zu bewerten ist der Anstieg der Industrieerträge auf rund 7,1 Mio. €. Damit übersteigt der Industrieertrag im Jahr 2022 erneut das Niveau des Vorjahres, was als großer Erfolg zu werten ist.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten liegt 2022 bei 219. In absoluten Zahlen arbeiteten zum Jahresende 283 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon sind ca. 34 % weiblich. Von diesen sind 109 Mitarbeitende in den wissenschaftlichen Bereichen aktiv. 101 Beschäftigte sind in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Weitere 73 Personen arbeiten in Fachabteilungen. Zudem unterstützen 17 wissenschaftliche Hilfskräfte und Auszubildende die Arbeiten am Fraunhofer IAF.

In 2022, Fraunhofer IAF expects its operating budget to remain around € 32 million, as in the previous year. Successful compensation measures and the contract situation in the energy sector prevented the feared increase in material costs. Due to the good profit situation, it was planned to hire more personnel than was actually achieved in 2022—the current skill shortage has clearly made itself felt here. Consequently, both personnel costs of € 19 million and material costs of around € 13 million are at the level of the previous year. The investment volume of around € 4 million is significantly lower than expected, which is due to pro-longed delivery times and supply shortages as result of the pandemic and the war as well as process delays of the ordering system as a result of the cutover to SAP.

For 2023, a high increase in the number of employees plus pay rises is planned—this is due to the expected increase in profit and the aim to hire personnel for the open positions from 2022. The increase in material costs for 2023 is mainly due to the assumption of rising energy costs, since the economical energy contracts ended in 2022. For current investments € 9,25 million are planned. Aside of project investments, especially investments in the energy sector are to be made in order to reduce the long-term energy demand of the institute.

A very large part of the overall budget continued to be financed by the Federal Ministry of Defence (MoD) in 2022, with a share of around 49,6 %. Due to the large number of projects in the area of quantum technologies, the civilian share remains high compared to 2019 and earlier. The increase in industrial revenue to around € 7.1 million is a positive development. This means that the industrial revenue in 2022 again exceeds the level of previous years, which can be considered a great success.

The number of full-time equivalent employees in 2022 is 219. In absolute numbers, 283 employees work at Fraunhofer IAF, of which approximately 34 % are female. Of these, 109 employees, including 29 PhD students, work in the scientific departments. 101 employees work in the infrastructure, including the management area. Further 73 person work as non-scientific employees in R&D departments. As of December, 17 scientific assistants and trainees support the work at Fraunhofer IAF.

* Es handelt sich um vorläufige Zahlen. | The figures are preliminary.

283

35.6 million €

Mitarbeitende Employees

Davon | Of which

109

Wissenschaftliche Mitarbeitende
in Fachabteilungen
Scientists in R&D departments

Inklusive | Including
Promovierende sowie

Masterstudierende in Fachabteilungen
Master and PhD students in R&D departments

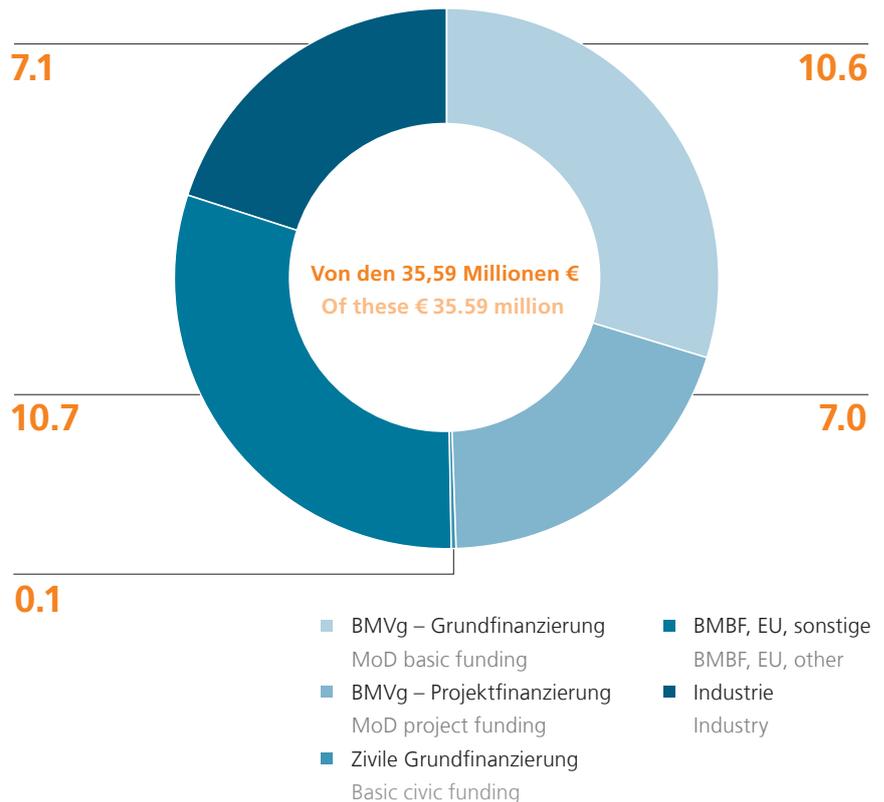
73

Mitarbeitende
in Fachabteilungen
Staff in R&D departments

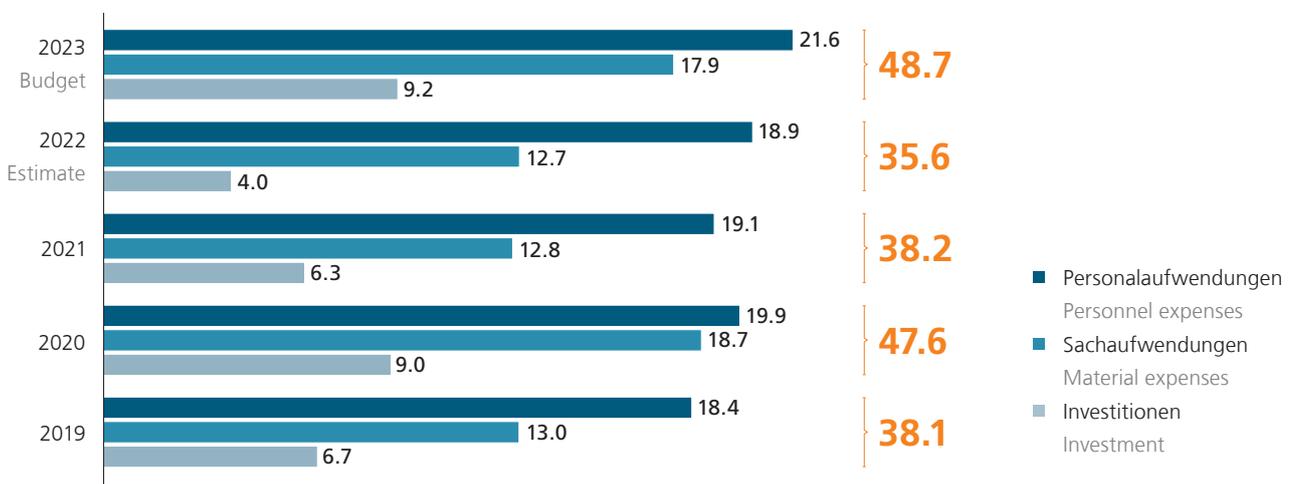
101

Mitarbeitende in Infrastruktur und Leitung
(davon sechs Hilfskräfte)
Staff in infrastructure and management
(including six assistants)

Gesamthaushalt (Stand 12/2022) Total budget (as of 12/2022)



Gesamthaushaltsausgaben in Mio. € Total budget outlay in million €



Organisationsstruktur

Organizational structure

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer IAF gliedert sich neben der Stabsstelle in drei Geschäftsbereiche. In den »Geschäftsfeldern« bildet das Institut marktrelevante Forschungsbereiche ab. Die Forschenden des Instituts gruppieren sich in den »Abteilungen« und der Bereich »Forschungsinfrastruktur« umfasst die für den Betrieb des Instituts notwendigen Strukturen.

The organizational structure of the Institute is divided into three business units in addition to a marketing unit. In its Business Units, the institute represents market-relevant research areas. The researchers of the institute are grouped in Departments and the division Research Infrastructure includes the structures necessary for the operation of the institute.

Institutsleitung Director

Prof. Dr. Rüdiger Quay
kommissarisch
acting
☎ -411

Lukas Kübler
Stabsstelle Marketing
und Kommunikation
Marketing and
communications
☎ -261

Bereichsleitungen Division Directors

Prof. Dr. Rüdiger Quay
Geschäftsfelder
Business Units
☎ -411

Dr. Jutta Kühn
Abteilungen
Departments
☎ -842

Dr. Martin Walther
Forschungsinfrastruktur
Research Infrastructure
☎ -434

Geschäftsfelder Business Units

Dr. Sébastien Chartier
Hochfrequenzelektronik
High-Frequency Electronics
☎ -446

Dr. Michael Mikulla
Leistungselektronik
Power Electronics
☎ -267

Dr. Robert Rehm
Optoelektronik
Optoelectronics
☎ -353

N.N.
Quantenbauelemente
Quantum Components

Dr. Florentin Reiter
Quantensysteme
Quantum Systems
☎ -391

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



Von links nach rechts
(from left to right)
Prof. Dr. Rüdiger Quay,
Dr. Jutta Kühn,
Dr. Martin Walther

Kuratorium

Advisory Board

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

Barbara Becker, MdL

Bayerischer Landtag, CSU Fraktion, München

Dr. Klaus Beilenhoff

United Monolithic Semiconductor GmbH, Ulm

Prof. Dr. Jérôme Faist

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Johannes Koeth

nanoplus GmbH, Gerbrunn

Dr. Jens Kosch

X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt

Dr. Tomas Krämer

Institutsbetreuer / Institute Liaison
Fraunhofer-Gesellschaft, München

Dr. Nicolai Künzner

Diehl Defence GmbH & Co. KG, Überlingen

MinR Dipl.-Phys. Claus Mayer

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und
Tourismus Baden-Württemberg, Stuttgart

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

Dr. Ulf Meiners

Vorsitzender / Chairman NICHIA Chemical Europe GmbH,
Kronberg i. T.

Dr. Thomas Metzger

Qualcomm Germany RFFE GmbH, München

Dr. Heike Riel

IBM Research, Zürich

Dr. Thomas Roedle

Infineon Technologies AG, Regensburg

Dr. Dietmar Schill

Sony Europe B. V., Stuttgart

Dr. Dirk Tielbürger

Bundesministerium der Verteidigung, Bonn

Andreas Wälti

Evatec AG, Trübbach, Schweiz

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



Auszeichnungen 2022

Awards 2022

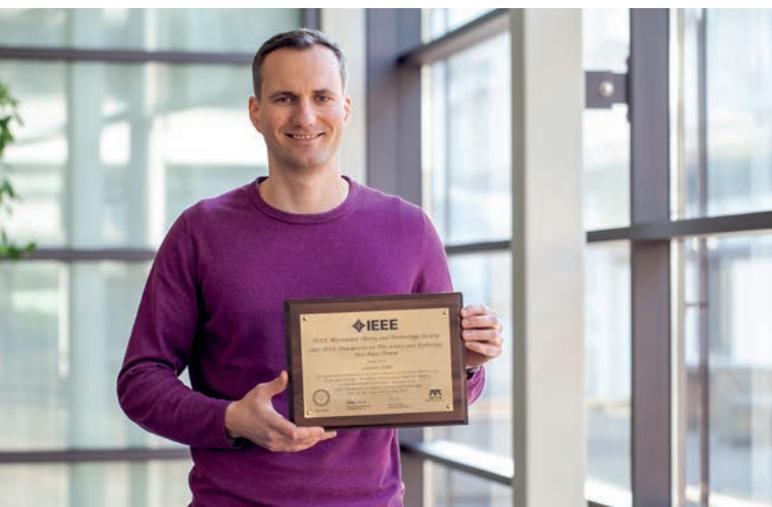
Michael Basler – SEMIKRON Young Engineer Award 2022



Für seine Forschung im Bereich der monolithischen Integration von GaN-Leistungsschaltungen hat Michael Basler den »SEMIKRON Young Engineer Award 2022« gewonnen. Ihm gelang es im Zuge seiner Dissertation, die GaN-auf-Si-Technologie durch die Kombination mehrerer Komponenten auf einem einzelnen Chip wesentlich zu verbessern und so ihre breitere Nutzung zu fördern.

Der SEMIKRON Young Engineer Award wird jährlich für herausragende Innovationen oder neuartige Konzepte in der Leistungselektronik von der SEMIKRON Foundation und dem ECPE-Netzwerk (European Center for Power Electronics) vergeben. Bedingung für die Preisvergabe ist ein gesellschaftlicher Nutzen, beispielsweise die Förderung des Umweltschutzes durch ressourcensparende Innovationen.

Laurenz John – T-TST Best Paper Award 2022



Für ihr Paper »Broadband 300-GHz Power Amplifier MMICs in InGaAs mHEMT Technology« hat ein Autorenteam um Dr. Laurenz John den »T-TST Best Paper Award 2022« der IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S) erhalten. Das Paper beschreibt die Entwicklung breitbandiger Leistungsverstärker-MMICs, die mit mehr als 20 mW Ausgangsleistung neue Rekordwerte in dem Frequenzbereich um 300 GHz erzielen. Die Verstärker wurden von Laurenz John in dem EU-Projekt »ThoR« entwickelt und bilden als leistungsstarke Sendeverstärker eine Schlüsselkomponente für die THz-Kommunikationssysteme, die am Fraunhofer IAF erforscht werden.

Mit dem »T-TST Best Paper Award« wird jährlich das bedeutendste Paper ausgezeichnet, das in der wissenschaftlichen Zeitschrift »IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology« veröffentlicht wurde. Die Verleihung erfolgte im Juni 2022 auf dem International Microwave Symposium in Denver, Colorado.

Michael Basler has won the SEMIKRON Young Engineer Award 2022 for his research in the field of monolithic integration of GaN power circuits. In the course of his dissertation, he succeeded in significantly improving GaN-on-Si technology by combining several components on a single chip, thus advancing its wider use.

The SEMIKRON Young Engineer Award is presented annually for outstanding innovations or novel concepts in power electronics by the SEMIKRON Foundation and the ECPE network (European Center for Power Electronics). A condition for the award is a benefit to society, for example the promotion of environmental protection through resource-saving innovations.

A team of authors led by Dr. Laurenz John has received the 2022 T-TST Best Paper Award from the IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S) for their paper "Broadband 300-GHz Power Amplifier MMICs in InGaAs mHEMT Technology." The paper describes the development of broadband power amplifier MMICs that achieve new records in the frequency range around 300 GHz with more than 20 mW of output power. The amplifiers were developed by Laurenz John in the EU project ThoR and, as high-performance transmit amplifiers, form a key component for the THz communication systems being researched at Fraunhofer IAF.

The T-TST Best Paper Award is given annually to the most significant paper published in the scientific journal "IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology." The award was presented in June 2022 at the International Microwave Symposium in Denver, Colorado.

Patente

Patents

Patenterteilungen

Patents granted

T. Gerrer, D. Meder, R. Reiner, P. Waltereit, B. Weiß
Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterbauelementes, Halbleiterbauelement und Träger
10 2018 200 020 B4, 20.01.2022; Deutschland

V. Cimalla, T. Gerrer, M. Preschle, T. Yoshikawa
Verfahren zum Transfer zumindest einer Dünnschicht
10 2017 202 793 B4, 29.09.2022; Deutschland

K.-F. Becker, A. Ens, A. Hülsmann, H. Walcher, C. Zech, H. von Rosenberg
Radarantenne
0 2013 222 963 B4, 21.07.2022; Deutschland

R. Aidam, V. Cimalla, L. Kirste
Halbleiterbauelement mit einer orientierten Schicht und Verfahren zu seiner Herstellung
11 2013 001 279 B4, 03.02.2022; Deutschland

Patentanmeldungen

Patent applications

F. Hahl, J. Jeske, T. Luo
Substrate and Method for its Manufacturing
17/929,507, 02.09.2022; Deutschland

J. Jeske, R. Ostendorf, T. Luo, S. Brose, K. Bergmann, S. Danylyuk
Verfahren und Anordnung zur lokalisierten Defekterzeugung für die Quantentechnologie
PCT/EP2022/068374, 04.07.2022; Deutschland

Ausbildung und Lehre

Education and teaching

Mitarbeitende des Fraunhofer IAF waren 2022 in der Lehre tätig.
Scientists of Fraunhofer IAF were active in teaching in 2022.

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

»Compound semiconductor devices«, »System Design Projekt«,
»Masterproject SSE Colloquium – Online«, »Mechanik«,
»Nanobiotechnologie – ONLINE«, »Elektrodynamik und Optik – Online«,
»Energy Efficient Power Electronics«

Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 22

»RF- and Microwave Circuits and Systems«,
»RF and Microwave System Design Course – Praktikum«,
»RF and Microwave Devices and Circuits – Online – Vorlesung«,
»Studienseminar Sustainable Systems Engineering«,
»Energy and Digitalisierung«, »Energy Efficient Power Electronics«,
»Schaltungstechnik / Circuit Technology«

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 16

»Quantencomputer / Quantum Computing – Vorlesung«,
»Quantencomputer / Quantum Computing – Übung«

PD Dr. Thomas Wellens

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 4

»Optoelektronische Quantenbauelemente«

Dr. Martin Walther

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2

Universität Stuttgart

»SiGe BiCMOS Monolithic Microwave Integrated Circuit Design – Lecture«

Dr. Sébastien Chartier

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 4

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Leistungselektronik«

Michael Basler

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2

universität freiburg



Universität Stuttgart



Abschlussarbeiten

Theses

Dissertationen

Doctoral Theses

Julia Langer

Quantum-Grade Diamond for Cavity-based Solutions, Universität Freiburg

David Schneider

Hybride Apertursynthese zur effizienten 3D-Bildgebung mit breitbandigem Mehrkanalaradar, Karlsruher Institut für Technologie KIT

Maciej Cwiklinski

Design of Millimeter-Wave Power Amplifiers in Gallium Nitride High-Electron-Mobility Transistor Technology, Universität Freiburg

Felix Heinz

Small-Signal and Noise Modeling of High-Electron-Mobility Transistors for Use in Quantum Technologies, Universität Freiburg

Markus Weiß

Realization of Radio Frequency Digital-to-Analog Converters in Gallium Nitride Technology for 5G Mobile Communication, Universität Freiburg

Niclas Manuel Feil

Aluminium-Scandium-Nitrid für breitbandige Oberflächenwellenfilter, Universität Freiburg

Bersant Gashi

Submillimeter-Wave Monolithic Integrated Circuits With Metastructure-Based On-Chip Antennas, Universität Freiburg

Arne Götze

CVD-Wachstum von Diamantspitzen mit Stickstoff-Vakanz-Zentren für die Raster-Sonden-Magnetometrie, Universität Freiburg

Felix Hahl

Cavity-enhanced magnetic-field sensing via stimulated emission from nitrogen-vacancy centres in diamond, Universität Freiburg

Masterarbeiten

Master Theses

Niklas Thiedecke

System concept for evaluation of planar sparse microphone array geometries regarding sound source localization performance, Universität Freiburg

Anand Jayaraman

Conceptual Study of Automotive Radar Feedback Receiver for Transmitter Subsystem, Universität Freiburg

Nishant Sutar

Considerations and design of a programmable DC-Electronic Load with a rated power of 250 W / 1000 W, Universität Freiburg

Dhruvin Dhaval Pandya

Verification and IC Design of Millimetre-Wave GaN Mixers for High-Linearity, Universität Freiburg

Ahmed Meligy

Integration of MMC Based BESS for STATCOM Applications, Universität Freiburg

Clément Kammler

Online Electrochemical Impedance Spectroscopy for batteries using a high frequency GaN DC/DC converter, Universität Freiburg

Bachelorarbeiten

Bachelor Theses

Neil Koesling

Magnetometrie mit NV Zentren über stimulierte Emission mittels optischer Laserkavität, Freie Universität Berlin

Höhepunkte 2022

Highlights 2022

Besuch der Landtagsabgeordneten Nadyne Saint-Cast

Visit of the Member of the State Parliament Nadyne Saint-Cast



15. März 2022

Die Freiburger Landtagsabgeordnete Nadyne Saint-Cast besuchte das Fraunhofer IAF und tauschte sich mit den Forschenden zu den Themen energieeffiziente Elektronik und Diamant-basierte Quantentechnologien aus. Auf der Agenda stand zudem die Frage, wie die Landespolitik die Forschung dabei unterstützen kann, dass Entwicklungen schneller ihren Weg in die Anwendung finden.

March 15, 2022

Nadyne Saint-Cast, Member of the State Parliament from Freiburg, visited Fraunhofer IAF and exchanged views with researchers on the topics of energy-efficient electronics and diamond-based quantum technologies. The agenda also included the question of how state policy can support research so that developments find their way more quickly into application.





LASER World of PHOTONICS & World of QUANTUM

26. bis 29. April 2022

Auf der »LASER World of PHOTONICS« in München stellte das Fraunhofer IAF unter anderem ein inline-fähiges Infrarotspektroskopie-Messsystem vor. Das Messsystem wurde gemeinsam mit dem Fraunhofer CAP entwickelt und soll Industrieunternehmen dabei unterstützen, Maßnahmen zur Qualitätssicherung sowie Prozesskontrollen zuverlässiger und effizienter zu gestalten. Parallel dazu wurden auf der erstmals stattfindenden »World of QUANTUM« zwei Projekte aus dem Bereich der Quantensensorik vorgestellt: zum einen das Fraunhofer-Leitprojekt »QMag«, das die Quantenmagnetometrie aus dem universitären Forschungsumfeld in die industrielle Anwendung überführen soll, zum anderen das Projekt »DiLaMag«, in dem Forschende extrem empfindliche Sensoren entwickeln, um beispielsweise die Herz- und Hirnaktivitäten des menschlichen Körpers mittels Magnetfeldern zu messen.

April 26 –29, 2022

At LASER World of PHOTONICS in Munich, Fraunhofer IAF presented, among other things, an inline-capable infrared spectroscopy measurement system. The measurement system was developed together with Fraunhofer CAP and is intended to support industrial companies in making quality assurance measures and process controls more reliable and efficient. In parallel, two projects from the field of quantum sensor technology were presented at the World of QUANTUM, which was held for the first time: on the one hand, the Fraunhofer lead project QMag, which aims to transfer quantum magnetometry from the university research environment to industrial applications, and on the other hand, the project DiLaMag, in which researchers are developing extremely sensitive sensors to measure, for example, the heart and brain activities of the human body using magnetic fields.

Zehn Jahre Fraunhofer CAP und Fraunhofer UK

Ten years Fraunhofer Cap and Fraunhofer UK

14. Juni 2022

Mit einem großen Empfang in der Royal Society in London feierten Fraunhofer UK und Fraunhofer CAP ihr zehnjähriges Jubiläum. 2012 aus dem Fraunhofer IAF entstanden, ist das Fraunhofer CAP in Glasgow angesiedelt und steht stellvertretend für die Internationalisierung des Fraunhofer-Modells. Als Gratulant reiste Prof. Dr. Rüdiger Quay an, der ein äußerst positives Fazit aus der erfolgreichen Kooperation der beiden Institute zog.

June 14, 2022

Fraunhofer UK and Fraunhofer CAP celebrated their tenth anniversary with a grand reception at the Royal Society in London. Fraunhofer CAP, which evolved from Fraunhofer IAF in 2012, is located in Glasgow and represents the internationalization of the Fraunhofer model. Prof. Dr. Rüdiger Quay arrived to congratulate. He drew an extremely positive conclusion from the successful cooperation of the two institutes.

Feierliche Einweihung der neuen Forschungsgebäude

Inauguration ceremony of the new research buildings



30. Juni 2022

Durch den Bau eines neuen Laborgebäudes und einer neuen MOCVD-Halle konnte das Fraunhofer IAF seine hochmoderne Forschungsinfrastruktur weiter ausbauen und die Bedingungen für die Entwicklung zukunftssträchtiger Halbleiter-Technologien verbessern. Im Rahmen der feierlichen Eröffnung schnitten Freiburgs Baubürgermeister Prof. Dr. Martin Haag, die Geschäftsführerin der Freiburg Wirtschaft Touristik Messe GmbH & Co. KG, Hanna Böhme, und Prof. Dr. Rüdiger Quay gemeinsam das Band durch und weihten die neuen Gebäude offiziell ein.

June 30, 2022

With the construction of a new laboratory building and a new MOCVD hall, Fraunhofer IAF was able to further expand its state-of-the-art research infrastructure and improve the conditions for the development of promising semiconductor technologies. During the ceremonial opening, Freiburg's Mayor for Construction Prof. Dr. Martin Haag, the managing director of Freiburg Wirtschaft Touristik Messe GmbH & Co. KG, Hanna Böhme, and Prof. Dr. Rüdiger Quay jointly cut the ribbon and officially inaugurated the new buildings.

QBN Meeting on Quantum Sensing

26. Oktober 2022

Vertretende von Unternehmen und Forschungseinrichtungen konnten sich im Rahmen des QBN Meetings über die aktuellsten Entwicklungen und führende Technologien im Bereich der Quantensensorik informieren. Zu Beginn bezeichnete Dr. Peter Knittel vom Fraunhofer IAF die Quantensensorik als »Hidden Champion unter den Quantentechnologien«, da sie unter allen Quantentechnologien bereits am weitesten entwickelt ist und große technologische Fortschritte in den nächsten Jahren zu erwarten sind. Beiträge von Element Six, dem Tokyo Institute of Technology, TNO, Diatope, Quantum Diamonds, attocube systems, NVision, QZabre, Fraunhofer IWM und Quantum Diamond Technologies Inc. gaben einen umfassenden Einblick in das Thema Quantensensorik.

October 26, 2022

At the QBN meeting, representatives from companies and research institutions were able to learn about the latest developments and leading technologies in the field of quantum sensing. At the start of the event, Dr. Peter Knittel from Fraunhofer IAF called quantum sensing the hidden champion among quantum technologies, as it is already the most advanced among all quantum technologies and major technological advances can be expected in the coming years. Contributions from Element Six, the Tokyo Institute of Technology, TNO, Diatope, Quantum Diamonds, attocube systems, NVision, QZabre, Fraunhofer IWM and Quantum Diamond Technologies Inc. gave a comprehensive insight into the topic of quantum sensing.



Developer Conference des Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW)

Developer Conference of the Competence Center Quantum Computing
Baden-Württemberg (KQCBW)

28. Oktober 2022

Auf dem IBM-Technologecampus in Ehningen – in nächster Nähe zum IBM Quantum System One – kamen rund 80 Forschende des KQCBW zusammen, um sich über die Grenzen individueller Projekte hinaus persönlich auszutauschen und Synergien zu schaffen. In Technical Talks über Quantenhardware, -software, Fehlermitigation und weitere Themen stellten Teilnehmende den aktuellen Stand der Forschung vor und führten vertiefende Diskussionen. Die Developer Conference hat erfolgreich die Forschungscommunity des KQCBW näher zusammengebracht und bildete den Auftakt zu weiteren gemeinsamen Veranstaltungen.

October 28, 2022

At the IBM Technology Campus in Ehningen — in close proximity to the IBM Quantum System One — around 80 KQCBW researchers came together to exchange ideas and create synergies beyond the boundaries of individual projects. In technical talks on quantum hardware, software, error mitigation and other topics, participants presented the current state of research and engaged in in-depth discussions. The Developer Conference successfully brought the KQCBW research community closer together and builds the foundation for further joint events.



Zukunft gestalten: Berufliche Chancen am Fraunhofer IAF

Shaping the future:
Career opportunities at Fraunhofer IAF



5 reasons why

- Modernste Forschungsinfrastruktur mit einzigartigen Anlagen entlang der gesamten Wertschöpfungskette
 - Vielfältiges Know-how der Mitarbeitenden
 - Forschungsfreiheit
 - Anwendungsnahe Projekte und enge Kontakte zu Industrie und öffentlichen Auftraggebern
 - Breitgefächerte Forschungsbereiche ermöglichen sowohl Spezialisierung wie auch interdisziplinäres Arbeiten
-
- *State-of-the-art research infrastructure with unique facilities along the entire value chain*
 - *Broad expertise of our employees*
 - *Freedom of research*
 - *Application-oriented projects and close contact to industry and public clients*
 - *Wide range of research areas that enable both specialization and interdisciplinary work*

Wissenschaftliche, technische und administrative Mitarbeitende bündeln am Fraunhofer IAF ihre Kräfte, um gemeinsam mit Partnern aus aller Welt die Technologien von morgen zu realisieren

Scientific, technical and administrative employees join forces at Fraunhofer IAF to realize the technologies of tomorrow together with partners from all over the world

Ob in Forschung, Technik oder Verwaltung, als Junge Wilde oder alter Hase – das Fraunhofer IAF bietet zukunftssträchtige Tätigkeiten in einem internationalen wissenschaftlichen Umfeld. Als eine der wenigen wissenschaftlichen Einrichtungen weltweit leisten wir Forschungs- und Entwicklungsarbeit entlang der gesamten Halbleiter-Wertschöpfungskette – im Rahmen öffentlicher Vorhaben wie auch für die Industrie. Dabei treffen anspruchsvolle Aufgaben auf eine familiäre Unternehmenskultur mit einer Vielzahl an Benefits der Fraunhofer-Gesellschaft und speziell des Fraunhofer IAF. Besonders reizvoll: Alle arbeiten unmittelbar am Puls des technologischen Fortschritts und erleben aus nächster Nähe, wie Innovationen entstehen, die das Morgen prägen. Außerdem profitieren sie von dem globalen Fraunhofer-Netzwerk, einer hervorragenden Vereinbarkeit von Familie und Beruf sowie von Leistungs- und Erfolgsprämien.

Weitere Vorteile

- Ein modern ausgestattetes und international geprägtes Arbeitsumfeld
- Eigenverantwortliches Arbeiten und kreatives Mitgestalten
- Persönliche Entwicklungsmöglichkeiten durch Weiterbildungsmaßnahmen
- Sehr gute Sozialleistungen
- Interne Sportangebote
- Gemeinsame Aktionen und Feste
- Regelmäßige Vortrags- und Info-Formate

Whether in research, technology or administration, as a young professional or old hand—Fraunhofer IAF offers promising activities in an international scientific environment. As one of the few scientific institutions worldwide, we perform research and development work along the entire semiconductor value chain—in the context of public projects as well as for industry. Challenging tasks meet a familiar corporate culture with a multitude of benefits from the Fraunhofer-Gesellschaft as well as specific benefits from Fraunhofer IAF. Particularly appealing: Everybody works directly on the pulse of technological progress and experiences firsthand how innovations are created that shape tomorrow. Moreover, they benefit from the global Fraunhofer network, an excellent work-life balance as well as performance and success bonuses.

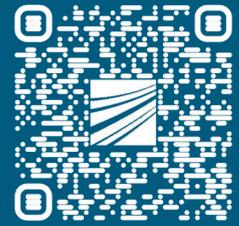
Further benefits

- A modern equipped and international working environment
- Independent work and creative participation
- Personal development opportunities through further training measures
- Very good social benefits
- Internal sports activities
- Joint activities and parties
- Regular presentations and information formats



*Mitarbeitende des Fraunhofer IAF nahmen an der feierlichen Eröffnung der neuen Forschungsgebäude im Sommer 2022 teil
Fraunhofer IAF employees participated in the grand opening of the new research buildings in summer 2022*

Working at Fraunhofer IAF



State-of-the-art workplace
including a clean room and laboratories

Research



R&D work in an international
environment with science
and industry

Enabling the institute's
work on the pulse of
technological progress



Technicians and Administration

Training and Studies



As Industrial Mechanic
or IT-Technician



PhD, Bachelor's and Master's
theses; Student Assistance

Forschung in die Anwendung begleiten Taking research into application

Vanessa Dehn promoviert seit August 2021 am Fraunhofer IAF im Bereich Quanteninformation. In ihrer Promotion untersucht und entwickelt sie Quantenalgorithmen und nutzt den IBM Quantum System One in Ehningen bei Stuttgart, dessen Zugang Fraunhofer exklusiv verwaltet.

Wie wichtig sind Kooperationen für eure Arbeit?

Dehn — Sie sind sehr wichtig! Wir haben verschiedene Projekte, in denen wir mit unterschiedlichen Partnern kooperieren. In dem Projekt »QORA II« beispielsweise arbeiten wir mit Forschenden eines weiteren Fraunhofer-Instituts und mit verschiedenen Unis zusammen. Ein weiteres Beispiel für Kooperationen in unserer Arbeit ist das gemeinsame Schulungsprogramm mit dem Fraunhofer IAO. Es fand im letzten Jahr zum ersten Mal statt und war ein richtiger Meilenstein. Das Schulungsprogramm war so ein Erfolg, dass wir es gemeinsam weiterentwickeln und in diesem Jahr in neuer Form anbieten. Für uns ist es wichtig, uns mit Projektpartnern und der Industrie auszutauschen und unsere Expertise dabei auch zu teilen. So kommen wir mit unserer Arbeit voran.

Warum hast du dich für das Fraunhofer IAF entschieden?

Dehn — Das Besondere für mich am Fraunhofer IAF ist in erster Linie in den Arbeitsalltag integriert zu sein, deshalb habe ich mich auch gegen eine Promotion an der Uni entschieden. Mir gefällt die praxisnahe Arbeit an einem Forschungsinstitut. Im Prinzip ist es so: Wir machen nicht nur Grundlagenforschung, sondern begleiten die Forschung auch darüber hinaus bis in die Anwendung. An einer Uni steckt man tiefer in der Grundlagenforschung, hier am Fraunhofer IAF entwickeln wir dafür im Rahmen der Projektarbeit konkrete Produkte. Generell gefällt mir, wie spannend meine Arbeit hier am Fraunhofer IAF ist.

Vanessa Dehn

Vanessa Dehn has been working on her PhD in quantum information at Fraunhofer IAF since August 2021. In her PhD thesis, she investigates and develops quantum algorithms and uses the IBM Quantum System One in Ehningen near Stuttgart, whose access Fraunhofer exclusively manages.

How important are collaborations for your work?

Dehn — They are very important! We have various projects in which we cooperate with different partners. In the QORA II project, for example, we are working with researchers from another Fraunhofer Institute and with various universities. Another example of cooperation is the quantum computing training program we offer together with Fraunhofer IAO. It took place for the first time last year and was a true milestone. The training program was such a success that we are jointly developing it further, offering it in a revised format this year. The program offers a platform to exchange ideas with project partners and industry as well as to share our expertise in the process. This is important to us and helps us to advance our work.

Why did you choose Fraunhofer IAF?

Dehn — The special thing for me working at Fraunhofer IAF is first and foremost being integrated into the daily work routine, which is why I decided against a doctorate at a university. I prefer practical work at a research institute. It basically works like this: we don't just do basic research, but also take the research beyond that into application. At a university, you are deeper into basic research. At Fraunhofer IAF, we develop concrete products within the framework of project work. In general, I like how exciting my work here at Fraunhofer IAF is.





Bharath Kumar Cimbili

Hohe Sichtbarkeit für Forschungsergebnisse High visibility for research results

Bharath Kumar Cimbili arbeitet seit Oktober 2020 als Wissenschaftler in der Hochfrequenzelektronik am Fraunhofer IAF und forscht im Rahmen des EU-Programms »MyWave« in enger Kooperation mit dem Partnerunternehmen Ericsson an hocheffizienten Leistungsverstärkern im E-Band-Frequenzspektrum, das für Satelliten- und Mobilkommunikation erschlossen wird.

Inwiefern profitiert deine Arbeit von Kooperationen?

Cimbili — Ich denke, dass Partnerschaften wie die mit Ericsson unsere Sichtbarkeit erhöhen. Die Leistungsverstärkerschaltungen, die ich entworfen habe, liefern beispielsweise Spitzenergebnisse, und Ericsson interessiert sich dafür, sie für ihre Anwendungen (5G-Basisstationen) zu kaufen und sie Kunden weltweit zu demonstrieren. Diese Partnerschaft erhöht die Sichtbarkeit sowohl für mich als Forscher als auch für die GaN-Technologie, die das Fraunhofer IAF für Millimeterwellen-Designs anbietet.

Was macht es in deinen Augen besonders attraktiv, am Fraunhofer IAF zu arbeiten?

Cimbili — Ich denke, einer der größten Vorteile, den ich im Vergleich zu den anderen Teilnehmenden des »MyWave«-Programms habe, ist die hauseigene Produktion, die wir am Fraunhofer IAF haben. Ich bin nicht auf externe Partner angewiesen, um meine Chips zu fertigen. Stattdessen verfügen wir über eigene Anlagen, durch die wir aus erster Hand Informationen über den Herstellungsprozess erhalten. Damit können wir unsere Schaltungen so optimieren, dass wir die bestmögliche Leistung erzielen und unsere Entwürfe weiter verbessern können.

Bharath Kumar Cimbili has been working as a researcher in high-frequency electronics at Fraunhofer IAF since October 2020 and is conducting research in the EU program MyWave in close collaboration with the partner company Ericsson. He is working on highly efficient power amplifiers in the E-band frequency spectrum, which is being targeted for satellite and mobile communications.

How does your work benefit from collaborations?

Cimbili — I think the partnerships, like the one with Ericsson for example, can increase our visibility. For instance, the power amplifier circuits that I designed previously are producing state-of-the-art results and Ericsson is interested in buying these samples for their applications (5G base stations) to demonstrate them to their customers across the world. This partnership increases the visibility for both, me as the researcher as well as the GaN technology that Fraunhofer IAF offers for millimeter-wave designs.

What makes working at Fraunhofer IAF especially attractive from your point of view?

Cimbili — I think one of the best advantages I have compared to the other participants in the MyWave program is the in-house fabrication we have at Fraunhofer IAF. I don't have to depend upon external partners to manufacture my chips. Instead, we have our own facilities through which we get first-hand information about the manufacturing process. This allows us to optimize our circuits to achieve the best possible performance and further improve our designs.

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

Institutsleitung (kommissarisch)

Director (acting)

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Marketing und Kommunikation

Marketing and Communications

Lukas Kübler
Tel. +49 761 5159-261
lukas.kuebler@iaf.fraunhofer.de

Redaktion

Editorial Board

Lukas Kübler, Dr. Violetta Budak,
Jennifer Funk, Stefanie Griesser,
Armin Müller, Prof. Dr. Rüdiger Quay

Konzept, Layout, Satz, Druck

Design, layout, typesetting, printing

netsyn, Joachim Würger, Freiburg,
Fraunhofer-Druckerei

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 2023

Bildnachweise

Picture credits

© Fraunhofer-Gesellschaft, 9;
© Loewn | FMD, 10–13;
© Fraunhofer IAO | Ludmilla Parsyak, 17;
© Fraunhofer ICT, 23;
© alexyz3d – stock.adobe.com, 26;
© antonmatveev – stock.adobe.com, 27;
© Fraunhofer UK, 28;
© Fraunhofer CAP, 29;
© Fraunhofer HHI, 35;
© QBN, 36;
© IQuSense, 37;
© EPIC, 38;
© Photonics BW, 39;
© Fraunhofer IAO | Ludmilla Parsyak, 43;
© phonlamaipphoto – stock.adobe.com, 45;
© Universität Freiburg | Sandra Meyndt, 50;
© INATECH | Cristina Maurette Blasini, 51;
© INATECH, 53;
© Fraunhofer EMI, 54;
© KIT, 55;
© David Ausserhofer, 56;
© RMIT | Brant Gibson, 56;
© TNO | Fraunhofer IAF, 58–59;
© Frank van den Bogaart, 61;
© Fraunhofer IPM, 68;
© AG Klinische Neurotechnologie | Charité –
Universitätsmedizin Berlin, 78;
© Fraunhofer HHI, 81;
© ESA | produced by VITO, 88;
© ESA | P. Carril, 89;
© Andrew Barnes, 91;
© Mike Stone, 102 (bottom);
© Fraunhofer IAO, 105 (top)

All others © Fraunhofer IAF, Dr. Violetta Budak,
Sandra Schneider

Newsletter



Wir informieren Sie über spannende Forschungsergebnisse,
neue Projektvorhaben und aktuelle Veranstaltungen.

We keep you up to date with exciting research results,
new projects, and current events.

[hier anmelden](#)
[subscribe here](#)

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF entwickelt elektronische und optoelektronische Bauelemente und Schaltungen auf Basis von Verbindungshalbleitern und Diamant. Das Institut zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen weltweit auf dem Gebiet der III/V-Halbleiter und trägt dazu bei, die Quantentechnologien von der Grundlagenforschung in die Anwendung zu bringen. 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 and diamond. The institute is one of the leading research facilities in the area of III-V semiconductors and contributes to bringing quantum technologies from basic research to application. Our technologies are used in a variety of areas such as security, energy conversion, communication, health and mobility.