



# Transfer for Industry

---

Jahresbericht – Annual Report 2024 / 2025

*Als Institut für angewandte Forschung mit einer breiten Themenvielfalt und starken inhaltlichen Synergien in der Mikro-, Nano- und Optoelektronik sowie den Quantentechnologien ist der Transfer innovativer Technologien in praktische Anwendungen in unseren F&E-Bestrebungen fest verankert. Darum sind wir stolz darauf, dass unsere Hardwarekomponenten in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz kommen und so einen Beitrag zu einer modernen, nachhaltigen und sicheren Zukunft leisten – sei es in Form von leistungsstarken Sende- und Empfangssystemen für Bodenstationen und Satelliten oder modernster 3D-Heterointegration für Chiplets, die den Elektronikmarkt der Zukunft prägen werden. Die Anwendungsfelder unserer Technologien sind so bunt und vielfältig wie die kreativen Köpfe, die hinter unseren Transfererfolgen stehen.*

*As an institute for applied research with a broad range of topics and strong synergies in micro-, nano- and optoelectronics as well as quantum technologies, the transfer of innovative technologies into practical applications forms an integral part of our R&D efforts. We are proud that our hardware components are used in a wide range of applications, contributing to a modern, sustainable and secure future — whether in the form of high-performance transmission and receiver systems for ground stations and satellites, or the latest 3D heterointegration for chiplets that will shape the electronics market of the future. The fields of application for our technologies are as diverse and manifold as the creative minds behind our transfer successes.*

# Transfer for Industry



**Jahresbericht – Annual Report 2024 / 2025**

# Vorwort

---

## Preface

Liebe Leserinnen und Leser,

unsere Rein- und Technologieräume sind das pulsierende Herzstück unserer Forschung. Hier treffen einzigartige Infrastruktur und das herausragende Know-how unserer Mitarbeitenden aufeinander, um fortschrittlichste III-V-Halbleiter- und Quantentechnologien für die Innovationen von morgen zu realisieren. In Zeiten des Wandels und der Neuausrichtung geopolitischer Strukturen gehört die technologische Souveränität zu den zentralen Herausforderungen unserer Zeit – gerade jetzt ist es entscheidend, Schlüsseltechnologien für Europa zu entwickeln, zu skalieren und industriell umzusetzen. Als führendes Forschungsinstitut im Bereich III-V-Halbleiter und diamantbasierter Quantentechnologien tragen wir mit herausragender Forschung und exzellentem Technologietransfer maßgeblich zur Stärkung der europäischen Innovationskraft bei. Der Transfer ist nicht nur ein fester Bestandteil der Fraunhofer-DNA, sondern auch das Fundament unserer Arbeit.

Seit einem Jahr führen wir das Fraunhofer IAF als Doppelspitze und dieses Jahr war geprägt von bedeutenden Fortschritten, neuen Initiativen und strukturellen Entwicklungen – ein besonderes Beispiel ist der Start der APECS-Pilotlinie. Im Rahmen des »EU Chips Acts« arbeiten darin die kooperierenden Institute der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) eng mit weiteren europäischen Partnern zusammen, um resiliente technologische Strukturen aufzubauen und die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Halbleiterindustrie zu stärken. Unser Dank für die Förderung gilt der EU, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Land Baden-Württemberg. Für das Fraunhofer IAF geht mit der Arbeit an APECS der Ausbau unserer Infrastruktur und eine Umstellung der Fertigung auf größere Wafer einher – Maßnahmen, die den Technologietransfer in die Industrie erleichtern und die europäische Halbleiterproduktion nachhaltig stärken. Auch im Bereich Quantentechnologien setzen wir mit den Projekten Qu-Test und Qu-Pilot sowie dem Aufbau einer Lieferkette für Diamantwafer neue Maßstäbe zur Förderung der europäischen Souveränität.

Dear Readers,

Our clean rooms and labs are the beating heart of our research. This is where unique infrastructure and the outstanding expertise of our employees come together to create the most advanced III-V semiconductor and quantum technologies for the innovations of tomorrow. In times of change and geopolitical realignment, technological sovereignty is one of the central challenges of our time — now more than ever, it is crucial to develop, scale up and implement key technologies for Europe on an industrial scale. As a leading research institute in the field of III-V semiconductors and diamond-based quantum technologies, we contribute significantly to strengthening Europe's innovative power with outstanding research and excellent technology transfer. Transfer is not only an integral part of the Fraunhofer DNA, but also the foundation of our work.

Starting last year, we have been leading Fraunhofer IAF as a team and this year has been marked by significant progress, new initiatives and structural developments — a great example is the launch of the APECS pilot line. Within the framework of the EU Chips Act, the cooperating institutes of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) are working closely with other European partners to build resilient technological structures and strengthen the competitiveness of the European semiconductor industry. We would like to thank the EU, the German Federal Ministry of Education and Research and the State of Baden-Württemberg, Germany, for their funding. For Fraunhofer IAF, the work on APECS goes hand in hand with the expansion of our infrastructure and a change of production to larger wafers — measures that facilitate technology transfer to industry and sustainably strengthen European semiconductor production. In the field of quantum technologies, we are also setting new standards for the promotion of European sovereignty with the projects Qu-Test and Qu-Pilot and the development of a supply chain for diamond wafers.



In diesem Jahresbericht präsentieren wir Ihnen einige unserer spannendsten Projektergebnisse und -fortschritte, die in intensiver Zusammenarbeit mit unseren Partnern aus der Wissenschaft und Industrie entstanden sind. Zudem stellen wir Ihnen unsere Applikationslabore vor, in denen wir Fachleuten und Interessierten einen Zugang zu modernsten Technologien aus den Bereichen Quantensensorik, Quantencomputing und Infrarotlaser-Spektroskopie ermöglichen. Die Applikationslabore bieten der Industrie eine einzigartige Gelegenheit, neueste Technologien zu testen und für eigene Anforderungen zu evaluieren.

Als Forschungseinrichtung spielt für uns auch der Wissenstransfer eine zentrale Rolle: Deshalb freuen wir uns, die Erfahrungen und Erkenntnisse der Menschen zu teilen, die am Fraunhofer IAF geforscht haben. Sie haben das bei uns erlangte Wissen in die Industrie beziehungsweise Wissenschaft mitgenommen, genutzt und weiterentwickelt.

Dieser Jahresbericht ist gewohnt und neu zugleich: In bewährter Weise präsentiert er Ihnen ein Jahr voller Highlights und Fortschritte des Fraunhofer IAF; als Schritt in die digitale Zukunft ist er zudem bereits mit vielen digitalen Elementen angereichert. Entdecken Sie Videos, Videointerviews sowie den virtuellen Zugang zu unserem Applikationslabor für Quantensensorik und erfahren Sie mehr über unsere Kompetenzen, Entwicklungen und die engagierten Menschen, die tagtäglich daran arbeiten, unsere Forschung in Anwendungen zu überführen und ihren Beitrag für eine fortschrittliche, nachhaltige und resiliente Gesellschaft zu leisten. Wir freuen uns auf den Transfer in die Zukunft!

Mit herzlichen Grüßen

Dr. Patricie Merkert

Prof. Dr. Rüdiger Quay

In this annual report, we present some of our most exciting project results and advances, which have been achieved through intensive collaboration with our partners in science and industry. We also feature our application laboratories, where we offer experts and interested parties access to state-of-the-art technologies in the fields of quantum sensing, quantum computing and infrared laser spectroscopy. The application laboratories offer industry a unique opportunity to test the latest technologies and evaluate them for their own requirements.

As a research institute, knowledge transfer plays a central role for us: That is why we are pleased to share the experiences and insights of the people who have conducted research at Fraunhofer IAF. They have taken the knowledge they have acquired with us into industry and science, where they have used and further developed it.

This annual report is both familiar and new: in the tried and tested way, it presents a year full of highlights and progress at Fraunhofer IAF; as a step into the digital future, it is also enriched with many digital elements. Discover videos, video interviews and virtual access to our application lab for quantum sensing, and learn more about our expertise, developments and the dedicated people who work day in, day out to transfer our research into applications and make their contribution to a progressive, sustainable and resilient society. We look forward to the transfer into the future!

Kind regards,

# Inhaltsverzeichnis

## Contents

<b>Technologische Souveränität   Technological Sovereignty</b> .....	<b>6</b>
Start der APECS-Pilotlinie für europäische Chiplet-Innovationen	
Launch of the APECS Pilot Line for European Chiplet Innovations. ....	8
Interview: »Europa als unverzichtbarer Partner in der globalen Technologiebranche«	
Interview: "Europe as an indispensable partner in the global technology industry" .....	14
Innovationsschub für Quantentechnologien Made in Europe	
Driving Innovation in Quantum Technologies Made in Europe .....	18
Diamantwafer für industrielle Quantentechnologien	
Diamond Wafers for Industrial Quantum Technologies. ....	22
Europäische Wertschöpfung für GaN-Messlösungen im D-Band	
European Added Value for GaN Measurement Solutions in the D Band .....	24
<b>Transfer durch Applikationslabore   Transfer Through Application Laboratories</b> .....	<b>26</b>
Applikationslabor für Quantensensorik	
Application Laboratory for Quantum Sensing. ....	28
Interaktiv: Das virtuelle Applikationslabor für Quantensensorik	
Interactive: the Virtual Application Laboratory for Quantum Sensing .....	32
Applikationslabor für Quantencomputing	
Application Laboratory for Quantum Computing .....	34
Applikationslabor für IR-Laser-Spektroskopie	
Application Laboratory for Infrared Laser Spectroscopy .....	38
<b>Transfer durch Köpfe   Transfer Through People</b> .....	<b>42</b>
Interview: »Von der internationalen Expertise kann jedes Industrieunternehmen nur profitieren.«	
Interview: "Industrial companies can only benefit from such international expertise." .....	44
Wissenstransfer durch ehemalige Kolleginnen und Kollegen	
Knowledge Transfer Through Former Colleagues .....	46
Interview: »An meiner Arbeit begeistert mich, wie viel ich tun kann.«	
Interview: "What I love about my work is how much I get to do." .....	52
Interview: »Es motiviert mich sehr, zu sehen, wie Forschung den Weg in die Praxis findet.«	
Interview: "It really motivates me to see how research finds its way into application." .....	54
Abschlussarbeiten   Theses .....	56
Interview: »Die Flexibilität in der Materialentwicklung ist wirklich außergewöhnlich.«	
Interview: "The flexibility in material development is truly exceptional." .....	57
Zukunft gestalten: Berufliche Chancen am Fraunhofer IAF	
Shaping the Future: Career Opportunities at Fraunhofer IAF. ....	58

Schauen Sie sich den Trailer  
zum Jahresbericht an:  
*Watch the trailer to  
our annual report:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-trailer](https://s.fhg.de/iaf-jb24-trailer)



<b>Transfer durch Projekte   Transfer Through Projects</b> .....	<b>62</b>
Rauscharme Verstärker für Satelliten der ESA Low-Noise Amplifiers for ESA Satellites .....	64
Pionierleistung in der Chipintegration für 6G-Kommunikationssysteme Pioneering Achievement in Chip Integration for 6G Communication Systems .....	70
Thermografische Verkehrsüberwachung mit bispektraler Kamera Thermographic Traffic Monitoring with Bispectral Camera .....	74
Tatortuntersuchung @ Fraunhofer IAF – Das EU-Projekt RISEN Crime Scene Investigation @ Fraunhofer IAF — EU Project RISEN .....	78
Internationales Jahr der Quantenwissenschaft und -technologie International Year of Quantum Science and Technology .....	80
Maßstäbe setzen – Wege zu skalierbaren Festkörper-Quantencomputern Setting the Bar — Pathways to Scalable Solid-State Quantum Computers .....	82
DAS Quantencomputing-Ökosystem Baden-Württembergs THE Quantum Computing Ecosystem in Baden-Württemberg .....	88
Revolutionäre Präzision: Projekt AMADEUS und die Zukunft der Quantensensorik Revolutionizing Precision: Project AMADEUS and the Future of Quantum Sensing .....	90
Fusionsenergie: Energiequelle der Zukunft Fusion energy: the Energy Source of the Future .....	94
<b>Höhepunkte 2024   Highlights 2024</b> .....	<b>100</b>
Highlight-Veranstaltungen 2024   Highlight Events 2024 .....	102
Pionierforschung am Fraunhofer IAF 2024   Pioneering Research at Fraunhofer IAF 2024 .....	106
Auszeichnungen 2024   Awards 2024 .....	110
<b>Wissenswertes   Things to know</b> .....	<b>112</b>
Das Institut in Zahlen   The Institute in Figures .....	114
Organisationsstruktur   Organizational Structure .....	116
Kuratorium   Advisory Board .....	117
In Memoriam .....	118
Ausbildung und Lehre   Education and Teaching .....	120
Patente   Patents .....	121
Impressum   Publication Details .....	122

# Technologische Souveränität

---

## Technological Sovereignty

*Mit unserer Forschung im Bereich III-V-Halbleiter und diamantbasierte Quantentechnologien und unserem Fokus auf Technologietransfer tragen wir maßgeblich zur Stärkung der technologischen Souveränität von Europa bei.*

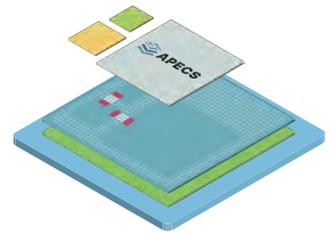
*With our research in the field of III-V semiconductors and diamond-based quantum technologies and our focus on technology transfer, we are making a significant contribution to strengthening Europe's technological sovereignty.*



# Start der APECS-Pilotlinie für europäische Chiplet-Innovationen

## Launch of the APECS Pilot Line for European Chiplet Innovations

Ende 2024 ist mit der Pilotlinie für »Advanced Packaging and Heterogeneous Integration for Electronic Components and Systems« (kurz APECS) ein wichtiger Baustein des EU Chips Act gestartet. APECS zielt darauf ab, Chiplet-Innovationen voranzutreiben und die Forschungs- und Fertigungskapazitäten für Halbleiter in Europa zu erhöhen. Die in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) kooperierenden Institute arbeiten eng mit weiteren europäischen Partnern am Aufbau der APECS-Pilotlinie und leisten damit maßgeblich einen Beitrag, Europas technologische Resilienz zu stärken und somit auch die globale Wettbewerbsfähigkeit in der Halbleiterindustrie zu steigern.



At the end of 2024, the pilot line for *Advanced Packaging and Heterogeneous Integration for Electronic Components and Systems* (APECS for short) was launched. It is an important building block of the EU Chips Act. APECS aims to advance chiplet innovations and increase research and manufacturing capacities for semiconductors in Europe. The institutes cooperating in the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) are working closely with other European partners on the development of the APECS pilot line, thus making a significant contribution to strengthening Europe's technological resilience and increasing its global competitiveness in the semiconductor industry.

Europäische Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, dass der Zugang zu fortschrittlichen Technologien aufgrund fehlender Ressourcen in Europa begrenzt ist. Die Europäische Kommission investiert im Rahmen des EU Chips Acts erhebliche Mittel in die Stärkung von Halbleitertechnologien und -anwendungen in der EU. Damit sollen die technologische Resilienz Europas erhöht, Liefer- und Wertschöpfungsketten gesichert sowie Innovationen in Schlüsselbranchen, wie Künstliche Intelligenz, Mobilität, Produktion, Informations- und Kommunikationstechnologien, vertrauenswürdige und ökologisch nachhaltige Elektronik sowie neuromorphes- und Quantencomputing vorangetrieben werden.

European companies today face the challenge that access to advanced technologies is limited due to a lack of resources in Europe. The European Commission is investing significant resources in strengthening semiconductor technologies and applications in the EU under the EU Chips Act. The aim is to increase Europe's technological resilience, secure supply and value chains, and drive innovation in key sectors such as artificial intelligence, mobility, manufacturing, information and communication technologies, trustworthy, environmentally sustainable electronics as well as neuromorphic and quantum computing.



# APECS

European Chiplet Innovation

Die APECS-Pilotlinie setzt hier beim skalierbaren Industrietransfer neu entwickelter Innovationen im Bereich Heterointegration, insbesondere beim Einsatz neuer Chiplet-Technologien an und schlägt so die Brücke zur anwendungsorientierten Forschung. APECS geht über herkömmliche »System-in-Package-Methoden« (SiP) hinaus und zielt darauf ab, robuste und vertrauenswürdige heterogene Systeme zu liefern, die die Innovationsfähigkeit der europäischen Halbleiterindustrie erheblich steigern.

In einem starken europäischen Konsortium bündelt APECS die technologischen Kompetenzen, Infrastrukturen und das Know-how von insgesamt zehn Partnern aus acht europäischen Ländern: Deutschland (Fraunhofer-Gesellschaft als Koordinator, FBH, IHP), Österreich (TU Graz), Finnland (VTT), Belgien (imec), Frankreich (CEA-Leti), Griechenland (FORTH), Spanien (IMB-CNM, CSIC) und Portugal (INL). Die APECS Pilotlinie wird von der Fraunhofer-Gesellschaft koordiniert und von der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) implementiert.

#### **Chiplet-Innovationen für skalierbaren Industrietransfer**

Die steigenden Performance- und Kosten-Anforderungen an elektronische Komponenten führen dazu, dass konventionelle Halbleiter-Chips zunehmend an ihre technologischen Grenzen stoßen. Die Prozessierung großer integrierter Schaltungen, wie sie für umfassende Funktionalitäten erforderlich sind, verursacht hohe Kosten, da einzelne Defekte sich extrem stark auf die Ausbeute eines einzelnen Wafers auswirken. Zudem sorgen chemische und mechanische Unverträglichkeiten verschiedener Materialien und Schichtstrukturen dafür, dass nur in begrenztem Umfang unterschiedliche Technologien auf einem Wafer realisiert werden können.

Eine neuartige Lösung, um die Systemfunktionalität effizient zu steigern, besteht in der Heterointegration: Dabei werden einzelne kleine Komponenten (sogenannte Chiplets) auf einem gemeinsamen Substrat (Interposer) elektrisch oder optisch verbunden. Durch den Chiplet-Ansatz können die einzelnen Technologien jeweils die für sie optimale Epitaxie und Prozessierung durchlaufen und bilden im Anschluss durch verlustarme Integration ein hochfunktionales, flexibles und effizientes System auf Chipgröße. Diese Modularisierung erhöht außerdem die Skalierbarkeit, vereinfacht das Chipdesign und verkürzt die Zeit bis zur Markteinführung von Innovationen.

Chiplets bieten signifikante Vorteile bei der Entwicklung und Fertigung von besonders performanten elektronischen und optischen Komponenten, da sie kompakte und hocheffiziente multifunktionale Systeme ermöglichen. Die Kombination verschiedener Funktionen wie Ansteuerungslogik und Verstärker auf einem Träger (heterogene Integration) verbessert sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Energieeffizienz eines Systems.

The APECS pilot line addresses this issue by focusing on the scalable industrial transfer of newly developed innovations in the field of heterointegration, particularly the use of new chiplet technologies, and thus builds a bridge to application-oriented research. APECS goes beyond conventional system-in-package (SiP) methodologies and aims to deliver robust and trustworthy heterogeneous systems that significantly increase the innovative capacity of the European semiconductor industry.

APECS combines the technological expertise, infrastructure and know-how of a strong European consortium of ten partners from eight European countries: Germany (Fraunhofer-Gesellschaft as coordinator, FBH, IHP), Austria (TU Graz), Finland (VTT), Belgium (imec), France (CEA-Leti), Greece (FORTH), Spain (IMB-CNM, CSIC) and Portugal (INL). The APECS pilot line is coordinated by the Fraunhofer-Gesellschaft and implemented by the Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

#### **Chiplet innovations for scalable industrial transfer**

The increasing performance and cost requirements for electronic components are increasingly pushing conventional semiconductor chips to their technological limits. The processing of large integrated circuits, as required for comprehensive functionalities, causes high costs because individual defects have an extremely strong effect on the yield of a single wafer. Furthermore, chemical and mechanical incompatibilities of various materials and layer structures limit the number of different technologies that can be realized on a single wafer.

Heterointegration is a novel solution for efficiently increasing system functionality. In this approach, individual small components (so-called chiplets) are electrically or optically connected on a common substrate (interposer). The chiplet approach allows the individual technologies to undergo the optimal epitaxy and processing for each of them, and then, through low-loss integration, they form a highly functional, flexible and efficient system at chip size. This modularization also increases scalability, simplifies chip design and shortens the time to market for innovations.

Chiplets offer significant advantages in the development and production of high-performance electronic and optical components, as they enable compact and highly efficient multifunctional systems. Combining different functions such as control logic and amplifiers on a single substrate (heterogeneous integration) improves both the performance and the energy efficiency of a system.

### **One-Stop-Shop für Technologien**

Die APECS-Pilotlinie zielt darauf ab, neue Funktionalitäten durch die sogenannte »System Technology Co-Optimization« (STCO) zu aktivieren und Integrationstechnologien zu vereinheitlichen. Dies wird es Unternehmen ermöglichen, fortschrittliche Produkte auch in kleinen Stückzahlen zu wettbewerbsfähigen Kosten zu entwickeln. Durch die Bereitstellung einer Vielzahl von Technologien in einem One-Stop-Shop wird APECS zukünftig Europas führender Hub für Advanced Packaging und Heterointegration und nimmt damit eine entscheidende Schlüsselrolle für die europäische Mikroelektronik ein.

### **Fraunhofer IAF entwickelt Chiplets für Hochfrequenzanwendungen**

Als Teil der FMD entwickelt das Fraunhofer IAF für die APECS-Pilotlinie neuartige Chiplets auf Basis der hybriden Halbleitermaterialsysteme InGaAs-auf-Si (Indiumgalliumarsenid-auf-Silizium) und GaN-auf-SiC (Galliumnitrid-auf-Siliziumcarbid). Diese Technologien eignen sich aufgrund herausragender Werte in zentralen Parametern wie Rauschen, Ausgangsleistung und Effizienz besonders gut für Hochfrequenzanwendungen und versprechen Innovationen in der Messtechnik, Kommunikation, Radartechnik und Sensorik. Ein weiterer Schwerpunkt des Fraunhofer IAF ist die Entwicklung von Microbump-Interposern, die die Verbindung zwischen den Chip-Oberflächen verbessern und eine kompaktere und leistungsfähigere Integration ermöglichen, was insbesondere in hochkomplexen Systemen von großem Vorteil ist.

### **Erweiterung der Fertigungskapazitäten für 6-Zoll-Wafer**

Um den Transfer in die Industrie zu erleichtern und die Qualität der Fertigung zu verbessern, werden für die Entwicklung und Fertigung von Chiplets und Interposern die Produktionskapazitäten am Fraunhofer IAF auf 6-Zoll-Wafer erweitert. Für die Industrie bietet die Fertigung auf größeren Wafern Kosteneinsparungen. Darüber hinaus führt diese Maßnahme zu besseren Prozessierungsergebnissen, da die neuen Produktionsanlagen qualitativ bessere Ergebnisse liefern, was sowohl die Produktivität erhöht als auch die Qualität der Bauelemente steigert.

### **One-stop shop for technologies**

The APECS pilot line aims to activate new functionalities through so-called "System Technology Co-Optimization" (STCO) and to standardize integration technologies. This will enable companies to develop advanced products even in small quantities at competitive costs. By providing a wide range of technologies in a one-stop shop, APECS will become Europe's leading hub for advanced packaging and heterointegration, thus playing a key role in European microelectronics.

### **Fraunhofer IAF develops chiplets for high-frequency applications**

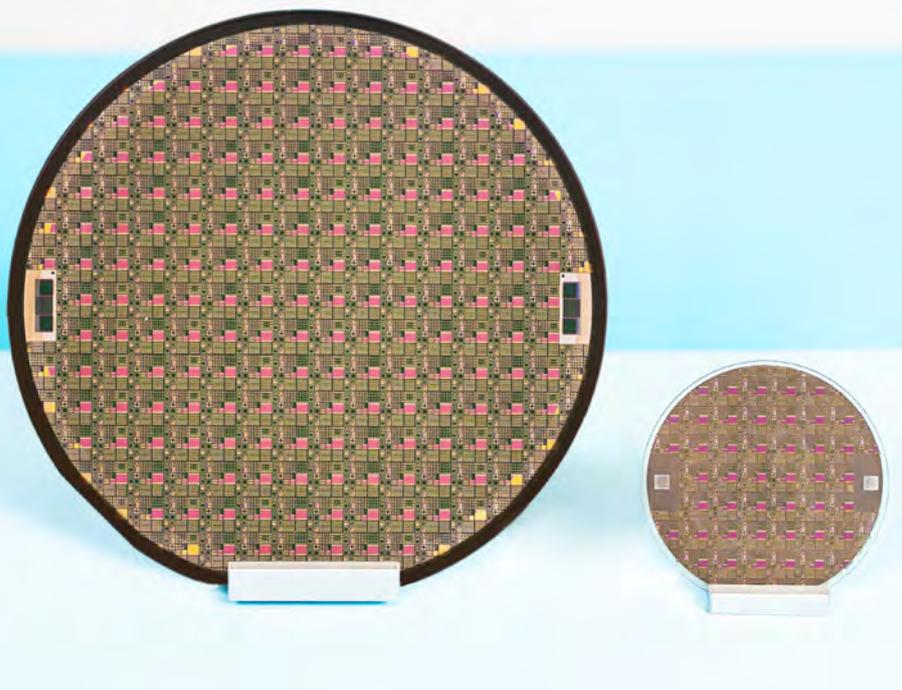
As part of the FMD, Fraunhofer IAF is developing novel chiplets based on the hybrid semiconductor material systems InGaAs-on-Si (indium gallium arsenide on silicon) and GaN-on-SiC (gallium nitride on silicon carbide) for the APECS pilot line. These technologies are particularly suitable for high-frequency applications due to their outstanding values in key parameters such as noise, output power and efficiency, and promise innovations in measurement technology, communication, radar technology and sensor technology. Another focus of Fraunhofer IAF is the development of microbump interposers, which improve the connection between the chip surfaces and enable more compact and powerful integration, which is particularly advantageous in highly complex systems.

### **Expansion of production capabilities to include 6-inch wafers**

In order to facilitate the transfer to industry and to improve the quality of the production, Fraunhofer IAF expands its production capabilities to include 6-inch wafers for developing and manufacturing chiplets and interposers. For industry, production on larger wafers offers cost savings. Furthermore, this measure leads to better processing results, since the new production facilities deliver higher-quality results, which both increases productivity and improves the quality of the components.

APECS wird durch Chips Joint Undertaking und durch nationale Förderungen von Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Österreich, Portugal und Spanien im Rahmen der »Chips for Europe«-Initiative kofinanziert. Die Gesamtfinanzierung beläuft sich auf 730 Millionen Euro über 4,5 Jahre.

*APECS is co-financed by the Chips Joint Undertaking and national funding from Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Greece, Portugal and Spain as part of the Chips for Europe initiative. The total funding amounts to 730 million euros over 4.5 years.*



*In der industriellen Fertigung bieten 6-Zoll-Wafer (links) sowohl Kosteneinsparungen als auch eine Erhöhung der Produktivität und Qualität der Bauelemente im Vergleich zu kleineren Größen wie einem 2-Zoll-Wafer (rechts). In industrial production, 6-inch wafers (left) offer both cost savings and an increase in the productivity and quality of the components as compared to a smaller size like the 2-inch wafer (right)*

### **Neue Prozesse und Anlagen**

Im Rahmen von APECS führt das Fraunhofer IAF im Bereich Materialwachstum und Prozesstechnologie umfassende technologische wie infrastrukturelle Maßnahmen durch. Im Reinraum des Instituts werden neue Anlagen für die Bereiche Epitaxie, Prozesstechnologie und Messtechnik beschafft und bis Ende 2027 in Betrieb genommen.

Zudem werden bestehende Prozesse für die Chiplet- und Interposer-Fertigung stark erweitert und die Integrationsmethoden grundlegend weiterentwickelt. Ein wichtiger Schritt ist beispielsweise die Einführung der chemo-mechanischen Politur, die speziell für die Heterointegration mit Silizium (Si) entwickelt wurde. Diese Methode ermöglicht eine präzise und saubere Verbindung von unterschiedlichen Materialschichten, was die Leistungsfähigkeit von Systemen steigert und neue Möglichkeiten für die Integration bietet. Eine weitere Maßnahme ist die Erforschung der Möglichkeiten zur Einführung weiterer Verdrahtungsebenen, die auf geringe Verluste optimiert sind. Durch diese zusätzlichen Ebenen wird die Signalintegrität erhöht und die Energieeffizienz verbessert.

Ein entscheidender Schritt in Richtung Miniaturisierung und Leistungssteigerung ist die Fertigung von ultradünnen Chiplets (mit einer Dicke von nur wenigen Mikrometern), die eine höhere Integration von Funktionen auf kleinerem Raum erlauben und damit die Entwicklung von hochleistungsfähigen kompakten Systemen vorantreiben.

Komplementär zu den technologischen Prozesslinien wird das Fraunhofer IAF PDKs (Process Design Kits) entwickeln, um externen Partnern den Zugang zu den heterointegrierten InGaAs-auf-Si- und GaN-auf-SiC-Chiplet-Linien zu ermöglichen. Das Institut hat umfangreiche Erfahrung in der Überführung von Forschungsergebnissen in marktreife Produkte und spielt eine Schlüsselrolle in der praktischen Implementierung von hochleistungsfähigen Systemen.

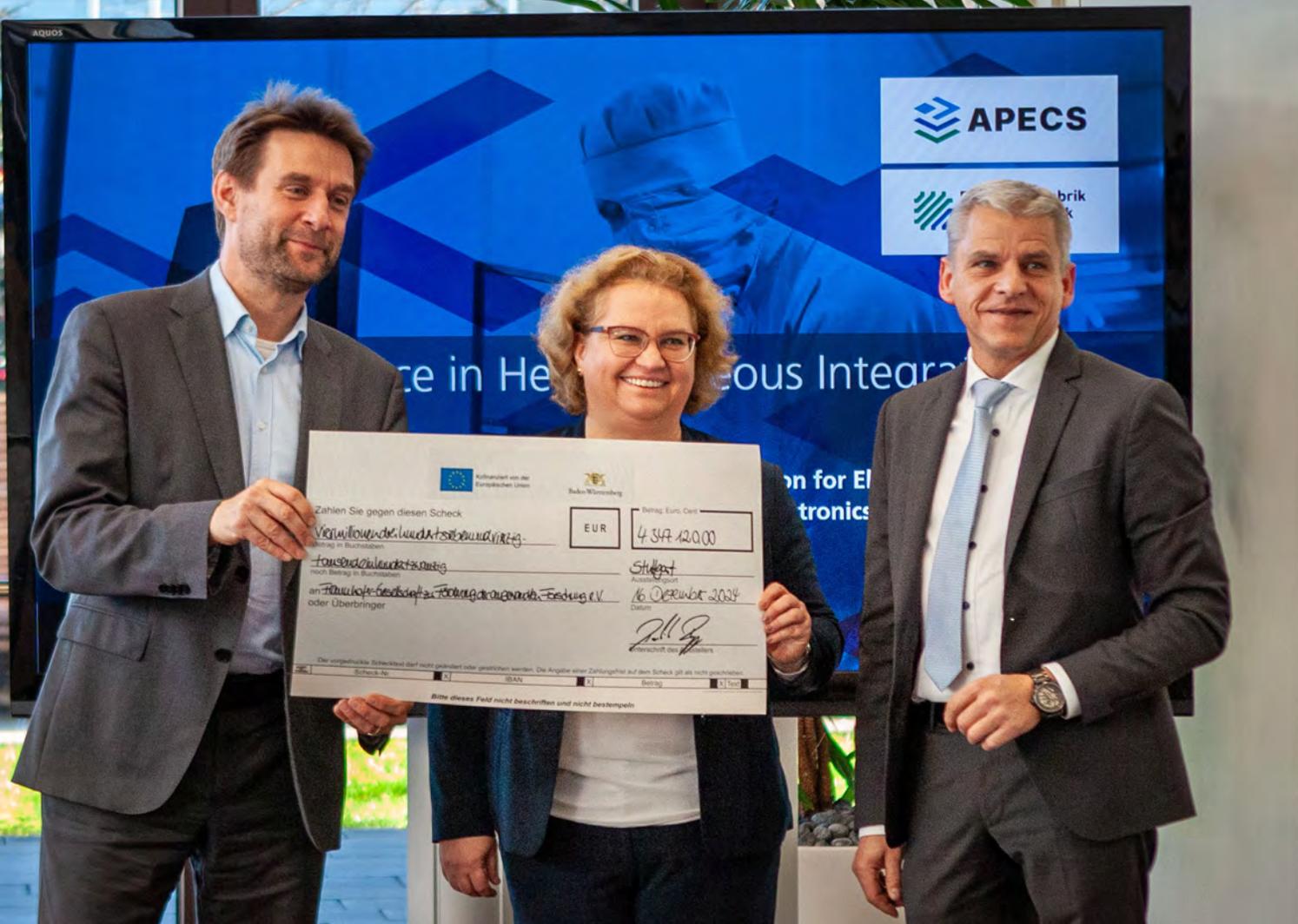
### **New processes and facilities**

Within APECS, Fraunhofer IAF is implementing comprehensive technological and infrastructural measures in the area of material growth and process technology. New equipment for epitaxy, process technology and measurement technology is being procured for the institute's clean room and will be put into operation by the end of 2027.

In addition, existing processes for chiplet and interposer production will be significantly expanded and the integration methods will be fundamentally further developed. One important step, for example, is the introduction of chemo-mechanical polishing, which was specially developed for heterointegration with silicon (Si). This method enables precise and clean connection of different material layers, which increases the performance of systems and offers new possibilities for integration. Another measure is research into the possibilities for introducing further wiring layers that are optimized for low losses. These additional layers increase signal integrity and improve energy efficiency.

A decisive step towards miniaturization and increased performance is the production of ultrathin chiplets (only a few micrometers thick), which allow a higher integration of functions in a smaller space and thus promote the development of compact high-performance systems.

Complementary to the technological process lines, Fraunhofer IAF will develop Process Design Kits (PDKs) to enable external partners to access the heterointegrated InGaAs-on-Si and GaN-on-SiC chiplet lines. The institute has extensive experience in transferring research results into marketable products and plays a key role in the practical implementation of high-performance systems.



Staatssekretär Dr. Patrick Rapp (r.), Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, übergab der Institutsleitung des Fraunhofer IAF, Dr. Patricie Merkert (m.) und Prof. Dr. Rüdiger Quay (l.), den symbolischen Scheck über die Fördersumme des Landes Baden-Württemberg in Höhe von 4,35 Millionen Euro

State Secretary Dr. Patrick Rapp (r.), Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism Baden-Württemberg, handed over the symbolic check for the funding of the state of Baden-Württemberg in the amount of 4.35 million euros to the institute management of Fraunhofer IAF, Dr. Patricie Merkert (m.) and Prof. Dr. Rüdiger Quay (l.)

Für die geplanten Beschaffungsmaßnahmen und Entwicklungsarbeiten erhält das Fraunhofer IAF über die Laufzeit des Vorhabens bis 2029 insgesamt eine Förderung von 28,75 Millionen Euro. Diese stellen das Chips Joint Undertaking der Europäischen Kommission (15,7 Millionen Euro), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (8,7 Mio. Euro) sowie das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (4,35 Millionen Euro) gemeinsam bereit.

For the planned procurement measures and development work, Fraunhofer IAF will receive a total of 28.75 million euros in funding over the duration of the project until 2029. This funding is provided jointly by the European Commission's Chips Joint Undertaking (15.7 million euros), the German Federal Ministry of Education and Research (8.7 million euros) and the Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism Baden-Württemberg (4.35 million euros).

# »Europa als unverzichtbarer Partner in der globalen Technologiebranche«

“Europe as an indispensable partner in the global technology industry”

Im Interview spricht Dr. Stephan Guttowski, Geschäftsstellenleiter der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD), über die Ziele, Herausforderungen sowie technischen und politischen Hintergründe der APECS-Pilotlinie.

In an interview, Dr. Stephan Guttowski, Managing Director of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD), talks about the goals, challenges, as well as technical and political background of the APECS pilot line.

## **Worin bestehen aktuell und in absehbarer Zukunft die größten Herausforderungen für die europäische Halbleiterindustrie?**

Guttowski — Europa verfügt über ein dynamisches Ökosystem aus führenden Unternehmen, kleinen und mittleren Unternehmen sowie Start-ups, deren Wettbewerbsvorteil auf fortschrittlichen Halbleiterlösungen beruht. Diesen Unternehmen fehlt aber oft der Zugang zu fortschrittlichen Technologien mit den zugehörigen Design- und Testkompetenzen, da die Ressourcen in Europa begrenzt sind. Unsere europäische Halbleiterindustrie steht also vor einigen großen Herausforderungen in der kommenden Zeit. Eine der drängendsten ist die starke Abhängigkeit von globalen Liefer- und Wertschöpfungsketten, insbesondere aus Asien und den USA, was die Resilienz der gesamten Halbleiterbranche extrem gefährdet. Zudem steigt auch der weltweite Wettbewerb um Technologieführerschaft, während gleichzeitig aber der stetig wachsende Fachkräftemangel in Europa die Innovationskraft hemmt. Hohe Investitionskosten für moderne Fertigungstechnologien und -anlagen sowie der wachsende Bedarf an energieeffizienten und leistungsstarken Chips stellen weitere Hürden dar.

## **What are the biggest challenges for the European semiconductor industry at present and in the near future?**

Guttowski — Europe has a vibrant ecosystem of leading companies, small and medium-sized enterprises, and start-ups that derive their competitive advantage from advanced semiconductor solutions. However, these companies often lack access to advanced technologies with the associated design and testing expertise, as resources in Europe are limited. Our European semiconductor industry is therefore facing some major challenges in the near future. One of the most pressing is the strong dependence on global supply and value chains, particularly from Asia and the US, which puts the resilience of the entire semiconductor industry at extreme risk. In addition, global competition for technology leadership is also increasing, while at the same time, the steadily growing shortage of skilled workers in Europe is hindering innovation. High investment costs for modern manufacturing technologies and equipment, as well as the growing demand for energy-efficient and high-performance chips, represent further hurdles.

*Dr. Stephan Guttowski ist seit 2021 Leiter der gemeinsamen Geschäftsstelle der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) und des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik. Dr. Stephan Guttowski has been Head of the Joint Office of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) and the Fraunhofer Group for Microelectronics since 2021*



### **Wie können Forschung und Entwicklung der Industrie helfen, diese Herausforderungen zu meistern?**

Guttowski — Forschung und Entwicklung (F&E) spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung der aktuellen und zukünftigen Herausforderungen des europäischen Halbleitermarkts. Durch die Entwicklung neuer Materialien, energieeffizienter Chipdesigns und innovativer Fertigungsprozesse können Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und technologische Resilienz ausbauen. Fortschritte in der Mikroelektronik ermöglichen leistungsfähigere und kosteneffizientere Lösungen und Innovationen in Schlüsselbranchen wie Künstliche Intelligenz, Mobilität, Produktion, Informations- und Kommunikationstechnologien, vertrauenswürdige und ökologisch nachhaltige Elektronik sowie neuromorphes- und Quantencomputing. Zudem können gezielte F&E-Initiativen den Technologietransfer beschleunigen und die Lücke zwischen wissenschaftlicher Arbeit und industrieller Anwendung schließen.

### **How can research and development help industry meet these challenges?**

Guttowski — Research and development (R&D) play a key role in addressing the current and future challenges of the European semiconductor market. By developing new materials, energy-efficient chip designs and innovative manufacturing processes, companies can strengthen their competitiveness and expand their technological resilience. Advances in microelectronics enable more powerful and cost-efficient solutions and innovations in key sectors, such as artificial intelligence, mobility, manufacturing, information and communication technologies, trustworthy and environmentally sustainable electronics, as well as neuromorphic and quantum computing. In addition, targeted R&D initiatives can accelerate technology transfer and close the gap between scientific work and industrial application.

### **Wie schätzen Sie den Beitrag des EU Chips Act und der APECS-Pilotlinie ein?**

Guttowski — Die Europäische Kommission investiert im Rahmen des European Chips Acts erhebliche Mittel in die Stärkung der Halbleitertechnologien. Ziel ist es, Europas technologische Resilienz zu erhöhen, Lieferketten zu sichern und Innovationen in Schlüsselbranchen voranzutreiben. Die Pilotlinie für APECS, als eine von derzeit fünf Pilotlinien im Rahmen des EU Chips Acts, ist dabei ein wichtiger Baustein. Sie fördert innovative Ansätze für Heterointegration und fortschrittliche Packaging-Technologien, um Chiplet-Innovationen voranzutreiben und so die Forschungs- und Fertigungskapazitäten in Europa zu erhöhen. Dadurch lassen sich neue Systemintegrationstechnologien schneller in industrielle Anwendungen überführen, die Abhängigkeit von globalen Lieferketten reduzieren und die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen steigern.

### **APECS wird von der FMD implementiert. Worin bestehen die größten Herausforderungen?**

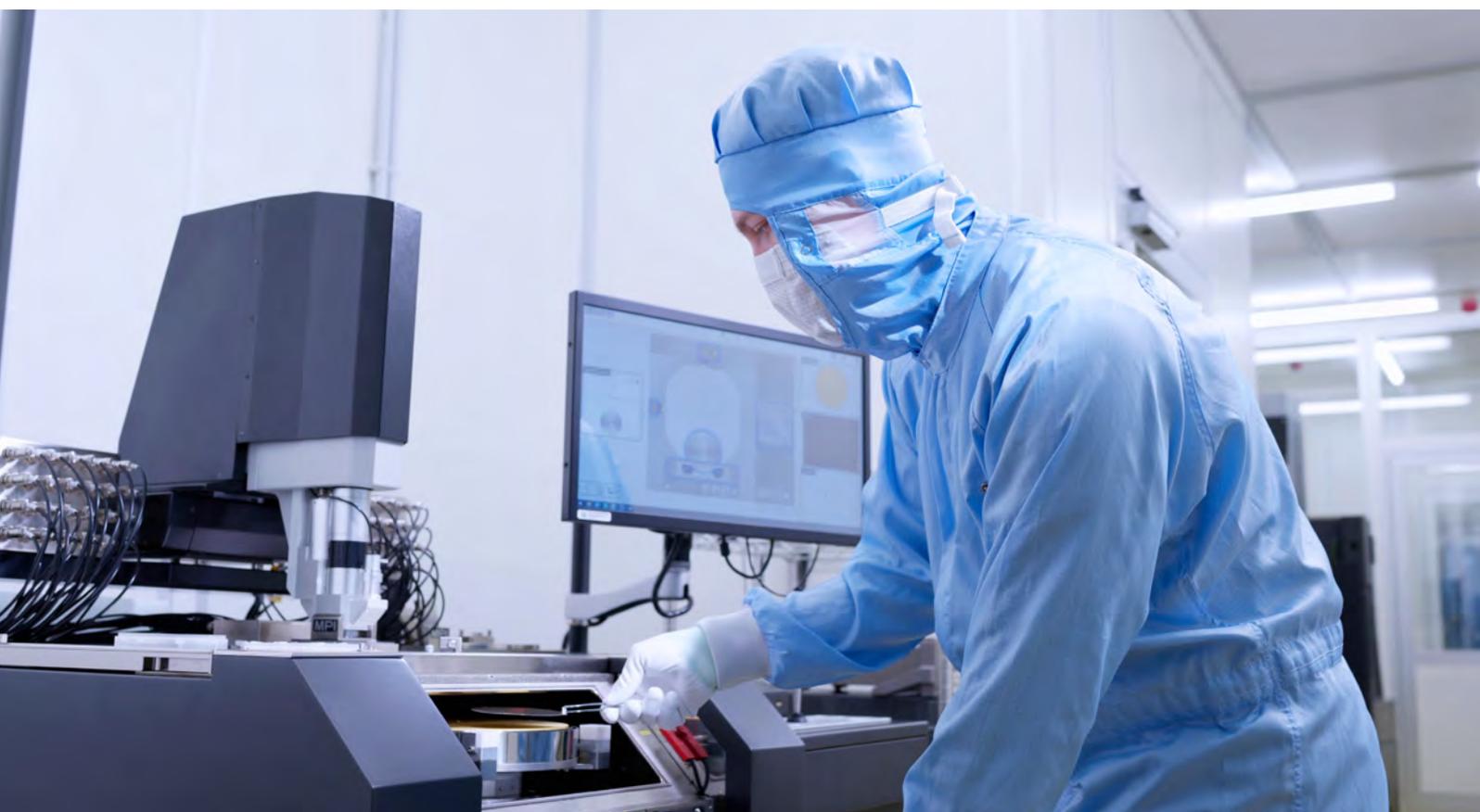
Guttowski — Eine der größten Herausforderungen besteht in der nahtlosen Integration verschiedener Technologien und Prozesse, um innovative Packaging-Lösungen zu ermöglichen, die hohe Anforderungen an die Koordination stellen. Zudem dürfen sich zehn Partner aus acht europäischen Ländern eng abstimmen, um ihre Synergien optimal nutzen zu können – allein in Deutschland sind 14 FMD-Institute beteiligt! Weitere Herausforderungen betreffen den niederschweligen Zugang zu den Angeboten der Pilotlinie, die Verfügbarkeit von Designkompetenzen, die Skalierbarkeit neuer Technologien und ihrer Charakterisierung, den Transfer in industrielle Anwendungen und die Sicherstellung der langfristigen Wirtschaftlichkeit der entwickelten Lösungen.

### **How do you rate the contribution of the EU Chips Act and the APECS pilot line?**

Guttowski — The European Commission is investing significant resources in strengthening semiconductor technologies as part of the European Chips Act. The aim is to increase Europe's technological resilience, secure supply chains and drive innovation in key industries. The pilot line for APECS, one of currently five pilot lines under the EU Chips Act, is an important building block in this effort. It promotes innovative approaches to heterointegration and advanced packaging technologies to advance chiplet innovation and thus increase research and manufacturing capacities in Europe. This will enable new system integration technologies to be transferred more quickly into industrial applications, reducing dependence on global supply chains and increasing the competitiveness of European companies.

### **APECS is being implemented by the FMD. What are the biggest challenges?**

Guttowski — One of the biggest challenges is the seamless integration of different technologies and processes to enable innovative packaging solutions, which involves a high level of coordination. In addition, ten partners from eight European countries must work closely together to make optimal use of their synergies — in Germany alone, 14 FMD institutes are involved! Further challenges concern the low-threshold access to the pilot line services, the availability of design expertise, the scalability of new technologies and their characterization, the transfer to industrial applications and ensuring the long-term economic viability of the developed solutions.



### **Was macht den Ansatz der heterogenen Integration so innovativ?**

Guttowski — Die Mikroelektronikforschung und -entwicklung ist das Herzstück der aktuellen technologischen (R)Evolutionen, die von Künstlicher Intelligenz und Hochleistungsrechnen über moderne Verteidigungssysteme bis hin zu Robotik, Leistungselektronik, drahtloser Kommunikation, E-Health, Quantentechnologien und mehr reichen. Solche zukünftigen elektronischen Systeme werden immer mehr Funktionen erfordern, die nicht von einem einzigen Chip geleistet werden können, selbst wenn fortschrittliche sogenannte System-on-Chip-(SoC-)Konzepte verwendet werden. Heterointegration bedeutet also die Kombination verschiedener Halbleitermaterialien und Technologien in einem einzigen System, wodurch kompaktere, leistungsfähigere und energieeffizientere Systeme entstehen. Vorteile sind eine höhere Leistungsdichte, reduzierte Latenzzeiten und eine verbesserte Energieeffizienz. Heterointegration wird über die aktuellen System-in-Package-Ansätze (SiP) hinausgehen und ist für elektronische Systeme und Geräte der nächsten Generation, die auf zukünftigen CMOS-Knoten (komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter), Siliziumgermanium, Siliziumcarbid, III-V-Halbleitern wie Galliumarsenid oder Galliumnitrid und allen verschiedenen Arten von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) basieren, von entscheidender Bedeutung. Herausforderungen bestehen jedoch in der komplexen Fertigung, den höheren Kosten und der Notwendigkeit neuer Design- und Testmethoden, um die Zuverlässigkeit der integrierten Systeme zu gewährleisten.

### **Welche Bedeutung hat der Transfer von Entwicklungsergebnissen aus der APECS-Pilotlinie in die industrielle Anwendung?**

Guttowski — Der Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie ist entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg von APECS. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Bildung und Industrie können innovative Technologien schneller zur Marktreife gebracht werden. Dies stärkt die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Firmen und sichert langfristig die technologische Resilienz. Zudem ermöglicht der Transfer die Skalierung neuer Fertigungsprozesse und trägt zur Schaffung neuer Wertschöpfungsketten in Europa bei.

*Im Rahmen der APECS-Pilotlinie wird in den kommenden Jahren die Europäische Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur für Halbleitertechnologien und -anwendungen weiter ausgebaut*

*The APECS pilot line will be used to further expand the European research and development infrastructure for semiconductor technologies and applications in the coming years*

### **What makes the heterogeneous integration approach so innovative?**

Guttowski — Microelectronics research and development is at the heart of the current technological (r)evolutions, ranging from artificial intelligence and high-performance computing to modern defense systems, robotics, power electronics, wireless communications, e-health, quantum technologies and more. These future electronic systems will require more and more functions that cannot be performed by a single chip, even when advanced system-on-chip (SoC) concepts are used. Heterointegration thus means combining different semiconductor materials and technologies in a single system, resulting in more compact, higher-performance and more energy-efficient systems. Advantages include higher power density, reduced latency and improved energy efficiency. Heterointegration will go beyond current system-in-package (SiP) approaches and is essential for next-generation electronic systems and devices based on future CMOS nodes (complementary metal-oxide-semiconductors), silicon-germanium, silicon carbide, III-V semiconductors such as gallium arsenide or gallium nitride and all the different types of microelectromechanical systems (MEMS). However, challenges remain in the complex manufacturing, higher costs and the need for new design and test methods to ensure the reliability of the integrated systems.

### **What is the significance of the transfer of development results from the APECS pilot line to industrial application?**

Guttowski — The transfer of research results to industry is crucial to the economic success of APECS. Through close collaboration between research, education and industry, innovative technologies can be brought to market faster. This strengthens the competitiveness of European companies and ensures long-term technological resilience. In addition, the transfer enables the scaling of new manufacturing processes and contributes to the creation of new value chains in Europe.

# Innovationsschub für Quantentechnologien Made in Europe

---

## Driving Innovation in Quantum Technologies Made in Europe

Mit den beiden Verbundprojekten Qu-Pilot und Qu-Test startete 2023 eine europäische Initiative zur Förderung der Entwicklung, Implementierung und Verfügbarkeit von Quantentechnologien in Europa. Zahlreiche Partner aus Industrie und Forschung entwickeln gemeinsam neue Methoden, bauen eine vernetzte Infrastruktur aus und intensivieren den fachlichen Austausch, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Forschungs- und Innovationslandschaft zu stärken. Das zentrale Ziel besteht darin, die Markteinführungszeit europäischer industrieller Innovationen im Bereich der Quantentechnologien zu verkürzen und eine vertrauenswürdige Lieferkette zu etablieren.

With the two collaborative projects Qu-Pilot and Qu-Test, a European initiative was launched in 2023 to promote the development, implementation and availability of quantum technologies in Europe. Numerous partners from industry and research are jointly developing new methods, expanding a networked infrastructure and intensifying the exchange of expertise in order to strengthen the competitiveness of the European research and innovation landscape. The central goal is to shorten the time to market for European industrial innovations in the field of quantum technologies and to establish a trustworthy supply chain.

Während Qu-Test sich auf die Verbesserung von Test- und Prüfverfahren konzentriert, fördert Qu-Pilot die praktische Anwendung und Implementierung von neuartigen Quantentechnologien aus europäischer Quelle. Gemeinsam tragen die Projekte dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit Europas im Bereich der Quantentechnologien zu stärken und innovative Lösungen für zukünftige Herausforderungen zu entwickeln. Durch den Austausch von Wissen, die Etablierung von Standards und die Durchführung von Pilotprojekten wird eine solide Grundlage für das Wachstum und die Akzeptanz von Quantentechnologien geschaffen. Die Projekte laufen von 2023 bis 2027 und werden im Rahmen des Programms Horizon Europe von der Europäischen Union mit jeweils fast 19 Millionen Euro gefördert.

While Qu-Test focuses on improving testing and verification procedures, Qu-Pilot promotes the practical application and implementation of novel quantum technologies from European sources. Together, the projects will help to strengthen Europe's competitiveness in the field of quantum technologies and develop innovative solutions for future challenges. By sharing knowledge, establishing standards and implementing pilot projects, a solid foundation for the growth and acceptance of quantum technologies will be created. The projects will run from 2023 to 2027 and will each receive around 19 million euros in funding from the European Union under the Horizon Europe program.

## Partners

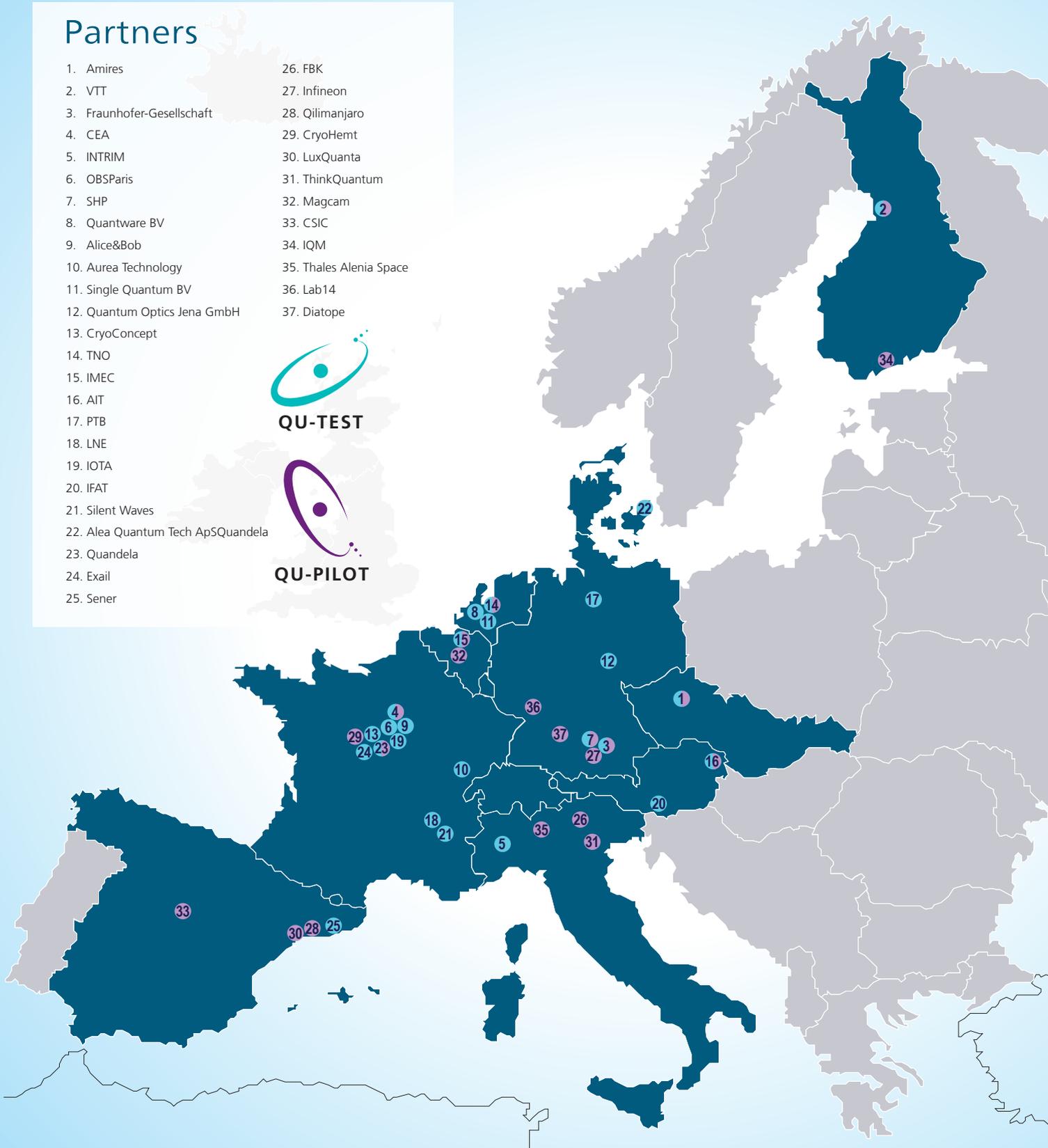
- |                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. Amires                         | 26. FBK                 |
| 2. VTT                            | 27. Infineon            |
| 3. Fraunhofer-Gesellschaft        | 28. Qilimanjaro         |
| 4. CEA                            | 29. CryoHemt            |
| 5. INTRIM                         | 30. LuxQuanta           |
| 6. OBSParis                       | 31. ThinkQuantum        |
| 7. SHP                            | 32. Magcam              |
| 8. Quantware BV                   | 33. CSIC                |
| 9. Alice&Bob                      | 34. IQM                 |
| 10. Aurea Technology              | 35. Thales Alenia Space |
| 11. Single Quantum BV             | 36. Lab14               |
| 12. Quantum Optics Jena GmbH      | 37. Diatope             |
| 13. CryoConcept                   |                         |
| 14. TNO                           |                         |
| 15. IMEC                          |                         |
| 16. AIT                           |                         |
| 17. PTB                           |                         |
| 18. LNE                           |                         |
| 19. IOTA                          |                         |
| 20. IFAT                          |                         |
| 21. Silent Waves                  |                         |
| 22. Alea Quantum Tech ApSQuandela |                         |
| 23. Quandela                      |                         |
| 24. Exail                         |                         |
| 25. Sener                         |                         |



**QU-TEST**



**QU-PILOT**



### **Qu-Pilot: Implementierung und Anwendung von Quantentechnologien**

Qu-Pilot zielt darauf ab, innovative Ansätze und Methoden verfügbar zu machen, die die Einführung und den Einsatz von Quantentechnologien in verschiedenen Bereichen unterstützen. Dazu werden Projekte initiiert, die Quantentechnologien in Bereiche wie Kommunikation, Sensorik und Datenverarbeitung nutzen. Im Rahmen des Projekts wird die Infrastruktur der Partner in vier verschiedene Plattformen integriert. In zweien davon ist das Fraunhofer IAF aktiv: In der Photonik-Plattform entwickelt das Fraunhofer IAF eine Wafer-Epitaxie von III-V-Schichtstrukturen für Lawinenphotodioden (APDs) und Einzelphoton-Lawinendioden (SPADs) im kurzwelligen Infrarot und baut entsprechende Technologieprozesse aus. Hierfür wurde das Konzept zur Fertigung von Multi-Project-Wafern adaptiert, um pro Prozesslauf verschieden konzipierte SPAD-Bauelemente für unterschiedliche Anwendungen herzustellen.

In der Diamant-Plattform unterstützt das Fraunhofer IAF die Entwicklung stabiler Epitaxie und Präparationsverfahren, um maßgeschneiderten Diamant für Quantentechnologien anbieten zu können, insbesondere in Hinblick auf Dotierung und Kristallorientierung. (111)-orientierter Diamant ist dem kommerziell gut verfügbaren (100)-orientierten Diamant hinsichtlich der Dotierungseffizienz und der Spinkontrolle von Farbzentren deutlich überlegen. Andererseits bestehen bei der Herstellung und Präparation von (111)-orientiertem Diamant auch Nachteile, wie zum Beispiel eine deutlich geringere Wachstumsrate und Schwierigkeiten beim Polieren aufgrund seiner extremen Härte.

Das Ziel am Fraunhofer IAF besteht deshalb darin, den Reifegrad des Wachstums von (111)-orientiertem Diamant zu erhöhen. Des Weiteren soll die Prozessentwicklung von dreieckigen integrierten Wellenleiter-Chips weiter vorgetrieben werden. Hier liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Reduzierung der Seitenwandrauheit der Bauelemente, um das Lichtstreu- und Dämpfungsverhalten zu verbessern.

Um die Nachteile der niedrigen Wachstumsrate von (111)-orientiertem Diamant zu überwinden, wurden dicke (100)-orientierte Diamanten (3 mm) gewachsen und (111)-orientierte Scheiben mittels Laser herausgeschnitten. Diese Scheiben wurden anschließend poliert und für die Quantensensorik verwendet. Ebenso wurden Diamanten mit spezieller Geometrie hergestellt. Ein Beispiel ist ein Pyramidenstumpf, mit der die Lichtein- und Auskopplung in diamantbasierten Quantensensoren verbessert und somit die Empfindlichkeit erhöht wird.

### **Qu-Test: Verbesserung der Test- und Prüfverfahren**

Qu-Test zielt auf die Etablierung von einheitlichen Standards für die Bewertung von quantenbasierten Systemen ab, um die Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Testergebnissen zu gewährleisten. Durch die Förderung des Austauschs von

### **Qu-Pilot: Implementation and application of quantum technologies**

Qu-Pilot aims to make innovative approaches and methods available that support the implementation and use of quantum technologies in various fields. To this end, projects are being initiated that utilize quantum technologies in areas such as communication, sensor technology and data processing. Within this project, the infrastructure of the partners will be integrated into four different platforms. Fraunhofer IAF is involved in two of them: in the photonics platform, Fraunhofer IAF is developing a wafer epitaxy of III-V layer structures for avalanche photodiodes (APDs) and single-photon avalanche diodes (SPADs) in the short-wave infrared and is expanding corresponding technology processes. To this end, the concept for the production of multi-project wafers was adapted in order to manufacture differently designed SPAD components for different applications in each process run.

In the diamond platform, Fraunhofer IAF supports the development of stable epitaxy and preparation methods in order to be able to offer customized diamond for quantum technologies, particularly with regard to doping and crystal orientation. (111)-oriented diamond is superior to the commercially available (100)-oriented diamond in terms of doping efficiency and spin control of color centers. On the other hand, there are also disadvantages in the production and preparation of (111)-oriented diamond, such as a significantly lower growth rate and difficulties in polishing due to its extreme hardness.

The goal at Fraunhofer IAF is therefore to increase the degree of growth of (111)-oriented diamond. Furthermore, the process development of triangular integrated waveguide chips is to be advanced. Here, the focus of the work is on reducing the sidewall roughness of the components in order to improve the light scattering and attenuation behavior.

To overcome the disadvantages of the low growth rate of (111)-oriented diamond, thick (100)-oriented diamonds (3 mm) were grown and (111)-oriented disks were cut out using a laser. These disks were then polished and used for quantum sensing. Similarly, diamonds with special geometries were produced. One example is a truncated pyramid, which is used to improve light coupling into and out of diamond-based quantum sensors, thus increasing sensitivity.

### **Qu-Test: Improvement of test procedures**

Qu-Test aims to establish uniform standards for the evaluation of quantum-based systems in order to ensure the comparability and traceability of test results. By promoting the exchange of experiences and best practices between research institutions, universities and industrial partners, the development of innovative approaches to quality assurance in quantum technology is supported. The implementation of pilot projects enables the testing and optimization of new testing methods



*Rasterelektronenmikroskop-Abbildung eines freistehenden Mikroring-Resonators aus Diamant. Die Methode des quasi-isotropen Trockenätzens ermöglicht die Herstellung von optischen Wellenleitern mit rechteckigem Querschnitt auf Substraten beliebiger Größe. Das komplett unterätzte Bauteil enthält Stickstoff-Vakanz-Farbzentren, deren Fluoreszenz per Spektroskopie gemessen wird. Scanning electron microscope image of a freestanding microring resonator made of diamond. The method of quasi-isotropic dry etching enables the fabrication of optical waveguides with a rectangular cross-section on substrates of any size. The completely undercut component contains nitrogen-vacancy color centers whose fluorescence is measured by spectroscopy.*

Erfahrungen und bewährten Verfahren zwischen Forschungseinrichtungen, Universitäten und Industriepartnern wird die Entwicklung innovativer Ansätze zur Qualitätssicherung in der Quantentechnologie unterstützt. Die Durchführung von Pilotprojekten ermöglicht die Erprobung und Optimierung neuer Testmethoden in der Praxis. Die Infrastruktur der Partner von Qu-Test wird in drei verschiedene Testumgebungen integriert, in denen auch das Fraunhofer IAF aktiv ist: Computing, Kommunikation und Sensorik.

Im Computing trägt das Fraunhofer IAF dazu bei, einheitliche Testparameter und -methoden für supraleitende Qubits, halbleitende Spin-Qubits, kryogene Hochfrequenz-Kabel und parametrische Wanderwellenverstärker zu ermitteln. Bei der Kommunikation arbeitet das Fraunhofer IAF daran, die Prüf- und Charakterisierungseinrichtungen für Komponenten und Teilsysteme von Quantenkommunikationsgeräten zu verbessern. Insbesondere für SPADs bei den typischen Telekommunikationswellenlängen um  $1,55 \mu\text{m}$  ist ein dedizierter Labormessplatz zur Bestimmung der temperaturabhängigen Dunkelzählrate aufgebaut worden, der aktuell um die Fähigkeiten zur räumlichen Abrasterung der SPAD-Bauelemente mit einzelnen Photonenimpulsen erweitert wird, um die Homogenität der Photonendetektionseffizienz zu prüfen.

Für die Sensorik werden am Fraunhofer IAF Magnetometer auf Basis von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant bereitgestellt, um die Empfindlichkeit zu verbessern, so dass sie einige zehn  $\mu\text{T}/(\text{Hz})^{1/2}$  für Einzel-NV-Scanner oder Hunderte von  $\text{nT}/(\text{Hz})^{1/2}$  für Weitfeld-Magnetometer erreichen.

in practice. The infrastructure of the Qu-Test partners is integrated into three different test environments in which Fraunhofer IAF is also active: computing, communication and sensor technology.

In the field of computing, Fraunhofer IAF is helping to determine uniform test parameters and methods for superconducting qubits, semiconducting spin qubits, cryogenic radio-frequency cables and parametric traveling wave amplifiers. In the field of communication, Fraunhofer IAF is working on improving the testing and characterization facilities for components and subsystems of quantum communication devices. In particular, a dedicated laboratory measuring station has been set up for SPADs at the typical telecommunication wavelengths around  $1.55 \mu\text{m}$  to determine the temperature-dependent dark count rate. This is currently being extended to include the capability of spatially scanning the SPAD components with single photon pulses in order to check the homogeneity of the photon detection efficiency.

For sensor technology, magnetometers based on nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond are being developed at Fraunhofer IAF to improve sensitivity, achieving several tens of  $\mu\text{T}/(\text{Hz})^{1/2}$  for single NV scanners or hundreds of  $\text{nT}/(\text{Hz})^{1/2}$  for wide-field magnetometers.

# Diamantwafer für industrielle Quantentechnologien

---

## Diamond Wafers for Industrial Quantum Technologies

Diamant zählt zu den vielversprechendsten Materialien für Quantentechnologien, doch seine Verfügbarkeit in industrietauglicher Qualität und Quantität ist bislang begrenzt. Im Verbundprojekt GrodiaQ arbeiten Forschende des Fraunhofer IAF gemeinsam mit fünf Industriepartnern an der Entwicklung innovativer Anlagen- und Wachstumsprozesse, um hochreine, (111)-orientierte Diamantwafer mit einem Mindestdurchmesser von 4 Zoll herzustellen und der Industrie bereitzustellen. Damit leisten die Projektpartner einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung einer europäischen Lieferkette für Quantenbauelemente und zur Reduzierung der Abhängigkeit von wenigen außereuropäischen Herstellern.

Diamond is one of the most promising materials for quantum technologies, but its availability in industry-grade quality and quantity has been limited so far. In the joint project GrodiaQ, researchers from Fraunhofer IAF are working together with five industrial partners to develop innovative equipment and growth processes to produce high-purity (111)-oriented diamond wafers with a minimum diameter of 4 inches and make them available to industry. In doing so, the project partners are making a significant contribution to establishing a European supply chain for quantum devices and reducing dependence on a few non-European manufacturers.



Herkömmliche Diamantsubstrate sind gegenwärtig auf Dimensionen von maximal 10 x 10 mm begrenzt, was ihre technologische Weiterverarbeitung erheblich einschränkt. Zudem variieren die Eigenschaften der einzelnen Diamantsubstrate. Besonders Diamanten mit einer (111)-Kristalloberfläche sind derzeit nur in sehr begrenzter Stückzahl verfügbar. Dabei bietet der (111)-Diamant ideale Voraussetzungen für Quantenbauelemente, da er aufgrund seiner Materialeigenschaften die Erzeugung von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) erleichtert und deren Steuerung als Qubits verbessert.

### **Einkristalliner (111)-Diamant auf 4-Zoll-Wafern**

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt GrodiaQ entwickelt das Fraunhofer IAF gemeinsam mit den Industriepartnern Diamond Materials, Evatec Europe und Trumpf Wachstumsprozesse auf 2-Zoll-Diamantsubstraten, um die Erkenntnisse schnell und effektiv in eine neue Anlagentechnologie für Substrate jenseits von 4-Zoll zu überführen. Das Konsortium konnte bereits erfolgreich das Wachstum von Diamant mit (111)-Oberfläche auf 2-Zoll-Flächen demonstrieren. Zudem gelang es, einen solchen Diamantfilm erfolgreich abzulösen und dessen Oberfläche zu polieren, wodurch ein freitragender, einkristalliner (111)-Diamant mit den Maßen 15 x 25 mm<sup>2</sup> entstand.

Parallel arbeitet das Konsortium an Substraten für die (111)-Diamantnukleation auf 4-Zoll-Wafern, die ein Wachstum auf dieser Fläche ermöglichen. Die dafür erforderliche Anlagentechnologie basiert auf einem innovativen Reaktorkonzept mit Halbleiterngeneratoren. Dieser Reaktor wird bis zum Projektende Mitte 2025 demonstriert und wird die Nukleation sowie das Wachstum von heteroepitaktischem Diamant auf Flächen jenseits üblicher 4-Zoll-Wafer erlauben.

### **Heteroepitaktische Herstellung für die Industrie**

Heteroepitaktischer Diamant kann auf kostengünstigeren Substraten gewachsen werden, was die Herstellung von Diamantbauelementen kosteneffizienter und skalierbarer macht. Die Schwierigkeit ist jedoch, dass die thermodynamischen Bedingungen es begünstigen, dass Diamant bevorzugt in der (100)-Orientierung wächst.

Die Forschenden am Fraunhofer IAF konnten demonstrieren, dass die NV-Zentren auf dem Diamantwafer wie bei homoepitaktischen Prozessen entlang der (111)-Wachstumsrichtung orientiert sind. Die Kohärenzzeiten der NV-Spins im hergestellten (111)-Material weisen die gleiche Größenordnung auf wie vergleichbares homoepitaktisch gewachsenes Material. Die Herstellung heteroepitaktischer Diamantwafer in hoher Qualität soll die Produktion von Quantenbauelementen in industriell relevanter Stückzahl ermöglichen und kann für optische Anwendungen, die bislang überwiegend polykristallines Material einsetzen, eine profitable Ergänzung darstellen.

Conventional diamond substrates are currently limited to dimensions of 10 x 10 mm at most, which considerably restricts their further technological processing. In addition, the properties of the individual diamond substrates vary. In particular, diamonds with a (111) crystal surface are currently only available in very limited quantities. Yet (111) diamonds are ideally suited for quantum devices because their material properties facilitate the generation of nitrogen vacancy centers (NV centers) and improve their control as qubits.

### **Single-crystal (111) diamond on 4-inch wafers**

In the GrodiaQ project, funded by the Federal Ministry of Education and Research, Fraunhofer IAF is working with the industrial partners Diamond Materials, Evatec Europe and Trumpf to develop growth processes on 2-inch diamond substrates in order to quickly and effectively transfer the findings into a new system technology for substrates beyond 4 inch. The consortium has already successfully demonstrated the growth of diamond with a (111) surface on 2-inch surfaces. In addition, it was possible to successfully detach such a diamond film and polish its surface, resulting in a self-supporting, single-crystal (111) diamond measuring 15 x 25 mm<sup>2</sup>.

In parallel, the consortium is working on substrates for (111) diamond nucleation on 4-inch wafers, which enable growth on this surface. The system technology required for this is based on an innovative reactor concept with semiconductor generators. This reactor will be demonstrated by the end of the project in mid-2025 and will allow the nucleation and growth of heteroepitaxial diamond on surfaces beyond the usual 4-inch wafers.

### **Heteroepitaxial production for industry**

Heteroepitaxial diamond can be grown on less expensive substrates, making the production of diamond devices more cost-efficient and scalable. However, the difficulty is that thermodynamic conditions favor diamond to grow in the (100) orientation.

The researchers at Fraunhofer IAF were able to demonstrate that the NV centers on the diamond wafer are oriented along the (111) growth direction, as in homoepitaxial processes. The coherence times of the NV spins in the (111) material produced show the same order of magnitude as comparable homoepitaxially grown material. The production of high-quality heteroepitaxial diamond wafers should enable the production of quantum devices in industrially relevant quantities and can be a profitable addition for optical applications that have so far mainly used polycrystalline material.

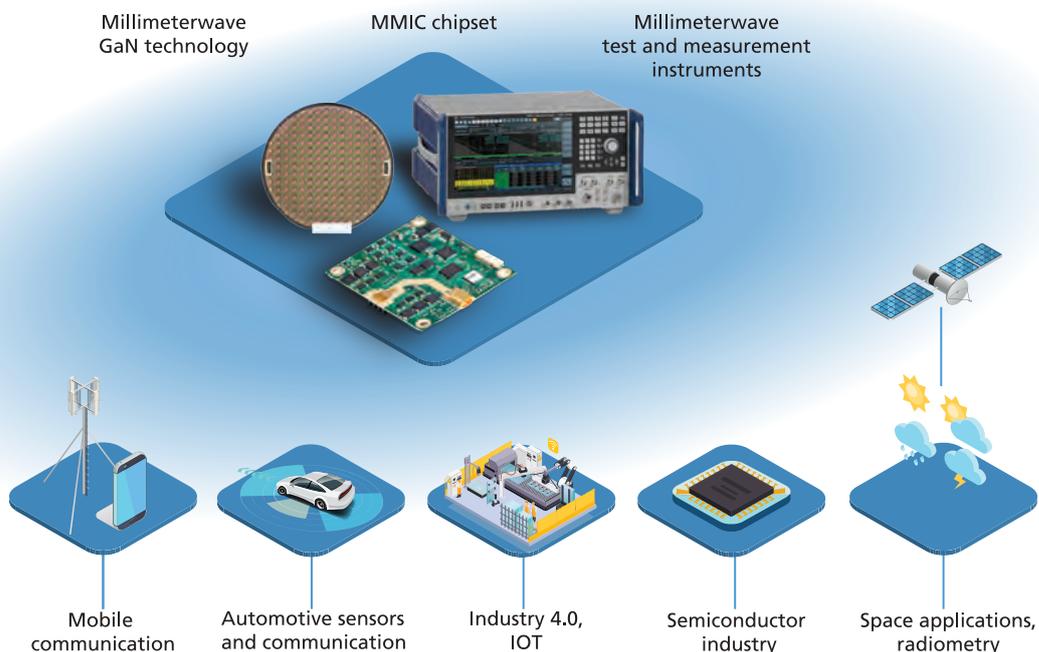
# Europäische Wertschöpfung für GaN-Messlösungen im D-Band

## European Added Value for GaN Measurement Solutions in the D Band

Effiziente Prüf- und Messsysteme bilden eine entscheidende Säule jeder mikroelektronischen Wertschöpfungskette. Unter der Leitung des Technologieunternehmens Rohde & Schwarz entwickelt das Fraunhofer IAF gemeinsam mit United Monolithic Semiconductors im Projekt GANYDEM170 eine innovative GaN-Technologie für Millimeterwellen-Anwendungen im Frequenzbereich bis 170 GHz. Auf Basis dieser Technologie soll ein neuartiges hochperformantes Prüf- und Messsystem realisiert werden. Die Forschenden arbeiten zudem daran, die GaN-Technologie für 6G-Kommunikationslösungen sowie innovative zukünftige Anwendungen im Millimeter-Frequenzbereich zu nutzen.

Efficient testing and measurement systems are a crucial part of every microelectronic value chain. Under the leadership of the technology company Rohde & Schwarz, Fraunhofer IAF and United Monolithic Semiconductors are jointly developing an innovative GaN technology for millimeter wave applications in the frequency range up to 170 GHz in the GANYDEM170 project. On the basis of this technology, a new high-performance testing and measuring system will be realized. The researchers are also working on using GaN technology for 6G communication solutions and innovative future applications in the millimeter frequency range.

*GaN-Technologien im Millimeterwellen-Bereich sind für viele Branchen und Anwendungen von zentraler Bedeutung. GaN technologies in the millimeter-wave range are of central importance for many industries and applications.*



Die EU-Initiative IPCEI ME/CT zielt darauf ab, die europäische Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität im Bereich Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien nachhaltig zu stärken. Dafür sollen in Europa Technologien für Frequenzbänder im Millimeterwellenbereich entwickelt, effiziente Test- und Messsysteme realisiert und in Fertigungsprozesse beziehungsweise in eine Serienproduktion überführt werden. Das gilt insbesondere für Systeme, die im Bereich der Millimeterwellen zwischen 30 und 300 GHz arbeiten, weil dieser zukünftig unter anderem für den Mobilfunk, die Satellitentechnik sowie Sensorik für Fahrzeuge und industrielle Produktion genutzt werden soll.

Das Projekt GANYDEM170 als Teil des IPCEI ME/CT setzt genau an dieser Zielsetzung an und konzentriert sich auf zwei entscheidende Faktoren der Wertschöpfungskette des Mikroelektronik-Ökosystems Europas: Die Projektpartner entwickeln auf Basis des Verbindungshalbleiters Galliumnitrid (GaN) hochleistungsfähige Prüf- und Messsysteme für Millimeter-Anwendungen bis 170 GHz mit dem Ziel, den aktuellen Stand der Technik deutlich zu übertreffen. Darüber hinaus nutzen sie die entwickelte GaN-Technologie, um die Forschung und Entwicklung im Bereich 6G-Mobilfunk sowie anderen relevanten Anwendungen voranzutreiben.

#### Neuartiger Technologieprozess GaN07

Um monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen (monolithic microwave integrated circuits, MMICs) für den Frequenzbereich bis 170 GHz zu realisieren, entwickeln Forschende des Fraunhofer IAF den neuartigen Technologieprozess GaN07. Dieser Galliumnitrid-Prozess mit der Gatellänge von 70 nm soll nicht nur höchste Anforderungen an Leistung und Zuverlässigkeit erfüllen, sondern auch herausragende Ergebnisse liefern. Die MMICs für GANYDEM170 werden unter anderem von Rohde & Schwarz entworfen und sollen am Fraunhofer IAF mit dem GaN07-Prozess gefertigt werden.

The EU initiative IPCEI ME/CT aims to sustainably strengthen European competitiveness and technological sovereignty in the field of microelectronics and communication technologies. Technologies for frequency bands in the millimeter wave range will be developed in Europe, efficient test and measurement systems will be realized and transferred to manufacturing processes and series production. This applies in particular to systems that operate in the millimeter wave range between 30 and 300 GHz, because this will be used in the future for mobile communications, satellite technology, and sensor technology for vehicles and industrial production, to name just a few applications.

The GANYDEM170 project, as part of the IPCEI ME/CT, is based on precisely this objective and focuses on two crucial factors in the value chain of Europe's microelectronics ecosystem: The project partners are developing high-performance test and measurement systems for millimeter applications up to 170 GHz based on gallium nitride (GaN) compound semiconductors, with the aim of significantly exceeding the current state of the art. In addition, they are using the developed GaN technology to advance research and development in the field of 6G mobile communications and other relevant applications.

#### New technology process GaN07

In order to realize monolithic microwave integrated circuits (MMICs) for the frequency range up to 170 GHz, researchers at Fraunhofer IAF are developing the novel technology process GaN07. This gallium nitride process with a gate length of 70 nm is designed not only to meet the highest performance and reliability requirements, but also to deliver outstanding results. The MMICs for GANYDEM-170 are designed by Rohde & Schwarz, among others, and will be manufactured at Fraunhofer IAF using the GaN07 process.

*Auf der European Microwave Week 2024 stellten Robert Ziegler von Rohde & Schwarz und Dr. Michael Mikulla vom Fraunhofer IAF die neuartige GaN-Technologie für die Messung von Hochfrequenzkomponenten im D-Band (110–170 GHz) vor*

*At European Microwave Week 2024 in Paris, Robert Ziegler from Rohde & Schwarz and Dr. Michael Mikulla, Fraunhofer IAF, presented the novel GaN technology for the measurement of high-frequency components in the D-band (110–170 GHz)*



Sehen Sie sich das Video an:  
Watch the video here:

[s.fhg.de/iaf-jb24-25](https://s.fhg.de/iaf-jb24-25)



# Transfer durch Applikationslabore

---

## Transfer Through Application Laboratories

*Unsere Applikationslabore bieten der Industrie eine einzigartige Gelegenheit, neueste Technologien aus den Bereichen Quantensensorik, Quantencomputing und Infrarotlaser-Spektroskopie zu testen und für eigene Anforderungen zu evaluieren.*

*Our application laboratories offer industry a unique opportunity to test the latest technologies in the fields of quantum sensors, quantum computing and infrared laser spectroscopy and to evaluate them for their own requirements.*



# Applikationslabor für Quantensensorik

---

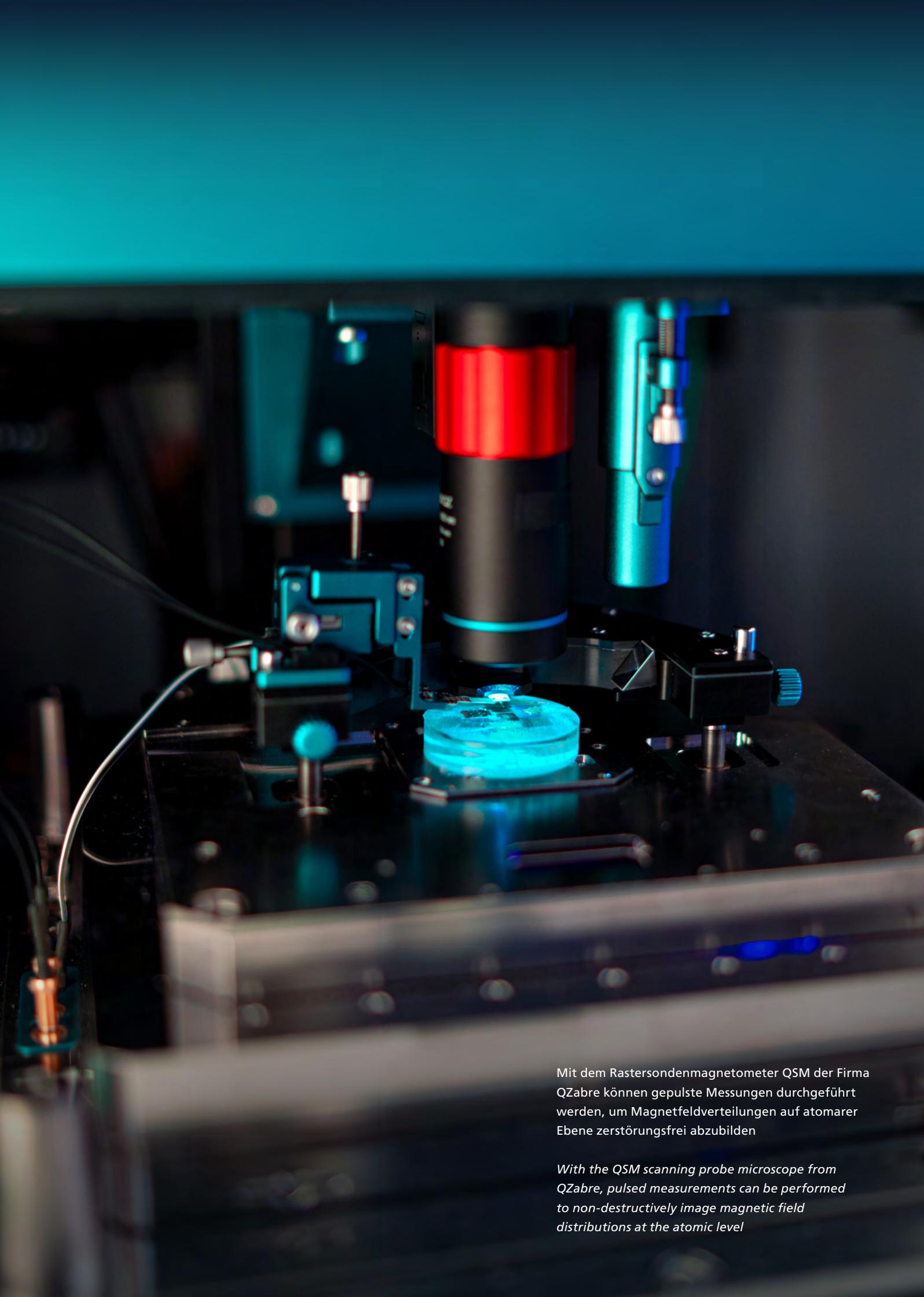
## Application Laboratory for Quantum Sensing

Hochempfindliche Quantensensoren sind besonders relevant für Branchen, in denen höchste Präzision entscheidend ist. Um der Industrie die Möglichkeit zu geben, das Potenzial der Quantensensorik zu erkunden und für ihre spezifischen Anforderungen zu evaluieren, hat das Fraunhofer IAF ein Applikationslabor für Quantensensorik eingerichtet. Dort stehen mehrere Quantenmagnetometer auf Basis von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant zur Verfügung, die Interessierte aus Industrie und Forschung zu Testmessungen nutzen können.

Highly sensitive quantum sensors are particularly relevant for industries where the highest precision is crucial. Fraunhofer IAF has set up an application laboratory for quantum sensor technology to enable industry to explore the potential of quantum sensor technology and assess it for their specific needs. The lab offers several quantum magnetometers based on nitrogen-vacancy centers (NV centers) in diamond, which can be used for a wide variety of applications.

Quantenmagnetometer visualisieren Magnetfeldverteilungen auf kleinster Skala und sind daher ideal für den industriellen Einsatz geeignet, beispielsweise zur Sichtbarmachung von mikroskopischen Materialdefekten in metallischen Werkstoffen, zur hochpräzisen Analyse von biologischem Gewebe oder zur Untersuchung von mikro- und nanoelektronischen Bauteilen. Diamantbasierte Magnetfeldsensoren bieten fundamentale Vorteile in der Anwendung: Sie können bei Raumtemperatur und auf Hintergrundfeldern betrieben werden und zeichnen sich dabei durch eine extrem hohe räumliche Auflösung aus. Zusätzlich zu den Testmöglichkeiten vor Ort hat das Fraunhofer IAF eine virtuelle Plattform mit umfassenden Fachinformationen zur Quantensensorik errichtet.

Quantum magnetometers visualize magnetic field distributions on the smallest scale and are therefore ideally suited for industrial applications that demand highest precisions. Possible use cases are the visualization of microscopic material defects in metallic materials, the high-precision analysis of biological tissue or the examination of micro- and nanoelectronic components. Diamond-based magnetic field sensors offer fundamental advantages: they can be operated at room temperature and in the presence of background fields and are characterized by an extremely high spatial resolution. In addition to the on-site testing facilities, a virtual platform with comprehensive specialist information on quantum sensor technology is available to interested parties.



Mit dem Rastersondenmagnetometer QSM der Firma QZabre können gepulste Messungen durchgeführt werden, um Magnetfeldverteilungen auf atomarer Ebene zerstörungsfrei abzubilden

*With the QSM scanning probe microscope from QZabre, pulsed measurements can be performed to non-destructively image magnetic field distributions at the atomic level*

## Quantenmagnetometer im Applikationslabor

### Weitfeldmagnetometer

Das Weitfeldmagnetometer wurde eigens am Fraunhofer IAF entwickelt und verwendet eine Diamantplatte mit einer homogenen Schicht aus NV-Zentren. Es misst Magnetfelder über einen großen Probenbereich in sehr kurzer Zeit und eignet sich damit für schnelle und quantitative Messungen im industriellen Einsatz. Das Weitfeldmagnetometer braucht keine Kalibrierung und kann für die Charakterisierung und Optimierung von ferromagnetischen Werkstoffen sowie für Anwendungen in der Biomedizin eingesetzt werden.

### Technische Spezifikationen

Sensitivität:  $< 10 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$   
Ortsauflösung:  $\pm 1 \mu\text{m}$   
Messbereich:  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  bis  $1 \times 1 \text{mm}^2$   
Messzeit: Sekunden bis Minuten  
Messmethoden: ODMR, Iso-B, Quench, pulsed  
Hersteller: Eigenanfertigung des Fraunhofer IAF

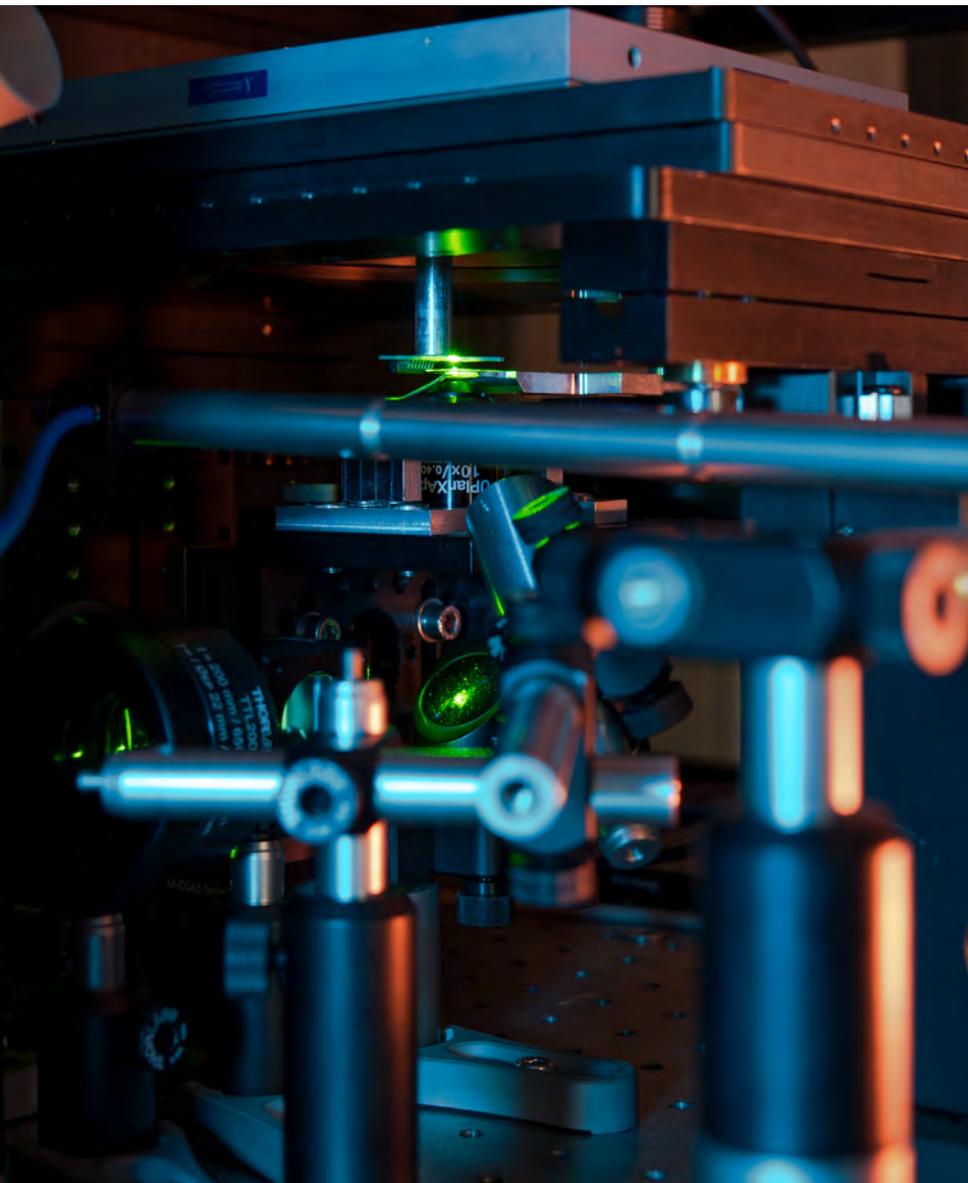
## Quantum magnetometer in the application lab

### Wide-field magnetometer

The wide-field magnetometer was specially developed at Fraunhofer IAF and uses a diamond plate with a homogeneous layer of NV centers. It measures magnetic fields over a large sample area in a very short time, making it suitable for fast and quantitative measurements in industrial applications. The widefield magnetometer does not require calibration and can be used for the characterization and optimization of ferromagnetic materials as well as for applications in biomedicine.

### Technical specifications

Sensitivity:  $< 10 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$   
Spatial Resolution:  $\pm 1 \mu\text{m}$   
Measurement Area:  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  bis  $1 \times 1 \text{mm}^2$   
Measurement Time: seconds to minutes  
Protocols: ODMR, Iso-B, Quench, pulsed  
Manufacturer: Produced in-house by Fraunhofer IAF



*Das Weitfeldmagnetometer nutzt eine Diamantplatte für schnelle und großflächige Messungen*  
*The wide-field magnetometer uses a diamond plate for fast and large-scale measurements*



*Das hochempfindliche Rastersondenmagnetometer ProteusQ der Firma Qnami nutzt Diamantspitzen mit einem einzelnen NV-Zentrum für präzise Messungen*  
*The highly sensitive ProteusQ scanning probe magnetometer from Qnami uses diamond tips with a single NV center for precise measurements*

### **Rastersondenmagnetometer**

Hochaufgelöste Rastersondenmagnetometer nutzen Diamantspitzen mit einem einzelnen NV-Zentrum. Damit bietet sich erstmals die Möglichkeit, auf der atomaren Ebene Magnetfeldverteilungen zu messen und abzubilden, die mit zuvor verfügbaren Verfahren nicht zugänglich sind. So lassen sich beispielsweise die Stromflüsse von mikro- und nanoelektronischen Schaltungen hochauflösend darstellen. Im Applikationslabor stehen zwei Rastersondenmagnetometer unterschiedlicher Hersteller für Messungen zur Verfügung.

### **Technische Spezifikationen**

Sensitivität:  $< 5 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$   
Ortsauflösung:  $\approx 35 \text{ nm}$   
Messbereich:  $85 \times 85 \times 15 \mu\text{m}$  bis  $100 \times 100 \times 15 \mu\text{m}$   
Messzeit: Minuten bis Stunden  
Messmethoden: ODMR, Iso-B, Quench, pulsed, AFM, MOKE  
Hersteller: Qnami, QZabre

### **Scanning Probe Magnetometer**

High-resolution scanning probe magnetometers use diamond tips with a single NV center. This offers the unprecedented opportunity to measure and image magnetic field distributions at the atomic level, which were previously inaccessible with available methods. Example use cases include the representation of the current flows of micro- and nanoelectronic circuits in high resolution. Two scanning probe magnetometers from different manufacturers are available for measurements at the application laboratory.

### **Technical specifications**

Sensitivity:  $< 5 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$   
Spatial Resolution:  $\approx 35 \text{ nm}$   
Measurement Area:  $85 \times 85 \times 15 \mu\text{m}$  up to  $100 \times 100 \times 15 \mu\text{m}$   
Measurement Time: minutes to hours  
Protocols: ODMR, Iso-B, Quench, pulsed, AFM, MOKE  
Manufacturer: Qnami, QZabre

Kontaktieren Sie uns bei Interesse an Testmessungen mit unseren Quantensensoren:  
*Please contact us if you are interested in test measurements with our quantum sensors:*

[quantum@iaf.fraunhofer.de](mailto:quantum@iaf.fraunhofer.de)



# Interaktiv: Das virtuelle Applikationslabor für Quantensensorik

## Interactive: the Virtual Application Laboratory for Quantum Sensing

Zusätzlich zu den Testmöglichkeiten am Institut steht der Industrie und Forschung das Applikationslabor für Quantensensorik in einer virtuellen Version zur Verfügung: Diese Informationsplattform enthält umfassendes Fachwissen und bietet die Möglichkeit, das Thema Quantensensorik selbständig zu erkunden und Lösungen für spezifische Anwendungsszenarien zu bewerten.

In addition to the on-site testing facilities, a virtual version of the application laboratory for quantum sensing is available to industry and research: This information platform contains comprehensive specialist knowledge and offers the opportunity to independently explore the field of quantum sensor technology and assess solutions for specific application scenarios.

Das virtuelle Applikationslabor gibt einen Überblick über die Quantensensoren, die am Fraunhofer IAF im Einsatz sind, und deren Anwendungsmöglichkeiten. Es umfasst drei Quantenmagnetometer und bietet ausführliche Fachinformationen und Erläuterungen zu den unterschiedlichen Messprinzipien der Geräte. Das Herzstück des Applikationslabors bilden die interaktiven Messungen, die Messszenarien aus den Branchen Werkstoffprüfung, Mikro- und Nanoelektronik sowie Biomedizin veranschaulichen.

The virtual application laboratory provides an overview of the quantum sensors in use at Fraunhofer IAF and their possible applications. It includes three quantum magnetometers and offers detailed technical information and explanations of the different measuring principles of the systems. At the heart of the application laboratory are the interactive measurements, which illustrate measurement scenarios from the fields of materials testing, micro- and nanoelectronics and biomedicine.



Erkunden Sie das virtuelle Applikationslabor für Quantensensorik:  
*Visit the virtual application laboratory for quantum sensing:*

[www.quantensing.de](http://www.quantensing.de)





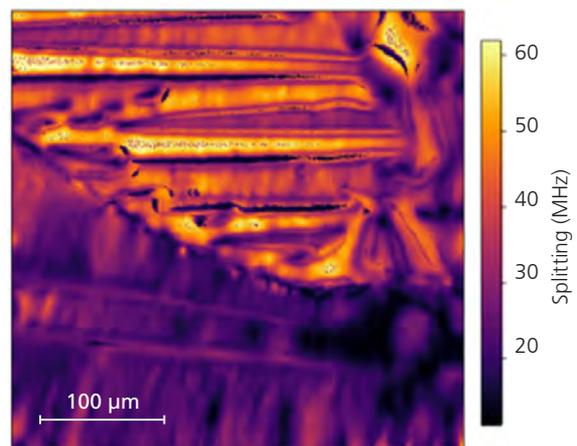
*Die virtuelle Plattform bietet gebündeltes Fachwissen und angeleitete Beispielmessungen aus den Bereichen Biomedizin, Mikro- und Nanoelektronik sowie Werkstoffprüfung  
The virtual platform offers expertise and guided sample measurements from the fields of biomedicine, micro- and nanoelectronics and materials testing*

Unternehmen und Institutionen profitieren von einem unkomplizierten Zugang zu aktuellem Fachwissen über die Funktionsweise und Einsatzgebiete von Quantensensoren. Sie haben die Möglichkeit, die Vorteile und Anwendungspotenziale der Geräte für ihre spezifischen Bedürfnisse abzuschätzen. Ergänzend dazu bietet eine Webseite umfangreiche Informationen zur Quantensensorik und deren potenziellen Anwendungen. Professionelle Ansprechpartner aus der Forschung und dem Technologietransfer stehen mit ihrer Expertise für Austausch und Beratung bereit.

Companies and institutions benefit from uncomplicated access to state-of-the-art specialist knowledge about the functionality and areas of application of quantum sensors. They have the opportunity to assess the advantages and application potential of the devices for their specific needs. In addition, a website provides extensive information on quantum sensor technology and its potential applications. Professional contacts from the fields of research and technology transfer are available to share their expertise and provide advice.

*Die Zeeman-Aufspaltungskarte, die von einer Eisenprobe gemessen wurde, zeigt bei einigen Körnern eine deutliche Korrelation zwischen der magnetischen Karte und den Korngrenzen. Diese und weitere Messergebnisse werden im virtuellen Applikationslabor gezeigt und ausgewertet.*

*Zeeman-splitting map measured from an iron sample. For some of the grains, the magnetic map shows a clear correlation to the grain boundaries. These and other measurement results are presented and evaluated in the virtual application lab.*



# Applikationslabor für Quantencomputing

---

## Application Laboratory for Quantum Computing

Das Applikationslabor für diamantbasiertes Quantencomputing bietet Forschenden und Fachleuten aus der Industrie direkten Zugang zu fortschrittlichen Quantencomputing-Technologien. Die Systeme basieren auf der Nutzung von Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant und bieten bis zu vier stark gekoppelte Qubits für eine umfassende Erforschung und Implementierung komplexer Quantenalgorithmen. Diese einzigartige Infrastruktur ermöglicht praxisnahe Experimente und Tests von Quantencomputing-Anwendungen in Bereichen wie Materialwissenschaften, Sensortechnologie und Kryptographie und zielt darauf ab, Unternehmen und Forschungseinrichtungen dabei zu unterstützen, konkrete technologische Fortschritte zu erzielen und Quantencomputing in industrielle Prozesse zu integrieren.

The application laboratory for diamond-based quantum computing provides researchers and industry professionals with direct access to advanced quantum computing technologies. The systems are based on the use of nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond and offer up to four strongly coupled qubits for in-depth exploration and implementation of complex quantum algorithms. This unique infrastructure enables hands-on experiments and testing of quantum computing applications in fields such as materials science, sensor technology, and cryptography. It aims to support companies and research institutions in achieving tangible technological advancements and integrating quantum computing into industrial processes.

*Seit Anfang 2025 verfügt das Applikationslabor über einen Quantencomputer auf Diamantbasis. Im Laufe des Jahres wird ein weiteres System hinzukommen.  
Starting 2025, the application laboratory has had a diamond-based quantum computer. Over the course of the year, an additional system will be set up.*



Newport  
Stabilizer™  
High Performance  
Laminar Flow Isolator  
7200 Series

Quantencomputing hat das Potenzial, zahlreiche Branchen grundlegend zu verändern. Besonders in der Arzneimittelentwicklung, der Optimierung von Lieferketten und der Kryptographie verspricht es erhebliche Effizienzgewinne und Innovationsschübe. Darüber hinaus birgt es die Aussicht, globale Herausforderungen anzugehen, die Medizinforschung voranzutreiben und den Einsatz erneuerbarer Energien zu optimieren.

### **Quantencomputer auf Basis von NV-Zentren in Diamant**

Quantencomputer, die auf NV-Zentren in Diamant basieren, zeichnen sich durch mehrere Vorteile aus: Sie verfügen über lange Kohärenzzeiten, was die Speicherung von Quanteninformationen über ausgedehnte Zeiträume ermöglicht. Zudem sind sie resilient gegenüber Umweltrauschen und anderen externen Einflüssen, was sie zu einer idealen Grundlage für stabile Quantenoperationen und den industriellen Einsatz macht.

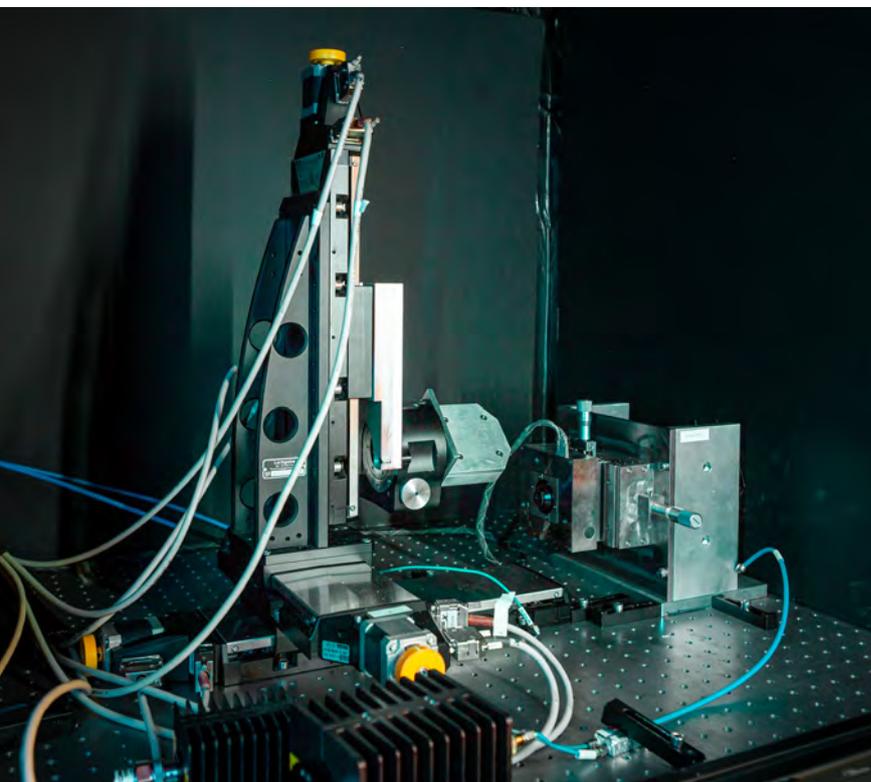
Forschende des Fraunhofer IAF arbeiten intensiv an der Entwicklung eines eigenen Quantencomputers auf Basis von NV-Zentren in Diamant (mehr dazu finden Sie ab Seite 82). Um das Potenzial von Quantencomputing in der Anwendung bereits heute erfahrbar zu machen, bietet das Applikationslabor einen praktischen Zugang zu einem diamantbasierten Quantencomputer, der NV-Zentren nutzt und bis zu vier Qubits bietet. Fachleute aus der Industrie und Forschung profitieren von der Möglichkeit, die Fähigkeiten der NV-Zentren-basierten Technologie zu erkunden, Quantenalgorithmen zu entwickeln und zu optimieren sowie reale Rechenprobleme anzugehen. Zudem bietet sich die Chance, sich mit den spezifischen Herausforderungen des Quantencomputings in verschiedenen Branchen und Anwendungen auseinanderzusetzen.

Quantum computing has the potential to fundamentally transform numerous industries. It promises significant efficiency gains and innovation boosts particularly in drug development, supply chain optimization and cryptography. Moreover, it holds the prospect of tackling global challenges, advancing medical research, and optimizing the use of renewable energy.

### **Quantum computers based on NV centers in diamond**

Quantum computers based on NV centers in diamond offer several advantages: They have long coherence times, allowing quantum information to be stored over extended periods. Additionally, they are resilient to environmental noise and other external influences, making them an ideal platform for stable quantum operations and industrial applications.

Researchers at Fraunhofer IAF are actively working on developing their own quantum computer based on NV centers in diamond (read more about our advances in this field on page 82). To make the potential of quantum computing tangible today, the application laboratory provides practical access to a diamond-based quantum computer that utilizes NV centers and offering up to four qubits. Industry and research professionals benefit from the opportunity to explore the capabilities of NV center-based technology and optimize quantum algorithms, and tackle real-world computational problems. Furthermore, they can engage with the specific challenges of quantum computing across various industries and applications.



*Der Quantenprozessor umfasst lokale Quantenregister, die aus bis zu zehn <sup>13</sup>C-Kernspins sowie einem Elektronenspin bestehen, der in ein einzelnes Farbzentrum eingebettet ist*

*The quantum processor consists of local quantum registers that are composed of an electron spin hosted by a single color center and up to ten <sup>13</sup>C nuclear spins*

### Geplante Erweiterung der Ausstattung

Im Laufe des Jahres 2025 wird das Applikationslabor um einen weiteren Quantencomputer auf Diamantbasis erweitert: Der QB-QDK2.0 ist ein hybrider quantenklassischer Rechenknoten, der neben dem Quantenprozessor (QPU) von Quantum Brilliance auch klassische Co-Prozessoren wie NVIDIA-GPUs und CPUs integriert. Diese Architektur ermöglicht es den Nutzern, verschiedene Tiefen hybrider quantenklassischer Algorithmen zu erforschen, wie zum Beispiel Techniken des maschinellen Lernens auf Quantenbasis, die nahtlos Quanten-Netzwerke und klassische neuronale Netzwerke kombinieren.

### Zugang für ein breites Publikum

Um die Vorteile des Quantencomputings für die Industrie nutzbar zu machen, öffnet das Fraunhofer IAF diese hochmoderne Technologie für ein breites Publikum und schlägt damit eine Brücke zwischen theoretischen Konzepten und praktischer Umsetzung.

Ein weiteres zentrales Ziel ist die Förderung der Entwicklung von Fachkräften im Bereich Quantencomputing. Das Applikationslabor bietet ein erstes Testfeld für Experimente und Innovationen mit diamantbasierter Computing-Technologie und ermöglicht es angehenden Fachleuten, ihr Wissen und ihre Fähigkeiten zu vertiefen.

Trotz der vielversprechenden Potenziale des Quantencomputings steht die Technologie derzeit vor erheblichen Herausforderungen – darunter Fehlerkorrektur, Skalierbarkeit und Robustheit der Hardware. In unserem Applikationslabor arbeiten unsere Forschenden intensiv daran, diese Herausforderungen anzugehen und Lösungen zu entwickeln, um den industriellen Einsatz dieser bahnbrechenden Technologie zu beschleunigen.

### Planned Expansion of Equipment

In the course of 2025, the application laboratory will be expanded with an additional diamond-based quantum computer: The QB-QDK2.0 is a hybrid quantum-classical computing node that integrates not only the quantum processing unit (QPU) from Quantum Brilliance but also classical co-processors such as NVIDIA GPUs and CPUs. This architecture enables users to explore various depths of hybrid quantum-classical algorithms, such as quantum-based machine learning techniques that seamlessly combine quantum and classical neural networks.

### Access for a broad community

To make the benefits of quantum computing accessible to industry, Fraunhofer IAF is opening up this cutting-edge technology to a broad audience, bridging the gap between theoretical concepts and practical implementation.

Another key objective is to foster the development of skilled professionals in the field of quantum computing. The application laboratory serves as an initial testbed for experiments and innovations with diamond-based computing technology, allowing future experts to deepen their knowledge and skills.

Despite its promising potential, quantum computing currently faces significant challenges, including error correction, scalability, and hardware robustness. In our application laboratory, researchers are working intensively to address these challenges and develop solutions that will accelerate the industrial use of this groundbreaking technology.

Kontaktieren Sie uns bei Interesse an  
der Nutzung unserer Quantencomputer:  
*Please contact us if you are interested  
in the use of our quantum computers:*

[quantum@iaf.fraunhofer.de](mailto:quantum@iaf.fraunhofer.de)



# Applikationslabor für IR-Laser-Spektroskopie

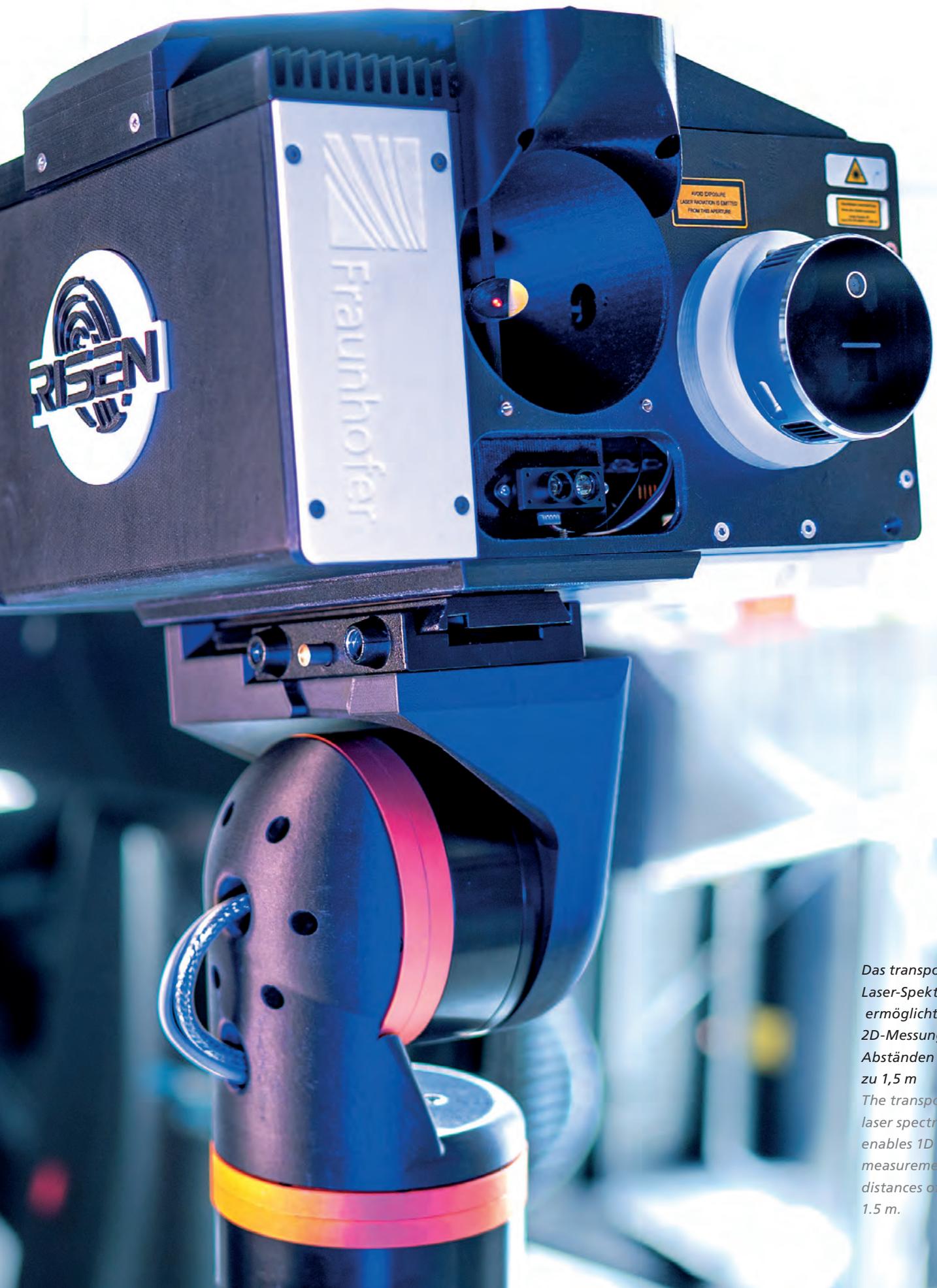
## Application Laboratory for Infrared Laser Spectroscopy

Im Applikationslabor für Infrarot-(IR-)Spektroskopie demonstrieren wir verschiedene Anwendungsfälle unserer schnell spektral durchstimmbaren Quantenkaskadenlaser (QCLs). Diese Technologie ermöglicht sehr schnelle und extrem breitbandige IR-Lasermesstechnik im mittleren Infrarotbereich von 4 bis 12  $\mu\text{m}$  ( $\sim 800$  bis  $2500\text{ cm}^{-1}$ ). In unserem Labor erproben wir die industrielle Skalierung von verschiedenen IR-Spektroskopiemethoden, die bisher nur strichprobenartig zur Qualitätssicherung eingesetzt werden.

In the application laboratory for infrared (IR) laser spectroscopy, we demonstrate various use cases for our rapidly tunable quantum cascade lasers (QCLs), which enable very fast and extremely broadband IR laser measurement technology in the mid-infrared range of 4 to 12  $\mu\text{m}$  ( $\sim 800$ – $2500\text{ cm}^{-1}$ ). In our laboratory, we are testing the industrial scaling of various IR spectroscopy methods that have so far only been used sporadically for quality assurance.

Während gängige Verfahren auf der FTIR-Spektroskopie basieren (Fourier-Transform-Infrarot), bietet die QCL-Spektroskopie den entscheidenden Vorteil einer deutlich höheren Brillanz, die signifikant reduzierte Messzeiten mit Zeitaufösungen bis in den Millisekundenbereich für komplette IR-Spektren sowie kontaktlose und abstandfähige Messungen ermöglicht. In- und online-fähige Messverfahren sind damit ebenso umsetzbar. In der Prozessanalyse oder bei der Entwicklung neuer Herstellungsverfahren, etwa in der Chemie- oder Pharmaindustrie, stellt dies einen bedeutenden potenziellen Effizienz- und Kostengewinn dar. Partner und Kunden aus Industrie und Wissenschaft haben die Möglichkeit, die QCL-Technologie des Fraunhofer IAF im Applikationslabor hautnah zu erleben. Die dabei verwendeten Messmethoden schließen Transmission- und Rückstreu-Spektroskopie, ATR- (attenuated total reflection) bzw. Mikrofluidik-Spektroskopie, QCL-Mikroskopie und die Point-of-Interest-(POI)-Spektroskopie ein.

While common methods are based on FTIR spectroscopy (Fourier-transform infrared), QCL spectroscopy has the advantage of significantly higher brightness, greatly reduced measurement times, with time resolutions down to the millisecond range for complete IR spectra, as well as enabling contactless and distance-capable measurements. Inline and online-capable measurement processes are thus feasible. In process analysis or in the development of new manufacturing methods, for example in the chemical or pharmaceutical industry, this represents a significant potential gain in efficiency and cost. Partners and customers from industry and science have the opportunity to experience the QCL technology of Fraunhofer IAF up close in the application laboratory. The measurement methods used include transmission and backscatter spectroscopy, ATR (attenuated total reflection) or microfluidic spectroscopy, QCL microscopy, and point-of-interest (POI) spectroscopy.



*Das transportable IR-Laser-Spektrometer ermöglicht 1D- und 2D-Messungen in Abständen von bis zu 1,5 m*

*The transportable IR laser spectrometer enables 1D and 2D measurements at distances of up to 1.5 m.*

### POI-Scanner

Unser Point-of-Interest-System demonstriert die inline-fähige Qualitätssicherung in der pharmazeutischen Verpackungsindustrie. Bei Prozessen, in denen Tabletten unterschiedlicher Zusammensetzung auf derselben Linie laufen, oder bei der patientenspezifischen Verblisterung, wenn sich Tabletten mittels kamerabasierter Systeme nicht eindeutig unterscheiden lassen, ergänzt unser System die Informationen um den IR-Fingerabdruck jeder einzelnen Tablette.

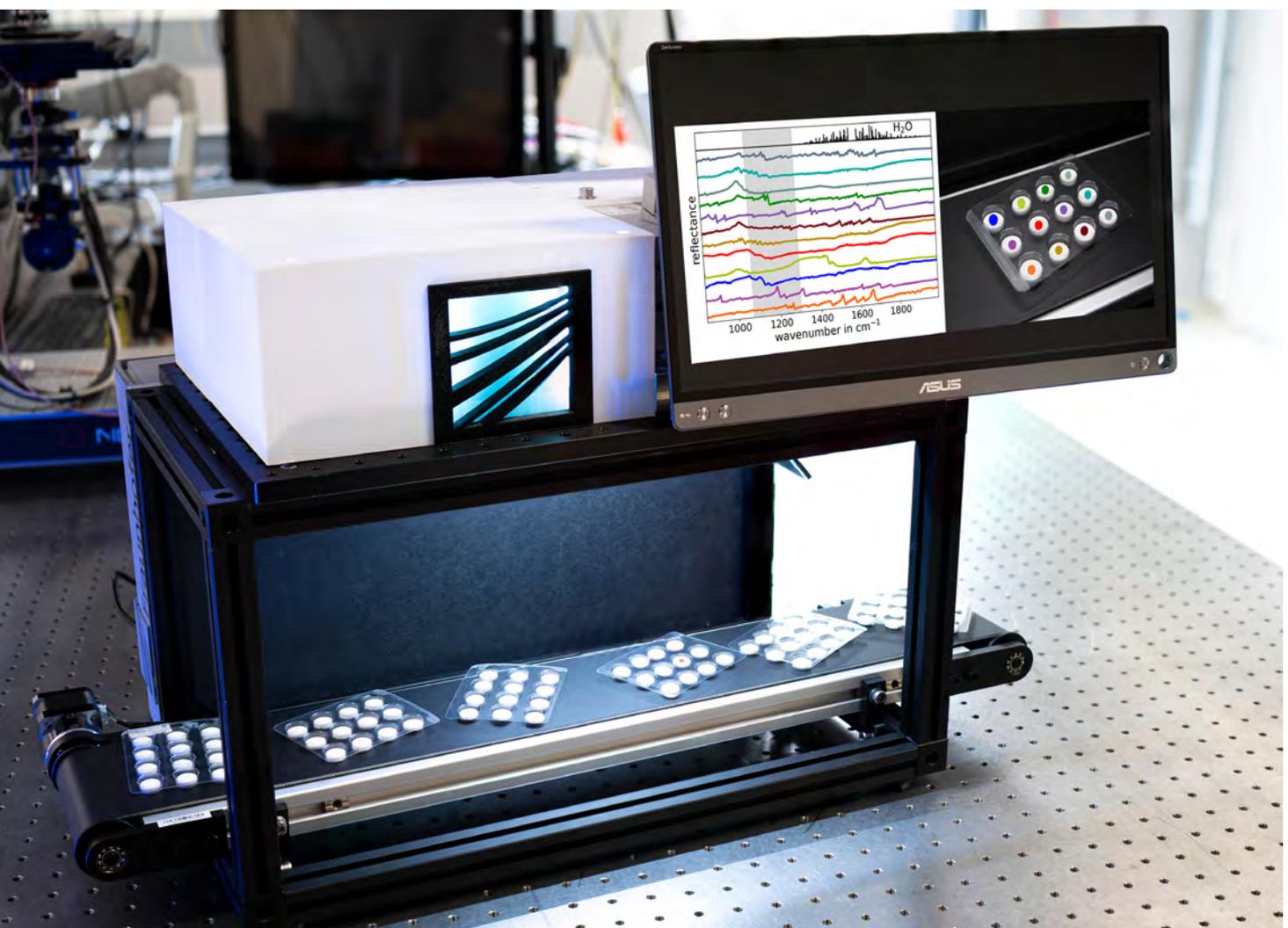
Mithilfe maschinellen Sehens erkennt das System den Tablettenblister sowie die Position jeder einzelnen Tablette im Blister und zeichnet jeweils ein Infrarot-Rückstreuungsspektrum auf. Die Klassifizierung erfolgt auf Basis eines neuronalen Netzes. So wird ein 12er-Tablettenblister in weniger als 0,3 Sekunden überprüft.

### POI scanner

Our point-of-interest system demonstrates inline quality assurance in the pharmaceutical packaging industry. For processes where tablets of different compositions run on the same line, or in patient-specific blister packaging where tablets cannot be clearly distinguished using visible camera-based systems, our system complements the information with the IR fingerprint of each tablet.

Using machine vision, the system detects the blister package and the position of each tablet inside the blister and records an infrared backscatter spectrum of each. The classification is done based on a neural network. In this way, a 12-tablet blister is inspected in less than 0.3 seconds.

*Der POI-Scanner nutzt maschinelles Sehen, um jede einzelne Tablette im Blister zu erkennen, das jeweilige Infrarot-Rückstreuungsspektrum zu erfassen und anhand dessen die Substanz zu identifizieren  
The POI scanner uses machine vision to detect each tablet inside the blister, capture the corresponding infrared backscatter spectrum, and identify the substance based on this data*



### Transportables 1D- und 2D-IR-Laser-Spektrometer

Die am Fraunhofer IAF entwickelte MOEMS-EC-QCL-Technologie zeichnet sich nicht nur durch ihre hohe Messgeschwindigkeit, sondern auch durch ihre Robustheit und geringe Baugröße aus. Dadurch eignet sie sich ideal für kompakte portable oder handgehaltene Systeme, bei denen unweigerlich Bewegungen auftreten und damit der Messspot wandert. Diese Technologie kann beispielsweise bei forensischen Tatortuntersuchungen unterstützen, indem Einsatzkräfte direkt vor Ort schnelle, kontaktlose und zerstörungsfreie Messungen vornehmen, um Substanzen zu identifizieren.

Im Applikationslabor steht ein IR-Laserspektroskopie-Demonstrator für die kontaktlose IR-Laserrückstreuungsspektroskopie an Feststoffen zur Verfügung. Der Demonstrator besitzt eine räumliche Scanfähigkeit (1D und 2D), sodass hyperspektrale und datenfusionierte Visualisierungen einer Szene erstellt werden können.

### Multicore-Lasersysteme

Die Stärke der MOEMS-EC-QCLs ist die spektrale Messgeschwindigkeit von einem Kilohertz. Die spektrale Abdeckung ist im Vergleich zur FTIR-Spektroskopie jedoch begrenzt. Um diese zu vergrößern, ermöglicht die Lasertechnologie des Fraunhofer IAF ein Multiplexing – ein Verfahren, bei dem mehrere, sich spektral ergänzende Module miteinander gekoppelt werden. So wird die spektrale Abdeckung vergrößert, ohne dass die Messgeschwindigkeit reduziert wird. Im Vergleich zu konkurrierenden Ansätzen sind die daraus resultierenden Multicore-Systeme noch immer sehr kompakt. Im Applikationslabor stehen solche Mehrkernsysteme für Demonstrationen zur Verfügung.

### Portable 1D and 2D IR laser spectrometer

The MOEMS-EC-QCL technology developed at Fraunhofer IAF is characterized not only by its high measurement speed but also by its robustness and small size. This makes it ideally suited for compact portable or handheld systems, where movements inevitably occur and thus the measurement spot shifts. For example, this technology can support forensic crime scene investigations by enabling on-site personnel to make rapid, non-contact, non-destructive measurements directly on site to identify substances.

In the application laboratory, an IR laser spectroscopy demonstrator for contactless IR laser backscatter spectroscopy of solids is available. The demonstrator has spatial (1D and 2D) scanning capability, allowing for hyperspectral and data-fused visualizations of a scene to be created.

### Multicore laser systems

The strength of MOEMS EC QCLs is the spectral measurement speed of one kilohertz. However, the spectral coverage is limited compared to FTIR spectroscopy. To increase the spectral coverage, Fraunhofer IAF's laser technology enables multiplexing — a process in which several spectrally complementary modules are coupled together. This increases the spectral coverage without reducing the measurement speed. Compared to competing approaches, the resulting multicore systems are very compact. Such multicore systems are available for demonstrations in the application laboratory.

Kontaktieren Sie uns bei Interesse an der  
Demonstration unserer IR-Lasertechnologien:  
*Please contact us if you are interested in a  
demonstration of our IR laser technologies:*

laser@iaf.fraunhofer.de



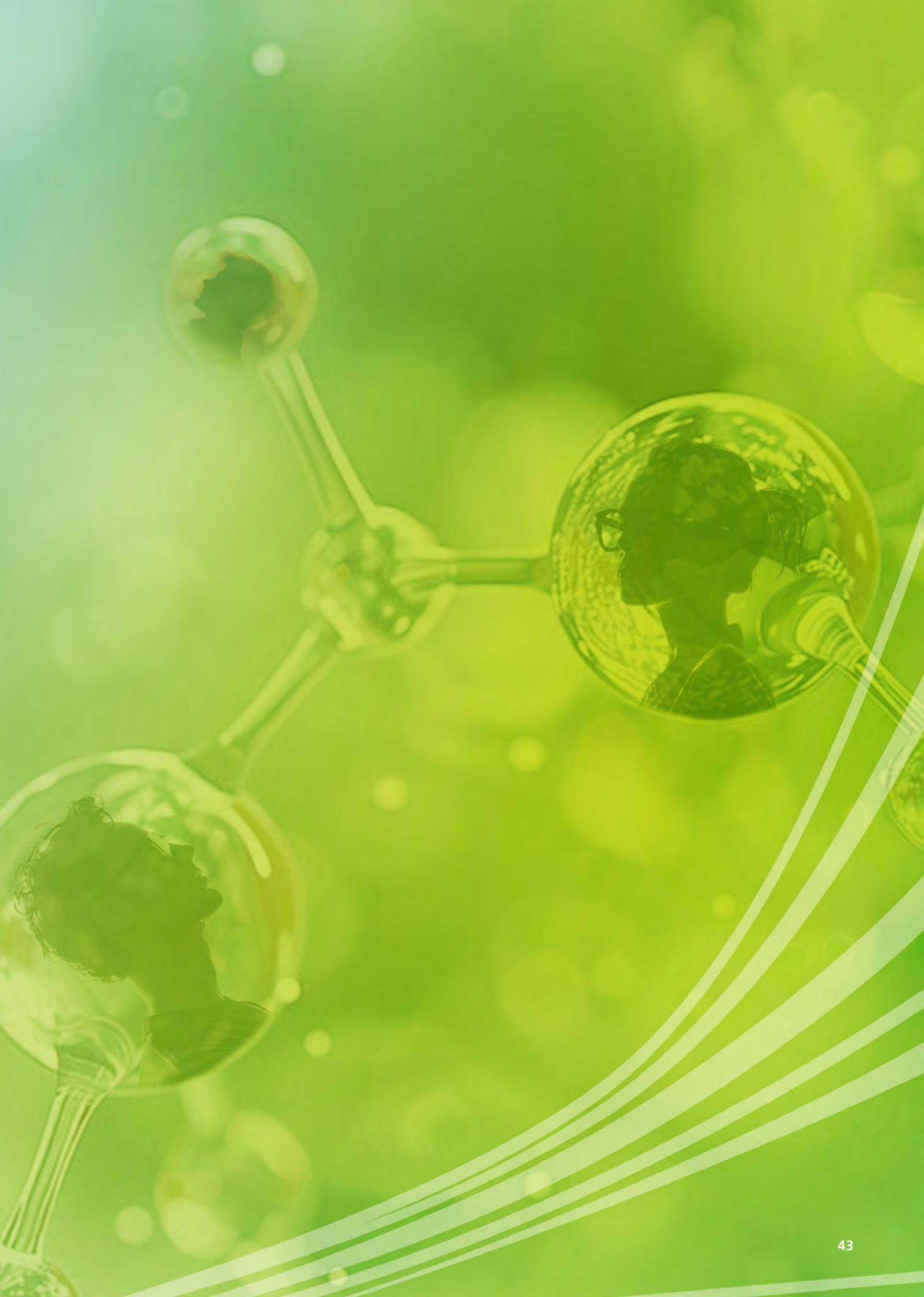
# Transfer durch Köpfe

---

## Transfer Through People

*Der Schlüssel zum Transfer von Technologien und Wissen sind die Menschen. Sie bringen die Fraunhofer-DNA, den Transfergedanken, zum Leben. Wir stellen aktuelle sowie ehemalige Kolleginnen und Kollegen vor, die ihre Erfahrungen und Kenntnisse weitertragen – in die Industrie und zurück.*

*People are the key to the transfer of technology and knowledge. They embody the Fraunhofer DNA, the transfer concept, and bring it to life. We introduce current and former colleagues who pass on their experience and knowledge from institute to industry and back again.*



# »Von der internationalen Expertise kann jedes Industrieunternehmen nur profitieren.«

“Industrial companies can only benefit from such international expertise.”

Dr. Markus Rösch war neun Jahre lang als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IAF tätig, bevor er die Forschung und Deutschland verließ, um in einem französischen Industrieunternehmen sein Know-how einzubringen. Vor zwei Jahren kehrte er ans Fraunhofer IAF zurück. Im Interview spricht er über seinen Werdegang, der ihm in der Industrie zugutekam, und jene Erkenntnisse, die er zurück ans Institut brachte.

Dr. Markus Rösch worked as a researcher at Fraunhofer IAF for nine years before leaving research and Germany to contribute his know-how to a French company. Two years ago, he returned to Fraunhofer IAF. In this interview, he talks about his career, that benefited him in industry, and the insights he brought back to the institute.

## **An welchen Themen hast du als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IAF geforscht?**

Bei meiner ersten Stelle am Fraunhofer IAF habe ich mich mit Hochfrequenztechnik beschäftigt – mit dem Aufbau der Chips, die hier am Institut hergestellt werden, aber auch mit Antennendesign und speziellen Designs für das Packaging. Das ist alles ziemlich komplex, da bei sehr hohen Frequenzen, wie sie hier erforscht werden, viel mehr Parameter beachtet werden müssen. Dadurch habe ich mich auch mit Radar beschäftigt und durch die Projekte sehr viel Kontakt zu Industriekunden gewonnen, was mir großen Spaß bereitet hat.

## **Warum hast du dich dann entschieden in die Industrie zu gehen?**

Es waren vor allem familiäre Gründe, die uns dazu bewogen haben, nach Frankreich zu gehen. Und da ich nochmal etwas anderes machen wollte, bin ich dort nicht in die Forschung, sondern in die Industrie gegangen. In einem mittelständischen Unternehmen mit Sitz in Grenoble hatte ich eine Stelle im Bereich Projektmanagement übernommen und dort zwei Jahre verbracht.

## **Which topics did you work on as a researcher at Fraunhofer IAF?**

In my first job at Fraunhofer IAF, I worked in the field of high-frequency technology. My focus were the structures of the chips that are manufactured here at the institute, but also antenna design and special designs for packaging. This is all quite complex because at very high frequencies, as they are researched here, many more parameters have to be considered. This is why I also looked at radar and were able to establish a lot of contacts with industrial clients through the projects, which I really enjoyed.

## **Then why did you decide to go into industry?**

It was mainly family reasons that led us to move to France. And since I wanted to do something different, I didn't go into research there, but into industry. I took a job in project management at a medium-sized company based in Grenoble and spent two years there.

### Welche Erfahrung aus deiner Tätigkeit am Fraunhofer IAF konntest du in die Industrie mitbringen?

Die Erfahrung, in einem großen internationalen Umfeld zu arbeiten, war auf jeden Fall von großem Vorteil. Am Fraunhofer IAF war ich in viele Projekte aus ganz Europa involviert – von Schweden über Frankreich, Spanien und Finnland bis nach Italien – darüber hinaus in Projekte in den USA. Von solch einer internationalen Expertise kann jedes Industrieunternehmen nur profitieren. Man weiß, wie man mit den unterschiedlichen Kulturen umgeht und wie man die Leute am besten anspricht. Das ist in der Industrie sehr wichtig.

### Der Kreis schließt sich – welches Know-how aus der Industrie hast du jetzt wieder ans Fraunhofer IAF gebracht?

Dort konnte ich umfassende Erfahrungen in den Bereichen Prozesse und Projektmanagement sammeln. Ich habe neue Tools kennengelernt, die im industriellen Umfeld unerlässlich sind, da man enger mit den Kunden zusammenarbeitet und maßgeschneiderte Produkte entwickelt. Auch im Hinblick auf die Kundenbeziehung während der Produktentwicklung habe ich wertvolle Erkenntnisse gewonnen.

### Und was ist nun dein Tätigkeitsbereich?

Derzeit bin ich hauptsächlich im Projektmanagement tätig – ein Bereich, den ich bei meiner zweiten Anstellung bewusst gewählt habe, da er mir nicht nur großen Spaß macht, sondern auch zahlreiche Möglichkeiten bietet, mit verschiedenen Abteilungen und Geschäftsfeldern zusammenzuarbeiten.

Ein weiterer Schwerpunkt meiner Arbeit ist die Etablierung des Projektmanagements am Institut. Diesen Prozess gestalte ich gemeinsam mit der neuen Institutsleitung, Dr. Patricie Merkert. Sie bringt durch ihre Erfahrung in der Industrie wertvolle Impulse ein und möchte das Thema am Fraunhofer IAF gezielt vorantreiben. In dieser Rolle fungiere ich als Schnittstelle zwischen ihr und dem Rest des Instituts, um Prozesse zu vereinheitlichen und neue Strukturen zu etablieren – mit dem Ziel, unser Projektmanagement noch effizienter zu gestalten.

### What experience from your work at Fraunhofer IAF have you been able to utilize most in industry?

The experience of working in a large international environment was definitely a great advantage. At Fraunhofer IAF, I was involved in many projects across Europe — from Sweden to France, Spain and Finland to Italy — and also in projects in the US. Any industrial company can only benefit from such international expertise. You know how to deal with different cultures and how to best address people. This is very important in industry.

### There and back again—what experiences from industry have you brought back to Fraunhofer IAF?

I was able to gain extensive experience in the areas of processes and project management. I got to know new tools that are essential in an industrial environment because you work more closely with customers and develop customized products. I also gained valuable insights into customer relations during product development.

### And what are you doing now at Fraunhofer IAF?

Currently, I am mainly involved in project management — an area that I deliberately chose for my second position because I not only enjoy it very much, but it also offers me numerous opportunities to work with different departments and business units.

Another focus of my work is the establishment of project management at the institute. I am shaping this process together with the new institute director, Dr. Patricie Merkert. She brings valuable impulses from her experience in industry and is keen to advance the topic at Fraunhofer IAF. In this role, I act as an interface between her and the rest of the institute in order to standardize processes and establish new structures, with the aim of making our project management even more efficient.



Sehen Sie sich das Video-Interview mit Markus Rösch online an:  
*Check out the video interview with Markus Rösch online:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-45](https://s.fhg.de/iaf-jb24-45)



# Wissenstransfer durch ehemalige Kolleginnen und Kollegen

## Knowledge Transfer Through Former Colleagues

**Zahlreiche Forschende haben ihre Karriere am Fraunhofer IAF begonnen, um anschließend ihre Erfahrungen und Kenntnisse in der Industrie oder an anderen wissenschaftlichen Einrichtungen einzubringen. Im Folgenden teilen Ehemalige, welche Erfahrungen sie als besonders wertvoll für ihren weiteren beruflichen Werdegang erachtet haben.**

Numerous researchers began their careers at Fraunhofer IAF before going on to contribute their experience and expertise to industry or other scientific institutions. In the following, former colleagues share which experiences they considered particularly valuable for their further professional career.



**Dr. Robert Elvis Makon**

Project Manager Mixed-Signal ASIC / MMIC Development, Rohde & Schwarz

*»Während meiner Promotion am Fraunhofer IAF sammelte ich wertvolle Erfahrungen darin, innovative Ideen von der Theorie in die Praxis umzusetzen. Dies umfasste die Entwicklung eines tiefgehenden Verständnisses der erforderlichen technologischen Grundlagen, den Aufbau einer geeigneten Wertschöpfungskette und die Arbeit an der Spitze technologischer Innovationen.*

*Zudem erlebte ich die Vorteile eines starken Kundenfokus und der Zusammenarbeit mit zentralen Akteuren aus Forschung und Industrie, um das Innovationsniveau in Projekten zu steigern. Diese Erfahrung ist für meine Karriere in der T&M-Branche von entscheidender Bedeutung, da eine ausgeprägte Innovationskraft essenziell ist, um Kunden bei der Entwicklung zukünftiger Technologiestandards zu unterstützen.«*

*“During my PhD at Fraunhofer IAF, I gained invaluable experience in taking innovative ideas from theory to practice. It involved developing a profound understanding of the required technology pillars, setting up the appropriate value chain, and working at the forefront of technological innovation.*

*Moreover, I witnessed the benefits of focusing on customer value and collaborating with key actors from research and industry to boost the innovation level in project work. This experience is instrumental in my industry career in the T&M sector, where a strong innovative drive is crucial for supporting customers in developing tomorrow’s technology standards.”*

*»Meine fünfjährige Forschungstätigkeit am Fraunhofer IAF war eine bereichernde Erfahrung für meine Entwicklung als Ingenieurin. Sie hat meine Karriere gefördert, da ich wertvolle Fähigkeiten und Kenntnisse vermittelt bekommen habe, die für meine Rolle als Dozentin an der Universidad de Cantabria von großer Bedeutung sind. Ich arbeitete an mHEMT-MMIC-Technologien und erlangte ein tiefes Verständnis für fortschrittliche Technologien. Dieses Fachwissen ermöglichte es mir, an weiteren Forschungsinitiativen teilzunehmen, insbesondere an der Entwicklung rauscharmer Empfänger für die Radioastronomie.*

*Darüber hinaus lehrte mich meine Zeit am Fraunhofer IAF die Bedeutung von Teamarbeit bei der Umsetzung anspruchsvoller Projekte. Die Zusammenarbeit mit talentierten Kolleginnen und Kollegen in vielfältigen und dynamischen Umgebungen half mir, meine Kommunikations- und Kooperationsfähigkeiten weiterzuentwickeln. Die fortlaufenden beruflichen Beziehungen haben eine entscheidende Rolle bei der Akquise neuer Forschungsprojekte gespielt. Beispielsweise bin ich derzeit an einem von der ESA finanzierten Projekt beteiligt, in dem wir gemeinsam mit dem Fraunhofer IAF, spanischen Industrieunternehmen und der Universidad de Cantabria arbeiten.«*

*“My research at Fraunhofer IAF over five years was an enriching experience for my development as an engineer. It enhanced my career by providing valuable skills and knowledge important for my role as a Lecturer at the Universidad de Cantabria. I worked on mHEMT MMIC technologies, gaining a deep understanding of advanced technologies. This expertise helped me participate in further research initiatives, especially in developing low-noise receivers for radio astronomy.*

*Additionally, my time at Fraunhofer IAF taught me the importance of teamwork in completing detailed projects. Collaborating with talented colleagues in diverse and dynamic environments allowed me to refine my communication and collaborative skills. The ongoing professional relationships have played a crucial role in securing new research projects. For example, I am currently involved in a project funded by the ESA, in which we are working alongside Fraunhofer IAF, Spanish industrial companies, and the Universidad de Cantabria.”*



**Dr. Beatriz Aja Abelán**

Associate Professor in the Department of Communications Engineering at the University of Cantabria, Spain



»Am Fraunhofer IAF kann man entlang der Wertschöpfungskette vom Design bis zur Herstellung von III-V-Halbleitern alle Stellgrößen für die Performance eines Chips beeinflussen. In meiner Zeit am Fraunhofer IAF habe ich bereits gelernt, dass ein Chip nur dann den Weg in die Applikation finden wird, wenn man durch enge Partnerschaft mit Systemhäusern in Industrie oder Forschung die Spezifikationen eng abstimmt. Ergeben sich daraus systemische Vorteile UND stimmen die kommerziellen Rahmenbedingungen, dann können bahnbrechende Innovationen entstehen.«

“The complete manufacturing chain from design towards processing of integrated circuits offers access to all parameters affecting the chip performance. During my time at Fraunhofer IAF I already experienced that the best chip will only make its way into an application if the spec definition is embedded into system concepts of partners in industry or research. Disruptive innovations will only materialize if the chip performance provides a system benefit AND if the commercials meet expectations.”

**Dr. Ludger Verweyen**

Vice President RF Communications,  
Infineon Technologies AG

»Seit 1996 pflege ich eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF. Diese Partnerschaft umfasste mehrjährige Aufenthalte sowie eine erfolgreiche Zusammenarbeit über die Distanz. Diese Gelegenheit ermöglichte es mir, mit führenden Forschenden zusammenzuarbeiten und Zugang zu hochmoderner Technologie sowie erstklassigen Messlaboren zu erhalten. Besonders bereichernd war zudem die Mitbetreuung der Doktorarbeit von Dr. Amado, einem ehemaligen Studenten der Universidad de Extremadura (Spanien). Insgesamt hat diese Kooperation meine akademische Laufbahn maßgeblich geprägt.«

“I have enjoyed a successful cooperation with Fraunhofer IAF since 1996. This partnership involved over three years of stays at the institute, as well as successful remote cooperation. This opportunity allowed me to collaborate with top scientists and have access to highly advanced technology and measurement laboratories. Also, the co-supervision of the PhD thesis of Dr. Amado, who was a former student from the Universidad de Extremadura (Spain), was very enriching. Overall, cooperation with Fraunhofer IAF has significantly shaped my academic career.”



**Dr. Yolanda Campos Roca**

Associate Professor at the Department of  
Computer and Communication Technologies,  
University of Extremadura, Spain

*»Die Fraunhofer-Welt ist geprägt von geballtem Fachwissen und in Deutschland beispielloser Infrastruktur für Forschung und Entwicklung. Sie positioniert sich zwischen der Forschung an unseren Forschungsuniversitäten und den Entwicklungsabteilungen unserer Industrie und nutzt die Stärken beider Welten. Zahlreiches Stammpersonal und eine reiche Grund- und Drittmittelförderung sorgen für ein einzigartiges Umfeld für einen Nachwuchswissenschaftler, der wie ich damals als Postdoc ein hervorragendes Umfeld für eine Karriere in der Forschung vorfindet. Am Fraunhofer IAF konnte ich mit einer der weltweit leistungsfähigsten Halbleitertechnologien arbeiten und publizieren, Projektverantwortung übernehmen, und von erfahrenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern lernen.*

*Ich durfte Teil einer weltweit sichtbaren Forschungsgruppe werden und konnte unsere Errungenschaften auf internationalen Fachtagungen vorstellen und so mein berufliches Netzwerk sehr schnell ausbauen. Die gute Stimmung in der Gruppe sorgte für ein sehr angenehmes Arbeitsumfeld, an das ich mich gern zurückerinnere. Die vergleichsweise unbesorgte Zeit am Fraunhofer IAF behalte ich in dankbarer Erinnerung und freue mich immer, wenn ich im Rahmen von Projektkooperationen an meine ehemalige Wirkungsstätte zurückkomme und die Kolleginnen und Kollegen wiedersehen kann.«*

*“The Fraunhofer world is characterized by vast expertise and an unparalleled research and development infrastructure in Germany. It positions itself between research at our universities and the development departments of our industry, leveraging the strengths of both worlds. A large permanent staff and substantial basic and third-party funding create a unique environment for young researchers. As a postdoc, I found excellent conditions for a career in research. At Fraunhofer IAF, I had the opportunity to work with and publish on one of the world’s most advanced semiconductor technologies, take on project responsibilities, and learn from experienced scientists.*

*I was fortunate to become part of a globally recognized research group and to present our achievements at international conferences, allowing me to rapidly expand my professional network. The positive atmosphere within the group made for a very pleasant working environment, which I remember fondly. I look back on my relatively carefree time at Fraunhofer IAF with gratitude and always appreciate the opportunity to return to my former workplace as part of project collaborations and reconnect with former colleagues.”*



**Prof. Dr.-Ing. Ingmar Kalfass**

Director and Head of the Institute for Robust Power Semiconductor Systems, University of Stuttgart



**Dr. Tingpeng Luo**

Senior researcher at the Technology Innovation Institute, Abu Dhabi, United Arab Emirates

»Meine Promotions- und Postdoc-Jahre am Fraunhofer IAF haben alles geprägt, was ich heute tue. Mit der Unterstützung des Instituts konnte ich Expertise im Bereich Quantensensorik aufbauen, innovative Erkenntnisse veröffentlichen, die zur wissenschaftlichen Gemeinschaft beitragen, und – am wichtigsten – ich wurde darin ausgebildet, eine unabhängige Forscherin zu werden. Durch die Zusammenarbeit mit verlässlichen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer IAF lernte ich den Wert gesunder Teamdynamiken kennen und konnte langfristige berufliche Verbindungen aufbauen. Der Übergang von der Doktorandin zum Senior Researcher ermöglichte mir zudem tiefere Einblicke in wissenschaftliche Projektplanungsprozesse.

Der Ruf der Fraunhofer-Gesellschaft stärkt weiterhin mein wissenschaftliches Ansehen. All diese Erfahrungen haben mir die Fähigkeit verliehen, in der Forschung tiefe technische Einblicke mit praxisnahen Visionen zu verbinden.«

“My PhD and postdoc years at Fraunhofer IAF shaped everything I do today. With the support of the institute, I built expertise in quantum sensing, published innovations that contribute to the community, and most importantly — I was trained to become an independent researcher. Working with reliable colleagues at Fraunhofer IAF, I learned the value of healthy team dynamics and built lasting professional connections. Transitioning from graduate to senior researcher, I gained deeper insight into scientific project planning processes.

The reputation of the Fraunhofer-Gesellschaft continues to enhance my credibility. All these experiences helped me develop the ability to lead research with both technical depth and practical vision.”

»Meine Zeit am Fraunhofer IAF war geprägt von interdisziplinärer Zusammenarbeit, internationalen Kooperationen und Forschung auf dem Gebiet der Quantensensorik und Laserswellenmagnetometrie. Die enge Verbindung zwischen Wissenschaft und Industrie ermöglichte mir, wertvolle Erfahrungen in der Umsetzung innovativer Technologien zu sammeln. Die gewonnenen praktischen Erkenntnisse haben meinen beruflichen Weg beeinflusst und bilden eine wichtige Grundlage für meine heutige Tätigkeit in der Industrie.«

“My time at Fraunhofer IAF was characterized by interdisciplinary collaboration, international partnerships, and research in the fields of quantum sensing and laser threshold magnetometry. The close connection between science and industry allowed me to gain valuable experience in the implementation of innovative technologies. The practical insights I gained have influenced my career path and form an important foundation for my current work in industry”.



**Dr. Felix Hahl**

Development Engineer at Bosch Quantum Sensing



»Während meiner Zeit am Fraunhofer IAF prägten mich besonders die Teilnahme an großen nationalen und EU-Verbundprojekten, insbesondere die Zusammenarbeit mit den Industriepartnern. Durch Fachkonferenzen und gemeinsame Forschung baute ich ein wertvolles Netzwerk auf, das mich bis heute begleitet und unterstützt. Die enge Zusammenarbeit mit der Industrie zeigte mir, dass mein Interesse vor allem in der Umsetzung technischer Ideen in serienreife Produkte liegt – ein zentraler Aspekt meiner beruflichen Laufbahn.«

“During my time at Fraunhofer IAF, I was particularly shaped by my participation in large national and EU collaborative projects, especially through my collaboration with industry partners. Through technical conferences and joint research, I built a valuable network that continues to support me to this day. Working closely with the industry made me realize that my main interest lies in transforming technical ideas into market-ready products — a key aspect of my professional career.”

**Dr. Marc Kelemen**

Director Semiconductor at DILAS Diodenlaser

»Nach meiner Promotion verbrachte ich ein Jahr als Gastwissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg. Dies verschaffte mir unschätzbare Erfahrungen in der Entwicklung und Messung von ultra-hochfrequenten elektronischen und optoelektronischen Schaltkreisen. Diese Erfahrung prägte meine Karriere und ermöglichte mir spannende Tätigkeiten als Entwickler, Manager und schließlich als Principal/Fellow bei Nokia Bell Labs in Murray Hill, NJ, USA.

Selbst heute nutze ich in meinem Kurs zur Mikrowellenschaltungstechnik an der Columbia University gerne grundlegende Millimeterwellen-Designprinzipien anhand von MMICs, die ich während meiner Zeit am Fraunhofer IAF entworfen und veröffentlicht habe. Dazu gehören kompakte koplanare Wellenleiter-Leistungsverstärker im Ka-Band sowie integrierte Langwellenlängen-Photoreceiver, die bei 60 GHz arbeiten. Es freut mich immer, ehemalige Fraunhofer-Kollegen auf Konferenzen wiederzutreffen, und es ist inspirierend zu sehen, dass das Fraunhofer IAF weiterhin eines der weltweit führenden Forschungsinstitute für Millimeterwellen- und Sub-THz-MMIC-Technologie ist.«

“Spending one year as a Guest Scientist at the Fraunhofer Institute for Applied Physics IAF in Freiburg after completing my PhD provided me with invaluable experience in the design and measurement of ultra-high-speed electronic and opto-electronic circuits. This experience helped shape my career, leading me to interesting roles as a designer, manager, and now Principal/Fellow at Nokia Bell Labs in Murray Hill, NJ, USA.

Even today, in my Microwave Circuit Design course at Columbia University, I like to demonstrate fundamental millimeter-wave design principles using MMICs that I designed and published during my time at Fraunhofer IAF. These designs include compact coplanar waveguide power amplifiers at Ka-band and integrated long-wavelength photoreceivers operating at 60 GHz. I’m always pleased to reconnect with former Fraunhofer colleagues at conferences, and it’s inspiring to see that the Fraunhofer IAF continues to be one of the world’s leading research institutes in millimeter-wave and sub-THz MMIC technology.”



**Dr. Yves Bayens**

Principal Scientist at Nokia Bell Labs,  
New Jersey, USA

»An meiner Arbeit begeistert mich,  
wie viel ich tun kann.«

---

“What I love about my work is how much I get to do.”

Teresa Duarte ist Doktorandin am Fraunhofer IAF und arbeitet in der Gruppe Nitride innerhalb der Abteilung Epitaxie. Sie schloss ihr Studium in Physics Engineering 2022 an der Universidade de Aveiro (Portugal) ab und arbeitete dort als wissenschaftliche Mitarbeiterin, bis sie 2024 zum Fraunhofer IAF kam.

Teresa Duarte is a PhD student at Fraunhofer IAF, working in the Nitrides Group of the Epitaxy Department. She graduated in Physics Engineering in 2022 at Universidade de Aveiro, Portugal, and worked as a research fellow there until she came to Fraunhofer IAF in 2024.

#### **Wie sieht dein typischer Arbeitstag am Fraunhofer IAF aus?**

Mein typischer Tag beginnt damit, dass ich ins Büro gehe, meine Straßenschuhe gegen meine äußerst bequemen Laborschuhe tausche und meine E-Mails checke, um zu entscheiden, was ich tun möchte. Wenn ich am Reaktor arbeite, gehe ich in

#### **What does your typical workday at Fraunhofer IAF look like?**

My typical day starts with me going into the office, switching from my outside shoes to my lab shoes, which are very comfy, and then checking emails and deciding what I want to do for the day. If I work with the reactor, I'm going into the MOCVD



*Am Fraunhofer IAF hat Teresa Duarte einen Arbeitsplatz gefunden, an dem sie einen Blick hinter die Kulissen werfen und verstehen kann, wie Bauelemente entstehen und wie sie eingesetzt werden*  
*At Fraunhofer IAF, Teresa Duarte has found a job where she can take a look behind the scenes and understand how components are created and how they are used*

die MOCVD-Halle und überprüfe die Einstellungen, starte ein Wachstum und sehe dann alle paar Minuten nach, wie es läuft. Der Prozess ist sehr optimiert, aber es ist gut, wenn man dabei ist und versteht, was vor sich geht. Zwischen diesem Hin und Her gehe ich in mein Büro, um Paper zu lesen, an Meetings teilzunehmen und Präsentationen vorzubereiten, oder ich gehe in den Reinraum, um Bauelemente zu charakterisieren.

### Was begeistert dich an deiner Arbeit?

An meiner Arbeit begeistert mich, wie viel ich tun kann. Dies ist ein einzigartiger Ort: Man hat so viele verschiedene Geräte, mit denen man Wafer wachsen, charakterisieren und prozessieren kann – und das alles im selben Gebäude. Für mich ist es sehr aufregend, alle Schritte des Prozesses zu sehen. Außerdem arbeite ich mit wirklich netten Leuten zusammen. Das trägt viel dazu bei, dass man einen guten Tag hat.

### Warum hast du dich dafür entschieden, in der angewandten Forschung zu arbeiten?

In Portugal haben wir eine Redewendung: Ich mag es, meine Hände im Teig zu haben. Das macht mir am meisten Spaß: im Labor zu sein und die ganzen verrückten Experimente durchzuführen. Bevor ich hierherkam, habe ich in der Grundlagenforschung gearbeitet. Obwohl das sehr viel Spaß macht, sehr faszinierend und auch sehr herausfordernd ist, musste ich mich entscheiden, als es um den nächsten Schritt ging: in diesem Umfeld bleiben oder in die Industrie gehen? Beide Entscheidungen sind sehr richtungsweisend. Die angewandte Forschung nimmt dagegen eher eine Vermittlerrolle ein. Außerdem ist sie etwas dankbarer als die Grundlagenforschung, weil die Zeiträume viel kürzer sind. Das hält die Motivation hoch.

### Was planst du für die Zukunft?

Oh, schwierige Frage. Ich möchte noch unabhängiger werden, was meine Arbeit und mein Equipment angeht, weiter lernen, fantastische Epi-Strukturen wachsen und natürlich weiterhin jeden Tag alle meine Kolleginnen und Kollegen nerven und zum Lachen bringen. Ja, das ist der Plan.

hall checking if everything is okay, starting a growth process, and going up on the reactor every couple of minutes to see if everything is indeed going well. The process is very optimized, but it's good to be there and to understand what's going on. Just between this back and forth, I'm going to my office to read papers, attend meetings and prepare presentations, or I'm going into the clean room to do characterization.

### What do you love about your work?

What I love about my work is how much I get to do. This is a very unique place: You have so much different equipment with which you can grow, characterize and process wafers all in the same building. To me, it is very exciting to see all steps of the process. Also, I get to work with really nice people, and I think that contributes a lot to have a good day.

### Why did you choose to work in applied sciences?

In Portuguese, we say: I like to have my hands in the dough. This is the fun part for me: to be in the lab and to do all the crazy experimental stuff. Before I came here, I worked in fundamental research. Although it is very fun, very intriguing and also very challenging, I had to decide what to do next: stay in this setting or go to industry? Both are very big leaps. Here, it's a bit of a middleman situation. Also, applied sciences are a bit more rewarding than fundamental research, because time-scales are a lot shorter. This is good to keep the motivation up.

### What are your plans for the future?

Oh, that's a hard one. I want to become even more independent than I am already with my work and equipment, continue learning, grow fantastic epi structures, and obviously keep annoying all of my coworkers every single day and making them laugh. Yeah. This is the plan.



Lernen Sie Teresa Duarte im Videointerview kennen:  
*Get to know Teresa Duarte in the video interview:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-53](https://s.fhg.de/iaf-jb24-53)



# »Es motiviert mich sehr, zu sehen, wie Forschung den Weg in die Praxis findet.«

---

“It really motivates me to see how research finds its way into application.”

Nach seiner Ausbildung zum Elektroniker war Daniel Grieshaber zunächst als staatlich geprüfter Elektrotechniker am Institut tätig. Nach einer Zwischenstation inklusive Bachelor-Fernstudium kehrte er für das Master-Studium an der Universität Freiburg als wissenschaftliche Hilfskraft ans Fraunhofer IAF zurück. Hier schrieb er auch seine Masterarbeit. Seit 2024 arbeitet Daniel Grieshaber als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Mikroelektronik.

After his training as an electrician, Daniel Grieshaber initially worked at the institute as a state-certified electrical engineer. After a stopover including a bachelor's degree by distance learning, he returned to Fraunhofer IAF as a research assistant for his master's degree at the University of Freiburg. He also wrote his master's thesis here. Since 2024, Daniel Grieshaber has been working as a research associate in the Microelectronics Department.

## Wie sieht dein Arbeitsalltag am Fraunhofer IAF aus?

Aktuell charakterisiere ich viele Bauelemente und führe Messungen durch, um festzustellen, wie wir Bauelemente weiter optimieren und welche Schaltungen wir daraus herstellen können. Wir wollen herausfinden, wie sie immer höhere Spannungen schalten und gleichzeitig noch effizienter werden können.

## What does your typical workday at Fraunhofer IAF look like?

I am currently characterizing many components and conducting measurements to determine how we can further optimize components and which circuits we can create from them. We want to find out how they can switch ever higher voltages and at the same time become even more efficient.

## Für welche Themen interessierst du dich besonders und was begeistert dich an deiner Arbeit?

Besonders interessiere ich mich für die Halbleiterphysik an sich und ihre Anwendungsmöglichkeiten: Wie bewegt sich ein Elektron durch den Halbleiter? Welche Stellschrauben gibt es, um die Funktionsweise eines Transistors anzupassen? Welche Schritte sind nötig, um schließlich ein funktionierendes Bauteil zu haben? Und wie lässt sich das messen? Es begeistert mich zu sehen, wie das, was ich an der Uni über Halbleiterphysik gelernt habe, in der Praxis tatsächlich funktioniert: Wie aus Strukturen, die auf Wafer aufgebracht werden, Transistoren werden und wie der Stromfluss sich beeinflussen lässt.

## What topics are you particularly interested in and what do you find inspiring about your work?

I am particularly interested in semiconductor physics itself and its possible applications: How does an electron move through the semiconductor? What are the parameters for adjusting the way a transistor works? What steps are necessary to finally have a functioning component? And how can it be measured? It inspires me to see the practical application of what I learned at university about semiconductor physics: how transistors are created from structures applied to wafers and how the current flow can be influenced.

**Interview: »Es motiviert mich sehr, zu sehen, wie Forschung den Weg in die Praxis findet.«**  
Interview: "It really motivates me to see how research finds its way into application."

### **Warum hast du dich für Fraunhofer entschieden – und warum für das Fraunhofer IAF im Besonderen?**

Für Fraunhofer habe ich mich entschieden, weil Fraunhofer zum einen eine sehr renommierte Forschungseinrichtung ist und zum anderen die angewandte Forschung vertritt. Es motiviert mich sehr zu sehen, wie Forschung den Weg in die Praxis findet, von Unternehmen aufgegriffen wird und schließlich beim Endanwender landet. Was mich vom Fraunhofer IAF überzeugt hat, ist die viel erwähnte Wertschöpfungskette: Es ist etwas sehr Besonderes, ein Bauelement in der Hand zu halten, das hier im Haus designt, epitaxiert und prozessiert wurde und das ich nun am gleichen Ort auch charakterisieren kann.

### **Wie verlief dein Weg ans Institut?**

Zunächst habe ich eine Ausbildung in einem Handwerksunternehmen gemacht und die Technikerschule besucht. 2016 bin ich nach Freiburg gezogen und habe als technischer Mitarbeiter am Fraunhofer IAF gearbeitet. Da ging es um das Schleifen und Polieren von Diamantoberflächen. Ich bin dann in die Elektronik-Entwicklung eines anderen Unternehmens gewechselt und habe einen Bachelor im Fernstudium absolviert. Im Anschluss habe ich noch einen Master in Embedded Systems an der Universität Freiburg gemacht. Währenddessen bin ich als wissenschaftliche Hilfskraft ans Fraunhofer IAF zurückgekehrt. Auch meine Masterarbeit habe ich hier geschrieben. Letztes Jahr habe ich schließlich als wissenschaftlicher Mitarbeiter angefangen.

### **Was planst du für die Zukunft?**

In der Wissenschaft ankommen. Ich möchte zum einen mein Fachwissen erweitern und auf dem Laufenden bleiben. Zum anderen möchte ich mehr über die Organisation von Wissenschaft lernen – zum Beispiel, wie ein Projekt zustande kommt, wie sich Projektpartner finden, wie man sich auf Konferenzen und darüber hinaus vernetzt. Das sind alles Dinge, die ich auf jeden Fall lernen möchte und auf die ich mich sehr freue.

### **Why did you choose Fraunhofer — and why Fraunhofer IAF in particular?**

I chose Fraunhofer because, on the one hand, it is a very renowned research institution and, on the other hand, it represents applied research. It motivates me to see how research finds its way into application, is taken up by companies and finally ends up with the end user. What convinced me about Fraunhofer IAF is the much-discussed value chain: it is something very special to hold a component that was designed, grown and processed here under one roof, and that I can now characterize in the same place.

### **How did you get to the institute?**

First, I completed an apprenticeship in a craft business and attended the technical school. In 2016, I moved to Freiburg and worked as a technical assistant at Fraunhofer IAF. There, I worked on the grinding and polishing of diamond surfaces. I then switched to the electronics development department of another company and completed a bachelor's degree by distance learning. After that, I did a master's degree in embedded systems at the University of Freiburg. During that time, I returned to Fraunhofer IAF as a research assistant. I also wrote my master's thesis here. Last year, I finally started working as a scientist.

### **What are your plans for the future?**

Arriving in the scientific community. Firstly, I want to expand my expertise and stay up to date. Secondly, I want to learn more about how science is organized— for example, how a project comes about, how project partners find each other, how to network at conferences and beyond. These are all things that I definitely want to learn and that I am very much looking forward to.



Das Videointerview mit Daniel Grieshaber finden Sie hier:  
*You can find the video interview with Daniel Grieshaber here:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-55](https://s.fhg.de/iaf-jb24-55)



# Abschlussarbeiten

## Theses

### Dissertationen

#### Doctoral theses

##### **Isabel Streicher**

Epitaxy of novel AlScN/GaN and AlYN/GaN heterostructures by metal-organic chemical vapour deposition, Universität Freiburg

##### **Balasubramanian Sundarapandian**

Epitaxial AlScN prepared by magnetron sputter epitaxy on molybdenum for BAW devices, Universität Freiburg

### Masterarbeiten

#### Master's theses

##### **Malgunkar Chimney**

Investigations of harmonic high-power doherty power amplifiers at MHz frequencies for industrial coating applications, Universität Freiburg<sup>1</sup>

##### **Marco Dall'Ara**

Variational quantum simulations for determining the ground state of molecules in a globally-driven Rydberg platform, Universität Padua

##### **Yousuf Danyal**

Investigations of sustainability and reusability improvements of high valued electronic printed circuit boards, Universität Freiburg<sup>1</sup>

##### **Can Dogan**

Integration von NV-Zentren in Diamant in einen External-Cavity- Diodenlaser als hocheffizienter Magnetfeld-Quantensensor, Hochschule München

##### **Daniel Grieshaber**

Entwurf und Charakterisierung eines GaN-Multilevel-Gate-Treibers, Universität Freiburg

##### **Farrukh Haider**

Investigations of harmonically-terminated millimetre-wave GaN doherty PAs for high-efficiency operation, Universität Freiburg

##### **Akash Nambiar**

Thermal characterization of GaN power switch HEMTs on different substrate materials, Universität Freiburg

##### **Yves Rottstedt**

Laser cavity combining an external surface emitting laser and nitrogen-vacancy centers in diamond for magnetometry applications, RWTH Aachen

##### **Eric Sigle**

Design of compact frequency multiplier MMICs with high harmonic suppression in a 35 nm InGaAs mHEMT technology, Universität Stuttgart

---

<sup>1</sup> Abschlussarbeit erstellt an der Universität Freiburg; Betreuer am Fraunhofer IAF  
Thesis written at the University of Freiburg; supervisor at Fraunhofer IAF

# »Die Flexibilität in der Materialentwicklung ist wirklich außergewöhnlich.«

“The flexibility in material development is truly exceptional.”

Dr. Isabel Streicher arbeitete bis 2024 in der Gruppe Nitride der Abteilung Epitaxie am Fraunhofer IAF und hat mit Auszeichnung promoviert.

Dr. Isabel Streicher worked in the Nitrides Group of the Epitaxy Department at Fraunhofer IAF until 2024 and received her doctorate with distinction.

## Wann bist du ans Fraunhofer IAF gekommen und was hast du gemacht?

Ich bin 2020 für meine Promotion ans Fraunhofer IAF gekommen und habe mit der Gruppe Nitride am Wachstum von Aluminiumscandiumnitrid (AlScN) geforscht. Wir waren weltweit die Ersten, die das Material durch metallorganische chemische Gasphasenabscheidung (MOCVD) hergestellt haben. Das war eine Sensation! Der Einsatz der MOCVD eröffnet aufgrund der Skalierbarkeit des Prozesses industrielle Anwendungen für das Material. Unser Know-how haben wir später von Scandium auf Yttrium transferiert und waren wieder die Ersten, die das vielversprechende neue Halbleitermaterial Aluminiumyttriumnitrid (AlYn) mit der MOCVD gewachsen haben. Es war eine sehr spannende Zeit und ich habe viel gelernt: Ich war auf Konferenzen, habe publiziert und wurde von meinem Gruppenleiter Dr. Stefano Leone top betreut. Die Arbeit in der gesamten Gruppe, aber auch teamübergreifend, zum Beispiel mit der Strukturanalyse, hat Spaß gemacht.

## When did you come to Fraunhofer IAF and what did you do?

I came to Fraunhofer IAF in 2020 for my doctorate and researched the growth of aluminum scandium nitride (AlScN) with the nitrides group. We were the first in the world to produce the material by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). That was a sensation! The use of MOCVD opens up industrial applications for the material due to the scalability of the process. We later transferred our know-how from scandium to yttrium and were again the first to grow the promising new semiconductor material aluminum yttrium nitride (AlYn) using MOCVD. It was a very exciting time and I learned a lot: I attended conferences, published papers and received excellent support from my group leader Dr. Stefano Leone. Working with my group, but also across other teams from the institute, for example with structural analysis, was great fun.



Welchen Nobelpreisträger Isabel getroffen hat und wie ihr weiterer Werdegang verlief, erfahren Sie online:  
*You can find out which Nobel Prize winner Isabel has met and read more about her career online:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-57](https://s.fhg.de/iaf-jb24-57)



# Zukunft gestalten: Berufliche Chancen am Fraunhofer IAF

---

Shaping the Future:  
Career Opportunities at Fraunhofer IAF



# Working at Fraunhofer IAF

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



[www.iaf.fraunhofer.de/karriere](http://www.iaf.fraunhofer.de/karriere)

## Research



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

Enabeling the institute's  
work at the cutting  
edge of technological  
progress



## Technicians and Administration

## Training and Studies



As Industrial Mechanic  
or IT-Technician



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

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

### **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

### **Vielfältige Bildungswege**

Am Fraunhofer IAF werden nicht nur zukunftssträchtige 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 – zum Beispiel in den Feldern Industriemechanik und Fachinformatik.

### **At the cutting edge 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 family-like corporate culture with a multitude of benefits from the Fraunhofer-Gesellschaft as well as specific benefits from Fraunhofer IAF. Particularly appealing: Everybody works directly at the cutting edge 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.

### **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

### **Diverse educational paths**

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 — for example in the fields of industrial mechanics and information technology.



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

### 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*

# Transfer durch Projekte

---

## Transfer Through Projects

*Auf den folgenden Seiten stellen wir einige unserer spannendsten Projekte vor, in denen wir gemeinsam mit interdisziplinären Partnern neue Lösungen erforschen und Innovationen anwenden.*

*The following pages feature some of our most exciting projects in which we are researching new solutions and applying innovations together with interdisciplinary partners.*

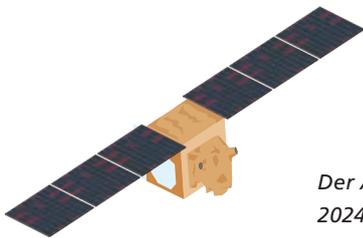


# Rauscharme Verstärker für Satelliten der ESA

## Low-Noise Amplifiers for ESA Satellites

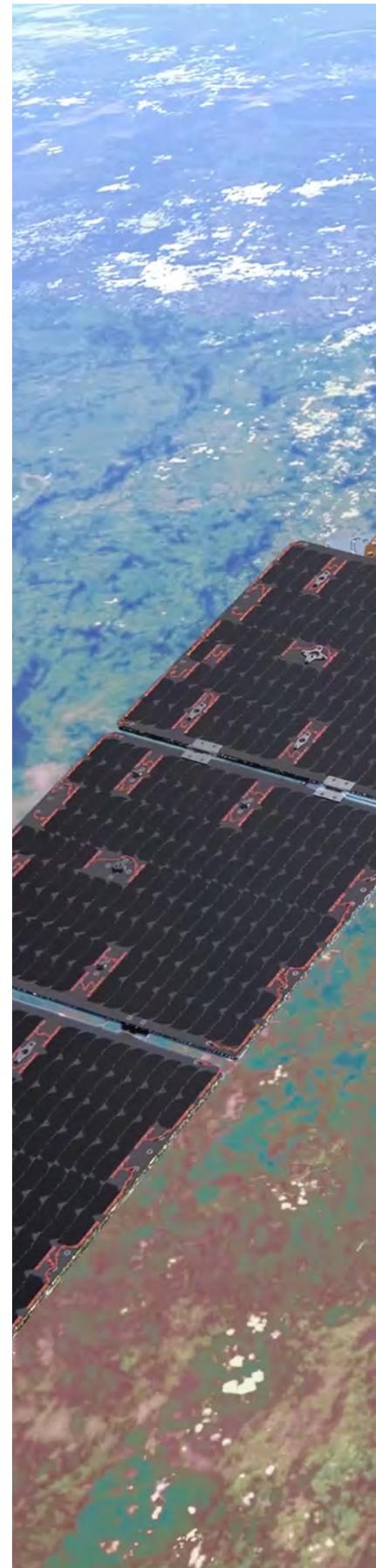
Mobile Kommunikation mit höheren Datenraten, präzisere Wettervorhersagen und Klimabeobachtung sowie ein stärkerer Schutz der eigenen Bevölkerung – für Europa hat das Weltall in verschiedenen Bereichen massiv an Bedeutung gewonnen. Um mit den globalen Entwicklungen mitzuhalten, setzt die Europäische Weltraumorganisation (European Space Agency, ESA) auf modernste Satellitentechnik. Zu den ausgewählten Partnern und Lieferanten der ESA gehört das Fraunhofer IAF, das für Satelliten und Bodenstationen leistungsstarke wie robuste Halbleiterkomponenten auf Basis der Materialsysteme Galliumnitrid (GaN) und Indiumgalliumarsenid (InGaAs) entwickelt und fertigt.

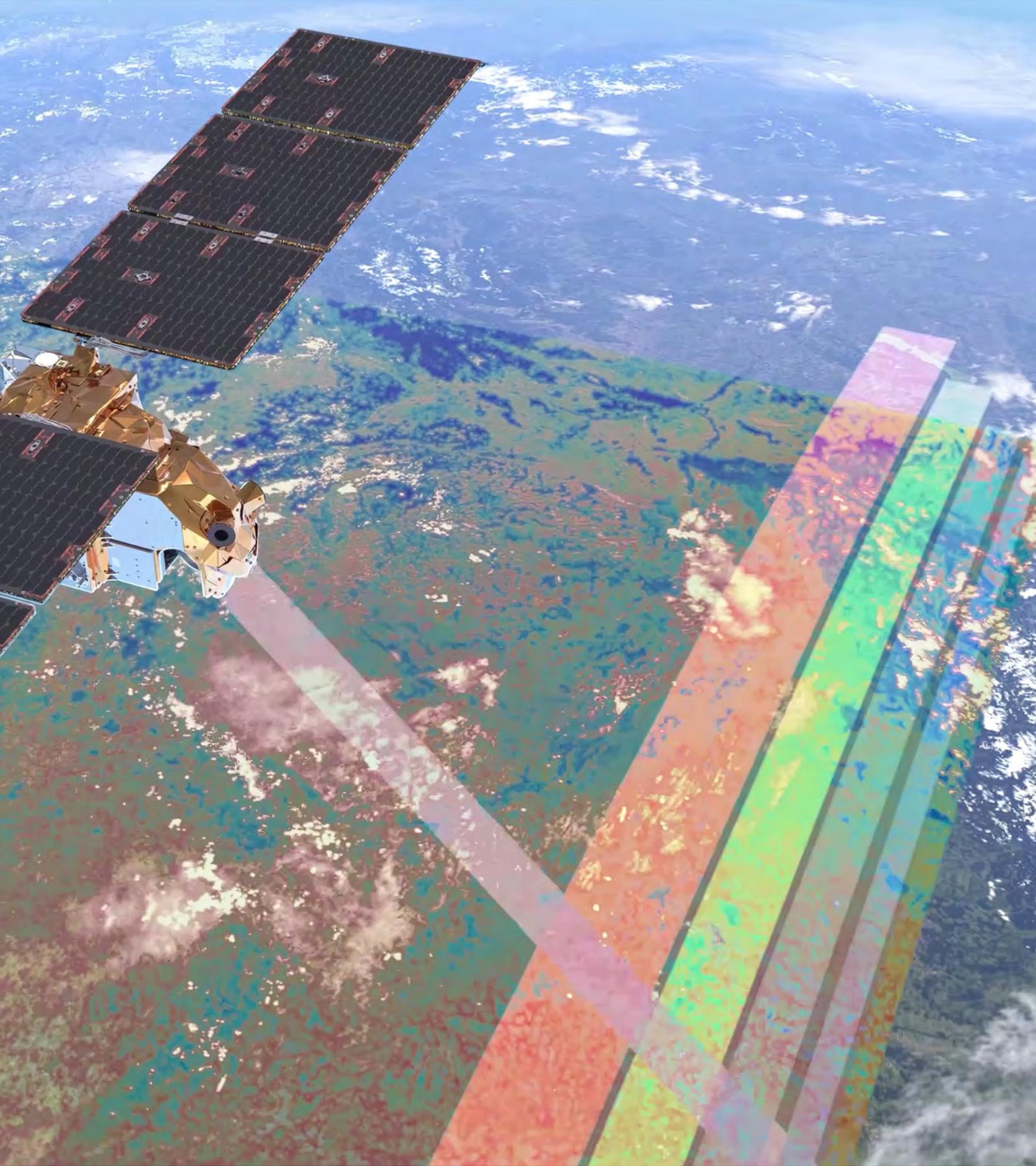
Mobile communication with higher data rates, more precise weather forecasts and climate observation as well as stronger protection for its own population — space has gained massive importance for Europe in various areas. To keep up with global developments, the European Space Agency (ESA) relies on state-of-the-art satellite technology. Fraunhofer IAF is among the selected partners and suppliers of the ESA, developing and producing high-performance and robust semiconductor components based on the material systems gallium nitride (GaN) and indium gallium arsenide (InGaAs) for satellites and ground stations.



*Der Arctic Weather Satellite der ESA startete im Sommer 2024 seine Mission auf einer erdnahen Umlaufbahn. Das hochmoderne Mikrowellenradiometer, das er zur Erhebung von Wetter- und Klimadaten nutzt, enthält vier rauscharme Verstärker des Fraunhofer IAF mit weltweit führender InGaAs-mHEMT-Technologie.*

*ESA's Arctic Weather Satellite started its mission in a low-Earth orbit in summer 2024. The state-of-the-art microwave radiometer it uses to collect weather and climate data contains four Fraunhofer IAF LNAs with world-leading InGaAs mHEMT technology.*





Ein mehrjähriger Einsatz im Weltraum stellt besonders hohe Anforderungen an elektronische Komponenten in Satelliten. Sie müssen sowohl eine spezifische Leistung erreichen als auch möglichst kompakt, effizient und robust sein, da Energie und Platz knappe Ressourcen im All sind und versagende Bauteile nicht mitten im Einsatz ersetzt werden können. Durch seine Expertise und seine umfassende Infrastruktur im Bereich der III-V-Verbindungshalbleiter hat sich das Fraunhofer IAF in den vergangenen zwei Jahrzehnten als verlässlicher Partner für innovative weltraumgeeignete Satellitentechnologien bewährt, wie sich in zahlreichen Projekten zeigt.

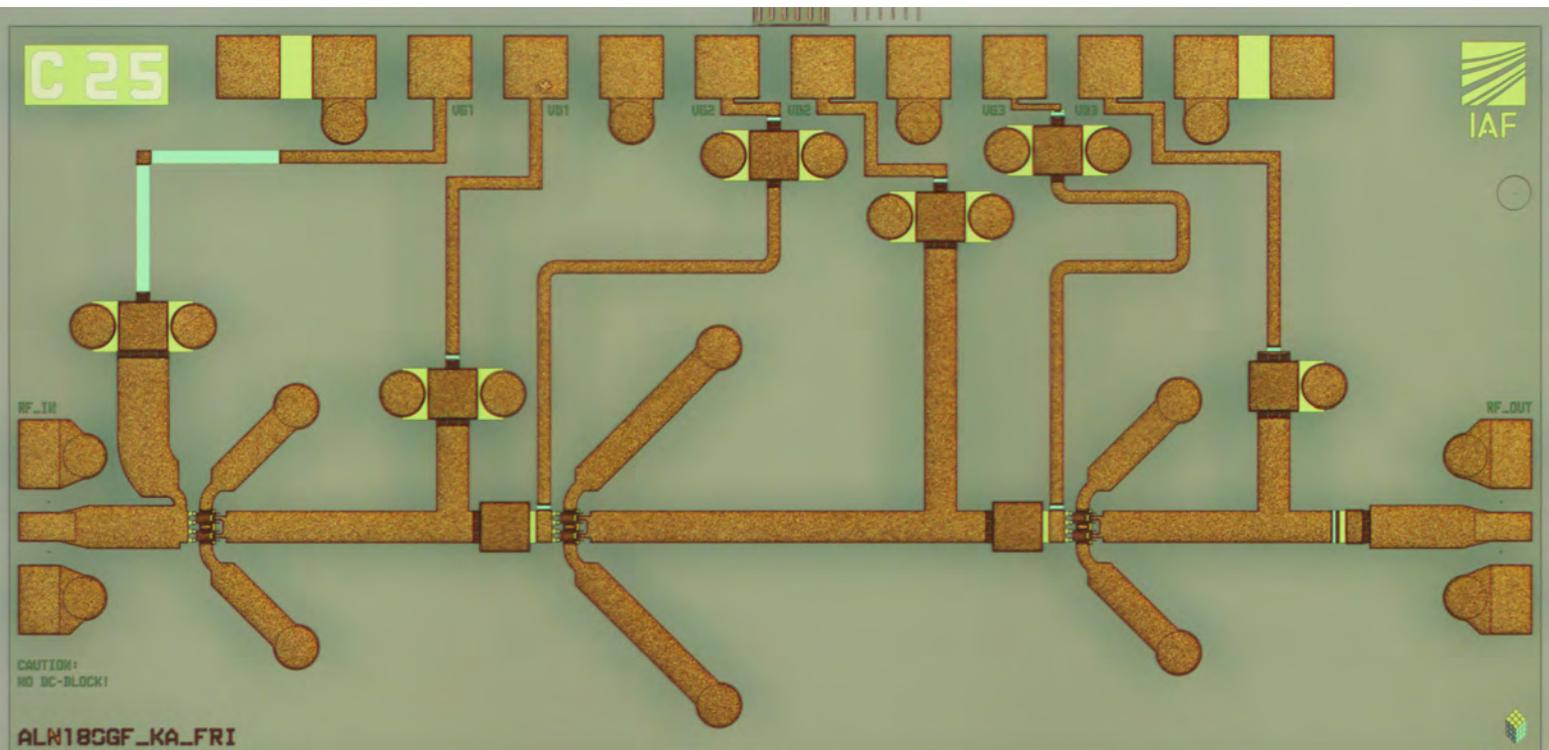
**MMIC-Entwicklung und -Fertigung entlang der III-V-Halbleiter-Wertschöpfungskette**

Die wichtigsten Bauelemente, die Forschende des Fraunhofer IAF für Weltraumanwendungen entwickeln, bilden monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen (monolithic microwave integrated circuits, MMICs): Im Fall von Kommunikationssystemen in Satelliten und Bodenstationen werden diese mit GaN-basierten Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (metamorphic high-electron-mobility transistors, HEMTs) realisiert, im Fall von passiven Mikrowellenradiometern zur Erdbeobachtung mit InGaAs-basierten metamorphen HEMTs (mHEMTs). Hinsichtlich Verstärkung, Rauschen, Kompaktheit und Robustheit erzielen die Verstärkermodule des Fraunhofer IAF regelmäßig internationale Bestwerte.

Several years of use in space places particularly high demands on electronic components in satellites. They must achieve a specific performance while also being as compact, efficient and robust as possible, since energy and storage are scarce in space and failed components cannot be replaced in the middle of a mission. With its expertise and comprehensive infrastructure in the field of III-V compound semiconductors, Fraunhofer IAF has proven itself as a reliable partner for innovative space-qualified satellite technologies over the past two decades, as numerous projects have shown.

**MMIC development and manufacturing along the III-V semiconductor value chain**

The most important components that Fraunhofer IAF researchers are developing for space applications are monolithic microwave integrated circuits (MMICs): In the case of communication systems in satellites and ground stations, these are realized with GaN-based high-electron-mobility transistors (HEMTs), in the case of passive microwave radiometers for earth observation with InGaAs-based metamorphic HEMTs (mHEMTs). In terms of gain, noise, compactness and robustness, the amplifier modules from Fraunhofer IAF regularly achieve top international ratings.



Die Fähigkeiten des Fraunhofer IAF umfassen Forschungs- und Entwicklungsleistungen entlang der gesamten Verbindungshalbleiter-Wertschöpfungskette: vom anforderungsspezifischen Chipdesign über die Epitaxie und Prozesstechnologie bis hin zur Charakterisierung, dem Modulbau sowie der Subsystemintegration. So ist es dem Institut nicht nur möglich, neuartige MMICs für zukünftige Space-Anwendungen zu entwickeln, sondern diese auch in Kleinserie zu fertigen und/oder bereits in Module zu integrieren, diese zu charakterisieren und einsatzfähig auszuliefern.

### **GaN-HEMT-LNAs für das Ku- und Ka-Band**

Im Rahmen des Projekts ESAKuKaLNA realisiert das Fraunhofer IAF GaN-basierte LNAs für die hochbitratige Kommunikation im Ku- und Ka-Band. Im Vergleich zu InGaAs weist das Halbleitermaterial GaN eine deutlich größere Bandlücke auf, wodurch die damit hergestellten HEMTs erheblich höhere Versorgungsspannungen, Leistungsdichten und eine höhere Robustheit erreichen. Während LNAs für niedrigste Rauschzahlen klassischerweise mit InGaAs hergestellt werden, ist GaN aufgrund seiner Robustheit eine interessante Alternative. Bei Anwendungen mit Potenzial für Störsignale muss ein InGaAs-LNA mit einer Schutzschaltung versehen werden, die Eingangssignale mit hohem Pegel abfängt, bevor sie zum MMIC gelangen. Mit dem Einsatz von GaN kann diese Schutzschaltung entfallen, was die leicht höhere Rauschzahl von GaN-LNAs insgesamt kompensiert.

Zur Erforschung des Potenzials von GaN-LNAs werden im Projekt ESAKuKaLNA MMICs mit unterschiedlichen Gate-Längen entworfen, prozessiert, gehäust und messtechnisch aufwendig charakterisiert – unter anderem mit Belastungstests, bei denen die Schaltungen höchsten Eingangsleistungen ausgesetzt werden. Die ESA plant, die Ergebnisse bei der Bewertung einer breiteren Einsatzfähigkeit von GaN-Technologien in den Satelliten der nächsten Generation zu nutzen.

*GaN-HEMT-MMIC mit einer Gate-Länge von 150 nm, der im Rahmen des Projekts ESAKuKaLNA mithilfe des GaN15-Prozesses am Fraunhofer IAF entwickelt und gefertigt wurde*

*GaN HEMT MMIC with a gate length of 150 nm, which was developed and manufactured at Fraunhofer IAF as part of the ESAKuKaLNA project using the GaN15 process*

The capabilities of Fraunhofer IAF include research and development services along the entire compound semiconductor value chain: from customized chip design, epitaxy and process technology to characterization, module construction and subsystem integration. This enables the institute not only to develop novel MMICs for future space applications, but also to manufacture them in small series and/or to integrate them into modules, characterize them and deliver them ready for use.

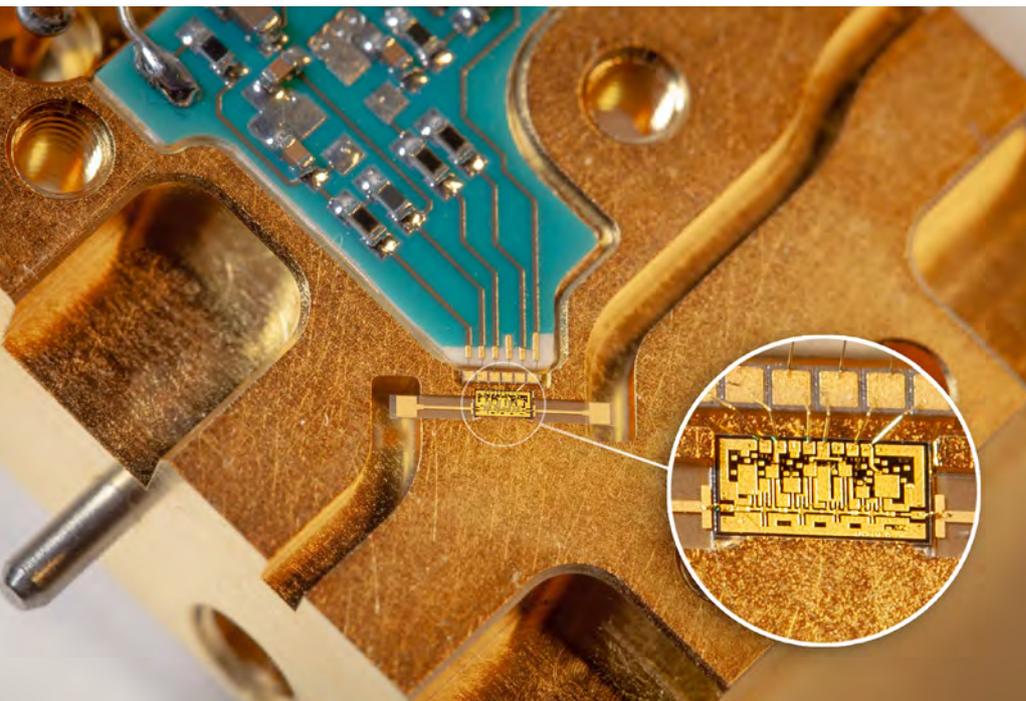
### **GaN HEMT LNAs for the Ku and Ka band**

In the ESAKuKaLNA project, Fraunhofer IAF is realizing GaN-based LNAs for high bit rate communication in the Ku and Ka band. Compared to InGaAs, the semiconductor material GaN has a significantly larger band gap, which means that the HEMTs manufactured with it achieve considerably higher supply voltages, power densities and higher robustness. While LNAs for the lowest noise figures are traditionally produced with InGaAs, GaN is an interesting alternative due to its robustness. For applications with potential for interfering signals, an InGaAs LNA must be equipped with a protection circuit that intercepts high-level input signals before they reach the MMIC. With the use of GaN, this protection circuit can be omitted, which compensates for the slightly higher noise figure of GaN LNAs overall.

To explore the potential of GaN LNAs, the ESAKuKaLNA project includes the design, processing, housing and characterization of MMICs with different gate lengths — including stress tests in which the circuits are exposed to the highest input powers. ESA plans to use the results to evaluate the broader applicability of GaN technologies in next-generation satellites.

Betrachten Sie das 89-GHz-LNA-Modul des Fraunhofer IAF, das Teil des Mikrowellenradiometers an Bord des AWS der ESA ist: *Take a look at the 89 GHz LNA module from Fraunhofer IAF, which is part of the microwave radiometer on board the AWS of ESA:*





*Nahaufnahme des mHEMT-MMIC für den Frequenzbereich um 89 GHz, integriert in das entsprechende LNA-Modul für das AWS-Mikrowellenradiometer*  
*Close-up of the mHEMT MMIC for the frequency range around 89 GHz, integrated into the corresponding LNA module for the AWS microwave radiometer*

### **InGaAs-mHEMT-LNAs für das AWS-Mikrowellenradiometer**

Am 16. August 2024 wurde der Arctic Weather Satellite (AWS) der ESA auf die Reise zu seiner polaren Umlaufbahn in 600 km Höhe über der Erde geschickt. Mit an Bord waren vier LNA-Module mit InGaAs-mHEMT-MMICs des Fraunhofer IAF, die wesentliche Bestandteile des passiven Mikrowellenradiometers bilden, mit dem der AWS Temperatur und Feuchtigkeit in der Arktis so präzise misst wie nie zuvor. Dies soll dazu beitragen, sowohl die Arktis als auch das globale Wetter und den Klimawandel, der in ihr besonders sichtbar wird, besser zu verstehen.

Die vier Module samt MMICs wurden vollständig am Fraunhofer IAF entwickelt sowie gefertigt und decken drei der vier Kanalgruppen des Radiometers ab: ein Modul den Frequenzbereich um 54 GHz, zwei identische Module den um 89 GHz (für eine größere Gesamtverstärkung wurden die Module in Reihe geschaltet), und ein Modul den Bereich um 170 GHz. Ist die Mission erfolgreich, plant die ESA eine weltumspannende Konstellation aus baugleichen Kleinsatelliten in das Weltall zu bringen, um im globalen Maßstab präzisere und kurzfristige Wettervorhersagen (»Nowcasting«) sowie Klimabeobachtungen zu ermöglichen.

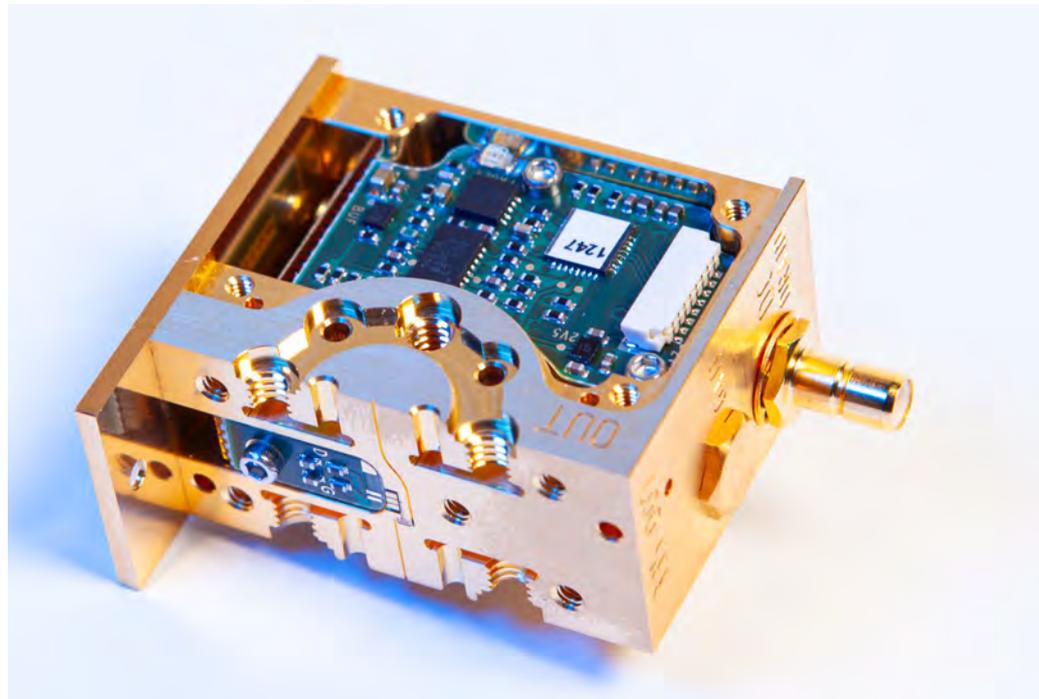
### **InGaAs mHEMT LNAs for the AWS microwave radiometer**

On August 16, 2024, ESA's Arctic Weather Satellite (AWS) was sent on its journey to its polar orbit 600 km above the Earth. On board were four LNA modules with InGaAs mHEMT MMICs from Fraunhofer IAF, which form essential components of the passive microwave radiometer with which the AWS measures temperature and humidity in the Arctic more precisely than ever before. This will contribute to a better understanding of both the Arctic and the climate change that is particularly visible in it.

The four modules including MMICs were developed and manufactured entirely at Fraunhofer IAF and cover three of the four channel groups of the radiometer: one module covers the frequency range around 54 GHz, two identical modules cover the range around 89 GHz (the modules were connected in series for greater overall amplification), and one module covers the range around 170 GHz. If the mission is successful, ESA plans to launch a global constellation of identical small satellites into space to enable more precise and shorter-term weather forecasts (so-called nowcasting) and climate observations on a global scale.

*Das Fraunhofer IAF hat im Projekt ESA LNA 600G die weltweit ersten LNA-Module mit einer Kleinsignalverstärkung von über 20 dB zwischen 580 und 650 GHz realisiert*

*In the ESA LNA 600G project, Fraunhofer IAF has realized the world's first LNA modules with a small signal gain of over 20 dB between 580 and 650 GHz*



#### **Entwicklung von 600-GHz-InGaAs-mHEMT-LNAs**

Um in neue Sensitivitätssphären vorzustoßen, entwickelt das Fraunhofer IAF im Projekt ESA LNA 600G InGaAs-mHEMT-LNAs für den Frequenzbereich um 600 GHz. Die Verfügbarkeit von extrem rauscharmen Empfangsverstärkern im Submillimeterwellen-Frequenzbereich (> 300 GHz) ist aus zwei Gründen besonders interessant für zukünftige weltraumgestützte Radiometer zur Erdbeobachtung: Erstens ermöglicht der Einsatz eines rauscharmen Vorverstärkers vor einem konventionellen Schottky-Mischer eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit des Empfängers. Zweitens machen LNAs die Verwendung von Direct-Detection-Radiometern möglich, was eine erhebliche Vereinfachung der Empfängerarchitektur erlaubt, da kein Lokaloszillator benötigt wird.

Innerhalb der Arbeit für die ESA wurde sowohl die InGaAs-on-Si-Technologie des Fraunhofer IAF als auch die zugehörige Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgreich in den THz-Frequenzbereich weiterentwickelt. Basierend auf den neuartigen III-V-Bauelementen mit lediglich 20 nm Gate-Länge konnten die weltweit ersten Verstärkermodule mit einer Kleinsignalverstärkung von über 20 dB zwischen 580 und 650 GHz realisiert werden. Die bei Raumtemperatur ( $T = 293$  K) bestimmte Hochfrequenzrauschzahl (NF) der Empfängermodule beträgt in diesem Frequenzbereich lediglich 11 dB.

#### **Development of 600 GHz InGaAs mHEMT LNAs**

In order to advance into new sensitivity spheres, Fraunhofer IAF is developing InGaAs mHEMT LNAs for the frequency range around 600 GHz in the ESA LNA 600G project. The availability of low-noise amplifiers in the submillimeter-wave frequency range (> 300 GHz) is particularly interesting for future space-based radiometers for Earth observation for two reasons: Firstly, the use of a low-noise preamplifier before a conventional Schottky mixer enables a significant improvement in the sensitivity of the receiver. Secondly, LNAs enable the use of direct-detection radiometers, which allows a considerable simplification of the receiver architecture as no local oscillator is required.

As part of the work for ESA, both the InGaAs-on-Si technology of Fraunhofer IAF and the associated packaging technology were successfully further developed in the THz frequency range. Based on novel III-V components with a gate length of only 20 nm, the world's first amplifier modules with a small signal gain of over 20 dB between 580 and 650 GHz have been realized. The high-frequency noise figure (NF) of the receiver modules determined at room temperature ( $T = 293$  K) is only 11 dB in this frequency range.

# Pionierleistung in der Chipintegration für 6G-Kommunikationssysteme

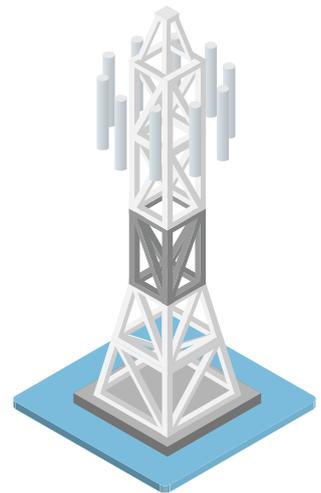
## Pioneering Achievement in Chip Integration for 6G Communication Systems

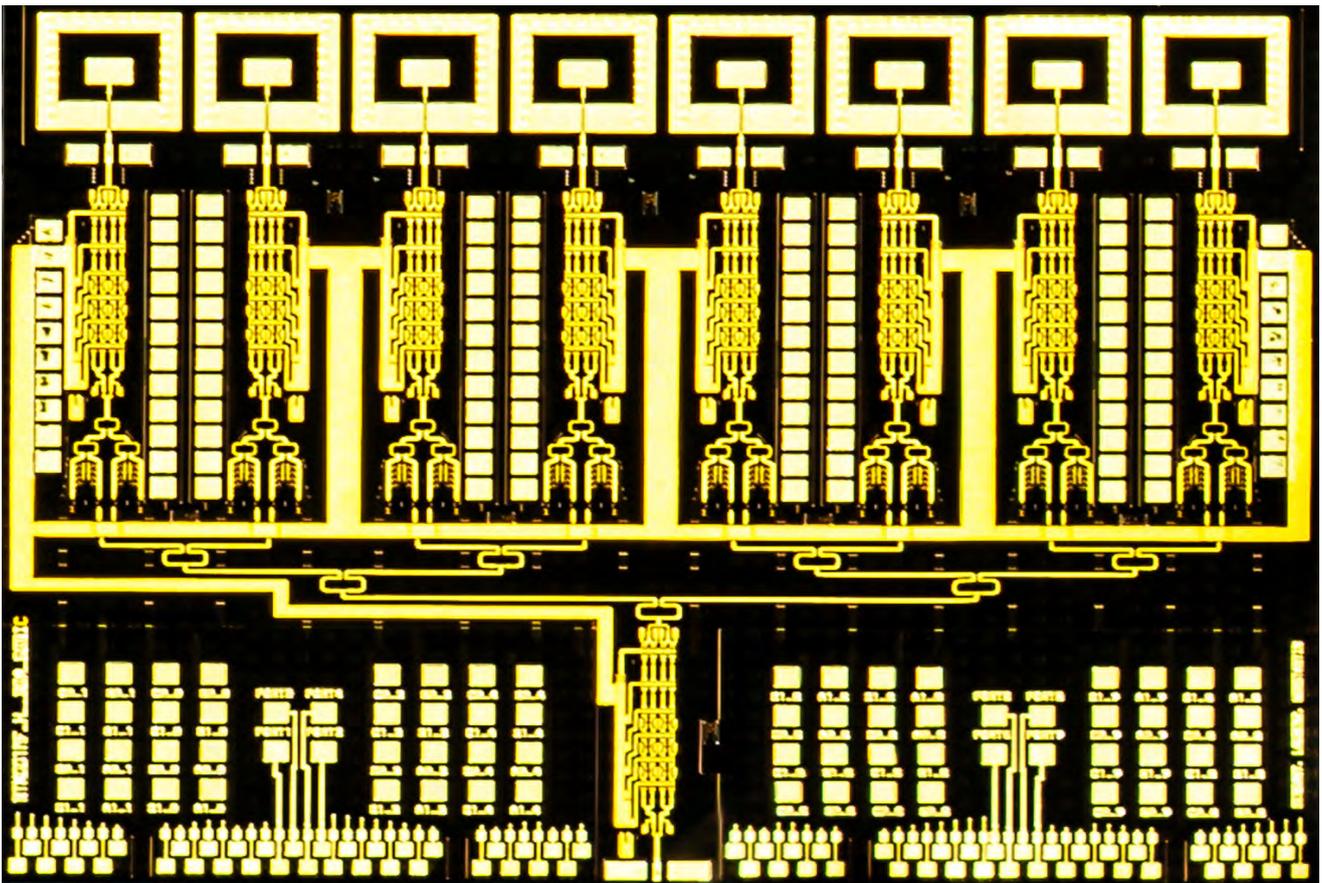
Der Mobilfunk der 6. Generation (6G) wird den Sub-Terahertz-Frequenzbereich (100 GHz bis 1 THz) nutzen, um extrem hohe Datenraten, enorme Bandbreiten und minimale Latenzzeiten zu ermöglichen. Doch höhere Frequenzen bringen auch höhere Übertragungsverluste mit sich. Forschende des Fraunhofer IAF arbeiten deshalb an der On-Chip-Integration relevanter Komponenten, um die gesamte Ausgangsleistung und damit die potenzielle Reichweite zukünftiger Kommunikationssysteme zu steigern. Ihr Durchbruch im Projekt 6G-RIC ist ein weltweit einzigartiger Chip auf Basis von III-V-Halbleitern: ein Phased-Array-MMIC mit acht Kanälen. Durch die Kombination aus hohen Frequenzen mit hoher Leistung und präziser Phasensteuerung ist das MMIC ein bedeutender Meilenstein in der 6G-Forschung.

The sixth-generation (6G) mobile networks will leverage the sub-terahertz frequency range (100 GHz to 1 THz) to enable ultra-high data rates, vast bandwidths, and minimal latency. However, higher frequencies also come with increased transmission losses. To address this challenge, researchers at Fraunhofer IAF are working on on-chip integration of key components to enhance the total output power and, consequently, the potential range of future communication systems. Their breakthrough in the 6G-RIC project is a globally unique chip based on III-V semiconductors: a phased-array MMIC with eight channels. By combining high frequencies with high power and precise phase control, this MMIC represents a significant milestone in 6G research.

Im Rahmen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts 6G-RIC (6G Research and Innovation Cluster) haben Forschende am Fraunhofer IAF ein achtkanaliges aktives Phased-Array-MMIC (monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung) entwickelt. Es arbeitet im Frequenzbereich um 300 GHz und vereint Vektormodulatoren, Leistungsverstärker und Antennen auf einem einzigen Chip, was eine effiziente Over-the-Air-Kombination der acht Ausgangssignale und damit eine Steigerung der gesamten Ausgangsleistung ermöglicht.

As part of the 6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC) project funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), researchers at Fraunhofer IAF have developed an eight-channel active phased-array MMIC (monolithic microwave integrated circuit). Operating at around 300 GHz, this chip integrates vector modulators, power amplifiers, and antennas into a single unit. This allows for efficient over-the-air combination of the eight output signals, thereby increasing total output power.





Prozessierter MMIC mit acht Kanälen für den Frequenzbereich um 300 GHz  
Processed MMIC with eight channels for the frequency range around 300 GHz

Die Herstellung des MMIC basiert auf einer 35-nm-InGaAs-mHEMT-Technologie (metamorpher Transistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit), die am Fraunhofer IAF entwickelt wurde. Diese ermöglicht eine hohe Verstärkung von über 20 dB im Frequenzbereich von 260 bis 320 GHz sowie eine Spitzenleistung von 6 dBm pro Kanal. Ein herausragendes Merkmal des MMICs ist die präzise Phasenverschiebung mit einer Vier-Bit-Auflösung im Bereich von 290 bis 320 GHz. Dank der phasengesteuerten Strahlformung lässt sich die Signalrichtung flexibel anpassen, was für Anwendungen wie die Signalübertragung zu mobilen Geräten oder den Einsatz in komplexen Netzwerktopologien von großem Vorteil ist.

The MMIC is manufactured using a 35-nm InGaAs-mHEMT (metamorphic high-electron-mobility transistor) technology developed by Fraunhofer IAF. This enables high gain exceeding 20 dB in the 260–320 GHz frequency range and delivers a peak power of 6 dBm per channel. One of the standout features of this MMIC is precise phase shifting with a four-bit resolution in the 290–320 GHz range. Thanks to phase-controlled beamforming, the signal direction can be adjusted flexibly, which is particularly advantageous for applications such as signal transmission to mobile devices or deployment in complex network topologies.

**Durchbruch in der hochkomplexen Chipintegration mit III-V-Halbleitern**

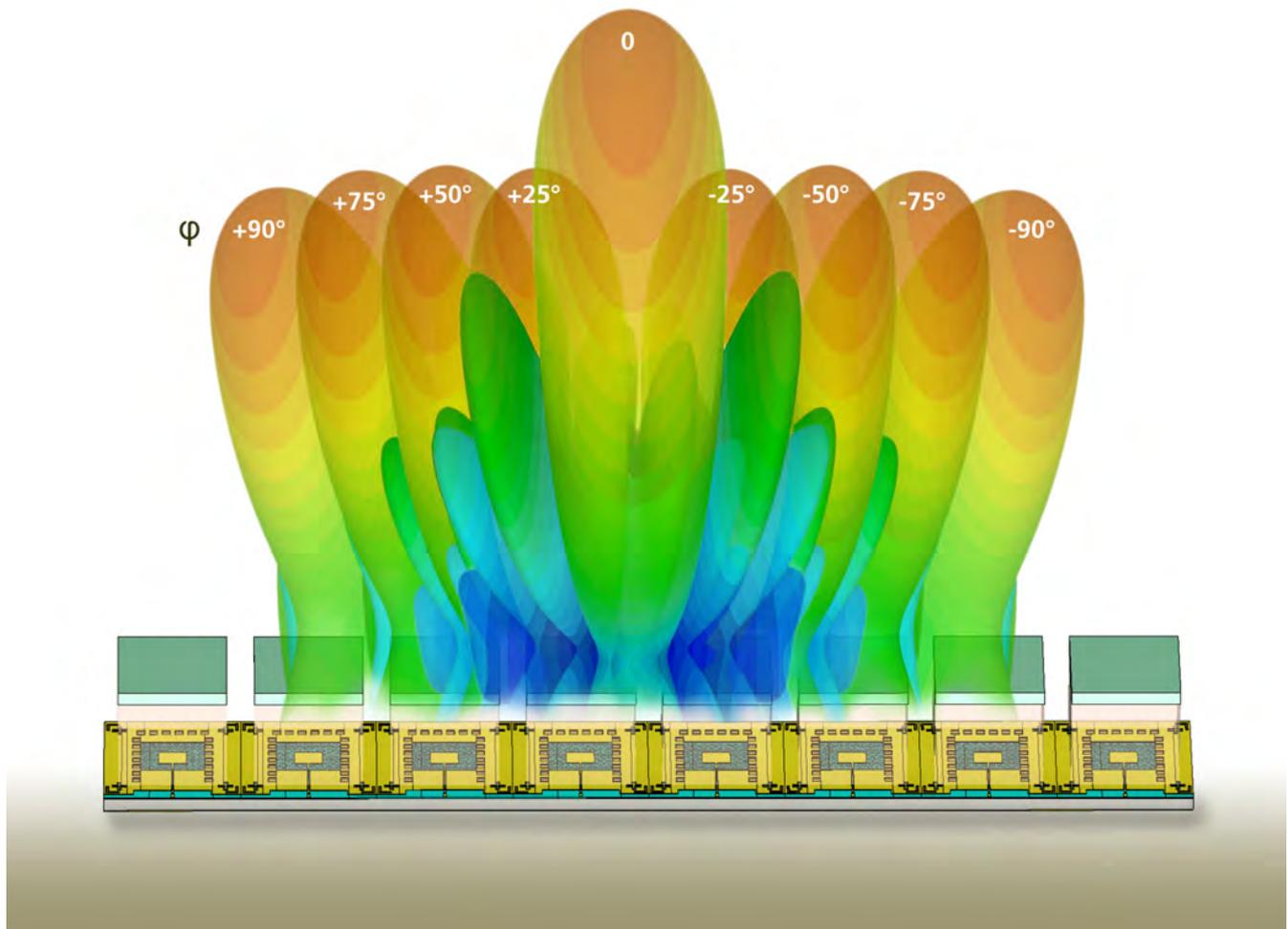
Für die Entwicklung des MMIC war ein hoher Integrationsgrad erforderlich, da die gewünschte Anzahl paralleler Kanäle auf einem einzigen Chip besondere Herausforderungen mit sich brachte. Gleichzeitig musste eine hohe Verstärkung und Ausgangsleistungsdichte sichergestellt werden. All diese Anforderungen konnten durch ein hochkomplexes Design mit der eigenen 35-nm-InAlAs/InGaAs-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF erfolgreich erfüllt werden.

Die Kombination aus Bitauflösung, Betriebsbandbreite und Verstärkungsgrad macht diese MMIC-Entwicklung auf Basis von III-V-Halbleitern weltweit einzigartig. Zwar sind siliziumbasierte Technologien bei der Integration von Antennenarrays weit fortgeschritten, jedoch bleibt ihre geringe Ausgangsleistung pro integrierten Kanal ein entscheidender Nachteil gegenüber III-V-Halbleitern.

**Breakthrough in high-complexity chip integration with III-V semiconductors**

The development of this MMIC required a high level of integration, as the desired number of parallel channels on a single chip posed significant challenges. At the same time, high gain and output power density had to be ensured. These requirements were successfully met through an advanced chip design using the proprietary 35-nm InAlAs/InGaAs-mHEMT technology of Fraunhofer IAF.

The combination of bit resolution, operating bandwidth, and gain level makes this III-V semiconductor-based MMIC a one-of-a-kind development worldwide. While silicon-based technologies have made significant progress in integrating antenna arrays, their low output power per integrated channel remains a key disadvantage compared to III-V semiconductors.



### On-Wafer-Messungen und Phasensteuerung

Die On-Wafer-Messungen der Streuparameter (S-Parameter) zeigen, dass die große Anzahl an Transistorfingern in geringem Maße zu Variationen zwischen den MMIC-Kanälen beiträgt. Dies unterstreicht die entscheidende Rolle von Phasenverschiebungskomponenten in solchen vollständig integrierten Array-MMICs. Das MMIC erreicht eine Verstärkung von über 20 dB im Frequenzbereich von 260 bis 320 GHz sowie eine Eingangsanpassung von besser als -10 dB zwischen 275 und 325 GHz. Die präzise Phasenverschiebung und -kompensation des MMIC wird in den vier Konstellationsdiagrammen veranschaulicht. Die Diagramme zeigen die erreichbaren Phasen am Ausgang eines vollständigen Kanalpfads mit einer Amplitudenvariation von nur maximal 3 dB und eine Vier-Bit-Phasenauflösung für die Frequenzen 290, 300, 310 und 320 GHz. Dies ermöglicht eine Strahlensteuerung in etwa 22,5°-Schritten im Frequenzbereich von 290 bis 320 GHz, was für Anwendungen in modernen Kommunikationstechnologien wie 6G-Netzwerken, die hohe Datenraten und zuverlässige Verbindungen erfordern, essenziell ist.

### 6G Research and Innovation Cluster

Als Konsortialpartner des »6G Research and Innovation Cluster« ist das Fraunhofer IAF Teil des Forschungshubs, der die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die nächste Generation der Mobilkommunikation (6G) auf allen Technologieebenen schaffen soll – vom Funkzugang über Kernnetze bis hin zu Glasfasertransportnetzen. 6G-RIC wird vom BMBF gefördert und konzentriert sich auf die Erforschung und Entwicklung einer sicheren, flexiblen und offenen Kommunikationsinfrastruktur als Grundlage für eine erfolgreiche Digitalisierung in der Wirtschaft und allen Bereichen der Gesellschaft. In dem Netzwerk führender nationaler wissenschaftlicher Einrichtungen beteiligt sich das Fraunhofer IAF mit seiner Erforschung von Sub-Terahertz-Funkstrecken mit Strahlschwenkungsfunktion. Dies ist eine Kerntechnologie für den kommenden Mobilfunkstandard, mit der mobile Teilnehmende gezielt mit der gewünschten Datenrate bedient werden können.

### On-wafer measurements and phase control

On-wafer measurements of scattering parameters (S-parameters) reveal that the large number of transistor fingers contributes only minimally to variations between MMIC channels. This highlights the crucial role of phase-shifting components in such fully integrated array MMICs. The MMIC achieves a gain of over 20 dB within the 260–320 GHz range and an input matching better than -10 dB between 275 and 325 GHz. The precise phase shifting and compensation of the MMIC are illustrated in four constellation diagrams. These diagrams depict the achievable phases at the output of a complete channel path, showing an amplitude variation of only 3 dB max and a four-bit phase resolution at 290, 300, 310, and 320 GHz. This allows for beam steering in 22.5° steps in the 290–320 GHz frequency range, which is essential for modern communication applications such as 6G networks, which demand high data rates and reliable connections.

### 6G Research and Innovation Cluster

As a consortium partner in the 6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC), Fraunhofer IAF is part of a research hub dedicated to establishing the scientific and technological foundations for next-generation mobile communication (6G) at all levels — from radio access and core networks to fiber transport networks. Funded by the BMBF, 6G-RIC focuses on developing a secure, flexible, and open communication infrastructure as a basis for successful digital transformation across industries and society. Within this network of leading national research institutions, Fraunhofer IAF contributes by advancing sub-terahertz radio links with beam steering capabilities — a core technology for the upcoming 6G mobile standard. This innovation will enable targeted high-data-rate delivery to mobile users, paving the way for next-generation wireless connectivity.

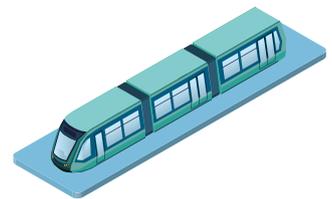
*Darstellung der Strahlsteuerungsfähigkeiten des Antennenarrays des 300-GHz-8x1-Senderchips. Der Strahlungswinkel lässt sich elektronisch durch die Anpassung der Signalphase verändern, was durch die integrierten Vektormodulatoren ermöglicht wird.*

*Demonstration of the beam-steering capabilities of the 300 GHz 8x1 transmitter chip's antenna array. The radiation angle can be electronically adjusted by modifying the signal phase, which is made possible by the integrated vector modulators.*

# Thermografische Verkehrsüberwachung mit bispektraler Kamera

## Thermographic Traffic Monitoring with Bispectral Camera

Im BMBF-Projekt BiCam haben das Fraunhofer IAF und die DIAS Infrared GmbH den Prototyp eines Outdoor-Kamerasystems entwickelt, das eine berührungs- und lückenlose thermografische Überwachung von fließenden Verkehrsströmen ermöglichen kann. Die Kamera soll potenzielle Bauteildefekte und Brände durch die Detektion von überhitzten Bereichen (»Hotspot«) frühzeitig erkennen und so die Sicherheit im Straßen- und Schienenverkehr erhöhen. In einem Feldtest hat das System sein Potenzial demonstriert, als es einen Hotspot eines vorbeifahrenden Zugs detektierte. Für die Kamera entwickelte das Fraunhofer IAF einen neuartigen InGaAsSb-basierten Zeilensensor für den eSWIR-Spektralbereich.



In the BMBF-funded project BiCam, Fraunhofer IAF and DIAS Infrared GmbH have developed a prototype of an outdoor camera system that can enable contactless and seamless thermographic monitoring of moving traffic. The camera is designed to detect potential component defects and fires at an early stage by identifying overheated areas (hot spots), thus increasing road and rail safety. In a field test, the system demonstrated its potential by detecting a hot spot on a passing train. Fraunhofer IAF developed a novel InGaAsSb-based line sensor for the eSWIR spectral range for the camera.

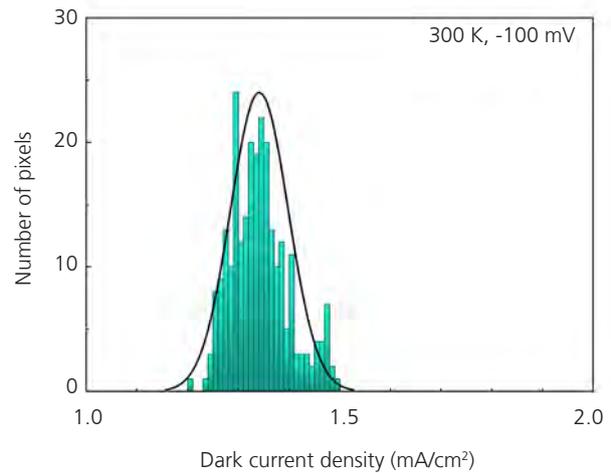
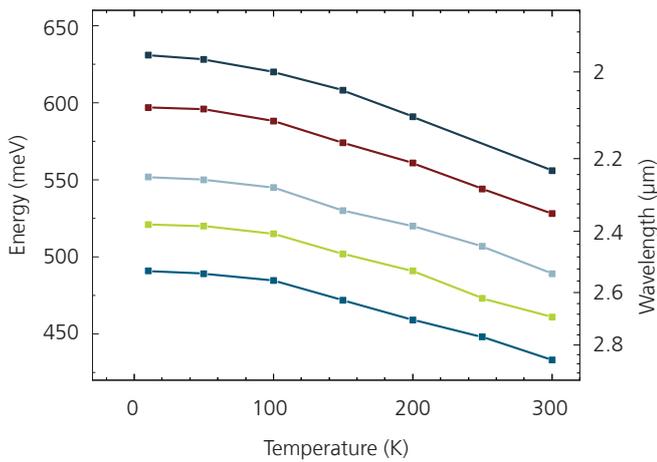


Hotspots wie überhitzte Fahrzeugteile und -ladungen können zu Ausfällen, Bränden und schweren Unfällen führen und stellen daher ein Sicherheitsrisiko im Schienen- und Straßenverkehr dar. Thermografisches Monitoring kann sie frühzeitig erkennen, stellt für den Dauereinsatz in der Verkehrsüberwachung aber hohe Anforderungen an das zugrundeliegende Messsystem. Das Fraunhofer IAF und die DIAS Infrared GmbH haben im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts »BiCam – Schnelle Infrarot-Zeilenkamera zur elektronischen Lage- und Temperaturüberwachung« ein bispektrales Kamerasystem für den Außeneinsatz entwickelt. Die Kamera ist als Komplettlösung konzipiert, um unter der Bedingung geringer Emissionsgrade metallischer Oberflächen erstmals eine berührungs- und lückenlose thermografische und visuelle Überwachung von bewegten Objekten mit hoher Geschwindigkeit zu ermöglichen. Das System soll möglichst wartungsfrei und mit geringem Energiebedarf bei gleichzeitig hohem Digitalisierungsgrad einsetzbar sein.

Hot spots such as overheated vehicle parts and loads can cause failures, fires and serious accidents and therefore pose a safety risk in rail and road traffic. Thermographic monitoring can detect them at an early stage, but the underlying measurement system must meet high requirements for continuous use in traffic monitoring. As part of the project "BiCam — Fast Infrared Line Scan Camera for Electronic Monitoring of Temperature and Position", funded by the Federal Ministry of Education and Research, Fraunhofer IAF and DIAS Infrared GmbH have developed a bispectral camera system for outdoor use. The camera is designed as an all-in-one solution to enable, for the first time, contact-free and seamless thermographic and visual monitoring of moving objects with high speed under the condition of low emissivity of metallic surfaces. The system should be as maintenance-free as possible and have low energy requirements while at the same time offering a high degree of digitization.

*Der Demonstrator des bispektralen Kamerasystems hat beim Feldtest einen Hotspot bei einem vorbeifahrenden Zug erfolgreich detektiert*  
*The demonstrator of the bispectral camera system has successfully detected a hot spot in a passing train during a field test*





*Links: Bandlückenenergie einer Probenserie aus InGaAsSb-Detektormaterial mit Kompositionsvariation aufgetragen über die Temperatur mit korrespondierender Grenzwellenlänge; rechts: Verteilung der Dunkelstromdichte aller 256 Pixel eines eSWIR-Zeilendetektors mit angepasster Normalverteilung*

*Left: band gap energy of a series of samples of InGaAsSb detector material with composition variation plotted against temperature with corresponding cut-off wavelength; right: distribution of the dark current density of all 256 pixels of an eSWIR line detector with fitted normal distribution*

Für das Fraunhofer IAF lag der Schwerpunkt der technischen Innovation in der Entwicklung eines Sensors, der eine Detektivität von mindestens  $5 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$  bei einer Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 1,6 bis 2,6  $\mu\text{m}$  aufweist. Hierfür haben die Forschenden Zeilendetektoren für erweiterte kurzwellige Infrarotstrahlung (eSWIR) mit 256 Pixeln hergestellt, die bei Raumtemperatur arbeiten.

### Herstellung von Zeilendetektoren am Fraunhofer IAF

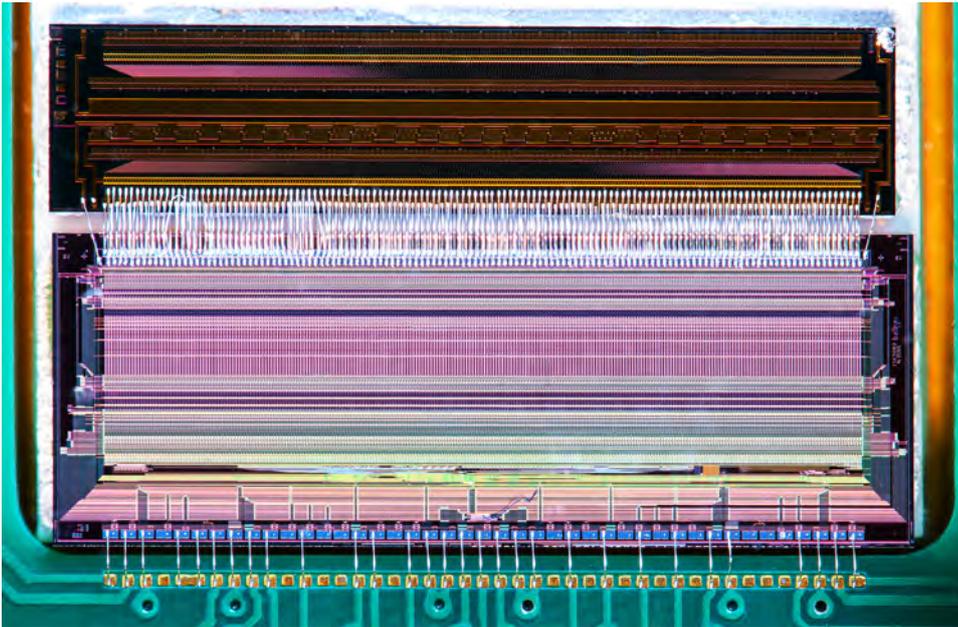
Um die eSWIR-Zeilendetektoren herzustellen, hat das Team am Fraunhofer IAF das quaternäre Detektormaterial Indiumgalliumarsenantimonid (InGaAsSb) epitaktisch gewachsen. Zur Bestimmung des temperaturabhängigen Verlaufs der Bandlückenenergie des Materials wurde eine Probenserie mit variiertem In/Ga-Verhältnis hergestellt. Anhand der gemessenen Photolumineszenz der Proben wurden die Bandlückenenergien des Detektormaterials bestimmt. Die abgeleiteten Grenzwellenlängen der Probenserie liegen genau im angestrebten Wellenlängenbereich, was einen Betrieb der Zeilendetektoren nahe Raumtemperatur ermöglicht (siehe Diagramm, links). Die Variabilität der Grenzwellenlänge im angestrebten Bereich bei gleichzeitiger Einhaltung der Gitteranpassung an das Substratmaterial erwies sich dabei als wichtiger Optimierungsparameter.

For Fraunhofer IAF, the focus of the technical innovation was on the development of a sensor that exhibits a detectivity of at least  $5 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$  at a sensitivity in the wavelength range of 1.6 to 2.6  $\mu\text{m}$ . The researchers have realized line detectors for extended short-wavelength infrared (eSWIR) radiation with 256 pixels that operate at room temperature.

### Manufacturing of line detectors at Fraunhofer IAF

To produce the eSWIR line detectors, the team at Fraunhofer IAF epitaxially grew the quaternary detector material indium gallium arsenic antimonide (InGaAsSb). To determine the temperature-dependent band gap energy of the material, a series of samples with a varied In/Ga ratio was produced. The photoluminescence of the samples was measured to determine the band gap energies of the detector material. The derived cut-off wavelengths of the sample series lie exactly in the targeted wavelength range, which allows the line detectors to be operated close to room temperature (see diagram, left). The variability of the cut-off wavelength in the targeted range while maintaining the lattice matching to the substrate material proved to be an important optimization parameter.

In the next step, the researchers developed a special mask set to create line detectors with 256 pixels of different geometries from the epitaxially grown material. A semi-automatic



*InGaAsSb-Detektorzeile mit 256 Pixeln, entwickelt und gefertigt am Fraunhofer IAF, integriert in das eSWIR-Modul der bispektralen Kamera der DIAS Infrared GmbH*

*InGaAsSb detector array with 256 pixels, developed and manufactured at Fraunhofer IAF, integrated into the eSWIR module of the bispectral camera of DIAS Infrared GmbH*

Die Forschenden entwickelten im nächsten Schritt einen speziellen Maskensatz, um aus dem epitaktisch gewachsenen Material Zeilendetektoren mit 256 Pixeln mit unterschiedlichen Geometrien zu realisieren. Mit einem halbautomatischen Waferprober kann die Dunkelstromdichte aller Pixel der Zeilen eines Wafers gemessen werden. Eine typische Verteilung der Dunkelstromdichte aller 256 Pixel einer Zeile inklusive einer angepassten Normalverteilung verdeutlicht die hohe Qualität des Zeilendetektors, der alle angestrebten elektrooptischen Eigenschaften erreichte und kein Ausfallpixel aufwies (siehe Diagramm, rechts).

#### **Feldtest zur Erkennung von Hotspots**

Der Projektpartner DIAS Infrared GmbH baute die am Fraunhofer IAF gefertigten eSWIR-Zeilendetektoren zunächst zusammen mit der Ausleseelektronik zu Modulen auf und integrierte diese anschließend zusammen mit einem Kanal im nahen Infrarot (NIR) und gemeinsamen optischen Komponenten in eine Kamera. Um eine orts- und zeitsynchrone Auswertung der Kanäle zu ermöglichen, stellt das System den NIR-Kanal in Graustufen dar. Er dient der visuellen Objektüberwachung und wird vom eSWIR-Kanal überlagert, der in einer Falschfarbendarstellung kodiert ist. Mit beiden Kanälen kann das System überhitzte Bereiche ortsaufgelöst darstellen. Die erfolgreiche Demonstration des Proof of Concept, bei der ein Hotspot eines vorbeifahrenden Zuges detektiert wurde, zeigt das Potenzial des entwickelten Kamerasystems am Beispiel der Verkehrsüberwachung.

wafer prober can be used to measure the dark current density of all pixels in the lines of a wafer. A typical distribution of the dark current density of all 256 pixels of a line, including a fitted normal distribution, illustrates the high quality of the line detector, which achieved all the targeted electro-optical properties and had no defective pixels (see diagram, right).

#### **Field test for the detection of hot spots**

The project partner DIAS Infrared GmbH first assembled the eSWIR line detectors manufactured at Fraunhofer IAF together with the readout electronics to form modules and then integrated them into a camera together with a near-infrared (NIR) channel and common optical components. To enable a spatially and temporally synchronous evaluation of the channels, the system displays the NIR channel in grayscale. It is used for visual object monitoring and is overlaid by the eSWIR channel, which is encoded in a false-color display. With both channels, the system can display overheated areas in a spatially resolved manner. The successful demonstration of the proof of concept, in which a hot spot of a passing train was detected, shows the potential of the developed camera system for traffic monitoring.

# Tatortuntersuchung @ Fraunhofer IAF – Das EU-Projekt RISEN

## Crime Scene Investigation @ Fraunhofer IAF — EU Project RISEN

Die direkte kontaktlose Detektion und chemische Identifizierung von Spuren an einem Tatort kann bei toxischen oder explosiven Substanzen die Sicherheit der Einsatzkräfte deutlich erhöhen und gleichzeitig die Ermittlungen beschleunigen, da aufwändige Laboruntersuchungen entfallen. Im EU-Projekt RISEN entwickelte das Fraunhofer IAF einen Technologiedemonstrator, der mittels laserbasierter IR-Spektroskopie zahlreiche forensisch relevante Substanzen innerhalb von Sekundenbruchteilen identifiziert.

The direct contactless detection and chemical identification of traces at a crime scene can significantly enhance the safety of emergency responders when dealing with toxic or explosive substances, while simultaneously accelerating investigations, as complex laboratory analyses become unnecessary. In the EU project RISEN, Fraunhofer IAF developed a technology demonstrator that identifies numerous forensically relevant substances within fractions of a second using laser-based IR spectroscopy.



*Tatortermittler mit dem  
IR-Spektroskopiesystem des  
Fraunhofer IAF in der fiktiven  
Szene der Carabinieri bei der  
Detektion von Drogen und  
Explosivstoffen*

*Crime scene investigators  
with the Fraunhofer IAF  
IR spectroscopy system in  
a fictional scene of the  
Carabinieri detecting  
drugs and explosives*

Klassische Tatortuntersuchungen sind langsam, da Spuren zunächst gesichert und erst anschließend im spezialisierten Forensiklabor untersucht werden müssen. Innerhalb eines europaweiten Verbunds aus Polizeikräften und Forschungseinrichtungen arbeitete das Fraunhofer IAF im Rahmen des Horizon-2020-Projekts RISEN an einem mobilen Technologiedemonstrator für die schnelle, kontaktlose und zerstörungsfreie forensische Tatortuntersuchung. Ziel der Arbeiten des Fraunhofer IAF war dabei die Entwicklung eines mobilen Technologiedemonstrators der mittels laserbasierter Infrarot-(IR-)Spektroskopie eine Vielzahl an Substanzen direkt am Tatort detektieren und identifizieren kann, um die Sicherheit der Einsatzkräfte zu erhöhen und sie bei der Spurenfindung und -aufnahme zu unterstützen.

### **Kontaktlos und zerstörungsfrei Substanzen identifizieren**

Zu den relevanten Substanzen, welche am Tatort identifiziert werden sollen, zählen Sprengstoffe, Betäubungsmittel, hochkonzentrierte synthetische Drogen, wie sie in Drogenlaboren zu finden sind, sowie Vorläufer-Substanzen und Streckmittel – zusätzlich jedoch auch biologische Proben wie Blut. Diese sollten ebenso schnell, kontaktlos und zerstörungsfrei detektiert werden, um eine DNA-Probennahme vornehmen zu können, was mit gängigen Methoden nur schwer möglich ist.

Die Vielzahl an verschiedenen Proben erforderte eine spektral sehr breitbandige Laserquelle, die nicht mit einem einzigen Lasermodul erreicht werden konnte. Trotz der sehr kompakten Systemabmessungen, welche einen Batteriebetrieb und Betrieb ohne weitere Peripherie ermöglichen, wurden in dem augensicheren System gleich zwei resonant durchstimmbare Quantenkaskadenlaserquellen (MOEMS-EC-QCLs) kombiniert.

### **Abschlusskampagne bei Carabinieri in Rom**

Im Oktober 2024 fand die Abschlusskampagne des Projekts bei den Carabinieri in Rom statt. Entworfen durch das RaCIS (Raggruppamento carabinieri investigazioni scientifiche), wurde eine fiktive Tatort-Szene gestaltet, die einen hypothetischen Mordfall in einem illegalen Labor für die Herstellung von Betäubungsmitteln darstellte. Diese Szene diente als Testgelände und ahmte die Komplexität und das hohe Risiko tatsächlicher forensischer Ermittlungen nach, indem die im Projekt entwickelten Sensoren und Verfahren ihre Überlegenheit gegenüber den klassischen Verfahren demonstrieren mussten.

Betrieben von echten Tatortermittlern konnte das System des Fraunhofer IAF seine Überlegenheit hinsichtlich der Geschwindigkeit und Abstandsfähigkeit bei der Detektion und Identifizierung von Drogen, Explosivstoffen und Blut in der Szene erfolgreich demonstrieren. In Kooperation mit den Projektpartnern konnte so ein virtuelles 3D-Abbild der Szene erzeugt werden, in denen die Messungen des Sensors des Fraunhofer IAF automatisiert räumlich lokalisiert wurden.

Conventional crime scene investigations are slow because evidence must first be secured and only then examined in a specialized forensic laboratory. Within a Europe-wide network of police forces and research institutions, Fraunhofer IAF worked on a mobile technology demonstrator for rapid, contactless, and non-destructive forensic crime scene investigations as part of the Horizon 2020 project RISEN. The goal of the work of Fraunhofer IAF was to develop a mobile technology demonstrator that can detect and identify a variety of substances directly at the crime scene using laser-based infrared (IR) spectroscopy in order to enhance the safety of the emergency responders and assist them in evidence collection and documentation.

### **Contact-free and non-destructive identification of substances**

Relevant substances to be identified at the crime scene include explosives, narcotics, highly concentrated synthetic drugs found in drug labs, as well as precursor substances and cutting agents. Additionally, biological samples such as blood should also be detected quickly, without contact nor destruction to allow for DNA sampling, which is difficult to achieve with common methods.

The wide range of different samples required a spectrally very broad laser source, which could not be achieved with a single laser module. Despite the very compact system dimensions that allow for battery operation and operation without further peripherals, the eye-safe system combined two resonantly tuneable quantum cascade laser sources (MOEMS-EC-QCLs).

### **Final campaign with Carabinieri in Rome**

In October 2024, the final campaign of the project took place with the Carabinieri in Rome. Designed by RaCIS (Raggruppamento carabinieri investigazioni scientifiche), a fictional crime scene was created, depicting a hypothetical murder case in an illegal drug manufacturing lab. This scene served as a testing ground, mimicking the complexities and high risks of actual forensic investigations, where the sensors and methods developed in the project had to demonstrate their superiority over classical methods.

Operated by real crime scene investigators, the Fraunhofer IAF system successfully demonstrated its superiority in terms of speed and distance capability in detecting and identifying drugs, explosives, and blood at the scene. In cooperation with the project partners, a virtual 3D representation of the scene was created, in which the measurements of the Fraunhofer IAF sensor were automatically spatially localized.

# Internationales Jahr der Quantenwissenschaft und -technologie

## International Year of Quantum Science and Technology

Die Quantentechnologien sind aus den Wissenschaftsnachrichten nicht mehr wegzudenken. Da überrascht es, dass die Formulierung der Quantenmechanik im Jahr 2025 schon genau einhundert Jahre zurückliegt. Zu diesem Anlass hat die UNESCO das Jahr 2025 zum Quantenjahr erklärt. Auch am Fraunhofer IAF sind Quanten schon lange fester Bestandteil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Aufbauend auf der langjährigen Transfererfahrung mit Quantentechnologien der ersten Generation wie der Lasertechnologie konnten jüngst auch in der zweiten Generation entscheidende Schritte in Richtung erster Anwendungen am Freiburger Institut geleistet werden.

Quantum technologies dominate the science news. It is therefore surprising that the formulation of quantum mechanics dates back one hundred years. To mark the occasion, UNESCO has declared 2025 the Year of Quantum. At Fraunhofer IAF, quantum technologies have long been an integral part of its research and development work. Building on many years of experience in transferring first-generation quantum technologies, such as laser technology, the institute has recently taken decisive steps towards the first applications of second-generation quantum technologies.

»Quantum2025 – 100 Jahre sind erst der Anfang...« Mit diesem Motto wird das Jubiläum der Quantentechnologien eingeläutet und auch am Fraunhofer IAF zeigt sich, dass das Forschungsfeld noch lange nicht erschöpft ist. In einer Vielzahl von nationalen sowie internationalen Verbundprojekten wird am Fraunhofer IAF ein systemischer Forschungsansatz vom Material über die Integration bis hin zur Software verfolgt.

### Diamant als Gamechanger

Das Herzstück der Quantentechnologien des Fraunhofer IAF bilden Farbzentren in Festkörpern. Diese können unter anderem mittels Stickstoffdotierungen in Diamant hergestellt werden (Stickstoff-Vakanz-Zentren, NV-Zentren). In diesem Forschungsbereich ist das Fraunhofer IAF weltweit führend und treibt in Kooperation mit Unternehmen wie Quantum Brilliance den Transfer in industrielle Anwendungen voran. Die atomaren Defekte im Diamantgitter können, wenn sie mit Lasern und Mikrowellen manipuliert werden, externe physikalische Parameter mit extremer Präzision messen und so als hochsensible Quantensensoren fungieren. Mehr zu der Anwendung in der Quantensensorik erfahren Sie auf S. 90.

“Quantum2025 — 100 years is just the beginning...” This is the motto of the anniversary of quantum technologies, and at Fraunhofer IAF, too, it is clear that the research potential of this field is far from exhausted. In a large number of national and international joint projects, Fraunhofer IAF is pursuing a systematic research approach from materials to integration and software.

### Diamond as game changer

At the heart of quantum technologies at Fraunhofer IAF are color centers in solids. These can be produced, for example, by nitrogen doping in diamond (nitrogen-vacancy centers, NV centers). Fraunhofer IAF is a world leader in this field of research and, in cooperation with companies such as Quantum Brilliance, is driving forward the transfer of research into industrial applications. When manipulated with lasers and microwaves, the atomic defects in the diamond lattice can measure external physical parameters with extreme precision and thus act as highly sensitive quantum sensors. Read more about the application in quantum sensing on p. 90.

Zusätzlich zu den Sensoranwendungen können Festkörper-Farbzentren auch als Quantenbit (Qubit) im Quantencomputing genutzt werden, indem ein Quantenregister aus mehreren NV-Zentren oder einem NV-Zentrum und benachbarten Kernspins im Wirtsmaterial gebildet wird. Jüngste Projektergebnisse zeigen hochpräzise Einzel- und Zwei-Qubit-Gatter zwischen dem NV-Elektronenspin und dem Stickstoff-Kernspin sowie die Verschränkung von zwei NV-Elektronenspins. Darüber hinaus wurde die kohärente Wechselwirkung zwischen einem einzelnen NV-Zentrum und 50 umgebenden  $^{13}\text{C}$ -Kernspins gemessen. Wie mit diesen Ansätzen am Fraunhofer IAF Quantencomputer und Quantensimulatoren realisiert werden, erfahren Sie auf S. 82.

Das Fraunhofer IAF konzentriert sich auf die Optimierung von Diamantwachstumstechniken sowie deren Verarbeitung, um NV-Zentren höchster Qualität für Quantenbauteile zu gewährleisten. Durch den Einsatz selbst entwickelter, patentierter chemischer Gasphasenabscheidungstechniken (CVD) stellt das Institut ultrareine Diamantsubstrate mit kontrolliert platzierten NV-Zentren her, die für die Nutzung als Quantenbauteil für die Quantensensorik und das Quantencomputing entscheidend sind. Damit trägt das Institut maßgeblich dazu bei, Quantentechnologien der zweiten Generation auf ihren Weg in die industrielle Anwendung zu bringen.

In addition to sensing applications, solid-state color centers can also be used as quantum bits (qubits) in quantum computing by forming a quantum register from multiple NV centers or an NV center and neighboring nuclear spins in the host material. Recent project results have demonstrated high-precision single- and two-qubit gates between the NV electron spin and the nitrogen nuclear spin, as well as the entanglement of two NV electron spins. Furthermore, the coherent interaction between a single NV center and 50 surrounding  $^{13}\text{C}$  nuclear spins has been measured. How quantum computers and quantum simulators are realized with these approaches at Fraunhofer IAF can be found on p. 82.

Fraunhofer IAF focuses on optimizing diamond growth techniques and processing to ensure NV centers of the highest quality for quantum devices. Using proprietary, patented chemical vapor deposition (CVD) techniques, the institute produces ultra-pure diamond substrates with the precisely placed NV centers that are crucial for use as a quantum component in quantum sensing and quantum computing. In doing so, the institute is making a significant contribution to bringing second-generation quantum technologies to industrial application.

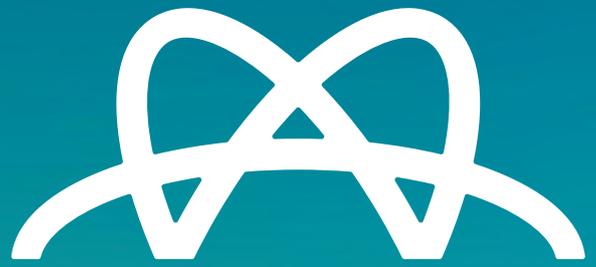
# Quantum<sup>BW</sup>

Das Fraunhofer IAF ist Teil der Geschäftsstelle Quantum<sup>BW</sup> und bringt sich aktiv in der Landesinitiative ein. Diese bündelt die Teile des Quantenökosystems in Baden-Württemberg und verfolgt mit einer Roadmap das klare Ziel, im engen Austausch zwischen Forschung und Industrie die Quantentechnologien im Land in die Anwendung zu bringen.

*Fraunhofer IAF is part of the Quantum<sup>BW</sup> office and is actively involved in the state initiative as member of its network, which brings together the members of the quantum ecosystem in the federal state Baden-Württemberg, Germany. With a roadmap, Quantum<sup>BW</sup> pursues the clear goal of bringing quantum technologies into application through close exchange between research and industry within Baden-Württemberg.*



[www.quantumbw.de](http://www.quantumbw.de)

  
YEAR OF QUANTUM  
2025

# Maßstäbe setzen – Wege zu skalierbaren Festkörper-Quantencomputern

---

## Setting the Bar — Pathways to Scalable Solid-State Quantum Computers

Geringerer Kühlbedarf, längere Operationszeiten, kleinere Fehlerraten: Quantencomputer auf Basis von Farbzentren in Diamant versprechen wesentliche Vorteile gegenüber konkurrierenden Quantencomputing-Technologien. Im Gegensatz zu den bereits relativ weit entwickelten supraleitenden Systemen bedarf es jedoch noch wichtiger Fortschritte in der Erforschung und Entwicklung festkörperbasierter Quantentechnologien. Am Fraunhofer IAF werden mehrere Ansätze ganzheitlich verfolgt, um das große Potenzial dieser Technologie frühzeitig aus der Grundlagenforschung in die Anwendung zu überführen und so eine neue Ära des Quantencomputings einzuläuten.

Lower cooling requirements, longer operation times, smaller error rates: quantum computers based on color centers in diamond promise significant advantages over competing quantum computing technologies. In contrast to the relatively advanced superconducting systems, however, important advances in research and development of solid-state-based quantum technologies are still needed. At Fraunhofer IAF, several approaches are therefore being pursued holistically in order to transfer the great potential of this technology from the basic research to applications at an early stage paving the way for a new era of quantum computing.



Sekundenschnell komplexe Probleme lösen, für die selbst moderne Supercomputer Jahrzehnte bräuchten – darin besteht das Versprechen von Quantencomputern. Doch so klar das Ziel vor Augen steht, so differenziert ist der Weg dorthin. Denn bis heute konkurrieren mehrere Ansätze zur Realisierung von Quantencomputern miteinander und bislang konnte sich noch keiner entscheidend durchsetzen. Jeder Ansatz hat hardware- wie softwareseitig spezifische Vor- und Nachteile, die sich von der Zuverlässigkeit über den Energieverbrauch bis hin zur Kompatibilität mit konventionellen Systemen erstrecken.

Einen relativ jungen und dabei sehr vielversprechenden Forschungsansatz bilden Quantencomputer basierend auf Farbzentren in Diamant. Hybrid integrierbare, skalierbare und nahe Raumtemperatur funktionierende Festkörper-Quantenbauelemente bieten eine robuste und energieeffiziente Alternative zu etablierten Quantencomputer-Hardwareplattformen, die sperrige Vakuumaufbauten beziehungsweise kryogene Kühlung erfordern. Gleichzeitig bieten Spin-Qubits in Diamant längere Operationszeiten und kleinere Fehlerraten als vergleichbare, kommerziell verfügbare Systeme auf dem Stand der Technik – eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung von komplexen Quantenalgorithmen mit vielen Gatteroperationen, die anwendungsseitig Vorteile gegenüber klassischem Computing bieten können.

Eine der größten Herausforderungen bei der Realisierung eines Quantencomputers basierend auf Farbzentren in Diamant stellt die skalierbare Kopplung der Qubits dar. Am Fraunhofer IAF werden mehrere Ansätze verfolgt, die in unterschiedlichen Quantencomputing-Anwendungen zum Einsatz kommen können. Im Projekt SPINNING werden Quantenregister durch photonische Kopplung mit Hilfe von optischen Mikroresonatoren realisiert, die in ersten Benchmarking-Analysen alle gängigen Systeme und Erwartungen übertreffen konnten. Im Projekt SPINUS kommt eine direkte magnetische Kopplung von Qubits zum Einsatz, die durch neuartige Auslesetechniken und verbesserte Materialsynthese ergänzt wird. Auf diesem Ansatz aufbauend werden parallel zu skalierbaren Quantencomputern auch Quantensimulatoren entwickelt. Dies ermöglicht es, von Synergien zwischen den beiden Computing-Paradigmen zu profitieren.

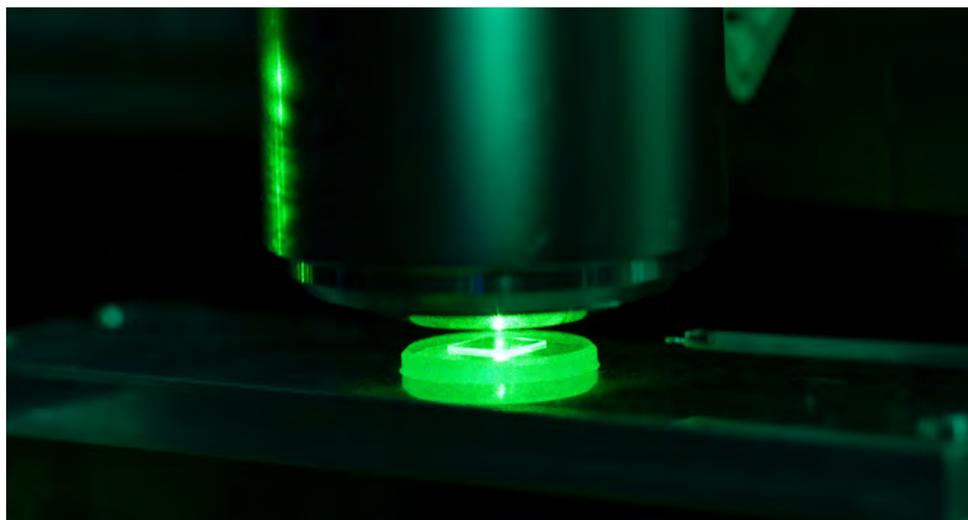
Solving complex problems in a matter of seconds that would take even modern supercomputers decades — that is the promise of quantum computers. However, while the goal is clear, the path to achieving it is not. To date, several approaches to realizing quantum computers are competing with each other, and so far, none has been able to establish itself decisively. Each approach has specific advantages and disadvantages in terms of hardware and software, ranging from reliability and energy consumption to compatibility with conventional systems.

A relatively new and very promising research approach is quantum computing based on color centers in diamond. Hybrid integrable, scalable solid-state quantum devices that function near room temperature offer a robust and energy-efficient alternative to established quantum computing hardware platforms that require bulky vacuum setups or cryogenic cooling. At the same time, spin qubits in diamond offer longer operation times and smaller error rates than comparable, commercially available systems based on the state of the art — an important prerequisite for complex quantum algorithms with many gate operations that can offer advantages over classical computing in applications.

One of the biggest challenges in realizing a quantum computer based on color centers in diamond is the scalable coupling of the qubits. At Fraunhofer IAF, two approaches are being pursued that can be used in different quantum computing applications. In the SPINNING project, quantum registers are realized by photonic coupling using optical microcavities, which have surpassed all conventional systems and expectations in initial benchmarking analyses. In project SPINUS, direct magnetic coupling of qubits is used, which is complemented by novel readout techniques and improved material synthesis. Building on this approach, scalable quantum computers and quantum simulators are developed in parallel. This makes it possible to benefit from synergies between the two computing paradigms.

*Bei Quantencomputern auf Basis von NV-Zentren in Diamant wird der Diamantchip unter ein optisches Mikroskop gelegt, das zur Initialisierung und zum optischen Auslesen des NV-Zentrums verwendet wird*

*For quantum computers based on NV centers in diamond, the diamond chip is placed under an optical microscope that is used to initialize and read out the NV center optically*



### **SPINNING – photonische Kopplung bei hoher Güte**

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten und vom Fraunhofer IAF koordinierten Projekt SPINNING wird ein universeller Quantencomputer entwickelt, der sich durch ein einzigartiges vernetztes und hybrides Design auszeichnet. Dabei werden Qubit-Register durch Farbzentren in Diamant und den sie umgebenden Kernspins hergestellt, die mit Mikroresonatoren photonisch miteinander gekoppelt werden. Diese innovative Technik ermöglicht es, Distanzen von mehreren Metern zwischen den Quantenregistern zu überwinden. In diesem Konzept eines Spin-Photon-basierten Quantencomputers steckt ein großes Transferpotenzial, da es nicht nur über eine hohe Skalierbarkeit verfügt, sondern auch über eine hohe Konnektivität, die eine flexible Verbindung mit konventionellen Computern ermöglicht.

Dem Projektteam von SPINNING gelang es, erstmals die Verschränkung von zwei Registern aus je sechs Qubits über eine Distanz von 20 m erfolgreich zu demonstrieren und dabei eine hohe mittlere Güte (im Sinne der Ähnlichkeit der verschränkten Zustände) zu erreichen. Des Weiteren konnten zur Projekthälfte bereits signifikante Verbesserungen in der zentralen Hardware und Software sowie der Peripherie für den Spin-Photon-basierten Quantencomputer erzielt werden.

Das Basismaterial und dessen Bearbeitung sowie die Realisierung von Farbzentren in Diamant zur Erzeugung von Qubits konnten ebenso verbessert werden wie die Technologie der photonischen Resonatoren. Dabei wurden erfolgreich Germanium- und Zinn-Vakanz-Defekte, die selbst als Qubit dienen können, in begleitenden Komponenten wie Detektoren und Quellen demonstriert und Diamantmaterialien mit einem kontrollierten Kernspinbad hergestellt. Darüber hinaus wurden hohe Q-Faktoren für Mikroresonatoren aus Diamant erreicht, in denen Farbzentren gezielt platziert wurden.

Ferner ist es dem Konsortium gelungen, die für den Betrieb des Quantencomputer nötige Elektronik zu entwickeln und erste Anwendungen des Quantencomputers für künstliche Intelligenz aufzuzeigen.

### **SPINUS – magnetische Kopplung und Quantensimulatoren**

Zur Entwicklung von festkörperbasierten Qubits für Quantensimulatoren und Quantencomputer werden im Horizon-Europe-Projekt SPINUS dipolare Wechselwirkungen zwischen den Elektronenspins des Stickstoff-Vakanz-Zentrums (NV-Zentrum) genutzt, was NV-NV-Abstände von einigen zehn Nanometern erfordert. Neben der technischen Herausforderung, NV-Zentren in einer regelmäßigen Anordnung auf so kleinen Längenskalen anzuordnen, ist die Auslesung der Quantenzustände schwierig, da benachbarte NV-Zentren optisch nicht mehr aufgelöst werden können. Das Projekt SPINUS reagiert auf diese Herausforderungen mit der Entwicklung von neuartigen Auslesetechniken und verbesserten Materialsynthesen.

### **SPINNING — high-quality photonic coupling**

In the SPINNING project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and coordinated by Fraunhofer IAF, a universal quantum computer is being developed that is characterized by a unique networked and hybrid design. In this project, qubit registers are created by color centers in diamond and the nuclear spins surrounding them. These are photonically coupled to each other using microresonators. This innovative technique makes it possible to overcome distances of several meters between the quantum registers. This concept of a spin-photon-based quantum computer has great transfer potential because it not only has high scalability but also high connectivity, which allows flexible connection to conventional computers.

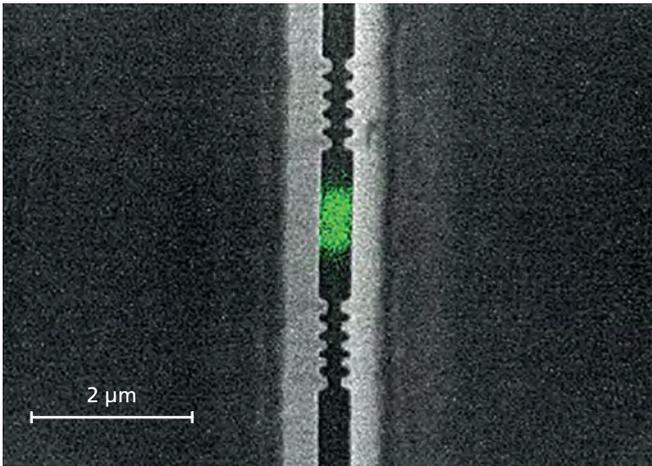
The SPINNING project team succeeded in demonstrating the entanglement of two registers of six qubits over a distance of 20 m for the first time, achieving a high medium quality (in terms of the similarity of the entangled states). Furthermore, significant improvements in the central hardware and software, as well as the peripherals for the spin-photon-based quantum computer, have already been achieved at the halfway point of the project.

The base material and its processing, as well as the realization of color centers in diamond for the generation of qubits, have been improved, as has the technology of photonic resonators. In the process, germanium-vacancy and tin-vacancy defects, which can serve as qubits themselves, were successfully demonstrated in accompanying components such as detectors and sources, and diamond materials were produced with a controlled nuclear spin bath. Furthermore, high Q-factors were achieved for microresonators made of diamond, in which color centers were placed in a targeted manner.

Furthermore, the consortium has succeeded in developing the electronics necessary for operating the quantum computer and in demonstrating the first applications of the quantum computer for artificial intelligence.

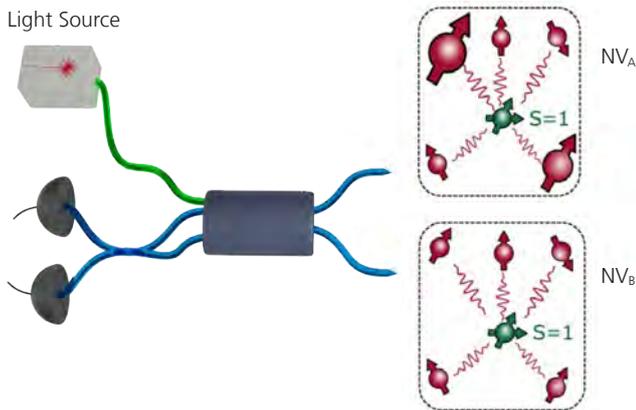
### **SPINUS — magnetic coupling and quantum simulators**

In the Horizon Europe project SPINUS, dipolar interactions between the electron spins of the nitrogen-vacancy center (NV center) are used to develop solid-state qubits for quantum simulators and quantum computers, which requires NV-NV distances of several tens of nanometers. In addition to the technical challenge of arranging NV centers in a regular arrangement on such small length scales, the readout of the quantum states is difficult because neighboring NV centers can no longer be resolved optically. The SPINUS project is responding to these challenges by developing novel readout techniques and improved material syntheses.



*Rasterelektronenmikroskopieaufnahme eines Mikroresonators, gefertigt in Diamant mit NV-Farbzentren detektiert, durch Kathodolumineszenz*

*Scanning electron micrograph of a microcavity fabricated in diamond with NV color centers detected by cathodoluminescence*



*Schematische Darstellung der Verschränkung von zwei Qubit-Registern entsprechend den Ergebnissen des Projekts SPINNING*

*Schematic representation of the entanglement of two qubit registers as achieved in project SPINNING*

Quantensimulatoren sind ein wichtiges Werkzeug zur Untersuchung von sogenannten angetrieben-dissipativen Quantensystemen und topologischen Phasen der Materie. Die Berechnung großer Quantensysteme ist selbst für klassische Supercomputer eine Herausforderung. Daher wird in SPINUS nicht nur ein festkörperbasierter Quantencomputer mit mehr als zehn Qubits realisiert, sondern auch ein Festkörper-Quantensimulator, der die Simulation mit mehr als 50 Qubits ermöglicht.

Dabei kommt ein ganzheitlicher Ansatz zu tragen, der gleich mehrere Schlüsselinnovationen vorantreibt. Neben NV-Zentren in Diamant werden auch Silizium-Vakanz- und Divakanz-Zentren in Siliziumkarbid als vielversprechendes alternatives Wirtsmaterial untersucht. Es werden neue Materialwachstumsprozesse entwickelt, um Sandwichstrukturen aus Schichten von wenigen Nanometern Dicke von durch Isotopen kontrolliertem Diamant und Siliziumkarbid zu synthetisieren. Darüber hinaus werden Co-Dotierung und Oberflächenterminierung getestet, um die Farbzentrenausbeute und Ladungsstabilität zu erhöhen. Elektrische Auslesetechniken werden mit Einzelelektronen-Bipolartransistoren als Verstärker kombiniert, um eine hochpräzise Spinauslesung bei Raumtemperatur zu erreichen, die mit den dichten Anordnungen von dipolgekoppelten NV-Zentren kompatibel ist.

Diese experimentellen Forschungen werden durch die Entwicklung eines umfassenden Software-Stacks flankiert. Dieser umfasst verbesserte Protokolle zur Hardware-Charakterisierung der neuen Defekte und bessere Steuerungssequenzen für Initialisierung, Auslesen und Quantengatter. Hybride Variationalalgorithmen für Quantenoptimierung, Quantenchemie und Quantenmaschinelernen werden auf die Hardware zugeschnitten, um realistische Anwendungsfälle zu identifizieren, in denen festkörperbasierte Quantenbauelemente einen Vorteil gegenüber klassischen Computern bieten können.

**Eine neue Ära der Quantencomputer**

Die Projekte SPINNING und SPINUS zeigen gleich mehrere Wege auf, die am Fraunhofer IAF verfolgt werden, um skalierbare, festkörperbasierte Quantencomputer zu demonstrieren. Bei der Forschung und Entwicklung steht der Transfer in kommerzielle Systeme wie die der Industriepartner im Vordergrund. Gemeinsam mit seinen Projektpartnern setzt das Fraunhofer IAF neue Maßstäbe für Festkörper-Quantentechnologien und ebnet so den Weg für eine neue Generation robuster und energieeffizienter Quantencomputer, die neue Märkte wie mobile oder dezentrale Anwendungen erschließen können.

Quantum simulators are an important tool for investigating so-called driven-dissipative quantum systems and topological phases of matter. Computing large quantum systems is a challenge even for classical supercomputers. Therefore, SPINUS will not only realize a solid-state-based quantum computer with more than ten qubits, but also a solid-state quantum simulator that allows the simulation with more than 50 qubits.

This involves a holistic approach that simultaneously advances several key innovations. In addition to NV centers in diamond, silicon vacancy and divacancy centers in silicon carbide are being investigated as a promising alternative host material. New material growth processes are being developed to synthesize sandwich structures of diamond and silicon carbide layers that are controlled by isotopes and have thicknesses of a few nanometers. In addition, co-doping and surface termination are being tested to increase the color center yield and charge stability. Electrical readout techniques are combined with single-electron bipolar transistors as amplifiers to achieve highly precise spin readout at room temperature that is compatible with dense arrays of dipole-coupled NV centers.

This experimental research is accompanied by the development of a comprehensive software stack. This includes improved protocols for hardware characterization of the new defects and better control sequences for initialization, readout, and quantum gates. Hybrid optimization algorithms for quantum optimization, quantum chemistry, and quantum machine learning will be tailored to the hardware to identify realistic use cases in which solid-state quantum devices can offer an advantage over classical computers.

### **A new era of quantum computers**

The projects SPINNING and SPINUS showcase several approaches that are being pursued at Fraunhofer IAF to demonstrate scalable, solid-state quantum computers. The research and development focuses on the transfer into commercial systems, such as those of industrial partners. Together with its project partners, Fraunhofer IAF is setting new standards for solid-state quantum technologies, paving the way for a new generation of robust and energy-efficient quantum computers that can open up new markets such as mobile or decentralized applications.

### **Stand der Technik übertriften**

Der exemplarische Vergleich der Zwischenergebnisse aus SPINNING mit den Kennzahlen von Quantencomputern auf Basis supraleitender Josephson-Kontakte (superconducting Josephson junctions, SJJs), in deren Entwicklung bislang weltweit ein Vielfaches der Ressourcen investiert wurde, zeigt das enorme Potenzial der Technologie: Der bislang zwölf Qubits umfassende Spin-Photon-basierte Quantencomputer erreicht im Ein-Qubit-Gatter mit einer Fehlerquote von  $< 0,5\%$  das gleiche Ergebnis wie die prominenten SJJ-Modelle Eagle (127 Qubits) und Heron (154 Qubits), die Teil der kommerzielle nutzbaren IBM-Quantencomputing-Cloud sind.

Bei der Kohärenzzeit übertrifft der Spin-Photon-basierte Quantencomputer mit einer Länge von über 10 ms die SJJ-Modelle ( $> 50 \mu\text{s}$ ) deutlich, obwohl die Distanz bei der Verschränkung mit 20 m gegenüber wenigen Millimetern um ein Vielfaches größer ausfällt. Dies ermöglicht längere Rechenoperationen und somit das Lösen komplexerer Problemstellungen.

### **Surpassing the state of the art**

The exemplary comparison of the interim results from SPINNING with the key figures of quantum computers based on superconducting Josephson junctions (SJJs), in the development of which many times the resources have been invested worldwide to date, shows the enormous potential of the technology: The spin-photon-based quantum computer, which so far comprises twelve qubits, achieved in its one-qubit gate with an error rate of  $< 0.5\%$  the same result as the prominent SJJ models Eagle (127 qubits) and Heron (154 qubits), which are part of the commercially available IBM quantum computing cloud.

In terms of coherence time, the spin-photon-based quantum computer with a length of over 10 ms significantly exceeds the SJJ models ( $> 50 \mu\text{s}$ ), although the distance for entanglement is many times greater (20 m compared to a few millimeters). This enables longer computing operations and thus the solution of more complex problems.

# DAS Quantencomputing-Ökosystem Baden-Württembergs

## THE Quantum Computing Ecosystem in Baden-Württemberg

Das Potenzial der Quantencomputer nutzen und einen echten Vorteil für praxisrelevante Anwendungen erzielen – dieses Ziel wird weltweit verfolgt. In Baden-Württemberg ist das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg (KQCBW) mit seiner Forschung ganz vorne mit dabei. In erfolgreichen Verbundprojekten konnten in verschiedenen Bereichen des Quantencomputings große Fortschritte erzielt werden. Der Erfolg des KQCBW wird fortgesetzt und das einzigartige Quantencomputing-Ökosystem im Land weiter ausgebaut.

Harnessing the potential of quantum computers and achieving a real advantage for practical applications — this goal is being pursued worldwide. In Baden-Württemberg, Germany, the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) is at the forefront of this research. Major progress has been made in various areas of quantum computing in successful joint projects. The success of the KQCBW will be continued and the unique quantum computing ecosystem in the state of Baden-Württemberg, Germany, will be further expanded.



*Unter dem Dach der baden-württembergischen Quantentechnologie-Innovationsinitiative Quantum<sup>BW</sup> leistet das KQCBW zentrale Beiträge zu Fortschritten im Quantencomputing und zur Fortschreibung der Landesstrategie in diesem Feld*

*Under the umbrella of Baden-Württemberg's innovation initiative on quantum technologies, Quantum<sup>BW</sup>, the KQCBW contributes significantly to advances in quantum computing and to the development of the state's strategy in this field*

Nach der erfolgreichen Durchführung von insgesamt elf Verbundprojekten in rund vier Jahren wird der Erfolg des KQCBW in einem zehnmonatigen Transferprojekt fortgeführt. Dabei werden die zahlreichen und sehr guten Forschungsergebnisse aus den Vorgängerprojekten fortgesetzt, die einen wichtigen Beitrag zum Wissenstransfer im Land leisteten. Die im KQCBW erreichten Ergebnisse wurden auf vielfältige Weise zahlreich und weit in die relevanten Fachkreise verbreitet und bildeten zudem die Grundlage für umfangreiche und einzigartige Quantencomputing-Schulungsangebote mit tiefen Einblicken in Anwendungsfälle für die Industrie sowie einem Kompaktformat für einen niederschweligen Einstieg.

Das KQCBW leistet zudem unter dem Dach der Quantentechnologie-Innovationsinitiative des Landes Baden-Württemberg Quantum<sup>BW</sup> zentrale Beiträge zu Fortschritten im Quantencomputing und zur Fortschreibung der Landesstrategie in diesem Feld. Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg hat Fördermittel zur Umsetzung von Maßnahmen zur Weiterentwicklung des KQCBW mit einem Gesamtvolumen von bis zu 20 Millionen Euro in den Haushaltsjahren 2024 bis 2028 bereitgestellt. In einer Transferphase werden nun die Grundlagen für die Fortsetzung im Rahmen der nächsten geplanten Förderphase erarbeitet, die im Sommer 2025 beginnen soll.

### **Kein Quantencomputing ohne Quantencomputer**

Um anwendungsorientierte Forschung zum Quantencomputing betreiben zu können, sind reale und performante Quantencomputer unabdingbar. Ein wesentliches Element im KQCBW ist daher der Zugang zu einer leistungsfähigen und modernen Quantencomputer-Infrastruktur. Hierzu führt die Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des KQCBW seine privilegierte Zusammenarbeit mit der IBM Deutschland GmbH fort. Mit einer Vereinbarung erhält das KQCBW Zugang zu IBMs Flotte der neuesten Utility-Scale-Quantensysteme in Ehningen sowie in den USA, die über die Cloud verfügbar sind. Abhängig von den Fortschritten in den einzelnen Anwendungen werden parallel insbesondere Vergleiche mit weiteren Ansätzen ermöglicht, etwa mit photonischen Quantencomputern oder solchen auf Basis von Ionenfallen.

Neben diesen Systemen wird am Fraunhofer IAF auch der Zugriff auf NV-basierten Quantencomputer und die Bereitstellung der HPC-Simulationsinfrastruktur (High-Performance Computing) sowie der virtuellen Demonstrator-Plattform zur Simulation von Quantenalgorithmen für alle Projektpartner innerhalb des KQCBW ermöglicht. Dies bildet eine umfangreiche Quantencomputer-Infrastruktur, die den Partnern des KQCBW ideale Voraussetzungen für ihre Forschungsarbeiten bietet und den Wissens- und Forschungstransfer im Land stärkt.

After the successful completion of a total of eleven joint projects in about four years, the success of the KQCBW will be continued in a ten-month transfer project. The numerous and excellent research results from the predecessor projects, which made an important contribution to knowledge transfer in the state of Baden-Württemberg, Germany, will be continued. The results achieved in the KQCBW were disseminated in a variety of ways to numerous and far-reaching relevant experts and also formed the basis for extensive and unique quantum computing training programs with deep insights into use cases for industry, as well as compact formats for low-threshold entry.

Under the umbrella of the Baden-Württemberg's innovation initiative on quantum technologies, Quantum<sup>BW</sup>, the KQCBW makes a central contribution to advances in quantum computing and to the updating of the state's strategy in this field. The Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, Labor and Tourism has provided funding of up to 20 million euros in the budget years from 2024 to 2028 to implement measures for the further development of the KQCBW. In a transfer phase, the foundations are now being laid for its continuation in the next planned funding phase, which is scheduled to begin in summer 2025.

### **No quantum computing without quantum computers**

In order to conduct application-oriented research on quantum computing, real and performant quantum computers are indispensable. An essential element in the KQCBW is therefore access to a powerful and modern quantum computer infrastructure. To this end, the Fraunhofer-Gesellschaft is continuing its privileged collaboration with IBM Deutschland GmbH as part of the KQCBW. An agreement gives the KQCBW access to IBM's fleet of the latest utility-scale quantum systems in Ehningen and in the USA, which are available via the cloud. Depending on the progress in the individual applications, comparisons with other approaches such as photonic and trapped-ion quantum computers will be possible in parallel.

In addition to these systems, access to quantum computers based on nitrogen-vacancy centers (NV centers) and the provision of the High-Performance Computing (HPC) simulation infrastructure and the virtual demonstrator platform for simulating quantum algorithms will be made available at Fraunhofer IAF to all project partners within the KQCBW. This forms a comprehensive quantum computing infrastructure that offers the partners of the KQCBW ideal conditions for their research work and strengthens the transfer of knowledge and research in the state of Baden-Württemberg, Germany.

# Revolutionäre Präzision: Projekt AMADEUS und die Zukunft der Quantensensorik

---

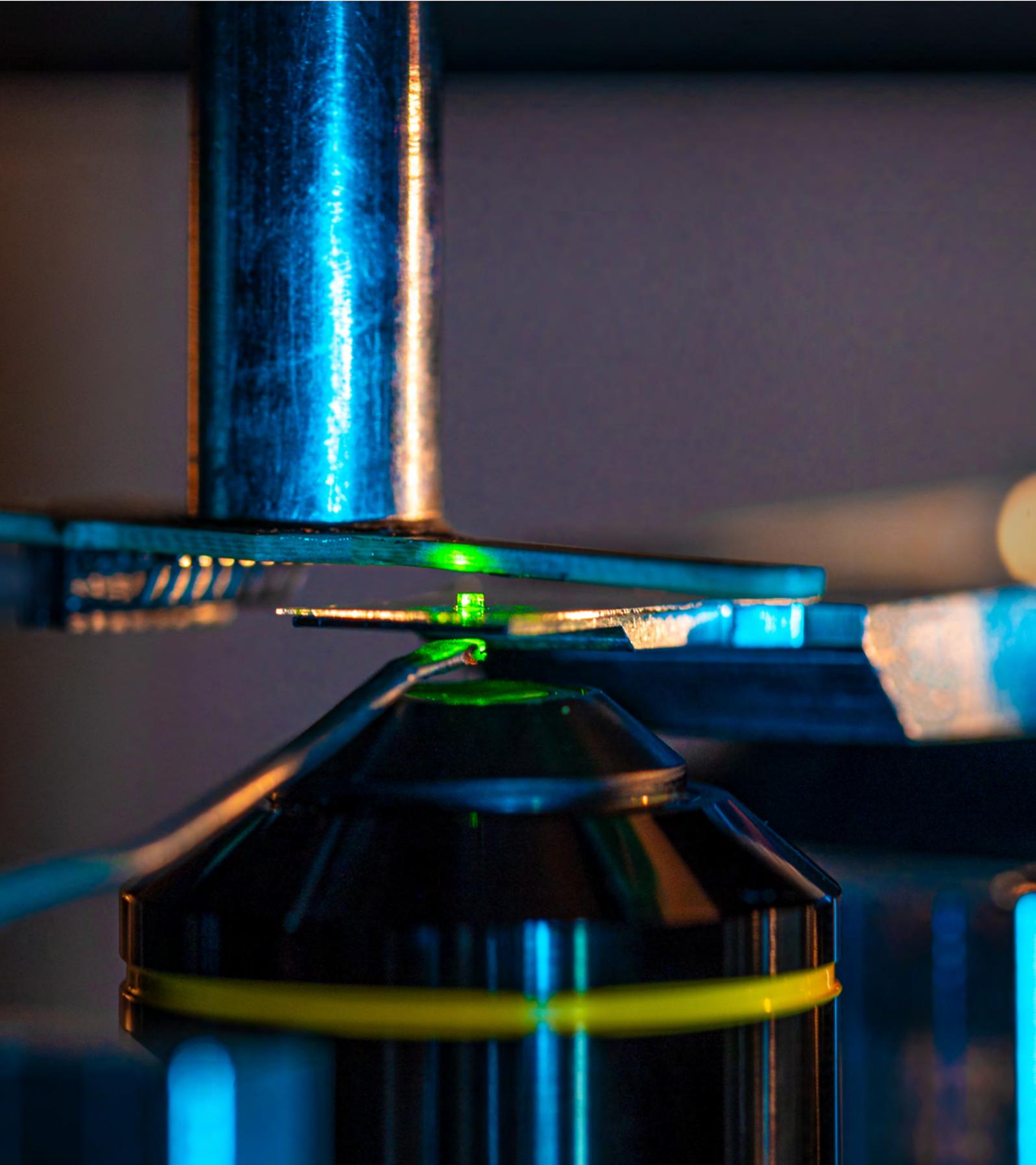
## Revolutionizing Precision: Project AMADEUS and the Future of Quantum Sensing

Quantentechnologien gestalten die Zukunft, und das EU-Projekt AMADEUS steht an der Spitze dieser Revolution. Durch die Nutzung von NV-Zentren in Diamant entwickelt das Projekt vier bahnbrechende Anwendungen für die Quantensensorik, die eine unübertroffene Präzision bei der Messung magnetischer und elektrischer Felder ermöglichen. Das Fraunhofer IAF spielt eine entscheidende Rolle bei der Weiterentwicklung dieser Innovationen, indem es den Wissenstransfer zwischen den Partnern erleichtert und Wege für die industrielle Umsetzung erforscht. AMADEUS zeigt, wie aus Spitzenforschung reale Lösungen werden und den Weg für eine smartere und effizientere Gesellschaft ebnen.

Quantum technologies are shaping the future, and the EU project AMADEUS is at the forefront of this revolution. By utilizing NV centers in diamond, the project develops groundbreaking applications for quantum sensing, delivering unmatched precision in measuring magnetic and electric fields. Fraunhofer IAF plays a vital role in advancing these innovations, facilitating knowledge transfer among partners and exploring avenues for industrial implementation. AMADEUS illustrates how cutting-edge research evolves into real-world solutions, paving the way for a smarter and more efficient society.

*Das Weitfeldmagnetometer erlaubt es, lokalisierte Defekte im Mikrometerbereich abzubilden (hier in einem Mikrochip)*  
*The wide-field magnetometer makes it possible to image localized defects in the micrometer range (here in a microchip)*





Quantentechnologien haben sich als transformative Kraft erwiesen, die Herausforderungen in Bereichen vom Gesundheitswesen bis hin zur industriellen Automatisierung angeht. Das EU-Projekt »AMADEUS – Advancing the Market Uptake of Diamond Defect Quantum Sensors« veranschaulicht dieses Potenzial durch die Entwicklung von vier innovativen Quantensensor-Anwendungen auf der Grundlage von Stickstoff-Vakanzen-Zentren (NV-Zentren) in Diamant. Diese Sensoren verbessern die Präzisionsmessung und ermöglichen eine beispiellose Genauigkeit bei der Erkennung magnetischer und elektrischer Felder in verschiedenen Branchen.

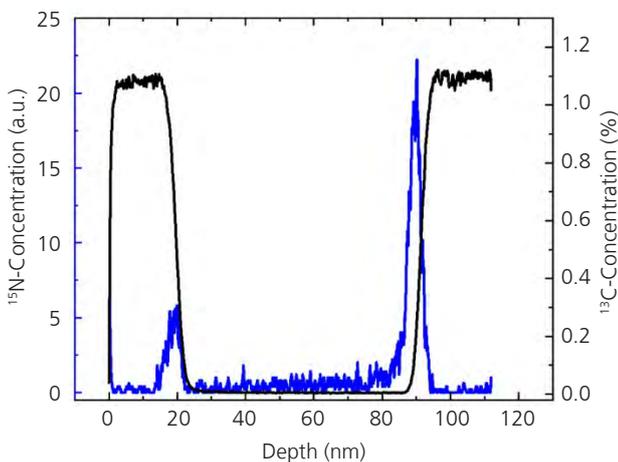
Zusammenarbeit und Wissenstransfer sind Grundpfeiler von AMADEUS. Das Fraunhofer IAF arbeitet eng mit Projektpartnern zusammen, darunter Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, um eine nahtlose Integration von Fachwissen und Technologie zu gewährleisten. Durch die frühzeitige Einbindung potenzieller Endnutzer werden im Rahmen des Projekts die wichtigsten Herausforderungen bei der Sensoreinführung ermittelt und durch iteratives Design und Testen angegangen. Die Fortschritte des Instituts beim optimierten Diamantwachstum und den Verarbeitungstechniken waren entscheidend für die Überführung theoretischer Fortschritte in konkrete Technologien. Dies ermöglichte ultrareine Diamantsubstrate mit NV-Zentren in kontrollierter Dichte und Schichtdicken vom Mikrometer- bis in den Nanometerbereich, was für eine optimale Sensorleistung entscheidend ist. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 dargestellt: Sie zeigt das SIMS-Profil (Sekundärionen-Massenspektrometrie) einer isotopisch kontrollierten NV-dotierten Diamantschicht, die mit einer Schichtdicke von 80 Mikrometern (blaue Linie, die den Einbau von <sup>15</sup>N zeigt) gewachsen wurde.

Darüber hinaus entwickelt das Fraunhofer IAF ein Weitfeldmagnetometer zur Erkennung von Defekten in Halbleiterschaltungen weiter: ein Werkzeug, das die Effizienz der Qualitätskontrolle und Fehleranalyse in der Mikroelektronik verbessert.

Quantum technologies have emerged as a transformative force, addressing challenges in areas from healthcare to industrial automation. The EU project *AMADEUS — Advancing the Market Uptake of Diamond Defect Quantum Sensors* exemplifies this potential by developing four innovative quantum sensing applications based on nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond. These sensors advance precision measurement, enabling unparalleled accuracy in detecting magnetic and electric fields across multiple industries.

Collaboration and knowledge transfer are hallmarks of AMADEUS. Fraunhofer IAF is cooperating closely with partners, including universities, research organizations, and industrial stakeholders, to ensure seamless integration of expertise and technology. By engaging early with potential end users, the project identifies key challenges in sensor deployment and addresses them through iterative design and testing. The institute's advances in optimized diamond growth and processing techniques have been crucial in translating theoretical advancements into tangible technologies. It allowed for ultrapure diamond substrates with controlled NV center densities and layer thicknesses from the micrometer down to the nanometer scale, which is critical for optimal sensor performance. One example is displayed in Figure 1 showcasing the Secondary ion mass spectrometry (SIMS) profile profile of an isotopically controlled NV-doped diamond layer grown with a layer thickness of 80 micrometers (blue line, showing incorporation of <sup>15</sup>N).

Additionally, Fraunhofer IAF is further developing a wide-field magnetometer for detecting defects in semiconductor circuits: a tool that enhances the efficiency of quality control and failure analysis in microelectronics. This microscope utilizes NV-based quantum sensing to achieve high-resolution imaging of electronic components, detecting defects that are invisible to conventional methods. By integrating NV centers with advanced optical detection techniques, the system offers a non-invasive, highly sensitive approach to defect characterization,



**Abb. 1: SIMS-Profil von flachen, mit Stickstoff dotierten Dünnschichten. Die dotierten Schichten sind an der Zunahme der Stickstoffkonzentration (blau) und dem Abfall der <sup>13</sup>C-Isotopenkonzentration (schwarz) erkennbar. Durch die diskrete Schichtung von Dünnschichten mit maßgeschneiderten Eigenschaften werden Diamanten für spezifische Quantensensorikanwendungen hergestellt.**

*Fig. 1: SIMS profiles of shallow, nitrogen doped thin films. The doped layers are visible from the increase in nitrogen concentration (blue) and the dip in the <sup>13</sup>C isotope concentration (black). Discrete layering of thin films with tailored properties is done to create diamonds for specific quantum sensing applications.*

Dieses Mikroskop nutzt NV-basierte Quantensensorik, um eine hochauflösende Bildgebung von elektronischen Komponenten zu erreichen und Defekte zu erkennen, die für herkömmliche Methoden unsichtbar sind. Durch die Integration von NV-Zentren mit fortschrittlichen optischen Detektionsverfahren bietet das System einen nicht-invasiven, hochempfindlichen Ansatz zur Fehlercharakterisierung. Dadurch können die Erträge in der Produktion verbessert und so die Kosten in der Halbleiterfertigung gesenkt werden, da einzelne fehlerhafte Bauteile ausgesondert werden können. Mit dieser Technik ist es möglich, lokalisierte Defekte im Mikrometerbereich abzubilden, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wo das Magnetfeld einer 2D-Elektronengasstruktur dargestellt ist.

Das industrielle Transferpotenzial der Ergebnisse von AMADEUS ist groß. Die entwickelten Technologien werden auf ihre Kommerzialisierung in Sektoren wie dem Gesundheitswesen, der Energie sowie der Luft- und Raumfahrt untersucht. So haben beispielsweise Magnetfeldsensoren das Interesse von Unternehmen geweckt, die auf medizinische Diagnostik spezialisiert sind. Darüber hinaus eignen sich NV-basierte Sensoren aufgrund ihrer Robustheit und Vielseitigkeit besonders für Anwendungen in rauen Umgebungen, zum Beispiel für die Weltraumforschung oder für Systeme zur Erzeugung erneuerbarer Energien (etwa Offshore-Windparks).

Über industrielle Anwendungen hinaus hat AMADEUS auch einen positiven gesellschaftlichen Einfluss. Durch die Ermöglichung genauerer Diagnose- und Überwachungssysteme können diese Sensoren die Ergebnisse im Gesundheitswesen verbessern und die Effizienz kritischer Infrastrukturen steigern. Darüber hinaus unterstreicht das Projekt das Potenzial der europäischen Forschung, in der Quantentechnologie führend zu sein, und fördert das Wirtschaftswachstum und die technologische Souveränität.

Die Rolle des Fraunhofer IAF in AMADEUS ist ein Beispiel für sein Engagement, Innovationen voranzutreiben und sicherzustellen, dass bahnbrechende Forschung in die Praxis umgesetzt wird. Durch seine Expertise in den Bereichen Materialwissenschaft und Gerätetechnik hat das Institut den Grundstein für eine neue Generation von Quantensensoren gelegt, die eine Neudefinition der Präzisionsmessung versprechen. Wenn diese Technologien in die industrielle Nutzung übergehen, werden sie eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung einer smarteren und nachhaltigeren Zukunft spielen.

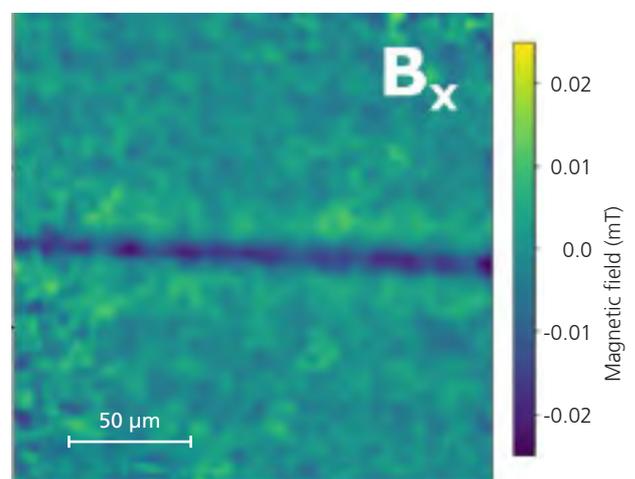
**Abb. 2: Erfassung des Magnetfelds in 2D-Elektronengasstrukturen mit hoher lokaler Präzision und Empfindlichkeit bis zu mehreren  $\mu\text{T}$**   
Fig. 2: Detection of the magnetic field in 2D electron gas structures with high local precision and sensitivity down to several  $\mu\text{T}$

improving production yields and reducing costs in semiconductor manufacturing. With this technique it is possible to image localized defects in the micrometer scale as seen in Figure 2 where the magnetic field of a 2D electron gas structure is displayed.

The industrial transfer potential of AMADEUS' outcomes is immense. The technologies developed are being explored for commercialization in sectors like healthcare, energy, and aerospace. For instance, magnetic field sensors have attracted interest from companies specializing in medical diagnostics. Furthermore, the robustness and versatility of NV-based sensors make them particularly suited for harsh environments, such as space exploration and renewable energy systems.

Beyond industrial applications, the social impact of AMADEUS is significant. By enabling more accurate diagnostics and monitoring systems, these sensors can improve healthcare outcomes and enhance the efficiency of critical infrastructure. Additionally, the project highlights the potential of European research to lead in quantum technologies, fostering economic growth and technological sovereignty.

The role of Fraunhofer IAF in AMADEUS exemplifies its commitment to driving innovation and ensuring groundbreaking research reaches practical application. Through its expertise in material science and device engineering, the institute has laid the foundation for a new generation of quantum sensors that promise to redefine precision measurement. As these technologies transition to industrial use, they will play a crucial role in shaping a smarter, more sustainable future.

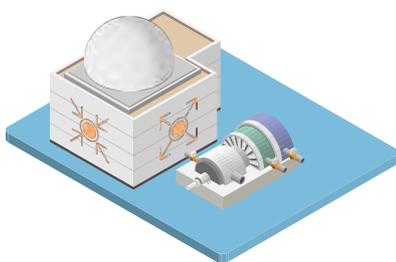


# Fusionsenergie: Energiequelle der Zukunft

## Fusion Energy: the Energy Source of the Future

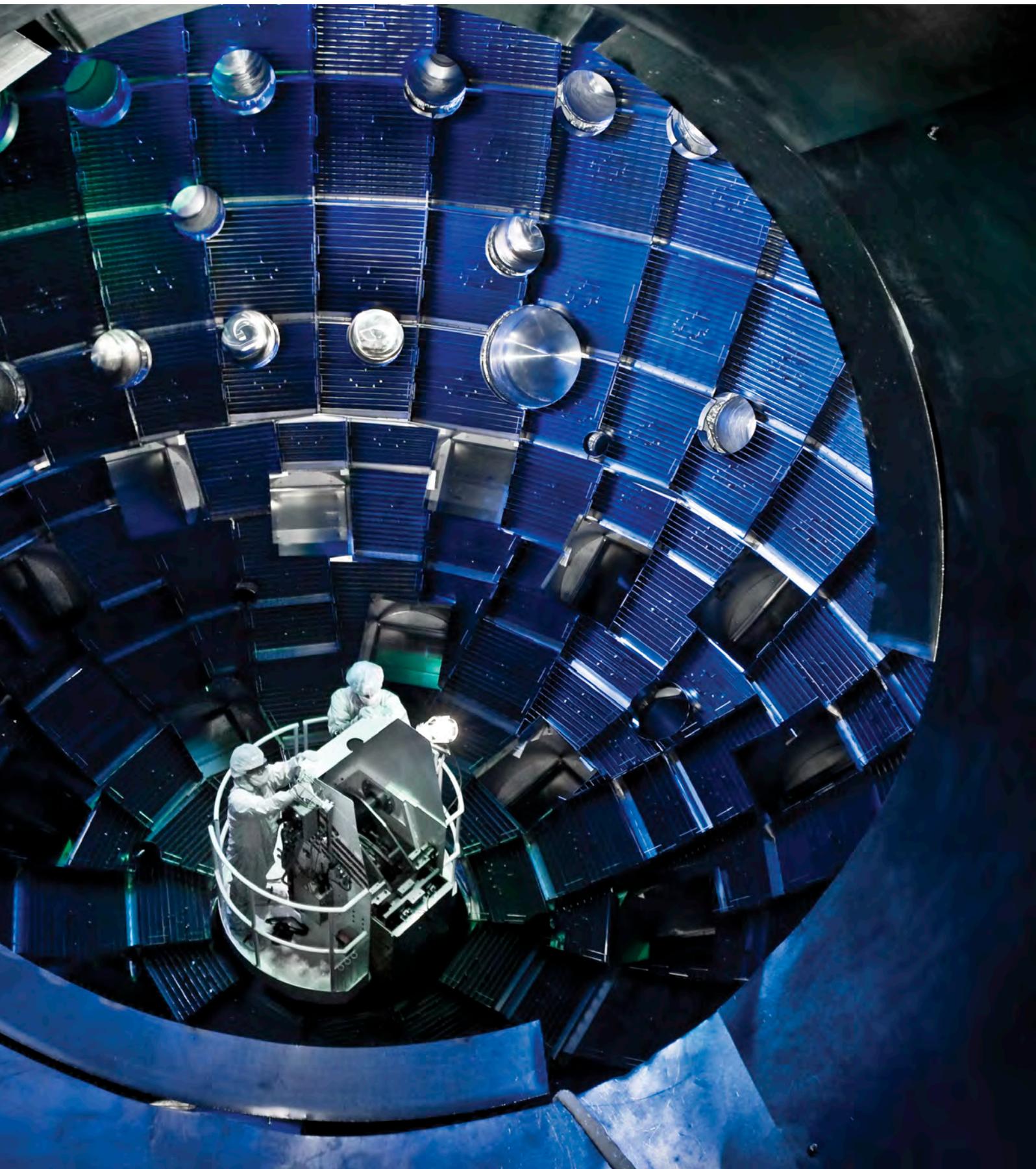
Die Kernfusion birgt grundsätzlich ein enormes Potenzial, um Energiebedarfsprobleme weltweit ab den 2040er Jahren zu lösen. Um den Weg zu Deutschlands erstem Fusionskraftwerk zu ebnen, startete die Bundesregierung 2024 das Förderprogramm Fusion 2040 mit einem Gesamtvolumen von mehr als einer Milliarde Euro. In diesem Rahmen fiel im Dezember 2024 auch der Startschuss zum IFE Targetry HUB, der Targets als Basistechnologien für die laserbasierte Trägheitsfusion erforscht. Das Fraunhofer IAF leitet gemeinsam mit der Focused Energy GmbH das Verbundprojekt, bestehend aus 15 Partnern aus Forschung und Industrie.

Nuclear fusion has the potential to solve the world's energy needs starting in the 2040s. To pave the way for Germany's first fusion power plant, the federal government launched the Fusion 2040 funding program in 2024 with a total volume of more than one billion euros. In December 2024, the IFE Targetry HUB was launched as part of this program, researching targets as basic technologies for laser-based inertial confinement fusion. Fraunhofer IAF is leading the joint project together with Focused Energy GmbH, which consists of 15 partners from research and industry.



*Blick in die Targetkammer der National Ignition Facility des Lawrence Livermore National Laboratory, wo 2022 ein bahnbrechender Meilenstein gelang: Das Konzept der Kernfusion als potenzielle Energiequelle wurde erfolgreich demonstriert.  
View into the target chamber of the National Ignition Facility of the Lawrence Livermore National Labor, where a groundbreaking milestone was reached in 2022: the concept of nuclear fusion as a potential energy source was successfully demonstrated.*



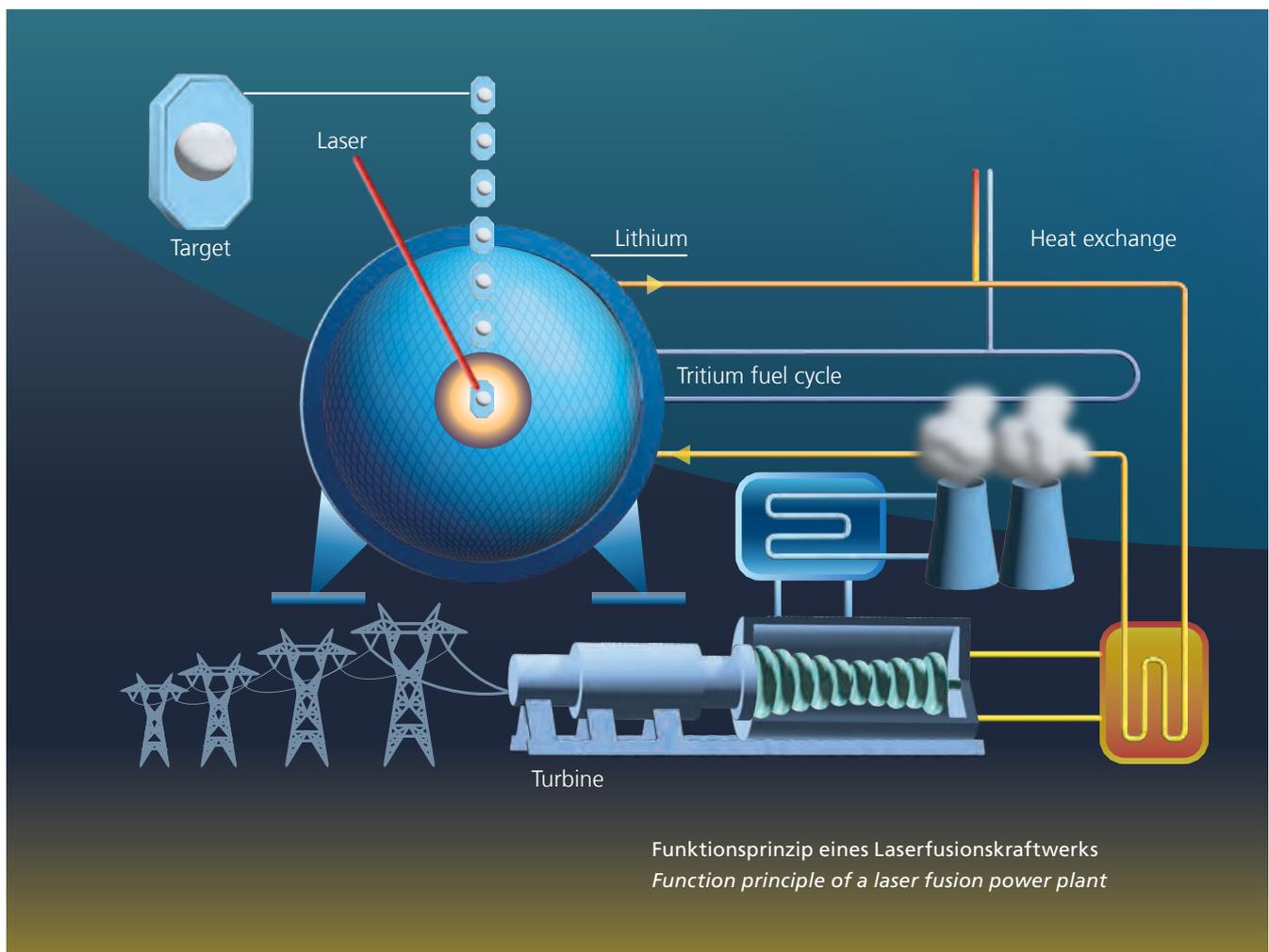


Nachdem das Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) erstmals eine erfolgreiche Kernfusion als potenzielle Energiequelle demonstrierte, ist weltweit das Interesse an der Technologie rasant gestiegen. Kernfusion bietet enorme Vorteile: Aus einem Kilogramm Fusionsbrennstoff lässt sich ungefähr so viel Energie gewinnen wie aus 55.000 Barrel Diesel oder 18.630 Tonnen Braunkohle. Dabei wäre der produzierte Strom CO<sub>2</sub>-neutral. Bis die Kernfusion jedoch als nachhaltige Energiequelle genutzt werden und einen Mehrwert für die Gesellschaft bieten kann, sind unter anderem Fortschritte bei der Entwicklung von Target-Technologien notwendig.

Mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit über 2,5 Millionen Euro geförderten Projekt »Inertial Fusion Energy (IFE) Targetry HUB für die DT-Trägheitsfusion« (IFE Targetry HUB) wird in Deutschland ein wichtiger Grundstein für die Erforschung der laserbasierten Trägheitsfusion gelegt. Im IFE Targetry HUB bringen 15 Verbundpartner ihre unterschiedlichen Expertisen aus der Grundlagenforschung, der angewandten Forschung sowie der Industrie ein, um gemeinsam geeignete Materialien und Prozesse für die funktionale und kosteneffizient skalierbare Fertigung sowie Charakterisierung von sogenannten Targets für die laserbasierte Trägheitsfusion zu erforschen. Diese Targets bilden einen Flaschenhals für die Umsetzung der Kernfusion und sind somit eine Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum laserbasierten Fusionskraftwerk der Zukunft.

Since Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) first demonstrated successful nuclear fusion as a potential energy source, interest in the technology has grown rapidly worldwide. Nuclear fusion offers enormous advantages: about as much energy can be obtained from one kilogram of fusion fuel as from 55,000 barrels of diesel or 18,630 tons of brown coal. The electricity produced would be CO<sub>2</sub> neutral. However, before nuclear fusion can be used as a sustainable energy source and provide added value to society, advances in the development of target technologies, among others, are needed.

The *Inertial Fusion Energy Targetry HUB for DT Inertial Fusion* (IFE Targetry HUB), which is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) with over 2.5 million euros, is laying an important foundation for research into laser-based inertial fusion in Germany. In the IFE Targetry HUB, 15 partners are contributing their different expertise from basic and applied research and industry to jointly research suitable materials and processes for the functional and cost-efficiently scalable production and characterization of targets for laser-based inertial confinement fusion. These targets are a bottleneck for the realization of nuclear fusion and are therefore a key technology on the way to a laser-based fusion power plant of the future.



Funktionsprinzip eines Laserfusionskraftwerks  
Function principle of a laser fusion power plant

### Kleine Targets, große Wirkung

Die laserbasierte Trägheitsfusion ist ein gepulster Prozess, bei dem mit hochenergetischen Laserstrahlen als Treiber ein mit den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium gefülltes Target komprimiert und gezündet wird. Dabei wird eine Temperatur von bis zu 120 Millionen Grad Celsius erreicht, und der Brennstoff wird unter gewaltigem Druck komprimiert und erhitzt. Dies löst eine Fusionsreaktion aus, bei der die positiv geladenen Atomkerne ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und zu einem neuen, energetisch günstigeren Kern verschmelzen, wobei enorme Energie freigesetzt wird.

### Small targets, big impact

Laser-based inertial confinement fusion is a pulsed process in which a target filled with the hydrogen isotopes deuterium and tritium is compressed and ignited using high-energy laser beams as a driver. In this process, a temperature of up to 120 million degrees Celsius is reached, and the fuel is compressed and heated under enormous pressure. This triggers a fusion reaction in which the positively charged atomic nuclei overcome their mutual repulsion and merge into a new, energetically more favorable nucleus, releasing enormous energy.

*Bei der Demonstration des Konzepts der Kernfusion als potenzielle Energiequelle am LLNL diente als Target eine winzige Diamantkugel, hergestellt von Diamond Materials, einer Ausgründung aus dem Fraunhofer IAF*

*For the demonstration of the concept of nuclear fusion as a potential energy source at LLNL, a tiny diamond sphere, manufactured by Diamond Materials, a spin-off from Fraunhofer IAF, served as the target*



ø 2,1 mm

ø 1 mm

ø 16,25 mm

Das Fraunhofer IAF arbeitete seit dem Ende der 1990er Jahre an der Herstellung von sphärischem Diamant, der die Grundlage für die heutige Target-Entwicklung bildet. Diamond Materials, eine Ausgründung des Fraunhofer IAF, hat den komplexen Herstellungsprozess optimiert. Ihre sphärischen Diamant-Targets mit einem Durchmesser von lediglich 1 bis 3 mm kamen 2022 bei dem Experiment am LLNL zum Einsatz.

Neben der Expertise im Diamantwachstum bringt das Fraunhofer IAF sein Know-how und seine Infrastruktur im Bereich der Mikrostrukturtechnologien in Hinblick auf Oberflächenbehandlungen der sphärischen Targets sowie der Materialcharakterisierung in den IFE Targetry HUB ein. Ziel des Fraunhofer IAF ist es, den Wissenstransfer im Verbund zu gewährleisten und die Eignung der von den Verbundpartnern gefertigten Targets für die Trägheitsfusion zu testen und zu bewerten. Hierzu werden in experimentellen Versuchen Targets verschossen, um die Bedingungen der Trägheitsfusion zu simulieren.

Damit die Kernfusion gelingt, ist die Target-Geometrie, Grenzflächenbeschaffenheit und Reinheit, sprich die Materialqualität, von entscheidender Bedeutung. Im IFE Targetry HUB entwickeln und implementieren die 15 Partner daher gemeinsam neue Materialien und Prozesse zur hochgenauen Produktion, beispielsweise zur additiven Fertigung von Schäumen beziehungsweise Plasma-Beschichtung und Charakterisierung von Target-Komponenten. Die Forschung zielt auf eine hoch skalierbare Target-Produktion ab, die die hohen Anforderungen der laserbasierten Trägheitsfusion erfüllt und die Entwicklung eines Kraftwerks perspektivisch ermöglicht.

Fraunhofer IAF has been working on the production of spherical diamond that forms the basis of today's target development since the late 1990s. This complex manufacturing process was optimized by Diamond Materials, a Fraunhofer IAF spin-off. Their spherical diamond targets with a diameter of only 1 to 3 mm were used 2022 in the experiment at LLNL.

In addition to its expertise in diamond growth, Fraunhofer IAF contributes its know-how and infrastructure in the field of microstructure technologies with regard to surface treatments of spherical targets and material characterization to the IFE Targetry HUB. The goal of Fraunhofer IAF is to ensure knowledge transfer within the network and to test and evaluate the suitability of the targets manufactured by the network partners for inertial confinement fusion. To this end, targets are fired in experimental tests to simulate the conditions of inertial confinement fusion.

The target geometry, interface properties and purity, meaning the material quality, are of crucial importance for the success of the nuclear fusion. In the IFE Targetry HUB, the 15 partners are therefore jointly developing and implementing new materials and processes for high-precision manufacturing, working on, for example, additive manufacturing of foams or plasma coating and improving characterization of target components. The research aims at a highly scalable target production that meets the high requirements of successful laser-based inertial confinement fusion and that perspective enables the development of a power plant.

**Das Ziel des BMBF ist es, möglichst schnell und zielführend die Voraussetzungen für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken zu schaffen. Dabei werden technologieoffen beide Ansätze verfolgt – sowohl die Trägheitsfusion als auch die Fusion mittels magnetischen Einschlusses.**

*The BMBF aims at laying the foundations for building and operating fusion power plants as soon as possible. In this, both approaches are being pursued: inertial confinement fusion as well as magnetic confinement fusion.*

A vertical timeline on a dark blue background with abstract light trails. The timeline is marked with three main phases: 2025 (Research and Development Phase), 2035 (Transfer Phase), and 2045 (Operating Phase). Each phase is connected to a specific event by a horizontal line and a colored dot. The background features a glowing sphere at the top and a perspective view of a road or track leading upwards.

2045

Operating Phase

Construction and operation of a large number of fusion power plants

2035

Transfer Phase

Construction of a power plant prototype

2025

Research and Development Phase

Research into basic principles, interrelationships and materials, as well as the development of components and systems

# Höhepunkte 2024

---

## Highlights 2024

*Wir sind stolz auf die Auszeichnungen und Rekorde, die Forschende des Fraunhofer IAF vergangenes Jahr erzielt haben. Sie gehören zu unseren Höhepunkten des Jahres 2024 ebenso wie die kontaktreichen Messebesuche mit fruchtbarem Austausch.*

*We are proud of the awards and records that researcher at Fraunhofer IAF achieved last year. They are among the highlights of 2024, as are the many fruitful exchanges we had during our busy visits to trade fairs.*



# Highlight-Veranstaltungen 2024

## Highlight Events 2024

### »Tatort Physik« der DPG am Fraunhofer IAF

DPG's "Tatort Physik" at Fraunhofer IAF



#### 18. Januar 2024

14 Bachelorstudierende besuchten das Fraunhofer IAF und erhielten Einblick in die praktische Forschungsarbeit am Institut. Der Besuch fand im Rahmen der Veranstaltungsreihe »Tatort Physik« statt – ein Format des Arbeitskreises junge DPG (Deutsche Physikalische Gesellschaft) der Regionalgruppe Freiburg, bei der Studierende verschiedene Forschungsinstitute und Orte besuchen, an denen Physikerinnen und Physiker am Werk sind.

#### January 18, 2024

14 bachelor students visited Fraunhofer IAF and gained insights into the practical research work at the institute. The visit took place as part of the event series "Tatort Physik" — a format of the Freiburg regional group of the Young DPG (German Physical Society), in which students visit various research institutes and places where physicists are at work.



## Developer Conference Quantencomputing

### Developer Conference Quantum Computing

#### 7.–8. März 2024

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 Anwendungspotenziale von Quantencomputing für die Wirtschaft.

#### March 7–8, 2024

On March 7 and 8, 2024, the members of the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg (KQCBW) were invited to the second Developer Conference in Freiburg by Fraunhofer IAO and Fraunhofer IAF. In an interactive lecture program, the partners of the five joint research projects in the KQCBW presented the application potential of quantum computing for the industry.



## Girls' Day

### Girls' Day

#### 25. April 2024

Beim diesjährigen Girls' Day am 25. April begrüßte das Fraunhofer IAF wieder Schülerinnen ab Klasse 8. Die Mädchen bekamen einen Einblick in die Labore und den wissenschaftlichen Arbeitsalltag der Forschenden. Im Reinraum konnten die Schülerinnen Wafer bemalen und dann miterleben, wie ihre Zeichnung zu einer goldenen Mikrostruktur umgewandelt wurde. Dabei lernten sie die besonderen Bedingungen in einem Reinraum kennen und durften selbst in die Schutzausrüstung schlüpfen.

*Nach einem kurzen Crash-Kurs in die Themen Halbleiter, Mikroelektronik und Diamant sowie einer Sicherheitsunterweisung ging es für die Schülerinnen an den praktischen Teil des Girls' Day*  
*After a short crash course on semiconductors, microelectronics and diamonds as well as a safety briefing, the students moved on to the practical part of the Girls' Day*

#### April 25, 2024

At this year's Girls' Day on April 25, Fraunhofer IAF once again welcomed schoolgirls from grade 8 onwards. The girls were given insight into research, laboratories and the day-to-day work of scientists. In the cleanroom, the students were able to paint wafers and then witness how their drawings were transformed into a golden microstructure. They learned about the special conditions in a cleanroom and were allowed to slip into the protective overalls themselves.

## QBN-Austausch über »Quantum Sensing & Imaging«

### QBN exchange on Quantum Sensing & Imaging



*Die Quantensensorik-Forschungsaktivitäten des Fraunhofer IAF hat Dr. Philipp D'Astolfo, Wissenschaftler im Bereich Quantenmagnetometrie, in seinem Vortrag vorgestellt*

*In his talk, Dr. Philipp D'Astolfo, scientist in the field of quantum magnetometry, presented the quantum sensing research activities of Fraunhofer IAF*

#### 11. Juni 2024

Am 11. Juni begrüßte das Fraunhofer IAF Mitglieder des Quantum Business Network (QBN) zum Austausch und Netzwerken unter dem Motto »Quantum Sensing & Imaging«. Zahlreiche Beiträge boten Einblicke in die aktuellsten Entwicklungen in der Quantensensorik und Quantenbildgebung. Fachleute und Vertretende von Start-Ups, Unternehmen und Forschungseinrichtungen nutzten die Gelegenheit, um neue Ansätze und Anwendungen sowie die Labore des Fraunhofer IAF kennenzulernen.

#### June 11, 2024

On June 11, Fraunhofer IAF welcomed members of the Quantum Business Network (QBN) to exchange ideas and network under the slogan of Quantum Sensing & Imaging. Various contributions offered insights into the latest developments in the field of quantum sensing and quantum imaging. Experts and representatives of start-ups, companies and research institutions took the opportunity to get to know new approaches and applications as well as the laboratories of Fraunhofer IAF.

## European Microwave Week in Paris

### European Microwave Week in Paris

#### 22.–27. September 2024

Auf der European Microwave Week (EuMW) 2024 präsentierte das Fraunhofer IAF Ausstellungsexemplare der im Radiometer des Arctic Weather Satellite verbauten rauscharmen Verstärker-Module ebenso wie weitere Hochfrequenzelektronik aus den Anwendungsbereichen Satellitenkommunikation, Mobilfunk oder Tieftemperatur-Messtechnik. Am Konferenzprogramm nahmen außerdem die Forscher Dr. Laurenz John, Dr. Philipp Neining und Dr. Axel Tessmann teil. Am 25. September konnten Studierende und Berufseinsteigende aus dem Fachbereich Mikrowellentechnologie das Fraunhofer IAF zudem beim Young Professionals' Career Event kennenlernen.

#### September 22–27, 2024

At European Microwave Week (EuMW) 2024, Fraunhofer IAF presented exhibits of the low-noise amplifier modules installed in the Arctic Weather Satellite radiometer as well as other high-frequency electronics from the application areas of satellite communications, mobile communications or low-temperature measurement technology. Also, researchers Dr. Laurenz John, Dr. Philipp Neining and Dr. Axel Tessmann participated in the conference program. Furthermore, students and young professionals from the field of microwave technology could get to know Fraunhofer IAF at the Young Professionals' Career Event on September 25.

## Quantum Effects

### Quantum Effects

#### 8.– 9. Oktober 2024

Die zweite Auflage der internationalen Fachmesse für Quantentechnologien, die Quantum Effects, fand in Stuttgart statt. Das Fraunhofer IAF war Teil des 450 m<sup>2</sup> großen Quantum<sup>BW</sup>-Gemeinschaftsstands mit knapp 20 weiteren Mitausstellern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Der Stand bildete das Zentrum der Messe, was die Rolle der Landesinitiative als Kern des starken, einzigartigen Quanten-Ökosystems in Baden-Württemberg versinnbildlichte.

#### October 8–9, 2024

The second edition of the international trade fair for quantum technologies, Quantum Effects, took place in Stuttgart. Fraunhofer IAF was part of the 450 m<sup>2</sup> Quantum<sup>BW</sup> joint booth with almost 20 other co-exhibitors from science and industry. The booth was the center of the trade fair, symbolizing the role of the state initiative as the core of the strong, unique quantum ecosystem in Baden-Württemberg.



*Dr. Rebekka Eberle (r.) präsentiert die Aktivitäten des Fraunhofer IAF im Bereich der Quantencomputing-Hardware der baden-württembergischen Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Petra Olschowski (2. v. l.)*

*Dr. Rebekka Eberle (right) presents the activities of Fraunhofer IAF in the field of quantum computing hardware to Petra Olschowski (2<sup>nd</sup> from left), Minister of Science, Research and Arts of Baden-Württemberg, Germany*



*Auf der EuMW 2024 präsentierte das Fraunhofer IAF modernste Hochfrequenz-Komponenten für Kommunikations- und Messanwendungen*

*At EuMW 2024, Fraunhofer IAF exhibited cutting-edge high-frequency components for communications and measurement applications*

# Pionierforschung am Fraunhofer IAF 2024

## Pioneering Research at Fraunhofer IAF 2024

### Mit Halbleiter-Scheibenlasern zum Quanteninternet

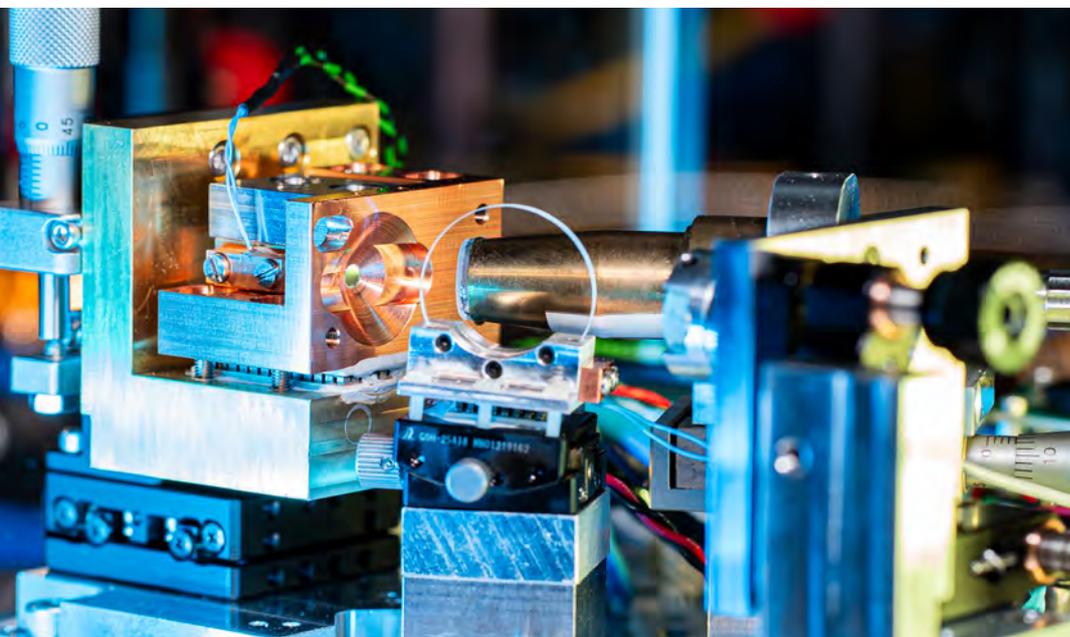
Eine Hürde auf dem Weg zum abhörsicheren Quanteninternet bilden die Differenzen zwischen dem Glasfaserstandard von 1550 nm und den Systemwellenlängen der verschiedenen, bisher realisierten Quantenbits (Qubits), die meist im sichtbaren oder nahinfraroten Spektralbereich liegen. Ein Lösungsansatz ist die sogenannte Quantenfrequenzkonversion, bei der die Frequenzen von Photonen gezielt verändert werden und dabei alle anderen Quanteneigenschaften erhalten bleiben. Dadurch wird eine Umwandlung in den 1550-nm-Telekombereich für die verlustarme, langreichweitige Übertragung der Quantenzustände möglich.

Die am Fraunhofer IAF im Projekt HiFi entwickelten Scheibenlaser erfüllen die hohen Anforderungen der Quantenfrequenzkonversion, da ihre Schmalbandigkeit und Wellenlängenstabilität Fluktuationen der Pumpwellenlänge und folglich Veränderungen der Zielwellenlänge der Qubits verhindern. Dabei decken sie je nach verwendeter Ausgangswellenlänge der Qubits gezielt eine Wellenlänge zwischen 1,9 und 2,5  $\mu\text{m}$  ab und erreichen bei einer Stabilität der absoluten Wellenlänge von unter 2 fm bis zu 2,4 W Ausgangsleistung. Das entspricht einer Frequenzstabilität von unter 100 kHz und unterschreitet klar die Frequenzstabilitätsklasse 1E-9. Dieses Ergebnis stellt einen internationalen Bestwert für diese Laserart dar und einen Schritt in Richtung Quanteninternet.

### Towards a quantum internet with semiconductor disk lasers

One hurdle on the way to a tap-proof quantum internet is the difference between the fiber optic standard of 1550 nm and the system wavelengths of the various quantum bits (qubits) that have been realized so far, which are mostly in the visible or near-infrared spectral range. One approach is so-called quantum frequency conversion, in which the frequencies of photons are deliberately changed while all other quantum properties are preserved. This makes it possible to convert the quantum states into the 1550 nm telecom range for low-loss, long-range transmission.

The disk lasers developed at Fraunhofer IAF in project HiFi meet the high requirements for quantum frequency conversion. Their narrow bandwidth and wavelength stability prevent fluctuations in the pump wavelength and thus changes in the target wavelength of the qubits. Depending on the output wavelength of the qubits used, they cover a wavelength between 1.9 and 2.5  $\mu\text{m}$  and achieve an output power of up to 2.4 W with an absolute wavelength stability of less than 2 fm. This corresponds to a frequency stability of less than 100 kHz and clearly exceeds the frequency stability class of 1E-9. This result represents a world record for this type of laser and a step towards a quantum internet.



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

### **Energieeffizientes Halbleitermaterial Aluminiumyttriumnitrid**

Erstmals gelang es Forschenden am Fraunhofer IAF, das vielversprechende neuartige Halbleitermaterial Aluminiumyttriumnitrid (AlYN) mittels metallorganischer chemischer Gasphasenabscheidung (MOCVD) herzustellen und zu charakterisieren. Bisher konnte AlYN nur mit dem Magnetron-Sputter-Verfahren abgeschieden werden. Die Herstellungsmethode mittels MOCVD ermöglicht die industrielle Skalierung auf größere Substrate.

Der Einsatz von AlYN, insbesondere in Heterostruktur mit Galliumnitrid (GaN), ermöglicht eine Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Minimierung des Energieverbrauchs für Halbleiter. Die Forschenden am Fraunhofer IAF konzentrierten sich bei der Entwicklung des neuen Verbindungshalbleiters vor allem auf dessen Anpassungsfähigkeit an GaN. Aufgrund seiner ferroelektrischen Eigenschaften und der unbegrenzten Schichtdicke eignet sich AlYN besonders für die Entwicklung nichtflüchtiger Speicheranwendungen. Dies ist besonders relevant für Rechenzentren, die zur Bewältigung des exponentiellen Anstiegs der Rechenkapazität für Künstliche Intelligenz eingesetzt werden und einen deutlich höheren Energieverbrauch aufweisen.

### **Energy-efficient semiconductor material aluminum yttrium nitride**

For the world's first time, researchers at Fraunhofer IAF have succeeded in producing and characterizing the promising novel semiconductor material aluminum yttrium nitride (AlYN) using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). To date, AlYN could only be deposited using the magnetron sputtering method. The production method using MOCVD enables industrial scaling to larger substrates.

The use of AlYN, especially in heterostructure with gallium nitride (GaN), enables an increase in performance while simultaneously minimizing energy consumption for semiconductors. The researchers at Fraunhofer IAF focused primarily on the adaptability of the new compound semiconductor to GaN. Due to its ferroelectric properties and unlimited layer thickness, AlYN is particularly suitable for the development of non-volatile storage applications. This is especially relevant for data centers, which are used to cope with the exponential increase in computing capacity for artificial intelligence and have significantly higher energy consumption.

*Die verschiedenen Farbnuancen  
der AlYN/GaN-Wafer resul-  
tieren aus unterschiedlichen  
Yttrium-Konzentrationen sowie  
Wachstumsbedingungen*

*The different color nuances of  
the AlYN/GaN wafers result from  
different yttrium concentrations  
and growth conditions*



### **NV-Diamant-Lasersystem mit zwei Medien erstmals erfolgreich demonstriert**

Am Fraunhofer IAF wird an dem weltweit neuartigen Ansatz der Laserswellen-Magnetometrie zur präzisen Magnetfeldmessung geforscht. 2024 haben die Forschenden Diamant mit Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) zusammen mit einem zweiten Lasermedium, einer Laserdiode zur zusätzlichen Lichtverstärkung, in einem optischen Resonator kombiniert. So haben sie es geschafft, die Laserschwelle erstmals zu demonstrieren: Je nachdem, wie stark die NV-Zentren angeregt wurden, ging das Lasersystem an oder aus.

Die Ergebnisse stellen einen Durchbruch für die Entwicklung der Laserswellen-Magnetometrie dar. Auf dieser Basis können in Zukunft Sensoren mit bis zu 100 Prozent Kontrast, starken Lichtsignalen und einem weiten Bereich von messbaren Magnetfeldstärken realisiert werden. Die Forschungsergebnisse wurden in der Fachzeitschrift Science Advances unter dem Titel »Dual-media laser system: nitrogen vacancy diamond and red semiconductor laser« veröffentlicht.

### **NV diamond laser system with two media successfully demonstrated for the first time**

At Fraunhofer IAF, research is being conducted into the novel approach of laser threshold magnetometry for precise magnetic field measurement. In 2024, the researchers combined diamond comprising nitrogen-vacancy centers (NV centers) with a second laser medium, a laser diode for additional light amplification, in an optical resonator. This way, they managed to demonstrate the laser threshold for the first time: depending on how strongly the NV centers were excited, the laser system turned on or off.

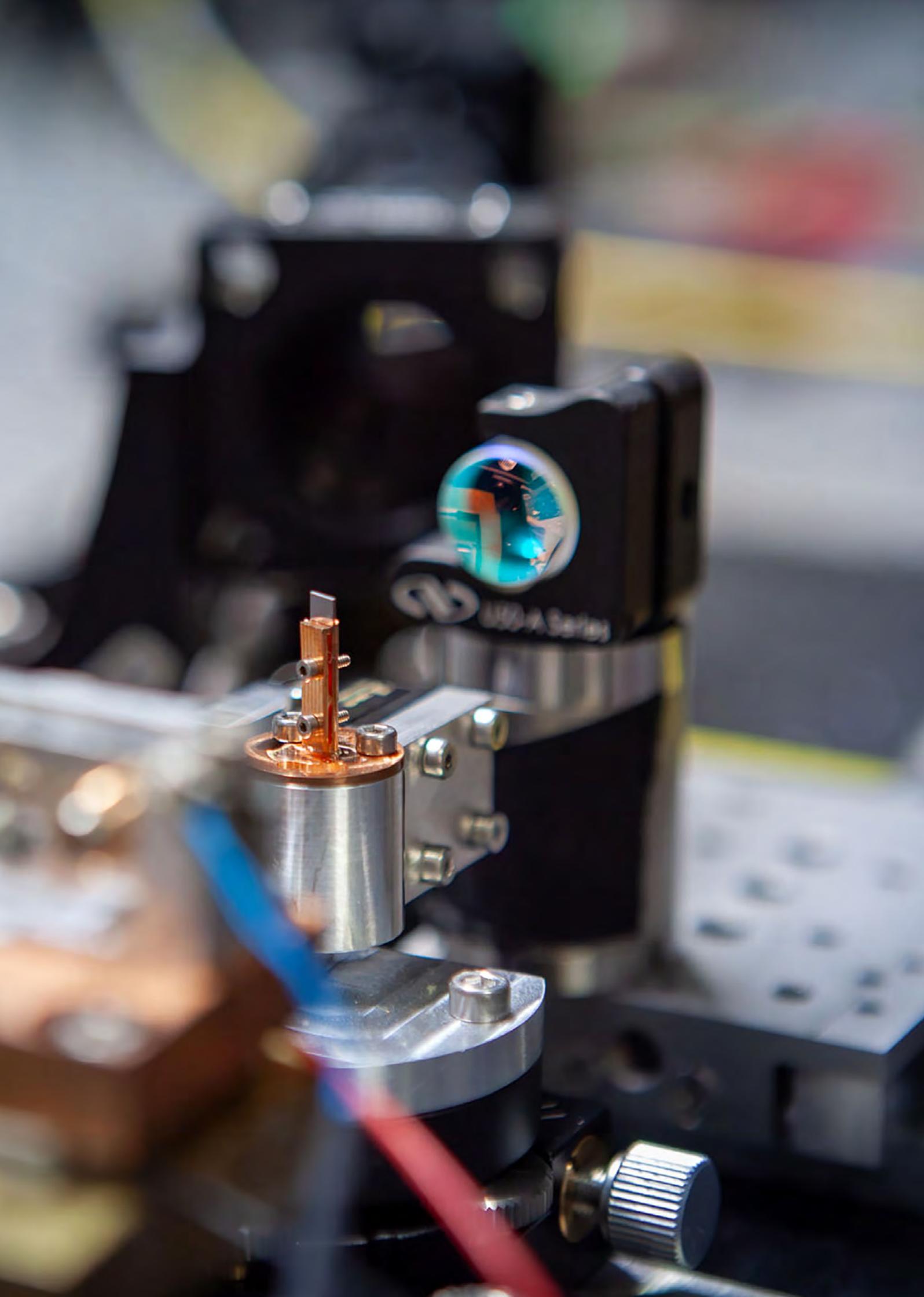
The results represent a breakthrough for the development of laser threshold magnetometry. In the future, sensors with up to 100 percent contrast, strong light signals and a wide range of measurable magnetic field strengths can be realized based on the approach demonstrated at Fraunhofer IAF. The research results were published in the journal Science Advances under the title "Dual-media laser system: nitrogen vacancy diamond and red semiconductor laser".

*Am Fraunhofer IAF wurde erstmals die NV-Diamant-Laserschwelle demonstriert  
The NV-diamond laser threshold was demonstrated for the first time at Fraunhofer IAF*



Sehen Sie sich unsere Highlights im Video an:  
*Watch our highlights in the video:*

[s.fhg.de/iaf-jb24-108](https://s.fhg.de/iaf-jb24-108)



# Auszeichnungen 2024

## Awards 2024

### Stefan Mönch et al. – IEEE JESTPE First Place Prize Paper Award



**Jun.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Mönch**

Das IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (JESTPE) hat Jun.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Mönch vom Fraunhofer IAF und seine Co-Autorenschaft der Fraunhofer-Institute für Angewandte Festkörperphysik IAF, für Physikalische Messtechnik IPM und für Keramische Technologien und Systeme IKTS mit dem First Place Prize Paper Award 2023 ausgezeichnet. Prämiiert wurden die Forschenden für ihr Paper »A 99.74 % Efficient Capacitor-Charging Converter Using Partial Power Processing for Electrocalorics«. Die Arbeit zeigt Ergebnisse aus dem Projekt EIKaWe und trägt dazu bei, künftige Festkörper-Wärmepumpen zu realisieren, die hocheffizient und klimafreundlich sind und weder Kältemittel noch einen Kompressor benötigen.

The IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (JESTPE) has honored Jun.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Mönch from Fraunhofer IAF and his co-authors from the Fraunhofer Institutes for Applied Solid State Physics IAF, for Physical Measurement Techniques IPM and for Ceramic Technologies and Systems IKTS with the First Place Paper Award 2023. The researchers were awarded the prize for their paper »A 99.74 % Efficient Capacitor-Charging Converter Using Partial Power Processing for Electrocalorics.« The work presents results from the EIKaWe project and contributes to the realization of future solid-state heat pumps that are highly efficient and climate-friendly and do not require refrigerants or compressors.

#### Publikation Publication

Stefan Mönch, Richard Reiner, Kareem Mansour, Patrick Waltereit, Michael Basler, Rüdiger Quay, Christian Molin, Sylvia Gebhardt, David Bach, Roland Binnering, Kilian Bartholomé:  
»A 99.74 % Efficient Capacitor-Charging Converter using Partial Power Processing for Electrocalorics«,  
in: IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 11/4, pp. 4491–4507, doi: 10.1109/JESTPE.2023.3270375.

## Michael Basler – IEEE Best Oral Presentation Award

Dr. Michael Basler hat beim IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications in Europe 2024 (WiPDA-Europe) den Best Oral Presentation Award erhalten. Ausgezeichnet wurde der Ingenieur des Fraunhofer IAF für die Vorstellung seines Papers »Monolithically Integrated Two-Stage GaN Gate Drivers«, das er zusammen mit seinen Kollegen Dr. Richard Reiner, Jun.-Prof. Dr. Stefan Mönch, Daniel Grieshaber, Fouad Benkhelifa und Prof. Dr. Rüdiger Quay erarbeitet hat. In dem Paper stellt Basler einen zweistufigen Gate-Treiber auf Basis des Verbindungsleistungshalbleiters Galliumnitrid (GaN) und dessen Integration in GaN-Leistungsschaltungen vor. Der zweistufige Ansatz erhöht die Flexibilität des Bauelements und ermöglicht es, verschiedene Treiber-Topologien zu realisieren.

Dr. Michael Basler has received the Best Oral Presentation Award at the IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications in Europe 2024 (WiPDA-Europe). The Fraunhofer IAF engineer was honored for the presentation of his paper »Monolithically Integrated Two-Stage GaN Gate Drivers«, on which he worked together with his colleagues Dr. Richard Reiner, Jun.-Prof. Dr. Stefan Mönch, Daniel Grieshaber, Fouad Benkhelifa and Prof. Dr. Rüdiger Quay. In the paper, Basler presents a two-stage gate driver based on the compound power semiconductor gallium nitride (GaN) and its integration into GaN power ICs. The two-stage approach increases the flexibility of the device and makes it possible to realize different driver topologies.



**Dr. Michael Basler**

### **Publikation** *Publication*

Michael Basler, Richard Reiner, Stefan Mönch, Daniel Grieshaber, Fouad Benkhelifa, Rüdiger Quay:  
»Monolithically Integrated Two-Stage GaN Gate Drivers«, in: 2024 IEEE Workshop on Wide Bandgap  
Power Devices and Applications in Europe (WiPDA Europe), pp. 1–5, doi: 10.1109/WiPDAEurope62087.2024.10797450.

# Wissenswertes

---

## Things to know

*Wir geben einen Überblick über die jüngsten Entwicklungen am mit Informationen über die Finanzen, Lehrveranstaltungen, Netzwerke sowie Patente des Fraunhofer IAF.*

*We provide an overview of the latest developments at Fraunhofer IAF, including information on finances, teaching, networks and patents.*



# Das Institut in Zahlen

## The Institute in Figures

Das Fraunhofer IAF steigerte den Betriebshaushalt 2024 gegenüber dem Vorjahr um 4,4 Mio. € auf ein Allzeithoch von 41,3 Mio. €. Die Sachaufwendungen in Höhe von insgesamt 17,6 Mio. € erfuhren einen unterdurchschnittlichen Aufwuchs aufgrund von allgemeinen Kostensteigerungen im Markt. Der Personalaufwand liegt mit 23,7 Mio. € circa 15 % über dem Vorjahreswert und steigt somit prozentual stärker als der Haushalt des Instituts. Dieser Anstieg ist vor allem auf den durch die Auftragslage bedingten Aufbau an Mitarbeitenden zurückzuführen. Im Verlauf des Jahres 2024 konnten zudem die offenen Stellen aus dem Vorjahr erfolgreich besetzt werden. Das Investitionsvolumen lag im Jahr 2024 mit 14,6 Mio. € deutlich höher als im Vorjahr. Viele aus Vorjahren offene Investitionen konnten 2024 realisiert werden und sichern fundamental die Zukunftsfähigkeit des Instituts.

Ein großer Teil des Gesamthaushalts wurde 2024 vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) mit einem Anteil von 41,4 % finanziert. Im zivilen Kontext konnten vor allem europaweite Projekte überdurchschnittlich gesteigert werden. Auch die Industrieerträge stiegen 2024 überproportional auf 8,4 Mio. €.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten lag 2024 bei 250. In absoluten Zahlen arbeiteten zum Jahresende 326 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon waren circa 33 % weiblich. 74 % aller Vollzeitäquivalente arbeiteten in wissenschaftlichen Abteilungen, 15 % waren in den Infrastrukturbereichen und 11 % in den nicht-wissenschaftlichen Fachabteilungen beschäftigt.

Für das Jahr 2025 erwartet das Fraunhofer IAF einen nur noch leicht steigenden Gesamthaushalt trotz wirtschaftlich und politisch angespannter Lage. Haupttreiber des antizipierten Wachstums sind unterjährige Personaleinstellungen im Jahr 2024 und bereits 2024 gestartete, aber erst 2025 realisierte Investitionen.

In 2024, Fraunhofer IAF increased its operating budget by €4.4 million to an all-time high of €41.3 million. At €17.6 million, non-personnel costs increased at a below-average rate due to general cost increases in the market. At €23.7 million, personnel costs are approximately 15 % higher than in the previous year and thus increased at a higher percentage rate than the institute's budget. This increase is mainly due to the expansion of the workforce in response to the strong demand for our services. In the course of 2024, the vacancies from the previous year were also successfully filled. At €14.6 million, the investment volume in 2024 was significantly higher than in the previous year. Many investments that had been pending from previous years were realized in 2024, fundamentally securing the institute's future viability.

The Federal Ministry of Defense (BMVg) provided a large share of the total budget in 2024, with 41.4 %. In the civil context, above-average increases were achieved in particular in Europe-wide projects. Industrial revenues also rose disproportionately in 2024 to €8.4 million.

The number of full-time equivalent employees was 250 in 2024. In absolute numbers, 319 employees worked at Fraunhofer IAF at the end of the year, of which about 33 % were female. 74 % of all full-time equivalents worked in scientific departments, 15 % were employed in infrastructure areas and 11 % work as non-scientific staff in specialist departments.

For 2025, Fraunhofer IAF expects only a slight increase in its total budget despite the tense economic and political situation. The main drivers of the anticipated growth are new hires during 2024 and investments that were started in 2024 but not realized until 2025.

# 326

# 55.8 million €

## Mitarbeitende Employees

Davon | Of which

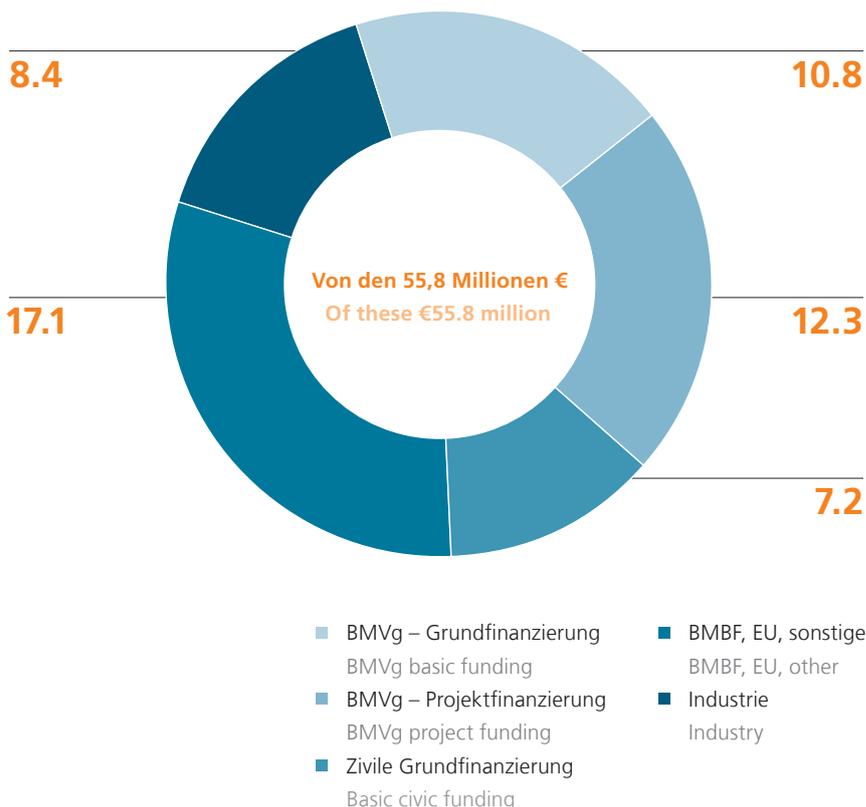
**237** Mitarbeitende in wissenschaftlichen Abteilungen  
Employees in scientific departments

Inklusive | Including Promovierende sowie Masterstudierende in Fachabteilungen  
Master and PhD students in R&D departments

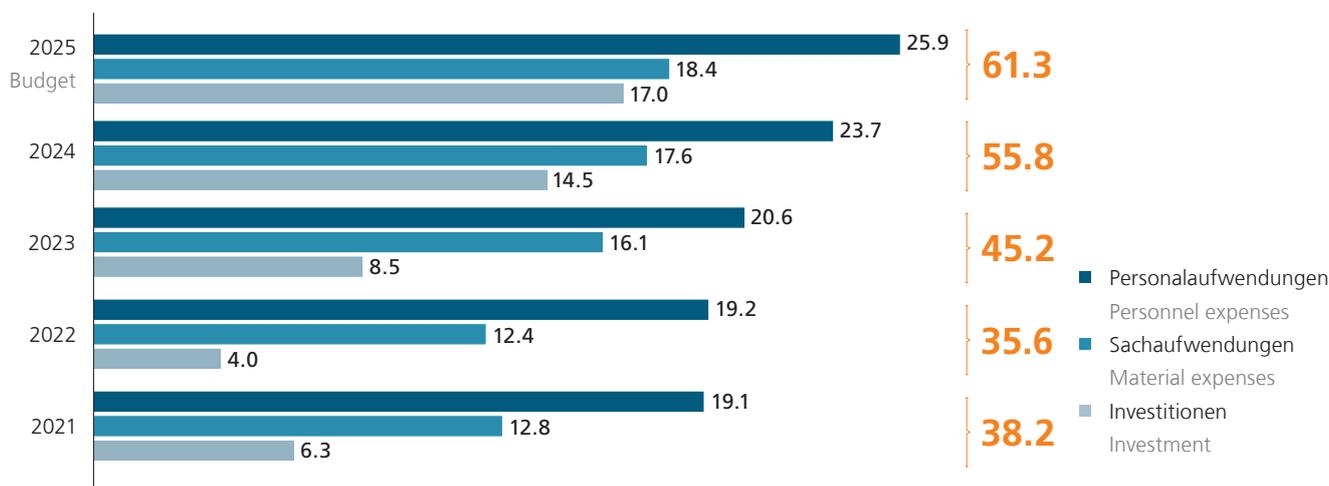
**47** Mitarbeitende in nicht-wissenschaftlichen Abteilungen  
Staff in non-scientific departments

**42** Mitarbeitende in Infrastruktur  
Staff in infrastructure

## Gesamthaushalt (Stand 4/2025) Total budget (as of 4/2025)



## Gesamthaushaltsausgaben in Millionen Euro Total budget outlay in million euros



# Organisationsstruktur

## Organizational Structure

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer IAF gliedert sich neben der Stabsstelle »Marketing und Kommunikation« in vier Geschäftsbereiche. In den Geschäftsfeldern bildet das Institut marktrelevante Forschungsbereiche ab. Die Forschenden des Instituts gruppieren sich in den Abteilungen und die Bereiche Verwaltung sowie Forschungsinfrastruktur umfassen die für den Betrieb des Instituts notwendigen Strukturen.

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

### Institutsleitung Institute Management

**Dr. Patricie Merkert**  
**Prof. Dr. Rüdiger Quay**

### Bereichsleitungen Division Directors

**Dr. Michael Mikulla**  
Geschäftsfelder  
Business Units

**Dr. Jutta Kühn**  
Abteilungen  
Departments

**Dr. Martin Walther**  
Forschungsinfrastruktur  
Research Infrastructure

**Dr. Daniel Auer**  
Verwaltung  
Administration

### Geschäftsfelder Business Units

**Dr. Fabian Thome**  
(kommissarisch/acting)  
Hochfrequenzelektronik  
High-Frequency Electronics

**Dr. Philipp Neining**  
(kommissarisch/acting)  
Leistungselektronik  
Power Electronics

**Dr. Robert Rehm**  
Optoelektronik  
Optoelectronics

**Dr. Michael Stoebe**  
Quantenbauelemente  
Quantum Components

**Dr. Florentin Reiter**  
Quantensysteme  
Quantum Systems

### 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

Von links nach rechts (from left to right)  
Dr. Patricie Merkert, Prof. Dr. Rüdiger Quay,  
Dr. Michael Mikulla, Dr. Jutta Kühn,  
Dr. Martin Walther, Dr. Daniel Auer



# Kuratorium

## Advisory Board

**Prof. Dr. Jasmin Aghassi-Hagmann**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

**Dr. Klaus Beilenhoff**

United Monolithic Semiconductor GmbH, Ulm

**Dr. Dennis Chercka**

Institutsbetreuer / Institute Liaison  
Fraunhofer-Gesellschaft, München

**Prof. Dr. Oana Cojocaru-Mirédin**

Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH),  
Freiburg

**Prof. Dr. Jérôme Faist**

United Monolithic Semiconductor GmbH, Ulm

**Dr. Gert Hechtfisher** (ab Sommer 2025)

Rohde & Schwarz, München

**Dr. Renata Jovanovic**

Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich,  
Schweiz

**MinR Maik Kammermann**

Bundesministerium der Verteidigung, Bonn

**Dr. Katrin Kobe**

Bosch Quantum Sensing, Ludwigsburg

**Dr. Johannes Koeth**

nanoplus GmbH, Gebrunn

**Dr. Nicolai Künzner**

Diehl Defence GmbH & Co. KG, Überlingen

**Ralf Lerner** (ab Sommer 2025)

X-FAB Silicon Foundries SE, Erfurt

**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, Rüschlikon, Schweiz

**Dr. Thomas Roedle**

Infineon Technologies AG, Regensburg

**Dr. Dietmar Schill**

Sony Europe B. V., Stuttgart

**Dr. Gregory U'Ren**

X-FAB Silicon Foundries SE, Erfurt

**Andreas Wälti**

Evatec AG, Trübbach, Schweiz

**Prof. Dr. Anke Weidenkaff**

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe  
und Ressourcenstrategie IWKS, Alzenau

**Prof. Dr. Jörg Wrachtrup**

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



# In Memoriam

---

2024 und 2025 mussten wir uns von vier sehr geschätzten Kollegen verabschieden, deren Karrieren unser Institut nachhaltig geprägt haben. Wir behalten sie als Wissenschaftler, Kollegen und Menschen in ehrender Erinnerung.

In 2024, we had to bid farewell to four highly esteemed colleagues whose careers have a lasting impact on our institute. We will always honor their memory as scientists, colleagues and individuals.



## **Prof. Dr. Hans-Joachim Wagner**

\*9.8.1953 † 21.2.2025

Prof. Dr. Joachim Wagner hat das Fraunhofer IAF 33 Jahre lang in entscheidenden Positionen stark geprägt und verkörperte als Vermittler zwischen wissenschaftlicher Exzellenz, akademischer Lehre und Technologietransfer vorbildlich die Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft.

Joachim Wagner begann 1985 als Wissenschaftler in der Abteilung Infrarot-Bauelemente am Fraunhofer IAF, leitete von 1996 bis 2015 die Abteilung Optoelektronik und wurde 2006 stellvertretender Institutsleiter. Zwischen 2016 und 2018 führte er den Bereich Geschäftsfelder und Kooperationen, 2017 leitete er kommissarisch das Institut. 2018 erhielt er den Fraunhofer-Taler für seine Verdienste um die Fraunhofer-Gesellschaft. Im selben Jahr wechselte Joachim Wagner an das Fraunhofer IPMS in Dresden und koordinierte bis 2022 das Leistungszentrum Funktionsintegration für die Mikro-/Nanoelektronik.

Prof. Dr. Joachim Wagner has strongly influenced the Fraunhofer IAF for 33 years in crucial positions and, as a mediator between scientific excellence, academic teaching and technology transfer, he exemplarily embodied the mission of the Fraunhofer-Gesellschaft.

Joachim Wagner began his career at Fraunhofer IAF in 1985 as a scientist in the Department Infrared Devices. From 1996 to 2015, he was head of the Department Optoelectronics and became Deputy Director of the institute in 2006. Between 2016 and 2018, he headed the Business Units and Cooperations Division, and in 2017 he served as interim Director of the institute. In 2018, he received the Fraunhofer Taler for his services to the Fraunhofer-Gesellschaft. In the same year, Joachim Wagner moved to the Fraunhofer IPMS in Dresden, where he coordinated the High Performance Center Functional Integration for Micro- and Nanoelectronics until 2022.

**Prof. Dr. Peter Koidl**

\* 30.12.1940 † 18.3.2024

Prof. Dr. Peter Koidl hat von 1969 an das Fraunhofer IAF über 35 Jahre entscheidend mitgeprägt. Er leitete die Abteilung Infrarot-Technologie und wurde 1996 zum stellvertretenden Institutsleiter ernannt, diese Funktion hatte er bis zu seinem Renteneintritt 2005 inne. Professor Koidl ist Begründer der Diamant-Forschung am Institut und leistete damit einen wichtigen Beitrag zum heutigen Forschungsprofil des Fraunhofer IAF.

Prof. Dr. Peter Koidl has played a decisive role in shaping Fraunhofer IAF for over 35 years, starting in 1969. He headed the Infrared Technology Department and was appointed Deputy Director of the institute in 1996, a position he held until he retired in 2005. Professor Koidl is the founder of diamond research at the institute and thus made an important contribution to the current research profile of Fraunhofer IAF.

**Dr. Günter Baur**

\* 27.3.1937 † 20.5.2024

Dr. Günter Baur arbeitete von 1975 bis 1996 als Wissenschaftler am Fraunhofer IAF, ab 1978 leitete er die Abteilung Displayphysik. Von 2006 bis 2015 bestand außerdem ein Erfindervertrag zwischen ihm und dem Institut. Günter Baur's Tätigkeit am Institut war durch prominente Erfolge geprägt: Er war federführend an der Entwicklung des Fluoreszenz-aktivierten Flüssigkristall-Displays (FLAD) beteiligt, das bereits kurz nach der Präsentation in die industrielle Serienproduktion ging. Lange galt sein Patent »Elektrooptisches Flüssigkristallschaltelement« als erfolgreichstes Patent des Fraunhofer IAF. 1978 verlieh die Fraunhofer-Gesellschaft Baur gemeinsam mit Waldemar Greubel dafür den allerersten Joseph-von-Fraunhofer-Preis. Die in seiner Abteilung anschließend erforschten Fluoreszenzsolarkollektoren ermöglichten zudem die Ausgründung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE im Jahr 1981.

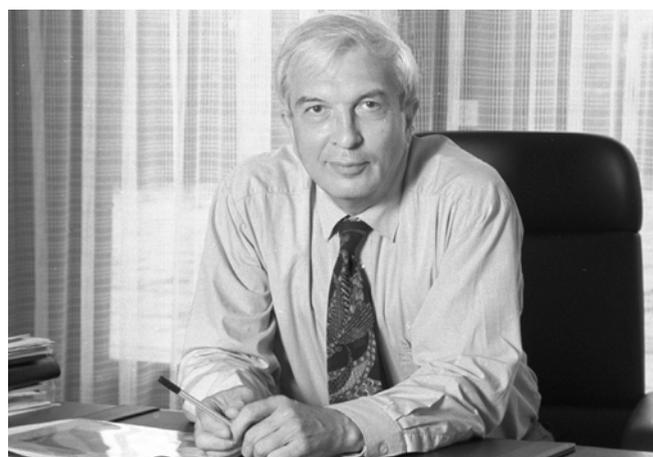
Dr. Günter Baur worked as a scientist at Fraunhofer IAF from 1975, to 1996. From 1978, he headed the Display Physics Department. From 2006 to 2015, he also had an inventor contract with the institute. Günter Baur's work at the institute was characterized by prominent successes: he played a leading role in the development of the fluorescence-activated liquid crystal display (FLAD), which went into industrial series production shortly after its presentation. For a long time, his patent "Electro-optical liquid crystal switching element" was considered the most successful Fraunhofer IAF patent. In 1978, the Fraunhofer-Gesellschaft awarded Baur and Waldemar Greubel the very first Joseph von Fraunhofer Prize for their work. The research into fluorescent solar collectors that was subsequently conducted in his Department also led to the founding of the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE in 1981.

**Prof. Dr. Günter Weimann**

\* 2.11.1940 † 22.5.2024

Prof. Dr. Günter Weimann war ein Pionier der III-V-Halbleiterforschung sowie der Molekularstrahlepitaxie (MBE) und ist aufgrund seiner bahnbrechenden Arbeiten eine weltweit anerkannte Autorität auf dem Gebiet der Verbindungshalbleiter. Günter Weimann leitete das Fraunhofer IAF von 1995 bis 2007. Er entwickelte in seiner Zeit am Fraunhofer IAF neue Infrarotdetektoren mit höchster Temporauflösung und die erste bispektrale Infrarotkamera. Ein weiterer Schwerpunkt waren Höchstfrequenztransistoren und Leistungselektronik, unter anderem auf Galliumnitrid-Basis. Unter seiner Leitung wurde das Fraunhofer IAF zum weltweit führenden Institut mit Industrierelevanz auf dem Gebiet der III-V-Mikro-, Nano- und Optoelektronik.

Prof. Dr. Günter Weimann was a pioneer in III-V semiconductor research and molecular beam epitaxy (MBE) and is a world-renowned authority in the field of compound semiconductors due to his groundbreaking work. Günter Weimann was the director of Fraunhofer IAF from 1995 to 2007. During his time at Fraunhofer IAF, he developed new infrared detectors with the highest temperature resolution and the first bispectral infrared camera. Another focus of his research was high-frequency transistors and power electronics, including those based on gallium nitride. Under his leadership, Fraunhofer IAF became a world-leading institute with industrial relevance in the field of III-V micro-, nano- and optoelectronics.

*Prof. Dr. Günter Weimann*

# Ausbildung und Lehre

## Education and Teaching

Mehrere Forschende des Fraunhofer IAF waren 2024 in der Lehre tätig.  
Several Scientists of Fraunhofer IAF were active in teaching in 2024.

### universität freiburg

#### Universität Freiburg

- »RF and Microwave Circuits and Systems – Vorlesung«
- »RF and Microwave System Design Course – Praktikum«
- »RF and Microwave Devices and Circuits – Vorlesung«
- »Sustainable Systems Engineering – Studienseminar «
- »Energy Efficient Power Electronics – Vorlesung mit O. Ambacher«
- »Energy Efficient Power Electronics – Übung mit O. Ambacher«
- »Schaltungstechnik / Circuit Technology – Vorlesung«

#### Prof. Dr. Rüdiger Quay

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 4

Ausgeübte Lehrtätigkeit | Actual teaching hours: 14

- »Optoelektronische Quantenbauelemente«

#### Dr. Martin Walther

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2

- »Quantencomputer / Quantum Computing Vorlesung«

- »Quantencomputer / Quantum Computing Übung«

#### Dr. Thomas Wellens

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2

- »RF- and Microwave Devices and Circuits«

#### Dr.-Ing. Bersant Gashi

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2

#### Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

- »Leistungselektronik«

#### Dr. Michael Basler

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 2



#### Universität Stuttgart

#### Universität Stuttgart

- »Elektromechanische Grundlagen der Medizintechnik – Elektrotechnik«

- »Einführung in die Elektrotechnik«

#### Jun.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Mönch

Lehrdebutat SWS | Teaching hours per week: 4

# Patente

## Patents

### Patenterteilungen

#### Patents granted

**C. Nebel, W. Müller-Sebert**

Beschichtungsanlage und Verfahren zur Beschichtung  
3 344 794, 30.10.2024, Schweiz, EU, Großbritannien

**M. Cwiklinski**

Integrated circuit  
12 015 062, 18.6. 2024, USA

**S. Leone, C. Manz, H. Menner, J. Wiegert, J. Ligl**

Method and apparatus for manufacturing a semiconductor layer and substrate provided therewith  
11 996 287 B2, 28.5.2024, USA

**T. Gerrer, V. Cimalla, A. Graff, M. Simon-Najasek**

Verfahren zum Bonden von zumindest einem Wafer und Substrat mit einem darauf befindlichen Wafer  
10 2018 210 658 B4, 21.3.2024, Deutschland

### Patentanmeldungen

#### Patent applications

**C. Giese**

Verfahren zur Herstellung eines Bauelementes  
10 2024 211 631.9, 5.12.2024, Deutschland

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

Sensor basierend auf Absorption von NV-Zentren in Diamant  
2 420 0184.0, 13.9.2024, Europa

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

Magnetic field sensor and method for detecting a magnetic field  
18/828 762, 9.9.2024, USA

**F.P. Schall, F. Hahl, M. Rattunde, L. Lindner**

Magnetometer und Verfahren zur Erfassung eines Magnetfelds  
10 2024 206 633.8, 15.7.2024, Deutschland

**C. Giese**

Herstellungsverfahren für laterale Stickstoff-Vakanz-Zentrum-basierte AFM-Magnetometerspitzen  
24185943.8, 2.7.2024, Europa

**C. Giese**

Implantation method  
18/753 794, 25.6.2024, Deutschland

**P. Döring, R. Reiner**

Monolithische Integration von lateralen III-N-Heterostrukturen in Kombination mit vertikalen III-N-Bauelementen und ein Verfahren zu dessen Herstellung  
24170509.4, 16.4.2024, Europa

**P. Döring, R. Reiner**

High-power component based on III nitride compound semiconductors, intermediate product and process for production of a high-power component  
18/636 343, 16.4.2024, Deutschland

**R. Driad, A. Bächle**

Quantenkaskadenlaser und Verfahren zu seiner Herstellung  
24163556.4, 14.3.2024, Europa

# 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  
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

Dr. Violetta Budak, Jennifer Funk, Stefanie Griesser,  
Lukas Kübler, Dr. Armin Müller, Moritz Ringwald

### Konzept, Layout, Satz, Druck

#### Design, layout, typesetting, printing

netsyn, Joachim Würger,  
Fraunhofer IAF,  
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 2025

### Bildnachweise

#### Picture credits

© chakawut – stock.adobe.com | Fraunhofer IAF, Title;  
© Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik, 9;  
© Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik, 15;  
© Bernhard Wolf, loewn, 16;  
© MNStudio – stock.adobe.com | Fraunhofer IAF, 22;  
© Rohde & Schwarz, 46;  
© University of Cantabria, 47;  
© Infineon Technologies AG, 48 (top);  
© University of Extremadura, 48 (bottom);  
© Universität Stuttgart, 49;  
© Technology Innovation Institute, Abu Dhabi, 50 (top);  
© DILAS Diodenlaser, 51 (top);  
© Nokia / Bell Labs, 51 (bottom);  
© ESA/Mlabspace, 64–65;  
© DIAS Infrared GmbH, 75;  
© National Ignition Facility/LLNL, 94–95;  
© Ludmilla Parsyak | QuantumBW, 105 (top);

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



# Newsletter und digitaler Jahresbericht

---

## Newsletter and Digital Annual Report

### Newsletter



Anmeldung  
Subscription

**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.

[s.fhg.de/iaf-nl](https://s.fhg.de/iaf-nl)

### Digitaler Jahresbericht / Digital annual report



**Der Jahresbericht 2024/25 als E-Paper**  
The annual report 2024/25 as e-paper

[s.fhg.de/iaf-jb24](https://s.fhg.de/iaf-jb24)