



Fraunhofer
IAF

Fraunhofer-Institut für Angewandte
Festkörperphysik IAF



Evolving Together

Jahresbericht – Annual Report 2023 / 2024

Als international ausgerichtetes Forschungsinstitut mit einzigartiger Themenvielfalt gehört es zum Wesen des Fraunhofer IAF, sich stetig gemeinsam weiterzuentwickeln – wissenschaftlich, persönlich, organisatorisch. Diese dynamische Vielfalt veranschaulicht unser Reinraum. Beispielhaft zeigt das Cover unseres Jahresberichts 2023/24 deshalb eine unserer Anlagen zur Molekularstrahlepitaxie (MBE).

Mit diesem Verfahren werden dünne einkristalline Schichten aus verschiedenen elementaren Ressourcen wie Aluminium, Gallium oder Indium gewachsen. Das Zusammenspiel der verschiedenen Atome erlaubt die Herstellung neuartiger Baulemente, die signifikante Weiterentwicklungen in Bereichen wie Klimabeobachtung, Sicherheit, Gesundheit oder Mobilität ermöglichen.

As an internationally oriented research institute with a unique range of topics, it is part of our essence at Fraunhofer IAF to constantly evolve scientifically, personally, and organizationally. This dynamic diversity is reflected in our clean room. Exemplarily, the cover of our 2023/24 annual report shows one of our systems for molecular beam epitaxy (MBE). This process is used to grow extremely thin single-crystal layers from various elemental resources such as aluminum, gallium, or indium. The interaction of the different atoms allows for the production of novel components, enabling significant advances in areas such as climate monitoring, safety, health, or mobility.

Evolving Together

Jahresbericht – Annual Report 2023 / 2024

Vorwort

Preface

Mit diesem Jahresbericht begrüßen wir Sie erstmals als Doppelspitze am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF. Seit dem 2. April 2024 bilden wir gemeinsam die Institutsleitung und arbeiten daran, dass am Fraunhofer IAF auch weiterhin exzellente und zukunftsweisende Forschung betrieben werden kann. Mit unterschiedlichen Erfahrungen und Perspektiven, aber gemeinsamen Werten und Zielen ist es unser Anliegen, das Fraunhofer IAF sowohl für gegenwärtige als auch für anstehende Herausforderungen zu stärken und mit unserer Spitzenforschung die Zukunft mitzugestalten – ganz im Sinne des Mottos unseres diesjährigen Jahresberichts: »Evolving together«.

In einer sich schnell wandelnden Welt gelingt die Weiterentwicklung nur gemeinsam mit Partnerschaften auf Augenhöhe, Teamgeist und dem Mut, sich Herausforderungen zu stellen. Mit unserer Expertise und Ausstattung sind wir eines der wenigen Forschungsinstitute, das die gesamte Wertschöpfungskette der III/V-Halbleiter und der Quantentechnologie abdeckt. Dieses Alleinstellungsmerkmal bauen wir weiter aus und nutzen es, um gemeinsam mit unseren Partnern zur Souveränität der europäischen Halbleiterindustrie, z. B. im Rahmen des European Chips Act, beizutragen. Als Teil des Fraunhofer-Leistungsbereichs Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS forschen wir für Schutz und Sicherheit und bringen unsere Infrastruktur und spezifischen Fähigkeiten in der Erforschung und Entwicklung festkörperbasierter Technologien, Komponenten und Systeme ein. Nachhaltigkeit ist ein weiteres zentrales Thema unserer Forschung. Wir entwickeln neue Materialien und Konzepte, um elektronische Komponenten und Systeme energieeffizienter, langlebiger und nachhaltiger zu machen und fördern den Technologie- und Wissenstransfer in die Industrie.

With this annual report, we welcome you for the first time as dual leadership at the Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF. Since April 2, 2024, we have jointly formed the Institute Management and are working to ensure that excellent and future-oriented research can continue to be carried out at Fraunhofer IAF. Drawing on different experiences and perspectives, but with common values and goals, our aim is to strengthen Fraunhofer IAF for both current and upcoming challenges and to help shape the future with our cutting-edge research — in line with the motto of this year's annual report: "Evolving together."

In a rapidly changing world, progress can only be made by working together in partnerships at eye level, with team spirit and the courage to face challenges. With our expertise and equipment, we are one of the few research institutes that covers the entire value chain of III-V semiconductors and quantum technology. We continue to expand this unique selling point and use it to contribute to the sovereignty of the European semiconductor industry together with our partners, e.g., within the framework of the European Chips Act. As part of the Fraunhofer Segment for Defense and Security VVS, we conduct research for protection and security and contribute our infrastructure and specific capabilities in the research and development of solid-state-based technologies, components and systems. Sustainability is further central topic of our research. We develop new materials and concepts to make electronic components and systems more energy-efficient, durable and sustainable and promote the transfer of technology and knowledge to industry.



Zur Forschung und Entwicklung gehört auch die Fähigkeit, sich anzupassen und interne Veränderungen anzustoßen. Mit einem Leitungsduo, einem Strategieprozess und digitalen Lösungen für die Verwaltung schaffen wir effizientere interne Prozesse und damit die erforderlichen Rahmenbedingungen, die eine produktive Umgebung und bahnbrechende Forschung möglich machen.

Die Stärke des Fraunhofer IAF liegt in seiner Vielseitigkeit. Unser Portfolio umfasst die Themen Hochfrequenz-, Leistungs- und Optoelektronik sowie Quantenbauelemente und -systeme. Der vorliegende Jahresbericht blickt auf herausragende [Forschungsergebnisse aus allen Forschungsbereichen](#) des letzten Jahres zurück sowie auf kürzlich gestartete Vorhaben voraus. Darüber hinaus gewährt er einen spannenden Einblick in unsere Prozess- und Wertschöpfungskette am Beispiel der [Satellitentechnik](#), für die wir alle Schritte vom Design bis zum einsatzbereiten Modul anbieten. Genauso vielseitig wie unsere Themen sind unsere rund 300 Mitarbeitenden. Neben den Forschenden zählen dazu auch diejenigen Beschäftigten, die im Hintergrund für einen reibungslosen Ablauf sorgen und zu den [Möglichmachern](#) unserer Spitzenforschung gehören. Einige von ihnen stellen wir Ihnen auf den kommenden Seiten vor. Außerdem sind wir sehr stolz, auf ein erfolgreiches Jahr mit vielen [Veranstaltungen, wissenschaftlichen Rekorden und Auszeichnungen](#) für unsere Forschenden zurückblicken und darüber berichten zu können.

Die gemeinsame Weiterentwicklung ist eine Chance, die Weichen zu stellen für verbesserte Prozesse, eine exzellente Forschung und innovative Technologien. Voller Elan und Optimismus starten wir in ein neues Kapitel des Fraunhofer IAF und freuen uns sehr über Ihr Interesse an unserer Arbeit.

Mit herzlichen Grüßen

Dr. Patricie Merkert

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Research and development also include the ability to adapt and initiate internal change. With a dual leadership, a strategy process and digital solutions for administration, we are creating more efficient internal processes and thus the necessary framework conditions that enable a productive environment and groundbreaking research.

The strength of Fraunhofer IAF lies in its versatility. Our portfolio covers the topics of high-frequency, power and optoelectronics as well as quantum components and systems. This annual report looks at [outstanding research results from all research areas](#) of the past year as well as the plans of recently launched projects. It provides an exciting insight into our process and value chain using the example of [satellite technology](#), for which we offer all steps from design to ready-to-use modules. On the following pages we also like to introduce you to some of our employees. With around 300 people, we are just as diverse as our topics. Alongside the researchers, this also includes our [employees who work in the background](#) to ensure that everything runs smoothly and enable our cutting-edge research. We are also very proud to be able to look back and report on a successful year with many [events, scientific records and awards](#) for our researchers.

Joint development is an opportunity to set the course for improved processes, excellent research and innovative technologies. Full of enthusiasm and optimism, we are starting a new chapter at Fraunhofer IAF and are delighted that you are interested in our work.

Sincerely,

Dr. Patricie Merkert

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Inhaltsverzeichnis

Contents

Im Interview: Doppelspitze am Fraunhofer IAF

Interview: Dual leadership at Fraunhofer IAF	6
--	---

Forschung und Entwicklung | Research and Development

D-Band-Sendemodule mit hoher Leistungseffizienz	
D-band transmitter modules with high power efficiency	14
Kryogene Charakterisierung von Quantencomputing-Bauelementen	
Cryogenic characterization of quantum computing components	17
Laser-Lichtquellen für digital-holografische Koordinatenmesssysteme	
Laser light sources for digital holographic coordinate measuring systems	21
Feature: Verbindungshalbleiter für europäische Satellitentechnik entlang der Wertschöpfungskette Feature: Compound semiconductors for European satellite technology along the value chain	25
SWIR-SPADs für Sensorik in Mobilität, Kommunikation und Medizin	
SWIR-SPADs for sensor technology in mobility, communication and health	35
Scheibenlaser als Enabling Technology für das Quanteninternet	
VECSELs as enabling technology for the quantum internet	39
Feature: Mit Diamantkugeln zur Fusionsenergie	
Feature: Diamond spheres for fusion energy	43
Interview: »Die perfekte Diamantkugel erfordert viel Know-how und ein aufwendiges Verfahren« Interview: "The perfect diamond sphere requires a great deal of expertise and a complex process"	46
Hochauflöste Magnetfeldmessungen mit Diamant	
High-resolution magnetic field measurements with diamond	51
Erfolgreicher Abschluss der Verbundprojekte des KQCBW	
Successful completion of the KQCBW joint projects	55
Gemeinsam mit der Industrie: GaN-Technologien für 6G	
Hand in hand with industry: GaN technologies for 6G	61
Unterstützung der GaN-Halbleiter-Industrie mit IPCEI ME/CT	
Supporting GaN semiconductor industry with IPCEI ME/CT	64
Einzelphotonen-Detektoren für eine Bildgebung ohne direkte Sichtverbindung	
Single-photon detectors for non-line-of-sight imaging	66
Elektro-optisches Messsystem zur Inline-Produktionskontrolle in der Chipfertigung	
Electro-optical measuring system for inline production control in chip manufacturing	68
Feature: Quantum ^{BW} – THE LÄND of quantum technology	
Feature: Quantum ^{BW} – THE LÄND of quantum technology	71
Autonome Navigation mit Quantenmagnetometern	
Autonomous navigation with quantum magnetometers	74
Neue Ära in der Erforschung von Festkörper-Quantencomputing	
New era in solid-state quantum computer research	76

Möglichmacher Enablers	78
Interview: »Veränderung bedeutet immer ein bisschen Reibung, aber dafür auch die Chance, Dinge neu zu gestalten«	
Interview: "Change always involves a bit of friction, but also the chance to reshape things"	80
Implementierung eines agilen Strategieprozesses am Fraunhofer IAF	
Implementation of an agile strategy process at Fraunhofer IAF.....	84
Ihre Mission: Den Forschenden den Rücken freihalten	
Their mission: To have the researchers' backs.....	86
24/7 im Dienst für Infrastruktur und Betriebssicherheit	
24/7 on duty for infrastructure and operational safety.....	90
Zukunft möglich machen: Bildungswege am Fraunhofer IAF	
Enabling the future: Educational paths at Fraunhofer IAF	94
Abschlussarbeiten Theses.....	96
Zukunft gestalten: Berufliche Chancen am Fraunhofer IAF	
Shaping the future: Career opportunities at Fraunhofer IAF	98
Höhepunkte Highlights	102
Höhepunkte 2023 Highlights 2023.....	104
Auszeichnungen 2023 Awards 2023	110
Rekorde 2023 Records 2023.....	114
Fraunhofer: Innovation seit 75 Jahren Fraunhofer: 75 Years of Innovation.....	117
Wissenswertes Things to know	118
Das Institut in Zahlen The institute in figures	120
Organisationsstruktur Organizational structure.....	122
Kuratorium Advisory Board	123
Ausbildung und Lehre Education and teaching	124
Stefan Mönch erhält Juniorprofessur Stefan Mönch receives junior professorship	125
Netzwerke Networks	126
Patente Patents	127
Impressum Publication details.....	128

Im Interview: Doppelspitze am Fraunhofer IAF

Interview: Dual leadership at Fraunhofer IAF

Dr. Patricie Merkert und Prof. Dr. Rüdiger Quay sprechen im Interview über die gemeinsame Institutsleitung und die Zukunft des Fraunhofer IAF.

In this interview, Dr. Patricie Merkert and Prof. Dr. Rüdiger Quay talk about their joint leadership and the future of Fraunhofer IAF.

Warum wurde eine Doppelspitze am Fraunhofer IAF eingeführt?

Merkert — Als die Fraunhofer-Gesellschaft mit der Idee einer Doppelspitze an mich herangetreten ist, ging es nicht nur darum Aufgaben aufzuteilen, sondern auch unterschiedliche Schwerpunkte zusammenzubringen. Rüdiger kommt aus der Fraunhofer-Welt und der Forschung. Ich komme aus der Industrie. Ziel unserer Doppelspitze ist es, diese Kompetenzen zusammenzubringen, um das bestmögliche für das Institut zu generieren. Unsere verschiedenen Sichtweisen, Erfahrungen, Kompetenzen, Präferenzen und auch Denkweisen ergänzen sich sehr gut.

Quay — Die Idee einer Doppelspitze wird in der Fraunhofer-Gesellschaft vermehrt wahrgenommen. Einer der Hauptgründe ist die zunehmende Komplexität, die wir im Wissenschaftssystem erfahren. Gleichzeitig hängt es mit der Vielzahl an Aufgaben zusammen, die in der Fraunhofer-Gesellschaft einer Institutsleitung zugeschrieben werden. Dazu gehört die Wahrnehmung der universitären Pflichten und gleichzeitig die Leitungsaufgaben an einem wirtschaftlichen und industriellen Forschungsinstitut. Da ist eine Arbeitsteilung, wie Patricie gesagt hat, naheliegend.

Why was dual leadership introduced at Fraunhofer IAF?

Merkert — When the Fraunhofer-Gesellschaft approached me with the idea of a dual leadership, it was not just about dividing up tasks, but also about bringing together different specializations. Rüdiger comes from the Fraunhofer world and research. I come from industry. The aim of our dual leadership is to bring these skills together in order to generate the best possible results for the institute. Our different perspectives, experiences, skills, preferences and ways of thinking complement each other very well.

Quay — The idea of a dual leadership is being increasingly recognized in the Fraunhofer-Gesellschaft. One of the main reasons for this is the increasing complexity that we are experiencing within field of applied research. At the same time, it is linked to the multitude of tasks that are ascribed to an institute director in the Fraunhofer-Gesellschaft. These include university duties and at the same time the management tasks at a commercial and industry-oriented research institute. A division of labor, as Patricie said, is logical.

Frau Merkert: Warum haben Sie Sich für das Fraunhofer IAF entschieden und worauf freuen Sie Sich besonders?

Merkert — Worauf ich mich am meisten freue, ist den Bogen zu schließen. Ich habe ursprünglich meine Doktorarbeit geschrieben, um meine Erfahrung aus der Industrie in die Lehre und Forschung zurückzubringen. Am Fraunhofer IAF kann ich jetzt diesen ganz persönlichen »Loop« von der Forschung zur Industrie und zurück endlich schließen. Dabei bringe ich aus über 20 Jahren in der Industrie vieles mit: Ich habe gelernt, wie man Organisationen baut, wie man Veränderungen vorantreibt, wie man neue Prozesse schafft oder verbessert, aber auch wie man Struktur und Transparenz herbeiführt, die dabei hilft, Entscheidungen in einer sich schnell wandelnden Welt sicher zu treffen.

Und vor allen Dingen freue ich mich, mit den Leuten zusammenzuarbeiten. Das ist es, was mich motiviert: mit Leuten zu arbeiten, sie zu verstehen und gemeinsam Dinge möglich zu machen – getreu dem Motto: »Stärken stärken heißt Schwächen schwächen«.



Das ist es, was mich motiviert: mit Leuten zu arbeiten, sie zu verstehen und gemeinsam Dinge möglich zu machen.«

“That is what motivates me: working with people, understanding them and making things possible as a team.”

Dr. Patricie Merkert

Herr Quay: Welche Veränderung haben Sie als kommissarischer Institutsleiter in den letzten zwei Jahren am Fraunhofer IAF begleitet?

Quay — Es gab einen Generationenwechsel in vielen Bereichen der Belegschaft und wir haben so eine völlig neue Generation von Mitarbeitenden, die auch andere Wünsche und Lebensauffassungen hat. Gleichzeitig haben wir auch einen thematischen Aufgabenwechsel in Bereichen, die etwas älter waren, vollzogen und diese durch neue Themen ersetzt. Zum Beispiel haben wir uns von der LED-Forschung getrennt, einem Thema, in dem wir bahnbrechende Ergebnisse erzielt haben, das aber so ausgereift ist, dass es nicht mehr zu einem Forschungsinstitut wie uns passt. Dafür haben wir neue Themen beispielsweise im Bereich der Quantentechnologien bei uns etabliert. Manche Themen werden auch noch weiter gestärkt werden, wie die Verteidigungsforschung am Fraunhofer IAF. Mit Blick auf die Ukrainekrise wird die Relevanz der Fähigkeit, unabhängig Komponenten und Subsysteme zu bauen, für Europa präsent. Und das gilt auch für die Luft- und Raumfahrt sowie für verschiedene neue Themen.

Ms. Merkert: Why did you choose Fraunhofer IAF and what are you particularly looking forward to?

Merkert — What I am most looking forward to is closing my personal loop. I originally wrote my doctoral thesis to bring my experience from industry back into teaching and research. At Fraunhofer IAF, I can now finally do this and return from research to industry and back. I bring a lot to the table from over 20 years in industry: I have learned how to build organizations, how to drive change, how to create or improve new processes, but also how to bring about structure and transparency that helps to make decisions with confidence in a rapidly changing world.

And above all, I enjoy working with people. That is what motivates me: working with people, understanding them and making things possible as a team—true to the motto: "Strengthening strengths means weakening weaknesses."

Mr. Quay: What changes have you experienced as acting director of Fraunhofer IAF in the last two years?

Quay — There has been a generational change in many areas of the workforce and we now have a completely new generation of employees who also have different wishes and outlooks on life. At the same time, we have also made a thematic change in areas that were somewhat older and replaced them with new topics. For example, we have parted with LED research, a topic in which we have achieved groundbreaking results, but which is so mature that it no longer suits a research institute like ours. Instead, we have established new topics, for example in the field of quantum technologies. Some topics will also be further strengthened, such as defense research at Fraunhofer IAF. In view of the Ukraine crisis, the ability to build independent components and subsystems is becoming increasingly relevant for Europe. And this also applies to aerospace and various new topics.



Neue Doppelspitze, neue Themen, neue Angestellte – Wie schafft man es, die Mitarbeitenden bei so vielen Veränderungsprozessen mitzunehmen?

Quay — Eine ganz wesentliche Komponente ist die Beteiligung der Mitarbeitenden sowohl inhaltlich als auch strukturell. Dabei wird es immer wichtiger, den Sinn der Arbeit herauszustellen, den wir durch die Anwendungen unserer Forschung stiften: Gesundheit, Energie, CO₂-Reduktion – das sind alles Themen, die Leute begeistern können. Durch unsere breite Aufstellung in der Halbleiter- und Festkörperforschung arbeiten wir an einer Vielzahl von sinnhaften Anwendungsfeldern.

Unsere Forschung so zu organisieren, dass unsere Mitarbeitenden einbezogen werden, ist ebenso wesentlich. Dazu haben wir zum Beispiel einen Strategieprozess eingeführt, der bottom-up organisiert ist. Hier können sich Kolleg:innen beteiligen, Ideen einbringen und stärker Verantwortung übernehmen, sodass auch schon junge Forschende Themen voranbringen können.

Von der Industrie in die Forschung – Dr. Patricie Merkert

Nach ihrer Promotion in der Materialwissenschaft ging Dr. Patricie Merkert in die Industrie: Bei den Unternehmen CeramTec und Mann+Hummel verantwortete sie die Bereiche Entwicklung, Business Development und Innovation. Zuletzt war sie Bereichsleiterin bei der E.G.O.-Gruppe und leitete dort die Abteilung Innovation & Technologies.

From industry to research—Dr. Patricie Merkert

After completing her doctorate in materials science, Dr. Patricie Merkert went into industry: at CeramTec and Mann+Hummel, she was responsible for development, business development and innovation. Most recently, she was Head of Division at the E.G.O. Group, where she headed the Innovation & Technologies department.

New dual leadership, new topics, new employees—how do you manage to keep employees on board with so many change processes?

Quay — A very important component is employee participation, both in terms of content and structure. It is becoming increasingly important to emphasize the meaning of the work that we create through the applications of our research: health, energy, CO₂ reduction—these are all topics that inspire people. Thanks to our broad positioning in semiconductor and solid-state research, we work on a variety of meaningful fields of application.

Organizing our research in such a way that our employees are involved is just as important. For example, we have introduced a bottom-up strategy process. Here, colleagues can participate, contribute ideas and take on more responsibility so that even young researchers can advance topics.

Leidenschaft für Forschung und Wissenschaft – Prof. Dr. Rüdiger Quay

Prof. Dr. Rüdiger Quay ist seit 2001 als Wissenschaftler am Fraunhofer IAF tätig. Seit 2018 war er stellvertretender Institutsleiter und verantwortlich für die Bereichsleitung der Geschäftsfelder. Im August 2020 wurde er auf die Fritz-Hüttlinger-Professur für energieeffiziente Hochfrequenzelektronik am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) der Universität Freiburg berufen. Prof. Quay übernahm die kommissarische Institutsleitung des Fraunhofer IAF im Januar 2022.

Passion for research and science— Prof. Dr. Rüdiger Quay

Prof. Dr. Rüdiger Quay has worked as a scientist at Fraunhofer IAF since 2001. From 2018, he has been Deputy Director of the Institute and responsible for the management of the business units. In August 2020, he was appointed to the Fritz Hüttlinger Professorship for Energy-Efficient High-Frequency Electronics at the Institute for Sustainable Technical Systems (INATECH) at the University of Freiburg. Prof. Quay took over the acting management of Fraunhofer IAF in January 2022.



Merkert — Veränderung ist das, was permanent um uns herum passiert und wir müssen darauf reagieren. Dabei ist vor allem Kommunikation ein großes Thema. Das unterstreicht das, was Rüdiger zur Beteiligung gesagt hat. Es ist wichtig diejenigen, die etwas bewegen wollen, zu unterstützen. Dabei ist auch eine gute Fehlerkultur sehr wichtig. Nur wer Fehler auch zulässt, kann aus ihnen lernen und es in Zukunft besser machen.

Durch Beteiligung, Kommunikation und eine gesunde Fehlerkultur können wir die Kolleg:innen befähigen und ihnen Mut machen, auch mal ein Risiko einzugehen und Dinge auszuprobieren. Nur so können wir gemeinsam Innovationen schaffen und Veränderungen angehen.

Merkert — Change is constantly happening around us and we have to react to it. In doing so, communication is a major aspect. This underlines what Rüdiger said about participation. It is important to support those who want to make a difference. A good error culture is also very important. Only those who allow mistakes can learn from them and do better in the future.

Through participation, communication and a healthy error culture, we can empower our colleagues and encourage them to take risks and try new things. This is the only way we can create innovations and tackle change together.

Beteiligung, Kommunikation und Fehlerkultur: Sind das auch drei Punkte, die für Sie eine gute Zusammenarbeit in der Doppelspitze ausmachen?

Merkert — Wir haben im Vorfeld viel über Kommunikation, Vertrauen und Fehlermachen geredet. Das sind Themen, die uns in der Zusammenarbeit auch untereinander extrem wichtig sind. Aber für mich war die dringendste Frage: Kann ich mir vorstellen, mit Rüdiger zusammen die Doppelspitze zu führen? Ist das jemand, dem ich vertrauen kann? Ist es jemand, den ich verstehe?

Quay — Das war auch für mich der wichtigste Punkt: Können wir uns beide das zusammen als Team vorstellen? Das haben wir positiv beantwortet!

Hinzu kommt auch, dass wir beide eine grundlegend positive Sichtweise auf die Zukunft und eine gewisse Risikobereitschaft teilen. Die Halbleiterindustrie ist zwar einerseits sehr konservativ, aber sie ist auch stark auf Fortschritt gepolt. Das heißt es müssen auch Risiken in Technologien, in Ansätzen und in Verfahren eingegangen werden. Es ist ein ganz wesentlicher Punkt, Dinge neu auszuprobieren und vermeintlich altbekannte Themen, neu zu adressieren.

Merkert — Weißt du noch, welche Frage du mir zu Beginn ungefähr dreimal gestellt hast: »Wie können wir dich bei Laune halten, damit dir nicht langweilig wird?« [lachen]

Quay — Das ist auch grundlegend eine sehr wichtige Frage in der Arbeitswelt und ich glaube, da beneiden uns viele Menschen: Mir ist noch nicht an einem einzigen Tag in meiner Karriere bei Fraunhofer langweilig gewesen.

Participation, communication and an error culture: are these also three points that make for good cooperation in your dual leadership?

Merkert — We talked a lot about communication, trust and making mistakes beforehand. These are topics that are also extremely important to us when working together. But for me, the most urgent question was: Can I imagine the dual leadership together with Rüdiger? Is this someone I can trust? Is it someone I understand?

Quay — That was also the most important point for me as well: Can we both imagine doing this together as a team? And we answered that positively!

In addition, we both share a fundamentally positive view of the future and a certain willingness to take risks. Although the semiconductor industry is very conservative on the one hand, it is also strongly oriented towards progress. This means that risks must also be taken in technologies, approaches and processes. It is very important to try things out in new ways and to address issues, even in established processes, in a new way.

Merkert — Do you remember the question you asked me about three times at the beginning: "How can we keep you entertained so you don't get bored?" [laughs]

Quay — This is also a fundamental question in work in general and I think many people envy us in this regard: I have never been bored a single day in my career at Fraunhofer.



Mir ist noch nicht an einem einzigen Tag in meiner Karriere bei Fraunhofer langweilig gewesen.«

“I have never been bored a single day in my career at Fraunhofer.”

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Welche konkreten Ziele haben Sie sich in den kommenden Jahren für das Institut gesetzt?

Quay — 2024 und 2025 werden thematisch extrem spannende Jahre. Wir werden zum einen unsere Forschung in den Quantentechnologien forsetzen wie zum Beispiel in der Landesinitiative Quantum^{BW}. Zudem arbeiten wir aktuell schon an Pilotlinien für die Halbleiter-Chipfertigung, hier verlassen sich Industriepartner wesentlich auf uns. Die Errichtung von pan-europäischen Pilotlinien ist auch eine wichtige Forderung (und Förderinitiative) des EU Chips Act. Als Beitrag dazu plant ein europäisches Konsortium unter der Leitung der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) in den kommenden Jahren die umfassendste und fortschrittlichste Pilotlinie für »Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging« aufzubauen. Wir freuen uns, Teil dieses gemeinsamen Projekts zu sein.

Das wichtigste Ziel bei allem bleibt, unsere internationale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und weiterhin Spitzenforschung zu betreiben. Das hat eine ganze Reihe von Ableitungen, wir werden zum Beispiel in neue Infrastrukturen investieren, um auch in Zukunft neue Technologie zu entwickeln. Außerdem müssen wir die Anschlussfähigkeit an die deutsche Wirtschaft halten und dabei gleichzeitig offenbleiben für länger laufende Themen, die sich noch nicht industrialisieren lassen. Das ist der Spagat, der vor uns liegt.

Merkert — Die Themenvielfalt, die Rüdiger anspricht, bietet natürlich super viele Chancen, aber auch viele Möglichkeiten sich zu verrennen. Dieser Balanceakt, wie wir das Institut aufzustellen, dass es weiterhin auf vielen unterschiedlichen Beinen stehen kann, ist eine zentrale Zielsetzung.

Aber ich würde sogar einen Schritt zurückgehen und betonen, dass es nicht darum geht, Veränderung der Veränderung willen zu betreiben, sondern damit das Institut zukunftssicher dasteht. Das beinhaltet auch gesicherte Arbeitsplätze für die Angestellten und dass es Arbeitsplätze sind, die Spaß machen. Dazu müssen natürlich auch die Finanzierungsmittel stimmen, damit wir auch in Zukunft in der Lage sind, strategische Investitionen zu tätigen. Dafür brauchen wir die richtigen Projekte und die richtigen Leute an den richtigen Stellen sowie ein Umfeld, in dem sich die Mitarbeitenden einbringen und mit Elan an den Themen arbeiten können.

What specific goals have you set yourself for the institute in the coming years?

Quay — 2024 and 2025 will be extremely exciting years in terms of research topics. On the one hand, we will continue our research in quantum technologies, for example in the state initiative Quantum^{BW}. In addition, we are already working on pilot lines in semiconductor chip production where industrial partners rely on us to a large extent. The establishment of pan-European pilot lines is also an important requirement (and funding initiative) of the EU Chips Act. As a contribution to this, a European consortium under the leadership of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) plans to establish the most comprehensive and advanced pilot line for "Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging" in the coming years. We are delighted to be part of this joint project.

The most important goal, however, is to maintain our international competitiveness and continue to conduct cutting-edge research. This has a whole range of implications; for example, we will invest in new infrastructures in order to continue developing new technology in the future. In addition, we must maintain our ability to connect with the German economy, while at the same time remaining open to longer-term topics that cannot yet be industrialized. This is the balancing act that lies ahead of us.

Merkert — The variety of topics that Rüdiger addresses naturally offers a great many opportunities, but also a lot of possibilities to get lost. This balancing act, how we set up the institute so that it can continue to stand on many different legs, is a central objective.

But I would even take a step back and emphasize that it is not about pursuing change for the sake of change, but so that the institute is future-proof. This also includes secure jobs for employees and jobs that are fun. Of course, this also requires the right financial resources so that we are also in a position to make strategic investments in the future. To do this, we need the right projects and the right people in the right places, as well as an environment in which employees can get involved and work with enthusiasm.

Forschung und Entwicklung

Research and Development



Exzellente Forschende in den Bereichen Elektronik, Optoelektronik und Quantentechnologien entwickeln gemeinsam Innovationen entlang der Halbleiter-Wertschöpfungskette und bringen sie in enger Kooperation mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft in die Anwendung. Dabei profitieren sie von der vielfältigen Expertise im Institut ebenso wie von dessen umfangreicher und leistungsstarker Forschungsinfrastruktur.

Excellent researchers in the fields of electronics, optoelectronics and quantum technologies jointly develop innovations along the semiconductor value chain and bring them into application in close collaboration with partners from industry and science. In doing so, they benefit from the diverse expertise at the institute as well as from its extensive and powerful research infrastructure.

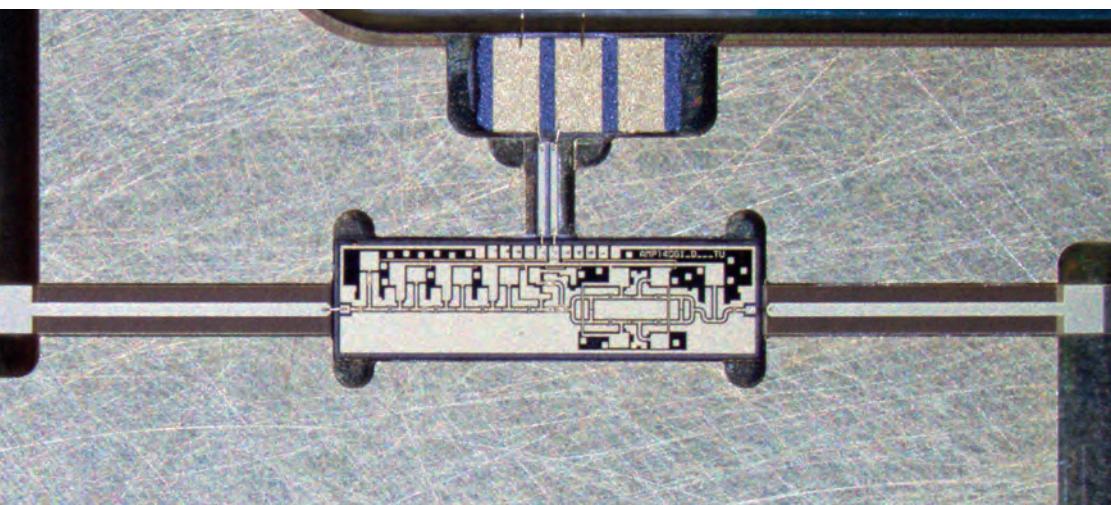
D-Band-Sendemodule mit hoher Leistungseffizienz

D-band transmitter modules with high power efficiency

Im Fraunhofer-Leitprojekt »6G SENTINEL« arbeitet das Fraunhofer IAF gemeinsam mit den Instituten Fraunhofer IIS, HHI, FOKUS und IZM an ausgewählten Grundlagen für die Gestaltung zukünftiger Kommunikationsnetze für den Mobilfunk der sechsten Generation. Dabei ist es den Forschenden des Fraunhofer IAF gelungen, Sendemodule für eine Mehrkanalübertragung im D-Band zu entwickeln, die eine maximale Leistungseffizienz von mehr als 10 % erreichen.

Dr. Dirk Schwantuschke

In the Fraunhofer lighthouse project 6G SENTINEL, Fraunhofer IAF is working together with the Institutes Fraunhofer IIS, HHI, FOKUS and IZM on selected basics for the design of future communication networks for sixth-generation mobile communications. The researchers at Fraunhofer IAF have succeeded in developing transmitter modules for multi-channel transmission in the D-band that achieve a maximum power efficiency of more than 10 %.



Der MMIC auf GaN-Basis bildet mit seinen Maßen von 4,5 mm x 1 mm das Kernelement des Sendemoduls.
With its dimensions of 4.5 mm x 1 mm, the GaN-based MMIC forms the core element of the transmitter module.

Im Fraunhofer-Leitprojekt »6G SENTINEL« (»Six-G Enablers: Flexible Networks, THz Technology and Integration, Non-Terrestrial Networks, SidElink, and Localization«) widmen sich die beteiligten Institute neben Fragestellungen zur Netzarchitektur, Lokalisierung, Messung und Simulation von Übertragungskanälen auch der Entwicklung von Hardware. Das Fraunhofer IAF hat dafür Sendemodule realisiert, die als Kernbaustein erstmalig MMICs auf Basis von Galliumnitrid (GaN) für die Übertragung komplexer Signale bei einer Mittenfrequenz von 140 GHz und einer angestrebten Bandbreite von 10 GHz verwenden. Zum Vergleich wurden GaN-Technologien mit 100 nm Gate-länge sowie 70 nm Gatelänge eingesetzt.

Das Ziel der Forschenden besteht darin, mit dem Sendemodul eine möglichst hohe lineare Ausgangsleistung über möglichst weite Übertragungsstrecken zu erreichen. Der am Fraunhofer IAF entwickelte Chip (4,5 mm x 1 mm) besteht aus einem vierstufigen Verstärker, der ein zweifaches Power-Combining verwendet. Auf Chipebene wird damit eine Kleinsignalverstärkung von 20 dB (100 nm) bzw. 23 dB (70 nm) erzielt. Die zugehörigen Sättigungsleistungen betragen 20 dBm (100 mW) bzw. 23 dBm (200 mW). Somit haben die Forschenden eine maximale Leistungseffizienz von mehr als 10 % erreicht. Auf Wafer-Level beträgt die Ausbeute dabei sogar mehr als 50 %.

Vom Chip zum Modul

Im weiteren Projektverlauf von »6G SENTINEL« wird das Fraunhofer IZM diese MMICs zusammen mit einer komplexen Mehrlagentechnologie in Patch-Antennen-Arrays integrieren. So kann eine parallele Übertragung von mehreren Funkkanälen demonstriert werden.

Für die ersten Übertragungsexperimente im Einkanal-Betrieb wurden die am Fraunhofer IAF realisierten MMICs in Split-Block-Modulen verbaut, um die geringe Dämpfung von Hohlleitern zu nutzen, die in der Größe WR06 ausgeführt sind. Zudem beinhalten die Module eine Steuerelektronik zur Stabilisierung der anliegenden Spannungen an den Schaltungen sowie die mechanischen Passungen zum Anschluss der genormten Hohlleiterflansche. Die Module erreichen mit den eingesetzten MMICs mit 100 nm Gatelänge im Frequenzbereich zwischen 130 GHz und 150 GHz eine Ausgangsleistung von mehr als 18 dBm (60 mW) und eine Signalverstärkung von ebenfalls 19 dB.

Im Rahmen der »6G SENTINEL«-Kooperation hat der Projektpartner Fraunhofer HHI mit diesen Modulen bereits erste Übertragungsexperimente erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur Veröffentlichung eingereicht. In dem verwendeten Messaufbau konnte dabei durch Reihenschaltung zweier Leistungsmoduln des Fraunhofer IAF eine Signalverstärkung von etwa 37 dB erreicht werden.

In the Fraunhofer lighthouse project 6G SENTINEL ("Six-G Enablers: Flexible Networks, THz Technology and Integration, Non-Terrestrial Networks, SidElink, and Localization"), the participating institutes are addressing issues relating to network architecture, localization, measurement and simulation of transmission channels as well as the development of hardware. Fraunhofer IAF has realized transmitter modules using MMICs based on gallium nitride (GaN) as core component for the first time for the transmission of complex signals at a center frequency of 140 GHz and a target bandwidth of 10 GHz. For comparison, GaN technologies with 100 nm gate length and 70 nm gate length were used.

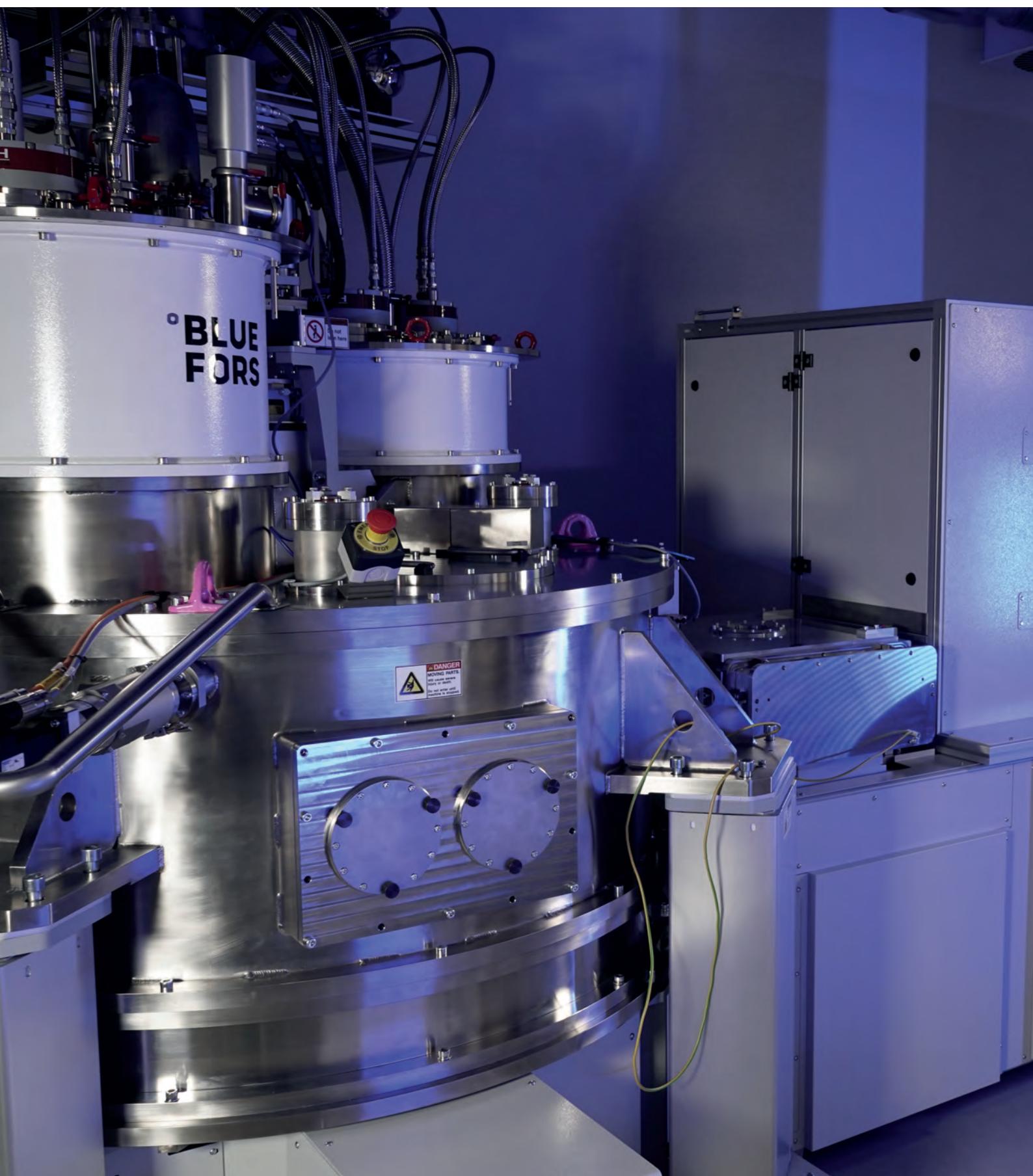
The aim of the researchers is to achieve the highest possible linear output power with the transmitter module over the longest possible transmission distances. The chip (4.5 mm x 1 mm) developed at Fraunhofer IAF consists of a four-stage amplifier that uses dual power combining. At chip level, a small signal amplification of 20 dB (100 nm) and 23 dB (70 nm) is achieved. The corresponding saturation powers are 20 dBm (100 mW) and 23 dBm (200 mW). The researchers have thus achieved a maximum power efficiency of more than 10 %. At wafer level, the yield even surpasses 50 %.

From chip to module

In the further course of the 6G SENTINEL project, Fraunhofer IZM will integrate these MMICs together with a complex multi-layer technology in patch antenna arrays. This will enable the parallel transmission of several radio channels to be demonstrated.

For the first transmission experiments in single-channel operation, the MMICs realized at Fraunhofer IAF were installed in split-block modules in order to exploit the low attenuation of waveguides, which are designed in size WR06. The modules also include control electronics to stabilize the voltages applied to the circuits as well as the mechanical fits for connecting the standardized waveguide flanges. The modules using the MMICs with 100 nm gate length achieve an output power of more than 18 dBm (60 mW) and a signal amplification of 19 dB in the frequency range between 130 GHz and 150 GHz.

As part of the 6G SENTINEL cooperation, the project partner Fraunhofer HHI has already successfully carried out initial transmission experiments with these modules. The results have been submitted for publication. In the measurement setup used, a signal amplification of around 37 dB was achieved by connecting two Fraunhofer IAF power modules in series.





Kryogene Charakterisierung von Quantencomputing- Bauelementen

Cryogenic characterization of quantum computing components

Quantencomputer sind eine Schlüsseltechnologie der Zukunft, doch ihre Entwicklung ist anspruchsvoll. Bei der Umsetzung ihres wesentlichen Baulements, des Qubits, konkurrieren mehrere Ansätze. Die meisten setzen einen kryogenen Betrieb voraus, was thermische Störungen minimiert. Um die Entwicklung solcher Qubits voranzubringen, hat das Fraunhofer IAF 2023 einen kryogenen Wafer-Prober in Betrieb genommen, der Wafer mit Durchmessern von bis zu 300 mm bei Temperaturen bis unter 2 K charakterisiert. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme handelte es sich um die erste Anlage dieser Art in Deutschland, die zweite in Europa.

Quantum computers are a key technology of the future, but their development is challenging. Several approaches are competing for the realization of their essential component, the qubit. Most of them require cryogenic operation, which minimizes thermal interference. In order to advance the development of such qubits, Fraunhofer IAF commissioned a cryogenic wafer prober in 2023, which characterizes wafers with diameters of up to 300 mm at temperatures below 2 K. At the time of commissioning, this was the first system of its kind in Germany and the second in Europe.

*Kryogener Wafer-Prober für die vollautomatische
Charakterisierung von 200-mm- und 300-mm-Wafern.
Cryogenic wafer prober for the fully automated
characterization of 200 mm and 300 mm wafers.*

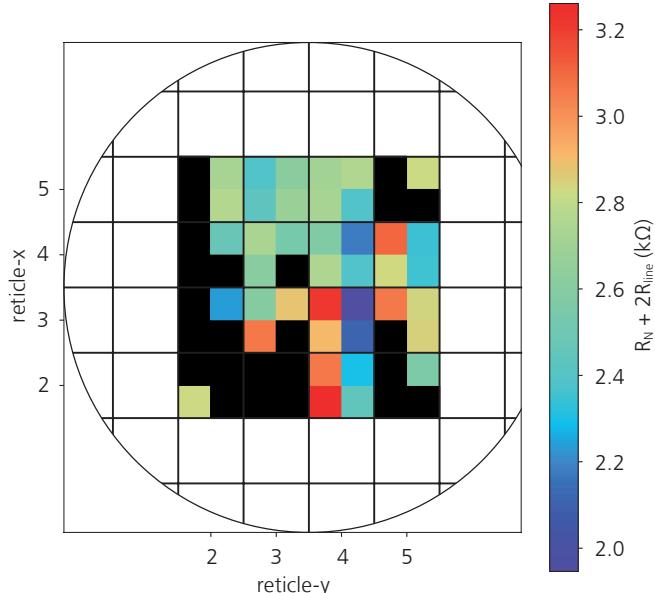
Nikola Komericiki

Es gibt verschiedene physikalische Ansätze zur Realisierung von Qubits. Im Sinne eines generalistischen Quantencomputers ist momentan der auf Supraleitung basierende Ansatz führend. Hierbei werden mit supraleitenden elektronischen Schaltungen künstliche Atome realisiert. Deren Grundzustand und erster angeregter Zustand stellen das relevante quantenmechanische Zwei-Niveau-System dar.

Der meistgenutzte Ansatz für Qubit-Erzeugung auf Supraleiterbasis ist das Transmon-Qubit. In der simpelsten Form besteht es aus einem Kondensator, der parallel zu einem Josephson-Kontakt angeordnet ist. Für ein grundlegendes Verständnis kann man das Transmon-Qubit mit einem LC-Oszillator vergleichen, allerdings resultiert die Induktivität aus dem Josephson-Kontakt, das harmonische Spektrum verändert sich und ermöglicht ein Energie-Delta zwischen dem Grundzustand und ersten angeregten Zustand, das sich von den weiteren Energie-Deltas unterscheidet. Dieser Punkt ist essentiell für die selektive Manipulation und Auslesung.

Josephson-Kontakte in Transmon-Qubits

Ein Josephson-Kontakt ist ein Supraleiter-Isolator-Supraleiter-Kontakt. Im supraleitenden Zustand können die Cooper-Paare durch den Isolator tunneln und es ergibt sich eine nicht lineare V-I-Charakteristik, die eine nicht lineare Induktivität bedingt. Josephson-Kontakte sind also essentielle Subkomponenten für Transmon-Qubits. Als solche bilden sie auch einen Forschungsgegenstand im EU-Projekt »MATQu – Materials for Quantum Computing«, in dem der kryogene Wafer-Prober u. a. zum Einsatz kommt. Mit seiner Hilfe hat das Fraunhofer IAF die V-I-Charakteristik von Josephson-Kontakten über ganze Wafer verschiedener Größen vermessen und daraus den kritischen Strom bestimmt, der für die Induktivität relevant ist. In einem weiterführenden Schritt sollen diese Messergebnisse mit der Performance von Transmon-Qubits desselben Loses mit identischen Josephson-Kontakten verknüpft werden.



There are various physical approaches to the realization of qubits. In terms of a generalist quantum computer, the approach based on superconductivity is currently leading the way. Here, artificial atoms are realized with superconducting electronic circuits. Their ground state and first excited state represent the relevant two-level quantum system.

The most commonly used approach for superconductor-based qubit generation is the transmon qubit. In its simplest form, it consists of a capacitor arranged in parallel with a Josephson junction. For a basic understanding, the transmon qubit can be compared to an LC oscillator. But the inductance results from the Josephson junction, the harmonic spectrum changes and allows an energy delta between the ground state and the first excited state, which is different from the other energy deltas. This point is essential for selective manipulation and readout.

Josephson junctions in transmon qubits

A Josephson junction is a superconductor-insulator-superconductor junction. In the superconducting state, the Cooper pairs can tunnel through the insulator, resulting in a non-linear V-I characteristic that causes a non-linear inductance. Josephson junctions are therefore essential subcomponents for transmon qubits. As such, they are also a subject of research in the EU project MATQu (»Materials for Quantum Computing«), in which the cryogenic wafer prober is used, among other things. With its help, Fraunhofer IAF has measured the V-I characteristics of Josephson junctions across entire wafers of different sizes and determined the critical current relevant to the inductance. In a further step, these measurement results are to be linked with the performance of transmon qubits from the same batch with identical Josephson junctions.

The properties of transmon qubits are measured in the mK range. Until now, it has not been technically possible to characterize entire wafers with diameters of 200 mm and

Wafer-Map, die den Normalzustandswiderstand von 650-nm-Josephson-Kontakten zeigt und aus deren V-I-Charakteristik sowie über einen 150-mm-Wafer bestimmt wurde. Es handelt sich um die ersten Konzept-Messungen im Rahmen des »MATQu«-Projekts auf einem Wafer von VTT. Es wurden 64 Josephson-Kontakte vermessen mit einer Ausbeute von 40, defekte Strukturen sind hier schwarz und nicht gemessene Bereiche weiß abgebildet.

Wafer map showing the normal state resistance of 650 nm Josephson junctions determined from their V-I characteristics and across a 150 mm wafer. These are the first concept measurements as part of the MATQu project on a wafer from VTT. 64 Josephson junctions were measured with a yield of 40. Defective structures are shown in black and unmeasured areas in white.

Die Eigenschaften von Transmon-Qubits werden im mK-Bereich gemessen. Technisch war es bislang nicht möglich, bei mK- oder einstelligen K-Temperaturen ganze Wafer mit Durchmessern von 200 mm und 300 mm zu charakterisieren. Aber die Messfähigkeiten im Bereich unter 2 K, die der neue Wafer-Prober dem Institut erschließt, sollen diese Lücke schließen. Das gilt auch im Rahmen des Ansatzes, den das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt »QUASAR – Halbleiter-Quantenprozessor mit shuttlingbasierter skalierbarer Architektur« verfolgt. Darin liegt der Fokus auf dem Problem der Skalierbarkeit, das den verschiedenen Ansätzen zur Realisierung von Qubits gemein ist. Beim shuttlingbasierten Ansatz des »QUASAR«-Konsortiums dient der Spin eines Elektrons als physikalische Realisierung des Zwei-Niveau-Systems.

Relevanz kryogener Charakterisierung von Qubit-Bauelementen

Die Charakterisierung bei Tiefsttemperaturen ist eine wesentliche Schlüsselkompetenz, um die Fertigung von Quantencomputing-Bauelementen verlässlich zu gestalten und auf industrielles Niveau zu bringen. Das liegt daran, dass sich die Sprungtemperatur der verwendeten Materialien im Bereich von 1 bis 10 K bewegt und die typische Energiedifferenz der zwei Niveaus bei 10 K liegt. Um sowohl die prinzipielle als auch die operative Funktion zu gewährleisten, braucht es kryogene Temperaturen. Die Charakterisierung als Qualitätsprüfung muss demnach ebenfalls bei kryogenen Temperaturen stattfinden, um verlässliche Aussagen über die Qubits und ihre Bauelemente zu treffen. Die Kompetenz, ganze 300-mm-Wafer bei diesen Temperaturen zu charakterisieren, ist eine technische Errungenschaft der letzten Jahre und ermöglicht erstmals systematische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Qubits analog zur Bit-Entwicklung mit Transistoren. Die Abhängigkeit von einzelnen Hero-Samples soll damit überwunden werden.

Weitere Anwendungen neben der Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Quantencomputing eröffnet der kryogene Wafer-Prober in der hochsensitiven kryogenen Sensorik und der kryogenen Elektronik.

Normalzustandswiderstand von 650-nm-Josephson-Kontakten, bestimmt aus deren V-I-Charakteristik als Violinenplot. Die Normalzustandswiderstand-Werte wurden mit Kernel Density Estimation über den Wafer-Radius aufgetragen. Es handelt sich um die ersten Konzept-Messungen im Rahmen des »MATQu«-Projekts auf einem Wafer von VTT.

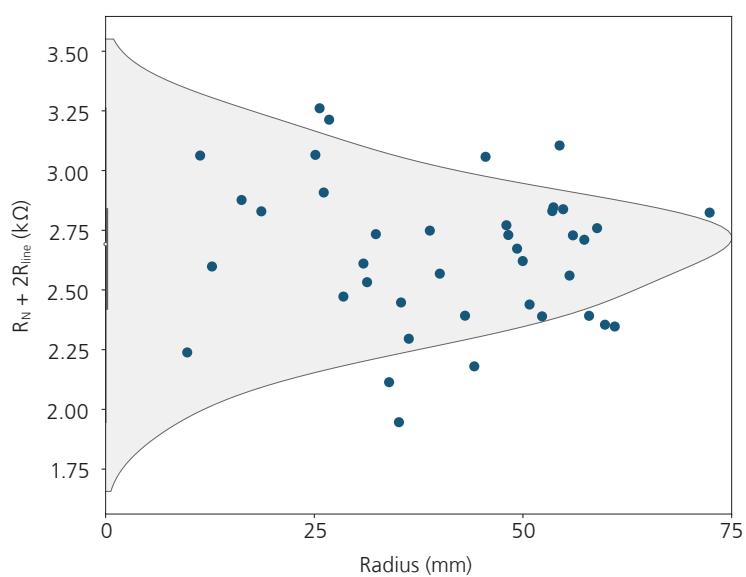
Normal state resistance of 650 nm Josephson junctions, determined from their V-I characteristics as a violin plot. The normal state resistance values were plotted over the wafer radius using kernel density estimation. These are the first concept measurements as part of the MATQu project on a wafer from VTT.

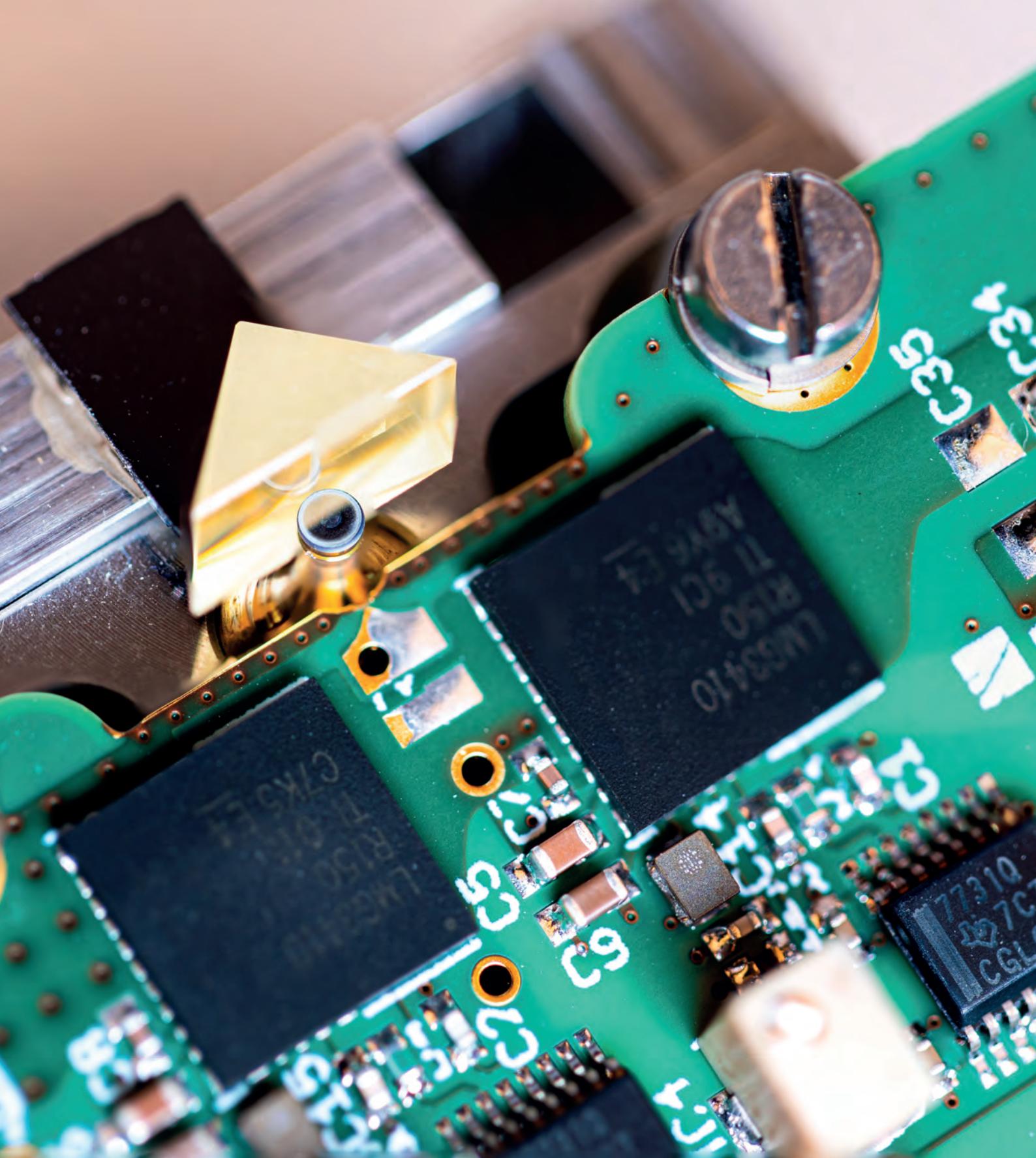
300 mm at mK or single-digit K temperatures. However, the measuring capabilities in the range below 2 K, which the new wafer prober opens up to the institute, should close this gap. This also applies to the QUASAR project ("Semiconductor Quantum Processor with Shuttling-based Scalable Architecture"), which is funded by the Federal Ministry of Education and Research. The focus here is on the problem of scalability, which is common to the various approaches to the realization of qubits. In the shuttling-based approach of the QUASAR consortium, the spin of an electron serves as the physical realization of the two-level system.

Relevance of the cryogenic characterization of qubit components

Characterization at cryogenic temperatures is an essential key competence for reliably designing the production of quantum computing components and bringing them up to industrial standards. This is due to the fact that the transition temperature of the materials used ranges from 1 to 10 K and the typical energy difference between the two levels is 10 K. Cryogenic temperatures are required to guarantee both the basic and the operational function. Characterization as a quality test must therefore also take place at cryogenic temperatures in order to make reliable measurements of qubits and their components. The ability to characterize entire 300 mm wafers at these temperatures is a technical achievement of the recent years and enables systematic research and development work for qubits for the first time, analogous to bit development with transistors. The aim is to overcome the dependence on individual hero samples.

In addition to research and development work in quantum computing, the cryogenic wafer prober opens up further applications in highly sensitive cryogenic sensor technology and cryogenic electronics.







Laser-Lichtquellen für digital-holografische Koordinatenmesssysteme

Laser light sources for digital holographic coordinate measuring systems

Im Fraunhofer-PREPARE-Projekt »MIAME« entstand das weltweit erste optische Koordinatenmessgerät, das schnelle, vollflächige Vermessungen von großausgedehnten Objekten im Meter-Maßstab mit interferometrischer Präzision (Sub-Mikrometer-Genauigkeit) ermöglicht. Ein entscheidender Bestandteil dieses Systems ist eine völlig neuartige Lichtquelle, die auf sogenannten Flüstergalerie-Resonatoren basiert und eine reproduzierbare, kontrollierte Verstimmung der emittierten Wellenlänge um einige 100 GHz erlaubt.

The Fraunhofer PREPARE project MIAME has created the world's first optical coordinate measuring system that enables fast, full-field measurements of large-scale objects on a meter scale with interferometric precision (sub-micrometer accuracy). A key component of this system is a completely new type of light source based on so-called whispering-gallery resonators, which allows a reproducible, controlled detuning of the emitted wavelength by several 100 GHz.

Im Projekt »MIAME« wurde ein GaN-basierter elektrischer Treiber entwickelt, der Multi-MHz-Spannungspulse bis zu 400 V generieren kann
In the MIAME project, a GaN-based electrical driver was developed that can generate multi-MHz voltage pulses of up to 400 V

Dr. Peter Holl
Dr. Michael Basler

Holografische Abstands- oder Oberflächenmessungen, zum Beispiel bei der Motorenfertigung, können sehr feine Auflösungen (im Sub- μm -Bereich) erreichen. Eine Messung mit einer Wellenlänge deckt jedoch nur einen Eindeutigkeitsbereich in Höhe der halben Wellenlänge ab. In der digitalen Holografie werden daher Aufnahmen mit verschiedenen Wellenlängen zu einer synthetischen Wellenlänge kombiniert. Die Differenz der verwendeten Wellenlängen ergibt die synthetische Wellenlänge: je geringer die Differenz, desto geringer die Auflösung und umso höher der Messbereich. Um große Eindeutigkeitsbereiche im Meter-Bereich zu gewährleisten, werden Lichtquellen mit kleinen, jedoch sehr präzisen Frequenzabständen im MHz- bis GHz-Bereich benötigt.

Flüstergalerie-Ringresonator verstimmt Licht präzise im MHz- und GHz-Bereich

Forschende des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik IPM, der Professur für Optische Systeme des Instituts für Mikrosystemtechnik (IMTEK) an der Universität Freiburg und des Fraunhofer IAF haben ein Koordinatenmesssystem für solche digitalen Holografien realisiert. Die Grundlage für die entwickelte neuartige Lichtquelle legte das IMTEK, das Fraunhofer IAF entwickelte sie derart weiter, dass sie erstmalig in einer realen Messumgebung für die digitale Holografie eingesetzt werden konnte. Die Lichtquelle beruht auf einem Flüstergalerie-Ringresonator aus einkristallinem Lithiumniobat (LiNbO_3), in den Licht eingekoppelt und für einige Zeit gespeichert werden kann. Wird während dieser Zeit eine Spannung an den Resonator angelegt, ändert sich über den elektro-optischen Effekt der Brechungsindex des LiNbO_3 und damit auch die Wellenlänge des im Resonator gespeicherten Lichts linear zur angelegten Spannung. Dieser Effekt ist vergleichbar mit der Frequenzänderung einer Gitarrenseite bei Änderung der Länge. Auf diese Weise lässt sich das Licht um eine präzise Frequenz im MHz- oder GHz-Bereich verstimmen.

Um diesen Effekt für die Messtechnik nutzbar zu machen, müssen zum einen schnelle optische Schalter das Pump- und verstimmte Nutzlicht trennen, um immer nur eine genau definierte Wellenlänge am Ausgang zu haben. Zudem muss die Signalstärke des Nutzlichtes optimiert werden, was den Betrieb der Flüstergalerie-Ringresonatoren bei einer Wellenlänge mit minimaler Absorption in LiNbO_3 voraussetzt. Da sich diese Wellenlänge jedoch nicht für die digitale Holografie eignet, haben die Forschenden außerdem eine Frequenzkonversion in die Lichtquelle integriert. Die kurze Lebensdauer der Photonen im Resonator von ca. 150 ns stellt hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit aller Systemkomponenten. An den Resonator muss in wenigen Nanosekunden eine einstellbare Spannung im Bereich bis 400 V angelegt werden, um die kurze Abklingzeit so effizient wie möglich für die Nutzlichterzeugung zu nutzen.

Holografische Abstands- oder Oberflächenmessungen, zum Beispiel in der Motorenfertigung, können sehr feine Auflösungen (im Sub- μm -Bereich) erreichen. Eine Messung mit einer Wellenlänge deckt jedoch nur einen Eindeutigkeitsbereich in Höhe der halben Wellenlänge ab. In der digitalen Holografie werden daher Aufnahmen mit verschiedenen Wellenlängen zu einer synthetischen Wellenlänge kombiniert. Die Differenz der verwendeten Wellenlängen ergibt die synthetische Wellenlänge: je geringer die Differenz, desto geringer die Auflösung und umso höher der Messbereich. Um große Eindeutigkeitsbereiche im Meter-Bereich zu gewährleisten, werden Lichtquellen mit kleinen, jedoch sehr präzisen Frequenzabständen im MHz- bis GHz-Bereich benötigt.

Whispering-gallery ring resonator precisely detunes light in the MHz and GHz range

Researchers from the Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM, the Chair of Optical Systems at the Department of Microsystems Engineering (IMTEK) at the University of Freiburg, and Fraunhofer IAF have realized a coordinate measuring system for such digital holographs. IMTEK laid the foundation for the novel light source developed, while Fraunhofer IAF refined it to such an extent that it could be used for the first time in a real measurement environment for digital holography. The light source is based on a whispering-gallery ring resonator made of monocrystalline lithium niobate (LiNbO_3), into which light can be coupled and stored for some time. If a voltage is applied to the resonator during this time, the refractive index of the LiNbO_3 and thus also the wavelength of the light stored in the resonator changes linearly to the applied voltage via the electro-optical effect. This effect is comparable to the change in frequency of a guitar string when the length is changed. In this way, the light can be detuned by a precise frequency in the MHz or GHz range.

In order to make this effect usable for measurement technology, fast optical switches must separate the pump and detuned useful light in order to always have only one precisely defined wavelength at the output. In addition, the signal strength of the useful light must be optimized, which requires the operation of the whispering-gallery ring resonators at a wavelength with minimal absorption in LiNbO_3 . However, as this wavelength is not suitable for digital holography, the researchers have also integrated a frequency conversion into the light source. The short lifetime of the photons in the resonator of approx. 150 ns places high demands on the speed of all system components. An adjustable voltage of up to 400 V must be applied to the resonator within a few nanoseconds in order to utilize the short decay time as efficiently as possible for the generation of useful light.

GaN-basierter elektrischer Treiber als Multi-MHz-Spannungspulsgenerator

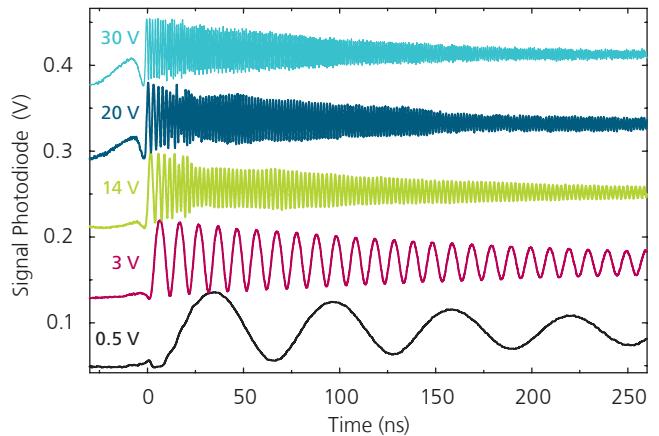
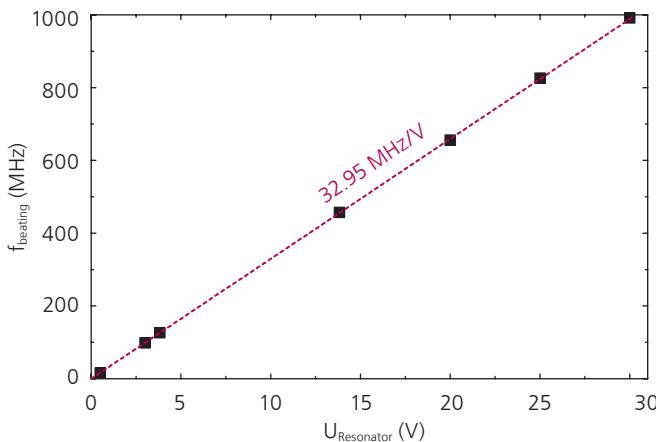
Das Fraunhofer IAF hat elektrische Treiber für den optischen Resonator und optische Schalter entwickelt, die als schnelle Multi-MHz-Spannungspulsgeneratoren für kapazitive Lasten fungieren. Aufgrund der Anforderungen an schnelle Anstiegszeiten im ns-Bereich und Wiederholungsraten im MHz-Bereich kamen dabei Leistungsbauelemente und integrierte Schaltungen auf Basis des ebenfalls am Fraunhofer IAF erforschten Halbleitermaterials Galliumnitrid (GaN) zum Einsatz.

Ende 2023 hat das Forschungsteam die Lichtquelle in einer Messkampagne erfolgreich zur holografischen Messung mit dem Sensorsystem des Fraunhofer IPM eingesetzt. Dafür wurden synthetische Wellenlängen im Bereich von 30 cm bis 2 m erzeugt und damit holografische Bilder aufgenommen. Grundlage der erfolgreichen Ergebnisse am Fraunhofer IAF bildete die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen Opto- und Mikroelektronik bei der Entwicklung des komplexen optischen Aufbaus sowie seiner Ansteuerung mithilfe von GaN-Bauelementen.

GaN-based electrical driver as a multi-MHz voltage pulse generator

Fraunhofer IAF has developed electrical drivers for the optical resonator and optical switches that function as fast multi-MHz voltage pulse generators for capacitive loads. Due to the requirements for fast rise times in the ns range and repetition rates in the MHz range, power devices and integrated circuits (ICs) based on the semiconductor material gallium nitride (GaN) were used. These GaN devices and ICs were also researched at Fraunhofer IAF.

At the end of 2023, the research team successfully used the light source in a measurement campaign for holographic measurements with the Fraunhofer IPM sensor system. Synthetic wavelengths in the range from 30 cm to 2 m were generated and used to record holographic images. The basis for the successful results at Fraunhofer IAF was the interdisciplinary collaboration between the Optoelectronics and Microelectronics departments in developing the complex optical setup and its control using GaN devices.



Die Schwebungsfrequenz zwischen Pumplicht und im Resonator verstimmtem Licht ist linear zur angelegten Spannung
 The beat frequency between the pump light and the light detuned in the resonator is linear to the applied voltage





Feature: Verbindungshalbleiter für europäische Satellitentechnik entlang der Wertschöpfungskette

Feature: Compound semiconductors for European satellite technology along the value chain

Der Klimawandel und die sicherheitspolitische Zeitenwende richten die Blicke wieder verstärkt Richtung Weltraum. Besonders Satelliten als zentrale Mittel der Informationsbeschaffung stehen im Fokus und müssen stetig steigende Anforderungen erfüllen. Am Fraunhofer IAF bündeln Mitarbeitende verschiedener Abteilungen ihre Kompetenzen, um besonders performante und zuverlässige Bauelemente auf GaN- und InGaAs-Basis zu entwickeln, die in Satelliten zur Erdbeobachtung und Kommunikation zum Einsatz kommen. Dabei deckt das Institut die Wertschöpfungskette vom Schaltungsdesign über Materialwachstum, Prozessierung und Charakterisierung bis zum Modulbau in-house ab.

Climate change and the changes in security policy are increasingly turning our attention back to space. Satellites in particular are in the spotlight as a central means of gathering information and have to meet rising requirements. At Fraunhofer IAF, employees from various departments are pooling their expertise to develop cutting-edge high-performance and reliable GaN- and InGaAs-based components that are used in satellites for Earth observation and communication. The institute covers the value chain from circuit design, material growth, processing and characterization to module construction in-house.

Im Mikrowellenradiometer des Arctic Weather Satellite der ESA kommen mehrere extrem rauscharme InGaAs-mHEMT-Verstärker des Fraunhofer IAF zum Einsatz
Several extremely low-noise InGaAs mHEMT amplifiers from Fraunhofer IAF are used in the microwave radiometer of the ESA Arctic Weather Satellite

Die am Fraunhofer IAF entwickelten Schaltungen und Module für Satellitenanwendungen erfüllen die spezifischen Anforderungen für den Einsatz im All auf weltweitem Spitzenniveau. In Zusammenarbeit mit verschiedenen nationalen wie internationalen Raumfahrtbehörden und -unternehmen trägt das Institut dazu bei, neue Frequenzbänder für hochbitratige Datenübertragung zu erschließen oder Erdbeobachtungsmisionen durchzuführen, die zuverlässigere Wettervorhersagen und Klimaüberwachung ermöglichen sollen. Spezialisiert hat sich das Fraunhofer IAF auf die Entwicklung von monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (monolithic microwave integrated circuits, MMICs) für die Realisierung von extrem empfindlichen Empfangsverstärkern, Mischern sowie leistungsstarken Sende- und Empfangsmodulen. Von der European Space Agency (ESA) wurde es als offizieller Zulieferer qualifiziert. Weitere Vorhaben wurden und werden beispielsweise mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) oder der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA) durchgeführt.

The circuits and modules for satellite applications developed at Fraunhofer IAF meet the specific requirements for use in space at a world-class level. In collaboration with various national and international space agencies and companies, the institute is helping to open up new frequency bands for high-bit-rate data transmission or to carry out Earth observation missions to enable more reliable weather forecasts and climate monitoring. Fraunhofer IAF has specialized in the development of monolithic microwave integrated circuits (MMICs) for the realization of extremely sensitive receiving amplifiers, mixers and powerful transmitting and receiving modules. It has been qualified as an official supplier by the European Space Agency (ESA). Further projects have been carried out with the German Aerospace Center (DLR) and the US National Aeronautics and Space Administration (NASA), for example.



Da wir am Fraunhofer IAF für Satellitenanwendungen alle Schritte der Wertschöpfungskette bis zum Modulbau anbieten, können wir den Stand der Technik mit unseren Technologien immer wieder neu definieren und unsere Innovationen in verlässlichen Komponenten für die Raumfahrt anbieten.«

“Since Fraunhofer IAF offers all steps of the value chain up to the manufacturing of modules for satellite applications, we can constantly redefine the state of the art with our technologies and provide innovations in reliable components for aerospace.”

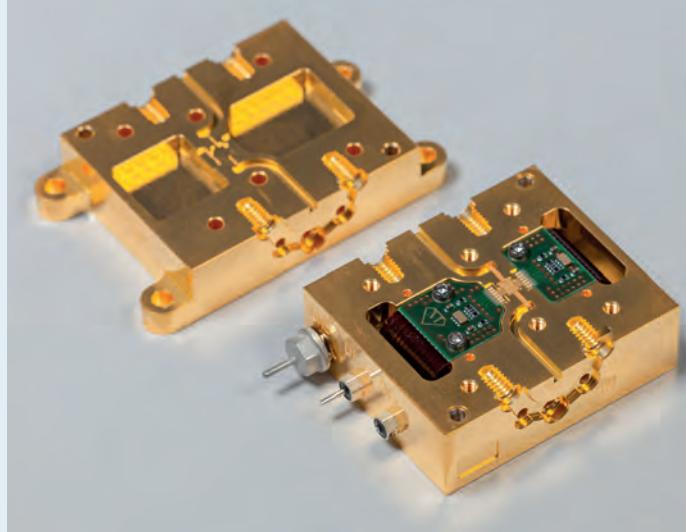
Dr. Sébastien Chartier
Head of Business Unit High-Frequency Electronics



Für den CubeSat EIVe hat das Fraunhofer IAF sowohl LNAs als auch PAs entwickelt, in kompakten Hochfrequenz-Modulen aufgebaut und zur In-Orbit-Verifizierung von neuartigen E-/W-Band-Kommunikationslinks bereitgestellt

For the CubeSat EIVe, Fraunhofer IAF has developed both LNAs and PAs, assembled them in compact high-frequency modules and provided them for in-orbit verification of novel E/W-band communication links

E-Band-Treiberverstärker (medium power amplifier, MPA) in einem vergoldeten Aluminium-Hohlleitermodul für den CubeSat E1VE
E-band medium power amplifier (MPA) in a gold-plated aluminum waveguide module for the CubeSat E1VE



In-house-Entwicklung und -Fertigung von Hochfrequenzelektronik entlang der Wertschöpfungskette

Mithilfe der umfangreichen Forschungsinfrastruktur entwickeln und fertigen Fachkräfte aus den Feldern Physik, Ingenieurwesen und Feinmechanik am Fraunhofer IAF Satellitentechnik entlang der Halbleiter-Wertschöpfungskette. Die Arbeit beginnt mit dem Design der Schaltungen entsprechend der jeweiligen Anforderungen an das spätere System und reicht bis zum Aufbau und der Qualifizierung einsatzbereiter Module, die Partner und Kunden in Satelliten und Bodenstationen integrieren. Den Schaltungsentwurf, das Materialwachstum, die Prozessierung und Charakterisierung sowie den Aufbau von Modulen führen Mitarbeitende der Abteilungen Mikroelektronik, Epitaxie, Technologie und Technische Dienste in enger Zusammenarbeit durch.

Verstärker-MMICs basierend auf GaN-HEMT- und InGaAs-mHEMT-Technologien

Für Radiometrie-Anwendungen entwickeln Forschende der Abteilungen Mikroelektronik und Technologie neuartige metamorphe Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (metamorphic high-electron-mobility transistors, mHEMTs) auf Basis des Verbindungshalbleiters Indiumgalliumarsenid (InGaAs). Diese ermöglichen extrem rauscharme und somit empfindliche Empfänger, mit denen Erdbeobachtungssatelliten die von der Erde ausgehenden Millimeterwellen extrem präzise detektieren, wodurch eine Vielzahl an Daten für verlässlichere Wettervorhersagen gewonnen werden können. Rauscharme Verstärkerschaltungen (low noise amplifier, LNA) mit InGaAs-mHEMTs hat das Fraunhofer IAF beispielsweise im Rahmen von ESA-Projekten im Frequenzbereich zwischen 54 und 229 GHz für den Wettersatelliten MetOp-SG oder für den Arctic Weather Satellite (AWS) realisiert. Letzterer soll einer Konstellation von knapp 30 Kleinsatelliten vorausgehen, die in 600 km Höhe den gesamten Globus abdecken und konstant Wetterdaten von jedem Ort der Erde liefern. Dies würde kurzfristigere Wettervorhersagen, sogenanntes Nowcasting, und bessere Klimabeobachtungen ermöglichen. Aktuell laufen zudem die Evaluierungsprojekte »Weather« (»Low Noise Amplifier at 600 Gigahertz«) und »Preliminary reliability assessment of mm-wave and sub-mm-wave MMICs«, in denen die Leistungsfähigkeit (Frequenzen bis 680 GHz) und Lebensdauer (Frequenzen bis 325 GHz) von neu entwickelten LNAs auf dem Prüfstand stehen.

In-house development and manufacturing of high frequency electronics along the value chain

Using the extensive research infrastructure, specialists from the fields of physics, engineering and precision mechanics at Fraunhofer IAF develop and manufacture satellite technology along the semiconductor value chain. The work begins with the design of the circuits according to the respective requirements of the future system and extends to the construction and qualification of ready-to-use modules that partners and customers integrate into satellites and ground stations. Employees from the Microelectronics, Epitaxy, Technology and Technical Services Departments work closely together on circuit design, material growth, processing, and characterization as well as module assembly.

Amplifier MMICs based on GaN HEMT and InGaAs mHEMT technologies

For radiometry applications, researchers in the Microelectronics and Technology Departments are developing novel metamorphic high-electron-mobility transistors (mHEMTs) based on the compound semiconductor indium gallium arsenide (InGaAs). These enable extremely low-noise and therefore sensitive receivers with which Earth observation satellites can detect the millimeter waves emitted by Earth with extreme precision, allowing a large amount of data to be obtained for more reliable weather forecasts. Fraunhofer IAF has implemented low-noise amplifier (LNA) circuits with InGaAs mHEMTs, for example, as part of ESA projects in the frequency range between 54 and 229 GHz for the MetOp-SG weather satellite or for the Arctic Weather Satellite (AWS). The latter is to precede a constellation of almost 30 small satellites that will cover the entire globe at an altitude of 600 km and provide constant weather data from any location on Earth. This would enable shorter-term weather forecasts, known as 'nowcasting' and better climate observations. Also, the evaluation projects "Weather" ("Low Noise Amplifier at 600 Gigahertz") and "Preliminary reliability assessment of mm-wave and sub-mm-wave MMICs" are currently underway. In these projects, researchers test the performance (frequencies up to 680 GHz) and service life (frequencies up to 325 GHz) of newly developed LNAs.



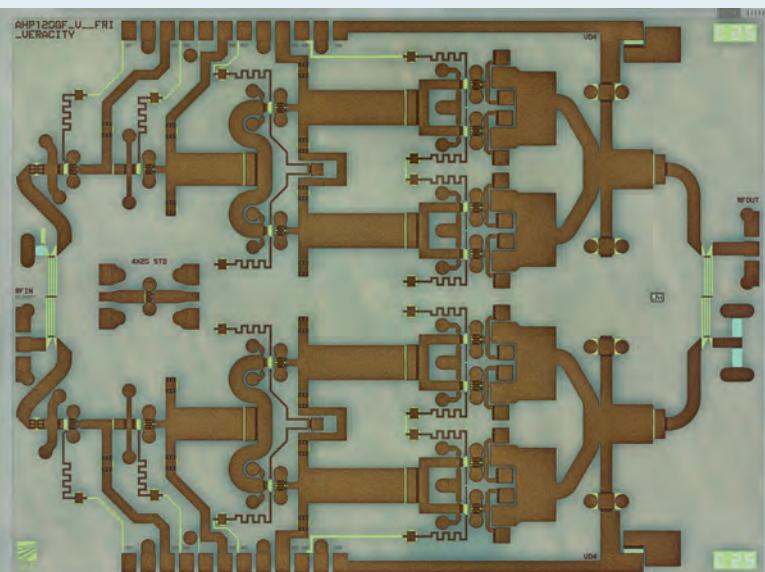
Wir haben viel investiert, um die hohen Qualitätsanforderungen internationaler Raumfahrtbehörden zu erfüllen. Die vielen erfolgreichen Projekte und Aufträge zeigen, dass sich die Arbeit gelohnt hat.«

“We have invested a lot to meet the high quality requirements of international space agencies. The many successful projects and orders show that the work has paid off.”

Dr. Arnulf Leuther
Group Manager Structuring and Deputy Head of Department Technology

Für die Satellitenkommunikation entwickeln die Forschenden Galliumnitrid-(GaN) basierte Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (high-electron-mobility transistors, HEMTs), die sich durch hohe Leistung auszeichnen. Dies ermöglicht zum einen hohe Reichweiten, zum anderen große Bandbreiten und dementsprechend hohe Datenübertragungsraten. Aktuell kommen GaN-HEMTs in Projekten zum Einsatz, in denen die Frequenzbereiche des Ka-Bands (26,5–40 GHz), Q-Bands (33–50 GHz), V-Bands (50–75 GHz) und E-Bands (60–90 GHz) erschlossen werden. Die Herausforderung bei der Entwicklung von GaN-Leistungsverstärkern (Power Amplifier, PA) besteht in der weiteren Steigerung der Effizienz, um Abwärme zu reduzieren, und einer Verbesserung ihrer Linearität, um Signalverzerrungen so gering wie möglich zu halten. Da Verbesserungen in der Leistung, Effizienz und Linearität sich physikalisch betrachtet jedoch widersprechen, gilt es Schaltungen zu realisieren, die sich den verschiedenen Parametern je nach Anwendung unterschiedlich stark annähern und so die bestmögliche Performance für den jeweiligen Fall bieten.

For satellite communication, the researchers are developing HEMTs based on gallium nitride (GaN), which are characterized by high performance. This enables long ranges on the one hand, and large bandwidths and correspondingly high data transfer rates on the other. GaN HEMTs are currently being used in projects for the development of the Ka-band (26.5–40 GHz), Q-band (33–50 GHz), V-band (50–75 GHz), and E-band (60–90 GHz) frequency ranges. The challenge in the development of GaN power amplifiers (PA) is to further increase their efficiency to reduce waste heat and improve their linearity to minimize signal distortion. However, since improvements in power, efficiency, and linearity are physically contradictory, it is necessary to realize circuits that approach the various parameters to different degrees depending on the application and thus offer the best possible performance for the respective case.



GaN-Verstärkerschaltung für Inter-Satelliten-Kommunikationslinks im V-Band (hier: 57–70 GHz)
GaN amplifier circuit for inter-satellite communication links in the V-band (here: 57–70 GHz)

Schaltungsdesign und Technologieentwicklung in enger Abstimmung

Das Schaltungsdesign gestalten Forschende der Abteilung Mikroelektronik entsprechend den jeweiligen Anforderungen an die spätere Satellitenkomponente. Auf einen abstrakten Entwurf folgt ein komplexes Layout, das in der Regel zwischen zehn und 20 Lagen umfasst, die verschiedenen Technologie-Prozessschritten wie dem Fotolithografieren, Implantieren, Ätzen, Aufdampfen, galvanischen Aufwachsen oder Dotieren entsprechen. Im Zuge enger Feedback-Schleifen zwischen den Mitarbeitenden aus Mikroelektronik und Technologie werden Designs stetig verbessert und um neue Eigenschaften erweitert. Mit der Abteilung Epitaxie erfolgt zudem ein enger Austausch über Merkmale und Performance der epitaxierten Wafer und der darauf prozessierten Bauelemente. Da die verschiedenen Abteilungen spezifische Qualitätskriterien für ihre Erzeugnisse (Materialsysteme, Transistoren, Schaltungen) haben und entsprechend messen, ist die enge wechselseitige Abstimmung ein wesentlicher Erfolgsfaktor des Fraunhofer IAF.

Collaborating closely in circuit design and technology development

Researchers in the Microelectronics Department create the circuit design according to the respective requirements of the future satellite system. An abstract design is followed by a complex layout, which usually comprises ten to 20 layers corresponding to various technology process steps such as photolithography, implantation, etching, vaporizing, galvanic growth, or doping. In the course of close feedback loops between employees from microelectronics and technology, designs are constantly improved and new properties are added. There is also a close exchange with the Epitaxy Department about the characteristics and performance of the epitaxial wafers and the components processed on them. As the various departments have specific quality criteria for their products (material systems, transistors, circuits) and measure them accordingly, close mutual collaboration is a key success factor for Fraunhofer IAF.



Dank unserer engen abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit können wir hochperformante Schaltungen in verschiedenen Frequenzbändern bis 200 GHz demonstrieren und gleichzeitig im Hinblick auf Technologietransfers die Zuverlässigkeit kontinuierlich verbessern.«

“Thanks to our close cross-departmental collaboration, we can demonstrate high-performance circuits in various frequency bands up to 200 GHz while continuously improving reliability in terms of technology transfers.”

Christian Friesicke

Group Manager High-Frequency Power Devices and Circuits in the Department Microelectronics

Epitaxie liefert das Ausgangsmaterial in höchster Güte

Buchstäblich die Grundlage der innovativen MMIC-Technologien für Satellitenanwendungen bilden die hochwertigen GaN- und InGaAs-Schichtstrukturen, die die Abteilung Epitaxie im Reinraum des Fraunhofer IAF wächst. Halbleiterschichten für GaN-basierte Anwendungen stellt die Gruppe Nitride von Dr. Stefano Leone mittels metallorganischer chemischer Gasphasenabscheidung her (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD). Schichtstrukturen auf GaAs-Grundlage wachsen Kathrin Frei und Tom Meyer aus der Gruppe Arsenide-Phosphide mittels Molekularstrahlepitaxie (molecular beam epitaxy, MBE). Der enge Austausch mit anderen Gruppen und Abteilungen ist dabei von besonderer Bedeutung. Angefangen bei der Gruppe Strukturanalyse um Dr. Lutz Kirste, die Präzisionsmessverfahren wie hochauflösende Röntgendiffraktometrie und Sekundärionen-Massenspektrometrie zur Materialanalyse einsetzt, hin zu den Abteilungen Technologie und Mikroelektronik, die das epitaxierte Material zu Transistoren verarbeitet und die aufgebauten Schaltungen charakterisieren: Nur eine enge Zusammenarbeit ermöglicht es, verlässlich optimierte Halbleiterstrukturen für bestimmte Anwendungen zu produzieren und sie zugleich kontinuierlich zu verbessern.

Epitaxy supplies high-quality materials

The high-quality GaN and InGaAs layer structures grown by the Department Epitaxy in the Fraunhofer IAF clean room literally form the basis of the innovative MMIC technologies for satellite applications. Semiconductor layers for GaN-based applications are grown by Dr. Stefano Leone's Nitrides Group using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). Kathrin Frei and Tom Meyer from the Group Arsenides/Phosphides are growing GaAs-based layer structures using molecular beam epitaxy (MBE). The close exchange with other groups and departments is of particular importance here. Starting with the Structural Analysis Group led by Dr. Lutz Kirste, which uses precision measurement methods such as high-resolution X-ray diffraction and secondary ion mass spectrometry for material analysis, through to the Technology and Microelectronics Departments, which process the epitaxial material into transistors and characterize the assembled circuits: Only close collaboration makes it possible to reliably produce optimized semiconductor structures for specific applications and to continuously improve them at the same time.



Kathrin Frei und Tom Meyer wachsen mit der MBE-Anlage InGaAs-Schichten, mit denen die Abteilung Technologie Transistoren für Verstärkerschaltungen herstellt

Kathrin Frei and Tom Meyer use the MBE system to grow InGaAs layers, which the Technology Department uses to produce transistors for amplifier circuits



Für eine verlässliche Performance der komplexen Transistor-Schaltungen ist eine reproduzierbar hohe Qualität der epitaxierten Halbleiterschichten erforderlich. Um diese gleichbleibend hohe Qualität sicherzustellen, sind wir auf das Feedback aller Gruppen entlang der Wertschöpfungskette angewiesen.«

“For the complex transistor circuits to perform reliably, the epitaxial semiconductor layers must be of a reproducibly high quality. To ensure this consistently high quality, we rely on feedback from all groups along the value chain.”

Dr. Robert Keil

Group Manager Arsenides/Phosphides in the Department Epitaxy

Exkurs zur MBE

Bei der MBE werden Substrate – für GaAs-basierte Anwendungen in der Regel auf 4"-Wafern – in einer Ultrahochvakuumkammer mit den Molekülen verschiedener elementarer Ressourcen wie Gallium, Aluminium oder Indium bestrahlt. Durch spezifische Einstellungen der Temperatur und des molekularen Fluxes ordnen sich die Atome der zu wachsenden Schichten in der gewünschten Dicke und Reihenfolge einkristallin auf dem Substrat an – und dies mit der Präzision einzelner atomarer Lagen (»Epitaxie« leitet sich aus dem Altgriechischen ab: »epí taxis«, »auf Ordnung, Ausrichtung«). Sind Schicht und Substrat nicht aus demselben Material, kann es aufgrund der unterschiedlichen Atomabstände im Kristallgitter leicht zu Wachstumsdefekten kommen, was diese sogenannte Heteroepitaxie sehr herausfordernd macht. Das Können und die Erfahrung der Epitaxie-Mitarbeitenden ist daher entscheidend für den Erfolg der Wachstumsvorgänge, die bis zu mehreren Stunden dauern können.

Excursion on MBE

In MBE, substrates — usually on 4" wafers for GaAs-based applications — are irradiated in an ultra-high vacuum chamber with the molecules of various elementary resources such as gallium, aluminum or indium. Specific temperature and molecular flux settings cause the atoms of the layers to be grown to form a single crystal on the substrate in the desired thickness and sequence — with the precision of individual atomic layers ('epitaxy' is derived from the ancient Greek: 'epí taxis', 'on order, alignment'). If the layer and substrate are not made of the same material, growth defects can easily occur due to the different atomic distances in the crystal lattice, which makes this so-called heteroepitaxy very challenging. The skill and experience of the epitaxy staff is therefore crucial for the success of the growth processes, which can take up to several hours.

Präzisionsarbeit in der Feinmechanik

Die Gehäuse für Hochfrequenzmodule stellen die Feinmechaniker Stephan Kolleth und Thomas Hellstab in der haus-eigenen Werkstatt des Fraunhofer IAF her. Dafür nutzen sie zwei moderne 5-Achs-CNC-Fräsmaschinen, die 2019 und 2023 beschafft wurden. Anhand von CAD-Zeichnungen (computer-aided design) der zu fertigenden Module, die sie aus der Abteilung Mikroelektronik erhalten, simulieren sie die Modulfertigung, optimieren den Ablauf der Arbeitsschritte und wählen passendes Feinwerkzeug, das Durchmesser bis hinab zu 0,06 mm erreicht. Die Anzahl der Arbeitsschritte und folglich die Herstellungsdauer einer Bauteilhälfte variiert dabei je nach Komplexität des Bauteils. Die Laufzeit der ersten Aufspannung beträgt zwischen 45 Minuten und 4 Stunden zuzüglich einer potenziell ebenfalls mehrstündigen Programmierungszeit.

Bei der Bearbeitung wird das in einem späteren Schritt vergolde Rohmaterial – meist Messing, für Satellitenanwendungen aber auch anwendungsspezifische Aluminiumlegierungen – Schritt für Schritt von allen Seiten durch das Werkzeug abgetragen. Hierbei ist höchste Präzision gefragt, da die beiden Hälften eines Moduls so exakt wie möglich aufeinanderpassen müssen, um die elektromagnetischen Wellen später nahezu verlustfrei zum Chip hin und vom ihm weg leiten zu können. Mithilfe optischer Messgeräte können Kolleth und Hellstab die angefertigten Module vor Ort überprüfen und direkt Verbesserungen im Herstellungsprozess vornehmen.



Die Herausforderung besteht darin, je nach vorgegebenem Material und dessen Bearbeitung die optimale Frästrategie für ein Bauteil zu finden.«

“The challenge is to find the optimum milling strategy for a component depending on the specified material and its processing.”

Thomas Hellstab und Stephan Kolleth

Precision mechanics in the Department Technical Services

Die Feinmechaniker Stephan Kolleth und Thomas Hellstab (v. l.) fertigen mit der neuen CNC-Fräsmaschine Gehäuse für Verstärkermodule, die in Satelliten zum Einsatz kommen

Precision mechanics Stephan Kolleth and Thomas Hellstab (from left) use the new CNC milling machine to manufacture housings for amplifier modules that are used in satellites

Accurate work in Precision Mechanics

Precision mechanics Stephan Kolleth and Thomas Hellstab manufacture the housings for high frequency modules in the in-house workshop of Fraunhofer IAF. They use two modern 5-axis CNC milling machines, which were purchased in 2019 and 2023. Using CAD (computer-aided design) drawings of the modules to be manufactured, which they receive from the Microelectronics Department, they simulate module manufacturing, optimize the sequence of work steps, and select suitable precision tools that can achieve diameters down to 0.06 mm. The number of work steps and consequently the manufacturing time for one half of a component varies depending on its complexity. The running time of the first clamping is between 45 minutes and 4 hours plus a programming time of potentially several hours.

During processing, the gold-plated raw material — usually brass, but also application-specific aluminum alloys for satellite applications — is removed step by step from all sides by the tool. Maximum precision is required here, as the two halves of a module must fit together as precisely as possible in order to be able to guide the electromagnetic waves to and from the chip later on with nearly no loss. Using optical measuring devices, Kolleth and Hellstab can check the manufactured modules on site and make direct improvements to the manufacturing process.



Einsatzbereite PA- und LNA-Module

Der Aufbau und die finale Charakterisierung einsatzbereiter Module bildet im Bereich der Satellitenanwendungen den Schlusspunkt der Wertschöpfungskette am Fraunhofer IAF. Beides erfolgt wieder in der Abteilung Mikroelektronik, die auch für Schaltungsdesign und CAD verantwortlich ist und damit eine Klammer um die Wertschöpfung am Institut bildet. Die Integration in Satelliten findet je nach Projekt bei den spezialisierten Partnern oder Auftraggebern wie dem Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart im Fall des CubeSats EIVE oder OHB Schweden für den Arctic Weather Satellite statt. Letzterer befindet sich bereits in der finalen Testphase und wird nach nur dreijähriger Projektlaufzeit voraussichtlich im Juni 2024 von Kalifornien aus ins All geschickt.

PA and LNA modules ready to use

The construction and final characterization of ready-to-use modules form the final stage of the value chain at Fraunhofer IAF in the field of satellite applications. Both are carried out in the Microelectronics Department, which is also responsible for circuit design and CAD and thus frame in the institute's value chain. Depending on the project, integration into satellites is carried out by specialized partners or clients such as the Institute of Space Systems (IRS) at the University of Stuttgart in the case of the CubeSat EIVE or OHB Sweden for the Arctic Weather Satellite. The latter is already in the final test phase and will be sent into space from California in June 2024 after a project duration of just three years.



**Mit unseren extrem performanten LNA- und PA-Modulen
tragen wir dazu bei, dass europäische Satelliten über
moderne Technik zur globalen Fernerkundung
und Kommunikation verfügen.«**

“With our extremely high-performance LNA and PA modules, we are helping to ensure that European satellites have state-of-the-art technology for global remote sensing and communication.”

Dr. Axel Tessmann

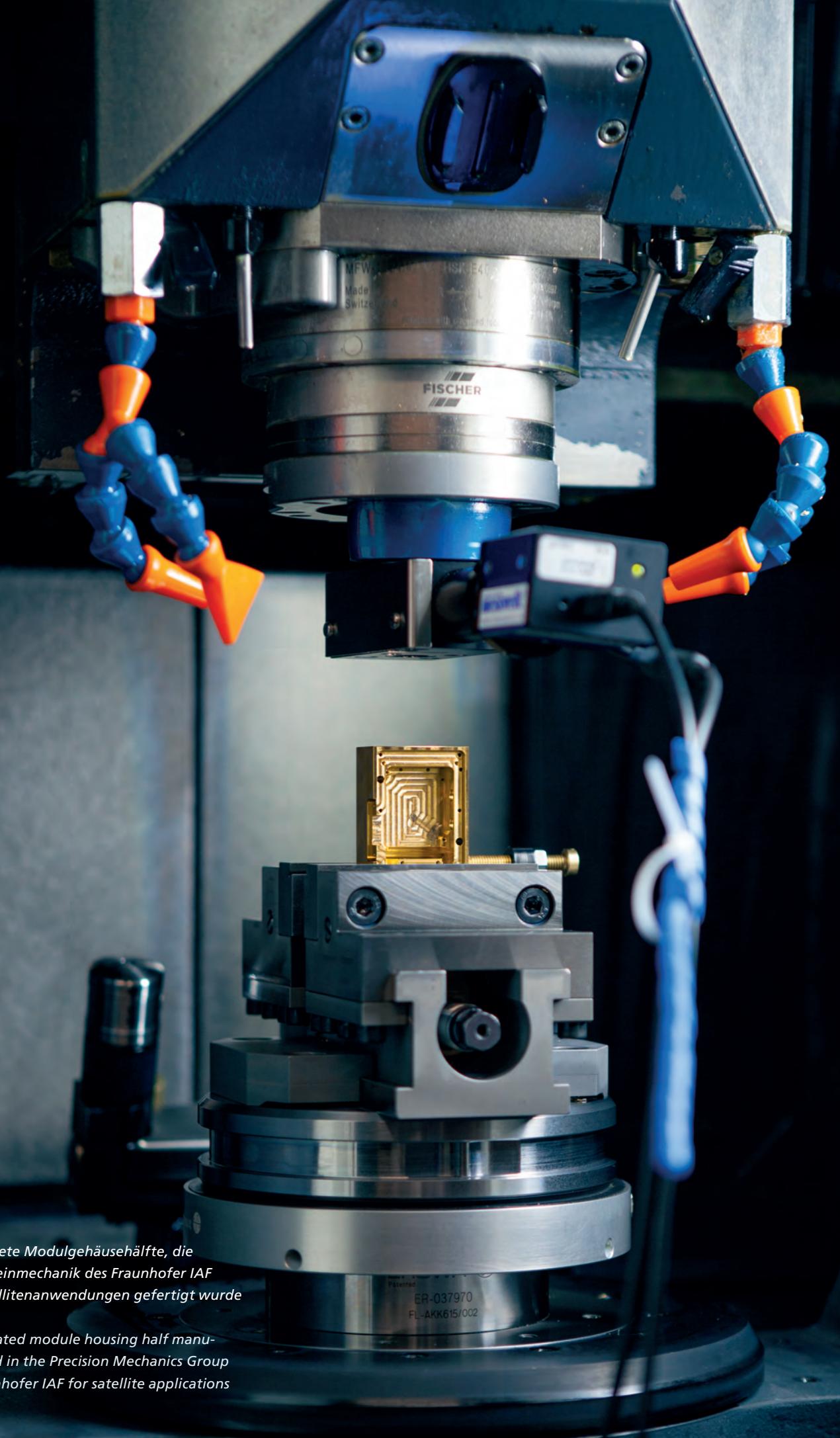
Group Manager Modules and Systems in the Department Microelectronics

Beispiele erfolgreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Satellitenanwendungen

- Rauscharmer monolithischer Mikrowellenverstärker im Frequenzbereich zwischen 54 und 229 GHz für Wetter-satelliten (MetOp-SG und Arctic Weather Satellite)
- Integriertes aktives W-Band-Empfänger-Frontend mit Betriebsfrequenzen zwischen 81 und 86 GHz für hochbiträtige oder langreichweite Datenübertragung bei geringem Energieverbrauch (BEACON)
- Sende- und Empfangsmodule für die Verifizierung von E-/W-Band-Kommunikationslinks, das 50-nm-InGaAs-mHEMT-Technologie für Verstärker, Frequenzvervielfacher und Mischer mit 100-nm-GaN-HEMT-Technologie für Leistungsverstärker kombiniert (E-Band: 71 – 76 GHz, Datenrate: 7 Gbit/s, Tx-Leistung: 33 dBm 2 W, Empfänger-Rauschzahl: 2 dB) (EIVE)
- TX-Module für Satelliten und RX-Module für Bodenstationen zur Messung der Kanalausbreitung im Q-/W-Band (37/75 GHz) (W-Cube)
- Rauscharme Verstärkerschaltungen bei 205 GHz zur Beobachtung von Hurrikänen und Taifunen (NASA-Projekt TROPICS)

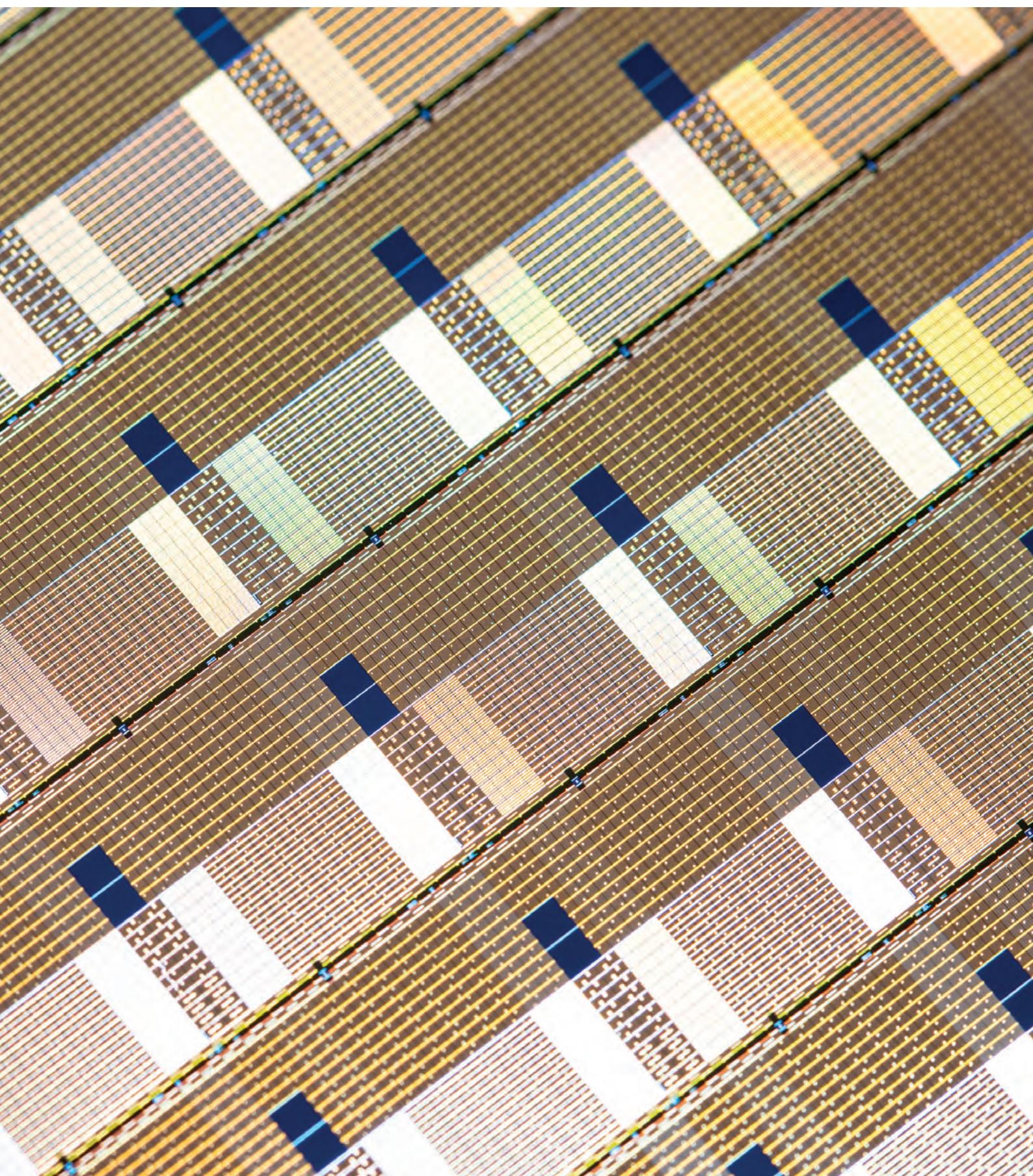
Examples of successful research and development works for satellite applications

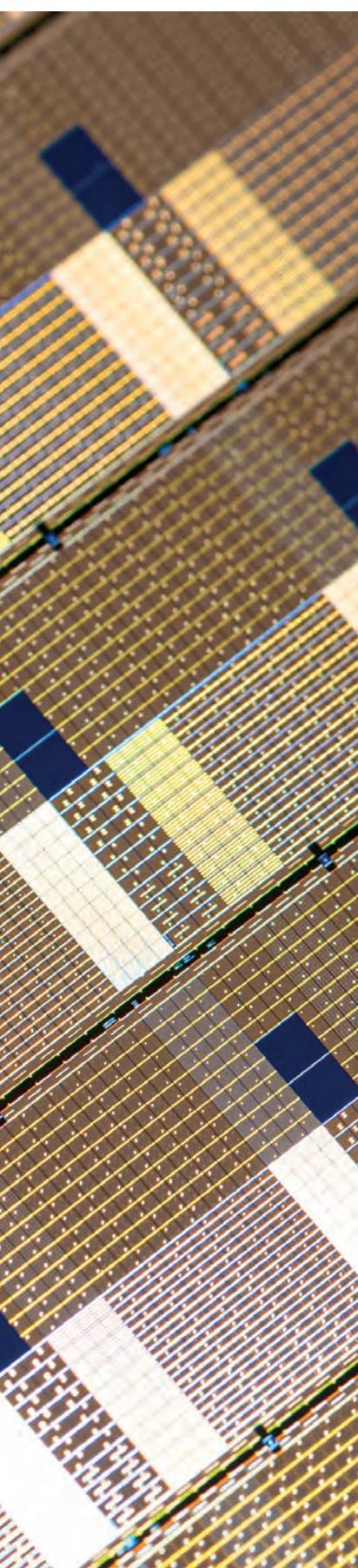
- Low-noise monolithic microwave amplifiers in the frequency range between 54 and 229 GHz for weather satellites (MetOp-SG and Arctic Weather Satellite)
- Integrated active W-band receive front-end with operating frequencies between 81 and 86 GHz for high data rate or long-range data transmission at low power consumption (target noise < 3.5 dB) (BEACON)
- Transmitter module for verification of E-/W-band communication link combining 50 nm InGaAs mHEMT technology for multiplier, mixer, and drive amplifier with 100 nm GaN HEMT technology for power amplifiers (E-band: 71 – 76 GHz, data rate: 7 Gbit/s, Tx power: 33 dBm 2 W, receiver noise figure: 2 dB) (EIVE)
- TX module for satellites and RX module for ground station in order to perform channel propagation measurements in the Q-/W-band (37/75 GHz) (W-Cube)
- LNA circuits at 205 GHz for monitoring hurricanes and typhoons (NASA project TROPICS)



*Vergoldete Modulgehäusehälften, die
in der Feinmechanik des Fraunhofer IAF
für Satellitenanwendungen gefertigt wurde*

*Gold-plated module housing half manu-
factured in the Precision Mechanics Group
of Fraunhofer IAF for satellite applications*





SWIR-SPADs für Sensorik in Mobilität, Kommunikation und Medizin

SWIR-SPADs for sensor technology in mobility, communication and health

Einzelphotonen-Lawinendioden (single-photon avalanche diodes, SPADs) gehören zu den sensitivsten Photodetektoren und können einzelne Lichtteilchen messen. In Verbindung mit dem Spektralbereich des kurzweligen Infrarots (short-wavelength infrared, SWIR), der augensichere Laser und eine höhere Resilienz gegenüber atmosphärischen Partikeln wie Rauch, Nebel und Staub ermöglicht, bilden sie eine Kernkomponente für zukünftige bildgebende LiDAR-Systeme (light detection and ranging). Diese werden in Anwendungsfeldern wie der autonomen Mobilität, Quantenkommunikation und Medizintechnik benötigt.

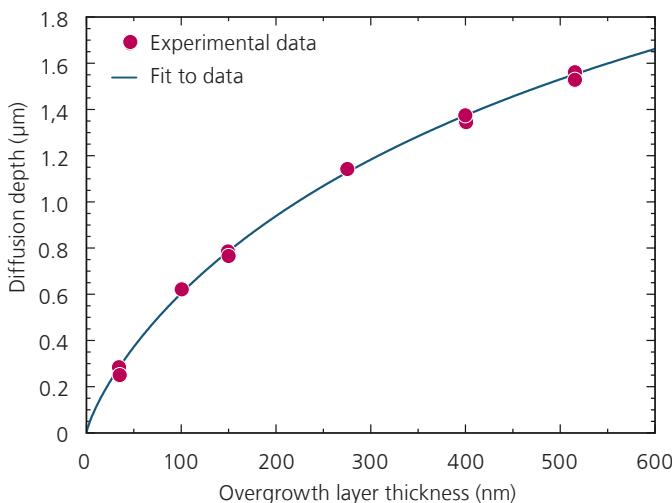
Single-photon avalanche diodes (SPADs) are among the most sensitive photodetectors and can measure individual photons. In combination with the short-wavelength infrared (SWIR) spectral range, which enables eye-safe lasers and greater resilience to atmospheric particles such as smoke, fog, and dust, they form a core component for future LiDAR (light detection and ranging) imaging systems. These are required in applications such as autonomous mobility, quantum communication, and medical technology.

*Nahaufnahme eines InGaAs-SWIR-SPAD-Wafers (3")
Close-up of a 3" InGaAs SWIR SPAD wafer*

Dr. Andreas Wörl

LiDAR-Systeme messen die Laufzeit der rückgestreuten Intensität eines gepulsten Laserstrahls, um äußerst präzise das Umfeld und die Entfernung zu stehenden oder sich bewegenden Objekten darzustellen. Hohe Reichweiten lassen sich allerdings nur mit möglichst sensitiven Photodetektoren erreichen, weshalb SPADs mit ihrer Fähigkeit zur Messung einzelner Lichtteilchen die Photodetektoren der Wahl darstellen.

Durch die Nutzung des SWIR-Spektralbereichs mit Wellenlängen zwischen 1 und 1,7 μm ergeben sich im Vergleich zum sichtbaren Spektralbereich weitere Vorteile: Atmosphärische Partikel wie Rauch, Nebel, Staub etc. werden besser durchdrungen, augensichere Laser mit hoher Ausgangsleistung können genutzt werden und die solare Hintergrundstrahlung wird minimiert. Am besten eignen sich für Detektoren im SWIR die III/V-Verbindungshalbleitermaterialien Indiumgalliumarsenid (InGaAs) und Indiumphosphid (InP). Das Fraunhofer IAF hat eine neue Methode zur Fertigung von InGaAs/InP-SPADs entwickelt, die räumlich hochauflösende Detektormatrizen für bildgebende LiDAR-Systeme ermöglicht.



Der experimentell bestimmte Zusammenhang zwischen der Diffusionstiefe des Dotierstoffes Zink in das intrinsische InP, aufgetragen über die epitaxierte Schichtdicke, dient als Verfahrensvorschrift zur Herstellung einer Zinkdiffusion
The experimentally determined correlation between the diffusion depth of the dopant zinc into the intrinsic InP, plotted against the epitaxial layer thickness, serves as a process rule for manufacturing a zinc diffusion

LiDAR systems measure the transit time of the backscattered intensity of a pulsed laser beam in order to display the surroundings and the distance to stationary or moving objects with extreme precision. However, long ranges can only be achieved with photodetectors that are as sensitive as possible, which is why SPADs with their ability to measure individual photons are the photodetectors of choice.

The use of the SWIR spectral range with wavelengths between 1 and 1.7 μm offers further advantages compared to the visible spectral range: Atmospheric particles such as smoke, fog, dust, etc. are better penetrated, eye-safe lasers with high output power can be used and solar background radiation is minimized. The III-V compound semiconductor materials indium gallium arsenide (InGaAs) and indium phosphide (InP) are best suited for detectors in the SWIR. Fraunhofer IAF has developed a new method for manufacturing InGaAs/InP SPADs that enables high-resolution detector matrices for LiDAR imaging systems.

New method for InGaAs/InP SPAD manufacturing

Diffusion of the dopant zinc plays a key role in the manufacturing of InGaAs/InP SPADs: a spatially limited p-conductive area is created with the aid of a lithographically structured diffusion mask. The geometry of the diffusion profile has a significant influence on the shape of the electric field strength in the active area of the SPAD. SPADs achieve the best possible optoelectronic properties with a diffusion profile in form of a double well. Researchers at Fraunhofer IAF have succeeded in developing an innovative method of selective epitaxial overgrowth for zinc diffusion. Following in-depth experimental research regarding the epitaxial parameters, it was shown that the diffusion depth can be adjusted with the aid of the thickness of the epitaxial overgrowth layer while simultaneously achieving an adequate doping level.

In an InGaAs/InP SPAD, the intrinsic (i) InGaAs absorber for absorbing individual photons and the i-InP multiplier for internal amplification of the photocurrent are the most important functional layers in the vertical layer structure. The other, much thinner layers are used for electrical contacting, for leveling the band edge between InGaAs and InP and for controlling the electric field strength distribution. The course of the field strength can be specifically adjusted through the choice of layer thicknesses and doping as well as the shape of the p-conducting double well profile.

In order to be used in future SWIR single-photon cameras, the SPADs must be integrated into focal plane arrays in a following step. Investigations into this and concepts for optimizing the device properties of the SPADs are currently underway at Fraunhofer IAF.

Neue Methode für die InGaAs/InP-SPAD-Fertigung

Bei der Herstellung von InGaAs/InP-SPADs spielt die Diffusion des Dotierstoffs Zink eine Schlüsselrolle: Mithilfe einer lithografisch strukturierten Diffusionsmaske wird dabei ein räumlich begrenzter p-leitender Bereich erzeugt. Die Geometrie des Diffusionsprofils nimmt wesentlichen Einfluss darauf, wie sich der Verlauf der elektrischen Feldstärke im aktiven Bereich der SPAD ausprägt. SPADs erreichen bestmögliche optoelektronische Eigenschaften mit einem Diffusionsprofil in Form einer Doppelwanne. Forschenden am Fraunhofer IAF ist es gelungen, für die Zinkdiffusion eine innovative Methode des selektiven epitaktischen Überwachsens zu entwickeln. Nach detaillierten experimentellen Forschungsarbeiten bezüglich der Epitaxieparameter konnte gezeigt werden, dass die Diffusionstiefe mit Hilfe der Schichtdicke der epitaxierten Überwachsschicht bei gleichzeitigem Erreichen eines adäquaten Dotierungsniveaus eingestellt werden kann.

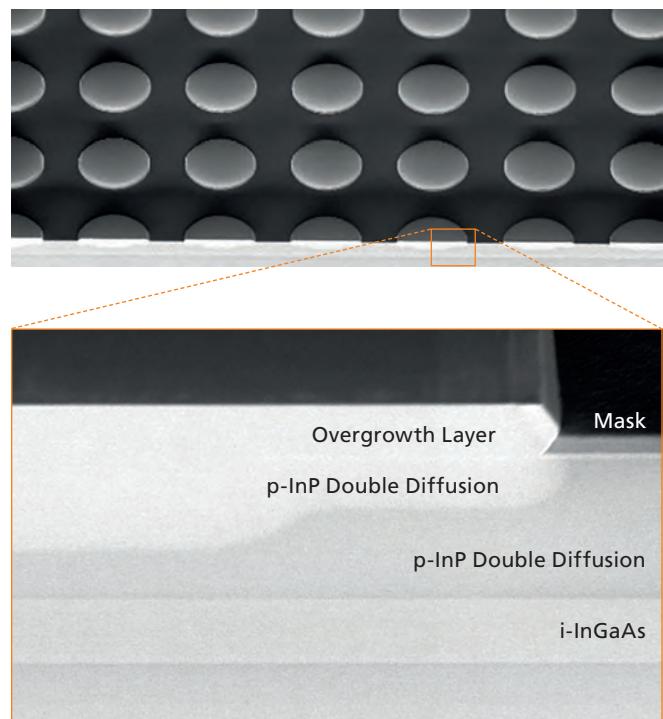
Bei einer InGaAs/InP-SPAD stellen der intrinsische (i) InGaAs-Absorber zur Absorption einzelner Photonen und der i-InP-Multiplikator zur internen Verstärkung des Photostroms die wichtigsten Funktionsschichten in der vertikalen Schichtstruktur dar. Die übrigen, vielfach dünneren Schichten dienen zur elektrischen Kontaktierung, zur Nivellierung des Bandkantenverlaufs zwischen InGaAs und InP sowie zur Kontrolle der elektrischen Feldstärkenverteilung. Der Verlauf der Feldstärke ist durch die Wahl von Schichtdicken und -dotierungen sowie der Ausprägung des p-leitenden Doppelwannenprofils gezielt einstellbar.

Um in zukünftigen SWIR-Einzelphotonenkameras zum Einsatz zu kommen, müssen die SPADs in einem nächsten Schritt in Bildfeldmatrizen integriert werden. Untersuchungen hierzu sowie Konzepte zur Optimierung der Bauelementeigenschaften der SPADs laufen aktuell am Fraunhofer IAF.

Anwendungen: Autonomes Fahren, diagnostische Bildgebung, Quantenverschlüsselung

Die Sensitivität von SWIR-SPADs gepaart mit ihrer Reichweite und ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber Störeinflüssen wie der Witterung erlauben hochpräzise und verlässliche dreidimensionale Bildgebung – sowohl bei direkter Sichtverbindung als auch »um die Ecke« (non-line-of-sight, NLOS). Derart präzise LiDAR-Systeme zur Detektion der Umwelt bilden eine technologische Säule der autonomen Mobilität oder verbesserter bildgebender Verfahren in der medizinischen Diagnostik, etwa bei der Endoskopie.

Die Kompatibilität mit Glasfasertechnologien für den Telekommunikationsbereich ermöglicht außerdem eine Verwendung der InGaAs/InP-SPADs in der Quantenkryptografie. Hierbei werden einzelne Photonen als Quantenschlüssel übertragen und von SPADs detektiert, um Nachrichten zu entschlüsseln.



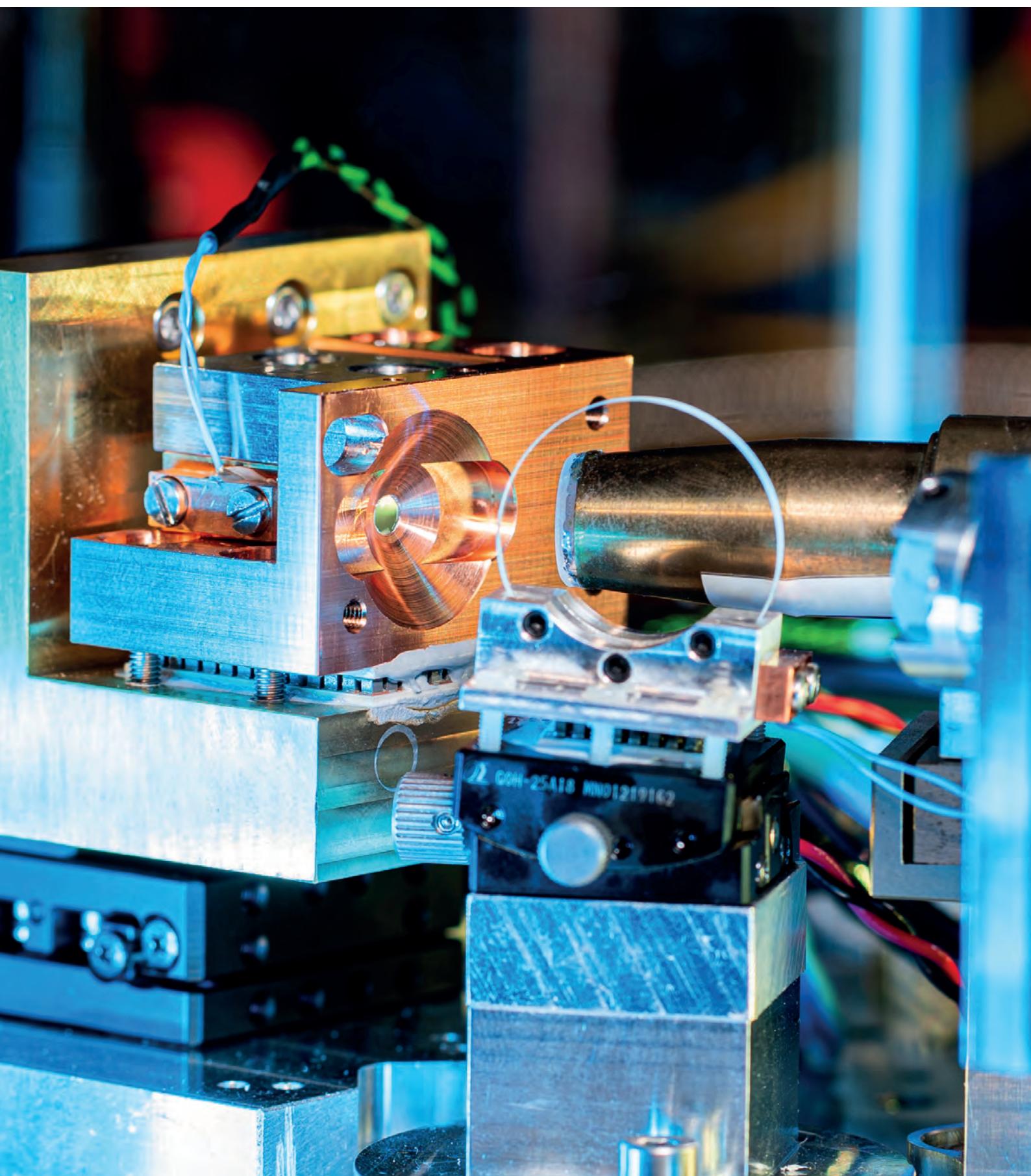
Querschnitt-Aufnahme von matrixförmig angeordneten InGaAs/InP-SPADs im Anschluss an die zweite Zinkdiffusion, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop zur Illustration des Diffusionsprofils in Form einer Doppelwanne, sichtbar in der Vergrößerung einer SPAD

Cross-sectional image of an InGaAs/InP SPAD array immediately after the second zinc diffusion, taken with a scanning electron microscope to illustrate the diffusion profile in the form of a double well, visible in the magnification of a SPAD

Applications: Autonomous driving, medical imaging, quantum key distribution

The sensitivity of SWIR SPADs, coupled with their range and resistance to interference such as weather conditions, enable highly precise and reliable three-dimensional imaging — both with direct line-of-sight and non-line-of-sight (NLOS). Such precise LiDAR systems for detecting the environment form a key technology for autonomous mobility or improved imaging technologies in medical diagnostics, for example in endoscopy.

Compatibility with fiber optic technologies for the telecommunications sector also enables the use of InGaAs/InP SPADs in quantum cryptography. Here, individual photons are transmitted as quantum keys and detected by SPADs in order to decrypt messages.





Scheibenlaser als Enabling Technology für das Quanteninternet

VECSELs as enabling technology for the quantum internet

Forschende des Fraunhofer IAF haben einmodige Scheibenlaser auf Basis von Galliumantimonid entwickelt, die bei einer Leistung von bis zu 2,4 W mit hoher spektraler Genauigkeit den Frequenzbereich zwischen 1,9 und 2,5 μm abdecken und als rauscharme Pumpquelle für Quantenfrequenzkonverter zum Einsatz kommen können. Quantenfrequenzkonversion ermöglicht es, die Wellenlänge von Photonen gezielt zu verändern, ohne die anderen Quanteneigenschaften zu verlieren. Auf diese Weise lässt sich das bestehende Glasfasernetz zu einem Quanteninternet ausbauen, indem die Wellenlänge von Photonen in den 1,55- μm -Telekombereich konvertiert wird.

Researchers at Fraunhofer IAF have developed single-mode VECSELs based on gallium antimonide, which cover the frequency range between 1.9 and 2.5 μm with high spectral accuracy at a power of up to 2.4 W. They can be used as a low-noise pump source for quantum frequency converters. Quantum frequency conversion makes it possible to selectively change the wavelength of photons without losing the other quantum properties. This allows the existing fiber optic network to be expanded into a quantum internet by converting the wavelength of photons into the 1.55 μm telecom range.

Scheibenlaser-Aufbau zur Entwicklung einer rauscharmen Pumpquelle für die Quantenfrequenzkonversion
VECSEL setup for the development of a low-noise pump source for quantum frequency conversion

Dr. Marcel Rattunde

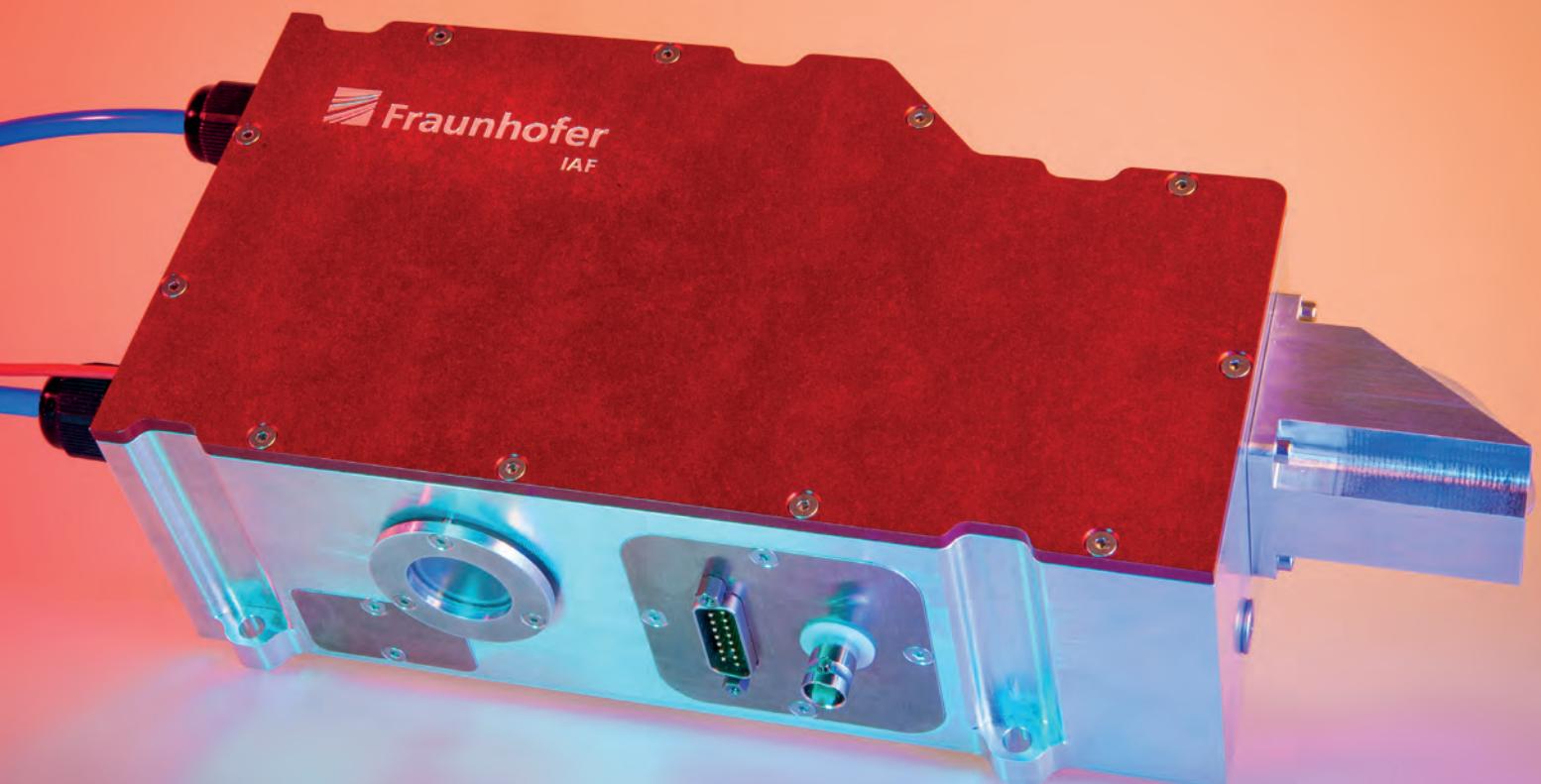
Die Systemwellenlänge der meisten bisher realisierten Quantenbits (Qubits) und Quantenspeicher liegt im sichtbaren oder nahinfraroten Spektralbereich. Um das bestehende, weltumspannende Glasfasernetz zu einem Quanteninternet auszubauen, benötigt man daher Quantenfrequenzkonverter, die die Frequenz bzw. Wellenlänge eines Photons gezielt verändern können und dabei alle anderen Quanteneigenschaften erhalten. Dadurch ist eine Konversion in den 1,55-µm-Telekombereich für die verlustarme, langreichweite Übertragung der Quantenzustände möglich. Der Prozess der Quantenfrequenzkonversion benötigt leistungsstarke, einmodige Pumplaser zwischen 1,9 und 2,5 µm mit hohen Anforderungen an die spektrale Genauigkeit.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes »HiFi – Hochintegrierter Quantenfrequenzkonverter höchster Fidelität auf Basis innovativer Laser-, Faser- und Produktionstechnologie« arbeiten Forschende an der Realisierung aller nötigen Technologien, um Quantenfrequenzkonverter (QFK) mit hoher Effizienz und geringem Rauschen für erste Teststrecken zur Verfügung zu stellen. Diese QFK sind für glasfaserbasierte Quantennetzwerke und Quantumrepeater essentiell und sollen sowohl sichere Kommunikationswege etablieren als auch Quantenprozessoren und -register langreichweitig verschränken.

*Einmodiges Halbleiter-Scheibenlaser-Modul mit bis zu 2,4 W Ausgangsleistung für den Frequenzbereich zwischen 1,9 und 2,5 µm, das als Pumpquelle für Quantenfrequenzkonverter zum Einsatz kommen kann
Single-mode VECSEL module with up to 2.4 W output power for the frequency range between 1.9 and 2.5 µm. It can be used as a pump source for quantum frequency converters*

The system wavelength of most of the quantum bits (qubits) and quantum memories realized to date is in the visible or near-infrared spectral range. In order to expand the existing global fiber optic network into a quantum internet, quantum frequency converters are required, because they can specifically change the frequency or wavelength of a photon while retaining all other quantum properties. This enables conversion to the 1.55 µm telecom range for low-loss, long-range transmission of quantum states. The process of quantum frequency conversion requires powerful, single-mode pump lasers between 1.9 and 2.5 µm with high demands on spectral accuracy.

As part of the joint project HiFi ("Highly integrated quantum frequency converter of the highest fidelity based on innovative laser, fiber and production technology") funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), researchers are working on the implementation of all necessary technologies to provide quantum frequency converters (QFCs) with high efficiency and low noise for initial test tracks. These QFCs are essential for fiber-optic-based quantum networks and quantum repeaters and are intended to establish secure communication channels as well as long-range interconnection of quantum processors and registers.



Schmalbandige und stabile Pumpquelle für Quantenfrequenzkonversion

Bei der Quantenfrequenzkonversion wird mithilfe eines Differenzfrequenz-Prozesses in einem nichtlinearen optischen Kristall die Energie des Pumpphotonen vom Signalphoton abgezogen. Um einen rauscharmen Prozess zu gewährleisten, muss dabei die Energie der Pumpphotonen unterhalb der Zielwellenlänge (meist 1,55 µm) liegen, da sonst der Pumplaser durch parasitäre Effekte Photonen im Ausgangssignal erzeugen kann. Erforderlich ist daher ein Pumplaser, der je nach verwendeter Ausgangswellenlänge der Qubits gezielt eine Wellenlänge zwischen 1,9 und 2,5 µm abdeckt. Außerdem muss der Pumplaser spektral schmalbandig sein und eine extrem gute Stabilität der absoluten Wellenlänge aufweisen (< 1 MHz), da jede Fluktuation der Pumpwellenlänge die Zielwellenlänge der Qubits verändert. Bei einer Abweichung oberhalb der natürlichen Linienbreite ist die Ununterscheidbarkeit der Qubits nicht mehr gegeben, was aber eine Grundvoraussetzung für die nachfolgende quantenmechanische Verarbeitung darstellt.

Einmodige Scheibenlaser mit Bestwert-Ausgangsleistung von 2,4 W

Das Fraunhofer IAF entwickelt daher innerhalb von »HiFi« leistungsstarke, spektral einmodige GaSb-basierte Halbleiter-Scheibenlaser (auch: vertical-external-cavity surface-emitting-laser, VECSEL), die den Bereich von 1,9 bis 2,9 µm abdecken. Es handelt sich um optisch gepumpte, oberflächenemittierende Laser mit externem Resonator und Intracavity-Filter für die Wellenlängenselektion. Die Leistung dieser Laser konnte das Forschungsteam im Rahmen des Projekts erfolgreich auf über 2,4 W im spektral einmodigen Betrieb mit guter Strahlqualität steigern, was einen internationalen Bestwert für diese Laser-Art darstellt. Dabei haben die Forschenden die Emissionswellenlänge exakt auf die Zielwellenlänge für Demonstrationsexperimente an der Faserstrecke der Universität des Saarlandes eingestellt (2062,40 nm), an die das Lasermodul des Fraunhofer IAF mittlerweile übergeben wurde. Neben der Leistungsskalierung bilden das genaue Verständnis des Modenverhaltens der Laser sowie die Identifizierung und Elimination der Rauschquellen die wichtigsten Forschungsaufgaben innerhalb des Projekts.

In enger Kooperation mit dem Projektpartner MENLO Systems GmbH wurde der Laser auf einen Frequenzkamm gelockt, der wiederum an eine 10-MHz-Referenz gekoppelt ist. Dadurch konnten die Forschenden bei 2,4 W Ausgangsleistung eine absolute Wellenlängenstabilität von unter 100 kHz nachweisen, was einer Frequenzstabilität besser als 1E-9 entspricht.

Narrow-band and stable pump source for quantum frequency conversion

In quantum frequency conversion, the energy of the pump photon is subtracted from the signal photon using a differential frequency process in a non-linear optical crystal. In order to ensure a low-noise process, the energy of the pump photons must be below the target wavelength (usually 1.55 µm), as otherwise the pump laser can generate photons in the output signal due to parasitic effects. Therefore, a pump laser is required that specifically covers a wavelength between 1.9 and 2.5 µm, depending on the output wavelength of the qubits used. In addition, the pump laser must be spectrally narrowband and have extremely good stability of the absolute wavelength (< 1 MHz), as any fluctuation in the pump wavelength changes the target wavelength of the qubits. If the deviation exceeds the natural linewidth, the qubits are no longer indistinguishable, which is a basic requirement for subsequent quantum mechanical processing.

Single-mode VECSELs with best output power of 2.4 W

Within HiFi, Fraunhofer IAF is therefore developing powerful, spectrally single-mode GaSb-based semiconductor disk lasers (also: vertical-external-cavity surface-emitting lasers, VECSELs), which cover the range from 1.9 to 2.9 µm. These are optically pumped, surface-emitting lasers with an external resonator and intracavity filter for wavelength selection. As part of the project, the research team was able to successfully increase the power of these lasers to over 2.4 W in spectrally single-mode operation with good beam quality, which represents an international record for this type of laser. The researchers set the emission wavelength exactly to the target wavelength for demonstration experiments at the fiber link of Saarland University (2062.40 nm), to which the Fraunhofer IAF laser module has since been handed over. In addition to power scaling, the most important research tasks within the project are the precise understanding of the mode behavior of the lasers and the identification and elimination of noise sources.

In close cooperation with the project partner MENLO Systems GmbH, the laser was locked to a frequency comb, which in turn is coupled to a 10 MHz reference. This enabled the researchers to demonstrate absolute wavelength stability of less than 100 kHz at 2.4 W output power, which corresponds to a frequency stability better than 1E-9.





Feature: Mit Diamantkugeln zur Fusionsenergie

Feature: Diamond spheres for fusion energy

Im Dezember 2022 feierten die Forschenden des Lawrence Livermore National Laboratory einen beachtlichen Durchbruch: Erstmals gelang es ihnen, mehr Energie aus einer Fusionsreaktion zu gewinnen, als durch die Laserstrahlen in das Target eingestrahlt wurde, und somit das Konzept der Kernfusion als potenzielle Energiequelle zu demonstrieren. Die Nachricht über das erfolgreiche Experiment ging um die Welt. Als Target diente eine winzige Diamantkugel, hergestellt von dem Freiburger Unternehmen Diamond Materials, einer Ausgründung aus dem Fraunhofer IAF.

In December 2022, researchers at the Lawrence Livermore National Laboratory celebrated a remarkable breakthrough: for the first time, they succeeded in obtaining more energy from a fusion reaction than was irradiated into the target by the laser beams, thus demonstrating the concept of nuclear fusion as a potential energy source. News of the successful experiment went around the world. The target used was a tiny diamond sphere manufactured by the Freiburg-based company Diamond Materials, a spin-off from Fraunhofer IAF.

Kleine Maße, großer Impact: Mit ihrem Durchmesser von 2,1 mm bzw. 1 mm sind die Diamantkugeln winzig, für die Erforschung der Kernfusion jedoch von großer Bedeutung
Small size, big impact: With a diameter of 2.1 mm or 1 mm, the diamond hollow spheres are tiny, but of great importance for research into nuclear fusion

Kernfusion ist die Energiequelle der Sonne und aller anderen Sterne. Bei dem Prozess verschmelzen zwei Wasserstoffatome bei extrem hohen Temperaturen und einem extrem hohen Druck zu einem Heliumatom und setzen dadurch eine große Menge Energie frei. Die freigesetzte Bindungsenergie ist so enorm, dass sie den Energiegewinn im Vergleich mit konventionellen Verbrennungsprozessen bei Weitem übersteigt. So lässt sich aus einem Gramm Fusionsbrennstoff ungefähr so viel Energie gewinnen wie aus elf bis 13 Tonnen Öl oder Steinkohle. Darüber hinaus bietet die Fusionsenergie entscheidende Vorteile: Sie ist sauberer und sicher. Da keine fossilen Brennstoffe verbrannt werden, wäre der produzierte Strom CO₂-neutral und würde zudem kaum radioaktiven Abfall produzieren. Bei der Kernfusion sind gefährliche, unkontrollierte Kettenreaktionen physikalisch unmöglich.

Meilensteine in der Forschung

In den letzten Jahren haben Forschungseinrichtungen und Unternehmen weltweit bedeutende Fortschritte bei unterschiedlichen Ansätzen zur Nutzung der Fusionsenergie erzielt. Im Dezember 2022 gelang ein bahnbrechender wissenschaftlicher Meilenstein an der National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in den USA: Erstmals wurde aus einer lasergesteuerten Fusionsreaktion mehr Energie gewonnen, als durch die Laser zur Auslösung der Reaktion in die Brennstoffkapsel eingebracht wurde.

Bei dieser Trägheitsfusion wird eine etwa 2 Millimeter große Diamanthohlkugel, das sogenannte Target, mit gefrorenem Brennstoff (ein Deuterium-Tritium-Gemisch) mit hochintensiver Laserstrahlung indirekt beschossen. Die Laserstrahlung wird in Röntgenstrahlung umgewandelt, wodurch die Diamantkugel das Hundertfache ihrer Dichte und eine Temperatur von bis zu 120 Millionen Grad Celsius erreicht. Wenn die Diamantkugel verdampft, wird der Brennstoff unter gewaltigem Druck zusammengequetscht und gleichzeitig erhitzt. Durch diesen stark komprimierten Zustand kann die Fusionsreaktion stattfinden: Die positiv geladenen Atomkerne überwinden ihre gegenseitige Abstoßung und verschmelzen zu einem neuen, energetisch günstigeren Kern, wobei Energie freigesetzt wird.

Perfekte Diamantkugel als ideales Target

Eine ultrapräzise Kugelform, eine extrem glatte Oberfläche und perfektes Material sind die Voraussetzungen dafür, dass das Target in dem Fusionsexperiment komprimiert werden kann, ohne zu deformieren. Synthetischer Diamant eignet sich aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften ideal: Die winzigen Diamanthohlkugeln lassen sich in eine perfekt runde Form bringen und durch die Einbringung von Fremdatomen können die Absorptionseigenschaften für Röntgenstrahlen maßgeschneidert werden.

Nuclear fusion is the energy source of the sun and all other stars. In the process, two hydrogen atoms fuse at extremely high temperatures and extremely high pressure to form a helium atom, thereby releasing a large amount of energy. The released binding energy is so huge that it far exceeds the energy gain compared to conventional combustion processes. One gram of fusion fuel can produce about as much energy as eleven to 13 tons of oil or hard coal. In addition, fusion energy offers decisive advantages: it is cleaner and safe. As no fossil fuels are burned, the electricity produced would be CO₂-neutral and would also produce little radioactive waste. With nuclear fusion, dangerous, uncontrolled chain reactions are physically impossible.

Milestones in research

In recent years, research institutions and companies worldwide have made significant progress in various approaches to the use of fusion energy. In December 2022, a groundbreaking scientific milestone was achieved at the National Ignition Facility (NIF) at Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in the USA: for the first time, more energy was obtained from a laser-controlled fusion reaction than was introduced into the fuel capsule by the lasers used to trigger the reaction.

In this inertial confinement fusion process, an approximately 2-millimeter diamond hollow sphere, the so-called target, is indirectly irradiated with frozen fuel (a deuterium-tritium mixture) using high-intensity laser radiation. The laser radiation is converted into X-rays, causing the diamond sphere to reach a hundred times its density and a temperature of up to 120 million degrees Celsius. When the diamond sphere vaporizes, the fuel is compressed under enormous pressure and heated at the same time. This highly compressed state enables the fusion reaction: the positively charged atomic nuclei overcome their mutual repulsion and fuse to form a new, energetically more favorable nucleus, releasing energy in the process.

Perfect diamond sphere as the ideal target

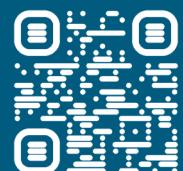
An ultra-precise spherical shape, an extremely polished surface and perfect material are the prerequisites for the target to be compressed in the fusion experiment without deforming. Synthetic diamond is ideal due to its unique properties: the tiny diamond hollow spheres can be formed into a perfectly round shape and the absorption properties for X-rays can be tailored by introducing foreign atoms.

Forschung zu Diamantkugeln startete am Fraunhofer IAF

Die Technologie für die Herstellung der Diamantkugel, wie sie bei dem Experiment am LLNL verwendet wurde, wurde am Fraunhofer IAF bereits vor Jahrzehnten entwickelt. Die Ausgründung Diamond Materials hat das Konzept weiterentwickelt und optimiert. Mittlerweile besteht die Kugelwand aus mehreren maßgeschneiderten Lagen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. So leisteten die Forschenden am Fraunhofer IAF und Diamond Materials einen wichtigen Beitrag zur Erforschung der Fusionsenergie als Energiequelle der Zukunft.

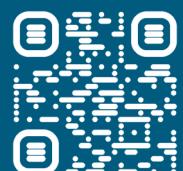
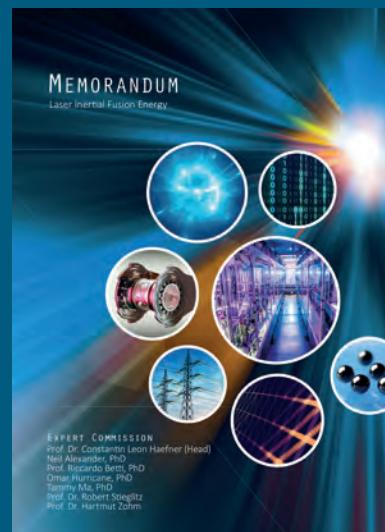
Research on diamond spheres began at Fraunhofer IAF

The technology for producing the diamond sphere, as used in the experiment at LLNL, was developed at Fraunhofer IAF decades ago. The spin-off Diamond Materials has further developed and optimized the concept. Today, the spherical wall consists of several customized layers with different material properties. In this way, the researchers at Fraunhofer IAF and Diamond Materials have made an important contribution to research into fusion energy as the energy source of the future.



»Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen« *Positionspapier Fusionsforschung* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

“Towards the energy supply of tomorrow” Position paper on fusion research by the Federal Ministry of Education and Research (German only)



Memorandum Laser Inertial Fusion Energy

Interview: »Die perfekte Diamantkugel erfordert viel Know-how und ein aufwendiges Verfahren«

Interview: “The perfect diamond sphere requires a great deal of expertise and a complex process”

Dr. Christoph Wild und Tobias Fehrenbach von Diamond Materials stellten die perfekte Diamantkugel für das erfolgreiche Experiment zur Kernfusion am Lawrence Livermore National Laboratory her. Im Interview sprechen sie über ihre Anfänge in der Diamantforschung, über die Herausforderungen bei der Herstellung der Diamantkugeln und über ihre Zusammenarbeit mit dem LLNL.

Dr. Christoph Wild and Tobias Fehrenbach from Diamond Materials produced the perfect diamond sphere for the successful nuclear fusion experiment at the Lawrence Livermore National Laboratory. In this interview, they talk about their beginnings in diamond research, the challenges of producing diamond spheres and their collaboration with LLNL.



Dr. Christoph Wild (rechts) begann mit seiner Diamantforschung am Fraunhofer IAF und gründete danach Diamond Materials. Tobias Fehrenbach (links) verantwortet die Fertigung von Diamantkugeln und einkristallinen Diamantschichten bei Diamond Materials.
Dr. Christoph Wild (right) started his diamond research at Fraunhofer IAF and then founded Diamond Materials. Tobias Fehrenbach (left) is responsible for the production of diamond spheres and monocrystalline diamond coatings at Diamond Materials.

Wie ist Ihre Begeisterung für Diamant entstanden?

Wild — Während meiner Diplomarbeit am Fraunhofer IAF hatte ich mich bereits mit amorphen diamantartigen Kohlenstoffschichten beschäftigt. Gleichzeitig erschienen erste Berichte über die Abscheidung von kristallinen Diamantschichten. Das fanden wir sehr spannend und haben angefangen, erste Experimente durchzuführen. Ich erinnere mich noch, wie wir die ersten Diamantschichten im Mikroskop gesehen haben und die Kollegen es nicht glauben konnten, als ich ihnen sagte: »Das sind Diamantkristalle.« In den 90er Jahren herrschte weltweit ein richtiger Diamanthype. Man kannte die außergewöhnlichen Eigenschaften von Diamant und durch die Abscheidung von Diamant in Schichtform auf Scheiben war klar, dass sich viele neue Anwendungen ergeben werden.

Fehrenbach — Als ich zum Diamant kam, war die Forschung bereits etabliert. Ich habe Geowissenschaften studiert und mich auf Kristallographie spezialisiert. Dass mit einem Werkstoff, der seinen Ursprung in der Natur hat, solche technischen Anwendungen möglich sind, finde ich sehr spannend. Nachdem ich mich am Fraunhofer ISE bereits viel mit Silizium beschäftigt habe, hat mich die Arbeit mit Diamant sehr gereizt. Da steckt noch viel Forschungspotenzial drin.

Herr Wild, mit welcher Vision haben Sie Diamond Materials gegründet?

Wild — Am Fraunhofer IAF hatten wir intensiv an der Weiterentwicklung der Diamanttechnologie gearbeitet, erfolgreich neue Reaktorkonzepte, wie den Ellipsoidreaktor, realisiert und verschiedene Bearbeitungsverfahren entwickelt. So konnte wir zu Beginn der 2000er Jahre erste Diamantprodukte verkaufen. Diamond Materials haben wir gegründet, um Diamantprodukte zu fertigen, zu vermarkten und damit Kundennachfragen langfristig zu bedienen. Als Wissenschaftler birgt es natürlich einen besonderen Reiz, die Ergebnisse der eigenen Forschung in die Praxis umzusetzen. Dieses Jahr feiern wir unser 20-jähriges Jubiläum!

War Ihnen am Anfang bewusst, dass Diamant eine Rolle bei der Erforschung der Kernfusion spielen könnte?

Wild — Nein, gar nicht. Aber inzwischen haben wir sogar zwei Berührungspunkte mit der Kernfusion: Zum einen natürlich durch die Diamantkugeln als Targets bei der Trägheitsfusion und zum anderen fertigen wir Diamantfenster zur Einkopplung der Mikrowelle in den Plasmareaktor beim ITER-Projekt in Südfrankreich, das an dem Konzept des magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmas arbeitet.

How did your enthusiasm for diamond begin?

Wild — During my diploma thesis at Fraunhofer IAF, I had already worked on amorphous diamond-like carbon layers. At the same time, the first reports on the deposition of crystalline diamond layers appeared. We were very excited by this and started to carry out initial experiments. I still remember the moment when we saw the first diamond layers under the microscope and my colleagues could not believe it when I told them: "These are diamond crystals." In the 1990s, there was a real diamond hype worldwide. The extraordinary properties of diamond were well known and the deposition of diamond in layer form on disks made it clear that many new applications would emerge.

Fehrenbach — When I came to diamond, its research was already well established. I studied geosciences and specialized in crystallography. For me, it is very exciting that this kind of technical application is possible with a material that has its origins in nature. Having already worked a lot with silicon at Fraunhofer ISE, I was very interested in working with diamond. There is still a lot of research potential there.

Mr. Wild, what was your vision when you founded Diamond Materials?

Wild — At Fraunhofer IAF, we worked intensively on the further development of diamond technology. We successfully realized new reactor concepts, such as the ellipsoid reactor, and developed various processing methods. This enabled us to sell our first diamond products at the beginning of the 2000s. We founded Diamond Materials to manufacture and market diamond products and thus meet customer demands in the long term. As a scientist, it is of course particularly exciting to put the results of the own research into practice. This year we are celebrating our 20th anniversary!

In the beginning, did you realize that diamond could play a role in nuclear fusion research?

Wild — No, not at all. But meanwhile, we even have two points of contact with nuclear fusion: firstly, of course, through the diamond spheres as targets in inertial confinement fusion and, secondly, we manufacture diamond windows for coupling the microwave into the plasma reactor in the ITER project in southern France, which is working on the concept of magnetically confined fusion plasma.

Wie kam es zur Zusammenarbeit mit dem Lawrence Livermore National Laboratory?

Wild — 1994 hatte ich Jürgen Biener auf einer Diamantkonferenz in Japan kennengelernt. Er ging dann ans LLNL und rief mich etwa zehn Jahre später an, um zu fragen, ob wir Hohlkugeln aus Diamant fertigen könnten. Am LLNL war man zu dieser Zeit auf der Suche nach einem idealen Targetmaterial für die Durchführung von Kernfusionsexperimenten. Das Material sollte eine möglichst kleine Ordnungszahl und eine hohe Dichte aufweisen. Damals hatte man hauptsächlich mit Beryllium und Plastik gearbeitet; die Diamantkugeln waren eher eine Backup-Option. Doch es stellte sich heraus, dass sich mit Diamant deutlich bessere Ergebnisse erzielen lassen. So haben wir sehr schnell die Grundlagen für die Fertigung entwickelt und bereits 2006 den Fraunhofer-Preis für diese Arbeiten erhalten.



Die Erkenntnisse aus den Experimenten werden die Grundlagen für die zukünftige Kernfusionstechnologie bilden.«

“The insights gained from the experiments will form the basis for future nuclear fusion technology.”

Dr. Christoph Wild

Warum eignet sich ausgerechnet Diamant für dieses Kernfusionsexperiment?

Fehrenbach — Bei dem Experiment wird das Laserlicht in Röntgenstrahlung umgewandelt, welche zur Implosion der Kugel führt. Deshalb braucht es ein Material mit niedriger Ordnungszahl, das eine hohe Dichte hat und gleichzeitig transparent für die Strahlung ist. Außerdem hat Diamant den Vorteil, dass man Fremdatome einbauen kann. Die inneren Schichten der Diamantkugeln sind mit Wolfram dotiert – so lässt sich die Röntgenabsorption quasi gezielt einstellen.

Diamantwafer werden Schicht für Schicht übereinander gewachsen, aber wie werden Hohlkugeln hergestellt?

Wild — Für die Herstellung von Diamanthohlkugeln werden Siliziumkugeln mit mehreren Diamantlagen beschichtet. Die einzelnen Schichten unterscheiden sich beispielsweise durch ihre Dotierung. Zum Schluss wird ein nur wenige Mikrometer kleines Loch in die Beschichtung gelasert und der Siliziumkern herausgeätzt. Die Targets für die Experimente bei dem LLNL müssen perfekte Diamanthohlkugeln sein, das ist natürlich eine Herausforderung.

How did the collaboration with the Lawrence Livermore National Laboratory come about?

Wild — I met Jürgen Biener at a diamond conference in Japan in 1994. He then went to LLNL and called me about ten years later to ask if we could make hollow spheres out of diamond. Then, LLNL was looking for an ideal target material for carrying out nuclear fusion experiments. The material had to have the lowest possible atomic number and a high density. At that time, people mainly worked with beryllium and plastic; the diamond spheres were more of a backup option. However, it turned out that significantly better results could be achieved with diamond. So we very quickly developed the basis for production and received the Fraunhofer Prize for this work in 2006.

Of all things, why is diamond suitable for this nuclear fusion experiment?

Fehrenbach — In the experiment, the laser light is converted into X-rays, which cause the sphere to implode. Therefore, a high-density material with a low atomic number is required that is also transparent to the radiation. Diamond also has the advantage of being able to incorporate foreign atoms. The inner layers of the diamond spheres are doped with tungsten — this allows the X-ray absorption to be adjusted in a targeted manner.

Diamond wafers are grown layer by layer on top of each other. How do you produce hollow spheres?

Wild — For the production of diamond hollow spheres, silicon spheres are coated with several diamond layers. The individual layers differ, for example, in their doping. Finally, a tiny hole of just a few micrometers is lasered into the coating and the silicon core is etched out. The targets for the experiments at LLNL have to be perfect diamond hollow spheres, which is of course a challenge.

Und wie erreicht man die perfekte Diamanthohlkugel?

Fehrenbach — Das Wichtigste ist eine exakt homogene Schichtdickenverteilung. Da die Schichten von oben abgeschieden werden, müssen die Kugeln im Reaktor stark bewegt werden. Aber alles, was rollt, kann kleine Defekte abkriegen und jede noch so kleine Unregelmäßigkeit hat eine Auswirkung auf die Kugelform und damit auf das gesamte Experiment. Deshalb haben wir viel Know-how gesammelt und aufwendige Verfahren entwickelt, um Diamantkugeln mit möglichst homogenen Schichten herzustellen. Von den Partnern vom LLNL bekommen wir ganz konkrete Vorgaben zu jeder Schicht. Zu 90 % kommt man recht zügig, aber das letzte Bisschen bis zur Perfektion macht noch viel Arbeit aus.

Wie haben Sie den Erfolg des Fusionsexperiments wahrgenommen?

Wild — Wir waren natürlich recht euphorisch. Ein paar Monate vorher hatte sich der Durchbruch schon angedeutet, aber das ist eine enorme Leistung: Die Wissenschaftler beim LLNL haben 30 Jahre an der erfolgreichen Demonstration gearbeitet und ihr Ziel im Dezember 2022 endlich erreicht. Und für das Experiment war die Diamantkugel als Target ein entscheidender Faktor. Für die praktische Energieerzeugung ist dieser Aufwand nicht wirtschaftlich, dennoch tragen diese Experimente dazu bei, Erkenntnisse zu gewinnen und Ideen zu generieren, die die Grundlagen für die zukünftige Kernfusions-technologie bilden werden.

Diamant als Basis für die Kernfusion, für Quantentechnologien – in welchen Bereichen wird Diamant auch nicht mehr wegzudenken sein?

Wild — Diamant wird überall da eingesetzt, wo seine herausragenden Eigenschaften genutzt werden können – etwa, wenn es um hohe Leistung geht, wo andere Materialien schmelzen würden oder wo man seine extreme Härte braucht. Oft sind es sehr spezielle Anwendungen, bei denen der Nutzen die Kosten überwiegt, und ständig kommen neue, auch teils überraschende Anwendungen hinzu, zum Beispiel in der Medizin. Derzeit arbeiten wir mit dem Fraunhofer IAF im Projekt »GrodiaQ« zusammen an der Entwicklung von Diamantsubstraten für quantentechnologische Anwendungen und profitieren auf beiden Seiten sehr von dem Austausch.

And how do you achieve the perfect diamond hollow sphere?

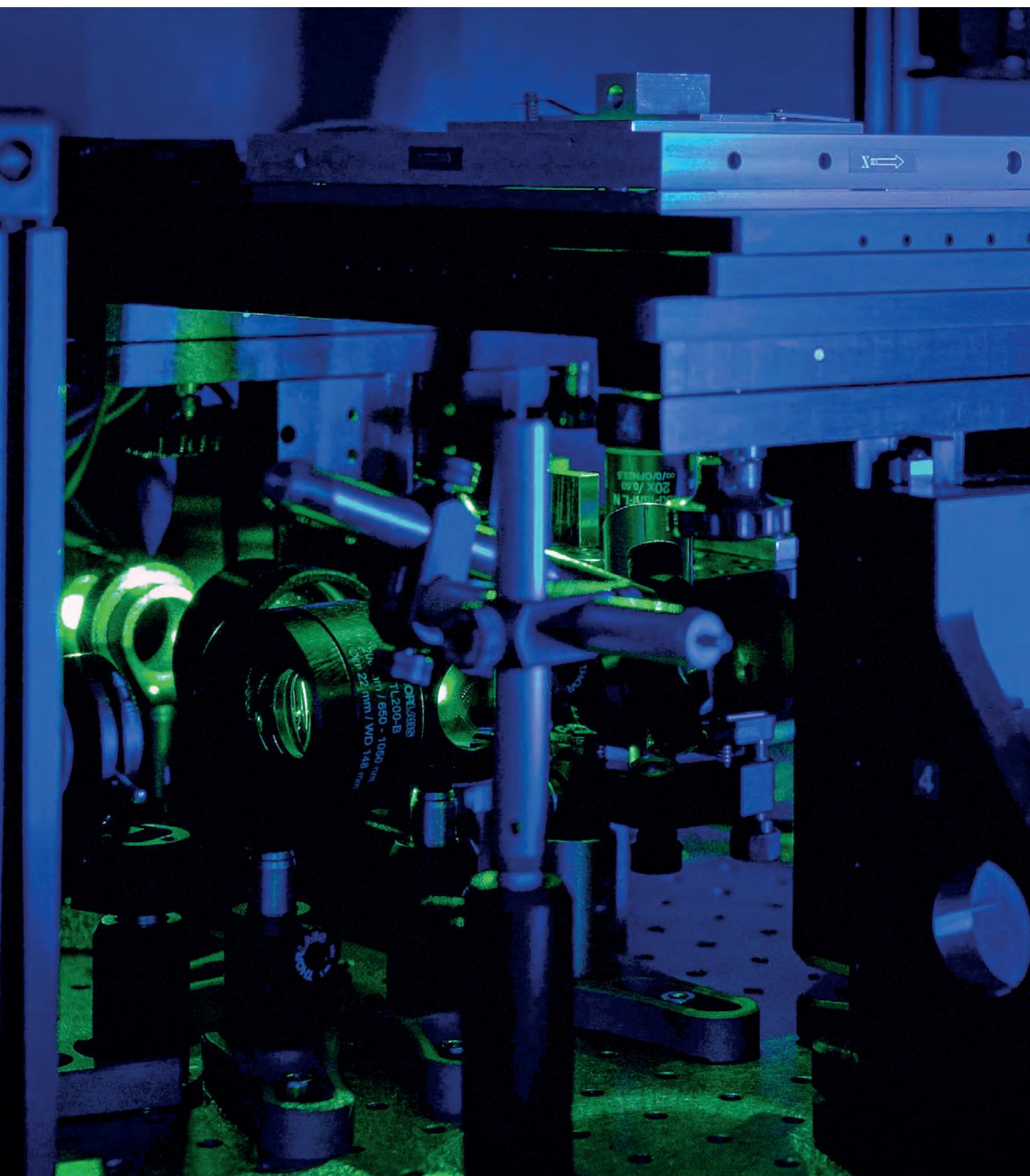
Fehrenbach — The most important thing is an exactly homogeneous layer thickness distribution. As the layers are deposited from above, the spheres in the reactor have to be moved a lot. But everything rolling can have small defects and every irregularity, no matter how small, has an effect on the shape of the sphere and therefore on the entire experiment. That is why we have gathered a great deal of know-how and developed complex processes to produce diamond spheres with layers that are as homogeneous as possible. Our partners at LLNL give us very specific guidelines for each shift. We get to 90 % quite quickly, but the last bit to perfection is still a lot of work.

How did you perceive the success of the fusion experiment?

Wild — Of course, we were quite euphoric. The breakthrough had been hinted at a few months earlier, but this is a huge achievement: the scientists at LLNL worked for 30 years on the successful demonstration and finally achieved their goal in December 2022. And the use of the diamond sphere as the target was a key factor in the experiment. This effort is not economical for practical energy production, but these experiments are helping to gain knowledge and generate ideas that will form the basis for future nuclear fusion technology.

Diamond as the basis for nuclear fusion, for quantum technologies – in which other areas will diamond be indispensable?

Wild — Diamond is used wherever its outstanding properties can be utilized — for example, where high performance is required, where other materials would melt or where its extreme hardness is needed. These are often very specialized applications where the benefits outweigh the costs, and new and sometimes surprising applications are constantly being added, for example in medicine. Currently, we are working together with Fraunhofer IAF on the development of diamond substrates for quantum technology applications in the GrodiaQ project and both sides benefit greatly from the exchange.





Hochauflöste Magnetfeldmessungen mit Diamant

High-resolution magnetic field measurements with diamond

Magnetfeldmessungen spielen in vielen technischen Bereichen eine tragende Rolle. Fast jedes Smartphone besitzt einen Magnetfeldsensor zur Navigation. Auch aus der Biomedizin, Mikroelektronik und Materialprüfung ist die Magnetometrie kaum mehr wegzudenken. Während hochsensitive Magnetfeldmessungen bereits technisch gut umsetzbar sind, stellte räumlich hochauflöste Magnetometrie bisher eine große Herausforderung dar. Durch die Entwicklung der Quantensensorik, basierend auf winzigen Punktdefekten in Diamant, wurden am Fraunhofer IAF nun völlig neue Möglichkeiten zur hochauflösten Magnetfeldmessung geschaffen, die neue Anwendungen erschließen kann.

Magnetic field measurements play a key role in many technical areas. Almost every smartphone has a magnetic field sensor for navigation. It is also hard to imagine biomedicine, microelectronics, and materials testing without magnetometry. While highly sensitive magnetic field measurements are already technically feasible, spatially high-resolution magnetometry has been a major challenge to date. Through the development of quantum sensor technology based on tiny point defects in diamond, Fraunhofer IAF has now created completely new possibilities for high-resolution magnetic field measurement which can lead to new applications.

*Weitfeldmagnetometer im Applikationslabor
Quantensensorik am Fraunhofer IAF
Wide-field magnetometer in the Application
Laboratory Quantum Sensing at Fraunhofer IAF*

Niklas Mathes

Sogenannte Stickstoff-Vakanzen in Diamant, auch NV-Zentren genannt, können als atomar kleine Magnetfeldsensoren genutzt werden. Da das Messergebnis direkt auf dem Auslesen eines einzelnen Quantenzustandes basiert, spricht man auch von einem Quantensensor. Diese Messmethode wird auch als optisch detektierte magnetische Resonanz (ODMR) bezeichnet. Die atomar kleine Größe der NV-Zentren erlaubt es, den Sensor extrem nah an die magnetische Probe heranzuführen und daher nicht nur sehr präzise, sondern auch mit einer sehr hohen Ortsauflösung zu messen.

Weitfeldmagnetometer – Messprinzip und -parameter

Mit diesem Ansatz wurde am Fraunhofer IAF ein Weitfeldmagnetometer basierend auf einer etwa 300 nm dicken Schicht von NV-Zentren nahe der Oberfläche eines Diamant-Einkristalls realisiert. Die Schicht wird hauseigen mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) auf ein hochreines, kommerzielles Diamantsubstrat aufgebracht. In dem Messsystem wird die NV-Schicht mit einem aufgeweiteten, kollimierten Laserstrahl angeregt. Der Durchmesser des Laserstrahls wird so gewählt, dass ein vergleichsweise großer Bereich der NV-Schicht angeregt wird, die Leistungsdichte aber ausreichend hoch ist, um eine gute Spinpolarisation zu erreichen. Als ein guter Kompromiss für die am Fraunhofer IAF verfolgten Anwendungen hat sich ein Messbereich mit einem Durchmesser von etwa 300 μm erwiesen.

Das aktuell am Fraunhofer IAF verwendete System erreicht eine Auflösung von etwa 700 nm und eine Sensitivität von einigen $\mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$. Das Vektormagnetfeld kann dabei innerhalb weniger Minuten unter Ausnutzung der vier möglichen Orientierungen von NV-Zentren im Diamant über den gesamten Messbereich quantitativ und kalibrierungsfrei abgebildet werden. Die Abbildung einer einzelnen Magnetfeldkomponente ist in vielen Fällen sogar innerhalb einiger Sekunden möglich. Des Weiteren kann über die longitudinale Relaxationszeit des Spins der NV-Zentren magnetisches Rauschen detektiert werden. Diese sogenannte Relaxometrie erlaubt einen sehr empfindlichen Nachweis magnetischer Rauschquellen in kurzer Distanz (< 100 nm) zu den NV-Zentren. Beispiele solcher Rauschquellen sind magnetische Nanoteilchen oder Moleküle sowie freie Radikale.

Abb. 1: Abbildung des magnetischen Streufeldes einer ermüdeten Ferrosilicium-Probe

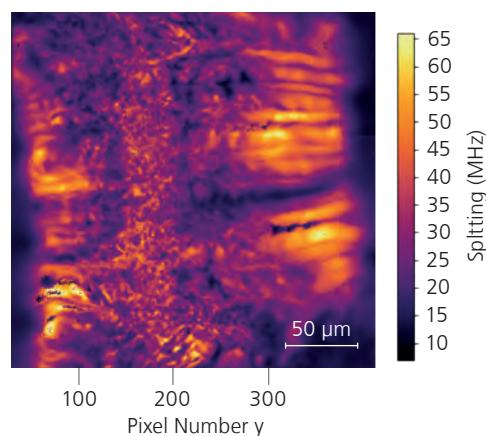
Fig. 1: Image of the magnetic stray field of a fatigued ferrosilicon sample

So-called nitrogen vacancies in diamond, also known as NV centers, can be used as atomically small magnetic field sensors. As the measurement result is based directly on the readout of a single quantum state, this is also referred to as a quantum sensor. This measurement method is called optically detected magnetic resonance (ODMR). The atomically small size of the NV centers makes it possible to bring the sensor extremely close to the magnetic sample and therefore to measure not only very precisely but also with a very high spatial resolution.

Wide-field magnetometer — Measuring principle and parameters

With this approach, a wide-field magnetometer based on an approximately 300 nm thick layer of NV centers near the surface of a diamond single crystal was realized at Fraunhofer IAF. The layer is applied in-house by means of chemical vapor deposition (CVD) on a high-purity commercial diamond substrate. In the measuring system, the NV layer is excited with an expanded, collimated laser beam. The diameter of the laser beam is selected so that a comparatively large area of the NV layer is excited, but the power density is sufficiently high to achieve good spin polarization. A measuring range with a diameter of around 300 μm has proven to be a good compromise for the applications pursued at Fraunhofer IAF.

The system currently used at Fraunhofer IAF achieves a resolution of around 700 nm and a sensitivity of several $\mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$. The vector magnetic field can be mapped quantitatively and calibration-free over the entire measuring range within a few minutes using the four possible orientations of NV centers in the diamond. In many cases, it is even possible to image a single magnetic field component within a few seconds. Furthermore, magnetic noise can be detected via the longitudinal relaxation time of the spin of the NV centers. This so-called relaxometry allows very sensitive detection of magnetic noise sources at a short distance (< 100 nm) from the NV centers. Examples of such noise sources are magnetic nanoparticles or molecules, as well as free radicals.



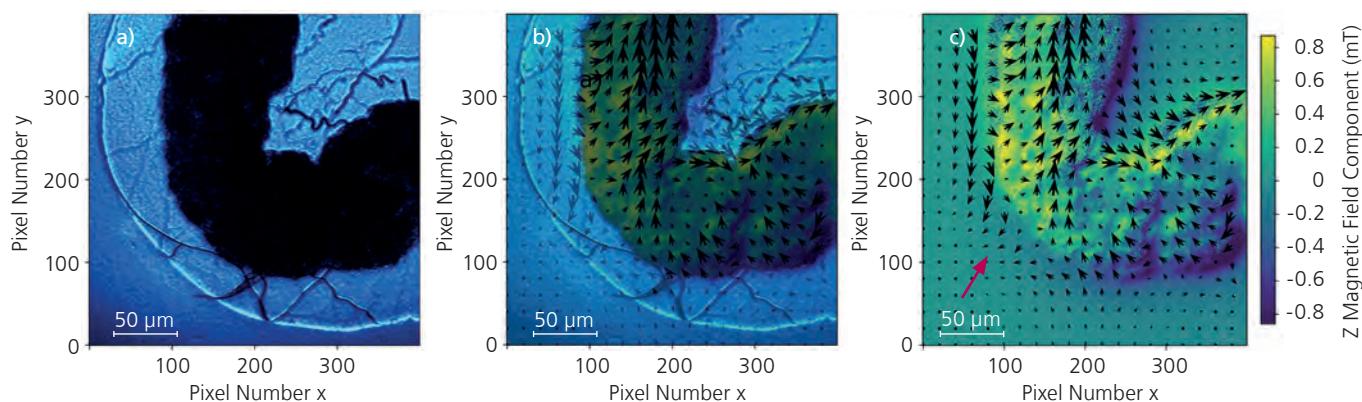


Abb. 2: a) Transmission microscope image of the gastrointestinal tract of a fruit fly fed with magnetic nanoparticles. **b)** Superimposition with the vector magnetic image. **c)** Vectorial image of the magnetic field distribution generated by the magnetic nanoparticles.

Fig. 2: a) Transmission microscope image of the gastrointestinal tract of a fruit fly fed with magnetic nanoparticles. b) Superimposition with the vector magnetic image. c) Vectorial image of the magnetic field distribution generated by the magnetic nanoparticles. (Nanoscale Advances, 6 (2024), 1, 247–255. <https://doi.org/10.1039/d3na00684k>)

Einzigartige Messeigenschaften bieten neue Anwendungsmöglichkeiten

Da das Weitfeldmagnetometer einen einzigartigen Kompromiss zwischen Messgeschwindigkeit, Sensitivität und räumlicher Auflösung bietet, besteht ein großes Potenzial für industrielle und medizinische Anwendungen. Dabei bietet es völlig neue Möglichkeiten. Es ist in der Lage, die von ferromagnetischen Materialien erzeugten Streufelder räumlich hochauflösen zu messen. Bislang waren derartige Messungen nur unter großem Zeitaufwand mittels mit Magnetkraftmikroskopie möglich. Im Weitfeldmagnetometer kann innerhalb von Sekunden eine magnetische Karte der Streufeldverteilung erstellt werden (Abb. 1). Das Ziel ist die Früherkennung von Materialermüdung. Der genaue Zusammenhang zwischen magnetischer Streufeldverteilung und Ermüdungszustand des Materials wird derzeit untersucht.

Eine weitere vielversprechende Anwendung ist die Detektion von magnetischen Nanoteilchen in biomedizinischen Proben. Magnetische Nanoteilchen sind aufgrund ihrer einzigartigen magnetischen Eigenschaften sehr interessant für unterschiedliche Bereiche biomedizinischer Forschung. Sie können funktionalisiert werden und beispielsweise als magnetische Marker in lebenden Organismen oder als Kontrastmittel verwendet werden (Abb. 2). Herkömmliche Techniken zum Nachweis von magnetischen Nanopartikeln in Gewebe, so wie Magnetresonanztomografie (MRT) oder Magnetic Particle Imaging (MPI), bieten nur eine relativ geringe räumliche Auflösung. NV-Sensoren könnte in Zukunft als komplementäre Technik zur präzisen Detektion von magnetischen Nanoteilchen in histologischen Gewebeproben verwendet werden.

Das Weitfeldmagnetometer des Fraunhofer IAF steht zusammen mit weiteren Quantensensorsystemen im Applikationslabor Quantensensorik. Interessierten aus Industrie und Wissenschaft für Testmessungen zur Verfügung.

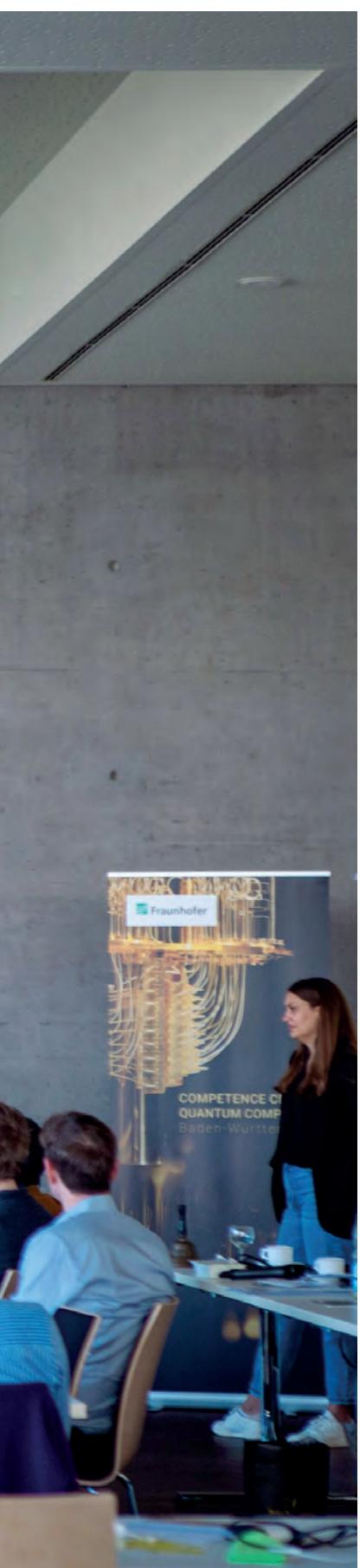
Unique measurement properties offer new applications

The wide-field magnetometer offers a unique compromise between measurement speed, sensitivity and spatial resolution, which holds great potential for industrial and medical applications. It offers completely new measuring possibilities. It is able to measure the stray fields generated by ferromagnetic materials with high spatial resolution. Until now, such measurements were only possible with great time expenditure using magnetic force microscopy. In the wide-field magnetometer, a magnetic map of the stray field distribution can be created within seconds (Fig. 1). The aim is the early detection of material fatigue; the exact relationship between magnetic stray field distribution and the fatigue state of the material is currently being investigated.

Another promising application is the detection of magnetic nanoparticles in biomedical samples. Magnetic nanoparticles are very interesting for various areas of biomedical research due to their unique magnetic properties. They can be functionalized and used, for example, as magnetic markers in living organisms or as contrast agents (Fig. 2). Conventional techniques for detecting magnetic nanoparticles in tissue, such as magnetic resonance imaging (MRI) or magnetic particle imaging (MPI), only offer a relatively low spatial resolution. In the future, NV sensor technology could be used as a complementary technique for the precise detection of magnetic nanoparticles in histological tissue samples.

The wide-field magnetometer is available to interested parties from industry and science for test measurements together with other quantum sensor systems in the Application Laboratory Quantum Sensing of Fraunhofer IAF.





Erfolgreicher Abschluss der Verbundprojekte des KQCBW

Successful completion of the KQCBW joint projects

Am 7. und 8. März 2024 wurden die Mitglieder des »Kompetenzzentrums Quantencomputing Baden-Württemberg« (KQCBW) gemeinsam von Fraunhofer IAO und Fraunhofer IAF zur zweiten Developer Conference nach Freiburg eingeladen. In einem interaktiven Vortragsprogramm präsentierten die Partner der fünf Verbundforschungsprojekte im KQCBW die Ergebnisse der zweiten Förderphase und damit einhergehend Anwendungspotenziale des Quantencomputings für die Wirtschaft.

On March 7 and 8, 2024, the members of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) were jointly invited by Fraunhofer IAO and Fraunhofer IAF to the second Developer Conference in Freiburg to mark the successful completion of their projects. In engaging talks, the partners of the five joint research projects presented the results of the second funding phase and thus insights into the state-of-the-art of quantum computing software and hardware research.

Das »Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg« (KQCBW) stellte seine Projektergebnisse im Rahmen der Developer Conference 2024 am Fraunhofer IAF vor
The Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) presented its project results at the Developer Conference 2024 at Fraunhofer IAF

Mit einem Umfang von insgesamt mehr als zwölf Millionen Euro förderte das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus ab Anfang 2023 für 15 Monate fünf Verbundforschungsprojekte im KQCBW. Diese Projekte hatten sich im Rahmen des zweiten Förderaufrufs im Kompetenzzentrum in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer-Gesellschaft erfolgreich beworben.

In den Vorhaben arbeiten Forschende aus insgesamt sechs Fraunhofer-Instituten gemeinsam mit 17 weiteren Universitäts-, Hochschul- und außeruniversitären Instituten des Landes sowie 56 assoziierten Unternehmenspartnern aus Deutschland zusammen, um unter Nutzung von Quantencomputing-Ressourcen des Kompetenzzentrums die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in verschiedenen Themenstellungen voranzutreiben. Die Forschungsthemen der fünf Verbundprojekte erstrecken sich von der Quantensimulation in den Material- und Naturwissenschaften über Anforderungen an leistungsfähige und zuverlässige Hardware-Umgebungen hin zur Programmierung von Quantenalgorithmen für den industriellen Bedarf.

Fachkräftebildung, Kooperation und Austausch

Die Verbundforschung des KQCBW ist für den Aufbau von Fachwissen und Kompetenzen im Land beispielgebend. Kooperation und Austausch sind maßgebliche Treiber der Schlüsseltechnologie und betreffen Universitäten wie frisch gegründete Start-ups gleichermaßen. Aktuell stellt der Fachkräftemangel noch eine Herausforderung für den jungen und anspruchsvollen Forschungszweig dar.

Durch gezielte Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen im Schulterschluss zwischen Forschung und Unternehmen lassen sich aktuelle Kompetenzlücken schließen und Expertise kann langfristig aufgebaut werden. Dazu hat beispielsweise das Quantencomputing-Schulungsprogramm des KQCBW beigetragen, das gemeinsam von Fraunhofer IAO und Fraunhofer IAF koordiniert wurde. Die interaktiven Schulungen haben neue Erkenntnisse kontinuierlich mit der Praxis verknüpft und ein Ökosystem mit mehr als 60 Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik aufgebaut.

With a total of more than twelve million euros, the Ministry of Economic Affairs, Labor and Tourism funded five collaborative research projects in the second funding phase of the KQCBW for 15 months from the beginning of 2023. These projects continued the research from the first phase of the Competence Center.

In these projects, researchers from a total of six Fraunhofer Institutes are working together with 17 other university, college and non-university institutes in the state as well as 56 associated corporate partners from Germany to advance research and development work in various topics using the Competence Center's quantum computing resources. The research topics of the five joint projects range from quantum simulation in the materials and natural sciences to requirements for powerful and reliable hardware environments and the programming of quantum algorithms for industrial needs.

Trainings, cooperation and exchange

The collaborative research of the KQCBW is exemplary for the development of specialist knowledge and expertise in Baden-Württemberg. Cooperation and exchange are crucial for this key technology and affect universities and newly founded start-ups alike. The shortage of skilled workers is still a challenge for this young and demanding branch of research.

Targeted trainings and further education measures in close cooperation between research and companies can close current skills gaps and build up expertise in the long term. The quantum computing training program of the KQCBW, for example, which is jointly coordinated by the institutes Fraunhofer IAF and IAO, has contributed to this. The interactive training courses have continuously linked new findings with practical applications and established an ecosystem with more than 60 partners from science, industry, and politics.



QC-4-BW II – Skalierbare Diamant-basierte

Quantenhardware

Im Projekt »QC-4-BWII«, das sich mit der Entwicklung und der Bewertung eines Quantenregisters basierend auf Stickstoff-Farbzentren (NV) in Diamanten für einen skalierbaren und spinbasierten NV-Quantenprozessor beschäftigt, konnten signifikante Fortschritte verzeichnet werden. Das Konsortium erreichte eine Erweiterung des NV-Quantenprozessors auf neun Qubits, wodurch sich die Leistungsfähigkeit des Systems wesentlich verbesserte. Durch Ansätze in der Skalierung mittels dipolarer NV-NV-Kopplung und der Entwicklung robuster Zwei-Qubit-Gatter sowie dynamischer Entkopplungsprotokolle konnte die Systemeffizienz und Güte signifikant gesteigert werden und es gelangen genauere Simulationen komplexer Moleküle unter Verwendung variationaler Quantenalgorithmen. Zudem deuten der erfolgreiche Transfer dieser quantenchemischen Algorithmen auf den entwickelten NV-Quantenprozessor und deren Vergleich mit Ergebnissen des IBM Quantum System One einen Vorteil der spinbasierten Topologie an, was das technologische Potenzial dieser Plattform eindrucksvoll bestätigt und neue Impulse für die zukünftige Quantenforschung setzen wird.

QC-4-BW II – Scalable diamond-based quantum hardware

Significant progress has been made in the QC-4-BW II project, which is concerned with the development and evaluation of a quantum register based on nitrogen color centers (NV) in diamonds for a scalable and spin-based NV quantum processor. The consortium achieved an extension of the NV quantum processor to nine qubits, which significantly improved the performance of the system. Through approaches in scaling using dipolar NV-NV coupling and the development of robust two-qubit gates and dynamic decoupling protocols, the system efficiency and quality could be significantly increased and more accurate simulations of complex molecules using variational quantum algorithms were achieved. In addition, the successful transfer of these quantum chemical algorithms to the developed NV quantum processor and their comparison with results from the IBM Quantum System One indicate an advantage of the spin-based topology. These findings confirm the impressive technological potential of this platform and will provide new impetus for future quantum research.

QORA II

QORA II – Quantenoptimierung mit resilienten Algorithmen

Quantencomputer, die heute schon genutzt werden, sind in der Größe begrenzt und ihre Ergebnisse durch Störeinflüsse fehlerbehaftet. Um ihr Potenzial dennoch zu nutzen, werden resiliente Algorithmen benötigt, wie sie in »QORA II« erforscht wurden. Die Forschenden haben in »QORA II« auf die Hardware des Quantenrechners besser zugeschnittene Verfahren zur Charakterisierung und Korrektur der darauf auftretenden Fehler entwickelt. Insbesondere haben sie eine mit dem Experiment gut übereinstimmende physikalische Modellierung des IBM-Quantenrechners in Ehningen erstellt und damit ein besseres Verständnis der darauf auftretenden Fehler erzielt. Außerdem wurden mit der dissipativen Quantenoptimierung und einer Weiterentwicklung des Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) neue algorithmische Ansätze verfolgt. Schließlich wurden die dabei gewonnenen Erkenntnisse neben der Portfoliooptimierung auch auf weitere für den Finanzbereich relevante Fälle wie Merkmalsauswahl für Kreditscoring, Clustering von Kundendaten und Risikomodellierung angewendet.

QORA II – Quantum optimization with resilient algorithms

Quantum computers that are already in use today are limited in size and their results are subject to errors due to interference. In order to exploit their potential, resilient algorithms such as those researched in QORA II are required. The researchers have developed methods that are better tailored to the hardware of a quantum computer to characterize and correct the errors that occur on it. In particular, they have created a physical model of the IBM quantum computer in Ehningen that corresponds well with the experiment and thus achieved a better understanding of the errors that occur on it. In addition, new algorithmic approaches were pursued with dissipative quantum optimization and a further development of the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA). Finally, in addition to portfolio optimization, the knowledge gained was also applied to other cases relevant to the financial sector, such as feature selection for credit scoring, clustering of customer data and risk modelling.



SEQUOIA End-to-End – Anwendungszentrierte End-to-End-Lösungen

Wesentliches Ziel des Verbundforschungsprojektes »SEQUOIA End-to-End« war es, die heutigen Engpässe im gesamten Quanten-Software-Entwicklungsprozess transparent zu machen und durch ganzheitliches Quanten-Software-Engineering leistungsfähige, automatisierte und steuerbare End-to-End-Lösungen für industrielle Anwendungsfälle zu erforschen und bereitzustellen. Die im Projekt entwickelten Algorithmen, Werkzeuge und Methoden flossen kontinuierlich in einen SEQUOIA-Softwarekomponenten-Baukasten ein. Diese Toolings werden über entsprechende GitHub-Repositorien als Open Source zur Verfügung gestellt. Auf Basis von acht Anwendungsfällen aus den Bereichen Produktion, Logistik, Engineering und Automotive wurden End-to-End-Demonstratoren entwickelt und als Best Practices für den gesamten Quanten-Software-Entwicklungsprozess als selbsterklärende, interaktive Jupyter Notebooks im KQCBW bereitgestellt. Dadurch werden Methoden des Quanten-Software-Engineering auch für Fachleute ohne explizite Erfahrung mit Quantencomputing nachvollziehbar. Zum Wissenstransfer wurden im Projekt bis Ende 2023 35 Schulungs- und Transferveranstaltungen mit einer Gesamtzahl von ca. 1700 geschulten Personen durchgeführt.

SEQUOIA End-to-End – Application-centered end-to-end solutions

The main goal of the joint research project SEQUOIA End-to-End was to make today's bottlenecks in the entire quantum software development process transparent and to research and provide powerful, automated and controllable end-to-end solutions for industrial use cases through holistic quantum software engineering. The algorithms, tools and methods developed in the project were continuously incorporated into a SEQUOIA software component kit. These toolings are made available as open source via corresponding GitHub repositories. Based on eight use cases from the fields of production, logistics, engineering and automotive, end-to-end demonstrators were developed and made available as best practices for the entire quantum software development process as self-explanatory, interactive Jupyter notebooks in the KQCBW. This makes quantum software engineering methods comprehensible even for developers without special experience in quantum computing. For the transfer of knowledge, 35 training and transfer events with a total number of approx. 1700 trained persons were carried out within the project by the end of 2023.



SiQuRe II

SiQuRe II – Modellierung und Simulation von NV-basierten Qubit-Registern

In diesem Projekt erforschte das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM gemeinsam mit den Universitäten Freiburg und Ulm das Quantenverhalten von Qubit-Registern in Diamantkristallen. Mit Modellen und Computersimulationsmethoden der theoretischen Quantenphysik wurde quantifiziert, unter welchen Bedingungen ein gekoppeltes Spinsystem, bestehend aus NV-Zentren und einigen ^{13}C -Atomen, robuste Quantenzustände aufweist, die sich als festkörperbasiertes Qubit-System für den Aufbau von Quantencomputern nutzen lassen. Deren essenzielle Quanteneigenschaften konnten im Hinblick auf ihre Skalierbarkeit charakterisiert werden. Ebenso wurden Fortschritte beim Einsatz des IBM-Quantencomputers bei der Lösung von aus der Festkörperphysik abgeleiteten Problemstellungen erzielt. Basierend auf theoretischen Modellen der Physik offener Quantensysteme konnte eine neuartige Fehlermitigationsmethode implementiert und getestet werden.

SiQuRe II – Modeling and simulation of NV-based qubit registers

In this project, the Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM, together with the Universities of Freiburg and Ulm, investigated the quantum behavior of qubit registers in diamond crystals. Models and computer simulation methods from theoretical quantum physics were used to quantify the conditions under which a coupled spin system consisting of NV centers and several ^{13}C atoms exhibits robust quantum states that can be used as a solid-state qubit system for the construction of quantum computers. Their essential quantum properties were characterized with regard to their scalability. Progress was also made in using the IBM quantum computer to solve problems derived from solid-state physics. Based on theoretical models of the physics of open quantum systems, a novel error mitigation method was implemented and tested.

QuESt⁺

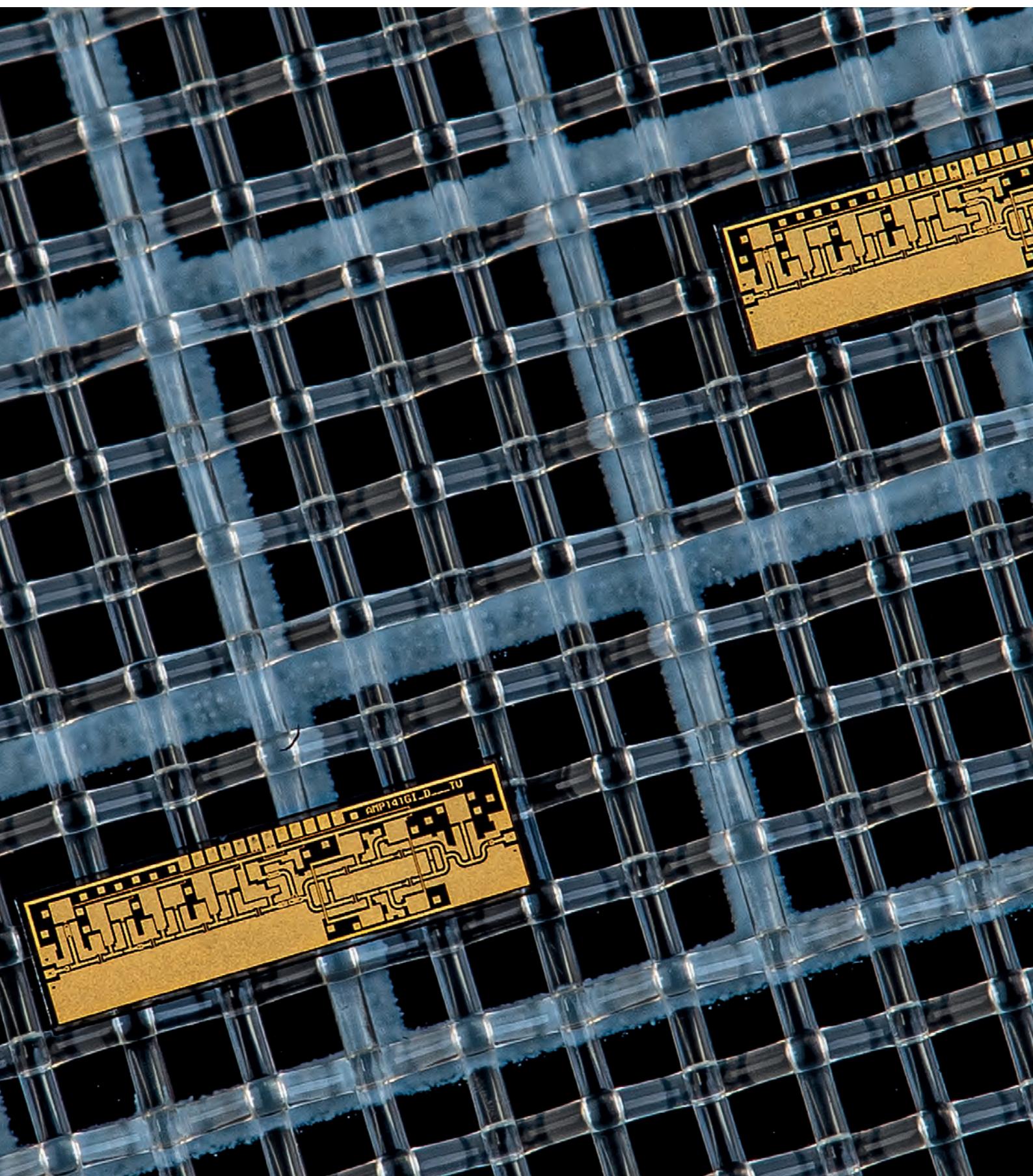
QuESt+ – Materialdesign mit innovativen Simulationstechniken

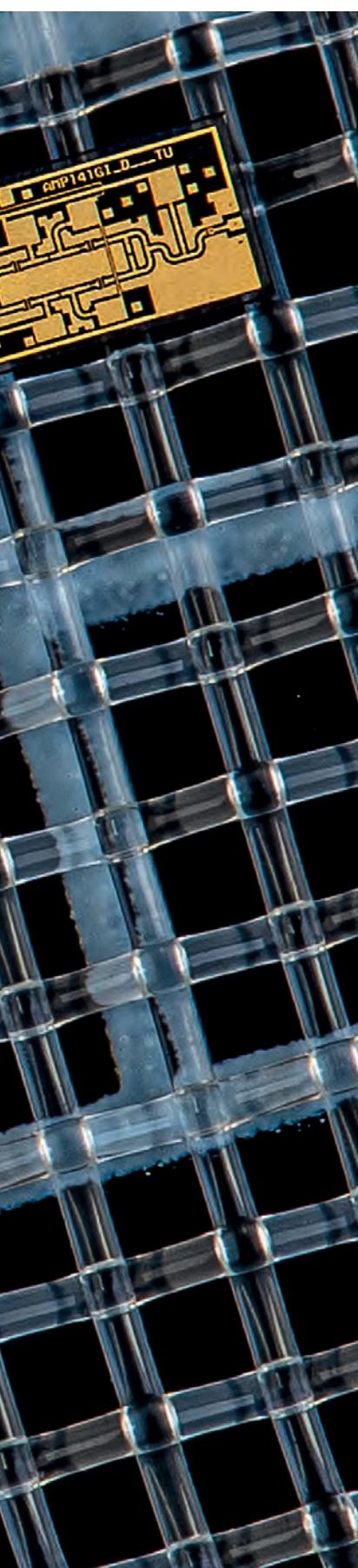
Das Projekt »QuESt+« hat unter Verwendung des IBM-Quantencomputers neuartige Materialsimulationsmethoden erforscht. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Fraunhofer IWM haben mit Unterstützung durch HQS Quantum Simulations spezialisierte Quantenalgorithmen für die Simulation von Batterieelektroden, -elektrolyten und -zellen sowie Brennstoffzellen entwickelt. Diese Algorithmen, kombiniert mit fortschrittlichen Fehlermitigationsstrategien, haben das Potenzial, die Lösung partieller Differentialgleichungen auf ein neues Niveau zu heben. Ebenso konnten die Vorteile der Nutzung von Quantencomputern für die atomistische Simulation stark-korrelierter Festkörpermaterialien analysiert und erforscht werden. »QuESt+« leitet eine innovative Ära in der Modellierung von Energiematerialien ein und legt die Basis für zukünftige Forschungen in diesem Bereich.

QuESt+ – Material design with innovative simulation techniques

The QuESt+ project has researched novel material simulation methods using an IBM quantum computer. The German Aerospace Center (DLR) and Fraunhofer IWM, supported by HQS Quantum Simulations, have developed specialized quantum algorithms for the simulation of battery electrodes, electrolytes and cells as well as fuel cells. These algorithms, combined with advanced error mitigation strategies, have the potential to take the solution of partial differential equations to a new level. The advantages of using quantum computers for the atomistic simulation of strongly correlated solid-state materials could also be analyzed and researched. QuESt+ ushers in an innovative era in the modeling of energy materials and lays the foundation for future research in this field.

Das Fraunhofer IAF und das Fraunhofer IAO koordinieren das »Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg« (KQCBW). Mehr als 70 Partner aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik arbeiten im KQCBW eng zusammen, um die Schlüsseltechnologie Quantencomputing in Deutschland voranzubringen. The institutes Fraunhofer IAF and IAO coordinate the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg with more than 70 partners from science, industry and politics, working closely together to advance the key technology of quantum computing in Germany.





Gemeinsam mit der Industrie: GaN-Technologien für 6G

Hand in hand with industry: GaN technologies for 6G

Zur Sicherung der technologischen Souveränität im Bereich der Kommunikationssysteme in Deutschland und Europa hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) »6G-Industrieprojekte zur Erforschung ganzheitlicher Systeme und Teiltechnologien für den Mobilfunk der 6. Generation« gestartet. Damit soll erreicht werden, dass wissenschaftliche und wirtschaftliche Akteure aus Deutschland bei der Ausgestaltung der technologischen Grundlagen für den 6G-Mobilfunk weltweit eine starke Rolle einnehmen. Seit Ende 2022 fördert das BMBF insgesamt 18 Verbundprojekte unter Führung von namhaften Industrieunternehmen. Dem Fraunhofer IAF ist es gelungen, in gleich drei Projekten mitzuwirken und an der Entwicklung des zukünftigen Mobilfunkes mitzuarbeiten.

To secure technological sovereignty in the field of communication systems in Germany and Europe, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) has launched "6G industry projects for research into holistic systems and sub-technologies for 6th generation mobile communications". The aim is to ensure that scientific and economic players from Germany have a strong role in shaping the technological foundations for 6G mobile communications worldwide. Since the end of 2022, the BMBF has been funding a total of 18 joint projects led by well-known industrial companies. Fraunhofer IAF has succeeded in participating in three projects and contributing to the development of future mobile communications.

*D-Band Leistungsverstärker
in GaN-Technologie
D-band power amplifier
in GaN technology*

Dr. Michael Mikulla

Der Anspruch dieser Förderinitiative des BMBF besteht darin, im Bereich des 6G-Mobilfunks an der Spitze der bereits anlaufenden internationalen Forschung zu agieren und frühzeitig den Transfer in die Anwendung vorzubereiten. Mit den Industrieprojekten soll das Fundament dafür gelegt werden, mit innovativen und international wettbewerbsfähigen Technologien eine weltweit führende Rolle einzunehmen. Das Fraunhofer IAF bringt insbesondere sein Know-how im Bereich der Leistungselektronik auf Basis des Halbleiters Galliumnitrid (GaN) ein.

ESSENCE-6GM

Unter der Führung von Nokia Bell-Labs arbeiten in diesem Verbundprojekt neun Partner an der Realisierung einer 6G-Kommunikation im Frequenzbereich um 140 GHz. Mithilfe von Phased-Array-Architekturen sollen Multi-Kanal-Übertragungsstrecken mit einer Bandbreite von 20 GHz demonstriert werden, um einen möglichst hohen Datendurchsatz zu erzielen. Die Erzeugung der Datenströme erfolgt mithilfe von komplexen Schaltungen in der fortschrittlichsten Silizium-Germanium-Technologie des Leibniz-Instituts für innovative Mikroelektronik (IHP).

In »ESSENCE 6GM« hat das Fraunhofer IAF die Aufgabe, die Leistungsverstärker für die Funkstrecke auf Basis der neusten GaN-Technologie mit 70 nm Gatelänge zu realisieren. Hiermit werden pro Kanal Sendeleistungen von 23 dBm erwartet. Für die Empfängerseite der Übertragungsstrecke kommt die mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF zum Einsatz, die für die hier benötigten hohen Frequenzen besonders rauscharme Empfangsverstärker ermöglicht. Bei 140 GHz beträgt die Rauschzahl lediglich 2 dB und ist damit die niedrigste von allen Halbleitertechnologien, die für das D-Band (110 GHz bis 170 GHz) geeignet sind.

Die sehr anspruchsvolle Realisierung der Sende- und Empfangsmodule wird von dem Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik (IHE) des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt.

6G-TERAKOM

In diesem Projekt unter der Führung der Firma Ericsson Antenna Technology Germany arbeiten insgesamt acht Partner ebenfalls an der Realisierung von Übertragungsstrecken für zukünftige 6G-Kommunikationsnetze. Auch hier soll der Frequenzbereich des D-Bands adressiert werden, in dem bereits heute große Frequenzblöcke für Kommunikationsanwendungen international reserviert sind. In einem differenzierten Ansatz wird hier das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM seine Mehrlagen-Integrationstechnologie zum Einsatz bringen, um Silizium-Germanium-Schaltungen der

The aim of this BMBF funding initiative is to be at the forefront of international research in the field of 6G mobile communications and to prepare the transfer to application at an early stage. The industrial projects are intended to lay the foundations for taking on a leading role worldwide with innovative and internationally competitive technologies. In particular, Fraunhofer IAF is contributing its expertise in the field of power electronics based on the semiconductor gallium nitride (GaN).

ESSENCE-6GM

Under the direction of Nokia Bell-Labs, this joint project involves nine partners working on the realization of 6G communication in the frequency range around 140 GHz. With the help of phased array architectures, multi-channel transmission links with a bandwidth of 20 GHz are to be demonstrated in order to achieve the highest possible data throughput. The data streams are generated using complex circuits in the most advanced silicon-germanium technology from the Leibniz Institute for Innovative Microelectronics (IHP).

In ESSENCE 6GM, Fraunhofer IAF has the task of realizing the power amplifiers for the radio link based on the latest GaN technology with a gate length of 70 nm. Transmission power of 23 dBm per channel is expected. The mHEMT technology of Fraunhofer IAF is used for the receiver side of the transmission link, which enables particularly low-noise receiver amplifiers for the high frequencies required here. At 140 GHz, the noise figure is just 2 dB, making it the lowest of all semiconductor technologies suitable for the D-band (110 GHz to 170 GHz).

The highly sophisticated implementation of the transmitter and receiver modules is being carried out by the Institute of High Frequency Technology and Electronics (IHE) at the Karlsruhe Institute of Technology.

6G-TERAKOM

In this project, led by Ericsson Antenna Technology Germany, a total of eight partners are also working on the realization of transmission links for future 6G communication networks. Here, too, the frequency range of the D-band is to be addressed, in which large frequency blocks are already reserved internationally for communication applications. In a differentiated approach, Fraunhofer Institute for Reliability and Micro-integration IZM will use its multilayer integration technology to combine silicon germanium circuits from Infineon for the generation of bit currents with GaN circuits from Fraunhofer IAF and integrated patch antennas in a single module. As the modules are also to be phase-controlled the distance between neighboring antennas in the array may not exceed 2 mm. This places high demands on the design of the circuits in terms of space requirements and power efficiency.

Firma Infineon für die Generation der Bit-Ströme mit GaN-Schaltungen des Fraunhofer IAF und integrierten Patch-Antennen in einem Modul zusammenzuführen. Da auch hier eine Phasensteuerung der Module erfolgen soll, darf der Abstand benachbarter Antennen im Array nicht größer als 2 mm sein. An die Auslegung der Schaltungen hinsichtlich des Platzbedarfs und der Leistungseffizienz ergeben sich hieraus hohe Anforderungen.

Das Fraunhofer IAF hat hierbei die Aufgabe, integrierte Front-End-Chips in 70-nm-GaN-Technologie für die Modulaufbauten in großer Stückzahl zur Verfügung zu stellen. Erstmals sollen bei Frequenzen um 140 GHz GaN-MMICs bestehend aus Leistungsverstärkern, rauscharmen Verstärkern und Schaltern realisiert werden. Dabei darf die Chipgröße lediglich 3 mm^2 betragen. Schaltungsdesign und -Simulation sind am Fraunhofer IAF bereits erfolgt und die MMICs befinden sich bei der Prozessierung im Reinraum des Instituts.

NITRIDES-4-6G

Dieses Industrieprojekt adressiert die Anbindung der zukünftigen terrestrischen 6G-Netze an die Satellitenkommunikation. Unter der Führung der Tesat-Spacecom GmbH arbeiten acht Partner an der Demonstration von leistungsfähigen und für Weltraumanwendungen geeigneten Komponenten auf der Basis von nitridischen Halbleitern. Erstmals sollen in diesem Zusammenhang die Verwendung von GaN-Substraten anstelle der herkömmlichen SiC-Substrate untersucht werden. Die Motivation hier ist das gitterangepasste Wachstum der für Transistoren und Schaltungen benötigten Epitaxieschichten auf diesem neuartigen Substratmaterial. Durch die damit reduzierte Anzahl der Kristaldefekte soll einerseits die Strahlungsfestigkeit der MMICs erhöht werden und andererseits soll gleichzeitig durch die Reduktion von Trapping-Effekten an Störstellen im Kristall die Leistungseffizienz der Bauelemente gesteigert werden.

Das Fraunhofer IAF wird in diesem Projekt seine GaN-MMIC-Technologie auf die GaN-Substrate anpassen und in Abstimmung mit Tesat-Spacecom Verstärkerschaltungen für das Q-Band (40 GHz bis 60 GHz) realisieren sowie deren Eigenschaften hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Lebensdauer evaluieren. Um den Betrieb der Schaltungen im Weltraum zu simulieren, werden Strahlungstests durchgeführt und ihre Auswirkungen auf Leistungsparameter der Halbleiterkomponenten untersucht.

Fraunhofer IAF has the task to provide integrated front-end chips in 70 nm GaN technology for the module assemblies in large quantities. For the first time, GaN MMICs consisting of power amplifiers, low-noise amplifiers and switches are to be realized at frequencies around 140 GHz. The chip size is limited to just 3 mm^2 . Circuit design and simulation have already been carried out at Fraunhofer IAF and the MMICs are being processed in the institute's clean room.

NITRIDES-4-6G

This industrial project addresses the connection of future terrestrial 6G networks to satellite communication. Under the direction of Tesat-Spacecom GmbH, eight partners are working on the demonstration of high-performance components based on nitride semiconductors that are suitable for space applications. For the first time, the use of GaN substrates instead of conventional SiC substrates will be investigated in this context. The motivation is the lattice-adapted growth of the epitaxial layers required for transistors and circuits on this new type of substrate material. By reducing the number of crystal defects, the radiation resistance of the MMICs is to be increased and at the same time the power efficiency of the components is to be enhanced by reducing trapping effects at impurities in the crystal.

In this project, Fraunhofer IAF will adapt its GaN MMIC technology to the GaN substrates and, in coordination with Tesat-Spacecom, realize amplifier circuits for the Q-band (40 GHz to 60 GHz) and evaluate their properties in terms of performance and lifetime. In order to simulate the operation of the circuits in space, radiation tests are being carried out and their effects on the performance parameters of the semiconductor components are being investigated.

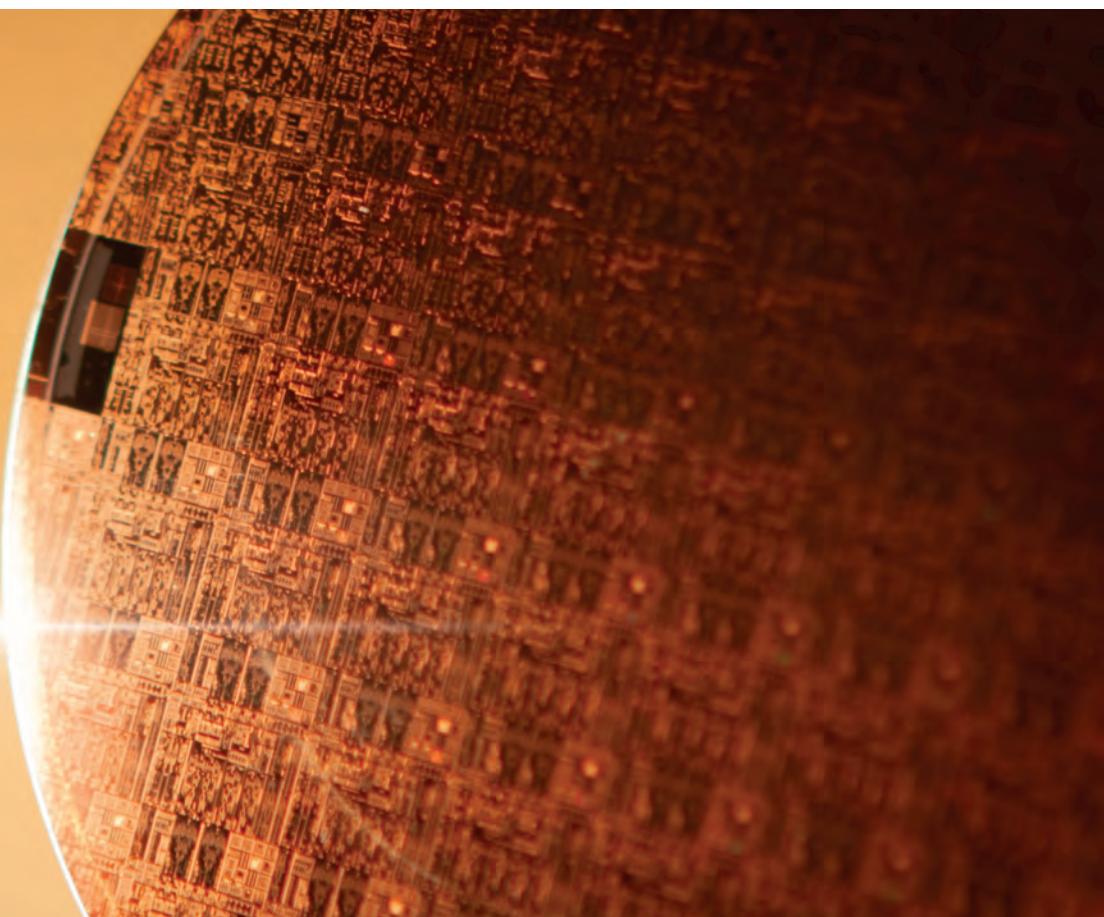
Unterstützung der GaN-Halbleiter-Industrie mit IPCEI ME/CT

Supporting GaN semiconductor industry with IPCEI ME/CT

Ein IPCEI (Important Project of Common European Interest) ist ein transnationales Vorhaben, das mittels staatlicher Förderung einen wichtigen Beitrag zu Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft leistet und die strategischen Ziele der Europäischen Union (EU) unterstützt. Die beteiligten Unternehmen und Einrichtungen bringen eine Kofinanzierung ein und bewirken positive Spillover-Effekte in der EU. Dabei werden sehr ehrgeizige Ziele in Bezug auf Forschung und Innovation verfolgt.

Dr. Michael Mikulla

An IPCEI (Important Project of Common European Interest) is a transnational project that makes an important contribution to the growth, employment and competitiveness of the European economy and supports the strategic objectives of the European Union (EU) by means of state funding. The participating companies and institutions contribute co-financing and generate positive spillover effects in the EU. Very ambitious goals are pursued in terms of research and innovation.



In Form mehrerer Unteraufträge ist das Fraunhofer IAF am aktuellen IPCEI Microelectronics and Communication Technology (ME/CT) beteiligt. Darin werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Mikroelektronik und Kommunikationstechnologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette verfolgt – von Materialien und Werkzeugen bis hin zu Chipdesign und Herstellungsprozessen –, und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. In diesen Projekten bringt das Fraunhofer IAF seine Expertise im Bereich der Galliumnitrid-(GaN)-Halbleitertechnologien für Hochfrequenz-Anwendungen ein und unterstützt damit die in diesem Feld tätige Industrie in Deutschland.

Erschließung des D-Bands und Technologieentwicklung für Messtechnik

Die Arbeiten sollen weitere Frequenzbänder für die mobile Kommunikation in 5G+ und später auch 6G-Anwendungen erschließen. Die durch das Fraunhofer IAF unterstützten GaN-Halbleitertechnologien zielen auf eine besonders hohe Leistungseffizienz bei extremen Linearitätsanforderungen ab, um den Energieverbrauch in zukünftigen Kommunikationsnetzen zu begrenzen – bei deutlich gesteigerten Übertragungskapazitäten und -geschwindigkeiten. Darüber hinaus werden durch das Fraunhofer IAF ehrgeizige Anwendungen in der Hochfrequenz-Messtechnik adressiert, die für die Entwicklung zukünftiger Kommunikationssysteme benötigt wird. Im Speziellen arbeiten Forschende an der Erschließung des D-Bands (110–170 GHz), da in diesem Frequenzband große Frequenzblöcke für Kommunikationsanwendungen der nächsten Generationen reserviert sind.

Schnelle industrielle Nutzung durch Multi-Project-Wafer-Runs

In einer engen Kooperation mit der in München ansässigen Firma Rohde & Schwarz entwickelt das Fraunhofer IAF eine spezielle Millimeterwellen-GaN-Technologie, u. a. für Anwendungen in der Messtechnik. Industrie und Wissenschaft innerhalb der EU soll der Zugang zu dieser Technologie durch sogenannte Multi-Project-Wafer-Runs ermöglicht werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die schnelle industrielle Nutzung der neu entwickelten Technologie für innovative Lösungen in der Messtechnik und bietet gleichzeitig eine technologische Plattform für die Erforschung von komplexen Schaltungskonzepten für Anwendungsgebiete wie autonomes Fahren, künstliche Intelligenz oder die automatisierte Produktionstechnik.

Vorderseitenprozessierter

Multi-Project-Wafer aus GaN/SiC

Front side processed multi-project GaN/SiC wafer

Fraunhofer IAF is involved in the current IPCEI Microelectronics and Communication Technology (ME/CT) as a subcontractor in several projects. This involves research and development projects on microelectronics and communication technology along the entire value chain — from materials and tools to chip design and manufacturing processes. IPCEI is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). In the projects, Fraunhofer IAF contributes its expertise in the field of gallium nitride (GaN) semiconductor technologies for high frequency applications and thus supports the respective industry in Germany.

D-band and measurement technology development

The projects aim at opening up further frequency bands for mobile communication in 5G+ and later also 6G applications. The GaN semiconductor technologies supported by Fraunhofer IAF aim to achieve particularly high power efficiency with extreme linearity requirements in order to limit energy consumption in future communication networks — with significantly increased transmission capacities and speeds. In addition, Fraunhofer IAF is addressing ambitious applications in high frequency measurement technology, which is required for the development of future communication systems. In particular, researchers are working on the development of the D-band (110–170 GHz) as large frequency blocks are reserved in this frequency band for next-generation communication applications.

Multi-project wafer runs accelerate industrial use

In close collaboration with the Munich-based company Rohde & Schwarz, Fraunhofer IAF is developing a special millimeter-wave GaN technology for applications in measurement technology, among others. Industry and science within the EU are to be given access to this technology through so-called multi-project wafer runs. This approach enables the rapid industrial use of the newly developed technology for innovative solutions in metrology. At the same time, it offers a technological platform for researching complex circuit concepts for application areas such as autonomous driving, artificial intelligence, or automated production technology.

Einzelphotonen-Detektoren für eine Bildgebung ohne direkte Sichtverbindung

Single-photon detectors for non-line-of-sight imaging

In dem Projekt »European Non-Line-of-Sight Optical Imaging«, kurz »ENLIGHTEN«, entwickeln die Verbundpartner neuartige Technologien für elektro-optische Sensorgäte der nächsten Generation. Diese Sensoren sollen eine Sicht auf Objekte oder Personen ermöglichen, wenn es keine direkte Sichtverbindung gibt, weil sie sich hinter Hindernissen, beispielsweise um die Ecke, befinden. Das Fraunhofer IAF trägt mit einem spezifischen InGaAs-basierten Einzelphotonen-Detektor-Array zur Entwicklung dieses innovativen Sensorkonzepts bei. Gefördert wird das Projekt vom Europäischen Verteidigungsfonds (EDF). **Dr. Frank Rutz**

In the project "European Non-Line-of-Sight Optical Imaging", ENLIGHTEN for short, the partners develop disruptive technologies for next-generation electro-optical sensing devices. These sensors should enable to see objects or people when there is no direct line of sight because they are behind obstacles, for example around corners. Fraunhofer IAF contributes to this innovative sensing concept with a specific InGaAs-based single-photon detector array. The project is funded by the European Defense Fund (EDF).

Das Projekt »ENLIGHTEN« zielt auf ein neuartiges optisches Sensorkonzept ab, das durch die Laufzeitanalyse von an Wänden reflektierter Photonen im infraroten Wellenlängenbereich eine Sicht um die Ecke ermöglicht. Dieses fortschrittliche Bildgebungsverfahren ist insbesondere bei anspruchsvollen Aufklärungsmissionen gefragt und kann so beispielsweise Sicherheits- und Rettungskräften einen Nutzen bringen.

Bei diesem Verfahren wird ein nanosekundenkurzer Laser-impuls im infraroten Wellenlängenbereich gegen eine Wand gestrahlt. Ein Teil des Impulses wird von der Wand reflektiert und erreicht ein Objekt, das sich um die Ecke befindet. Von dort wird der Laserimpuls erneut reflektiert und gelangt zurück zur Wand, von wo die Photonen nach einer weiteren Reflexion mittels eines äußerst empfindlichen Photodetektors nachgewiesen werden.

The ENLIGHTEN project aims to develop a new kind of optical sensor concept that enables a view around corners by analyzing the time of flight of photons reflected from walls in the infrared wavelength range. This advanced imaging technique is particularly useful for demanding reconnaissance missions and can thus benefit security and rescue forces, for example.

In this method, a nanosecond-short laser pulse in the infrared wavelength range is beamed against a wall. Part of the impulse is reflected by the wall and reaches an object around the corner. From there, the laser pulse is reflected again and returns to the wall, from where the photons are detected after a further reflection using an extremely sensitive photodetector.

Nachweis von einzelnen Photonen

Der entscheidende Teil des Bildgebungsverfahrens liegt in der Analyse der Laufzeit des Impulses. Diese Laufzeit gibt Auskunft darüber, wie weit das reflektierende Objekt von der Wand entfernt ist. Durch die präzise Messung von Laufzeit und Richtung der reflektierten Photonen kann ein Bild des verborgenen Objekts numerisch berechnet werden. Aufgrund der mehrfachen diffusen Reflexion des Laserstrahls entlang des optischen Strahlwegs wird nur ein sehr geringer Bruchteil der ursprünglich im Laserimpuls enthaltenen Photonen letztlich detektiert. Der Detektor muss daher in der Lage sein, selbst einzelne Photonen nachzuweisen. Zudem sollte der Detektor eine hohe zeitliche wie auch räumliche Auflösung bieten, um detaillierte Bilder des reflektierenden Objekts zu ermöglichen.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, entwickelt das Fraunhofer IAF Einzelphotonen-Lawinendurchbruchdioden (Single-Photon Avalanche Diodes, SPADs) auf Basis von Indiumgalliumarsenid (InGaAs), die einzelne Infrarot-Photonen mit Wellenlängen um 1550 nm detektieren. Die Entwicklung dieser Detektortechnologie zielt einerseits auf eine möglichst hohe Nachweiseffizienz einzelner Photonen mit zeitlichen Unsicherheiten unter 100 ps und andererseits auf eine möglichst geringe Dunkelzählrate, d.h. falsche Zählpulse nicht vorhandener Photonen. Dies wird durch bestmögliche Materialqualität beim epitaktischen Wachstum der Halbleiterschichten sowie einer iterativen Optimierung der prozesstechnologischen Strukturierung der Detektorbau-elemente am Fraunhofer IAF umgesetzt. Einzelement-InGaAs-SPADs wurden bereits hergestellt und SPAD-Zeilenanordnungen befinden sich aktuell in der Fertigung. Diese werden dem Projektconsortium zur weiteren Integration und Bewertung eines Non-Line-of-Sight-(NLOS)-Bildgebungssystems bereitgestellt.

Detection of single photons

The crucial part of the imaging method is analyzing the time of flight of the pulse. This time of flight provides information on how far the reflecting object is from the wall. By precisely measuring the time of flight and direction of the reflected photons, an image of the hidden object can be calculated numerically. Due to the multiple diffuse reflection of the laser beam along the optical beam path, only a very small fraction of the photons originally contained in the laser pulse are ultimately detected. The detector must therefore be able to detect even single photons. In addition, the detector should offer a high temporal and spatial resolution to enable detailed images of the reflecting object.

To meet these requirements, Fraunhofer IAF develops single-photon avalanche diodes (SPADs) based on indium gallium arsenide (InGaAs), which detect single infrared photons with wavelengths around 1550 nm. The development of this detector technology targets both the highest possible detection efficiency of individual photons with temporal uncertainties below 100 ps and the lowest possible dark count rate, i.e., false counting pulses of non-existent photons. This is achieved through the best possible material quality in the epitaxial growth of the semiconductor layers and an iterative optimization of the technological structuring process of the detector components at Fraunhofer IAF. Single-element InGaAs SPADs have already been manufactured and SPAD line arrays are currently in fabrication. These will be provided to the project consortium for further integration and evaluation of a non-line-of-sight (NLOS) imaging system.

*Einzelphotonen-Detektoren tragen zur Erfassung von Objekten bei, die sich um die Ecke befinden, und können damit bei Rettungseinsätzen von großem Nutzen sein
Single-photon detectors contribute to the measurement of objects that are around corners and can therefore be very useful in rescue operations*

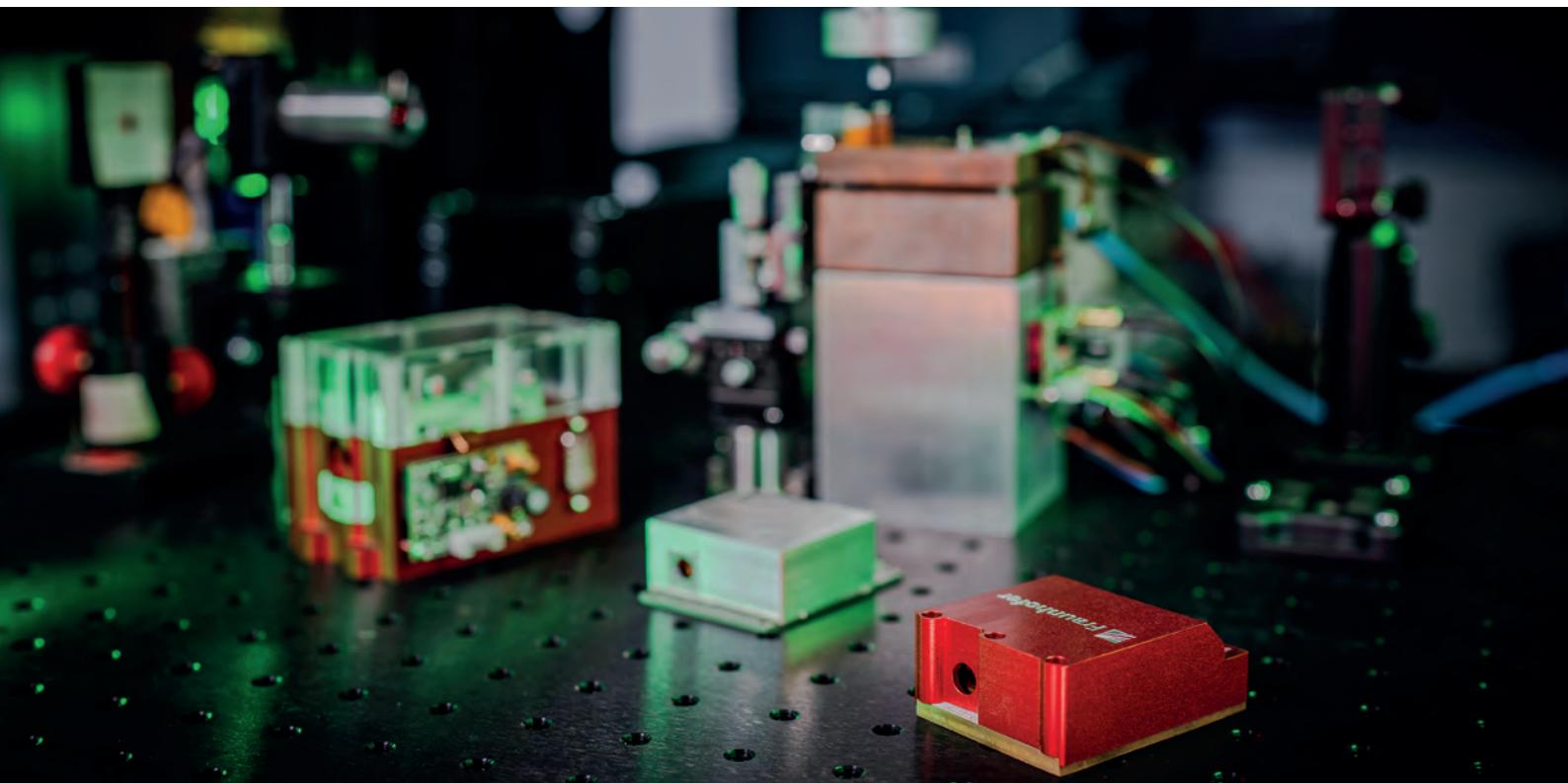


Elektro-optisches Messsystem zur Inline-Produktionskontrolle in der Chipfertigung

Electro-optical measuring system for inline production control in chip manufacturing

Breitbandige Laser im mittleren Infrarot (MIR) kommen potentiell bei der spektroskopischen Identifizierung in der Analytik ebenso zur Anwendung wie bei der Vermessung der 3D-Profiltreue in der Chipfertigung. Im Projekt »AIRLAMet« entwickeln Forschende des Fraunhofer IAF ein automatisiertes Aufbauverfahren für resonant durchstimmbare Quantenkaskadenlaserquellen (MOEMS-EC-QCL). Damit wollen sie eine Laserquellen-Serie verfügbar machen, die hinsichtlich Kosten, Geschwindigkeit und Flexibilität für die Industrie attraktiv ist und zahlreiche Analytik- und Messaufgaben erst ermöglicht oder verbessert.

Broadband lasers in the mid-infrared (MIR) are potentially used for spectroscopic identification in analytics as well as for measuring 3D profile fidelity in chip manufacturing. In the AIRLAMet project, researchers at Fraunhofer IAF are developing an automated assembly process for resonantly tunable quantum cascade laser sources (MOEMS-EC-QCL). Their aim is to make a laser source series available that is attractive to industry in terms of cost, speed, and flexibility. The series is expected to enable or improve numerous analytical and measurement tasks.



Im Projekt »AIRLAMet« arbeiten Forschende daran, kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) einen breiten Zugang zu MIR-Technologien zu ermöglichen, die bisher nur speziellen Nischenanwendungen vorbehalten sind. Dafür heben sie die Herstellung der von Fraunhofer IAF und Fraunhofer IPMS entwickelten Quantenkaskadenlaser (quantum cascade laser, QCL) mit externem optischen Resonator (external cavity, EC) und MOEMS-Gitterscanner (mikro-opto-elektrisch-mechanisches System) auf eine automatisierte Fertigungsbasis. Dies verspricht Kosten, Verfügbarkeit und Reproduzierbarkeit auf ein industrietaugliches Niveau zu bringen, was neue Anwendungsfelder erschließt. Die Laserquellentechnologie zeichnet sich durch eine breite und extrem schnelle spektrale Durchstimmbarkeit aus. Dadurch werden Echtzeit-spektroskopie und inline-fähige Messsysteme ermöglicht.

Vorteile von MOEMS-EC-QCLs

MOEMS-EC-QCL-Quellen bieten eine Reihe von Vorzügen gegenüber klassischen Ansätzen wie der FTIR-Spektroskopie, etwa eine hohe spektrale Leistungsdichte und Kompaktheit. Namentlich die von Fraunhofer IAF und Fraunhofer IPMS entwickelten MOEMS-EC-QCLs erzielen darüber hinaus einen enormen Geschwindigkeitsvorteil: Sie erreichen eine spektrale Messgeschwindigkeit von bis zu 1 kHz. Da die spektrale Breite der Einzelquellen jedoch begrenzt ist, wird für einige Anwendungen eine Kombination mehrerer Quellen benötigt. Deshalb bildet die Entwicklung einer flexiblen Kombinationsmethode mehrerer Laser-»Kerne« einen zweiten Projektschwerpunkt.

Einen breiten Einsatz von MOEMS-EC-QCL-Quellen verhindern bisher vor allem die hohen Herstellungskosten der Einzelkerne und der Aufwand für die Kombination mehrerer Quellen in ein Gesamtsystem. Diese beiden Barrieren zu überwinden, ist das Kernanliegen von »AIRLAMet«. Hierfür entwickelt das Projektteam basierend auf der MOEMS-EC-QCL-Laser-technologie einen Demonstrator für die Messung der Dicke und Zusammensetzung dünner funktionaler Schichten in der Halbleiterproduktion. Durch ihre hohe Messgeschwindigkeit ermöglichen die MOEMS-EC-QCLs eine ortsaufgelöste Vermessung bei einer der Produktion angemessenen Geschwindigkeit. Die zerstörungsfreie Prüfung im laufenden Prozess ermöglicht es, Fehler und Defekte frühzeitig zu erkennen und ggf. sofort zu beheben. Der Demonstrator soll diese Vorteile veranschaulichen.

Bereits erarbeitet haben die Forschenden am Fraunhofer IAF ein neues, automatisiert fertigbares Modulkonzept für die MOEMS-EC-QCLs, das sich aktuell in der Evaluierung befindet.

In the AIRLAMet project, researchers are working on giving small and medium-sized enterprises (SMEs) broad access to MIR technologies that have so far only been reserved for special niche applications. To this end, they are taking the manufacturing of quantum cascade lasers (QCL) developed by Fraunhofer IAF and Fraunhofer IPMS with an external optical cavity (EC) and MOEMS grating scanner (micro-opto-electro-mechanical system) to an automated fabrication basis. This promises to bring costs, availability and reproducibility to a level suitable for industrial use, opening up new fields of application. The laser source technology is characterized by a broad and extremely fast spectral tunability. This enables real-time spectroscopy and inline-capable measurement systems.

Advantages of MOEMS-EC-QCLs

MOEMS-EC-QCL sources offer a number of advantages over conventional approaches such as FTIR spectroscopy, including high spectral power density and compactness. In particular, the MOEMS-EC-QCLs developed by Fraunhofer IAF and Fraunhofer IPMS also achieve an enormous speed advantage: they reach a spectral measurement speed of up to 1 kHz. However, since the spectral width of the individual sources is limited, a combination of several sources is required for some applications. For this reason, the development of a flexible method for combining several laser 'cores' is a second focus of the project.

The high production costs of the individual cores and the effort involved in combining several sources into an overall system have so far prevented the widespread use of MOEMS-EC-QCL sources. Overcoming these two barriers is the main objective of AIRLAMet. To this end, the project team is developing a demonstrator based on MOEMS-EC-QCL laser technology for measuring the thickness and composition of thin functional layers in semiconductor manufacturing. Thanks to their high measurement speed, the MOEMS-EC-QCLs enable spatially resolved measurement at a speed appropriate to production. Non-destructive testing during the ongoing process makes it possible to detect faults and defects at an early stage and, if necessary, rectify them immediately. The demonstrator is intended to illustrate these advantages.

The researchers at Fraunhofer IAF have already developed a new, automated module concept for the MOEMS-EC-QCLs, which is currently being evaluated.

Drei Generationen von MOEMS-EC-QCLs (von links nach rechts). Das Projekt hebt die MOEMS-EC-QCL-Technologie durch die Entwicklung eines automatisierten Aufbauverfahrens auf die nächste Stufe.
Three generations of MOEMS-EC-QCLs (from left to right). The project takes MOEMS-EC-QCL technology to the next level by developing an automated assembly process.

Quantum^{BW}

Fraunhofer



Feature: Quantum^{BW} – THE LÄND of quantum technology

Feature: Quantum^{BW} – THE LÄND of quantum technology

Quantum^{BW} bildet eine Dachmarke für die Quantentechnologieforschung im Land Baden-Württemberg. Die Innovationsinitiative formt ein starkes Netzwerk, in dem Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sowie führende High-Tech-Unternehmen und Start-ups aus THE LÄND ihre Kompetenzen bündeln. Im Miteinander entstehen aus Pionierforschung in den Quantenwissenschaften Produkte wie ultrasensible Sensoren für autarke Navigation, besonders präzise MRT-Geräte und Prototypen hochleistungsfähiger Quantencomputer.

Quantum^{BW} forms an umbrella label for quantum technology research in the state of Baden-Württemberg. The innovation initiative forms a strong network in which universities, non-university research institutions as well as leading high-tech companies and start-ups from THE LÄND pool their expertise. Together, pioneering research in the quantum sciences results in products such as ultra-sensitive sensors for autonomous navigation, particularly precise MRI devices and prototypes of high-performance quantum computers.

Auf dem Quantum^{BW}-Landesstand auf der Messe Quantum Effects 2023 in Stuttgart wurde die wegweisende Quantentechnologieforschung in Baden-Württemberg ausgestellt
The pioneering quantum technology research of Baden-Württemberg was exhibited at the Quantum^{BW} booth at Quantum Effects 2023 fair in Stuttgart



Die Landesinitiative Quantum^{BW} wurde 2023 gestartet, um die im Land verteilte Expertise in den Quantentechnologien an den universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie in Unternehmen unter einem gemeinsamen Dach zusammenzuführen, zu vernetzen und Synergien zu schaffen. Dadurch sollen zum einen Know-how und Infrastrukturen effizienter genutzt und ausgebaut werden, und zum anderen die Sichtbarkeit Baden-Württembergs als Quanten-Standort national wie international gestärkt werden. Das in Quantum^{BW} erschlossene Ökosystem unterstützt die Wissenschaft und Wirtschaft dabei, die großen Potenziale der Quantentechnologien zu erschließen und sie gezielt in den Markt zu bringen. Die Initiative wird durch die baden-württembergischen Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus gefördert.

Operativ werden die Aktivitäten der Initiative durch eine Geschäftsstelle betreut, die gleichzeitig als zentraler Kontaktpunkt fungiert. Die Quantum^{BW}-Geschäftsstelle formiert sich dezentral und besteht aus Mitgliedern der Universitäten Stuttgart und Ulm sowie der Institute Fraunhofer IAF und IAO. Im ersten Projektjahr wurden entlang der Handlungsfelder von Quantum^{BW} (siehe Abbildung »Zentrale Struktur«) verschiedene Aktivitäten durchgeführt, um einen Rahmen zu schaffen, der die quantentechnologischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Land unterstützt.

Ein starker Standort für Quantentechnologien

Baden-Württemberg bietet durch seine vielen Akteure im wissenschaftlichen und industriellen Feld der Quantenforschung ein einmaliges Ökosystem, das starke Infrastrukturen, Synergien und Potenziale für eine frühzeitige Markteinführung von Quantentechnologien bietet.

Um dieses Quantentechnologie-Ökosystem zu fördern, wurden verschiedene Austauschformate wie die »Developer Conference« 2024 des Kompetenzzentrums Quantum Computing Baden-Württemberg, das Cross Cluster Event »Quantum Technologies meets Automotive« von Photonics BW sowie

The state initiative Quantum^{BW} was launched in 2023 to bring together and pool the expertise in quantum technologies at university and non-university research institutions and in companies across the state under one roof and to create synergies. The aim is to use and expand know-how and infrastructures more efficiently and to strengthen Baden-Württemberg's visibility as a quantum location both nationally and internationally. The ecosystem developed in Quantum^{BW} supports science and industry in tapping into the great potential of quantum technologies and bringing them to market in a targeted manner. The initiative is funded by the Baden-Württemberg Ministries of Science, Research and the Arts as well as of Economic Affairs, Labor and Tourism.

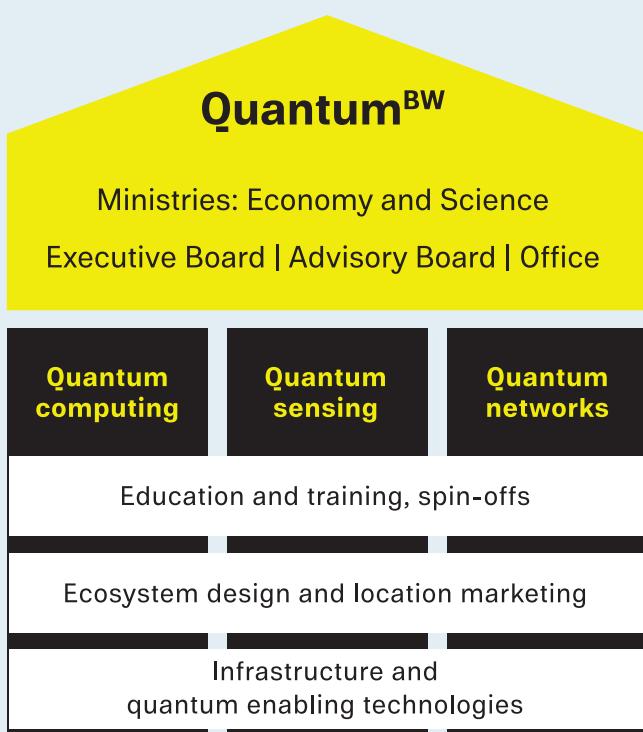
The initiative's activities are operationally managed by an office, which also acts as a central point of contact. The Quantum^{BW} office is made up decentralized and is formed by members from the universities of Stuttgart and Ulm as well as the institutes Fraunhofer IAF and IAO. In the first year of the project, various activities were carried out along Quantum^{BW} fields of action (see figure "Central structure") in order to create a framework that supports quantum technology research and development work in the state.

A strong location for quantum technologies

With its many players in the scientific and industrial field of quantum research, Baden-Württemberg offers a unique ecosystem that provides strong infrastructures, synergies and potential for an early market launch of quantum technologies.

In order to promote this quantum technology ecosystem, various exchange formats such as the "Developer Conference 2024" of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg, the cross-cluster event "Quantum Technologies

Zentrale Struktur und Handlungsfelder von Quantum^{BW}
Central structure and fields of actions of Quantum^{BW}



eine Abendveranstaltung auf dem »Austauschforum Quantum Computing 2024 scale up!« von der DLR QCI begleitet und ausgerichtet. Darüber hinaus bot der Quantum^{BW}-Landesstand auf der im Jahr 2024 erstmals stattfindenden Quantum Effects in Stuttgart mit seinen 450 m² einen einmaligen Einblick in die Pionierforschung im Quantencomputing und in der Quantensensorik in Baden-Württemberg. Veranstaltungen wie diese bringen die Community zusammen und machen die Quantentechnologieforschung und -industrie auch über die Landesgrenzen hinaus bekannt.

Aus- und Weiterbildung im Land der Quanten

Ein weiteres wesentliches Handlungsfeld von Quantum^{BW} ist die Aus- und Weiterbildung, damit die Technologie künftig besser eingeschätzt und genutzt werden kann. An den Instituten Fraunhofer IAF und IAO wurde ein Schulungsprogramm entwickelt, das eine einmalige interaktive Quantencomputing-Ausbildung für Entwickelnde, Forschende und Studierende bietet. In verschiedenen Formaten werden fundierte Kenntnisse im Bereich Quantenalgorithmitik vermittelt und erste Programmiererfahrung mit realen Quantencomputern gesammelt. Die Schulung adressiert außerdem Fragestellungen der Management-Ebene und gibt einen weitreichenden Überblick und konkrete Handlungsempfehlungen zu Trends, Marktentwicklungen und der Wettbewerbslandschaft im Quantencomputing. Die Schulungsreihe wird im Rahmen von Quantum^{BW} fortgesetzt.

Where possibility becomes reality

Neben diesen Aktivitäten wird die Quantum^{BW}-Roadmap, die einen Fahrplan für die Technologieentwicklung im Bereich Quantensensorik und Quantencomputing in Baden-Württemberg bietet, durch ein Expertengremium stetig weiterentwickelt und an die Dynamik des Forschungsfeldes angepasst. Gleichzeitig werden Förderformate entwickelt, die die Quantentechnologie-Infrastrukturen des Landes und die Erforschung von Enabling-Technologien unterstützen, um den Markteintritt der Quantentechnologien in THE LÄND Realität werden zu lassen.



Die »KQCBW Developer Conference« fand im März 2024 im Rahmen von Quantum^{BW} statt
Quantum^{BW} supported the second KQCBW Developer Conference, which took place in March 2024

meets Automotive“ by Photonics BW and an evening event accompanying the exchange forum “Quantum Computing 2024 scale up!” organized by DLR QCI were held. In addition, the 450 m² Quantum^{BW} joint booth at Quantum Effects fair in Stuttgart, which took place for the first time in 2023, offered a unique insight into pioneering research in quantum computing and quantum sensor technology in Baden-Württemberg. Events like these bring the community together and make Baden-Württemberg’s quantum technology research and industry known beyond the state’s borders.

Training, further education and CPD in the land of the quantum

Another key field of action for Quantum^{BW} is education, training and CPD, in order to make the technology better assessable and usable in the future. The institutes Fraunhofer IAF and IAO have developed a training program that offers unique application-oriented quantum computing trainings for developers, researchers and students. In various formats, in-depth knowledge in the field of quantum algorithms is taught and initial programming experience with real quantum computers is gained. These trainings also address matters at management level and provide a far-reaching overview and concrete recommendations for action on trends, market developments and the competitive landscape in quantum computing. The training series will be continued within the framework of Quantum^{BW}.

Where possibility becomes reality

In addition to these activities, the Quantum^{BW} Roadmap, which provides a guideline for technology development in the field of quantum sensor technology and quantum computing in Baden-Württemberg, is constantly being further developed by a board of experts and adapted to the dynamics of the research field. At the same time, funding formats are being developed to support the state’s quantum technology infrastructures and research into enabling technologies in order to make the market entry of quantum technologies in THE LÄND a reality.

Autonome Navigation mit Quantenmagnetometern

Autonomous navigation with quantum magnetometers

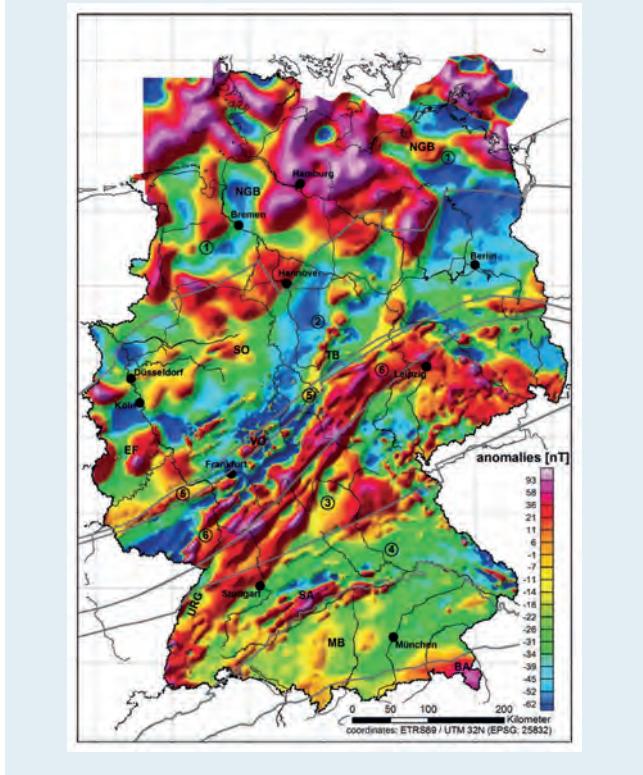
Im Projekt »ADEQUADE« erforscht das Fraunhofer IAF zusammen mit EU-Forschungs- und Industriepartnern das Potenzial der Quantensensorik für die europäische Verteidigung. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf kompakten Quanten-Vektormagnetometern zur globalen Positionsbestimmung auf Basis von NV-Zentren in Diamant. Das Projekt wird vom Europäischen Verteidigungsfonds (EDF) gefördert.

Dr. Michael Kunzer

In the ADEQUADE project, Fraunhofer IAF is researching the potential of quantum sensor technology for European defense together with EU research and industry partners. A key focus is on compact quantum vector magnetometers for global positioning based on NV centers in diamond. The project is funded by the European Defense Fund (EDF).

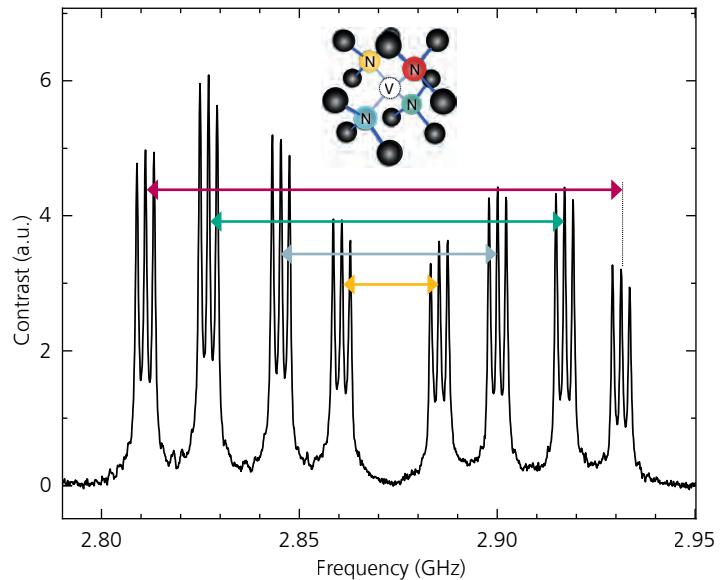
Die Satelliten-basierte Positionsbestimmung nimmt in unserem täglichen Leben eine immer wichtigere Bedeutung ein. Allerdings ist sie nicht überall verfügbar (z.B. unter Wasser) und im Krisenfall sehr leicht zu stören. Daher kommen der autonomen Navigation und Positionsbestimmung eine zentrale Rolle im Verteidigungsfall zu. Durch die rasche Entwicklung der Quantensensorik konnten im Labor bereits magnetische Sensoren mit Empfindlichkeiten im unteren pT-Bereich demonstriert werden. Jedoch erfordern sie meist eine umfangreiche Peripherie, sind groß, teuer und empfindlich. In dem Forschungsprojekt »Advanced, Disruptive and Emerging Quantum Technologies for Defense«, kurz »ADEQUADE«, werden die Anwendungsanforderungen erarbeitet und mit dem Potenzial der unterschiedlichen Quantensensoren abgeglichen. Das Fraunhofer IAF entwickelt dabei Quantensensoren, die die Erstellung hochpräziser magnetischer Karten der Feldintensität, Inklination und Deklination erlauben. In Verbindung mit einem Vektormagnetometer soll eine autonome, global verfügbare und kaum zu störende Methode zur Positionierung entstehen.

Satellite-based positioning is becoming increasingly important in our daily lives. However, it is not available everywhere (e.g., under water) and is very easy to disrupt in a crisis situation. Autonomous navigation and positioning therefore play a central role in the event of defense. Thanks to the rapid development of quantum sensor technology, magnetic sensors with sensitivities in the lower pT range have already been demonstrated in the laboratory. However, they usually require extensive peripherals and are large, expensive and sensitive. In the research project "Advanced, Disruptive and Emerging Quantum Technologies for Defense", or ADEQUADE for short, the application requirements are being developed and compared with the potential of the various quantum sensors. Fraunhofer IAF is developing quantum sensors that allow the creation of high-precision magnetic maps of field intensity, inclination and declination. In conjunction with a vector magnetometer, an autonomous, globally available and hardly interferable method of positioning is to be developed.



Die magnetische Karte Deutschlands zeigt die dem Feld des Erdkerns ($\approx 49 \mu\text{T}$) überlagerten Krustenanomalien im nT-Bereich

The magnetic map of Germany shows the crustal anomalies in the nT range superimposed on the field of the Earth's core ($\approx 49 \mu\text{T}$)



Spektroskopische Messung der Vektorkomponenten eines externen Magnetfelds durch Zerlegung entlang der vier <111>-Richtungen des Diamantsensors

Spectroscopic measurement of the vector components of an external magnetic field by decomposition along the four <111> directions of the diamond sensor

NV-Vektormagnetometer

Das Stickstoff-Vakanz-Zentrum (NV-Zentrum) ist ein axiales Farbzentrums, das sich entlang einer der vier <111>-Richtungen im Diamantgitter anordnet. Es bindet einen Elektronenspin, der sich optisch ausrichten, mittels Hochfrequenzsignalen kontrollieren und wieder optisch auslesen lässt. Aufgrund der Wechselwirkung des Elektronenpols mit dem Erdmagnetfeld kommt es zu einer sogenannten Zeeman-Aufspaltung, die mittels magnetischer Resonanzspektroskopie (ODMR) bei Raumtemperatur mit sichtbarem Licht sehr präzise vermessen werden kann. Das Resonanzspektrum bei 2,9 GHz ist mit kompakten und preiswerten Mobilfunkkomponenten zugänglich.

Mit jeder der NV-Familien lässt sich die jeweilige Vektorkomponente des Erdmagnetfelds entlang der jeweiligen <111>-Richtung vermessen. Während übliche skalare Magnetometer nur die Feldintensität messen, sind so alle Vektorkomponenten des Erdmagnetfelds mit einem einzigen Sensorchip zugänglich. Auch die bei Vektormagnetometern übliche senkrechte Justage dreier Einzelchips kann entfallen, da die NV-Zentren bereits präzise im Kristall orientiert sind.

Herausforderung Genauigkeit und Dynamik

Das magnetische Feld des Erdkerns ($\approx 50 \mu\text{T}$) zeigt einen kontinuierlichen globalen Verlauf, der sich zur globalen Positionierung eignet. Für eine Positionsgenauigkeit unter 100 m müssen jedoch die schwachen Krustenanomalien im nT-Bereich erfasst werden. Dies erfordert eine hohe Dynamik und Resistenz gegenüber Störsignalen.

NV vector magnetometer

The nitrogen-vacancy center (NV center) is an axial color center that is arranged along one of the four <111> directions in the diamond lattice. It binds an electron spin that can be optically aligned, controlled by means of high-frequency signals and optically read out again. Due to the interaction of the electron spin with the earth's magnetic field, a so-called Zeeman splitting occurs, which can be measured very precisely by means of magnetic resonance spectroscopy (ODMR) at room temperature with visible light. The resonance spectrum at 2.9 GHz is accessible with compact and inexpensive mobile radio components.

Each of the NV families can be used to measure the respective vector component of the earth's magnetic field along the respective <111> direction. While conventional scalar magnetometers only measure the field intensity, all vector components of the earth's magnetic field are accessible with a single sensor chip. The vertical alignment of three individual chips, which is common with vector magnetometers, can also be omitted, as the NV centers are already precisely oriented in the crystal.

The challenge of accuracy and dynamics

The magnetic field of the earth's core ($\approx 50 \mu\text{T}$) shows a continuous global course that is suitable for global positioning. For positioning accuracy below 100 m, however, the weak crustal anomalies in the nT range must be detected. This requires high dynamics and resistance to interference signals.

Neue Ära in der Erforschung von Festkörper-Quantencomputing

New era in solid-state quantum computer research

Mit dem Start der drei EU-weiten Projekte »SPINUS«, »SPARQ« und »AI4QT« bricht eine neue Ära in der Erforschung des Festkörper-Quantencomputings und der Quantensimulation an. Diese Initiativen sollen die Quantentechnologie entscheidend voranbringen, indem sie die Entwicklung von Spin-Qubit-Plattformen, Quantenalgorithmen für maschinelles Lernen und innovative Technologien zur Erzeugung von Farbzentren in Diamanten fokussieren. Die Zusammenarbeit von führenden Forschungseinrichtungen in Europa unter der Koordination des Fraunhofer IAF verspricht, die Grenzen des Quantencomputings zu erweitern.

Dr. Daniel Hähnel

The launch of the three EU-wide projects SPINUS, SPARQ and AI4QT heralds a new era in research on solid-state quantum computing and quantum simulation. These initiatives are expected to significantly advance quantum technology by focusing on the development of spin qubit platforms, quantum algorithms for machine learning and innovative technologies for generating color centers in diamonds. The collaboration of leading research institutions in Europe under the coordination of Fraunhofer IAF promises to push the boundaries of quantum computing.

Vortrag am Fraunhofer IAF über
Festkörper-Quantencomputing
Talk at Fraunhofer IAF on solid-
state quantum computing



Integrativer Forschungsansatz in drei Projekten

Das von Horizon Europe geförderte Projekt »SPINUS« basiert auf dem Potenzial von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant, stabile und kontrollierbare Quantenzustände bei Raumtemperatur zu ermöglichen. Ziel des 2024 gestarteten Projekts ist es, experimentelle Plattformen auf der Basis von Festkörper-Spin-Qubits für Quantensimulationen und -computing zu etablieren. Die Forschenden verfolgen dabei einen umfassenden Ansatz, welcher Materialdesign, Steuerungstechniken, Auslesetechnologie sowie maßgeschneiderte Quantenalgorithmen umfasst. Koordiniert vom Fraunhofer IAF, bringt »SPINUS« die Expertise von zwölf Partnern aus acht Ländern zusammen. In enger Zusammenarbeit konnte bereits ein vielversprechendes Fundament geschaffen werden, um die Entwicklung eines Quantenprozessors auf Basis von Spin-Photonen gemeinsam zu meistern.

Im Projekt »SPARQ« leistet das Fraunhofer IAF einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung eines Verfahrens zur gezielten Erzeugung von Farbzentren-Arrays wie Stickstoffvakanzen (NV) und Zinnvakanzen (SnV) durch Einzel-Ionen-Implantation in Diamant. Das zu entwickelnde SnV-Verfahren kombiniert ein fortschrittliches Ionenstrahlensystem für die Erzeugung von Einzel-Ionen, welche aus Flüssigmetall- und Plasmaquellen erzeugt werden, mit dem homo-epitaktischen Wachstum von Diamant sowie Annealing und Oberflächenmodifikation. Diese Technologie soll nicht nur die präzise Positionierung von Dotanden in Diamanten, sondern auch in anderen Halbleitern ermöglichen, was die Möglichkeiten für breite Anwendungen in der Nanotechnologie und Quantentechnologie eröffnet.

Das Projekt »AI4QT« widmet sich der Entwicklung von Quantenalgorithmen für das maschinelle Lernen, um die Rechenressourcen aktueller Quantenprozessoren optimal zu nutzen und zu steuern. Durch die Kombination von Quantencomputing und KI wird angestrebt, praktische Anwendungsszenarien des Quantencomputings zu skizzieren und die Forschung in diesem Bereich voranzutreiben. Die im Projekt entwickelten Protokolle, Bibliotheken und Algorithmen sollen neue Wege für die Nutzung maschinellen Lernens zur Steuerung von Spin-basierten Quantencomputern aufzeigen. »AI4QT« gehört zum Forschungsprogramm Quantensysteme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und ist Teil der Fördermaßnahme »EUREKA« Deutschland-Ungarn.

Gemeinsam den Stand der Technik vorantreiben

Die Koordination und Zusammenarbeit zwischen diesen Projekten unterstreicht die Bedeutung einer integrativen Forschungslandschaft, die darauf abzielt, Synergien zu schaffen und das Potenzial der Spin-basierten Quantentechnologien voll auszuschöpfen. »SPINUS«, »SPARQ« und »AI4QT« leisten einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung von Technologien, die die Grundlage für die nächste Generation von Quantencomputern und -simulatoren bilden.

Integrative research approach in three projects

The Horizon Europe-funded project SPINUS builds on the potential of nitrogen vacancy centers (NV) in diamond to enable stable and controllable quantum states at room temperature. The aim of the project, which was launched in January 2024, is to establish experimental platforms based on solid-state spin qubits for quantum simulations and computing. The researchers are pursuing a comprehensive approach that includes material design, control techniques, readout technology and customized quantum algorithms. Coordinated by Fraunhofer IAF, SPINUS brings together the unique expertise of twelve partners from eight different countries. In close collaboration, a promising foundation has already been laid for the joint development of a quantum processor based on spin photons.

As part of the SPARQ project, Fraunhofer IAF is making a significant contribution to the development of a process for the targeted generation of color center arrays such as nitrogen vacancies (NV) and tin vacancies (SnV) by single-ion implantation in diamond. The SnV process to be developed combines an advanced ion beam system for the generation of single ions generated from liquid metal and plasma sources with the homo-epitaxial growth of diamond as well as with annealing and surface modification. This technology should not only enable the precise positioning of dopants in diamonds, but also in other semiconductors, opening up the potential for broad applications in nanotechnology and quantum technology.

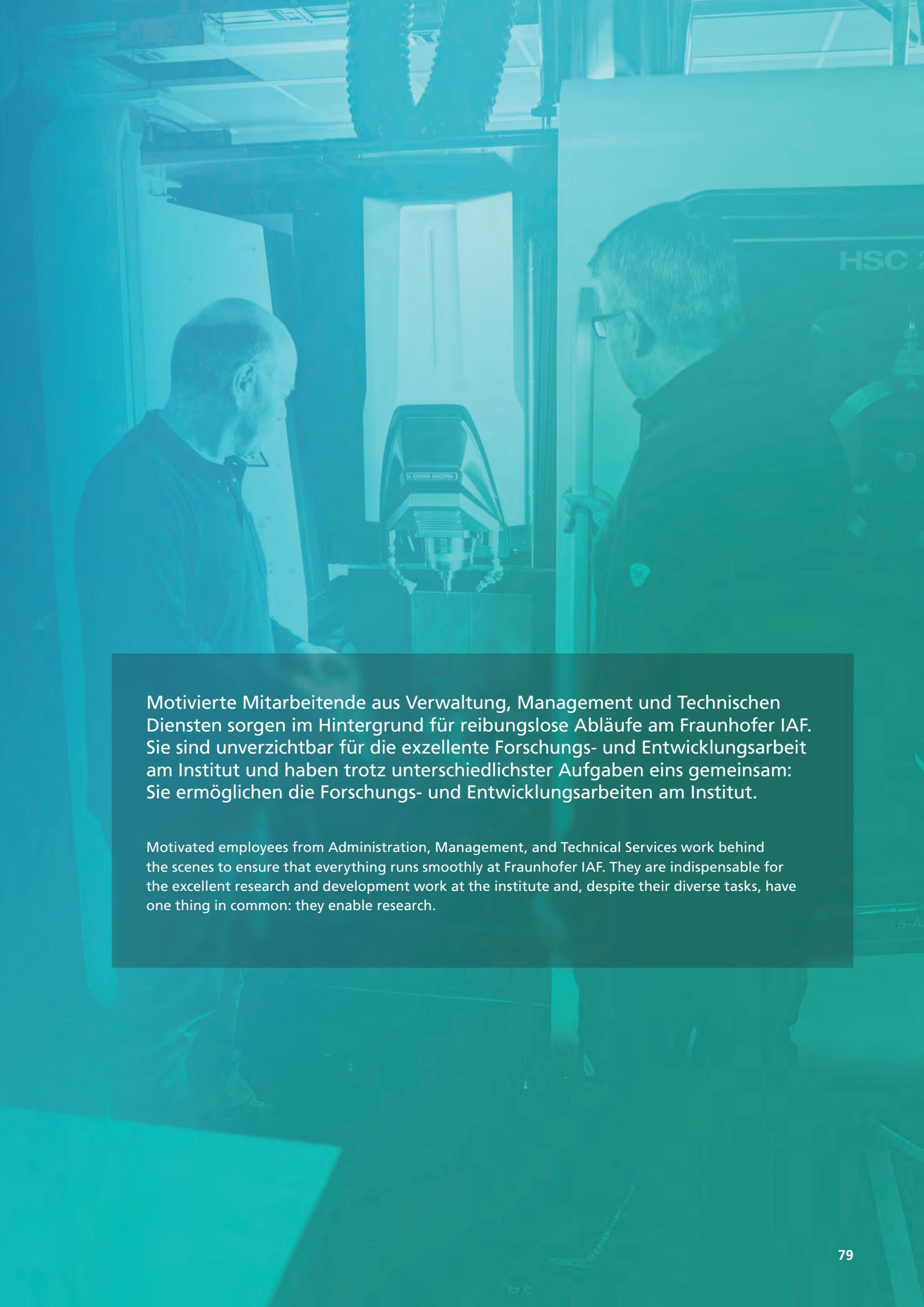
The AI4QT project is dedicated to the development of quantum algorithms for machine learning in order to optimally utilize and control the computing resources of current quantum processors. By combining quantum computing and AI, the aim is to outline practical application scenarios for quantum computing and to advance research in this area. The protocols, libraries and algorithms developed in the project will show new ways of using machine learning to control spin-based quantum computers. AI4QT is part of the Quantum Systems research program of the Federal Ministry of Education and Research as well as of the EUREKA Germany-Hungary funding measure.

Jointly advancing the state of the art

The coordination and collaboration between these projects underline the importance of an integrative research landscape that aims to create synergies and fully exploit the potential of spin-based quantum technologies. SPINUS, SPARQ and AI4QT are making a decisive contribution to the development of technologies that will form the basis for the next generation of quantum computers and simulators.

Möglichmacher

Enablers



Motivierte Mitarbeitende aus Verwaltung, Management und Technischen Diensten sorgen im Hintergrund für reibungslose Abläufe am Fraunhofer IAF. Sie sind unverzichtbar für die exzellente Forschungs- und Entwicklungsarbeit am Institut und haben trotz unterschiedlichster Aufgaben eins gemeinsam: Sie ermöglichen die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Institut.

Motivated employees from Administration, Management, and Technical Services work behind the scenes to ensure that everything runs smoothly at Fraunhofer IAF. They are indispensable for the excellent research and development work at the institute and, despite their diverse tasks, have one thing in common: they enable research.

Interview: »Veränderung bedeutet immer ein bisschen Reibung, aber dafür auch die Chance, Dinge neu zu gestalten«

Interview: "Change always involves a bit of friction, but also the chance to reshape things"

Annette Ganschow leitet seit Anfang 2023 die Personalgruppe am Fraunhofer IAF. Im Interview spricht sie darüber, wie sie die Mitarbeitenden während der Veränderungsprozesse wahrnimmt, welche Recruiting-Maßnahmen in Zeiten des Fachkräftemangels wirken und was einen attraktiven Arbeitgeber in der Forschung ausmacht.

Annette Ganschow heads the HR group at Fraunhofer IAF since the beginning of 2023. In this interview, she talks about how she perceives the employees during the change processes, which recruiting measures work in times of skills shortages and what makes an attractive employer in research.



Annette Ganschow kommt ursprünglich aus der Personalentwicklung. Vor dem Fraunhofer IAF war sie bei der IAV, der Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, und für die Kulturveranstaltungen des Bundes in Berlin (KBB) tätig, die u.a. die Berlinale ausrichten.

Annette Ganschow originally comes from human resources development. Before joining Fraunhofer IAF, she worked at IAV, Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, and for the Kulturveranstaltungen des Bundes in Berlin (KBB), which, among others, host the Berlinale.

Derzeit finden viele Veränderungsprozesse sowohl am Fraunhofer IAF als auch in der gesamten Fraunhofer-Gesellschaft statt. Wie erlebst du diese Zeit?

Grundsätzlich erlebe ich hier einen kollegialen und respektvollen Umgang miteinander und das ist eine gute Basis für die Zusammenarbeit. Im Zuge der Veränderungen findet eine Auseinandersetzung mit der Struktur und der Strategie statt und das bedeutet auch immer eine Chance zur Weiterentwicklung und Verbesserung. Da geht es um Verantwortlichkeiten, um Entscheidungsbefugnisse, um die Definition von Zielen und vor allem um die Identifikation mit dem Institut. Die Veränderung von strategischen Abläufen birgt die Chance, schneller und dabei noch innovativer zu werden, wenn wir es schaffen, Vision, Strategie und Werte miteinander zu verbinden.

Wie erlebst du die Mitarbeitenden in dieser Phase?

Hier im Bereich Forschung und Entwicklung habe ich den Eindruck, dass die Mitarbeitenden Neuem und Ungewöhnlichem grundsätzlich offen gegenüberstehen. Sie sind neugierig, sie hinterfragen, probieren Dinge aus und sind bereit, sich neuen Herausforderungen zu stellen. Aber natürlich bringt jede Veränderung auch Zweifel und Skepsis mit sich, weil nicht alles vorhersehbar ist und viele neue Einflüsse, unterschiedliche Interessen und Perspektiven aufeinandertreffen. Eine Veränderung bedeutet immer ein bisschen Reibung, aber dafür eben auch die Chance, Dinge neu zu gestalten. In solchen Phasen ist die Kommunikation entscheidend – die Mitarbeitenden wollen mitgenommen werden und sich einbringen können.

Trotz Fachkräftemangel ist es gelungen, 2023 sehr viele offene Stellen zu besetzen. Wie haben wir das geschafft?

In erster Linie durch sehr fleißige Kolleg:innen! Alle Beteiligten sind immer am Ball geblieben, um die freien Stellen zu besetzen. Zudem haben wir unsere Ausschreibungen optimiert, aktuelle Stellenportale hinterfragt, neue Portale und Medien ergänzt, um die Reichweite zu vergrößern und auch international sichtbarer zu werden. Wir waren viel im Austausch mit der Institutsleitung und den Führungskräften, haben bei den Personalplanungsrunden Stellen priorisiert, den Fokus auf Schlüsselpositionen gelegt und da nochmal mit besonders viel Nachdruck nach geeigneten Kandidat:innen gesucht. Die Fachbereiche haben verstärkt Konferenzen und Fachmessen genutzt, um geeignete Kandidat:innen anzusprechen. Und natürlich haben wir sehr viele Bewerbungsgespräche geführt.

Currently, many change processes are taking place both at Fraunhofer IAF and in the entire Fraunhofer-Gesellschaft. How are you experiencing this time?

Generally speaking, I experience a collegial and respectful interaction here and that is a good basis for cooperation. As part of the transformation, there is an examination of the structure and strategy and this always means an opportunity for further development and improvement. It is about responsibilities, decision-making powers, defining goals and, above all, identifying with the institute. Changing strategic processes offers the opportunity to become faster and more innovative if we manage to combine vision, strategy and values.

How do you perceive the employees in this phase?

Here in Research and Development, I have the impression that employees are generally open to new and unfamiliar things. They are curious, they question, try things out and are ready to face new challenges. But of course, every change comes with doubts and skepticism, because not everything is predictable and many new influences, different interests and perspectives come together. Change always involves a bit of friction, but also the chance to reshape things. Communication is crucial in such phases — employees want to be involved and be able to contribute.

Despite the skills shortage, we managed to fill a large number of vacancies in 2023. How did we achieve this?

First and foremost thanks to very hard-working colleagues! Everyone involved has always kept the ball rolling to fill the vacancies. We have also optimized our job advertisements, questioned current job portals and added new portals and media in order to increase our reach and become more visible internationally. We were in close contact with the institute's management and executives, prioritized positions during the HR planning sessions, focused on key positions and searched for suitable candidates with particular vigor. The departments have increasingly used conferences and trade fairs to approach suitable candidates. And of course, we held a lot of job interviews. The combination of our measures and the improved labor market in the second half of the year ultimately led to us hiring twice as many people as in previous years.

Das Zusammenspiel aus unseren Maßnahmen und dem verbesserten Arbeitsmarkt ab der zweiten Jahreshälfte hat dazu geführt, dass wir letztendlich doppelt so viele Einstellungen wie in den Vorjahren hatten.

Der Arbeitsmarkt ist im Wandel und die Ansprüche an den Arbeitgeber verändern sich. Welche Rahmenbedingungen müssen gegeben sein, damit das Fraunhofer IAF auch weiterhin ein toller Ort zum Arbeiten und Forschen ist?

Für die Forschenden liegt der Reiz des Fraunhofer IAF natürlich in der Forschungsinfrastruktur und dem Zusammenspiel zwischen exzellenter Forschung und anwendungsorientierter Entwicklung. Wir müssen natürlich flexibel bleiben – oder agil, wie man heute sagt. Es braucht die hochwertige Ausstattung und Infrastruktur, aber es braucht auch eine agile Arbeitsumgebung. In der New-Work-Bewegung sind Themen wie Teilzeit, mobiles Arbeiten oder Sabbaticals nicht mehr wegzudenken. Die heutigen Berufseinsteiger:innen legen großen Wert auf eine sinnstiftende Arbeit, gleichzeitig wollen sie selbstbestimmt sein und Verantwortung übernehmen. Hier müssen wir insbesondere mit den Führungskräften eng zusammenarbeiten, weil das in Zukunft eine ganz andere Art von Führung erfordert wird. Wir müssen Mitarbeitende nicht nur gewinnen, sondern sie auch weiterentwickeln, ihnen Perspektiven aufzeigen, damit es auch dauerhaft hier am Institut attraktiv bleibt. Das Wichtigste bleibt jedoch der respektvolle und wertschätzende Umgang miteinander.

Welche Möglichkeiten zur Weiterentwicklung bietet das Fraunhofer IAF seinen Mitarbeitenden?

Um Mitarbeitende langfristig zu binden, ist u. a. ihre Weiterentwicklung entscheidend. Es braucht fachliche und auch überfachliche Qualifizierung, um auf zukünftige Herausforderungen vorbereitet zu sein und auch als Arbeitgeber attraktiv zu bleiben. Daher wollen wir alternative Karrierewege gestalten, um eine Weiterentwicklung nach persönlichen Stärken zu fördern. Es gibt z. B. die klassische Entwicklung zu einer Führungskraft als Gruppen- oder Abteilungsleitung und dann gibt es die Spezialisierung in einem Fachgebiet, also eine Art Fachlaufbahn. Viele Kolleg:innen haben gar kein Bedürfnis, unbedingt ins Management zu gehen und mit vielen operativen Themen betraut zu werden und würden stattdessen lieber Karriere auf ihrem Spezialgebiet machen. Deshalb arbeiten wir an dem Konzept einer sogenannten Fachlaufbahn. Diese Struktur gibt es bereits zum Teil, aber hier können wir noch relativ viel gestalten.

The labor market as well as the demands on employers are changing. What conditions are necessary to ensure that Fraunhofer IAF continues to be a great place to work and conduct research?

For researchers, the charm of Fraunhofer IAF is the research infrastructure and the combination of excellent research and application-oriented development. But of course, we have to remain flexible — or agile, as you say today. You need high-quality equipment and infrastructure, but you also need an agile working environment. Topics such as part-time work, mobile working and sabbaticals have become an integral part of the New Work movement. Today's young professionals attach great importance to meaningful work, but at the same time, they want to be self-determined and take on responsibility. We need to work closely with managers in particular, because this will require a completely different kind of leadership in the future. We must not only attract employees, but also develop them and point out prospects so that working here at the institute remains attractive in the long term. The most important thing, however, is to treat each other with respect and appreciation.

What opportunities for further development does Fraunhofer IAF offer its employees?

In order to retain employees in the long term, their further development is crucial. Professional and interdisciplinary qualifications are needed in order to be prepared for future challenges and to remain attractive as an employer. We therefore want to create alternative career paths to promote further development according to personal strengths. For example, there is the classic development into a manager as head of a group or department and then there is specialization in a particular area, i.e. a kind of specialist career path. Many colleagues have no desire to go into management and be entrusted with many administrative tasks and would prefer to pursue a career in their area of specialization instead. This is why we are working on the concept of a specialist career path. This structure already exists to some extent, but there is still quite a lot we can do here.

Wie schaffen wir es, mehr Frauen für die Forschungsarbeit bei uns zu begeistern?

Über Kolleg:innen, die an Hochschulen lehren, kommen wir ein bisschen näher an die Unis heran und haben in letzter Zeit tatsächlich viele Doktorandinnen einstellen können. Zukünftig bilden wir sogar selbst aus und haben so die Chance, weiblichen Nachwuchs zu entwickeln. Zudem haben wir wöchentliche Termine mit den Beauftragten für Chancengleichheit, um Initiativbewerbungen oder gute Profile von Frauen zu sichten und gezielt zu überlegen, auf welche Stellen sie passen würden. Von der Institutsleitung gibt es eine große Unterstützung, wenn Mitarbeiterinnen eine Führungsverantwortung übernehmen wollen und natürlich nutzen wir das TALENTA-Programm von der Fraunhofer-Zentrale, um Frauen gezielt zu fördern.

How do we manage to attract more female scientist?

Through colleagues who teach at universities, we are getting a little closer to the universities and have actually been able to recruit many female doctoral students recently. In the future, we will even train apprentices ourselves and thus have the opportunity to develop young female talent. We also have weekly meetings with the Equal Opportunities Officers to review unsolicited applications or good profiles from women and consider specifically which positions they would be suitable for. There is a great deal of support from the Institute Management when female employees want to take on management responsibility and, of course, we use the TALENTA program from Fraunhofer headquarters to specifically promote women.



Meine Vision ist, dass wir als Sparringspartner für die Mitarbeitenden und Führungskräfte wahrgenommen werden.«

"My vision is for us to be perceived as a sparring partner for employees and managers."

Was hattest du dir vorgenommen, als du vor über einem Jahr die Leitung der Personalgruppe übernommen hast?

Ich komme ursprünglich aus der Personalentwicklung und das ist bestimmt eine meiner Stärken. Ich möchte zusammen mit dem Team nicht nur das Recruiting von qualifizierten Mitarbeitenden stärken, sondern auch die Mitarbeiterbindung fördern und ausbauen und die notwendigen Strukturen für eine Personalentwicklung schaffen. Meine Vision für die Personalgruppe ist, dass wir eine unterstützende, aber auch beratende Rolle einnehmen und als Sparringspartner für die Mitarbeitenden und Führungskräfte wahrgenommen werden. Sie kennen unsere Expertise, sprechen uns an und wir unterstützen sie dabei, ihre Ziele umzusetzen.

What were your plans when you took over the management of the HR group over a year ago?

My background is in human resources development and that is definitely one of my strengths. Together with the team, I not only want to strengthen the recruitment of qualified employees, but also promote and expand employee retention and create the necessary structures for personnel development. My vision for the HR group is that we take on a supportive but also advisory role and are perceived as a sparring partner for employees and managers. They know our expertise, contact us and we support them in achieving their goals.

»Kultur isst Strategie zum Frühstück«

“Culture eats strategy for breakfast”

Dieses bekannte Zitat des US-amerikanischen Ökonomen Peter F. Drucker wird gerne verwendet, um die Bedeutung der Unternehmensstrategie im Verhältnis zur Kultur eines Unternehmens einzuordnen. Darauf aufbauend ergab sich für das Fraunhofer IAF bei der Erarbeitung eines neuen Strategieprozesses im Jahr 2022 die Leitfrage: Kann ein Strategieprozess so gestaltet werden, dass sich daraus gleichzeitig eine positive Beeinflussung der Institutskultur ergibt?

This well-known quote by US economist Peter F. Drucker is often used to categorize the importance of corporate strategy in relation to a company's culture. Based on this, the key question for Fraunhofer IAF when developing a new strategy process in 2022 was: Can a strategy process be designed in such a way that it also has a positive influence on the institute's culture?

*Ein zentrales Element des Strategieprozesses am Fraunhofer IAF ist die Partizipation der Mitarbeitenden
A central element of the strategy process at Fraunhofer IAF is the participation of employees*



Neben dem Ziel, den Strategieprozess des Instituts kontinuierlicher und agiler zu gestalten und so strategisches Denken in den Institutsalltag zu integrieren, standen deshalb auch weitere Aspekte im Fokus. Eine große Rolle spielten dabei die Eindrücke aus der Corona-Pandemie, in der der fachliche und zwischenmenschliche Austausch durch die äußersten Bedingungen teils deutlich erschwert war. Dadurch wurden zwei Fragen aufgeworfen: Wie kann man für alle Mitarbeitenden ein höheres Maß an Transparenz für die strategischen Themen des Instituts schaffen und wie lässt sich die Möglichkeit der Mitarbeitenden verbessern, auf die strategischen Themen ihrer Organisationseinheit und damit des Instituts Einfluss zu nehmen?

In Begleitung eines erfahrenen Coaches wurde ein Ansatz für einen Strategieprozess erarbeitet, der diese drei Teilespekte in sich vereint: Einbettung der strategischen Arbeit in den Institutsalltag, umfassende Transparenz über die strategischen Ziele und Partizipation der Mitarbeitenden an der Strategie. Entstanden ist ein Strategieprozess, der auf der Methode von »Objectives and Key Results« (OKRs) basiert und an die Besonderheiten unseres Forschungsinstituts angepasst wurde. Die Formulierung der OKRs findet alle sechs Monate auf der Ebene der Geschäftsfelder und wissenschaftlichen wie auch nicht-wissenschaftlichen Abteilungen statt. Die OKRs aller Einheiten sowie der Fortschritt bei ihrer Erreichung sind für alle Mitarbeitenden des Instituts jederzeit einsehbar. Durch die Einbindung der »critical friends« findet ein Abgleich der Ziele jeder Einheit mit ihren institutsinternen Stakeholdern statt. Darüber hinaus werden die OKRs regelmäßig im Ausschuss der Institutsleitung diskutiert. Der Prozess unterliegt einem regelmäßigen Review, um ihn stets bestmöglich an die Anforderungen und Bedürfnisse des Instituts und seiner Mitarbeitenden anzupassen.

Das Fazit, das sich nach gut eineinhalb Jahren gelebten Prozesses für das Institut ergibt, ist, dass durch die Einbindung des Strategieprozesses in den Institutsalltag eine stärkere Identifikation der Mitarbeitenden mit der Strategie erreicht werden konnte. Zudem hat sich gezeigt, dass ein Strategieprozess, der transparent und partizipativ gestaltet wird, einen positiven Einfluss auf die Institutskultur hat.

Die Kultur wird sich also etwas anderes zum Frühstück suchen müssen.

When designing the new strategy process at Fraunhofer IAF, the focus was not only on making the institute's strategy process more continuous and agile in order to integrate strategic thinking into the Institute's day-to-day work but also on further aspects. Impressions from the coronavirus pandemic played a major role in this, as the external conditions made professional and interpersonal exchanges much more difficult in some cases. This raised two questions: How can a greater degree of transparency be created for all employees with regard to the institute's strategy and how can employees' ability to influence the strategic topics of their organizational unit and therefore the institute be improved?

Accompanied by an experienced coach, an approach was developed for a strategy process that combines these three aspects: embedding strategic work in the day-to-day life of the institute, comprehensive transparency about the strategic goals and employee participation in the strategy. The result is a strategy process that is based on the Objectives and Key Results (OKRs) method and has been adapted to the specifics of our research institute. The OKRs are formulated every six months at the level of the business areas and departments, both scientific and non-scientific. The OKRs of all units and the progress made in achieving them can be viewed by all employees of the institute at any time. By involving the so-called critical friends, the objectives of each unit are compared with their internal stakeholders. In addition, the OKRs are regularly discussed in the Institute Management Board. The process is subject to regular review so that it can always be adapted to the requirements and needs of the institute and its employees in the best possible way.

The conclusion that can be drawn after a year and a half of living the process is that by integrating the strategy process into the day-to-day work of the institute, employees were able to identify more strongly with the strategy. It has also been shown that a strategy process that is transparent and participatory has a positive influence on the institute's culture.

The culture will have to find something else for breakfast.

Ihre Mission: Den Forschenden den Rücken freihalten

Their mission: To have the researchers' backs

Sie sind die Menschen, die die Forschung am Fraunhofer IAF auf der administrativen Seite betreuen und voranbringen: 28 Verwaltungsmitarbeitende in den Gruppen Projekte, Finanzen und Personal unterstützen die Forschenden und sorgen für eine reibungslose Organisation des Forschungsinstituts.

They support and advance research at Fraunhofer IAF on the administrative side: The administrative staff of 28 experts in the groups Projects, Finance and Human Resources support the researchers and ensure the smooth organization of the research institute.

Die Verwaltung des Fraunhofer IAF umfasst die Gruppen Projekte, Finanzen und Personal
The administration of Fraunhofer IAF comprises the groups Projects, Finance and Human Resources



»Wir sind die Stelle, die den Wissenschaftlern das Leben erleichtern soll«, fasst Claudia Daghero, Stellvertretende Verwaltungsleitung und Leiterin der Gruppe Finanzen am Fraunhofer IAF, die Mission ihrer Abteilung zusammen. Ob beim Projektmanagement, der Beschaffung von Forschungsmaterialien und -Anlagen oder zur Gewinnung neuer Beschäftigter: Die Fachabteilungen des Instituts finden in der Verwaltung verlässliche Unterstützung.

Die Verwaltung des Fraunhofer IAF ist eine Schnittstelle sowohl zur Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft in München als auch zu Projektträgern, Ministerien, Industriekunden oder Fördermittelgebern und übernimmt eine wichtige Vermittlungsfunktion. Ihre Aufgaben sind vielfältig und fordernd zugleich. »Wir sind sozusagen ein Kontrollorgan und haben gleichzeitig das Ziel, unsere wissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen administrativ zu entlasten und so die Rahmenbedingungen der Forschung am Institut möglichst optimal zu gestalten«, betont Claudia Daghero, die sich unter anderem um das Institutscontrolling und die Budgetplanung kümmert.

“We are the ones that make life easier for the scientists,” says Claudia Daghero, Deputy Head of Administration and Head of the Finance Group at Fraunhofer IAF, summarizing the mission of her department. Whether for project management, the procurement of research materials and equipment or the recruitment of new employees: the institute’s employees find reliable support in the administration department.

The administration of Fraunhofer IAF is an interface to the headquarters of the Fraunhofer-Gesellschaft in Munich as well as to project management organizations, ministries, industrial customers or funding bodies and assumes an important mediating function. Its tasks are varied and demanding at the same time. “We are, so to speak, a supervisory body and at the same time aim to relieve the administrative burden on our colleagues and thus create the best possible framework conditions for research at the institute,” emphasizes Claudia Daghero, who is responsible for institute controlling and budget planning, among other things.



Projekte: Von der Anbahnung bis zur Abrechnung

Die Gruppe Projekte begleitet sowohl mit ihrer umfangreichen Projektmanagement-Kompetenz als auch mit juristischer Expertise die Forschenden von der Projektanbahnung bis zur -abrechnung. Sie helfen bei Vorvertragsverhandlungen, der Formulierung von Anträgen, der Kalkulation und auch im weiteren Projektverlauf ist das Team Sparringspartner, wenn es um die Einhaltung der Vertragsbedingungen geht.

Besonders anspruchsvoll sind dabei die umfangreichen Forschungsrichtlinien, aber auch große Projektvorhaben, in denen Kooperationsvereinbarungen mit teilweise zehn bis 50 Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft verhandelt werden. »Die ständige Kommunikation mit den Forschenden ist dabei für uns essentiell. Je früher wir im Prozess eingebunden sind, desto besser. Und insbesondere auch für die jungen Wissenschaftler:innen stehen wir bei Fragen gerne zur Verfügung und unterstützen«, sagt Sibylle Sauter, die seit 2008 als Projektmanagerin am Fraunhofer IAF arbeitet.

Was sie an ihrer Arbeit reizt? »Wir bekommen einen sehr großen Einblick in das Geschäft des Instituts. Unsere Aufgaben sind so vielfältig und breit aufgefächert, dafür benötigen wir viele Informationen aus dem Haus und auch innerhalb der Gruppe erfordert es viel Kommunikation. Das ist herausfordernd und spannend zugleich«, berichtet Sibylle Sauter.

Finanzen: Große Bandbreite an Aufgaben

In direkter Nachbarschaft zum Projekt-Team im 2. OG des Instituts sitzt die Gruppe Finanzen mit den Bereichen Einkauf, Buchhaltung, Controlling und Reisestelle. Sie arbeiten eng mit den Fachabteilungen zusammen, besonders wenn es um die Beschaffung von Forschungsmaterialien und -Anlagen geht. »Hier sind wir quasi der Dreh- und Angelpunkt. Wir stehen in Kontakt mit den Forschenden und den Lieferanten, kümmern uns darum, dass das Richtige bestellt und geliefert wird zu angemessenen Konditionen«, berichtet Melanie Lommen, die seit ihrem VWL-Bachelorabschluss 2019 die Buchhaltung und den Einkauf am Fraunhofer IAF verstärkt.

Die Bandbreite des Einkaufs reicht dabei vom Kugelschreiber bis zur MOCVD-Anlage. Das sorgt für Abwechslung und interessante Einblicke in die Forschung sowie ein stetig wachsendes Know-how in ihrem Team: sowohl hinsichtlich der speziellen Forschungsmaterialien als auch der umfangreichen Richtlinien, denen das Fraunhofer IAF als öffentlich gefördertes Institut unterliegt – vom Vergaberecht bis hin zum Reisekostengesetz.

Projects: from initiation to billing

With its extensive project management skills and legal expertise, the Projects Group supports researchers from project initiation to billing. They help with pre-contract negotiations, the formulation of applications and costing. The team also acts as a sparring partner during the further course of the project when it comes to compliance with contractual conditions.

The extensive research guidelines are particularly demanding, as are the large projects in which cooperation agreements are negotiated, sometimes with ten to 50 partners from science and industry. "Constant communication with the researchers is essential for us. The earlier we are involved in the process, the better. And we are also happy to answer questions and provide support, especially for young scientists," says Sibylle Sauter, who has been working as a project manager at Fraunhofer IAF since 2008.

What gets her out of bed and to work? "We get a great deal of insight into the institute's business. Our tasks are so varied and wide-ranging that we need a lot of information from within the company and it also requires a lot of communication within the group. It is challenging and exciting at the same time," states Sibylle Sauter.

Finances: wide range of tasks

Directly adjacent to the project team on the third floor of the institute is the Finance Group which is responsible for purchasing, accounting, controlling and travel planning. They work closely with the other groups of the institute, especially when it comes to procuring research materials and equipment. "We are pivotal for any procurement. We are in contact with the researchers and suppliers and make sure that the right things are ordered and delivered on reasonable terms," reports Melanie Lommen, who has been working in accounting and purchasing at Fraunhofer IAF since completing her bachelor's degree in economics in 2019.

The spectrum of procurements ranges from ballpoint pens to MOCVD systems. This ensures variety and interesting insights into research as well as constantly growing know-how in her team with regard to the special research materials as well as the extensive guidelines to which Fraunhofer IAF is subject as a publicly funded institute — from public procurement law to the Travel Expenses Act.

Die größte Herausforderung sieht Melanie Lommen darin, den Spagat zwischen diesen Richtlinien und den Anforderungen, die sich aus der Forschung ergeben, zu schaffen: »Hier am Institut wird am Puls der Zeit geforscht und da kommt es besonders darauf an, zeitnah an die richtigen Materialien und Lieferanten mit dem nötigen Wissen zu kommen beziehungsweise das Wissen in neuen Forschungsgebieten schnell aufzubauen. Da sind die Wissenschaftler:innen natürlich immer dran und wir unterstützen, um auch bei Lieferschwierigkeiten oder geringer Verfügbarkeit spezielle Güter trotzdem möglichst schnell und in der benötigten Qualität zu erhalten.«

Personal: Auf der Suche nach den besten Köpfen

Exzellente Materialien und Anlagen reichen jedoch nicht aus für exzellente Forschung. Das allerwichtigste sind Fachkräfte, die derzeit überall stark gesucht werden. Das Engagement der Gruppe Personal hat 2023 dazu geführt, dass das Fraunhofer IAF viele zentrale Stellen besetzen konnte. Neben dem Recruiting verantwortet die Gruppe alle Personalangelegenheiten vom Onboarding bis zur Personalentwicklung. Im Interview auf [Seite 80](#) gibt Annette Ganschow, Leiterin der Personalgruppe des Fraunhofer IAF, weitere Einblicke in die HR-Themen am Institut.

Kollegiales Miteinander

Claudia Daghero ist seit 30 Jahren am Institut, hat im Laufe der Zeit einige Veränderungen begleitet und diese waren nicht immer einfach. Aber ihr Team hat die Herausforderungen gut gemeistert. »Die Digitalisierung hat einen Quantensprung gemacht in der Corona-Phase«, gibt Claudia Daghero ein Beispiel. »Wir haben viele Verwaltungsprozesse digitalisiert, funktionieren seitdem annähernd papierlos und neue Online-Tools vereinfachen die Abstimmung zwischen allen Beteiligten.«

Wie gut die Verwaltung als Team funktioniert, zeigte sich in den letzten Jahren an der Fraunhofer-weiten Einführung einer einheitlichen Software für Unternehmensprozesse. Dadurch muss am Institut vieles neu gedacht werden, Prozesse und die Zusammenarbeit mit den anderen Abteilungen ändern sich und trotzdem muss der Betrieb weiterlaufen. Dabei wird auch die Chance genutzt, um Prozesse zu vereinfachen. Claudia Daghero ist sichtlich stolz auf ihr Team: »Sie haben sich drauf eingelassen und sich intensiv reingefucht.« Erfolgsentscheidend sei dabei aber auch die Zusammenarbeit und der enge Austausch mit den Forschenden gewesen. Das gelte nach wie vor: »Wir arbeiten alle zusammen und unser kollegiales Miteinander hilft sehr.«

The biggest challenge for Melanie Lommen is managing the balancing act between these guidelines and the requirements that arise from research: "Here at the institute, research is conducted at the cutting edge and it is particularly important to obtain the right materials and suppliers with the necessary knowledge in a timely manner, or to quickly build up knowledge in new research areas. Of course, the scientists are always at the state of the art and we provide support to ensure that specific goods can still be obtained as quickly as possible and in the required quality, even in the event of delivery difficulties or low availability."

Personnel: in search of the best talents

Excellent materials and facilities are not enough for excellent research. Most important are skilled workers, who are currently in great demand everywhere. The commitment of the Human Resources Group has enabled Fraunhofer IAF to fill many central vacancies in 2023. In addition to recruiting, the HR staff at the institute are the first point of contact for all personnel matters and are responsible for everything from onboarding to personnel development. In the interview on [page 80](#), Annette Ganschow, head of the HR Group at Fraunhofer IAF, provides further insights into HR topics at the institute.

Cooperative environment

Claudia Daghero has been involved in a number of changes over her 30 years at the institute, which have not always been easy. But her team has mastered the challenges well. "Digitalization has made a quantum leap during COVID," says Claudia Daghero, giving an example. "We have digitized many administrative processes, have been working almost paperless since then and new online tools simplify coordination between involved parties."

In recent years, the Fraunhofer-wide introduction of standardized software for company processes has shown how well the administration works as a team. As a result, many things have to be rethought at the institute, processes and cooperation with other groups have to change and yet operations must always continue. This is also an opportunity to simplify processes. Claudia Daghero is proud of her team: "They got involved and really dug in." However, the collaboration and close exchange with the researchers was and still is crucial to success. "We all work together and our cooperative environment helps a lot."

24/7 im Dienst für Infrastruktur und Betriebssicherheit

24/7 on duty for infrastructure and operational safety

Niemand kennt sich in den Institutsgebäuden so gut aus wie sie: Die Mitarbeitenden der Abteilung Technische Dienste am Fraunhofer IAF unterstützen die Fachabteilungen in den Bereichen technische Infrastruktur, Feinmechanik sowie Reinigung und gewährleisten mit ihrer Arbeit die Betriebssicherheit. Dabei sind sie regelmäßig ganz nah dran an der Forschung.

Nobody knows the institute buildings as well as they do: The employees of the Technical Services Department at Fraunhofer IAF support the scientific departments in the areas of technical infrastructure, precision mechanics and cleaning and ensure operational safety with their work. In doing so, they are close to the research.

Abteilungsleiter Andreas Wagner (hinten, zweiter von links) und sein Stellvertreter Andreas Beck (zweite Reihe, rechts) mit den Mitarbeitenden der Technischen Dienste

Head of Department Andreas Wagner (back, second from left) and his deputy Andreas Beck (second row, right) with colleagues from Technical Services



Die Technischen Dienste, oder kurz TD, am Fraunhofer IAF sind eine eingespielte und hilfsbereite Truppe, die selbst bei ungewöhnlichen Anfragen schwer aus der Ruhe zu bringen ist. Die Abteilung ist in fünf Gruppen organisiert: Verfahrenstechnik, Regelungstechnik, Elektrotechnik, Institutsdienste sowie Feinmechanik. Ein Bereitschaftsdienst steht an 365 Tagen im Jahr 24 Stunden täglich zur Lösung technischer Probleme bereit.

Geleitet wird die Abteilung TD seit 2021 vom Architekten Andreas Wagner: »Das Besondere an meiner Arbeit hier am Fraunhofer IAF ist die Kombination aus vorausschauender Planung, damit das Institut den Forschungsanforderungen entspricht, und einem starken Dienstleisteranspruch im Tagesgeschäft. Das leben wir im gesamten Team und dies aktiv mitzugestalten macht viel Spaß und motiviert.«

Vielfältige Aufgaben rund um die komplexe Infrastruktur des Instituts

Die Aufgaben der Abteilung reichen von der Planung der Energieversorgung des Instituts unter Berücksichtigung der Klimaziele der Fraunhofer-Gesellschaft über die Bereitstellung und Instandhaltung technischer Anlagen, das Gebäudemanagement mit den Facetten Bewachung, Reinigung, Ver- und Entsorgung bis hin zur Fertigung feinmechanischer Bauteile.

»Oberste Priorität hat dabei immer die Betriebstüchtigkeit der Technischen Gebäudeausstattung, damit die wissenschaftlichen Abteilungen möglichst unterbrechungsfrei forschen können«, so Andreas Wagner.

Der Blick für viele Details

TD hat viele Details zeitgleich im Blick und kontrolliert permanent mit Unterstützung des elektronischen Leitsystems, ob alle technischen Anlagen reibungslos laufen. Wenn wissenschaftliche Abteilungen neue Anlagen anschaffen oder ein Laborumbau ansteht, sorgen die Mitarbeitenden dafür, dass die anspruchsvollen Anforderungen der präzisen und hochtechnischen Forschungsanlagen erfüllt werden: Hierzu zählen beispielsweise Aspekte der Statik und Dynamik sowie die Versorgung mit Strom, Wasser, Kühlung und Abluft sowie mit notwendigen Medien, zu denen verschiedenste Gase zählen.

»Unser Ziel ist es, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiter möglichst so arbeiten können, dass sie nicht merken, dass im Hintergrund etwas passiert«, sagt Andreas Beck, Gruppenleiter der Verfahrenstechnik und stellvertretender Abteilungsleiter. »Meine Schwerpunkte sind Bau, Heizung, Klima, Lüftung und Gase. Wir haben sehr viele Medien, die für die Forschung benötigt werden. Die betreue ich mit meinem Kollegen Mathias Siegel.«

The Technical Services, or TD for short, at Fraunhofer IAF is a well-coordinated and helpful team that is hard to get out of its stride even when faced with unusual requests. The department is organized into five groups: Process Engineering, Control Engineering, Electrical Engineering, Institute Services and Precision Mechanics. An on-call service is available 24 hours a day, 365 days a year to solve technical problems.

The TD Department is led by architect Andreas Wagner since 2021: "The special thing about my work here at Fraunhofer IAF is the combination of forward-looking planning, so that the institute will continue to meet research requirements, and a strong service provider approach in day-to-day business. The entire team works by this approach and actively helping to shape it is a lot of fun and motivation for me."

Various tasks around the institute's complex infrastructure

The department's tasks range from planning the institute's energy supply, taking into account the climate goals of the Fraunhofer-Gesellschaft, to the provision and maintenance of technical equipment, building management with the facets of security, cleaning, supply and disposal, and the production of precision mechanical components.

"The top priority is always to ensure that the technical building equipment is operational so that the scientific departments can carry out their research with as few interruptions as possible," says Andreas Wagner.

An eye for many details

TD keeps an eye on many details at the same time and, with the support of the electronic control system, constantly monitors whether all technical systems are running smoothly. When scientific departments purchase new equipment or a laboratory conversion is due, the technicians ensure that the demanding requirements of the precise and highly technical research facilities are met: these include, for example, aspects of statics and dynamics as well as the supply of electricity, water, cooling and exhaust air and the necessary media, which include a wide variety of gases.

"Our aim is for the scientific staff to be able to work as smooth as possible without realizing that something is going on in the background," says Andreas Beck, Group Leader of Process Engineering and Deputy Head of Department. "My focus is on construction, heating, air conditioning, ventilation and gases. We have a lot of media that are needed for research. I take care of this with my colleague Mathias Siegel."

Spezielle Anforderungen

Andreas Beck sitzt mit Mathias Siegel, Gruppenleiter Institutsdienste, und Volker Sass, Gruppenleiter Elektrotechnik, in einem Büro. Es vergeht kaum eine halbe Stunde, in der nicht ein:e Handwerker:in oder ein:e Kolleg:in in der Tür steht, um sich abzustimmen. Gelassen managen die drei erfahrenen Kollegen das Tagesgeschäft und bereiten die anstehenden Themen für die nächsten Jahre vor, die prominent an der Bürowand hängen: »FFU-Aufsatzkühler«, »Drucklufttrockner«, »Regenwasserpumpen«, »Rohrleitungsnetz 5 °C«, »Toilettenanlagen«, »Abluftanlagen Labore« und vieles mehr. Ein aktuelles Beispiel ist hier auch der Umstieg auf Fernwärme, der einige bauliche Maßnahmen erfordert.

Ein ganz spezieller Bereich am Institut ist der Reinraum, der besonders strenge Anforderungen hinsichtlich Partikelanzahl, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck erfüllt. Wichtiges Bindeglied zu den Forschenden ist die Reinraumbeauftragte der Abteilung TD: Sie kontrolliert den laufenden Reinraumbetrieb, tauscht sich regelmäßig mit den Forschenden aus und stellt das Qualitätsmanagement sicher.

Allrounder Feinmechanik

Besonders nah dran an der Forschung ist auch die Gruppe Feinmechanik. Sie fertigt Bauteile und Module für wissenschaftliche Zwecke aus diversen Materialien und ist anerkannter IHK-Ausbildungsbetrieb für Industriemechanik im Fachbereich Feinwerktechnik. Mehr über die Arbeit der Feinmechanik lesen Sie im Artikel über Satellitentechnik auf [Seite 31](#) in diesem Jahresbericht.

Die Haustechnik ist auch für das Team Marketing und Kommunikation wichtige Ansprechpartnerin, beispielsweise bei der Vorbereitung hausinterner Veranstaltungen oder der Aufstellung des 10 Meter großen Weihnachtsbaumes. Und schon manches maßgeschneiderte Podest für Ausstellungsstücke für Messen ist in der Werkstatt der Feinmechanik entstanden. Fragt man im Institut herum, wird schnell klar: TD lässt niemanden im Regen stehen. Die Motivation des Teams erklärt sich Andreas Beck so: »Wir arbeiten eng zusammen und haben einen großen Wissensstand in TD. Mit unserer Arbeit bewirken wir etwas am Institut und ein großer Pluspunkt unserer Arbeit ist, dass wir die Ergebnisse unserer Leistung sehen können.«

Special requirements

Andreas Beck sits in an office with Mathias Siegel, Head of Institute Services, and Volker Sass, Head of Electrical Engineering. Hardly half an hour goes by without a tradesperson or colleague standing in the doorway to confer with them. The three experienced colleagues calmly manage the day-to-day business and prepare the upcoming topics for the next few years, which are prominently displayed on the office wall: "FFU top-mounted coolers," "compressed air dryers," "rainwater pumps," "piping network 5 °C," "toilet systems," "exhaust air systems laboratories," and more. Another current example is the switch to district heating, which requires significant structural measures.

A very special area at the institute is the clean room, which meets particularly strict requirements in terms of particle count, temperature, humidity and pressure. The TD Department's clean room officer is an important link to the researchers: she monitors ongoing clean room operations, regularly exchanges information with the scientists and ensures quality management.

Allrounder Precision Mechanics

The Precision Mechanics Group is also particularly close to research. It manufactures components and modules for scientific purposes from various materials and is a recognized IHK training company for industrial mechanics in the field of precision engineering. You can read more about the work of the Group Precision Mechanics in the article on satellite communication on [page 31](#) of this annual report.

The in-house building services are also an important point of contact for the Marketing and Communication Group, for example when preparing in-house events or putting up the 10-metre Christmas tree. And many a customized pedestal for exhibits at trade fairs has been created in the Precision Mechanics workshop. If you ask around the institute, it quickly becomes clear: TD leaves no one out in the cold. Andreas Beck explains the team's motivation as follows: "We work closely together and have a wealth of knowledge at TD. Our work makes a difference at the institute and a big plus point of our work is that we can see the results of our efforts."



Thomas Trendle leitet die Gruppe Feinmechanik und bildet auch
zukünftige Industriemechaniker:innen am Fraunhofer IAF aus

Thomas Trendle leads the Precision Mechanics Group and also
trains future industrial mechanics at Fraunhofer IAF

Zukunft möglich machen: Bildungswege am Fraunhofer IAF

Enabling the future: Educational paths at Fraunhofer IAF

Am Fraunhofer IAF werden nicht nur zukunftsträchtige Technologien entwickelt, sondern auch die dafür verantwortlichen Fachkräfte. Neben der Betreuung von Promotionen in den Fachbereichen rund um Physik und Ingenieurwesen ist es möglich, naturwissenschaftliche oder technische Master- und Bachelorarbeiten am Institut zu schreiben und ein duales Studium zu absolvieren. Außerdem bildet das Fraunhofer IAF aus – in den Feldern Industriemechanik, Fachinformatik und Mikrotechnologie mit Fachrichtung Halbleitertechnik.

Fraunhofer IAF not only develops future technologies, but also the professionals responsible for them. In addition to supervising PhD candidates in the fields of physics and engineering, it is possible to write scientific or technical master's and bachelor's theses at the institute and complete an integrated degree program. Fraunhofer IAF also offers apprenticeships — in the fields of industrial mechanics, information technology and microtechnology with specialization in semiconductor technology.

Welche vielfältigen Bildungswege am Fraunhofer IAF beschritten werden können, zeigt die folgende Übersicht aktueller Promovierender, Studierender und Auszubildender.

The following overview of current PhD candidates, students and trainees shows the diverse educational paths that can be taken at Fraunhofer IAF.

Auszubildende

Trainees

- Tom Sütterle
- Oliver Böhm
- Jonas Mateos De Paz

Studierende

Students

- Akashay Gangadharan Nambiar
- Daniel Grieshaber
- Yves Rottstaedt
- Eric Sigle
- Farrukh Haider
- Can Dogan

Promovierende

PhD students

- Vanessa Dehn
- Akash Nair
- Kathrin König
- Moise Safari Mugisho
- Sundarapandian Balasubramanian
- Isabel Streicher
- Niklas Mathes
- Michael Krebsbach
- Nikola Komericki
- Felix Hoffmann
- Benjamin Weber
- Lukas Lindner
- Christian Friesicke
- Paul Haas
- Vivienne Leidel
- Sebastian Heuft
- Anant Agnihotri
- Philip Schätzle
- Tobias Nauck
- Florian Schall
- Leon Hertle
- Mohammed Saqlain Khan
- Annarita Ricci
- Astrid Lando Tchinda
- Teresa Duarte



Ich habe mich entschieden, nach meinem Master am Fraunhofer IAF zu bleiben, weil das Team an verschiedenen Themen Interesse zeigt. Mir gefällt, dass sich die vielfältigen Forschungsgebiete durch ihren Fokus auf die praktische Umsetzung der Erkenntnisse auszeichnen.«

"After my master's degree, I decided to stay at Fraunhofer IAF because the team is interested in a wide range of topics. I like the fact that the diverse research areas are characterized by their focus on the practical implementation."



Tobias Nauck
Doktorand
PhD student



Daniel Grieshaber
Masterstudent
Master's student



Als Werkstudent konnte ich einen Einblick in die Forschungstätigkeit im Bereich der Leistungselektronik am Fraunhofer IAF erhalten. Insbesondere die Wertschöpfungskette und die damit verbundenen Möglichkeiten haben mich dazu bewegt, hier meine Abschlussarbeit auf diesem Gebiet zu schreiben.«

"As a student trainee, I was able to gain an insight into research activities in the field of power electronics at Fraunhofer IAF. In particular, the value chain and the associated opportunities motivated me to write my final thesis in this field at the institute."

Abschlussarbeiten

Theses

Dissertationen

Doctoral Theses

Michael Basler

Extended Monolithic Integration Levels for Highly Functional GaN Power ICs, Universität Freiburg

Tingpeng Luo

Characterization and Optimization of NV-Ensemble in Bulk Diamond for Sensing Application, Universität Freiburg

Masterarbeiten

Master's theses

Dixon Jeremi Fernandes

Noise Modelling of Robust GaN-based mm-Wave Technologies for Low-Noise Amplifier Design, Universität Freiburg

Antony Abel Kunnath

Characterization and Modelling of Backgated mHEMT Structures, Universität Freiburg

Tobias Nauck

Low Depth Quantum Amplitude Estimation on Noisy Quantum Processors, Universität Freiburg

Florian Philipp Schall

Sensitivitätsverbesserung von Laserschwellenmagnetometrie basierend auf Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant, TU Kaiserslautern-Landau

Daje Weber-Trebesch

Design and Investigation of a 120 GHz Doherty Amplifier in GaN MMIC Technology, Universität Freiburg

Isabel Wiegand

Aufbau eines Widefield-Setups zur Charakterisierung von NV-Zentren in Diamant, Hochschule Koblenz

Bachelorarbeiten

Bachelor's theses

Neill Aron Koesling

Aufbau und Charakterisierung eines Semiconductor Membrane External-Cavity Surface-Emitting Laser in Kombination mit einem Intra-Cavity-Stickstoff-Vakanz-Diamanten, Freie Universität Berlin

Marius Mayer

Charakterisierung von 600-V-GaN-Halbbrücken in schnell-schaltenden Pulsgeneratoren für kapazitive Lasten, Universität Freiburg

Birk Ramin

Comparison of Quantum and Classical Approximate Optimization Algorithms, Universität Freiburg

Yasin Yüce

Empirische Großsignalmodellierung von 50-nm-mHEMT-Bauelementen, DHBW Lörrach



» Ich habe mein duales Studium der Elektrotechnik am Fraunhofer IAF und an der DHBW Lörrach abgeschlossen. Ich arbeite an der Modellierung von GaN- und GaAs-Transistoren für die Hochfrequenz-Schaltungsentwicklung. Mir macht es Spaß, mit so vielen herausragenden Forschenden zusammenzuarbeiten.«

"I completed my integrated degree in electrical engineering at Fraunhofer IAF and DHBW Lörrach. I am working on the modeling of GaN and GaAs transistors for high-frequency circuit development and enjoy working with so many outstanding researchers."

Yasin Yüce
Elektrotechniker
Electrical Engineer



Während meiner Masterarbeit untersuchte ich grundlegende physikalische Phänomene mit dem Ziel, aus den gewonnenen Erkenntnissen in Zukunft einen anwendungsreifen Quantensensor entwickeln zu können. Die Kombination aus Grundlagenforschung und gleichzeitiger Anwendungsnähe ist sehr spannend und ich freue mich, diese Arbeit im Rahmen einer Promotion weiterführen zu können.«

"During my master's thesis, I investigated fundamental physical phenomena with the aim of developing an application-ready quantum sensor in the future. The combination of basic research and simultaneous application proximity is very exciting and I am looking forward to continuing this work as part of a PhD."



Florian Philipp Schall
Doktorand
PhD student

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
 - Breit gefächerte Forschungsbereiche, die sowohl Spezialisierung wie auch interdisziplinäres Arbeiten ermöglichen
-
- *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



Am Puls des technologischen Fortschritts

Ob in Forschung, Technik oder Verwaltung, als junge Wilde oder alter Hase – das Fraunhofer IAF bietet zukunftsträchtige 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

On the pulse of technological progress

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.

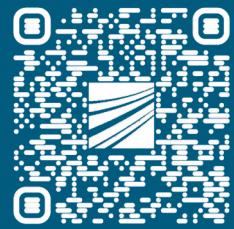
Further benefits

- 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



*Das Fraunhofer IAF bietet Mitarbeitenden vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten
Fraunhofer IAF offers employees various development opportunities*

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

Höhepunkte

Highlights



Eine gemeinsame Weiterentwicklung ist auf regelmäßigen Austausch angewiesen. Deshalb bildeten Veranstaltungen mit verschiedensten Zielgruppen – aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik ebenso wie aus Schule und Universität – sowie kontaktreiche Messeauftritte wichtige Höhepunkte im Jahr 2023. Das gilt auch für die Auszeichnungen und Rekorde, die Forschende des Fraunhofer IAF vergangenes Jahr erzielt haben.

Evolving together depends on regular exchange. This is why events with a wide variety of target groups — from business, science and politics as well as from schools and universities — and trade fair appearances rich in contacts were important highlights in 2023, as were the awards and records that Fraunhofer IAF researchers achieved last year.

Höhepunkte 2023

Highlights 2023

Besuch der Bundestagsabgeordneten Chantal Kopf

Visit from Chantal Kopf, member of the German parliament



18. Januar 2023

Im Januar 2023 begrüßte das Fraunhofer IAF Chantal Kopf, Bundestagsabgeordnete des Wahlkreises Freiburg, zu einem persönlichen Gespräch mit dem damals kommissarischen Institutsleiter Prof. Dr. Rüdiger Quay und einer Führung durch den Reinraum des Instituts. Zentrale Themen des Besuchs waren der European Chips Act und die Erforschung klimaneutraler Technologien zur Überwindung der anhaltenden Energiekrise.

January 18, 2023

In January 2023, Fraunhofer IAF welcomed Chantal Kopf, member of the Bundestag for the constituency of Freiburg, for a personal meeting with the at that time acting Director Prof. Dr. Rüdiger Quay and a tour of the institute's clean room. The main topics of the visit were the European Chips Act and research into climate-neutral technologies to overcome the ongoing energy crisis.



Wirtschaftsstaatssekretär informiert sich am Fraunhofer IAF über Quantentechnologien

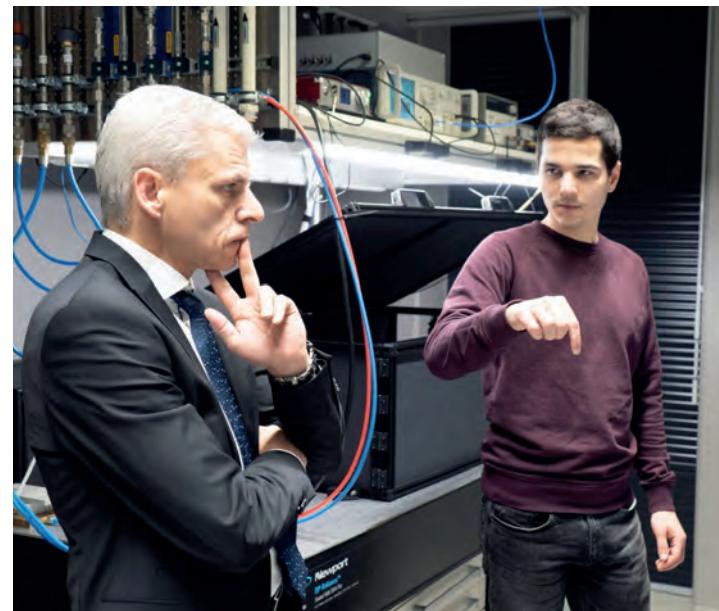
State Secretary for Economic Affairs learns about quantum technologies at Fraunhofer IAF

31. März 2023

Bei seinem Besuch des Fraunhofer IAF am 31. März 2023 sprachen der baden-württembergische Wirtschaftsstaatssekretär Dr. Patrick Rapp und Prof. Dr. Rüdiger Quay über industrielle Chancen und Kooperationsmöglichkeiten im Bereich der Quantentechnologien. Der Besuch umfasste Führungen durch den Reinraum, den Schulungsraum Quantencomputing und das Applikationslabor Quantensensorik sowie Präsentationen von Forschenden des Instituts.

March 31, 2023

During his visit to Fraunhofer IAF on March 31, 2023, Baden-Württemberg's State Secretary for Economic Affairs Dr. Patrick Rapp and Prof. Dr. Rüdiger Quay spoke about industrial opportunities and cooperation possibilities in the field of quantum technologies. The visit included a guided tour of the clean room, the quantum computing training room and the Application Laboratory Quantum Sensing as well as presentations by researchers from the institute.



Baden-Württemberg startet Quantum^{BW} – Innovationsoffensive in den Quantentechnologien

Baden-Württemberg launches Quantum^{BW} — innovation offensive in quantum technologies

21. April 2023

Gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft haben Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Wissenschaftsministerin Petra Olschowski und Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut am 21. April in Stuttgart das Startsignal für Quantum^{BW}, die gemeinsame Innovationsinitiative für Quantentechnologien, gegeben und die Quantenstrategie des Landes vorgestellt. Um einen passgenauen Wissenstransfer zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sicherzustellen, analysieren die Institute Fraunhofer IAF und IAO im Rahmen von Quantum^{BW} die Bedarfe der Wirtschaft mit ihren Industriepartnern und bringen diese in die Quantenstrategie des Landes Baden-Württemberg ein.

April 21, 2023

In April 2023, together with partners from science and industry, the State Government gave the start signal for Quantum^{BW}, Baden-Württemberg's joint innovation initiative for quantum technologies, and presented its quantum strategy. Ensuring a tailor-made transfer of knowledge between industry and science, the Fraunhofer IAF and IAO institutes are analyzing the needs of industry with their industrial partners as part of Quantum^{BW} and incorporate them into the quantum strategy of Baden-Württemberg.

45. Freiburger Infrarot-Kolloquium

45th Freiburg Infrared Colloquium



16. – 17. Mai 2023

Infrarotlaser und -detektoren sind der Schlüssel zur Entwicklung von Hochleistungssystemen für die Bereiche Sicherheit und Raumfahrt. Ebenso spielen sie in der medizinischen Diagnostik, Gasanalyse und der Spektroskopie eine immer größere Rolle. Um die Forschung und Entwicklung von Infrarottechnologien voranzutreiben, treffen sich Fachleute der Branche regelmäßig beim Freiburger Infrarot-Kolloquium. Die 45. Ausgabe der Konferenz fand mit 100 internationalen Fachleuten aus Wissenschaft und Industrie am 16. und 17. Mai 2023 am Fraunhofer IAF statt.

May 16–17, 2023

Infrared lasers and detectors are key to the development of high-performance systems for security and aerospace sectors. Likewise, they play an increasingly important role in medical diagnostics, gas analysis and spectroscopy. To advance the research and development of infrared technologies, industry experts meet regularly at the Freiburg Infrared Colloquium. The 45th edition of the conference with 100 international representatives from science and industry took place on May 16 and 17, 2023, at Fraunhofer IAF.

EuMW 2023

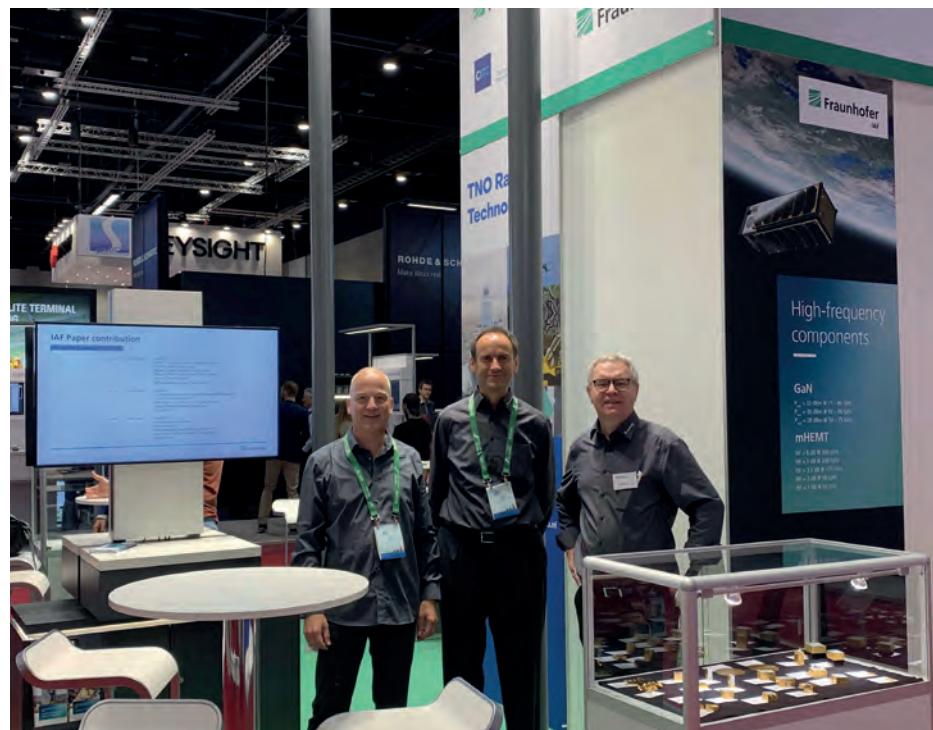
EuMW 2023

17. – 22. September 2023

Das Fraunhofer IAF präsentierte neueste Fortschritte der Hochfrequenzelektronik auf Basis von III/V-Halbleitern für Mikrowellentechnologie, Hochfrequenztechnik und Radar auf der European Microwave Week 2023 (EuMW) in Berlin. Zusätzlich zum Messeauftritt war das Freiburger Institut bei 18 Konferenzbeiträgen vertreten und stellte u. a. integrierte Schaltungen für Terahertz-Frequenzen sowie Submillimeterwellen-MMICs und -Module vor.

September 17–22, 2023

Fraunhofer IAF presented its latest advances in high-frequency electronics based on III-V compound semiconductors at the European Microwave Week 2023 (EuMW) in Berlin. In addition to its participation at the trade fair, the institute was represented in 18 conference papers with presentations, among others, on integrated circuits for terahertz frequencies as well as submillimeter-wave MMICs and modules.





LASER World of PHOTONICS und World of QUANTUM

LASER World of PHOTONICS and World of QUANTUM

27.– 30. Juni 2023

Auf der LASER World of PHOTONICS 2023 in München präsentierte das Fraunhofer IAF u. a. ein Scheibenlasermodul als Beispiel seiner optoelektronischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entlang der III/V-Halbleiter-Wertschöpfungskette. Auf der parallel stattfindenden World of QUANTUM wurde u. a. ein neuartiges Weitfeld-Magnetometer auf Diamantbasis präsentiert.

June 27–30, 2023

At the LASER World of PHOTONICS 2023 in Munich, Fraunhofer IAF presented, among others, a VECSEL module as an example of its optoelectronic research and development activities along the III-V semiconductor value chain. In addition, an innovative wide-field magnetometer based on diamond was showcased at the parallel World of QUANTUM.

Neuer Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft besucht Freiburger Institute

New President of the Fraunhofer-Gesellschaft visits the Freiburg institutes



29. September 2023

Prof. Dr. Holger Hanselka, seit August 2023 neuer Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, besuchte im Rahmen seines Amtsantritts verschiedene Fraunhofer-Standorte. Die erste Station war Freiburg. Am Fraunhofer IAF informierte sich Hanselka über die großen Fortschritte in der Quantentechnologie insbesondere auf Basis von synthetischem Diamant. Darüber hinaus erhielt er Einblick in die Entwicklung effizienter Datenübertragung für den Einsatz im 6G-Mobilfunk und in der Satellitenkommunikation basierend auf integrierten Schaltkreisen, die im Reinraum des Fraunhofer IAF hergestellt wurden.

September 29, 2023

Prof. Dr. Holger Hanselka, the new President of the Fraunhofer-Gesellschaft, visited various Fraunhofer locations as part of his inauguration. The first stop was Freiburg. At Fraunhofer IAF, Hanselka learned about the major advances in quantum technology, particularly on the basis of synthetic diamond. He also gained insight into the development of efficient data transmission for use in 6G mobile communications and satellite communications based on integrated circuits manufactured in the Fraunhofer IAF clean room.

Quantum Effects 2023 in Stuttgart

Quantum Effects 2023 in Stuttgart

10.–11. Oktober 2023

Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den vergangenen Jahren sind die Quantentechnologien auf einem guten Weg Richtung Anwendung. Das Fraunhofer IAF zeigte seine neuesten Forschungsergebnisse in den Bereichen Quantensensorik und Quantencomputing-Hardware sowie -Software bei der Erstaufgabe der Fachmesse Quantum Effects am 10. und 11. Oktober 2023 in Stuttgart.

October 10–11, 2023

Due to intensive research and development activities in recent years, quantum technologies are well on the way towards application. Fraunhofer IAF presented its latest research results in the fields of quantum sensing as well as quantum computing hardware and software at the first edition of the Quantum Effects trade fair in Stuttgart on October 10 and 11, 2023.

Nobelpreisträger Hiroshi Amano lädt Forschende des Fraunhofer IAF ein

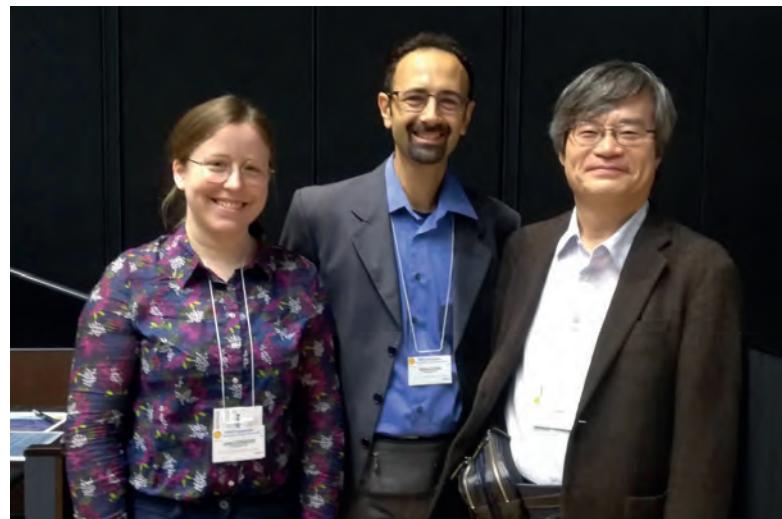
Nobel laureate Hiroshi Amano invites researchers
of Fraunhofer IAF

10. November 2023

Eine große Ehre für drei Forschende des Fraunhofer IAF: Dr. Lutz Kirste, Dr. Stefano Leone und Isabel Streicher waren eingeladen, am 10. November an der Universität Nagoya einen Vortrag im Rahmen des CIRFE-Symposiums der Forschungsgruppe von Nobelpreisträger Prof. Dr. Hiroshi Amano zu halten. Ihr Vortrag trug den Titel: »Growth and structural characterization of nitride semiconductors at Fraunhofer IAF«.

November 10, 2023

Great honor for three Fraunhofer IAF researchers: Dr. Lutz Kirste, Dr. Stefano Leone, and Isabel Streicher were invited to give a lecture at the CIRFE Symposium of the research group of Nobel laureate Prof. Dr. Hiroshi Amano at Nagoya University on November 10. The presentation was entitled: "Growth and structural characterization of nitride semiconductors at Fraunhofer IAF."



Auszeichnungen 2023

Awards 2023

Fabian Thome und Arnulf Leuther – IEEE Tatsuo Itoh Award 2023



Dr. Fabian Thome

Für ihren Beitrag »A 75–305-GHz Power Amplifier MMIC With 10–14.9-dBm Pout in a 35-nm InGaAs mHEMT Technology« wurden Dr. Fabian Thome und Dr. Arnulf Leuther mit dem IEEE Tatsuo Itoh Award 2023 der IEEE Microwave Theory and Technology Society (MTT-S) ausgezeichnet.

In ihrem Beitrag präsentieren Fabian Thome und Arnulf Leuther den ersten monolithisch integrierten Mikrowellenschaltkreis zur Leistungsverstärkung (power amplifier monolithic microwave integrated circuit, PA-MMIC) mit Oktav-Bandbreite, der eine Ausgangsleistung von 10 dBm bei 300 GHz liefert. Entwickelt haben die Autoren den PA-MMIC mit der 35-nm-InGaAs-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF. Der PA-MMIC kann in Anwendungen wie drahtlosen Punkt-zu Punkt-Kommunikationsverbindungen oder hochauflösenden Radarsystemen und Messgeräten zum Einsatz kommen, die im Frequenzbereich bis 300 GHz arbeiten und auf eine große Betriebsbandbreite angewiesen sind.



Dr. Arnulf Leuther

Dr. Fabian Thome and Dr. Arnulf Leuther have been awarded the IEEE Tatsuo Itoh Award 2023 for their paper "A 75–305-GHz Power Amplifier MMIC With 10–14.9-dBm Pout in a 35-nm InGaAs mHEMT Technology" of the IEEE Microwave Theory and Technology Society (MTT-S).

In their paper, Fabian Thome and Arnulf Leuther present the first power amplifier monolithic microwave integrated circuit (PA-MMIC) with octave bandwidth that delivers an output power of 10 dBm at 300 GHz. The authors developed the PA-MMIC using the 35 nm InGaAs mHEMT technology of Fraunhofer IAF. The PA-MMIC can be used in applications such as wireless point-to-point communication links or high-resolution radar systems and measurement devices that operate in the frequency range up to 300 GHz and rely on a wide operating bandwidth.

Philipp Neininger und Laurenz John – Awards European Microwave Week 2023

EumiC Conference Prize: Dr. Philipp Neininger und seine Co-Autoren erhielten den EuMIC Conference Prize für ihr Paper »Ultra-Wideband mmW Digital Step Attenuator«. Darin geht es um den derzeit breitbandigsten digitalen Stufenabschwächer für den Frequenzbereich von 40 bis 220 GHz, basierend auf der 35-nm-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF.

DTZ Young Scientist Award: Der Award des Deutschen Terahertz-Zentrums e. V. wurde Dr. Laurenz John für seine herausragende Dissertation mit dem Titel »Integrated Sub-Millimeter-Wave High-Power Amplifiers in Advanced InGaAs Channel HEMT Technology« verliehen. In der Arbeit beschreibt der Wissenschaftler die Entwicklung eines rauscharmen Verstärkers für den Arctic Weather Satellite der ESA. Dafür wurden drei LNA-Schaltungen für unterschiedliche Frequenzbänder (um 54 GHz, 89 GHz und 165–183 GHz) in einer 50-nm-InGaAs-Kanal-mHEMT-Technologie realisiert, in Hohlleitermodule integriert und für das Protoflugmodell des Satelliten qualifiziert.

EumiC Conference Prize: Dr. Philipp Neininger and his co-authors received the Prize for their paper "Ultra-Wideband mmW Digital Step Attenuator." The paper is about the currently most broadband digital step attenuator for the frequency range from 40 to 220 GHz, based on the 35 nm mHEMT technology of Fraunhofer IAF.

The Young Scientist Award of the Deutsches Terahertz-Zentrum e. V. was given to Dr. Laurenz John for his outstanding dissertation entitled "Integrated Sub-Millimeter-Wave High-Power Amplifiers in Advanced InGaAs Channel HEMT Technology." In his paper, the scientist describes the development of a low-noise amplifier for ESA's Arctic Weather Satellite. For this purpose, three LNA circuits for different frequency bands (around 54 GHz, 89 GHz, and 165-183 GHz) were realized in a 50 nm InGaAs channel mHEMT technology, packaged in waveguide modules, and qualified for the satellite's proto-flight model.



Dr. Philipp Neininger



Dr. Laurenz John

Kareem Mansour – Green ICT Award



Kareem Mansour

Für seine 2021 am Fraunhofer IAF und am INATECH der Universität Freiburg erstellte Masterarbeit hat Kareem Mansour den Green ICT Award der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) erhalten. Der Preis wurde am 24. Oktober 2023 im Rahmen des MST Kongresses in Dresden verliehen. In seiner Arbeit entwickelte Mansour einen neuartigen DC-DC-Spannungs- wandler, der den Wirkungsgrad elektrischer Energiewandlung, etwa zur Ansteuerung elektrokalorischer Festkörper-Wärmepum- pen, signifikant erhöht.

Kareem Mansour has received the Green ICT Award of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) for his master's thesis written in 2021 at Fraunhofer IAF and INATECH of the University of Freiburg. The award was presented on October 24, 2023, during the MST Congress in Dresden. In his thesis, Mansour developed a novel DC-DC voltage converter that significantly increases the efficiency of electrical energy conversion, for example in the controlling of solid-state electrocaloric heat pumps.

Felix Hahl – Quantum Futur Award 2023



Dr. Felix Hahl (Mitte)

Dr. Felix Hahl hat beim diesjährigen Quantum Futur Award den ersten Platz in der Kategorie Promotionsarbeiten belegt. Er überzeugte die Jury mit seiner Arbeit aus dem Bereich der Quantensensorik und einem dreiminütigen Pitch, in dem er die Ergebnisse seiner Arbeit und deren potenzielle Anwendungen in der Medizintechnik vorstellte. Neben der Jury überzeugte Hahl mit seinem Pitch auch das Publikum, das ihn mit über 50 % der abgegebenen Stimmen ebenfalls zum Sieger des Audience Awards kürte.

Dr. Felix Hahl took first place in the PhD thesis category at this year's Quantum Future Award. He convinced the jury with his work in the field of quantum sensor technology and a three-minute pitch in which he presented the results of his work and their potential applications in medical technology. In addition to the jury, Hahl's pitch also impressed the audience, who voted him the winner of the Audience Award with over 50 % of the votes cast.

Akash Nair und Matthias Sinnwell – Awards International Conference on Nitride Semiconductors

Outstanding Poster Award: Akash Nair, Wissenschaftler auf dem Gebiet Wachstum piezoelektrischer Materialien, wurde für sein Poster mit dem Titel »Controlling stress behavior of sputtered a-plane Al_{1-x}Sc_xN films« ausgezeichnet. Darin beschreibt der Doktorand, wie es ihm und seiner Gruppe gelungen ist, Aluminiumscandiumnitrid-(AlScN-)Schichten erstmals in nichtpolarer Richtung zu wachsen und dabei die Spannung der Schichten zu kontrollieren, was sich positiv auf die Materialeigenschaften auswirkt. Im Bereich AlScN-Wachstum stellt dieses Ergebnis einen Durchbruch dar.

Best Student Award: Matthias Sinnwell, Doktorand im Bereich Materialcharakterisierung, erhielt die Auszeichnung für seinen Konferenzvortrag mit dem Titel: »Fin-length scaling of vertical 100-fin GaN FinFETs on sapphire resulting in maximum frequency of oscillation $f_{\max} = 9.5$ GHz«. In seinem Vortrag demonstrierte er einen FinFET mit maximaler Schwingungsfrequenz von 9,5 GHz, was einen Rekordwert für vertikale GaN-Transistoren darstellt, kalkulierte die zu erwartenden Frequenzen und präsentierte erstmals eine Realisierung der komplizierten FinFET-Struktur auf Wafer-Ebene.

Outstanding Poster Award: Akash Nair, scientist in the field of piezoelectric materials growth, was honored for his poster entitled: "Controlling stress behavior of sputtered a-plane Al_{1-x}Sc_xN films." The doctoral student describes how he and his group succeeded for the first time in growing aluminum scandium nitride (AlScN) layers in the non-polar direction while controlling the layer stress. This result represents a breakthrough for the growth of AlScN.

Best Student Award: Matthias Sinnwell, PhD student in the field of material characterization, received the award for his conference presentation entitled: "Fin-length scaling of vertical 100-fin GaN FinFETs on sapphire resulting in maximum frequency of oscillation $f_{\max} = 9.5$ GHz." In his presentation, he demonstrated a FinFET with a maximum oscillation frequency of 9.5 GHz, which represents a record value for vertical GaN transistors, calculated the expected frequencies and presented a realization of the complicated FinFET structure at wafer level for the first time.



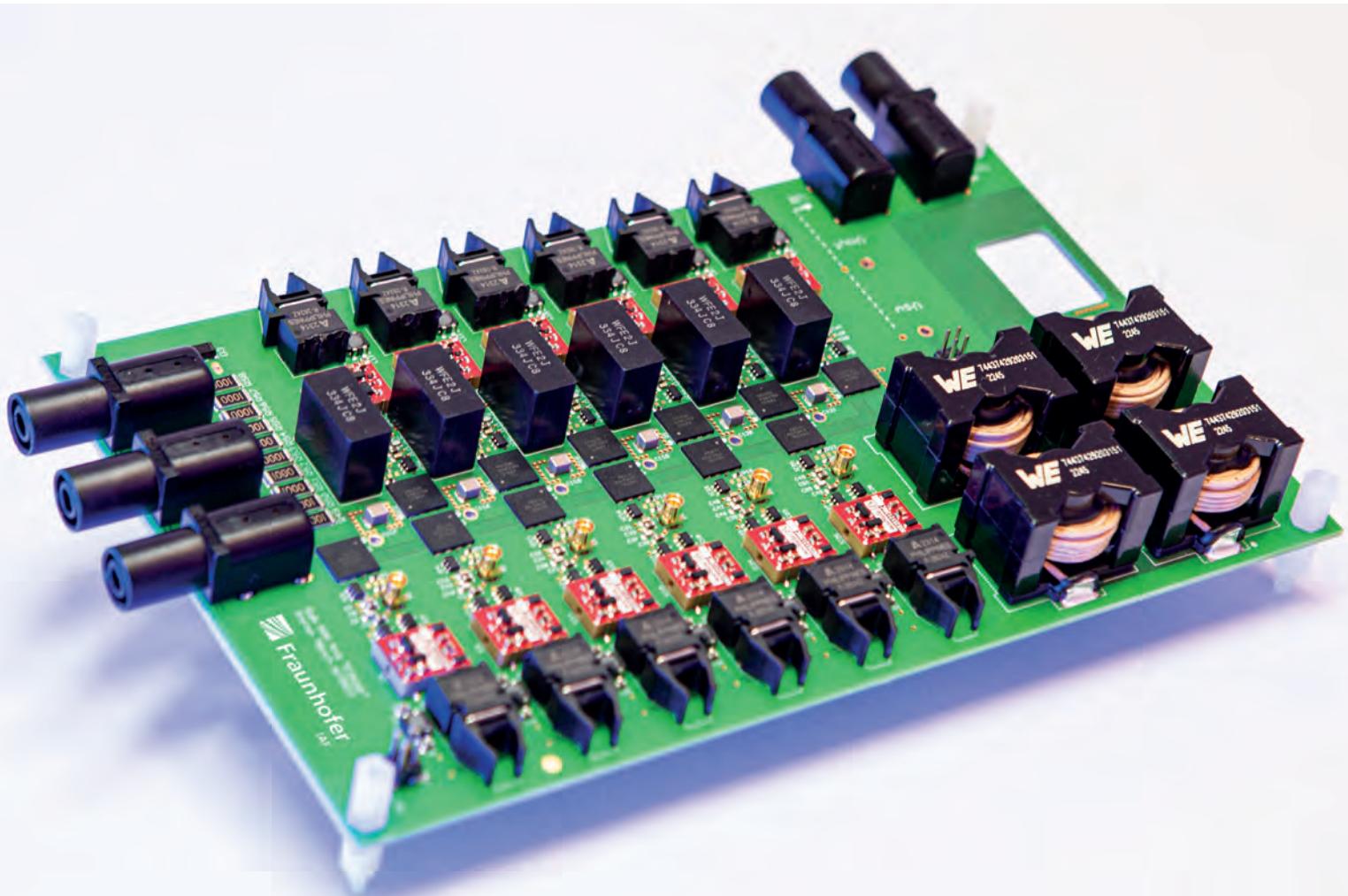
Akash Nair



Matthias Sinnwell

Rekorde 2023

Records 2023



Forschende um Jun.-Prof. Dr. Stefan Mönch erzielten mit Leistungselektronik für elektrokalorische Wärmepumpen einen neuen Wirkungsgradrekord von 99,7 %. Der abgebildete Demonstrator ist eine Weiterentwicklung und erzielt sogar einen elektrischen Wirkungsgrad von 99,75 %.

Researchers led by Junior Professor Dr. Stefan Mönch achieved a new efficiency record of 99.7 % with power electronics for electrocaloric heat pumps. The demonstrator shown here is a further development and even achieves an electrical efficiency of 99.75 %.

Forschende des Fraunhofer IAF erzielten im Jahr 2023 folgende Ergebnisse, die zum Zeitpunkt der Publikation Bestwerte in ihren Bereichen darstellten.

In 2023, researchers at Fraunhofer IAF achieved the following results, which represented international records in their fields at the time of publication.

Niedrigste Rauschtemperatur und Gleichstrom-Leistungsaufnahme unter den monolithisch integrierten rauscharmen Verstärkern für das C-Band bei kryogenen Temperaturen
Lowest noise temperature and DC power consumption among monolithically integrated C-band low noise amplifiers at cryogenic temperatures
Heinz, Felix; Thome, Fabian; Leuther, Arnulf: "Monolithically Integrated C-Band Low-Noise Amplifiers for Use in Cryogenic Large-Scale RF Systems"

Monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung für rauscharme Verstärker bei 730 GHz
Monolithically integrated microwave circuit for low noise amplifiers at 730 GHz
Tessmann, Axel; Leuther, Arnulf; Thome, Fabian; John, Laurenz; Gashi, Bersant;
Maßler, Hermann; Saam, Alexander; Chartier, Sébastien: "Advanced mHEMT Technologies for Use in Radar, Communication and Meteorological Applications"

Monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung für einen Leistungsverstärker, der 20 dB Verstärkung sowie Leistungsstufen von mehr als 20 mW um 300 GHz bei einer PAE > 2,5 % erreicht
Monolithically integrated microwave circuit for power amplifier achieving 20 dB of gain and power levels larger than 20 mW around 300 GHz with maximum PAE > 2.5%
John, Laurenz; Tessmann, Axel; Wagner, Sandrine; Leuther, Arnulf: "Highly Compact 20 mW 270–320 GHz InGaAs mHEMT Power Amplifier MMIC"

2,4 W Ausgangsleistung eines spektral-einmodigen Halbleiter-Scheibenlasers im 2 µm-Frequenzbereich (Frequenzstabilität < 100 kHz)
2.4 W output power of a spectral single-mode VECSEL in the 2 µm frequency range (frequency stability < 100 kHz)
Adler, Steffen; Holl, Peter; Diwo-Emmer, Elke; Bächle, Andreas; Bradler, Maximilian; Yahyapour, Milad; Holzwarth, Ronald; Rattunde, Marcel: "High-power 2 µm GaSb-based VECSEL with an absolute wavelength stability below 1 MHz"

Schaltungstopologie für Spannungswandler zur Ansteuerung elektrokalorischer Wärmepumpen mit elektrischem Wirkungsgrad > 99,7 %
Voltage converter circuit topology for controlling electrocaloric heat pumps with electrical efficiency > 99.7 %
Mönch, Stefan; Reiner, Richard; Mansour, Kareem; Waltereit, Patrick; Basler, Michael; Quay, Rüdiger; Molin, Christian; Gebhardt, Sylvia; Bach, David; Binninger, Roland; Bartholomé, Kilian: "A 99.74 % Efficient Capacitor-Charging Converter Using Partial Power Processing for Electrocalorics"



Fraunhofer: Innovation seit 75 Jahren

Fraunhofer: 75 Years of Innovation

2024 feiert die Fraunhofer-Gesellschaft ihr 75-jähriges Bestehen. Was damals in einem Münchner Sitzungssaal als Verein mit 103 Mitgliedern begann, ist heute die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung.

Am 26. März 1949 wurde die Fraunhofer-Gesellschaft gegründet. Namensgeber wurde der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreiche Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). In den Anfangsjahren standen noch Forschungen im Bereich Berg- und Maschinenbau im Vordergrund, doch Fraunhofer entwickelte sich immer mehr zu einer essenziellen Säule der Wissenschaftslandschaft in Deutschland. Mitte der 60er-Jahre wurde die Fraunhofer-Gesellschaft offiziell zur Trägerorganisation für angewandte Forschung im deutschen Innovationssystem.

Das Fraunhofer-Modell der erfolgsabhängigen Grundfinanzierung erzeugte seit den 70ern jene Dynamik des Erfolgs, die bis heute anhält. Nach der deutschen Wiedervereinigung ergriff die Fraunhofer-Gesellschaft die Gelegenheit und gründete in den neuen Bundesländern über 20 neue Institute und Einrichtungen. Nachdem bereits 1984 der Verbund Mikroelektronik entstanden war, schlossen sich seit 1997 verstärkt weitere Fraunhofer-Institute zu thematisch orientierten Verbünden zusammen. 2015 gründete die Fraunhofer-Gesellschaft erstmals sogenannte regionale Leistungszentren.

Die Fraunhofer-Gesellschaft als Erfolgsmodell und Innovationsmotor

Heute blickt die Fraunhofer-Gesellschaft zurück auf 75 Jahre Unternehmensgeschichte voller bahnbrechender Erfindungen und Lösungen für komplexe technologische Herausforderungen. Seit ihrer Gründung hat sie sich kontinuierlich weiterentwickelt und dabei zahlreiche Meilensteine erreicht, die ihre Innovationskraft in den verschiedensten Bereichen der Spitzenforschung widerspiegeln. Von bescheidenen Anfängen bis hin zu einer international anerkannten Forschungsorganisation hat sich Fraunhofer stets durch Erfindergeist und unternehmerisches Handeln ausgezeichnet und ist so zum Innovationsmotor der deutschen Wirtschaft geworden.

In 2024, the Fraunhofer-Gesellschaft is celebrating its 75th anniversary. What began as an association with 103 members in a meeting room in Munich is now the world's leading organization for application-oriented research.

The Fraunhofer-Gesellschaft was founded on March 26, 1949. The research organization was named after Joseph von Fraunhofer (1787–1826), a Munich scholar who was equally successful as a researcher, inventor and entrepreneur. In the early years, research focused primarily on the fields of mining and mechanical engineering, but Fraunhofer gradually evolved to become a mainstay of research in Germany. In the mid-1960s, Fraunhofer was officially designated the German science community's umbrella organization for applied research.

The Fraunhofer model and its performance-oriented base funding sparked the dynamic success that continues today. After Germany's reunification, the Fraunhofer-Gesellschaft seized the day, setting up more than 20 new institutes and research units in the states that had newly joined the Federal Republic. Following the 1984 establishment of the Fraunhofer Group for Microelectronics, additional Fraunhofer institutes began ramping up their efforts to join forces in 1997, forming thematically focused groups. In 2015, the Fraunhofer-Gesellschaft founded its first-ever regional high-performance centers, where Fraunhofer institutes work closely with industry and other research partners on a local basis, covering projects on related topics.

The Fraunhofer-Gesellschaft as a success model and driver of innovation

Today, the Fraunhofer-Gesellschaft looks back on a 75-year history full of groundbreaking inventions and solutions to complex technological challenges. Since it was first founded, the organization has continued to grow and evolve, reaching many milestones along the way that reflect its innovative strength across all the different fronts of cutting-edge research. Rising from modest beginnings to international recognition as a research organization, Fraunhofer has always been defined by inventive spirit and entrepreneurial actions. Its numerous inventions and developments have made it the German economy's innovation engine.

Wissenswertes

Things to know



Das Fraunhofer IAF ist mehr als die Summe seiner Zahlen, Daten und Fakten. Aber sie helfen dabei, sich auf den neuesten Stand zu bringen. Informationen über die Finanzen, Lehrveranstaltungen, Netzwerke oder Patente des Fraunhofer IAF verschaffen einen Überblick über die jüngsten Entwicklungen am Institut.

Fraunhofer IAF is more than just the sum figures, facts, and data. But they do help to bring one up to date. Information about the finances, university teachings, networks, or patents of Fraunhofer IAF provide an overview of the latest developments at the institute.

Das Institut in Zahlen

The institute in figures

Das Fraunhofer IAF steigerte den Betriebshaushalt 2023 gegenüber dem Vorjahr um 5,1 Mio. € auf 36,7 Mio. €. Die Sachaufwendungen i. H. v. insgesamt 16,1 Mio. € erfuhrn einen Aufwuchs aufgrund von Kostensteigerungen in den Bereichen Energie und Instandhaltung sowie im erhöhten Einkauf von forschungsspezifischem Material. Der Personalaufwand liegt mit 20,6 Mio. € ca. 6 % über dem Vorjahreswert. Neben der tarifbedingten Steigerung lag dies an der moderaten Erhöhung der Beschäftigtenzahl. Noch immer konnten die wegen der guten Ertragslage geplanten Neueinstellungen durch den weiterhin spürbaren Fachkräftemangel nicht vollumfänglich realisiert werden. Das Investitionsvolumen in Höhe von 8,5 Mio. € konnte im Vergleich zum Vorjahr deutlich gesteigert werden. Die Lieferzeiten waren auch 2023 noch deutlich länger als vor der Pandemiephase, wobei sich erste Entspannung zeigte. Lieferengpässe gab es ebenfalls noch an einigen Stellen, insgesamt hat sich die Situation am Markt jedoch gebessert.

2024 ist das Ziel, die Lücken der Personalbesetzung aus den Vorjahren zu schließen. Zusammen mit der planmäßigen Tarifsteigerung wird sich der Gesamtaufwand weiter erhöhen. Die geplante Steigerung des Sachaufwands folgt im Wesentlichen der Inflation. Für laufende Investitionen sind 11,0 Mio. € vorgesehen.

Ein großer Teil des Gesamthaushalts wurde 2023 vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) mit einem Anteil von 33,8 % finanziert. Im zivilen Bereich trugen die Projekte der Quantentechnologie weiterhin zum hohen Volumen der öffentlichen Förderung bei. Die Industrieerträge erreichten nicht das Volumen des Vorjahrs, sie lagen bei rund 6,0 Mio. €.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten lag 2023 bei 229. In absoluten Zahlen arbeiteten zum Jahresende 289 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon waren ca. 32 % weiblich. Von diesen waren 113 Mitarbeitende, inklusive 23 Promovierende, in den wissenschaftlichen Bereichen aktiv. 102 Beschäftigte waren in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Weitere 74 Personen arbeiteten als nicht-wissenschaftliche Mitarbeitende in den Fachabteilungen. Stand Dezember unterstützten zudem 23 wissenschaftliche Hilfskräfte und Auszubildende die Arbeiten am Fraunhofer IAF.

Fraunhofer IAF increased its operating budget in 2023 by € 5.1 million to € 36.7 million compared to the previous year. Material expenses totaling € 16.1 million experienced an increase due to cost increases in the areas of energy and maintenance as well as the increased purchase of research-specific materials. The personnel expenses were around 6 % higher than in the previous year at € 20.6 million. This is due to the moderate increase in the number of employees as well as the increase due to collective wage agreements. It has still not been possible to fully realize the new hires planned due to the good earnings situation because of the continuing shortage of skilled workers. The investment volume of € 8.5 million increased significantly compared to the previous year. Delivery times in 2023 were still considerably longer than before the pandemic, although the situation has begun to ease. There were also still supply bottlenecks in some areas, but the situation on the market has improved overall.

In 2024, the aim is to close the gaps in personnel from previous years. Together with the planned pay rise, total expenses will increase further. The planned increase in operating expenses is essentially in line with inflation. An amount of € 11.0 million has been budgeted for current investments.

A large part of the total budget in 2023 was financed by the Federal Ministry of Defense (BMVg) with a share of 33.8 %. In the civil sector, quantum technology projects continue to contribute to the high volume of public funding. Industrial income did not reach the volume of the previous year, amounting to around € 6.0 million.

The number of full-time equivalent employees in 2023 is 229. In absolute figures, 289 employees were working at Fraunhofer IAF at the end of the year, of which approx. 32 % are female. Of these, 113 employees, including 23 doctoral students, are active in the scientific areas. 102 employees work in infrastructure, including management. A further 74 people work as non-scientific staff in the specialist departments. As of December, 23 research assistants and trainees also support the work at Fraunhofer IAF.

289

45.2 million €

Mitarbeitende Employees

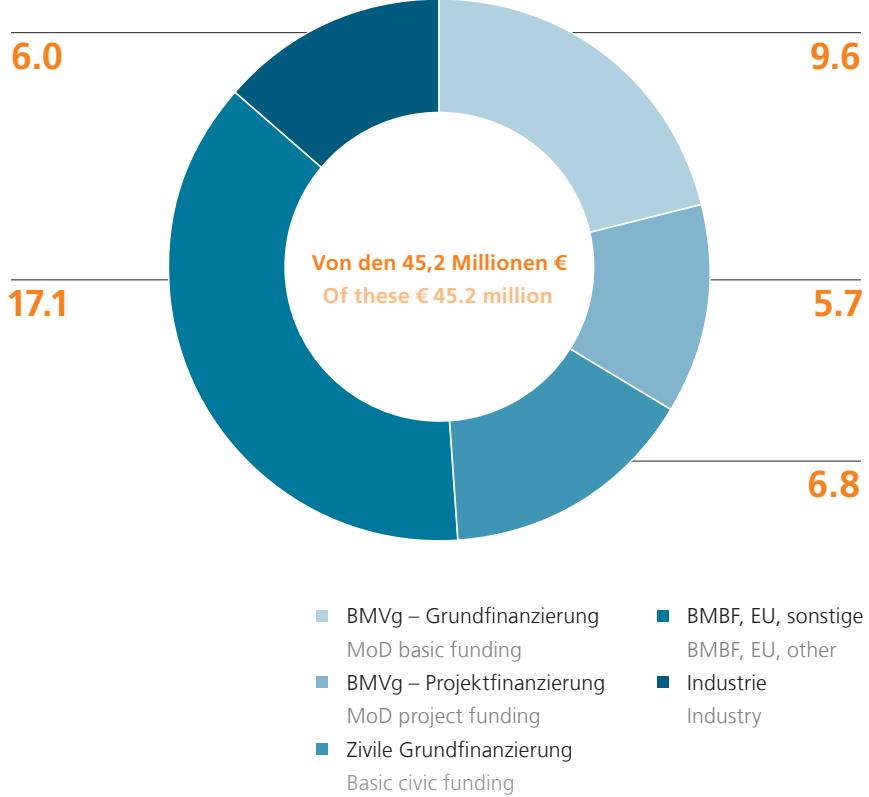
Davon | Of which

113Wissenschaftliche Mitarbeiterende
in Fachabteilungen
Scientists in R&D departments

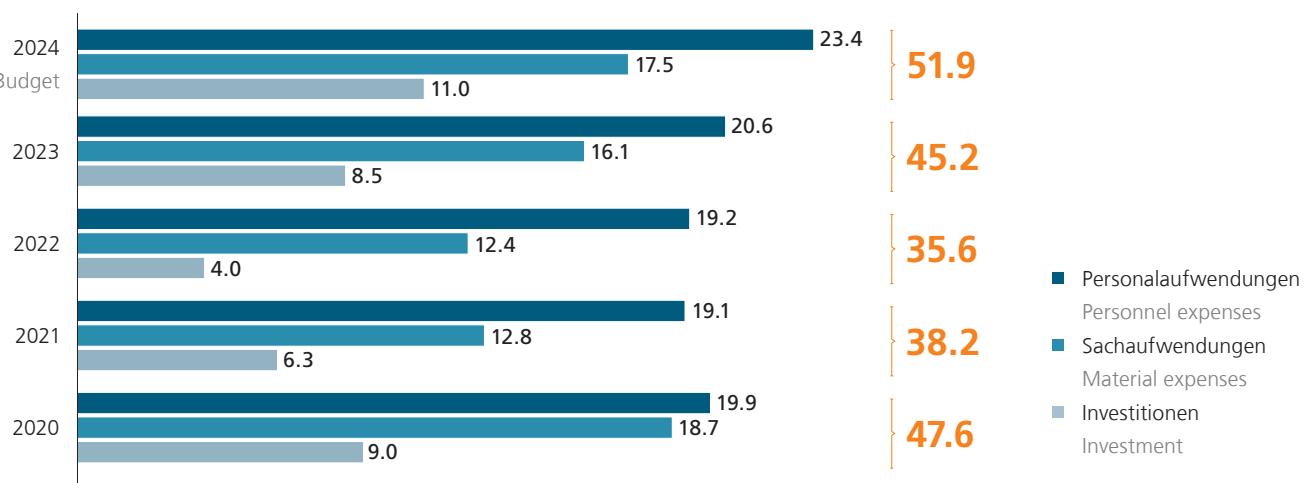
Inklusive | Including

Promovierende sowie
Masterstudierende in Fachabteilungen
Master and PhD students in R&D departments**74**Mitarbeitende
in Fachabteilungen
Staff in R&D departments**102**Mitarbeitende in Infrastruktur und Leitung
(davon sechs Hilfskräfte)
Staff in infrastructure and management
(including six assistants)

Gesamthaushalt (Stand 04/2024) Total budget (as of 04/2024)



Gesamthaushaltsausgaben in Mio. € Total budget outlay in million €



Organisationsstruktur

Organizational structure

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer IAF gliedert sich neben der Stabsstelle Marketing und Kommunikation 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 Divisions in addition to the Group Marketing and Communications. 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.

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



Institutsleitung Institute Management

Dr. Patricie Merkert

📞 -412

Prof. Dr. Rüdiger Quay

📞 -411

Bereichsleitungen Division Directors

Dr. Matthias Ohlrogge

Geschäftsfelder
Business Units

📞 -455

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.

Quantenbauteile
Quantum Components

Dr. Florentin Reiter

Quantensysteme
Quantum Systems

📞 -391

Von links nach rechts (from left to right)

Dr. Patricie Merkert, Prof. Dr. Rüdiger Quay,

Dr. Matthias Ohlrogge, Dr. Jutta Kühn,

Dr. Martin Walther

Kuratorium

Advisory Board

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

MdB Barbara Becker

Bayerischer Landtag, CSU Fraktion, München

Dr. Klaus Beilenhoff

United Monolithic Semiconductor GmbH, Ulm

Prof. Dr. Jérôme Faist

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Renata Jovanovic

Deloitte Consulting GmbH, Berlin

Dr. Johannes Koeth

nanoplus GmbH, Gerbrunn

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 the research program of Fraunhofer IAF advising the Institute Management 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, Schweiz

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. Anke Weidenkaff

Fraunhofer IWKS, Alzenau

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



Ausbildung und Lehre

Education and teaching

Mehrere Mitarbeitende des Fraunhofer IAF waren 2023 in der Lehre tätig.
Several Scientists of Fraunhofer IAF were active in teaching in 2023.



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

»RF- and Microwave Circuits and Systems – Vorlesung«,
»RF and Microwave System Design Course – Praktikum«,
»RF and Microwave Devices and Circuits – Vorlesung«,
»Schaltungstechnik / Circuit Technology«,
»Studienseminar Sustainable Systems Engineering« (anteilig),
»Energy and Digitalization«,
»Energy Efficient Power Electronics« (gemeinsam mit Prof. Dr. Oliver Ambacher/
INATECH und Dr. Sönke Rogalla/Fraunhofer ISE)

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Lehrdebutat SWS / Teaching hours per week: 2

Ausgeübte Lehrtätigkeit / Actual teaching hours: 14

»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

Universität Stuttgart

»SiGe BiCMOS Monolithic Microwave Integrated Circuit Design«

Dr. Sébastien Chartier

Lehrdebutat SWS / Teaching hours per week: 2



Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Leistungselektronik«

Dr. Michael Basler

Lehrdebutat SWS / Teaching hours per week: 2

»Hochfrequenztechnik in der Schaltungstechnik«

Dr. Matthias Ohlrogge

Lehrdebutat SWS / Teaching hours per week: 4

Stefan Mönch erhält Juniorprofessur

Stefan Mönch receives junior professorship

Dr.-Ing. Stefan Mönch, Forscher im Bereich Leistungselektronik am Fraunhofer IAF, startete im Dezember 2023 als Juniorprofessor an der Universität Stuttgart und baut die Forschungsgruppe »Smarte Converter für eine emissionsfreie Mobilität der Zukunft« am Institut für Elektrische Energiewandlung IEW auf.

Dr.-Ing. Stefan Mönch, researcher in the field of power electronics at Fraunhofer IAF, has started as a junior professor at the University of Stuttgart in December 2023 and establishes the research group "Smart converters for emission-free mobility of the future" at the Institute of Electrical Energy Conversion IEW.

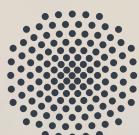


Die Juniorprofessur ermöglicht es, dass sich mehr Studierende und Promovierende auf effiziente und emissionsfreie Energiewandlung spezialisieren können. Gemeinsam beschleunigen wir dadurch die Erforschung innovativer Lösungen für drängende und gesellschaftlich relevante Herausforderungen der Energie-, Wärme- und Mobilitätswende.

"The junior professorship enables more students and doctoral candidates to specialize in efficient and emission-free energy conversion. Together, we will accelerate research on innovative solutions for urgent and socially relevant challenges of the energy, heating and mobility transition."

Stefan Mönch hat 2021 zu Galliumnitrid-basierten und integrierten Leistungshalbleiter-Schaltungen promoviert und ist seitdem als Wissenschaftler und Projektleiter am Fraunhofer IAF tätig. Neben der Juniorprofessur forscht er weiterhin an der effizienten elektrischen Ansteuerung elektrokalorischer Wärmepumpen und leitet als Koordinator das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt »GaN4EmoBiL« zu 1200-V-GaN-Leistungshalbleitern für Elektromobilität und Systemintegration durch bidirektionales Laden.

Stefan Mönch completed his PhD on gallium nitride-based and integrated power semiconductor circuits in 2021 and has been working as a scientist and project manager at Fraunhofer IAF since. In addition to the junior professorship, he continues to work on the efficient electrical control of electrocaloric heat pumps and is coordinator of the project GaN4EmoBiL on 1200 V GaN power semiconductors for electromobility and system integration through bidirectional charging funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action.



Universität Stuttgart



Netzwerke

Networks

Neben der Beteiligung in nationalen wie internationalen Forschungskonsortien ist das Fraunhofer IAF auch aktives Mitglied in Forschungs- und Industrienetzwerken aus den verschiedenen Fachbereichen entlang der gesamten Forschungs-und-Entwicklungsdiensleistungen des Instituts.

- 6G Research and Innovation Cluster
- ASCENT+ — Network for European Nanoelectronics Access
- Bitkom e. V.
- Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg
- Department of Sustainable Systems Engineering — INATECH
- EPIC — European Photonics Industry Consortium
- Fraunhofer Competence Network Quantum Computing
- Fraunhofer Group for Microelectronics
- Fraunhofer Segment for Defense and Security VVS

In addition to participating in national and international research consortia, Fraunhofer IAF is also an active member of research and industry networks along the institute's entire research and development services.

- iQuSense Innovation Network
- MATQu — Materials for Quantum Computing
- Open6GHub — 6G for Society and Sustainability
- Photonics BW e. V.
- Quantum Business Network (QBN)
- Quantum^{BW}
- Research Fab Microelectronics Germany (FMD)
 - Green ICT — Competence center for sustainable information and communication technology
 - FMD-QNC — FMD-Module Quantum and Neuromorphic Computing
- Sustainability Center Freiburg (LZN)



Patente

Patents

Patenterteilungen

Patents granted

A. Hülsmann, B. Kleiner, A. Röhrle, O. Röhrle

Sichtsystem

10 2015 102 557 A1, 02.02.2023; Deutschland

R. Amirpour

Semiconductor component, use of a semiconductor component

US 11,611,003 B2, 21.03.2023, USA

V. Lebedev

Electroacoustic resonator and method for manufacturing the same

US 11,711,066 B2, 25.07.2023, USA

R. Amirpour

Halbleiterbauelement, Verwendung eines Halbleiterbauelements

10 2017 125 162 B4, 28.12.2023; Deutschland

Patentanmeldungen

Patent applications

F. Hahl, J. Jeske, L. Lindner, F. P. Schall

Magnetfeldsensor und Verfahren zur Erfassung eines Magnetfeldes

10 2023 208 946.7, 14.09.2023, Deutschland

Ch. Giese

Verfahren zur Implantation

10 2023 206 269.0, 03.07.2023, Deutschland

P. Döring, R. Reiner

Hochleistungsbauelement auf Basis von III-Nitrid-Verbindungs-halbleitern, Zwischenerzeugnis und Verfahren zur Herstellung eines Hochleistungsbauelementes

10 2023 109 595.1, 17.04.2023, Deutschland

R. Driad, A. Bächle

Quantenkaskadenlaser und Verfahren zu seiner Herstellung

10 2023 106 427.4, 15.03.2023, Deutschland

Impressum

Publication details

**Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF**
**Fraunhofer Institute for
Applied Solid State Physics 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
Institute Management
Dr. Patricie Merkert
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, Dr. Armin Müller, Moritz Ringwald

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 Management.

© Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF,
Freiburg 2024

Bildnachweise
Picture credits

© ESA-Mlabspace, 24–25;
© Universität Stuttgart, 26;
© MPI für Plasmaphysik/Matthias Otte/Interpolation: MPG,
Fraunhofer ILT, 45 (top to bottom);
© IBM Research, 58;
© pwmotion – stock.adobe.com (AI generated) |
Fraunhofer IAF, 67;
© Ludmilla Parsyak | Fraunhofer IAO, 70–71;
© LIAG-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), 75 (left);
© Fraunhofer-Gesellschaft, 98–99;
© Fraunhofer-Gesellschaft, 100;
© Ludmilla Parsyak | Fraunhofer IAO, 104 (bottom);
© Stefano Leone, Ludmilla Parsyak | Fraunhofer IAO, 109
(top to bottom);
© Kareem Mansour, VDI Technologiezentrum GmbH, 112
(top to bottom);
© ICNS-14, 113 (both);
© Fraunhofer-Gesellschaft, 116;
© Stefan Mönch, 125;
© xyz+ – stock.adobe.com, 126;

All others © Fraunhofer IAF,
Dr. Violetta Budak, Moritz Ringwald

Newsletter und digitaler Jahresbericht

Newsletter and digital annual report

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

Digitaler Jahresbericht / Digital annual report



Der Jahresbericht 2023/24 als E-Paper oder PDF-Datei



The annual report 2023/24 as e-paper or PDF file

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.

