



2019/2020

# THE WAY AHEAD

ANNUAL REPORT/JAHRESBERICHT







” We can only see a short distance ahead,  
but we can see plenty there that needs to be done.

*Alan Turing (1912–1954), British mathematician and cryptographer, who is considered to be one of the fathers of modern computer science.*





# VORWORT

## Preface



” Die Erforschung und Entwicklung von Quantencomputern durch die Fraunhofer-Gesellschaft bereitet Deutschland einen »way ahead« in dem wirtschaftlich wichtigen Gebiet der zukünftigen informationsverarbeitenden Systeme und Netze.

*The research and development of quantum computers by the Fraunhofer-Gesellschaft pave Germany's »way ahead« in the key economic area of future information processing systems and networks.*

Zur Sicherung einer technologisch souveränen Gesellschaft und einer international kompetitiven Wirtschaft fördern das Land Baden-Württemberg und die Bundesrepublik Deutschland im Einklang mit dem »Quantum Flagship« der Europäischen Kommission gezielt die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie im Themenfeld des Quantencomputings. Im Zentrum der europäischen und nationalen Förderstrategie stehen Leuchtturmprojekte für den Aufbau von neuen Kompetenznetzwerken und die Stärkung von innovativen Wirtschaftszweigen.

*In order to secure a technologically sovereign society and an internationally competitive economy, the state of Baden-Württemberg and the Federal Republic of Germany promote systematic cooperation between science and industry in the field of quantum computing in accordance with the European Commission's »Quantum Flagship«. At the center of the European and national funding strategy are lighthouse projects to establish new networks of expertise and strengthen innovative economic sectors.*



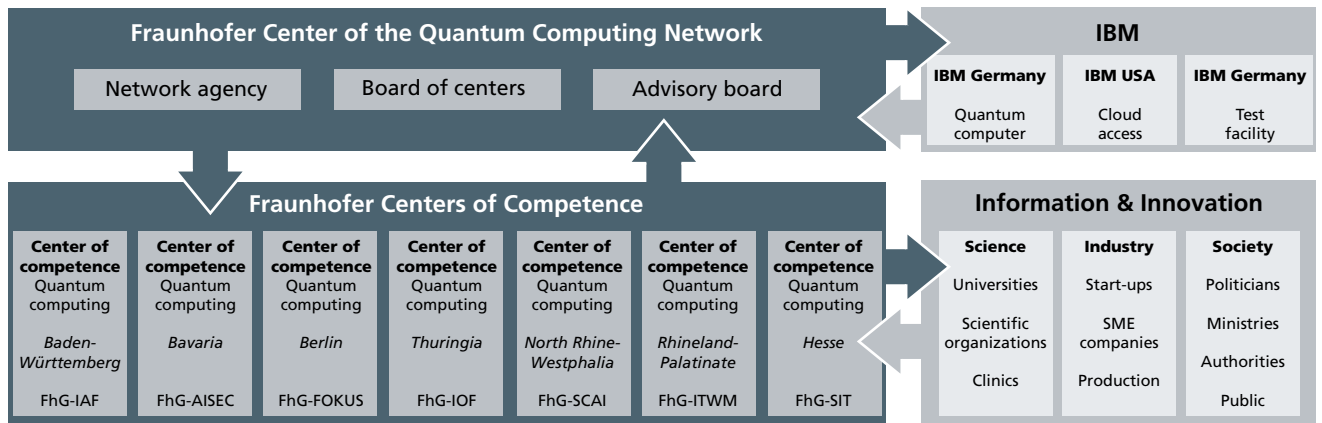
Der Quantencomputer ist in den letzten Jahren für die Industrie interessant geworden. Bekannte Firmen wie D-wave, Google, IBM, Rigetti und Intel arbeiten intensiv an der Realisierung von kommerzialisierbaren Rechnern auf der Basis von Quantenbits. Diese Computer erlauben es, bestimmte Rechenoperationen viel schneller zu lösen, als dies mit Hilfe von Bit-basierten, kommerziellen Computern möglich ist. Dabei darf man einen Quantencomputer nicht einfach nur als schnelleren Rechner betrachten. Die Probleme, die ein Quantencomputer berechnen kann, müssen es erlauben, die Gesetze der Quantenmechanik zu nutzen, um eine Lösung zu finden.

Der Vorteil des Quantencomputers wird erkennbar, sobald man logische Schaltungen für Bits mit solchen für Qubits vergleicht. Wenn einer digitalen Schaltung 8 Bits zur Verfügung stehen, kann diese genau eine Zahl zwischen 0 und 255 abbilden. Schaltungen mit 8 Qubits hingegen, können alle 256 Möglichkeiten gleichzeitig verfügbar machen. Wird dieser Schaltung ein Qubit hinzugefügt, können 1.024 Zustände und mit einem weiteren Qubit schon 2.048 Zustände bereitgestellt werden. Eine Schaltung mit 34 Qubits reicht also aus, um mehr als 10 Milliarden Zustände gleichzeitig verfügbar zu machen. Wird dann eine Operation mit Hilfe der Qubits durchgeführt, kann diese alle Zustände gleichzeitig berücksichtigen. Dies ist der fundamentale Grund, warum der Quantencomputer für bestimmte Probleme sehr schnell eine Lösung finden kann. Allerdings ist es sehr schwierig, Algorithmen zu finden, die eine Darstellung von Zuständen über Qubits anwendungsrelevant nutzen können. Dies liegt daran, dass eine Messung der Qubits dazu führt, dass der Zustand auf nur einen der möglichen Werte reduziert wird. Deshalb wird bei den meisten Quantenalgorithmen zuerst der komplette Raum der Möglichkeiten aufgespannt und dann per Interferenz nicht relevante Zustände wieder entfernt, sodass am Ende nur ein Zustand übrig bleibt, der das Ergebnis der Berechnung beschreibt.

Quantum computing has become interesting for industry in recent years. Well-known companies such as D-wave, Google, IBM, Rigetti and Intel are working intensively to develop commercializable computers based on quantum bits. These computers allow certain arithmetic operations to be solved much faster than is possible with the help of bit-based, conventional computers. A quantum computer cannot simply be regarded as a faster computer. The problems that a quantum computer can solve have to enable the laws of quantum mechanics to be used to find a solution.

The advantage of the quantum computer becomes apparent as soon as we compare logic circuits for bits with those for qubits. If 8 bits are available to a digital circuit, it can represent just one number between 0 and 255. Circuits with 8 qubits, on the other hand, can make all 256 possibilities available at the same time. If a qubit is added to the circuit, 1,024 states can be provided and, with the addition of one further qubit, 2,048 states. A circuit with 34 qubits is therefore all that is required to make more than 10 billion states available at the same time. If an operation is then carried out using the qubits, it can take all states into account simultaneously. This is what underlies quantum computers' ability to find solutions to certain problems so quickly. However, it is very difficult to find algorithms that can apply representations of states via qubits. This is because measuring qubits reduces the state to only one of the possible values. For this reason, most quantum algorithms first scan the entire range of possibilities and then remove irrelevant states so that finally, the one remaining state describes the result of the calculation.





Ein Quantenalgorithmus, der das Interesse an Quantencomputern stark erhöht hat, wurde 1995 von Peter Shor vorgestellt. Dieser Algorithmus erlaubt die effiziente Zerlegung einer Zahl in zwei Primzahlen. Für die Primzahlzerlegung einer Zahl mit 300 Stellen würde ein digitaler Hochleistungsrechner ungefähr 150.000 Jahre brauchen. Die Zeit, die ein Quantencomputer für dieselbe Aufgabe benötigt, kann zwar nur geschätzt werden, da sie von der Prozessorarchitektur abhängt. Aber ein Quantencomputer sollte die äquivalente Primzahlzerlegung in wenigen Tagen ausführen können.

Die jüngst gelungene Reduzierung der Fehleranfälligkeit von Quantencomputern hat die Tür zu industriellen Anwendungen geöffnet. Es konnte gezeigt werden, dass viele Qubits zu einem sogenannten logischen Qubit vernetzt werden können. Durch die erzeugte Redundanz ist es möglich, die Fehlerrate des logischen Qubits beliebig zu verringern. Dazu ist es notwendig, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit eines einzelnen Qubits einen gewissen Grenzwert unterschreitet. Dieser Grenzwert wurde 2015 mit Qubits erreicht, die auf supraleitenden elektronischen Bauelementen basieren. Laufende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind derzeit darauf konzentriert, mehr und mehr Qubits auf einem Prozessor zu integrieren, so dass genügend logische Qubits zur Verfügung stehen, um einen marktfähigen Quantencomputer zu bauen. Mit den momentan verwendeten Methoden werden zwischen 1.000 und 10.000 Qubits benötigt, um fehlerfreie logische Qubits zu realisieren. Dementsprechend werden bis zu einer Million Qubits benötigt, um 100 logische Qubits zu demonstrieren. Die Integration einer solch großen Menge an Qubits sollte technisch möglich sein, da ähnliche und höhere Integrationsdichten bei digitalen Prozessoren bereits realisiert werden. Die größten Schaltungen, die jüngst von Intel, Rigetti und IBM vorgestellt wurden, enthalten 50 bis 128 Qubits. Die Firma D-Wave bietet schon heute Prozessoren mit mehr als 2.000 Qubits an, wobei diese Qubits extrem hohe Fehlerwahrscheinlichkeiten aufweisen, die deutlich größer

One quantum algorithm that greatly increased interest in quantum computers was introduced in 1995 by Peter Shor. This algorithm allows the efficient decomposition of a number into two prime numbers. A high-performance digital computer would take around 150,000 years to perform prime factorisation on a number with 300 digits. The time that a quantum computer would take to perform the same task can only be estimated because it depends on the processor architecture. But a quantum computer should be able to complete the equivalent prime number decomposition in a few days.

The recent successful reduction in the error rate of quantum computers has opened the door to industrial applications. It has been shown that many qubits can be networked into a so-called logical qubit. The redundancy generated makes it possible to reduce the error rate of the logical qubit as desired. For this it is necessary that the error probability of a single qubit falls below a certain limit. This limit was reached in 2015 with qubits based on superconducting electronic components. Current research and development work is focused on integrating more and more qubits into a single processor, so as to ensure sufficient logical qubits are available to enable a marketable quantum computer to be built. With the methods currently used, between 1,000 and 10,000 qubits are required to achieve error-free logical qubits. Accordingly, one million qubits are required for 100 logical qubits. The integration of such a large number of qubits should be technically possible, since similar and higher integration densities have already been used in digital processors. The largest circuits recently introduced by Intel, Rigetti and IBM contain 50 to 128 qubits. The company D-Wave already offers processors with more than 2,000 qubits, but these qubits have error probabilities that are significantly higher than the limit which may be reached to still enable error correction. The essential question that currently arises for the use of the quantum computer is whether applications

Organisationsstruktur des Kompetenznetzwerks »Quantencomputing« mit seinem Zentrum für Quantencomputing und seinen derzeit sieben Kompetenzzentren in den beteiligten Bundesländern. Das Zentrum administriert den IBM-Quantencomputer und den zusätzlichen Cloud-Zugang auf ein IBM-Netzwerk. Die Kompetenzzentren integrieren universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen in das Kompetenznetzwerk.

*Organizational structure of the »Quantum Computing« competence network with its Center for Quantum Computing and currently seven competence centers in the federal states involved. The center administers the IBM quantum computer and additional cloud access to an IBM network. The competence centers integrate university and non-university research institutions and companies into the competence network.*

sind als der Grenzwert, der zur Fehlerkorrektur erreicht werden darf. Die wesentliche Frage, die sich momentan für die Nutzung des Quantencomputers stellt, ist die, ob schon Anwendungen mit 50 bis 128 fehlerbehafteten Qubits möglich sind oder ob das Zeitalter des Quantencomputers erst mit vollständiger Fehlerkorrektur anbricht.

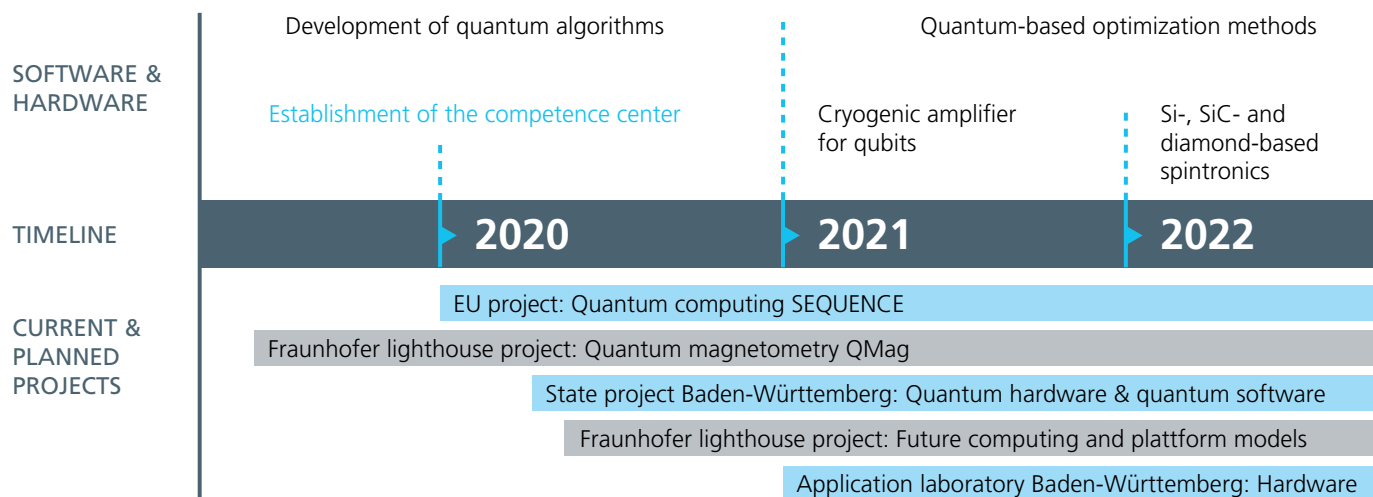
Um diese Frage zu beantworten, möchte die Fraunhofer-Gesellschaft in Kooperation mit der International Business Machines Corporation (IBM Deutschland) ein nationales Netzwerk aus Kompetenzzentren im Forschungsfeld des Quantencomputings aufbauen. IBM stellt dem Fraunhofer-Kompetenznetzwerk und seinen Partnern ab dem Jahr 2021 einen Quantencomputer (IBM Q System) für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Standort Ehningen bei Stuttgart als Rechenplattform auf dem weltweit höchsten Stand der Technik (basierend auf einer Matrix von > 25 Qubits) zur Verfügung. Die robuste Konfiguration der Rechenplattform (Standzeit > 95 %) ermöglicht alle Ebenen der Forschung und Entwicklung – von der essentiellen Algorithmik, der Softwareentwicklung sowie der Gestaltung elementarer Logikoperationen bis hin zur Kontrolle des Quantenprozessors im eigentlichen Rechenvorgang. Die Leistungsparameter des Quantencomputers sind auf die hohen Anforderungen einer Forschungsinfrastruktur mit dem Fokus auf wirtschaftsrelevante Anwendungen ausgerichtet. Der Standort in Baden-Württemberg ermöglicht den Betrieb dieses IBM-Quantencomputers unter deutscher Gesetzgebung als essentiellen Kern der Gesamtinitiative. Hierdurch wird eine wichtige Voraussetzung für eine breite Beteiligung der Industrie, z. B. in Verbundprojekten oder durch Auftragsforschung, geschaffen. Weiterhin stellt IBM einen Cloud-Zugang zu Quantencomputern mit 50 Qubits und mehr bereit. Diese in den USA beheimateten Systeme operieren noch nicht mit der Robustheit des oben beschriebenen Systems (> 25 Qubits), ermöglichen aber aufgrund Ihrer besonders hohen Zahl an Qubits eine besonders explorative Forschung in der Erstellung

with 50 to 128 qubits with errors are possible or whether the age of the quantum computer only begins with complete error correction.

To answer this question, the Fraunhofer-Gesellschaft, in cooperation with the International Business Machines Corporation (IBM Germany), is keen to build a national network of competence centers in the research field of quantum computing. From 2021, IBM will provide the competence network with a quantum computer (IBM Q system) for research and development work at the Ehningen site near Stuttgart, in the form of a state-of-the-art computing platform (based on a matrix of > 25 qubits) for the Fraunhofer competence network and its partners. The robust configuration of the computing platform (service time > 95 %) enables all levels of research and development – from essential algorithms, software development and the design of basic logic operations to the control of the quantum processor in the actual computing process. The performance parameters of the quantum computer are geared towards the high demands of a research infrastructure with a focus on economically relevant applications. The location in Baden-Württemberg enables this IBM quantum computer, which is critical to the entire initiative, to operate under German law. This is an important prerequisite for broader industrial involvement, e.g. in collaborative projects or through contract research. IBM also provides cloud access to quantum computers with 50 qubits and more. These systems, which are located in the USA, are not as robust as the > 25 qubit system described above, but due to their particularly high number of qubits, they enable exploratory research in the creation and testing of quantum algorithms and the evaluation of the performance of the next generation of quantum computers.

As part of the Center of Competence »Quantum Computing Baden-Württemberg«, Fraunhofer IAF would like to make significant progress in the performance of qubit arrays and





Zeitstrahl der Roadmap mit exemplarischen Meilensteinen und Projekten für die Erforschung und Entwicklung von Hardware und Software für Quantencomputer sowie der Integration verschiedener Rechnerarchitekturen zur anwendungsbezogenen Realisierung von Computern der nächsten Generation im Rahmen des Kompetenzzentrums »Quantencomputing Baden-Württemberg«.

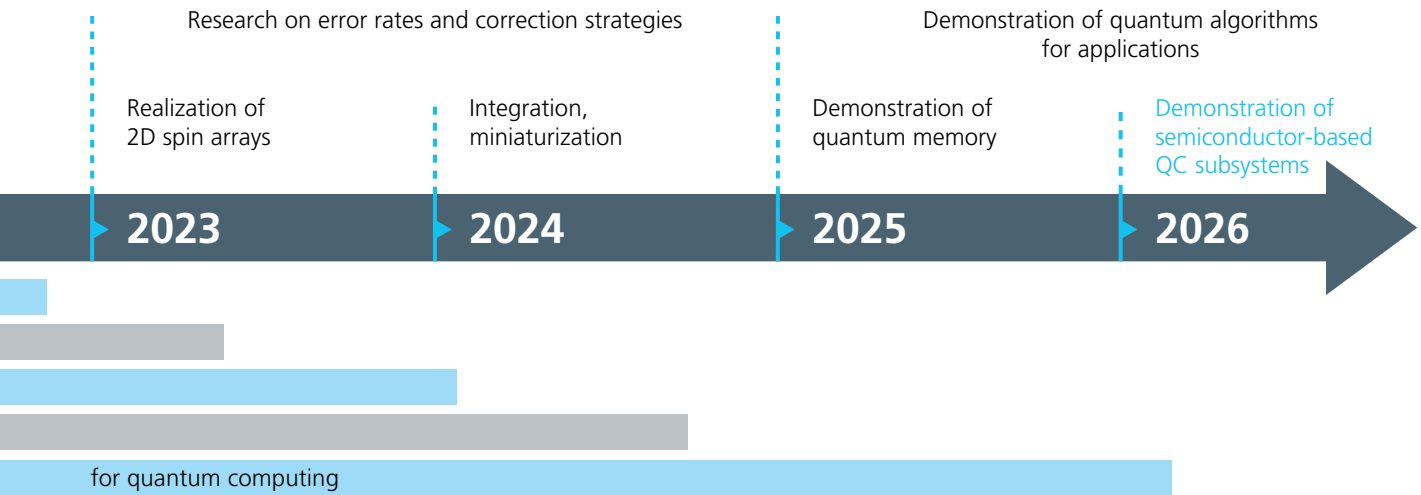
*Roadmap timeline with illustrative milestones and projects for research into, and development of, hardware and software for quantum computers, and for integrating a range of computer architectures to enable next-generation computers to be deployed in the Center of Competence »Quantum Computing Baden-Württemberg«.*

und Testung von Quantenalgorithmen sowie die Evaluation der Leistungsfähigkeit der nächsten Quantencomputer-Generation.

Im Rahmen des Kompetenzzentrums »Quantencomputing Baden-Württemberg« möchte das Fraunhofer IAF signifikante Fortschritte in der Performance von vernetzten Qubits und Quantenspeichern beisteuern. Ziel des Instituts ist es, durch Forschung und Entwicklung neuartiger Quanten-Hardware die erreichbaren Rechenzeiten von Quantencomputern zu erhöhen und Fehlerraten zu reduzieren. Die Forschung und Entwicklung des Fraunhofer IAF wird sich über die Entwicklung von Quanten-Hardware entlang ihrer gesamten Wertschöpfungskette, d. h. von der Entwicklung neuartiger Materialstrukturen und Prozesstechnologien über die Schaffung einer begleitenden Analytik und Qualitätssicherung quantenelektronischer Bauelemente bis hin zur Erforschung neuartiger Aufbau- und Verbindungstechniken sowie zur Demonstration leistungsfähiger Quantenspeicher und prozessierender Komponenten erstrecken. Weiterhin werden mit Hilfe des auf supraleitenden Qubits basierenden IBM-Quantencomputers kritische Leistungsparameter von relevanter Quanten-Hardware in praxisnahen Rechenprozessen getestet und in Verbundprojekten mit Universitäten, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Unternehmen zur Hardwareentwicklung für die nächste Generation von Hochleistungsrechnern genutzt.

quantum memories. The aim of the institute is to accelerate the computing rates achievable with quantum computers and to reduce error rates through research and development of novel quantum hardware. Research and development at the IAF will focus on the development into quantum hardware along the entire value chain, i.e. everything from the development of new material structures and process technologies, to the creation of associated analytics and quality assurance for quantum electronic components, to research into new construction and packaging technologies and demonstration of powerful quantum memories and processing components. Furthermore, the IBM superconducting qubit-based quantum computer enables critical performance parameters for quantum hardware to be tested in the context of practical computing processes and used in collaborative projects with universities, extramural research institutions and companies to develop hardware for the next generation of high-performance computers.

Baden-Württemberg and Germany have pioneered the development of key elements of the quantum computer and the exploitation of new architectures for the next generation of computers. Research groups in Baden-Württemberg in particular are global competitors in the science and technology involved both with quantum hardware and quantum software. It will be the task of the competence network and the Fraunhofer IAF to turn this starting position into compe-



Baden-Württemberg und Deutschland haben Pionierarbeit bei der Entwicklung von Schlüsselementen des Quantencomputers und in der Erforschung neuartiger Architekturen für die nächste Computergeneration geleistet. Insbesondere Forschungsgruppen in Baden-Württemberg sind in der Entwicklung von sowohl Hardware als auch Software weltweit wettbewerbsfähig. Es wird die Aufgabe des Kompetenznetzwerks und des Fraunhofer IAF sein, diese Ausgangsposition in wettbewerbsfähige Komponenten, Systeme und Anwendungen zu transferieren. Dazu gehört es, spezifische regionale und nationale Stärken wie institutionelle Unterstützung und Vielfalt bei Universitäten, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs), aber auch bei großen Unternehmen in die Forschung und Entwicklung zu integrieren. Diese Aufgabe wird durch eine zielgerichtete Systemintegration von Quantencomputern sowie durch eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen dem Kompetenzzentrum und Unternehmen in Baden-Württemberg erfüllt. Das Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg« und das Fraunhofer IAF sind bestrebt, regionale Unternehmen im Zuge von Verbundprojekten an den IBM-Quantencomputer heranzuführen und im Rahmen von Auftragsforschung Dienstleistungen mit Hilfe der neuartigen Rechnerplattformen für eine möglichst hohe Zahl von Branchen zu leisten. Weiterhin können Unternehmen als Mitglied des Kompetenznetzwerkes mit Hilfe der Fraunhofer-Gesellschaft in hoher Eigenständigkeit die Leistungsfähigkeit des Quantencomputers für ihre Forschung und Entwicklung evaluieren und nutzen. Über diese Möglichkeiten kann eine völlig neue Quanten-Hardware- und -Software-Branche in Baden-Württemberg und Deutschland mit Möglichkeiten für Ausgründungen in den Bereichen der Mikro- und Nanoelektronik, der Mikro- und Nanooptik, der Mikrowellenelektronik sowie der Quanteninformatik stimuliert werden.

titive components, systems and applications. This will involve the integration of specific regional and national strengths such as institutional support and diversity in universities, extramural research institutions", but also in large companies, into research and development. It is a task that will require the targeted integration of quantum computer systems and close cooperation between the Center of Competence and Baden-Württemberg companies. The Center of Competence »Quantum Computing Baden-Württemberg« and Fraunhofer IAF strive to familiarize regional industry with the IBM quantum computer in the context of collaborative projects and to develop innovative computer platforms as part of contract research that can provide services for the largest possible number of companies. Furthermore, as members of the competence network, companies benefit from the assistance of the Fraunhofer-Gesellschaft to enable them to evaluate the potential of the quantum computer for their research and development, and take advantage of it, with a high degree of independence. This will act as a catalyst for the emergence of a completely new quantum hardware and software industry in Baden-Württemberg and Germany, with the potential for spin-offs in micro- and nano-electronics, micro- and nano-optics, microwave electronics and quantum information technology.

*Oliver AmBacher*



# 2020

## HEUTE

existieren schon Quantencomputer mit mehr als 50 Qubits, z. B. von Google, IBM, Intel und Rigetti. Auch in Deutschland sind mehrere Initiativen gestartet, einen deutschen Quantencomputer zu bauen. Fraunhofer nimmt einen IBM Q System One in Betrieb und testet Anwendungsszenarien.

## TODAY

companies such as Google, IBM, Intel and Rigetti already have quantum computers with more than 50 qubits. Germany also has several initiatives aimed at building a quantum computer. Fraunhofer will put an IBM Q System One into operation and test application scenarios.



# 2023

## IN DREI JAHREN

ist die Fehlertoleranz der Quantenprozessoren so weit verbessert, dass dann Operationen mit mehr als 100 Qubits demonstriert werden können.

## IN THREE YEARS

the fault tolerance of quantum processors will be improved to such an extent that it will be possible to demonstrate operations using more than 100 qubits.



# THE WAY AHEAD

## Quantum computing

### 2030

#### IN ZEHN JAHREN

werden Quantencomputer mit Quantenalgorithmen, die klassische Computer übertreffen, anwendungsrelevant betrieben. Sie werden z. B. für Optimierungsprozesse genutzt.

#### IN TEN YEARS

quantum computers will be operated with quantum algorithms that surpass traditional computers. They will be used to run application-relevant optimization processes, for example.

### 2026

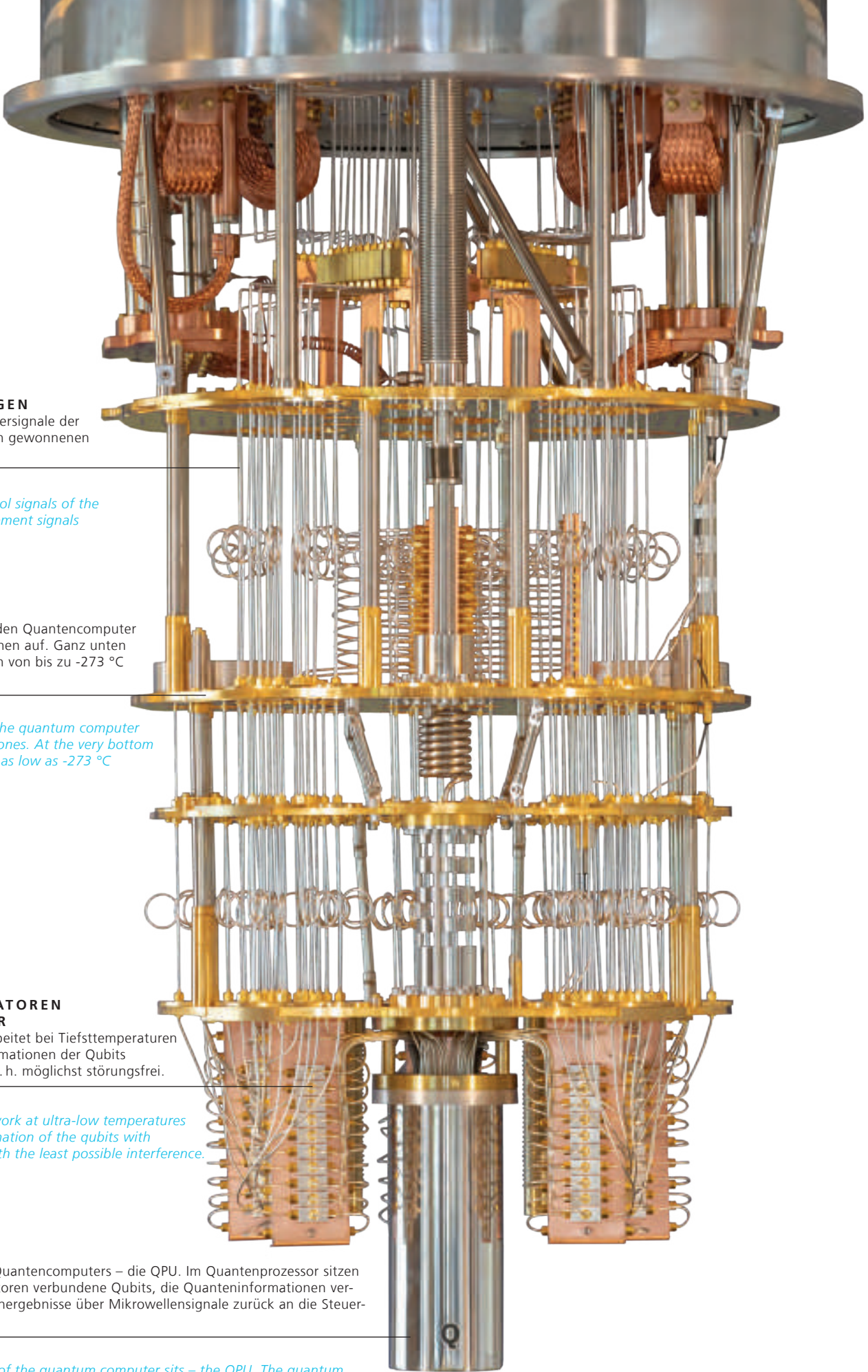
#### IN SECHS JAHREN

gibt es Quantenprozessoren mit Quantenfehlerkorrektur und logischen Qubits.

#### IN SIX YEARS

there will be quantum processors with quantum error correction and logical qubits.





#### KOAXIALLEITUNGEN

Sie übertragen die Steuersignale der Qubits und die an ihnen gewonnenen Messsignale.

#### COAXIAL LINES

*They transmit the control signals of the qubits and the measurement signals obtained from them.*

#### KÜHLZONEN

Die Goldplatten teilen den Quantencomputer in verschiedene Kühlzonen auf. Ganz unten herrschen Temperaturen von bis zu  $-273\text{ °C}$  ( $15\text{ mK}$ ).

#### COOLING ZONES

*The gold plates divide the quantum computer into different cooling zones. At the very bottom there are temperatures as low as  $-273\text{ °C}$  ( $15\text{ mK}$ ).*

#### KRYOGENE ISOLATOREN UND VERSTÄRKER

Kryogene Elektronik arbeitet bei Tiefsttemperaturen und überträgt die Informationen der Qubits möglichst rauscharm, d. h. möglichst störungsfrei.

#### COOLING ZONES

*Cryogenic electronics work at ultra-low temperatures and transmit the information of the qubits with minimum noise, i. e. with the least possible interference.*

#### QPU

Hier sitzt die CPU des Quantencomputers – die QPU. Im Quantenprozessor sitzen mit Mikrowellenresonatoren verbundene Qubits, die Quanteninformationen verarbeiten und die Rechenergebnisse über Mikrowellensignale zurück an die Steuereinheit senden.

#### QPU

*Here is where the CPU of the quantum computer sits – the QPU. The quantum processor contains qubits connected to microwave resonators, which process quantum information and return the calculated results to the control unit via microwave signals.*



# KRYOGENE ELEKTRONIK FÜR QUANTENCOMPUTER

*Cryogenic electronics for quantum computers*

Derzeitige Quantencomputer nutzen lange Kabel zur Verbindung von Raumtemperaturvorspannung sowie Auslese- und Steuerelektronik. Um hochgradig skalierbare Quantencomputer zu ermöglichen, bedarf es einer kryogenen Elektronik (< 4 K) mit einer Vielzahl von Funktionalitäten, die unter extrem rauscharmen Bedingungen und mit begrenzter Leistungsaufnahme arbeiten. Im Projekt **SEQUENCE** wird dies erreicht, indem Silizium- und III/V-Technologie kombiniert wird, was Quantencomputer mit verbesserter Skalierbarkeit, Leistung und reduzierten Kosten ermöglicht. Am IAF entwickeln und vergleichen wir zwei von uns entwickelten Technologien: Kryogene MOSHEMT- und HEMT-MMICs mit extrem niedrigem Rauschen und niedriger Leistungsaufnahme. Außerdem arbeiten wir an der 3D-Integration von rauscharmen Verstärkern und Schaltern.

State-of-the-art quantum computers currently use long cables to connect room temperature biasing, readout, and control electronics. Highly scalable quantum computers require cryogenic electronics (< 4 K) with a wide array of functionalities, operating under extremely low noise conditions with limited power budgets. The **SEQUENCE** project will address this, providing a versatile platform with a combination of Silicon and III-V technology, which will enable quantum computers to demonstrate improved scalability, higher performance and reduced costs. At IAF we are developing and comparing two in-house technologies for application in quantum computers: cryogenic MOSHEMT and HEMT MMICs with extremely low noise and low power consumption. Furthermore, we are working on the 3D integration of low-noise amplifiers and switches.

” Wir nutzen unsere »state-of-the-art« kryogene Elektronik für die nächste Generation der Quantencomputer.

*We use our expertise in state-of-the-art cryogenic electronics for the next generation of quantum computers.*



## SEQUENCE



**Fabian Thome**

Projektleiter / *Project Manager*

fabian.thome@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / *Project Partners*  
IBM Research GmbH, Lund University,  
Institut polytechnique de Grenoble,  
CEA-Leti, University of Glasgow,  
University College Cork, C2Amps,  
École polytechnique fédérale de Lausanne



MORE  
INFO



### TRL - LEVEL





# INHALTSVERZEICHNIS

## *Table of contents*

- 02 **VORWORT**  
*Preface*
- 08 **THE WAY AHEAD**  
*Quantum computing*
- 12 **INHALTSVERZEICHNIS**  
*Table of contents*
- 14 **KURATORIUM**  
*Advisory Board*
- 16 **STIMMEN DES KURATORIUMS**  
*Voices from our Advisory Board*
- 18 **AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT**  
*From idea to product*
- 19 **WIE SIE MIT UNS KOOPERIEREN KÖNNEN**  
*How you can work with us*
- 20 **DIENSTLEISTUNGEN**  
*Services*
- 22 **APPLIKATIONSLABORE**  
*Application laboratories*
- 24 **DAS INSTITUT IN ZAHLEN**  
*The institute in figures*

## KOMMUNIKATION

### *Communication*

- 46 **IM GESPRÄCH MIT NOKIA**  
*In conversation with NOKIA*
- 50 **UNSERE PROJEKTE IM BEREICH DER KOMMUNIKATION**  
*Our projects in the field of communication*
- 60 **THE WAY AHEAD**  
*Communication*

## MOBILITÄT

### *Mobility*

- 30 **IM GESPRÄCH MIT DEM FORSCHUNGS-KOORDINATOR**  
*In conversation with the research coordinator*
- 34 **UNSERE PROJEKTE ZUR MOBILITÄT**  
*Our projects in the field of mobility*
- 42 **THE WAY AHEAD**  
*Mobility*



# MEDIZIN

## *Medical technology*

- 64 IM GESPRÄCH MIT DER ZAHNMEDIZINERIN  
*In conversation with the dentist*
- 68 UNSERE PROJEKTE IM BEREICH DER MEDIZINTECHNIK  
*Our projects in the field of medical technology*
- 74 THE WAY AHEAD  
*Medical technology*



78 HÖHEPUNKTE 2019  
*Highlights from 2019*

84 PATENTE  
*Patents*

86 AUSBILDUNG UND LEHRE  
*Education and teaching*

87 FAKTEN UND ZAHLEN  
*Facts and figures*

88 ABSCHLUSSARBEITEN  
*Theses*

92 FORSCHUNGSFABRIK MIKRO-ELEKTRONIK DEUTSCHLAND  
*Research Fab Microelectronics*

93 WEITERE KOOPERATIONSPARTNER  
*Other research partners*

94 WELTWEIT VERNETZT  
*A global network*

96 ORGANIGRAMM  
*Organigram*

99 FÜR BEWERBER  
*Jobs@IAF*

100 MESSEN & VERANSTALTUNGEN 2020  
*Fairs & conferences 2020*

102 IMPRESSUM  
*Publication details*

# KURATORIUM

## *Advisory Board*



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

**Dr. Klaus Beilenhoff**

*United Monolithic Semiconductors GmbH, Ulm*

**Prof. Dr. Jérôme Faist**

*ETH Zürich, Schweiz*

**Dr. Johannes Koeth**

*nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH,  
Gerbrunn*

**Dr. Jens Kosch**

*X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt*

**Dr. Tomas Krämer**

*Institutsbetreuer / Institute Liaison  
Fraunhofer-Gesellschaft, München*

**Prof. Dr. Juerg Leuthold**

*ETH Zürich, Schweiz*

**MinR Dipl.-Phys. Claus Mayer**

*Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau  
Baden-Württemberg, Stuttgart*



**Dr. Ulf Meiners**

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





Teilnehmer/-innen der Kuratoriumssitzung 2019 am Fraunhofer IAF, teilweise in Vertretung der Vollmitglieder.  
*Participants of the Advisory Board meeting 2019 at Fraunhofer IAF, partly representing full members.*

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

**Dr. Thomas Metzger**

*Qualcomm Germany RFFE GmbH, München*

**Dr. Thomas Roedle**

*Ampleon Netherlands B.V., Nijmegen, Niederlande*

**Dr. Frank Treppe**

*Direktor Wissenschaftspolitik und Internationales  
Director Science Policy and International Affairs /  
Fraunhofer-Gesellschaft, München*

**TRDir Wolfgang Scheidler**

*Gast / Guest*

*Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und  
Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD 61), Manching*

**Dr. Dietmar Schill**

*Sony Europe B. V., Stuttgart*

**Andreas Wälti**

*Evatec AG, Trübbach, Schweiz*

**Dipl.-Ing. MinR Norbert Weber**

*Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn*

**Prof. Dr. Jörg Wrachtrup**

*3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart*



# STIMMEN DES KURATORIUMS

## *Voices from our Advisory Board*

Wir haben Mitglieder unseres Kuratoriums gefragt:  
»Was ist Ihr »way ahead« für das Fraunhofer IAF?«

*We asked members of our Advisory Board, »What is your »way ahead« for Fraunhofer IAF?«*



### DR. HANS BRUGGER

*HENSOLDT Sensors GmbH*

Das IAF wird durch gezielte Nutzung von Quanteneffekten und Kooperationen innerhalb Fraunhofer seine führende Stellung als Impulsgeber für neue Innovationen in der Mikro- und Optoelektronik erfolgreich ausbauen.

*Fraunhofer IAF will successfully expand its leading position as a driving force for innovation in microelectronics and optoelectronics through the targeted use of quantum effects and collaboration within Fraunhofer.*

### DR. ULF MEINERS

*NICHIA Chemical Europe GmbH*

Im Zuge der Digitalisierung wird das Thema der Hochleistungscomputer immer wichtiger. Das interdisziplinäre Fraunhofer IAF ist für Entwicklungen im Bereich Quantencomputing hervorragend aufgestellt.

*In the course of digitalization, the topic of high-performance computers is becoming increasingly important. As an interdisciplinary institute, IAF is very well placed to capitalize on developments in quantum computing.*



### DR. THOMAS METZGER

*Qualcomm Germany RFFE GmbH*

Auf Basis der hohen Kompetenz des IAF erwarte ich in den nächsten Jahren wesentliche Beiträge für energieeffiziente Lösungen in den Bereichen Quantencomputing, autonomes Fahren, mobile Kommunikation und Sensorik.

*Given IAF's high levels of expertise, I expect it to make a significant contribution to energy-efficient solutions in quantum computing, autonomous driving, mobile communication and sensor technology over the coming years.*

## DR. JENS KOSCH

*X-FAB Semiconductor Foundries GmbH*

Das Fraunhofer IAF ist geschätzt als erfolgreicher Brückenbauer zwischen Forschung und Industrie. Nun gilt es, neue Brücken zu bauen – zum Beispiel mit neuen Methoden und Modellen der Zusammenarbeit.

*Fraunhofer IAF is highly regarded as a successful bridge builder between research and industry. Now it is time to build new bridges – through new methods and models of collaboration, for example.*



## DR. JOHANNES KOETH

*nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH*

Mit dem Fundament aus den Technologien und Fertigkeiten, die das IAF in den vergangenen Jahrzehnten entwickelt hat, wird es im Zeitalter der Quantentechnologien zahlreiche innovativen Anwendungen verwirklichen.

*Building on the foundation of the technologies and skills it has developed over the past decades, Fraunhofer IAF will be able to bring many innovative applications to fruition in the age of quantum technology.*



## ANDREAS WÄLTI

*Evatec AG*

Neue Materialien, vielleicht auch esoterische, sehe ich als Wegweiser in der III-V-Halbleitertechnologie. Getrieben wird dies durch Anforderungen an Low Power, High Data Density, Near Data Processing und Fast Data Transmission.

*I see new materials, possibly including esoteric materials, as pointing the way for III-V semiconductor technology. This is driven by requirements for low power, high data density, near data processing and fast data transmission.*



# AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT

## *From idea to product*

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

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

### WARUM FRAUNHOFER IAF? WHY FRAUNHOFER IAF?

#### **Zusammenarbeit: maßgeschneidert!**

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

#### ***Tailor-made collaboration!***

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

#### **Gebündelte Kompetenzen**

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

#### ***Bundled competences***

We provide you with optimum solutions across a range of materials and processes due to our comprehensive portfolio.

#### **Ihre Anfrage im Mittelpunkt**

Bei Auftragsforschung gehen wir spezifisch auf Ihre Anfrage ein.

#### ***The focus is on your needs***

Contract research allows us to provide you with individualized responses.

#### **Kostengünstige Lösungen**

Zugriff auf unsere Infrastruktur und Prozesse schonen Ihre internen Ressourcen.

#### ***Cost-effective solutions***

Our research infrastructure and processes save resources for our partners.

#### **Geschütztes Umfeld**

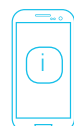
Vertraulichkeit und der Schutz Ihrer Daten haben bei unserer Arbeit oberste Priorität.

#### ***Protected environment***

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



MORE  
INFO





# WIE SIE MIT UNS KOOPERIEREN KÖNNEN

*How you can work with us*

## INDUSTRIEKUNDEN

### *Industry*

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

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



## FORSCHUNGSINSTITUTE

### *Research Institutes*

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

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



## START-UPS

### *Start-ups*

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

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



# DIENSTLEISTUNGEN

## Services

Wir bieten Ihnen entlang unserer Wertschöpfungskette eine breite Palette an Dienstleistungen an. Sie können bei uns Epitaxie nach Ihren Spezifikationen beauftragen oder Chipfläche auf Wafern buchen. Gerne unterstützen wir Sie auch bei Design, Modellierung und Herstellung von integrierten Schaltungen sowie Modulen. Im Bereich der Messtechnik bieten wir Ihnen Analytik von Halbleitern sowie Hochfrequenz-Messungen.

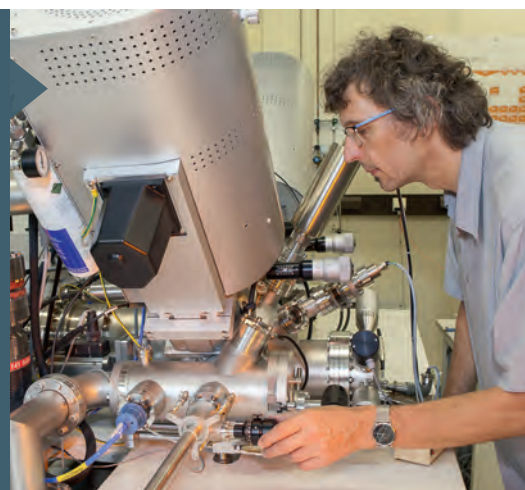
*We provide a wide range of services along the whole of our value chain. You can request epitaxy developed to your specifications or book chip space on wafers. We are also happy to support you in the design, modelling and manufacture of integrated circuits and modules. We also have experience of measurement technology and can also provide you with semiconductor analysis and high-frequency measurements.*

## ANALYTIK VON HALBLEITERN *Semiconductor Analysis*

Wir bieten Ihnen eine Reihe analytischer Verfahren zur chemischen und strukturellen Charakterisierung von Volumenhalbleitern, Halbleiterheterostrukturen sowie Dünnschichtsystemen.

*We offer a range of analytical methods for the chemical and structural characterization of bulk semiconductors, semiconductor heterostructures and thin-film systems.*

[lutz.kirste@iaf.fraunhofer.de](mailto:lutz.kirste@iaf.fraunhofer.de)



## HOCHFREQUENZ-MESSTECHNIK *High Frequency Measurements*

Wir charakterisieren Ihre integrierten Schaltungen und Hochfrequenzmodule, z. B. Low-Power- und Low-Noise-Amplifier, Mixer, Frequenzmultiplikatoren, Oszillatoren, Schalter und Phasenschieber.

*We characterize your integrated circuits and high frequency modules, e.g. low power and low noise amplifiers, mixers, frequency multipliers, oscillators, switches and phase shifters.*

[hermann.massler@iaf.fraunhofer.de](mailto:hermann.massler@iaf.fraunhofer.de)



## AUFTRAGSEPITAXIE

### *Epitaxy on Demand*

Beauftragen Sie bei uns Epitaxieschichten nach Ihren Spezifikationen für leistungs- und hochfrequenzelektronische Bauteile sowie für Halbleiterlaser, LEDs und Detektoren.

*We produce epitaxial layers according to your specifications for power and high frequency electronic components, and for semiconductor lasers, LEDs and detectors.*

[rolf.aidam@iaf.fraunhofer.de](mailto:rolf.aidam@iaf.fraunhofer.de)



## MULTIPROJEKT-WAFER-RUNS

### *Multiproject wafer runs*

Wir bieten regelmäßig elektronische Multiprojekt-Wafer-Runs (MPW) und Maskenprozessierungen sowohl mit Front- als auch Rückseitenprozessierung.

*We regularly offer electronic multi project wafer runs (MPW) and undertake mask processing with both front and back side processing.*

[laura.hau@iaf.fraunhofer.de](mailto:laura.hau@iaf.fraunhofer.de)



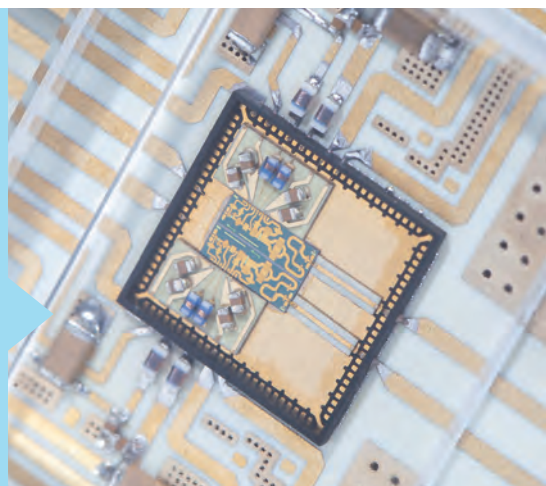
## MODULE UND SCHALTUNGEN

### *Modules and ICs*

Wir entwickeln für Sie integrierte Schaltungen und Module bis zu 670 GHz mit weltweiten Spitzenwerten in den Bereichen Rauschzahl, Verstärkung und Effizienz.

*We develop integrated circuits and modules up to 670 GHz with the top values in the world for noise figure, amplification and efficiency.*

[hermann.massler@iaf.fraunhofer.de](mailto:hermann.massler@iaf.fraunhofer.de)





# APPLIKATIONSLABORE

## *Application laboratories*

In unseren Applikationslaboren zeigen wir Ihnen die Potenziale unserer Technologien für verschiedene Branchen auf. Gerne testen wir vor Ort und mit Ihren Proben, ob unsere Technologie sich für Ihre Fragestellung eignet.

*Our application laboratories illustrate the potential of our technologies for a variety of industries. We are happy to undertake on-site testing using your samples to assess whether our technology addresses your issue.*

### 3 D - MESSUNGEN MIT MILLIMETERWELLEN

Extrem flexibel und in alle Richtungen drehbar ist dieser innovative Messplatz am Fraunhofer IAF: Indem wir sowohl Hochfrequenzsensoren als auch optische Sensoren an einen frei beweglichen Roboterarm anschließen, können Bauelemente dreidimensional aus unterschiedlichen Winkeln und Abständen zuverlässig geprüft werden.

So charakterisieren wir die Strahlungseigenschaften von Antennen (60–300 GHz), führen 3D-Oberflächenscans durch und liefern tomographische Bilder von dielektrischen Objekten. Der Messplatz kann je nach Anwendungsszenario angepasst werden.

### 3 D MEASUREMENTS WITH MILLIMETER WAVES

Fraunhofer IAF's innovative measuring station is highly flexible and can rotate in all directions. By attaching both high-frequency sensors and optical sensors to a freely movable robot arm, we can undertake reliable three-dimensional inspections of devices from different angles and distances.

This enables us to characterize the radiation properties of antennas (60–300 GHz), perform 3D surface scans and deliver tomographic images of dielectric objects. The measuring station can be adapted to suit different application scenarios.



## 3D-MESSLABOR

### *3D measuring laboratory*

**Dominik Meier**

Projektleiter / Project Manager

[dominik.meier@iaf.fraunhofer.de](mailto:dominik.meier@iaf.fraunhofer.de)



MORE  
INFO



## INFRAROT-LASER-SPEKTROSKOPIE IN ECHTZEIT

Wie verändern sich Zusammensetzungen von chemischen Substanzen unter äußeren Einflüssen? Welche Substanzen befinden sich in einer Lösung oder Flüssigkeit? Unsere innovativen Quantenkaskadenlaser (QCL) finden die Antwort.

QCLs identifizieren chemische Substanzen wesentlich zuverlässiger als vergleichbare Nahinfrarot- oder Ramanspektroskopie. Darüber hinaus arbeitet unser System in Echtzeit: Feste, flüssige oder gasförmige chemische Stoffe werden in nur einer Millisekunde erkannt – ein echter Fortschritt für die In- und Online-Prozesskontrolle.

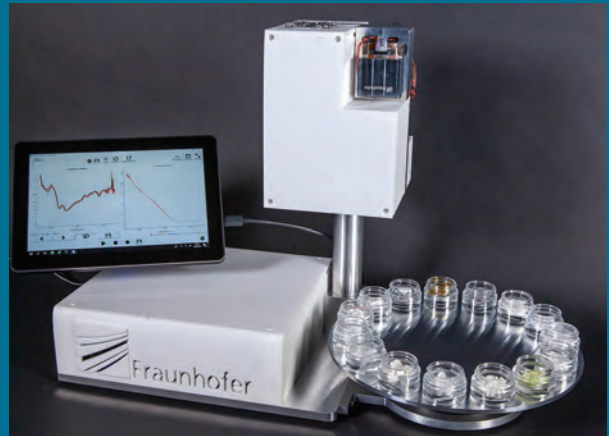
Durch seine breite spektrale Abstimmbarkeit im infraroten Wellenlängenbereich zwischen 4 und 11  $\mu\text{m}$  sowie seine hohe spektrale Brillanz, ist der QCL für verschiedenste Messaufgaben hervorragend geeignet.

## REAL-TIME INFRARED LASER SPECTROSCOPY

How does the composition of chemical substances change under external influences? What substances are found in solutions and liquids? Our innovative quantum cascade lasers (QCL) find the answer.

QCLs identify chemical substances much more reliably than comparable near-infrared or Raman spectroscopy. What is more, our system works in real time, detecting solid, liquid or gaseous chemical substances in just one millisecond – a real advance in inline and online process control.

Thanks to its broad spectral tunability in the infrared wavelength range between 4 and 11  $\mu\text{m}$  and its high spectral brilliance, the QCL is excellently suited to perform a wide range of measurement tasks.



## LASER-SPEKTROSKOPIE *Laser Spectroscopy*

**Dr. Marko Härtelt**

Projektleiter / Project Manager

marko.haertelt@iaf.fraunhofer.de



MORE  
INFO



# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## *The institute in figures*

Das Fraunhofer IAF rechnet im Jahr 2019 mit einem gegenüber dem Vorjahr um mehr als 1 Mio. € höheren Betriebshaushalt, welcher bei ca. 30,2 Mio. € liegen wird. Hierfür sind in erster Linie die aufgrund des Personalwachstums und von Tarifsteigerungen deutlich höheren Personalaufwendungen verantwortlich. Diese werden mit 18,1 Mio. € einen Höchststand erreichen, wobei auch für die kommenden Jahre 2020 und 2021 von einer weiteren Expansion des Personals ausgegangen wird. Die laufenden Investitionen werden aufgrund einer vom BMVg projektfinitzierten Beschaffung einer MOCVD-Anlage im Jahr 2019 auf dem Rekordniveau von 10,6 Mio. € erwartet. Auch in den Folgejahren sollen Investitionen in jährlicher Höhe zwischen 6 und 8 Mio. € realisiert werden. Zusätzlich werden auch im Jahr 2019 im Rahmen des BMBF-finanzierten Programms »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« weitere 2 Mio. € als Ausbauminvestitionen in zukunftsweisende technologische Geräte investiert.

Der größere Teil des Betriebshaushalts und der laufenden Investitionen wird voraussichtlich auch 2019 vom BMVg mit einem Anteil von ca. 58 % finanziert. Bei den Industrieerträgen wird ein Rückgang von ca. 0,3 Mio. € auf ca. 4,6 Mio. € erwartet, was einen Anteil von ca. 34 % an den zivilen Forschungsaktivitäten bedeutet. Diesem Rückgang stehen deutliche Steigerungen öffentlicher Projekterträge sowie bei der Einwerbung Fraunhofer-interner Mittel zur Unterstützung der Vorlauftorschung gegenüber. Der um ca. 7 Mio. € deutlich gegenüber 2018 höhere Gesamthaushalt in Höhe von 40,8 Mio. € zeigt sich wiederum als sehr gut finanziert, so dass wir erneut mit einem positiven Jahresergebnis rechnen.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten liegt 2019 bei 218. In absoluten Zahlen arbeiten 285 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon 32 % weiblich. Von diesen 285 sind 200 direkt in der Forschung und 85 in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Forschung arbeiten 36 Personen an ihrer Doktor- oder Masterarbeit, 7 sind zum Zweck ihrer Berufsausbildung oder im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Institut beschäftigt.

In 2019, Fraunhofer IAF expects its operating budget to be around € 30.2 million, more than € 1 million higher than in the previous year. This is primarily due to significantly higher personnel costs resulting from personnel growth and public sector pay rises. Personnel costs will peak at € 18.1 million, with staff expansion expected to continue in 2020 and 2021. Investment is expected to reach a record level of € 10.6 million in 2019 due to the procurement of a MOCVD system financed by a project funded by the Federal Ministry for Defence (BMVg). Annual investment of between € 6 and € 8 million is also expected in subsequent years. In addition, in 2019 a further € 2 million will be invested in pioneering technological equipment as part of the Research Fab Microelectronics Germany, funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF).

The majority of the operating budget and current investment in 2019 will likely be financed by the Federal Ministry for Defence, with a share of approximately 58 %. Industrial revenues are expected to decline by € 0.3 million to approx. € 4.6 million, which represents approx. 34 % of civil research activity. This decline will be offset by significant increases in public project revenues and the acquisition of internal Fraunhofer funds for preparatory research. The overall budget of € 40.8 million, which is € 7 million higher than in 2018, is again very healthy, so we expect to achieve strong overall annual results.

The number of full-time equivalent employees in 2019 is 218. A total of 285 employees, of whom 32 % are female, work at Fraunhofer IAF. Of these 285, 200 are directly engaged in research and 85 in infrastructure, including management. 36 research employees are working on the doctoral or master's theses, 7 are undertaking vocational training at Fraunhofer IAF or are employed as part of their studies at the Baden-Württemberg Cooperative State University.



**MITARBEITER /  
- INNEN** *Employees*

**GESAMTHAUSHALT** (as of 09/2019)  
*Total budget*

**285 40.8 MILLION €**

**DAVON**  
*Of which*

**VON DEN 40,8 MILLIONEN €**  
*Of these € 40.8 million*

**82**

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

**82**

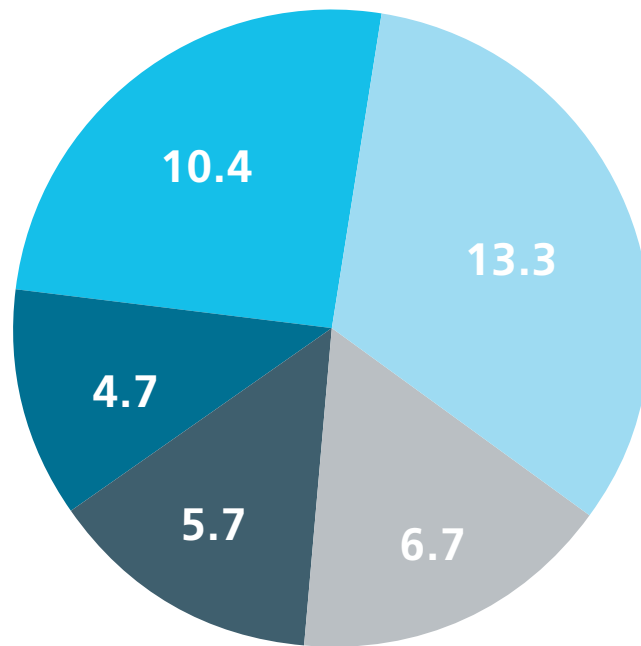
Nichtwissenschaftliche  
Mitarbeiter/-innen in  
Fachabteilungen  
*Other staff in R&D  
departments*

**36**

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

**85**

Infrastruktur & Leitung  
*Infrastructure & management*



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

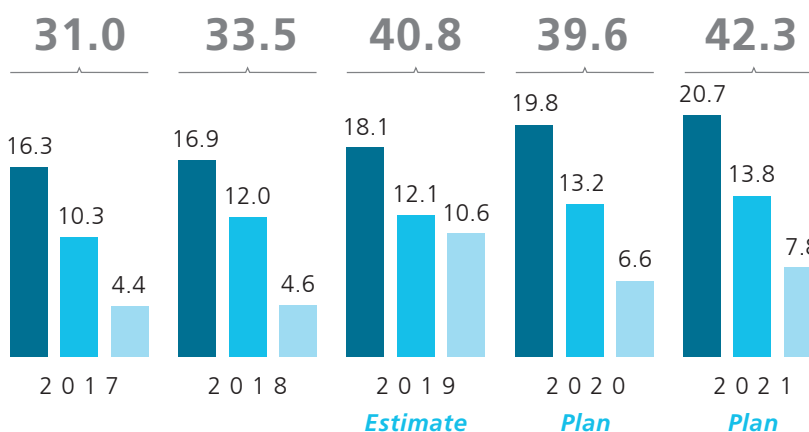
**GESAMTHAUSHALT-AUSGABEN IN MIO. €**

*Total budget outlay in million €*

■ Personalaufwendungen  
*Personnel costs*

■ Sachaufwendungen  
*Non-personnel costs*

■ Investitionen  
*Investment*



## WIE SIEHT DIE KOMMUNIKATION VON MORGEN AUS?

*What will the communication  
of tomorrow look like?*

- 46 IM GESPRÄCH MIT NOKIA  
*In conversation with NOKIA*
- 50 UNSERE PROJEKTE IM BEREICH  
KOMMUNIKATION  
*Our projects in the field of  
communication*
- 60 THE WAY AHEAD  
*Communication*

## WIE SIEHT DIE MOBILITÄT VON MORGEN AUS?

*What will the mobility of tomorrow look like?*

- 30 IM GESPRÄCH MIT DEM FORSCHUNGSKOORDINATOR  
*In conversation with the research coordinator*
- 34 UNSERE PROJEKTE IM BEREICH MOBILITÄT  
*Our projects in the field of mobility*
- 42 THE WAY AHEAD  
*Mobility*



# WIE SIEHT DIE MEDIZIN VON MORGEN AUS?

*What will the medical technology  
of tomorrow look like?*

64 IM GESPRÄCH MIT DER ZAHNMEDIZINERIN  
*In conversation with the dentist*

68 UNSERE PROJEKTE IM BEREICH MEDIZINTECHNIK  
*Our projects in the field of medical technology*

74 THE WAY AHEAD  
*Medical technology*











## WIE SIEHT DIE MOBILITÄT VON MORGEN AUS?

*What will the mobility of tomorrow look like?*

Eine bezahlbare und nachhaltige Mobilität der Zukunft braucht innovative Ideen wie neue Antriebs- oder Sharingkonzepte. Auch autonomes Fahren kann zu einem energie- und ressourceneffizienten Personen- und Güterverkehr beitragen. Auf dem Weg dahin erforschen wir Galliumnitrid-basierte Leistungselektronik für Sensorik, Elektromobilität und Assistenzsysteme.

*Making the mobility of the future affordable and sustainable requires innovations such as new drive designs and sharing concepts. Autonomous driving can also contribute to energy- and resource-efficient passenger and freight transport. Along the way, we are researching gallium nitride-based power electronics for sensor technology, electromobility and assistance systems.*

# IM GESPRÄCH MIT DEM FORSCHUNGSKOORDINATOR

*In conversation with the research coordinator*



Tomas Krämer, Forschungs Koordinator bei der Fraunhofer-Gesellschaft, hatte schon bei seiner Promotion zum Festkörperphysiker immer die Anwendung im Blick. Heute koordiniert er die Fraunhofer-Initiative Next Generation Computing, die im Bereich der Mobilität neue Impulse geben kann. Im Interview spricht er mit Rüdiger Quay, stellvertretender Institutsleiter des IAF und Forscher im Bereich Leistungselektronik, über innovative Konzepte und den Weg in eine »grüne Mobilität«.

*Tomas Krämer, research coordinator at the Fraunhofer-Gesellschaft, has always had practical application in mind, even during his doctorate in solid-state physics. Today, he coordinates the Fraunhofer Next Generation Computing initiative, which aims to generate fresh momentum in the field of mobility. In this interview with Rüdiger Quay, Deputy Director of IAF and researcher in the field of power electronics, he talks about innovative concepts and the path toward »green mobility«.*

## WELCHE TECHNOLOGISCHE INNOVATION RUND UM DIE MOBILITÄT HAT SIE FASZINIERT?

**Krämer** — Die Mobilität an sich ist für mich eine faszinierende Sache! Sie bedeutet ja, Grenzen zu überwinden, Freiheit zu erlangen und Dinge neu und anders kennenzulernen.

**Quay** — Die Schifffahrt und die damit verbundene Vernetzung der Welt im 15. und 16. Jahrhundert. Das hat die Welt sehr stark verändert und ist die Grundlage für unseren heutigen Welthandel und den Austausch der Kulturen.

## WIE SIEHT IHRE PRIVATE MOBILITÄT AUS?

**Krämer** — Ich fahre viel Fahrrad für mein Sportbedürfnis, das ich sonst im beruflichen Alltag schwer unterbringe. Allerdings muss ich zugeben, dass ich Schönwetterradfahrer bin! Ich versuche, Reisen einzuschränken und stattdessen die technischen Möglichkeiten wie Telefon- und Videokonferenzen zu nutzen. Es ist eben einfacher, ein paar Elektronen hin und her zu schieben als den ganzen Menschen (*lacht*).

## WHICH TECHNOLOGICAL INNOVATION IN THE FIELD OF MOBILITY HAVE YOU FOUND INTERESTING?

**Krämer** — Mobility itself is fascinating to me! It means overcoming boundaries, freedom and seeing things in a new and different way.

**Quay** — Seafaring and the associated discovery of the world in the 15<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> century. This changed the world very dramatically and it formed the basis for the global trade and cultural exchange that we see today.

## WHAT DOES YOUR OWN MOBILITY LOOK LIKE?

**Krämer** — I cycle a lot, to meet my need to do sports, which I generally find difficult to accommodate in my professional life. However, I have to admit that I am a fair weather cyclist! In general, I try to limit my travel and use technology such as telephone and video conferencing instead. It's just easier to move a few electrons back and forth than the whole person (*laughs*).





Dr. Rüdiger Quay (links) und Dr. Tomas Krämer (rechts)  
*Dr. Rüdiger Quay (left) and Dr. Tomas Krämer (right)*

**Quay** — Ich reise beruflich sehr viel und habe daher einen großen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, der mir persönlich wehtut. Auf den vielen Reisen kann man sehen, wie sich die Welt verändert: Trockenheit in Holland, wo ich als Kind immer im Sommer in Gummistiefeln im strömenden Regen stand. Privat setze ich auf das Fahrradfahren, wo immer es geht.

#### **WIE BEREITET DAS FRAUNHOFER IAF EINEN »WAY AHEAD« IM BEREICH DER MOBILITÄT?**

**Quay** — Wir forschen an Galliumnitrid (GaN) für effektives Spannungswandeln und eine effiziente Leistungsversorgung. GaN wird heute schon im Auto in verschiedenen Konvertern verbaut, weil es klein und kompakt ist. Für die Umrichtung im Motor wird GaN evaluiert. Die noch sehr großen Konverter würden dann kleiner und müssten nicht mehr wassergekühlt werden. Das würde die Autos auch leichter machen. Wir forschen außerdem an höheren Spannungen bis 1200 V, weil das noch effizienter wäre. Dazu muss man aber das Materialsystem noch weiterentwickeln, da es derzeit noch keine GaN-Substrate gibt, die kostengünstig sind.

**Quay** — I travel a lot professionally and therefore have a high CO<sub>2</sub> footprint, which pains me personally. On my many journeys I have seen how the world is changing: droughts in Holland, where as a child I used to stand in wellington boots in the pouring rain. In my private life I use my bike whenever possible.

#### **HOW IS FRAUNHOFER IAF PAVING THE »WAY AHEAD« IN THE FIELD OF MOBILITY?**

**Quay** — We are researching gallium nitride (GaN) for effective voltage conversion and efficient power supply. GaN is already used in cars today in various converters because it is small and compact. It is also being evaluated for converters in engines. This would mean that converters, which are currently very large, could become smaller and would no longer have to be water-cooled. And that would make cars lighter. In addition, we are researching higher voltages up to 1200 V, because that would be even more efficient. For this, however, the material system has to be further developed, as there are currently no cost-effective GaN substrates available.



Dr. Krämer sieht die Zukunft in intelligenter Mobilität.  
*Dr. Krämer thinks intelligent mobility is the future.*

**Krämer** — Wenn man beim IAF unter die Haube guckt, sieht man viele Anknüpfungspunkte zur Mobilität. Ein wesentlicher Teil der Wertschöpfung beim Auto ist ja die Sensorik, Kommunikation und Elektronik. Da ist das IAF stark. Kurzfristig sehe ich mit den Millimeterwellen-Komponenten die Chance, die Fahrerassistenz und das vernetzte Fahren voranzutreiben. Die Leistungselektronik des IAF ist besonders energieeffizient und trotzdem hochperformant und damit prädestiniert für die Mobilität. Mittelfristig kann Diamant als neues leistungselektronisches Material dienen. Und das Zukunftsthema ist ganz klar das Quantencomputing, das eine intelligente Logistik möglich macht.

**Krämer** — When you look under the hood at Fraunhofer IAF, you see many points of contact with mobility. An essential part of the added value of a car is not the powertrain and the driver's cab, but the sensors, communication and electronics. That's where IAF is strong. In the short term, I see IAF's millimeter-wave devices as a good opportunity to advance driver assistance and networked driving – right up to autonomous vehicles. IAF's power electronics are particularly energy-efficient and yet high-performance, meaning that they are predestined for mobility. In the medium term, diamond can serve as a new power electronic material. And the topic of the future is clearly quantum computing, which makes intelligent logistics possible.

#### HOW COULD NEXT GENERATION COMPUTING BE OF HELP?

**Quay** — Neuromorphic and quantum computers are capable of solving more specific problems than our classic computers. Our computers are very flexible, but they need too much energy to solve complex problems. This could be improved by giving up flexibility on the chip so that it solves certain problems faster and more efficiently, i.e. with less energy. We need this performance in order to ensure we provide the required computing power in real-time situations with high-density traffic efficiently. Today, this can only be achieved with very high amounts of energy.

**Krämer** — Autonomous driving and intelligent logistics present us with extremely complex problems. Neuromorphic and quantum computers can bring us a significant step forward. In our next generation computing initiative, we are pursuing these two topics. That's why I advocated this early on in the Fraunhofer Group for Microelectronics and then in the Research Fab Microelectronics Germany.



READ THE FULL  
INTERVIEW



## WAS WIRD MIT NEXT GENERATION COMPUTING MÖGLICH WERDEN?

**Quay** — Neuromorphe und Quantencomputer können speziellere Probleme lösen als unsere klassischen Computer. Unser PC ist sehr flexibel, aber er braucht für komplexe Probleme zu viel Energie. Dem kann man begegnen, indem man Flexibilität auf dem Chip aufgibt, damit er gewisse Probleme schneller und effizienter, d. h. energieärmer löst. Diese zusätzliche Computer-Performance benötigen wir, um in Situationen von hochdichtem Verkehr die nötige Rechenleistung in Echtzeit effizient bereitzustellen. Das schafft man heute nur mit sehr hohen Energiemengen.

**Krämer** — Das autonome Fahren und eine intelligente Logistik stellen uns vor extrem komplexe Probleme. Neuromorphe und Quantencomputer können uns da einen deutlichen Schritt nach vorne bringen. Bei unserer Initiative zum Next Generation Computing verfolgen wir diese zwei Themen. Deswegen habe ich mich schon früh im Mikroelektronikverbund und dann auch in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland dafür stark gemacht.

## WAS GLAUBEN SIE – WIE SIEHT DIE MOBILITÄT IN 20 JAHREN AUS?

**Krämer** — Erheblich elektromobiler, erheblich intelligenter. Vielleicht ist die Mobilität auch wieder weniger wichtig, weil vieles über die virtuelle Kommunikation gelöst wird. Und wenn man dann doch fahren muss, wird es effizient und emissionsfrei sein.

**Quay** — Ich bin ein großer Freund des elektrischen Antriebs des Flugzeugs. Das wäre ein großer Durchbruch. Dazu braucht man bessere Speicher und Antriebe. Als Quelle wären erneuerbare Energien ein großer Fortschritt. Ich muss oft fliegen, sehe aber das Einbringen von klimaschädlichen Gasen in die Stratosphäre als kritisch. Wasserstoff könnte auch eine Lösung sein, aber der ist noch eine harte Nuss für die Forschung.



Dr. Quay hofft auf Netzausbau in der Elektromobilität.

*Dr. Quay hopes for grid expansion in electromobility.*

## WHAT DO YOU THINK MOBILITY WILL BE LIKE IN 20 YEARS?

**Krämer** — Much more electromobile, much more intelligent. Maybe mobility will also become less important again, because we'll be able to solve a lot of issues through virtual communication. And if you do have to drive, it will be efficient and emission-free.

**Quay** — I'm a big advocate of electric powertrains for aircrafts. That would be a big breakthrough. For this we need better storage and drives. Renewable energy as a source would be a big step forward. I have to fly often, but the introduction of climate-unfriendly gases into the stratosphere is of course critical. Hydrogen could be a solution, but it is still a tough nut to crack for research.



# UNSERE PROJEKTE IM BEREICH MOBILITÄT

*Our projects in the field of mobility*



## VERTIGO

LEISTUNGSELEKTRONIK IM  
NIEDERVOLTBEREICH FÜR  
ASSISTENZSYSTEME

*Low-voltage power electronics for  
assistance systems*



## GaNIAL

EFFIZIENTES LADEN VON  
ELEKTROFAHRZEUGEN MIT GaN

*Efficient charging of electric vehicles with GaN*



## KoNet

ECHTZEIT-KOMMUNIKATION FÜR DAS AUTONOME FAHREN

*Real-time communication for autonomous driving*



## GaNTraction

FRAKTALE GaN-MODULE FÜR  
DIE ELEKTROMOBILITÄT

*Fractal GaN modules for electromobility*



## ElKaWe

KLIMAFREUNDLICHES HEIZEN UND KÜHLEN IM KFZ

*Climate-friendly heating and cooling for cars*



## mAgnest

HOCHLEISTUNGS-STROMSENSOREN  
FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

*High-performance current sensors for  
electromobility*



# ECHTZEIT-KOMMUNIKATION FÜR DAS AUTONOME FAHREN

*Real-time communication for autonomous driving*

Die für das autonome Fahren benötigten Datenmengen und Bandbreiten sind enorm. Eine Erhöhung der Trägerfrequenz in den THz-Bereich steigert die nutzbare Bandbreite und damit die zur Verfügung stehende Datenkapazität auf einige 100 Gbit/s. Das Projekt **KoNet** untersucht und entwickelt daher neue adaptive hochbitratige Übertragungstechnologien mit einer effizienten, teilweise dezentralen Netzwerkmanagement-Architektur. Damit lassen sich erstmals komplexe selbstlernende Konzepte im Bereich des autonomen Fahrens umsetzen. Anwendungen finden sich im Bereich des Kolonnenfahrens im Straßen- und Lastkraftsowie im schienengebundenen Verkehr.

The data volumes and bandwidths required for autonomous driving are enormous. Increasing the carrier frequency in the THz range increases the usable bandwidth, and thus available data capacity, to a few 100 Gbit/s. The **KoNet** project therefore investigates and develops new adaptive high-bit-rate transmission technologies with efficient, partially decentralized network management architecture. For the first time, it is possible to apply complex self-learning concepts to autonomous driving. Applications can be found in the field of platooning on roads and by trucks, and for rail transport.

” Wir entwickeln eine hochbitratige Übertragungstechnologie, die für das autonome Fahren unerlässlich ist.

*We're developing high bit-rate transmission technology that is essential for autonomous driving.*



## KoNet



**Dr. Thomas Merkle**

Projektleiter / Project Manager

thomas.merkle@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

Fraunhofer HHI, Fraunhofer ESK, Fraunhofer FIT



MORE  
INFO



TRL - LEVEL





# EFFIZIENTES LADEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN MIT GaN

*Efficient charging of electric vehicles with GaN*

Damit sich Fahrzeuge mit Elektroantrieb langfristig durchsetzen können, müssen die Lademöglichkeiten flexibler werden. Um Ladesäulen mit Wechselstrom, Wandladestationen oder herkömmliche Steckdosen nutzen zu können, bedarf es On-Board-Ladegeräte. Diese im Fahrzeug mitgeführte Ladeelektronik muss möglichst klein, leicht und kostengünstig sein. Dafür braucht es extrem kompakte und gleichzeitig effiziente leistungselektronische Systeme auf Basis von Galliumnitrid (GaN). Im Projekt **GaNIAL** werden erstmals Strom- und Temperatursensoren, Leistungstransistoren der 600-V-Klasse mit intrinsischen Freilaufdioden und Gate-Treiber in einem GaN Power IC vereint. Dies ermöglicht höhere Schaltfrequenzen sowie eine Zustandsüberwachung direkt im Chip.

In order for electric vehicles to become established in the long term, charging options must become more flexible. In order to be able to use charging stations with alternating current, wall charging stations or conventional sockets, on-board chargers are required. Vehicles' on-board charging electronics must be as small, light and inexpensive as possible. This requires extremely compact and efficient power electronics systems based on gallium nitride (GaN). Project **GaNIAL** is the first to combine current and temperature sensors, 600 V power transistors with intrinsic freewheeling diodes and gate drivers in a single GaN power IC. This enables higher switching frequencies and in-chip status monitoring.

” Mit unserer Technologie sollen Ladegeräte kompakter und zuverlässiger werden.

*Our technology is designed to make chargers more compact and reliable.*



## GaNIAL



**Dr. Patrick Waltereit**

Projektleiter / Project Manager

patrick.waltereit@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

Robert Bosch GmbH, BMW AG,

Finepower GmbH, University of Stuttgart



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# LEISTUNGSELEKTRONIK IM NIEDERVOLT- BEREICH FÜR ASSISTENZSYSTEME

*Low-voltage power electronics for assistance systems*

Die wachsende Elektromobilität und das autonome Fahren erfordern einen effizienteren Umgang mit den zur Verfügung stehenden Energieressourcen. In modernen Fahrzeugen erhöht sich die Zahl an Assistenzsystemen stetig und damit auch die Anforderungen an Baugröße, Leistungsdichte und Kosten. Die Einführung eines 48-V-Bordnetzes gilt hier als eine Schlüsseltechnologie. Im Projekt **VERTIGO** ist daher die Entwicklung völlig neuer, massenmarktauglicher und hoch-effizienter vertikaler Bauelemente für Spannungswandler im Niedervoltbereich bis 200 V das Ziel. Damit sollen die Verluste bei der Spannungswandlung um über 50 % reduziert werden. Dies soll durch neue Ansätze im Halbleitermaterial, der Bauelementtechnologie und bei der Integration im Packaging erreicht werden.

Increasing electromobility and autonomous driving require energy resources to be used more efficiently. In modern vehicles, the number of assistance systems is constantly increasing, as are the requirements for size, power density and cost. The introduction of a 48 V on-board electrical system is regarded as a key technology here. The aim of project **VERTIGO** is therefore to develop completely new, mass-marketable, highly efficient vertical components for low-voltage transformers of up to 200 V. The aim is to reduce losses during voltage conversion by more than 50 %. This will be achieved by means of new approaches to semiconductor materials, component technology and packaging integration.

” Unser Projekt macht die  
Elektronik im Auto effizienter.  
*Our project makes car electronics more efficient.*



## VERTIGO



**Dr. Patrick Waltereit**

Projektleiter / Project Manager

patrick.waltereit@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

Fraunhofer ISIT, Fraunhofer IISB, Fraunhofer-Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# FRAKTALE GaN-MODULE FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

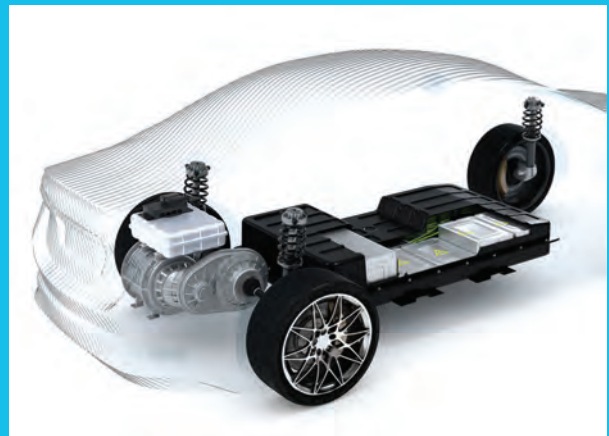
## Fractal GaN modules for electromobility

Die Smog-Belastungen in Ballungsräumen und die endlichen fossilen Energieressourcen führen zu einem Umdenken hin zur Elektromobilität. Bei der Elektrifizierung des Antriebs gilt die 48-V-Technologie als ein richtungweisender Kompromiss zwischen Effizienz, Volumen, Gewicht, Kosten und Sicherheit. Damit können bis zu 15 % Treibstoff und CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der konventionellen Technik eingespart werden. Dafür werden kompakte und effiziente Leistungshalbleitermodule benötigt, die in der Lage sind, Durchlasströme von mehreren Hundert Ampere zu schalten. Im Projekt GaNTraction werden neuartige fraktale Module auf Basis von Galliumnitrid (GaN) entwickelt. Durch ein neues Bauteilkonzept und einer fraktal dimensionierten Leitungsstruktur kann das Volumen künftiger Antriebsinverter um den Faktor 5 reduziert werden.

Smog pollution in urban areas and finite fossil energy reserves mean that electromobility is being rethought. When it comes to powertrain electrification, 48 V technology represents a trend-setting compromise between efficiency, volume, weight, cost and safety. This can save up to 15 % of fuel and of CO<sub>2</sub> emissions compared with conventional technology. What is needed are compact, efficient power semiconductor modules capable of switching currents of several hundred amperes. Project GaNTraction develops new fractal modules based on gallium nitride (GaN). A new device concept and a fractal approach to supply lines allow for highly compact traction inverters with volume reduction of a factor of 5 compared with existing systems.

„ Unsere fraktalen GaN-Antriebsinverter bringen die Elektromobilität voran.

*Our fractal GaN drive inverters promote electric mobility.*



## GaNTraction



**Dr. Richard Reiner**

Projektleiter / Project Manager

richard.reiner@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

in the context of the Vector foundation:

Esslingen University, University of Stuttgart,

Bundeswehr University Munich



MORE  
INFO



## TRL - LEVEL





# HOCHLEISTUNGS-STROMSENSOREN FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

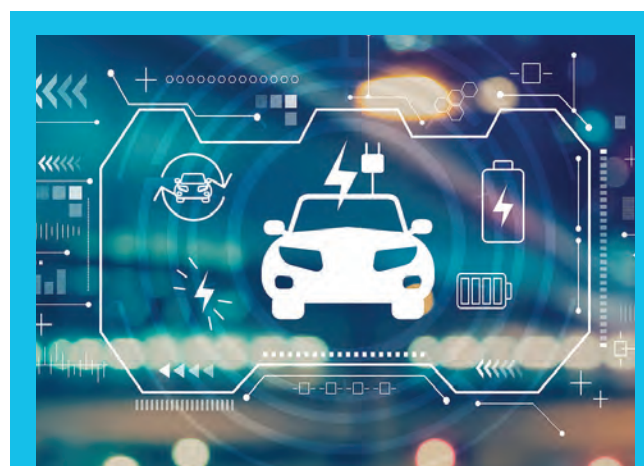
*High-performance current sensors for electromobility*

Stromsensoren sind heute in der Automobilelektronik allgegenwärtig. Sie sind sowohl für die Steuerung sicherheitsrelevanter Anwendungen als auch für die Energieumwandlung Schlüsselkomponenten. Insbesondere im Kontext der Elektromobilität und dem autonomen Fahren steigen die Anforderungen an Stromsensoren: Gefordert sind DC-Fähigkeit, schnelle Messzeiten, ein großer Messbereich und eine kompakte Bauweise. Um diese Anforderungen zu erfüllen, entwickelt das Projekt **mAgnes** einen neuartigen Sensor auf Basis von piezoelektrischem Aluminiumscandiumnitrid und Dünnschichten von magnetostruktivem Eisen-Cobalt-Silizium-Bor. Der miniaturisierte Sensor wird CMOS-kompatibel sein und eine sehr hohe Sensitivität bei geringem Energieverbrauch bieten.

Today, current sensors are ubiquitous in automotive electronics. They are a key component both for the control of safety features and for energy conversion. Particularly in the context of electromobility and autonomous driving, the demands on current sensors are increasing: DC capability, fast measurements, sensitivity across a broad range and a compact design. In order to meet these demands, project **mAgnes** is developing an innovative sensor that combines piezoelectric aluminum scandium nitride thin films and a magnetostrictive iron cobalt silicon boron alloy. The sensor will be CMOS compatible with a small form factor, low power consumption and very high sensitivity.

„ Unser mAgnes-Sensor wird mit seiner Schnelligkeit und Vielseitigkeit der Sensor der Wahl für zukünftige E-Mobility-Lösungen sein.

*The mAgnes sensor will be fast and highly versatile the sensor of choice for the future e-mobility solutions.*



## mAgnes



**Dr. Agnė Žukauskaitė**  
Projektleiter / Project Manager  
agne.zukauskaite@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partner  
Fraunhofer ISIT



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# KLIMAFREUNDLICHES HEIZEN UND KÜHLEN IM KFZ

*Climate-friendly heating and cooling for cars*

Um die Klimaziele zu erreichen, muss sich nicht nur unsere Art der Mobilität ändern. Auch unsere Fahrzeuge müssen klimafreundlicher werden. Die Klimaanlage, die uns im Auto im Sommer kühlt und im Winter wärmt, verbraucht nicht nur große Mengen Energie und Sprit, sondern arbeitet bisher auch mit schädlichem Kühlmittel. Ziel des Projektes **EIKaWe** ist die Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen – ohne Kältemittel und ohne Kompressor – basierend auf dem sogenannten »elektrokalarischen Effekt«. Elektrokalarische Materialien, z. B. Keramiken und Polymere, zeigen beim Ein- bzw. Ausschalten eines elektrischen Feldes eine Temperaturerhöhung bzw. -senkung, die zum Kühlen und Heizen genutzt werden kann. So entsteht ein System, das ohne aktives Pumpen oder Schalten von Ventilen auskommt und eine deutlich höhere Effizienz aufweist.

It is not only our mobility that will need to change in order to meet climate targets. Our vehicles must also become more climate-friendly. Air-conditioning systems, which cool us in summer and keep us warm in winter, not only consume a lot of energy and fuel, they also use harmful coolants. The aim of project **EIKaWe** is to develop highly efficient heat pumps – without refrigerants and without compressors – based on the so-called »electrocaloric effect«. Electrocaloric materials, e.g. ceramics and polymers, show an increase or decrease in temperature when an electric field is switched on or off, which can be used for cooling and heating. The result is a system that does not require active pumping or switching of valves and is significantly more efficient.

” Gut fürs Klima: eine neue Generation effizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel.

*Good for the climate: a new generation of efficient heat pumps without harmful coolants.*



## EIKaWe



**Dr. Patrick Waltereit**

Projektleiter / Project Manager

patrick.waltereit@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners  
Fraunhofer IPM, Fraunhofer IKTS,  
Fraunhofer IAP, Fraunhofer LBF,  
Fraunhofer FEP



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# 2030

**IN ZEHN JAHREN**

hat sich der Elektroantrieb durchgesetzt. Autonome Fahrzeuge sind in das 6G-Netz eingebunden und im urbanen Raum häufig auf den Straßen unterwegs.

**IN TEN YEARS**

the electric drive will have established itself. Autonomous vehicles are integrated into the 6G network and are frequently found on the road in urban areas.



# 2020

**HEUTE**

ist das Schlüsseljahr für die Elektromobilität. Bis Ende des Jahres fahren auf Deutschlands Straßen eine halbe Million Elektroautos. Gerade im urbanen Raum nutzen immer mehr Menschen Carsharing und ÖPNV.

**TODAY**

is the key year for electromobility. By the end of the year, half a million electric cars are expected to be on Germany's roads. More and more people are sharing cars and using public transport, especially in urban areas.





# THE WAY AHEAD

## Mobility



## 2026

### IN SECHS JAHREN

ist autonomes Fahren auf ausgewiesenen Strecken möglich. Davon profitiert zuerst der Güterverkehr mit LKWs, Schiffen und Zügen. Beim PKW ist die Batteriezellproduktion klimafreundlicher und nachhaltiger geworden.



### IN SIX YEARS

autonomous driving will be possible on designated routes. This will first of all benefit freight traffic (trucks, ships and trains). For passenger cars, battery cell production will have become more climate-friendly and sustainable.



## 2023

### IN DREI JAHREN

ist die Verkehrsinfrastruktur mit digitaler Technik (Sensorik, Kommunikation) für die intelligente Mobilität ausgerüstet. Damit sind eine teilautomatisierte Verkehrslenkung und eine vorausschauende Wartung möglich.

### IN THREE YEARS

transport infrastructure will be equipped with digital technology (sensor technology, communication) for intelligent mobility. This will enable partially automated traffic control and predictive maintenance.







# WIE SIEHT DIE KOMMUNIKATION VON MORGEN AUS?

*What will the communication of tomorrow look like?*

Schon heute sind in Deutschland 90 % der Menschen online. 80 % der digitalen Kommunikation sind Videos, Tendenz steigend. 2021 wird in Deutschland ein Datenverkehr von bis zu 172 Terabit pro Sekunde prognostiziert – pro Stunde wäre das die Datenmenge aller weltweit existierenden Kinofilme. 5G und 6G sollen diese Datenmengen bereitstellen. Auf dem Weg dorthin erforschen wir energieeffiziente Leistungselektronik für den Mobilfunk.

*Today, 90 % of people in Germany are already online. 80 % of digital communication is videos, and the trend is rising. By 2021, Germany is predicted to have data traffic of up to 172 terabits per second – which is equivalent to all movies currently in existence every hour. 5G and 6G are aiming to provide this data volume. On the way towards this goal, we are researching energy-efficient power electronics for mobile communications.*



# IM GESPRÄCH MIT NOKIA

## *In conversation with NOKIA*



Wolfgang Templ ist Abteilungsleiter »Radio Transceiver Devices« bei Nokia in Stuttgart und forscht an energieeffizienten Transceivern für die Mobilkommunikation. Schon zu Schulzeiten begeisterte er sich für die Kommunikation und bastelte kurzerhand ein Lichttelefon bis zum Haus seines besten Freundes. Im Interview spricht er mit Michael Mikulla, Geschäftsfeldleiter »Leistungselektronik« am Fraunhofer IAF, über revolutionäre Entwicklungen und Zukunftsvisionen rund um die Kommunikation.

*Wolfgang Templ is Group Manager »Radio Transceiver Devices« at Nokia in Stuttgart. He was a communications enthusiast while he was still at school, building a light telephone to connect with the house of his best friend. In this interview with Michael Mikulla, Head of the business unit »Power Electronics« at Fraunhofer IAF, he talks about revolutionary developments and visions for the future of communication.*

### WAS WAR FÜR SIE BISHER DIE GRÖSSTE ERRUNGENSCHAFT DER KOMMUNIKATION?

**Templ** — Ich glaube, es ist nicht übertrieben, zu behaupten, dass die Einführung des Internets, der Mobilkommunikation und zuletzt des Smartphones und die damit einhergehenden Netzwerktechnologien unsere gesamte Zivilisation und Kultur maßgeblich beeinflussen und verändern.

**Mikulla** — Unglaublich, wie schnell sich alles entwickelt hat. Wählscheiben kennt man heute ja nur noch aus Hitchcock-Filmen, aber in meiner Jugend war das Stand der Technik und es gab ein Monopol der Post fürs Telefonieren. Das hatte dann zur Folge, dass Telefonieren tagsüber teurer war als abends. Heutzutage unvorstellbar!

### WIE FINDEN SIE IN KOOPERATION MIT DEM FRAUNHOFER IAF EINEN »WAY AHEAD«?

**Templ** — Der mobile Datenverkehr wächst auf nicht absehbare Zeit immer noch exponentiell von Jahr zu Jahr.

### WHAT DO YOU THINK HAS BEEN THE GREATEST ACHIEVEMENT IN COMMUNICATIONS SO FAR?

**Templ** — I don't think it's an exaggeration to say that the introduction of the internet, mobile communications and more recently smartphones and the associated network technologies are having a major impact on our entire civilization and changing our culture.

**Mikulla** — It's unbelievable how quickly things have changed. Today we only see rotary dials in Hitchcock movies, but in my youth they were the state of the art and the post office had a monopoly on telephone services. As a result it was more expensive to make a telephone call during the day than in the evening. Absolutely inconceivable nowadays!

### WHAT KIND OF »WAY AHEAD« ARE YOU AND FRAUNHOFER IAF IDENTIFYING IN YOUR JOINT WORK?

**Templ** — Mobile data traffic will continue to increase exponentially from year to year for the foreseeable future.



Dr. Wolfgang Templ (links) und Dr. Michael Mikulla (rechts)  
*Dr. Wolfgang Templ (left) and Dr. Michael Mikulla (right)*

Zukünftige Sender und Empfänger müssen sehr hohe Datenraten bewältigen, sehr energieeffizient arbeiten und dies alles zu erschwinglichen Kosten. Zusammen mit dem IAF arbeiten wir an Bauelementen, die bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz die Übertragung extrem hoher Bitraten im Bereich von mehreren 100 Gbit/s auf Trägerfrequenzen bis in den THz-Bereich unterstützen.

**Mikulla** — Die Voraussetzungen, um am IAF technische Lösungen für 5G und später 6G zu entwickeln, sind wirklich hervorragend für Bauelemente, Transceiver usw. Wichtig ist es, in den nächsten Jahren mit den richtigen Kooperationspartnern die nächsten Schritte zu unternehmen, um Hardware zu entwickeln, die robust, flexibel und skalierbar ist. Wir zählen Nokia zu den Top-Adressen für solche Partnerschaften!

**Templ** — Ein echter Durchbruch für uns wäre sicherlich eine energieeffiziente Komponententechnologie, die ein kompaktes, kostengünstiges THz-Kommunikationssystem ermöglicht. Das würde nochmals einen deutlichen Anstieg der Datenraten bei nochmals höherer Flexibilität bedeuten.

Future transmitters and receivers will have to cope with very high data rates and work very energy-efficiently, and all this at an affordable cost. We are working with IAF on devices that support transmission of extremely high bit rates of several hundred Gbit/s on carrier frequencies up to the THz range, whilst simultaneously delivering high energy efficiency.

**Mikulla** — The conditions for developing technical solutions for 5G and later 6G at IAF are outstanding for components, transceivers, etc. Over the next few years it will be important to take the next steps with the right partners so that we can develop robust, flexible and scalable hardware. We believe Nokia is one of the top partners for this kind of work!

**Templ** — A real breakthrough would certainly be an energy-efficient device with technology that allowed for a compact, low-cost THz communications system. This would mean a further significant increase in data rates with even greater flexibility.



Dr. Wolfgang Templ, Abteilungsleiter bei Nokia.  
*Dr. Wolfgang Templ, Group Manager at Nokia.*

### WIE SIEHT WOHL UNSERE KOMMUNIKATION IN 20 JAHREN AUS?

**Templ** — Bei der Kommunikation zwischen Menschen könnte eine nahezu perfekte Immersion in die Umgebung des Kommunikationspartners erreicht werden. Schon heute ist hier mit Virtual Reality und Augmented Reality viel machbar. Durch die weitere Steigerung der Bildqualität, 360°-Vision oder 3D-Projektion und Holografie ist hier noch sehr viel zu erwarten.

**Mikulla** — Ich denke, dass sowohl die Online- als auch die Offlinekommunikation ihre Berechtigung behalten werden. Auf der einen Seite wird man mit Freunden und Familie, die sich irgendwo auf dem Globus befinden, in intensivem Kontakt sein wollen, aber andererseits ist ein gemeinsamer Spaziergang im Wald oder an der See natürlich nur sehr schwer durch einen technologischen Fortschritt zu ersetzen.

### WHAT DO YOU IMAGINE OUR COMMUNICATION WILL LOOK LIKE IN 20 YEARS?

**Templ** — As far as communications between people are concerned, I imagine that there will be almost perfect immersion in the environment of your interlocutor. Virtual Reality and Augmented Reality are already making much of this possible. With further improvements in image quality, 360° vision, 3D projection and holography, there are still a lot of developments ahead.

**Mikulla** — I think that both online and offline forms of communication will retain their legitimacy. On the one hand you'll want to be in close contact with friends and family all over the globe, but on the other hand it's of course very difficult to substitute technological progress for a walk in a forest or by the sea.

### WHAT WOULD BE YOUR VISION OF THE PERFECT COMMUNICATIONS OF THE FUTURE?

**Templ** — I imagine that being totally immersed in the immediate surroundings of the person I'm talking to will be great. You'll have the impression that they're physically present or that you're physically with them, for instance at a stadium event or a concert. To be realistic, though, this would also have to include smell, taste and the sense of touch. Ultimately, the individual could communicate with a counterpart – like in a realistic dream – or immerse themselves in a virtual world.

**Mikulla** — These are fascinating perspectives, which I think will largely become reality and will enrich people's experience of communications. We must not forget, however, that we are analogue beings with limited receptive capacities. The great task will therefore be to involve people in this process so that they don't feel left out.



## WAS WÄRE DENN IHRE VORSTELLUNG DER PERFEKTEN KOMMUNIKATION DER ZUKUNFT?

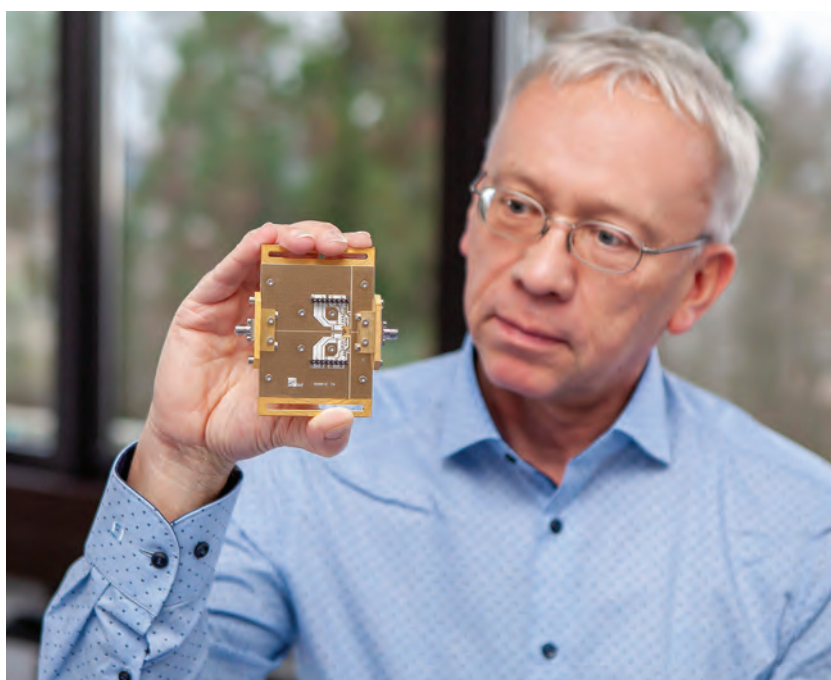
**Templ** — Die perfekte Immersion in die unmittelbare Umgebung des Gesprächspartners stelle ich mir toll vor. Dass man das Gefühl erhält, der Gesprächspartner wäre physisch anwesend oder man befände sich bei ihm, z. B. im Stadion oder beim Konzert. Hierzu würden für ein realistisches Erlebnis allerdings auch Geruch, Geschmack und Tastsinn gehören. Aber ultimativ könnte dann die jeweilige Person – ähnlich einem realistischen Traumerlebnis – mit einer Gegenstelle kommunizieren oder in eine virtuelle Welt eintauchen.

**Mikulla** — Das sind faszinierende Perspektiven, die bestimmt auch zum größten Teil verwirklicht und das Erleben der Menschen bereichern werden. Man darf aber nicht vergessen, dass wir analoge Wesen sind, die über begrenzte Aufnahmekapazitäten verfügen. Die große Aufgabe wird also sein, die Menschen auf diesem Weg einzubeziehen.

## AUF DEM WEG IN DIE ZUKUNFT – WAS WÜRDEN SIE DA SELBST GERN ERFINDEN?

**Templ** — Ich bin ja der Meinung, dass Waschmaschine und Geschirrspüler zwei der besten Erfindungen der Menschheit waren. Gemessen hieran gebe ich es bescheidener: Ich wäre bereits mit WARP-Antrieb oder dem Beamen zufrieden.

**Mikulla** — Ich wünsche mir Hilfsroboter für zuhause: Müll trennen, Fenster putzen, so etwas. Ob man dann wohl ein vernünftiges Gespräch mit ihnen führen kann und ob sie sich mit ihren Kollegen zusammenfinden, um beispielsweise auch ein Konzert zu besuchen?



Dr. Michael Mikulla, Geschäftsfeldleiter »Leistungselektronik« am IAF.

*Dr. Michael Mikulla, Head of business unit »Power Electronics« at IAF.*

## WHAT WOULD YOU LIKE TO INVENT ON OUR WAY INTO THE FUTURE?

**Templ** — I believe that washing machines and dishwashers were two of humanity's best inventions. Measured against this, I have more modest ambitions: I would be satisfied with WARP drive or teleportation.

**Mikulla** — I wish I had a robot to help me at home: separate garbage, clean windows, that sort of thing. I wonder if you could have a conversation with them and if they would get together with their colleagues, for example to go to a concert?



READ THE FULL  
INTERVIEW



# UNSERE PROJEKTE IM BEREICH KOMMUNIKATION

*Our projects in the field of communication*



## NESSiE

ABHÖRSICHERE QUANTENKOMMUNIKATION

*Secure quantum communication*



## ARIADNE

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ FÜR »BEYOND 5G«

*Artificial intelligence for »beyond 5G« networks*







## UltimateGaN

ENERGIESPARENDE CHIPS AUS  
GALLIUMNITRID

*Energy-saving chips made from gallium nitride*



## KONFEKT

KOMPONENTEN FÜR 6G

*Components for 6G*



## EIVE

E-BAND-SATELLITENKOMMUNIKATION  
MIT MULTI-GIGABIT-DATENRATEN

*E-band satellite communication with  
multi-gigabit data rates*



## ASTERIX

SATELLITENKOMMUNIKATION MIT  
HOHEM DATENDURCHSATZ

*High-throughput satellite communication*



## ThoR

NEUARTIGE THz-RICHTFUNKSTRECKE  
FÜR DATENRATEN BIS ZU 100 GBIT/S

*Innovative THz radio link with data rates of up to 100 Gbit/s*



## 5G GaN2

GALLIUMNITRID FÜR EIN LEISTUNGSSTARKES  
5G-MOBILFUNKNETZ

*Gallium nitride for a powerful 5G mobile network*



# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ FÜR »BEYOND 5G«

*Artificial intelligence for »beyond 5G« networks*

Ein flexibles und überall verfügbares Mobilfunknetz »beyond 5G« erfordert die Nutzung von höheren Frequenzbändern, die Einführung neuartiger Hardwaretechnologien und fortschrittlicher Materialien sowie das Überdenken traditioneller Designprinzipien und -architekturen. Im Projekt **ARIADNE** wird eine neuartige hybride drahtlose Systemarchitektur entwickelt, um extrem hohe Datenraten im Bereich von 100 Gbit/s nahezu latenzfrei zuverlässig und skalierbar zu übertragen. Das Projekt vereint Hochfrequenztechnologie (130 – 200 GHz) und ein drahtloses Systemkonzept auf Basis künstlicher Intelligenz zur Optimierung der Architektur, der Signal- und Datenverarbeitung sowie aller Funktionen zum Netzwerkmanagement.

Sustaining a flexible and universally available mobile communications network beyond 5G will necessitate the exploitation of higher frequency bands, the adoption of novel hardware technologies and advanced materials and the rethinking of traditional design principles and architectures. In this context, the **ARIADNE** project is developing an innovative hybrid wireless system, in order to achieve ultra-reliable and scalable connectivity for extremely high data rates (in the range of 100 Gbit/s) at almost zero latency. It brings together high frequency technology (130 – 200 GHz) and an artificial intelligence-based wireless system design to optimize architecture, signal, data processing and all network management functions.

” Unsere THz-Technologien setzen den Grundstein für sich selbst optimierende Richtfunknetze.

*Our THz technologies lay the foundations for self-optimizing radio networks.*



## ARIADNE



**Dr. Thomas Merkle**

Projektleiter / Project Manager  
thomas.merkle@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

EURESCOM, University of Piraeus Research Center, CNRS, Oulun Yliopisto, Intracom SA, Aalto Korkeakouluosaatio SR, National Center of Scientific Research »Demokritos«, Telefónica Investigación y Desarrollo SA, Nokia Solutions and Networks Oy, RapidMiner GmbH



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# KOMPONENTEN FÜR 6G

## Components for 6G

Die mobile und an allen Orten verfügbare Daten-Kommunikation ist mittlerweile eine unabdingbare Voraussetzung für digitalisierte Gesellschaften. Die 6. Generation der Mobilfunktechnologie, die ab 2030 erwartet wird, soll zusätzlich »Super high definition video« (8k), »Super immersive multimedia« (Hologramme) und »Super precise positioning« bieten. Dies bedingt große Übertragungsbandbreiten und damit höhere Trägerfrequenzen (70 – 90 GHz und sogar bis 150 GHz). Galliumnitrid ist als Material für diese Anwendungen ideal geeignet, da seine Ausgangsleistung, Bandbreite und Leistungseffizienz der Siliziumtechnologie überlegen ist. Im Rahmen des Projekts **KONFEKT** werden als zentrale Komponente von 6G Mehrantennensysteme und elektrisch schwenkbare Antennen entwickelt.

Mobile data communication, available everywhere, has become an indispensable prerequisite for digitized societies. The 6th generation of mobile communications technology, which is expected from 2030 onwards, will also offer »super high definition video« (8k), »super immersive multimedia« (holograms) and »super precise positioning«. This requires large transmission bandwidths and thus higher carrier frequencies (70 – 90 GHz and even up to 150 GHz). Gallium nitride is ideally suited to these applications because of its superior output power, bandwidth and efficiency compared with silicon technology. Project **KONFEKT** is developing multiantenna systems and phased array antennas as central components of 6G.

” Neue Hardware für das Mobilfunknetz von übermorgen!  
*New hardware for the mobile network of the future!*



## KONFEKT



**Dr. Dirk Schwantuschke**

Projektleiter / Project Manager  
dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partner  
Fraunhofer HHI



MORE  
INFO



### TRL - LEVEL



# NEUARTIGE THz-RICHTFUNKSTRECKE FÜR DATENRATEN BIS ZU 100 Gbit/s

*Innovative THz radio link with data rates of up to 100 Gbit/s*

Unser Datenhunger ist unaufhaltsam. Schon heute werden für die nahe Zukunft Datenraten von mehreren Terabytes pro Sekunde und pro Quadratkilometer prognostiziert. Um Nutzern diese hohen Datenverkehrsdichten zu ermöglichen, benötigen die Netzanbieter viele kleine Mobilfunkzellen, die mit dem sog. »Backhaul« an das Kernnetz angebunden werden. Nicht immer geht das per Glasfaser, und bisher erreichen die für 5G geplanten drahtlosen Backhails nur bis zu 10 Gbit/s. Das Projekt **ThoR** realisiert daher erstmals ein superheterodynes Systemkonzept bei THz-Frequenzen. Dies ermöglicht enorm hohe Echtzeit-Übertragungsraten von bis zu 100 Gbit/s. Dabei kommen InGaAs-basierte Leistungsverstärker und Frontends bei 300 GHz zum Einsatz, kombiniert mit hochmodernen digitalen Signalverarbeitungseinheiten im E-Band (60 – 90 GHz).

Our hunger for data is unstoppable. Even today, data rates of several terabytes per second and per square kilometer are predicted for the near future. In order to provide such high data density, an increased number of small cells is needed, which are connected to the core network via the so-called backhaul. This connection is not always possible via fiber optics and the wireless backhaul solutions planned for 5G only achieve up to 10 Gbit/s. Project **ThoR** is developing the first superheterodyne architecture for wireless communications at THz frequencies, in order to demonstrate high-speed real-time data transmission at data rates of up to 100 Gbit/s. To achieve these objectives, we are using 300 GHz InGaAs mHEMT power amplifiers and frontends in combination with state-of-the-art E-band modems (60 – 90 GHz).

” High-Speed-Technologie für die drahtlose Übertragung ultrahoher Datenraten!

*High-speed technology for wireless transmission of ultra-high data rates!*



## ThoR



**Laurencz John**

Projektleiter / *Project Manager*  
laurencz.john@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / *Project Partners*

TU Braunschweig, Deutsche Telekom AG,  
NEC Corporation, Siklu Communications Ltd.,  
Vivid Components Ltd., HRCP, University of Lille / IEMN  
Laboratory, Chiba Institute of Technology, Gifu University,  
University of Stuttgart, Waseda University



MORE  
INFO



TRL - LEVEL





# GALLIUMNITRID FÜR EIN LEISTUNGS- STARKES 5G-MOBILFUNKNETZ

*Gallium nitride for a powerful 5G mobile network*

Sowohl unzählige Sensoren mit niedriger Datenrate im »Internet der Dinge« als auch einzelne Endgeräte mit hohen Datenraten, wie sie beispielsweise beim Streamen von Videos genutzt werden, profitieren von einem 5G-Netzwerk. Um die hohen Datenraten, die dafür benötigt werden, zuverlässig bereitstellen zu können, will man sich in Zukunft auch Frequenzbänder im Millimeterwellen-Bereich (> 24 GHz) zu Nutze machen, die eine 10-mal höhere Bandbreite bieten als bisher. Ziel des Projekts **5G GaN2** ist es, die verfügbare Ausgangsleistung und die Energieeffizienz der Netzinfrastruktur durch den Einsatz fortschrittlicher Galliumnitrid-Technologie und angepasster Aufbautechnik zu erhöhen. Hierfür werden Demonstratoren bei 28, 38 und 80 GHz entwickelt und bewertet.

Countless sensors with low data rates in the »Internet of Things« as well as individual end devices with high data rates, such as those used for video streaming, benefit from a 5G network. In order to be able to reliably provide the high data rates required, millimeter-wave frequency bands (> 24 GHz) will increasingly be used in the future, because they offer a bandwidth that is 10 times higher than current technology. The aim of project **5G GaN2** is to increase the output power and energy efficiency available to network infrastructure through the use of gallium nitride technology and corresponding packaging technology. Demonstrators at 28, 38 and 80 GHz will be developed and evaluated within the project for this purpose.

” Meine Vision: maximale Datenrate bei minimalem Energieeinsatz.

*My vision: maximum data rate with minimum energy consumption.*



## 5G GaN2



**Dr. Dirk Schwantuschke**

Projektleiter / Project Manager

[dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de](mailto:dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de)

Projektpartner / Project Partners

United Monolithic Semiconductors GmbH, CEA-Leti, III-V Lab, Thales, Ericsson, XFAB, Sencio, University of Erlangen, SweGaN AB, MEC, University of Padova, Funcoats, University College Dublin, Benetel, TU Bratislava, TESAT-Spacecom GmbH & Co. KG



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# SATELLITENKOMMUNIKATION MIT HOHEM DATENDURCHSATZ

## High-throughput satellite communication

Die Satellitenkommunikation spielt eine Schlüsselrolle in der Datenversorgung an schwer zugänglichen Orten, wie zum Beispiel in Flugzeugen und auf Schiffen, sowie in der Erfassung von Erdbeobachtungsdaten. Auch hier geht der Trend zu hochauflösenden Daten. Dies bedingt zwingend mehr Bandbreite und daher die Nutzung von höheren Frequenzbändern zwischen 18 und 27 GHz. Als Leistungsverstärker für eine schnelle Datenübertragung in diesem Bereich wurden bisher Wanderfeldröhrenverstärker eingesetzt. Als Alternative dazu bieten Halbleiterverstärker («solid-state power amplifiers», SSPAs) eine niedrigere Versorgungsspannung, eine reduzierte Komplexität der benötigten Stromversorgungskomponenten und einen weniger aufwändigen mechanischen Aufbau. Im Projekt **ASTERIX** werden SSPAs bei 20 GHz und 26 GHz entwickelt und bewertet.

Satellite communication plays a key role in supplying data in places that are difficult to access, such as airplanes or ships, as well as in the acquisition of Earth observation data. Here, too, the trend is towards higher volumes of data. This necessarily requires more bandwidth and therefore the use of higher frequency bands between 18 and 27 GHz. Up to now, this area has achieved fast data transmission by using travelling-wave tube amplifiers as power amplifiers. Solid-state power amplifiers (SSPAs) are an alternative offering lower supply voltage, reduced complexity of power supply components and a simpler mechanical design. Project **ASTERIX** will develop and evaluate SSPAs at 20 GHz and 26 GHz.

” Satellitenkommunikation ermöglicht die Vernetzung aller Menschen zu einer wirklich globalen Gemeinschaft.

*Satellite communication enables the connection of all human beings in order to create a truly global community.*



## ASTERIX



**Christian Friesicke**

Projektleiter / Project Manager  
christian.friesicke@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners  
Airbus Defence and Space, KHH Consulting,  
TU Hamburg-Harburg, Fraunhofer IMWS,  
TESAT-Spacecom GmbH & Co. KG, UMS GmbH



MORE  
INFO



### TRL - LEVEL



# E-BAND-SATELLITENKOMMUNIKATION MIT MULTI-GIGABIT-DATENRATEN

## *E-band satellite communication with multi-gigabit data rates*

Um neue Frequenzbereiche für die Satellitenkommunikation zu erschließen und damit den stetig wachsenden Bedarf an Datenraten bedienen zu können, soll im Projekt **EIVE** die weltweit erste In-Orbit-Kommunikationsstrecke im E-Band (60 – 90 GHz) demonstriert werden. Dabei kommen zwei besonders leistungsfähige Sende- und Empfangstechnologien des Fraunhofer IAF zum Einsatz: Leistungsverstärker auf Basis von Galliumnitrid sowie rauscharme mHEMT-Empfangsverstärker. Der Nachweis der Machbarkeit eines Daten-Downlinks mit Multi-Gigabit-Datenraten wird durch den Start eines Nanosatelliten mit sechs CubeSat-Einheiten erbracht. Außerdem wird die Übertragungsqualität verschiedener Modulationsformate und variabler Datenraten in Abhängigkeit der Wetterbedingungen untersucht.

In order to open up new frequency ranges for broadband satellite communication and to ensure that the constantly growing demand for data rates can be met, the **EIVE** project will demonstrate the world's first in-orbit communication link in the E-band (60 – 90 GHz). Two particularly powerful transmitter and receiver technologies from Fraunhofer IAF will be employed: gallium nitride based solid state power amplifiers and low-noise mHEMT receiving amplifiers. Proof of the feasibility of a data downlink with multi-gigabit data rates will be provided by the launch of a nanosatellite with six CubeSat units. We will also investigate the transmission quality of a range of modulation formats and variable data rates in different weather conditions.

” **EIVE** – ein wesentlicher Schritt zur Realisierung von global verfügbarem Breitbandinternet.

*EIVE – an essential step towards the realization of globally available broadband internet.*



## EIVE



**Dr. Axel Tessmann**

Projektleiter / *Project Manager*

axel.tessmann@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / *Project Partners*

University of Stuttgart, RPG Radiometer Physics GmbH,

TESAT-Spacecom GmbH & Co. KG



MORE  
INFO



## TRL - LEVEL





# ENERGIESPARENDE CHIPS AUS GALLIUMNITRID

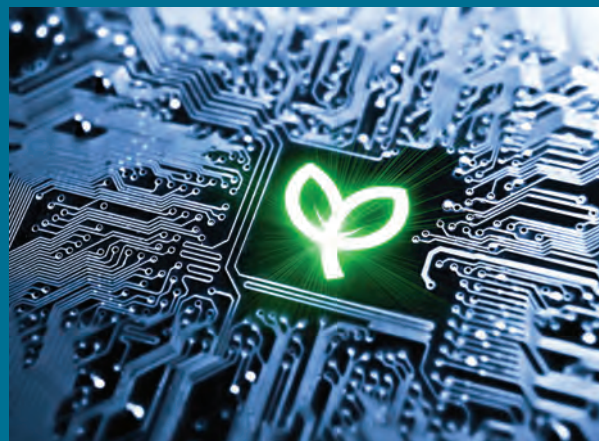
*Energy-saving chips made from gallium nitride*

Der weltweite Energiebedarf steigt durch die zunehmende Digitalisierung unseres täglichen Lebens. Neben kostengünstigen elektronischen Komponenten und Systemen wird auch ihre Energieeffizienz immer wichtiger, um Big-Data-Anwendungen und drahtlose Gigabit-Kommunikation (z. B. 5G-Mobilfunk) nachhaltig mit Strom zu versorgen. Im Projekt **UltimateGaN** wird eine neue Generation energiesparender Galliumnitrid-basierter Hochfrequenz- und Leistungselektronik auf kostengünstigem 200-mm-Silizium-Substrat entwickelt. Als Beispiel dient ein Leistungsverstärker bei 28 GHz für die 5G-Mobilfunkkommunikation. Neben einer Reduzierung des Platzbedarfs soll sich die Verlustleistung im Vergleich zu bisherigen Systemen halbieren, bei doppelt so hoher Leistungsdichte wie die derzeit genutzte Silizium-Technologie sie bietet – und bei gleichem Preis.

The increasing digitalization of our daily lives means that the worldwide demand for energy is growing. In addition to low-cost electronic components and systems, energy efficiency is also becoming increasingly important in order to ensure a sustainable electricity supply for Big Data applications and wireless gigabit communication (e.g. 5G). Project **UltimateGaN** is developing a new generation of Gallium nitride based energy-saving high-frequency and power electronics on cost-effective 200 mm silicon substrate. One example is a power amplifier at 28 GHz for 5G mobile communications. In addition to reducing the form factor, this will halve power losses compared with previous systems, with twice the power density as the silicon technology currently in use, and at the same cost.

” Wir bieten die Effizienz von Galliumnitrid zum Preis von Silizium!

*We offer the efficiency of gallium nitride at the price of silicon!*



## UltimateGaN



**Dr. Dirk Schwantuschke**

Projektleiter / Project Manager

[dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de](mailto:dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de)

Projektpartner / Project Partners

Infineon Technologies AG, IMEC, AT&S AG, Fronius International GmbH, CTR AG, TU Graz, Fraunhofer IMWS, Siltronic AG, NaMLab gGmbH, Aixtron SE, TU Chemnitz, University of Padova, University of Milan, Eltek AS, TU Bratislava, NanoDesign SRO, EPFL, Attolight SA, IKERLAN, For Optimal Renewable Energy Systems SL, LEAR, RISE, SweGaN AB



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# ABHÖRSICHERE QUANTEN-KOMMUNIKATION

## Secure quantum communication

Die rasante Entwicklung bei Quantencomputern gefährdet die traditionelle Verschlüsselung in der Kommunikation mit öffentlichen und privaten Schlüsseln. Durch den Einsatz verschränkter Photonen kann auf physikalische Weise eine abhörsichere Kommunikation realisiert werden. Erzeugt werden können verschränkte Photonen beispielsweise mittels nichtlinearer Wellenleiter. Das Projekt **NESSiE** nutzt dafür periodisch gepoltes Lithiumniobat sowie Aluminiumgalliumarsenid. Ein großer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Wellenleiter die Integration mit anderen optischen und elektronischen Komponenten auf Chipebene ermöglichen. Daraus ergibt sich eine reduzierte Größe und ein geringeres Gewicht der Komponenten, was am Ende eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung praktischer Anwendungen ist.

Due to the rapid development of quantum computers, traditional encryption of communication using public and private keys is at risk. The use of entangled photons can physically ensure that eavesdropping is impossible. Entangled photons can be generated using non-linear waveguides. Project **NESSiE** is using periodically polarized lithium niobate and aluminum gallium arsenide to develop such waveguides. A particular advantage of this approach is that waveguides enable integration with other optical and electronic components at the chip level, thus reducing the size and weight of components, which is ultimately an essential prerequisite for practical applications.

” Wir machen die Quantenkommunikation praktisch nutzbar.  
*We turn quantum communication into a practical reality.*



## NESSiE



**Dr. Thorsten Passow**

Projektleiter / Project Manager  
thorsten.passow@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners  
Fraunhofer CAP, Fraunhofer ILT



MORE  
INFO



## TRL - LEVEL



# 2026

**IN SECHS JAHREN**

werden erste mobile Sende- und Empfangsmodule für 6G erprobt. Frequenzen bis zu 300 GHz kommen dabei zum Einsatz.

**IN SIX YEARS**

the first mobile transmitter and receiver modules for 6G will be tested, using frequencies up to 300 GHz.



# 2023

**IN DREI JAHREN**

funktioniert 5G in Deutschland flächendeckend im Millimeterwellen-Bereich.

**IN THREE YEARS**

5G will be operating in the millimeter-wave range throughout Germany.



# THE WAY AHEAD

## Communication



# 2030

### IN ZEHN JAHREN

funktioniert 6G. Damit verfügen Mobilfunknutzer über die 100-fache Datenrate im Vergleich zu 2020. Weitere Vorteile sind kürzere Verzögerungszeiten sowie die Integration von künstlicher Intelligenz (KI).

### IN TEN YEARS

6G will be working. This will give mobile phone users 100 times the data rate compared to 2020, with other advantages including shorter delay times and the integration of artificial intelligence (AI).

# 2021

### IN EINEM JAHR

gibt es das Applikationslabor »Kommunikation«: Innerhalb des Projekts KONFEKT (s. S. 53) entsteht unter Beteiligung des Fraunhofer IAF ein Applikationslabor am Fraunhofer HHI in Berlin. Dort werden Komponenten für die 6G-Kommunikation aufgebaut und getestet.

### IN ONE YEAR

a »Communications« application laboratory will come into existence: This will be set up within project KONFEKT (see p. 53) at Fraunhofer HHI in Berlin in collaboration with Fraunhofer IAF. Components for 6G communication will be developed and tested there.









## WIE SIEHT DIE MEDIZIN VON MORGEN AUS?

*What will tomorrow's medical technology look like?*

»Gesundheit ist nicht alles, aber ohne Gesundheit ist alles nichts.«

– Arthur Schopenhauer

Innovative Technologien bieten uns neue Möglichkeiten, die personalisierte Medizin voranzutreiben. Auf dem Weg in eine Zukunft der frühen, sicheren und unkomplizierten Diagnostik erforschen wir Quantensensoren zur Unterstützung der Magnetresonanztomographie sowie Quantenkaskadenlaser für die Atemgasanalyse.

*»Health is not everything, but without health everything is nothing.« – Arthur Schopenhauer*

*Innovative technologies offer us new opportunities to advance personalized medicine. Paving the way for a future of early, safe and straightforward diagnostics, we are researching quantum sensors to support magnetic resonance imaging and quantum cascade lasers for respiratory gas analysis.*



# IM GESPRÄCH MIT DER ZAHNMEDIZINERIN

## *In conversation with the dentist*



Katja Nelson ist Leiterin der Translationalen Implantologie am Universitätsklinikum Freiburg. Sie ist begeistert von der Mischung aus Forschung, Lehre und klinischer Arbeit und engagiert sich seit Jahren für eine strahlenfreie Bildgebung in der Zahnmedizin. Im Interview spricht sie mit Jan Jeske, Gruppenleiter »Quantenmagnetometrie« am Fraunhofer IAF, darüber, wie die Quantentechnologie die Zukunft der Zahnmedizin prägen könnte.

*Katja Nelson is Head of Translational Implantology at the University of Freiburg Medical Center. She is passionate about combining research, teaching and clinical work and has been conducting research on radiation-free imaging in dentistry for many years. In this interview with Jan Jeske, Group Manager »Quantum Magnetometry« at Fraunhofer IAF, she talks about how quantum technology could shape the future of dentistry.*

**PROF. NELSON, HABEN SIE IN IHRER ZEIT ALS ZAHNMEDIZINERIN BEREITS EINE ART REVOLUTION ERLEBT?**

**Nelson** — Absolut! Das war die Einführung der DVT – der digitalen Volumentomographie. Diese Technologie ermöglicht es dem Zahnarzt, bildgebende Diagnostik in 3D in seiner Praxis durchzuführen, ohne zum Radiologen zu überweisen.

**WIE HAT SICH DIE DIAGNOSTIK SEITDEM ENTWICKELT?**

**Nelson** — Das Röntgen gehört immer noch zu den Haupttechnologien, was aufgrund der Strahlenbelastung für die Patienten nicht ideal ist. Da setze ich große Hoffnungen auf die Magnetresonanztomographie, da sie strahlenfrei funktioniert und seit ein paar Jahren sowohl Weichteil- als auch Hartgewebe darstellen kann. Deshalb ist es für uns sehr interessant, was das Fraunhofer IAF im Bereich der Quantenmagnetometrie für das MRT erforscht.

**PROF. NELSON, HAVE YOU ALREADY EXPERIENCED A KIND OF REVOLUTION IN YOUR TIME AS A DENTIST?**

**Nelson** — Absolutely! That was the introduction of DVT – digital volume tomography. This technology allows dentists to perform 3D imaging diagnostics in their practice without having to refer to the radiologist every time.

**HOW HAS DIAGNOSTICS DEVELOPED SINCE THEN?**

**Nelson** — X-rays are still one of the main technologies, which is not ideal for patients due to the radiation involved. I see magnetic resonance imaging as a very promising technology because it works without radiation and has been capable of imaging both soft and hard tissue for a couple of years now. So Fraunhofer IAF's research into quantum magnetometry for MRI is very interesting to us.



Prof. Dr. Katja Nelson und Prof. Dr. Dr. Rainer Schmelzeisen mit Kollegen am Universitätsklinikum Freiburg.

*Prof. Dr. Katja Nelson, Prof. Dr. Dr. Rainer Schmelzeisen and her colleagues of the University of Freiburg Medical Center.*

**Jeske** — Wir arbeiten daran, Quantensensoren zu entwickeln, die das MRT ergänzen und verbessern könnten. Gerade in der Magnetometrie haben sie das Potenzial, einerseits mit höherer Präzision und andererseits mit sehr hoher räumlicher Auflösung zu messen. Denkbar sind auch ganz neue Technologien, bei denen andere, spezifischere Atomkerne als Wassermoleküle vermessen werden.

**Jeske** — We are working on the development of quantum sensors that could complement and improve MRI. In magnetometry in particular, they have the potential to deliver more precise measurements on the one hand and very high spatial resolution on the other. It is also conceivable that completely new technologies could be used to measure other specific atomic nuclei than water molecules.

#### **WIE KÖNNTE DAS FRAUNHOFER IAF EINEN »WAY AHEAD« IN DER ZAHNMEDIZIN EBENEN?**

#### **HOW COULD FRAUNHOFER IAF PAVE THE »WAY AHEAD« FOR DENTISTRY?**

**Nelson** — Ich wünsche mir eine strahlenfreie Bildgebung mit hoher Auflösung. Die Anatomie und pathologischen Vorgänge sind im zahnmedizinischen Bereich zum Teil so klein, dass selbst das CT damit überfordert ist. Eine hohe Ortsauflösung und Empfindlichkeit eröffnet zudem die Möglichkeit, nach anderen Molekülen zu suchen. Das wäre eine massive Indikationserweiterung. Und wir brauchen eine Technologie, die für den täglichen Einsatz geeignet ist. Das bedeutet, dass sie ohne eine aufwendige Heliumkühlung auskommt und einfach in die Zahnarztpraxis gestellt werden kann.

**Nelson** — First of all, I would like to have radiation-free imaging with high resolution. The anatomy and the pathological processes involved with dentistry are in some cases so small that even CT is unable to cope with them. High spatial resolution and sensitivity also make it possible to search for other molecules. This would be a massive extension of indication in diagnostics. And as the next step, we need a technology that is suitable for daily use. This means that it does not require expensive helium cooling and is easy to incorporate in dental practices.



Prof. Dr. Katja Nelson träumt von strahlungsfreier, personalisierter und teilautomatisierter Zahnmedizin.  
*Prof. Dr. Katja Nelson dreams of radiation-free, personalized and partially automated dentistry.*

**Jeske** — Magnetfeldmessungen mittels NV-Zentren in Diamant wären hier ideal, da sie bei Raumtemperatur funktionieren – also ohne Heliumkühlung. Unser Laserswellen-Magnetometer (LSM) könnte als präziserer Messsensor dienen, um schwächere Magnetfelder zu messen und damit schwächere Signale aufzulösen. Eine andere Strategie wäre auch noch die Entwicklung eines Diamant-Polarisators, der mit einem Biomolekül als Kontrastmittel funktioniert. Dies wird derzeit im Projekt MetaboliQs erforscht (S. 71).

**Jeske** — Magnetic field measurements using diamond NV centers would be ideal here because they function at room temperature – i.e. without helium cooling. Our laser threshold magnetometer (LTM) could serve as a more precise sensor to measure weaker magnetic fields and thus resolve weaker signals. Another strategy would be to develop an innovative diamond polarizer to combine it with a biomolecule as a contrast agent. This is currently being investigated by the MetaboliQs project (p. 71).

#### WHAT OTHER POSSIBILITIES DO QUANTUM SENSORS OFFER?

**Jeske** — I hope that we can further improve and exploit the benefits of quantum sensors – i.e. their very high resolution, precision and operation at room temperature. This could for example enable more precise hand-held magnetic field sensors to detect the exact position of nerves. Measuring the stronger magnetic field signals instead of the electrical signals as we do with EEG and ECG would improve the characterization of brain and heart activities. And more precise technologies such as LTM it could become possible to replace claustrophobic MRI tubes with open devices and even offer MRI scans to people with metal implants or pacemakers.

#### WHAT IS YOUR PERSONAL WISH FOR THE FUTURE?

**Nelson** — My dream is to see the introduction of MRI for dentistry. I feel like an ambassador and have been fighting to reach this goal for many years. At the University of Freiburg Medical Center we have already published many articles on how to use MRI in dentistry. The Fraunhofer institutes



READ THE FULL  
INTERVIEW





## WELCHE MÖGLICHKEITEN BIETEN QUANTENSSENSOREN NOCH?

**Jeske** — Ich hoffe, dass wir die Vorteile der Quantensensoren – also sehr hohe Auflösung und Präzision im Betrieb bei Raumtemperatur – weiter verbessern und in Anwendungen nutzbar machen können. So könnten präzisere handgeführte Magnetfeldsensoren beispielsweise die genaue Position von Nerven aufspüren. Indem man die deutlicheren Magnetfeldsignale statt der elektrischen Signale wie bei EEG und EKG nutzt, könnten die Hirn- und Herzaktivitäten exakt vermessen werden. Außerdem könnte es dank präziseren Technologien wie dem LSM möglich werden, die klaustrophobischen Röhren durch offene Geräte zu ersetzen und selbst Menschen mit Metall-Implantaten oder Herzschrittmachern MRT-Scans anzubieten.

## WAS IST IHR PERSÖNLICHES ZIEL FÜR DIE ZUKUNFT?

**Nelson** — Ich träume davon, die Einführung des Dental-MRT zu erleben. Ich fühle mich als Botschafterin und kämpfe seit vielen Jahren dafür. Wir von der Uniklinik haben bereits viele Veröffentlichungen dazu gemacht, wie man das MRT in der Zahnmedizin nutzen kann. In den Fraunhofer-Instituten herrscht ebenfalls ein sehr großes Know-how. Wenn die Forschung es schafft, die unterschiedlichen Disziplinen und Verbündete aus allen Sparten zu vereinen, werde ich es tatsächlich noch erleben, wie ein Dental-MRT es auf den Markt schafft. Das wäre ein Highlight in meiner Berufskarriere.

**Jeske** — Das wäre wirklich ein Durchbruch! Mein aktuell wichtigstes Ziel ist die Umsetzung meines Konzepts eines Lasersystems, das NV-Zentren in Diamant als Lasermedium nutzt, und der Einsatz dieses Lasersignals für präzisere Messungen. Langfristig träume ich davon, dann an der Umsetzung all der Anwendungen beteiligt zu sein, die ein solcher Laser bietet (S. 70).



Dr. Jan Jeske forscht am weltweit ersten Laserschwellen-Magnetometer.  
*Dr. Jan Jeske researches the first laser threshold magnetometer.*

also have a very high level of expertise. If research succeeds in uniting the various disciplines and colleagues from all sectors, I will actually see a dental MRI reach the market. That would be a highlight in my professional career.

**Jeske** — That would be a real breakthrough! My most important goal currently is to develop a laser system that uses diamond NV centers as a medium and to use this signal to deliver more precise measurements. In the long run, I dream of being part of all the applications this kind of laser can deliver (p.70).

# UNSERE PROJEKTE IM BEREICH MEDIZINTECHNIK

*Our projects in the field of medical technology*





## DiLaMag

PRÄZISION BEI DER  
MEDIZINISCHEN DIAGNOSTIK

*Precision in medical diagnostics*



## MetaboliQs

FRÜHERKENNUNG VON HERZ-KREISLAUF-ERKRANKUNGEN

*Improved diagnostics for cardiovascular diseases*



## DiaPol

VERBESSERTE KREBSDIAGNOSTIK

*Improved cancer diagnostics*



## ISLAS

KRANKHEITEN »RIECHEN«

*»Smelling« diseases*



# PRÄZISION BEI DER MEDIZINISCHEN DIAGNOSTIK

## Precision in medical diagnostics

Für die Medizin sind Magnetfeldmessungen von großer Bedeutung, da Magnetfelder den Körper unverzerrt und ohne Abschwächung durchdringen und somit präzisere Signale liefern als die Messung elektrischer Signale. Derzeit genutzte Magnetfeldsensoren erreichen die höchste Auflösung allerdings nur mithilfe von aufwändiger und teurer Tieftemperaturkühlung. Ziel des Projekts DiLaMag ist es, Diamant mit einer hohen Dichte an Stickstoff-Vakanz-Zentren zum ersten Mal in einem Lasersystem einzusetzen, um damit hochpräzise Magnetfelder bei Raumtemperatur zu messen. Diese sogenannte »Laserschwellen-Magnetometrie« ist ein weltweit neuer Forschungsansatz. Das zu entwickelnde System soll stärkere Signale und einen höheren Kontrast erzielen, was zu wesentlich präziseren Messergebnissen führt.

Magnetic field measurements are of great importance for medical diagnostics, because magnetic fields penetrate the body undistorted and without attenuation and thus provide more precise signals than are achieved by the measurement of electrical signals. However, magnetic field sensors currently in use can only achieve the highest levels of resolution with the help of complex and expensive low-temperature cooling. The aim of project DiLaMag is to use diamond with a high density of nitrogen vacancy centers for the first time in a laser system in order to measure high-precision magnetic fields at room temperature. This so-called »laser threshold magnetometry« is a research approach that is globally unique. The system to be developed will achieve stronger signals and a higher contrast, which leads to much more precise measurement results.

” Meine Vision: mit einem innovativen Sensorkonzept der Medizin neue Türen öffnen.

*My vision is to open new doors for medicine thanks to an innovative sensor concept.*



## DiLaMag



**Dr. Jan Jeske**

Projektleiter / Project Manager  
jan.jeske@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partner  
SIGMA Medizin-Technik GmbH



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# SCHNELLERE FRÜHERKENNUNG VON HERZ-KREISLAUF-ERKRANKUNGEN

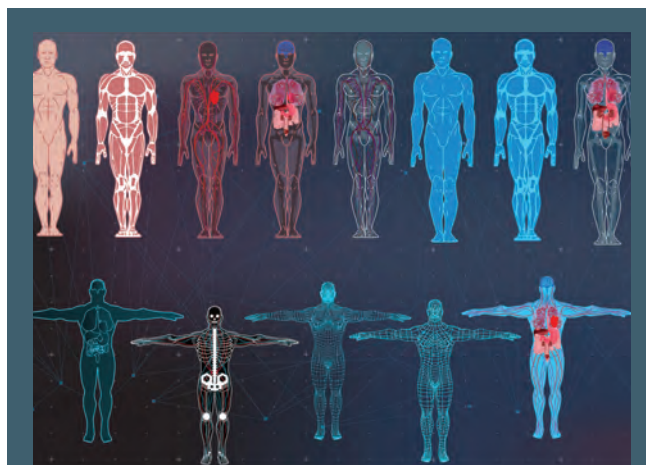
*Improved diagnostics for cardiovascular diseases*

Kardiovaskuläre Krankheiten sind die häufigste Todesursache weltweit. Zur Verbesserung der Früherkennung muss der Stoffwechselprozess des Herzgewebes auf einem molekularen Level verstanden und beobachtet werden. Mit bisherigen Methoden wie der Magnetresonanztomographie (MRT) ist dies nicht in hoher Auflösung möglich; außerdem werden oft zusätzlich radioaktive Stoffe als Kontrastmittel eingesetzt. Im Projekt **MetaboliQs** wird ein neuartiger Diamant-Polarisator entwickelt, der zusammen mit einem Biomolekül als Kontrastmittel funktioniert. Ziel ist, bei Raumtemperatur eine 160-fach höhere Effizienz sowie eine 40-fach schnellere und 4-fach billigere Polarisation zu erreichen – und das ganz ohne schädliche Stoffe.

Cardiovascular diseases are one of the most common causes of death worldwide. In order to do improve early diagnosis, the metabolic process of heart tissue needs to be understood and observed on a molecular level. Existing methods such as MRI do not allow this in high resolution. Furthermore, radioactive substances are often used as contrast agents. Project **MetaboliQs** develops a novel diamond polarizer that works together with a biomolecule as a contrast agent. The goal is to achieve a 160-fold increase in efficiency, a 40-fold increase in speed and polarization that is 4 times as cheap as before – at room temperature and completely avoiding any harmful substances.

” Wir forschen für eine schnellere und effizientere Diagnostik bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

*We conduct research for faster and more efficient diagnostics for cardiovascular diseases.*



## MetaboliQs



**Dr. Christoph Nebel**

Projektleiter / Project Manager  
christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners  
NVision Imaging Technologies GmbH, TU Munich,  
Swiss Federal Institute of Technology,  
Bruker BioSpin GmbH, Element Six Ltd.,  
The Hebrew University of Jerusalem



MORE  
INFO



### TRL - LEVEL



# KRANKHEITEN »RIECHEN«

## »Smelling« diseases

Die Atemgasanalyse hat in den letzten Jahren in der Medizintechnik stark an Bedeutung gewonnen. Atemgastests ermöglichen die nicht-invasive Detektion gasförmiger Biomarker für Krankheiten wie Diabetes, verschiedene Krebsarten und Stoffwechselerkrankungen. Im Projekt ISLAS schließen sich Fraunhofer IPM und Fraunhofer IAF zusammen, um ein Messsystem zu entwickeln, mit dem erstmals eine große Anzahl von Biomarkern mit extrem hoher Empfindlichkeit und kurzen Messzeiten detektiert werden kann. Dafür kommt ein innovatives photothermisches Messkonzept des IPM zum Einsatz. Das Fraunhofer IAF bringt seine abstimmbaren Quantenkaskadenlaser ein, mit Hilfe derer die Biomarker wie bei einem Fingerabdruck zweifelsfrei zu identifizieren sind.

In recent years, breath gas analysis has become increasingly important in medical technology. Breath gas tests enable the non-invasive detection of gaseous biomarkers for diseases such as diabetes, various types of cancer and metabolic diseases. In project ISLAS, Fraunhofer IPM and Fraunhofer IAF are joining forces to develop a measurement system that is the first to detect a large number of biomarkers with extremely high sensitivity and short measurement times. An innovative photothermal measurement concept from Fraunhofer IPM will be used for this purpose. Fraunhofer IAF is contributing its tunable quantum cascade lasers, which enable definitive identification of biomarkers through fingerprint spectroscopy.

” Eine schnelle und einfache Art, Krankheiten direkt im Atem zu erkennen.

*A fast and easy way to detect diseases directly in the breath.*



## ISLAS



**Dr. Stefan Hugger**

Projektleiter / Project Manager  
stefan.hugger@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partner  
Fraunhofer IPM



MORE  
INFO



TRL - LEVEL





# VERBESSERTE KREBSDIAGNOSTIK

## *Improved cancer diagnostics*

Krebserkrankungen gehören weltweit zu den häufigsten Todesursachen. Zur Diagnose und Therapiebewertung ist die Magnetresonanztomographie (MRT) besonders schonend für den Patienten, da sie zum Teil ohne für den Menschen schädliche Chemikalien oder radioaktive Substanzen auskommt. Im Projekt **DiaPol** werden neue Entwicklungen der Quantenphysik genutzt, um die Funktionalität der MRT-Methode signifikant zu erweitern. Dabei soll ein diamantbasierter Polarisator genutzt werden, um die Kernspins der Markermoleküle auszurichten und so die Empfindlichkeit der Messung drastisch zu erhöhen. Damit soll es möglich werden, Krebs nicht nur frühzeitig zu erkennen, sondern auch das Stadium der Krebszellen zu diagnostizieren.

Cancer is one of the most common causes of death worldwide. From the patient's point of view, magnetic resonance imaging (MRI) is an especially gentle way of diagnosing patients and evaluating treatment, as it does not always require chemicals or radioactive substances that are harmful to humans. Project **DiaPol** uses new developments in quantum physics to significantly extend the functionality of MRI. A diamond-based polarizer will be used to align the nuclear spins of the marker molecules and thus drastically increase the sensitivity of the measurement. This will make it possible not only to detect cancer at an early stage, but also to diagnose the stage the cancer cells are at.

” Ich möchte das große Potenzial der Quantentechnologie für die Menschen erschließen.

*I want to tap the great potential of quantum technology for the benefit of all people.*



## DiaPol



**Dr. Christian Giese**

Projektleiter / Project Manager  
christian.giese@iaf.fraunhofer.de

Projektpartner / Project Partners

NVision Imaging Technologies GmbH, University of Ulm,  
The Hebrew University of Jerusalem, ICDAT Ltd.



MORE  
INFO



TRL - LEVEL



# 2023

## IN DREI JAHREN

werden Quantensensoren, die mit einzelnen Spins von Elektronen arbeiten und klassische Sensoren in Auflösung und Robustheit übertreffen, im Labor demonstriert.

## IN THREE YEARS

quantum sensors that work with single electron spins and outperform traditional sensors with regard to resolution and robustness will have been demonstrated in the laboratory.



MORE  
INFO



# 2020

## HEUTE

werden am IAF schon Quantensensoren für medizinische Applikationen erforscht. Um die Ergebnisse schnell in die Anwendung zu bringen, entsteht am IAF ein Applikationslabor »Quantensensorik«, in dem Industriekunden ihre spezifischen Fragestellungen mit Hilfe verschiedener Quantenmagnetometer untersuchen können.

## TODAY

quantum sensors for medical applications are already being researched at IAF. In order to translate the results into applications quickly, IAF is setting up an application laboratory on quantum sensors, where industrial customers can investigate specific issues with the aid of a range of quantum magnetometers.



# THE WAY AHEAD

## Medical technology



# 2026

### IN SECHS JAHREN

sind erste kommerzielle integrierte Quantensensoren auf dem Markt. Im Labor wird an der zweiten Generation der Sensoren mit verschränkten Spins gearbeitet, die noch einmal eine höhere Auflösung bieten.

### IN SIX YEARS

the first commercially integrated quantum sensors will be on the market. The second generation of sensors with entangled spins is being developed in the laboratory, and these will provide even higher resolution.

# 2030

### IN ZEHN JAHREN

sind Quantensensoren im Markt angekommen und ersetzen herkömmliche Sensoren in High-Performance-Anwendungen. In der Medizintechnik werden Quantensensoren nun in der Praxis erprobt.

### IN TEN YEARS

quantum sensors will have arrived on the market and will be replacing conventional sensors in high performance applications. In medical technology, quantum sensors will now be being tested in practice.



# ANHANG

*Appendix*





- |    |   |     |   |
|----|---|-----|---|
| 78 | <b>HÖHEPUNKTE 2019</b><br><i>Highlights from 2019</i>   | 93  | <b>WEITERE KOOPERATIONSPARTNER</b><br><i>Other research partners</i>            |
| 84 | <b>PATENTE</b><br><i>Patents</i>  | 94  | <b>WELTWEIT VERNETZT</b><br><i>A global network</i>                             |
| 86 | <b>AUSBILDUNG UND LEHRE</b><br><i>Education and teaching</i>                                      | 96  | <b>ORGANIGRAMM</b><br><i>Organigram</i>   |
| 87 | <b>FAKTEN UND ZAHLEN</b><br><i>Facts and figures</i>  | 99  | <b>FÜR BEWERBER</b><br><i>Jobs@IAF</i>  |
| 88 | <b>ABSCHLUSSARBEITEN</b><br><i>Theses</i>   | 100 | <b>MESSEN &amp; VERANSTALTUNGEN 2020</b><br><i>Fairs &amp; conferences 2020</i> |
| 92 | <b>FORSCHUNGSFABRIK MIKRO-<br/>ELEKTRONIK DEUTSCHLAND</b><br><i>Research Fab Microelectronics</i> | 102 | <b>IMPRESSUM</b><br><i>Publication details</i>                                  |



# HÖHEPUNKTE 2019

## Highlights from 2019



4. Juni 2019

Die Quantenforschung hat in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte erreicht. Zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie luden die Fraunhofer-Institute IAF, IPM und IWM am 4. Juni zum Industrieworkshop »Quantentechnologie« ein. Über 70 Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft nahmen teil und tauschten Erkenntnisse, Vorhaben und Ideen zu den Themen Quantensensorik, Quantenimaging und Quantencomputing aus.

Sowohl große Unternehmen, wie Bosch, IBM und Endress+Hauser, als auch mehrere internationale Start-ups zeigten Interesse am Dialog mit der Wissenschaft zu den Zukunftsthemen. Durch den intensiven Austausch wurde nicht nur klar, dass erste quantentechnologische Systeme sich bereits ihren Weg in die Industriebahnen – die Teilnehmer waren sich einig, dass die Kooperation zwischen der Forschung und Industrie unerlässlich ist, um weltweit wettbewerbsfähig zu bleiben und Technologien schneller in marktfähige Produkte zu überführen.



June 4, 2019

Quantum research has made considerable progress in recent years. To strengthen collaboration between research and industry, the Fraunhofer institutes IAF, IPM and IWM invited organized a »Quantum Technology« workshop for industry on June 4. More than 70 representatives from science and industry took part in the event and shared knowledge, projects and ideas in relation to quantum sensors, quantum imaging and quantum computing.

Along with large companies such as Bosch, IBM and Endress+Hauser, several international start-ups showed great interest in a dialogue with science on the topics of the future. The intensive discussions did more than make clear that the first quantum technology systems are already making their way into industry – participants agreed that collaboration between research and industry is essential in order to remain globally competitive and to transfer technologies more quickly into marketable products.





19. – 20. März 2019

Mit einem umfassenden Vortragsprogramm und einer Rekordzahl von mehr als 100 internationalen Teilnehmern bot sich Experten aus Wissenschaft und Industrie eine Plattform zur Diskussion neuester Erkenntnisse für die Entwicklung hochleistungsfähiger Infrarot-Sensoren, -Detektoren und -Laser für Sicherheit, Raumfahrt sowie industrielle Prozesse.



March 19–20, 2019

With an extensive program of scientific talks and a record number of more than 100 international participants, experts from science and industry provided a platform to discuss the latest findings in relation to the development of high-performance infrared sensors, detectors and lasers for security, aerospace and industrial processes.



23. – 27. September 2019

Die erste Herbsttagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft befasste sich mit Quantum Science und Informationstechnologie im Schnittfeld von Grundlagenforschung und Anwendungsorientierung. In Vorträgen und Postern präsentierte das IAF seine Forschung zu NV-Zentren in Diamant für die Quantensensorik. Institutsleiter Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher diskutierte beim »Public Science Evening« über die Entwicklung neuartiger Quantenmagnetometer.

September 23–27, 2019

The first autumn conference of the German Physical Society dealt with the interface of basic research and application orientation in relation to quantum science and information technology. In lectures and posters, Fraunhofer IAF presented its research on NV centers in diamond for quantum sensors. Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher, Director of Fraunhofer IAF, discussed the development of novel quantum magnetometers at the Public Science Evening.



## 70 JAHRE FRAUNHOFER 70 YEARS OF FRAUNHOFER

28. September 2019

Lasershow, Escape Game und Science on Stage: So feierten die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute zusammen mit rund 5.000 Besuchern den 70. Geburtstag der Fraunhofer-Gesellschaft auf dem Platz der Weißen Rose an der Universität Freiburg. Das Fraunhofer IAF zeigte Diamantforschung zum Anfassen: Mit einer Diamantscheibe konnten Besucher einen Eiswürfel durchschneiden und so die hervorragende Wärmeleitfähigkeit von Diamant selbst erleben. Wie Licht auf uns wirkt, zeigte das LED-Exponat des Fraunhofer IAF anhand verschiedener Beleuchtungsoptionen für Gemüse im Supermarkt.

Das Bühnenprogramm bot Vorträge zu aktuellen Forschungshighlights, Interviews und Live-Musik. Aus dem Fraunhofer IAF erklärte Dr. Rüdiger Quay, wie es mit einer fortschrittlichen Leistungselektronik gelingt, Daten schneller und gleichzeitig energieeffizienter zu übertragen. Dr. Jan Jeske gab einen Einblick in die Quantensensorik und Dr. Marcel Rattunde stellte Quantenkaskadenlaser für die Spektroskopie vor. Arte-Moderatorin Anja Waltereit führte durch das Programm und erhielt Unterstützung vom Namenspatron der Fraunhofer-Gesellschaft: Joseph von Fraunhofer, dargestellt von Schauspieler Rainer G. Mannich, gab Anekdoten aus seinem Leben zum Besten. Der Tag endete mit einer spektakulären Laser-show nach Einbruch der Dunkelheit.



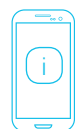
September 28, 2019

A laser show, an escape game and science on stage: the five Freiburg Fraunhofer Institutes celebrated the 70th anniversary of the Fraunhofer-Gesellschaft together with around 5,000 visitors. Fraunhofer IAF presented hands-on diamond research: Visitors could cut an ice cube using a diamond disc and experience the outstanding thermal conductivity of diamond for themselves. IAF's LED exhibit demonstrated how light affects us by showcasing various lighting options for vegetables in supermarkets.

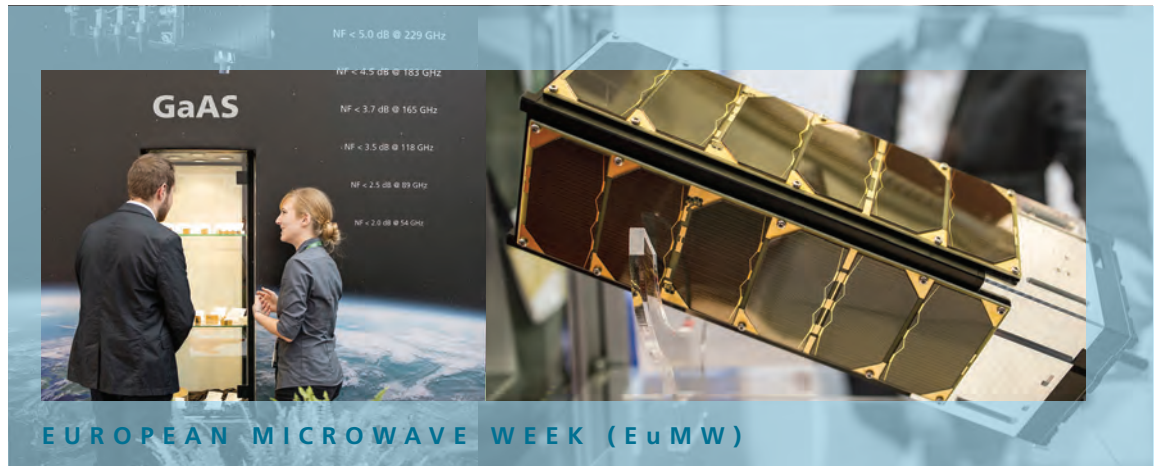
The stage program included current research highlights, interviews and live music. From Fraunhofer IAF, Dr. Rüdiger Quay explained how advanced power electronics can be used to transmit data faster and more efficiently. Dr. Jan Jeske provided an introduction to quantum sensors and Dr. Marcel Rattunde talked about quantum cascade lasers for spectroscopy. Arte presenter Anja Waltereit hosted the program and received support from the patron saint of the Fraunhofer-Gesellschaft: Joseph von Fraunhofer, played by actor Rainer G. Mannich, who recounted anecdotes from his life. The day ended with a spectacular after-dark laser show.



MORE  
INFO







29. September – 4. Oktober 2019

Neben Vorträgen auf der Fachkonferenz präsentierte das Fraunhofer IAF auf der [EuMW](#) in Paris integrierte Schaltungen für Frequenzen bis 670 GHz sowie Terahertz-Technologien, die für ultraschnelle Datenübertragung (5G / 6G), zur hochgenauen Entfernungsmessung und zur Klima- und Erdbeobachtung aus dem All eingesetzt werden können.

September 29 – October 4, 2019

At EuMW in Paris, Fraunhofer IAF showcased integrated circuits for frequencies up to 670 GHz and terahertz technologies as well as giving scientific talks. These technologies can be used for ultra-fast data transmission (5G / 6G), high-precision distance measurement and for observing the earth and its climate from space.



12. – 13. September 2019

Der [Innovation Day](#) zum Fokusthema »Microwave und Terahertz« bot Impulsvorträge sowie Round-Table-Gespräche zu 5G, Sensorik für autonomes Fahren und Industrie 4.0. Auf der begleitenden Ausstellung zeigte das Fraunhofer IAF THz-Funkmodule von 270 – 330 GHz mit hohen Datenraten bis 400 Gbit/s sowie weitere Hochfrequenz-Technologien am Beispiel eines 4"-GaAs-Wafers, Hochfrequenz-ICs und eines heterointegrierten W-Band-Sendemoduls.

September 12 – 13, 2019

The Innovation Day on »Microwave and Terahertz« offered introductory lectures and discussions on 5G, sensors for autonomous driving and industry 4.0. At the accompanying exhibition, Fraunhofer IAF presented THz radio modules from 270 – 330 GHz with high data rates up to 400 Gbit/s as well as other high-frequency technologies, using a 4" GaAs wafer, high-frequency ICs and a heterointegrated W-band transmit module as examples.





1. – 5. April 2019

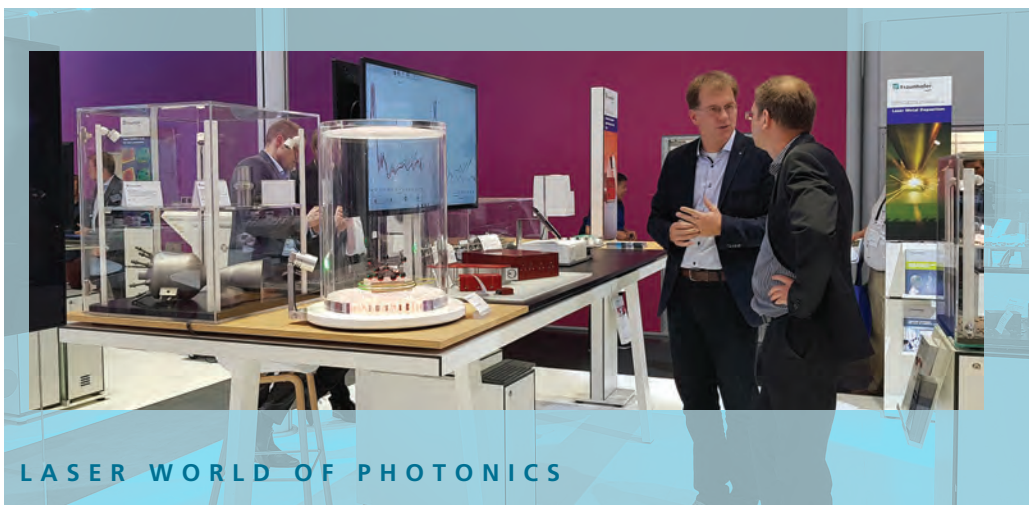
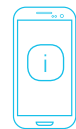
Die Hannover Messe 2019 präsentierte sich im Look des Fraunhofer-Jubiläumjahres. Im Sinne von #whatsnext zeigte das Fraunhofer IAF die Zukunft der Radarsensoren: kompakte und hochauflösende W-Band-Radare zur zerstörungsfreien und berührungslosen Prüfung verpackter Güter auf Inhalt und Vollständigkeit.

April 1–5, 2019

Hannover Fair 2019 styled itself around the Fraunhofer anniversary year. In the spirit of #whatsnext, Fraunhofer IAF demonstrated the future of radar sensors: compact and high-resolution W-band radars for non-destructive and remote inspection of the content and completeness of packaged goods.



WATCH VIDEO



24. – 27. Juni 2019

Forscher des Fraunhofer IAF stellten in München ihr neues **Messsystem** vor, das die kontaktlose Identifizierung verschiedenster chemischer und pharmazeutischer Substanzen in Echtzeit ermöglicht und sich ideal für den Einsatz in der Pharma-, Chemie- und Lebensmittelindustrie eignet. Das System basiert auf der Rückstreuungsspektroskopie mit schnell abstimmbaren Quantenkaskadenlasern.

June 24–27, 2019

In Munich, researchers from Fraunhofer IAF presented their new **measurement system**, which enables the contactless identification of a wide range of chemical and pharmaceutical substances in real time and is ideally suited for use in the pharmaceutical, chemical and food industries. The system is based on backscattering spectroscopy and uses fast tunable quantum cascade lasers.



27. Juni 2019

2019 haben wir drei langjährige Kuratoriumsmitglieder verabschiedet. Dr. Hans Brugger (HENSOLDT Sensors GmbH; links) unterstützte das IAF 18 Jahre lang mit seiner Expertise, 9 davon als Vorsitzender. Nach 20 bzw. 9 Jahren verabschiedeten sich auch Prof. Werner Wiesbeck (KIT; rechts) und Dr. Rainer Kroth (Diehl Defence GmbH & Co. KG; Mitte) mit guten Wünschen für die Zukunft des Fraunhofer IAF. Wir bedanken uns für Ihren Einsatz über all die Jahre!

June 27, 2019

In 2019, we bid goodbye to three long-standing members of our Advisory Board. Dr. Hans Brugger (HENSOLDT Sensors GmbH; left) supported IAF for 18 years with his expertise, 9 of them as chairman. After 20 and 9 years respectively, Prof. Werner Wiesbeck (KIT; right) and Dr. Rainer Kroth (Diehl Defence GmbH & Co. KG; center) said farewell with good wishes for the future of Fraunhofer IAF. Thank you for your commitment over all these years!



2019 wurde das IAF mit dem Fraunhofer FamilienLogo ausgezeichnet. Es prämiiert Institute, die sich besonders für die Vereinbarkeit von Beruf und Privatleben einsetzen. Julian Mayer (rechts, Mitte) schloss als einer der besten seine Ausbildung zum Fachinformatiker am IAF ab und erhielt dafür eine Ehrung der Fraunhofer-Gesellschaft.



In 2019, Fraunhofer IAF was awarded the Fraunhofer family logo. It honors institutes that are particularly committed to promoting work-life balance. Julian Mayer (right, center) completed his IT specialist training at IAF and received an award from the Fraunhofer-Gesellschaft for being one of best trainees.



# PATENTE

## Patents



»Mein Team war das erste, das über die erfolgreiche Abscheidung von Aluminiumscandiumnitrid per metallorganischer chemischer Gasphasenabscheidung berichtet hat. Damit verfolgen wir unsere Vision, Leistungselektronik der nächsten Generation auf Basis von AlScN industriell herstellbar zu machen. Es ist ein echter Durchbruch für uns und wir sind wirklich stolz!«

*»My team is the first to report successful growth of aluminum scandium nitride by metal-organic chemical vapor deposition. We are pursuing our vision of making next-generation power electronics based on AlScN producible on an industrial scale. It is a real breakthrough for us and we are very proud.«*



READ THE FULL  
INTERVIEW

Dr. Stefano Leone, Gruppenleiter »Nitride«

*Dr. Stefano Leone, Group Manager »Nitrides«*



## PATENTERTEILUNGEN

### Granted patents

#### F. Fuchs, R. Rehm, M. Walther

Halbleiterbauelement mit einer Passivierungsschicht und Verfahren zu seiner Herstellung  
1771879; 02.01.2019; Europa (EP) 50 2005 015 976.4; 02.01.2019; Deutschland (DE) 1771879; 02.01.2019; Frankreich (FR) 1771879; 02.01.2019; Schweden (SE)

#### S. Maroldt

Verstärkerschaltung  
10 2013 223 898 B4; 31.01.2019; Deutschland (DE)

#### V. Cimalla, T. Gerrer, M. Preschle,

#### T. Yoshikawa

Verfahren zum Transfer zumindest einer Dünnschicht  
10,242,915 B2; 26.03.2019; USA (US)

#### C. Goßler, P. Ruther, U. Schwarz

Method for Producing a Micro-Led Matrix, Micro-Led Matrix and use of a Micro-Led Matrix  
10,276,631 B2; 30.04.2019; USA (US)

#### F. Benkhelifa

Semiconductor Device  
US 10,283,630 B2; 07.05.2019; USA (US)

#### K. Köhler, S. Müller, P. Waltereit

Verfahren zur Bestimmung der Struktur eines Transistors  
2471089 B1; 19.06.2019; Frankreich (FR) 2471089 B1; 19.06.2019; Großbritannien (GB)

#### F. Raay

Matrix Power Amplifier  
10/355,652; 16.07.2019; USA (US)

#### M. Knapp

Acoustic-Wave-Resonator und elektronische Filterschaltung  
10 2018 207 825 B3; 24.10.2019; Deutschland (DE)

## PATENTANMELDUNGEN

### Patent applications

#### M. Knapp

Acoustic Wave Resonator and Electronic Filter Circuit  
16/398,843, 30.04.2019; USA (US)

#### V. Züribig, C. Nebel

Method for Producing Homo-epitaxial Diamond Layers  
1907069.7; 20.05.2019; Großbritannien (GB) 16/426,093; 30.05.2019; USA (US)



#### S. Leone, C. Manz,

H. Menner, J. Wiegert, J. Ligl  
Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Schicht, damit versehenes Substrat und dessen Verwendung  
10 2019 212 821.1; 27.08.2019; Deutschland (DE)

#### S. Roscher

Method and Apparatus for the Expansion of Graphite  
16/569,264; 12.09.2019; USA (US)

#### V. Lebedev

Electroacoustic Resonator and Method for Manufacturing the Same  
16/655,304; 17.10.2019; USA (US)

#### F. Raay

Power Multiplying N\*M (2D) Matrix Amplifier Expansion of Graphite  
16/657,357; 18.10.2019; USA (US)

#### M. Cwiklinski

Integrierter Schaltkreis  
10 2019 216 400.5; 24.10.2019; Deutschland (DE)

# AUSBILDUNG UND LEHRE

## Education and teaching

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

### Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

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

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

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

»RF and Microwave Circuits and Systems«,  
»RF and Microwave Devices and Circuits«,  
»RF and Microwave Systems – Design Course«,  
»Bauelemente und Schaltungen der Leistungselektronik«  
*Dr. Rüdiger Quay*

»Solid State and Semiconductor Physics«  
*Dr. Christoph Nebel*

### Karlsruher Institut für Technologie

»Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie«  
*Dr. Martin Walther*

### Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Leistungselektronik«  
*Michael Basler*



»Die Experimente sind jedes Mal ein Highlight. Wir blicken zu den Studierenden und merken gleich, ob das Interesse da ist und die Spannung steigt. Und dann ist da das Überraschungsmoment, wenn plötzlich etwas passiert, das man anders erwartet.«

»The experiments are always a highlight. We watch the students and can immediately see if they are interested and if the tension is rising. And then there is the element of surprise when suddenly something happens that you didn't expect.«



Dr. Josef Rosenzweig und Dr. Klaus Köhler erwecken Physik zum Leben.  
*Dr. Josef Rosenzweig and Dr. Klaus Köhler bring physics to life.*

READ THE FULL INTERVIEW

# FAKTEN UND ZAHLEN

## *Facts and figures*

### GASTWISSENSCHAFTLER

#### *Guest scientists*

2019 durften wir am Fraunhofer IAF fünf Gäste begrüßen.

*In 2019, we welcomed five guests to Fraunhofer IAF.*

- » Prof. Norio Tokuda, Kanazawa University, Ishikawa
- » Prof. Thomas Volz, Macquarie University, Sydney
- » Sarath Raman Nair, Macquarie University, Sydney
- » Marco Capelli, RMIT University, Melbourne
- » Prof. Jörg Thietke, DHBW Lörrach

5

22

### FACHGREMIEN

#### *Committees*

Das Fraunhofer IAF ist in 22 Fachgremien vertreten, von Mitgliedschaften in Lenkungs- und Programmausschüssen, Facharbeitsgruppen und Kuratorien bis hin zu Gast- und Mitherausgeberschaften von Fachzeitschriften.

*Fraunhofer IAF scientists sit on 22 expert committees, ranging from steering and program committees to technical working groups and advisory boards to guest and associate editorships of scientific journals.*

### PUBLIKATIONEN

#### *Publications*

2019 wurden am Fraunhofer IAF 110 Publikationen wie Dissertationen, Open-Access-Artikel sowie wissenschaftliche Aufsätze und Konferenzbeiträge als Erst- oder Mitautor veröffentlicht.

*Scientists of Fraunhofer IAF authored and co-authored 110 publications in 2019, including dissertations and open access publications as well as journal and conference papers.*

<http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/index.htm>

110



# ABSCHLUSSARBEITEN

## Theses



»Ich erforsche in meiner Dissertation Aluminiumscandiumnitrid und seine piezoelektrischen Eigenschaften für den Einsatz in Hochfrequenzfiltern moderner Handys. AlScN ist der »way ahead« für zukünftige Breitbandfilter, wie sie bei 5G gebraucht werden!«

*»In my dissertation I am researching aluminium scandium nitride and its piezoelectric properties for use in high frequency filters for cutting-edge mobile phones. AlScN is the »way ahead« for future broadband filters such as those required for 5G!«*



[READ THE FULL INTERVIEW](#)

Nicolas Kurz hat 2019 seine Promotion mit Auszeichnung abgeschlossen.

[Nicolas Kurz completed his dissertation with distinction in 2019.](#)

## PROMOTIONEN DOCTORAL THESES

### **Thomas Gerrer**

Transfer von AlGaIn/GaN-Hochleistungs-  
transistoren auf Diamant

[Universität Freiburg](#)

### **Marius Knapp**

Graphene – from Synthesis to the Application  
as a Virtually Massless Electrode Material for  
Bulk Acoustic Wave Resonators

[Universität Freiburg](#)



### **Nicolas Kurz**

Untersuchung der elektroakustischen  
und pyroelektrischen Eigenschaften von  
Aluminium-Scandium-Nitrid für mikro-  
akustische Hochfrequenzfilter

[Universität Freiburg](#)

### **Yuan Lu**

Development and characterization of  
piezoelectric AlScN-based thin films for  
electroacoustic applications

[Universität Freiburg](#)

### **Christian Manz**

Darstellung und Simulation von AlN/GaN-  
Übergitterstrukturen für elektronische  
Bauelemente

[Universität Freiburg](#)

### **Johannes Schmidt**

Antimonidische Übergitter Infrarot-Photo-  
dioden mit reduziertem Dunkelstrom

[Universität Freiburg](#)

### **Lars Ansgar Watschke**

AlGaIn-basierte Avalanche-Photodioden  
für den UV-C-Spectralbereich

[Universität Freiburg](#)

### **Andreas Wörl**

Analyse der Rauschmechanismen von  
Photodetektoren aus InAs/GaSb-Übergittern  
für den infraroten Spektralbereich

[Universität Freiburg](#)

## MASTERARBEITEN MASTER THESES

### **Nikesh Bansal**

Investigation of the use of MOSHEMT based amplifiers in direct receivers for radiometry applications

[Universität Freiburg](#)

### **Benjamin Baumann**

Investigation of components for millimeter-wave system-in-packages in D-band based on ceramic materials

[Universität Duisburg](#)

### **Navaneeth Bedsurkar**

Influence of Substrate Potential on Switching Characteristics of a High-Voltage GaN-on-Si Power Device

[Universität Freiburg](#)

### **Alexander Beeren**

Entwurf und Charakterisierung eines monolithisch integrierten Point-of-Load-Wandlers in lateraler GaN-on-Si-Technologie

[Hochschule Reutlingen](#)

### **Selina Eckel**

System Performance of Resistive Mixers as Part of an Integrated D-Band Single Antenna Radar Transceiver

[Karlsruher Institut für Technologie](#)

### **Christine Girgius**

Development and optimization of a concept for vehicles underbody surveillance with radar sensor in the field of highly automated parking

[Universität Freiburg](#)

### **Christian Hoyer**

Breitbandige differenzielle Verstärker in GaN-HEMT-Technologie für 5G-Mobilfunkanwendungen

[Karlsruher Institut für Technologie](#)

### **Daniel von Kutzleben**

Comparison of SiC MOSFETs and GaN HEMTs for a Partial Load Optimized DC/DC Converter for Solar Battery Storage Systems

[Universität Freiburg](#)

### **Ankita Manocha**

Investigation of Efficient Broadband Directional Couplers for Multi-Band High-Power Operation

[Universität Freiburg](#)

### **Shreya Maolanker**

Investigations of artificial intelligence schemes for generalized control testing

[Universität Freiburg](#)

### **Dang Thanh Tung Nguyen**

High-Power, load modulation-capable GaN Amplifier for 5G Applications at 1.8 – 2.2 GHz

[Universität Freiburg](#)

### **Mark André Schepperle**

Dunkelstrom planar prozessierter InGaAs-Photodioden

[Universität Freiburg](#)

### **Fabian Stiller**

Entwicklung und Verwendung eines Radarsensors zur Objekterkennung

[Universität Freiburg](#)

### **Mohamed Fadi Yassine**

Investigation of building blocks for vertical GaN Devices

[Universität Freiburg](#)

## BACHELORARBEITEN BACHELOR THESES

### **Hendrik Kaltenbach**

Entwicklung einer frei konfigurierbaren und modularen Switch-Matrix für einen Leistungsmessplatz

[DHBW Lörrach](#)

### **Lucas Tetzl**

Entwicklung und Aufbau von Teilkomponenten für ein Handheld-Radar zur Materialanalyse

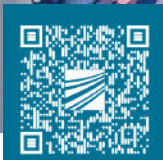
[DHBW Lörrach](#)



»Schon als Kind habe ich mit meinem Vater Lampen gebaut. Jetzt schreibe ich meine Masterarbeit am Fraunhofer IAF und programmiere einen Mikrokontroller, der On-Chip-Signalverarbeitung ermöglicht. Das ebnet den Weg für ein Echtzeit-Radarsystem.«

*»When I was a child I was already building lamps with my dad. Now I'm writing my Master's thesis at Fraunhofer IAF, programming a microcontroller to enable on-chip signal processing. This will pave the way for a real-time radar system.«*

READ THE FULL  
INTERVIEW



Sara Alzalabny schreibt derzeit ihre Masterarbeit am Fraunhofer IAF.

*Sara Alzalabny is currently writing her Master's thesis at Fraunhofer IAF.*

# FORSCHUNGSFABRIK MIKROELEKTRONIK DEUTSCHLAND

*Research Fab Microelectronics Germany*

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

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

## WAS GESCHAH 2019 AM FRAUNHOFER IAF IM ZUSAMMENHANG MIT DER FMD?

- Zwei neue Anlagen wurden in Betrieb genommen: eine Multiwafer-Molekularstrahlepitaxie-Anlage (MBE) sowie ein Sekundärionen-Massenspektrometer (SIMS). Für die letzte erwartete Anlage zur Elektronenstrahlolithographie wurden umfangreiche Vorarbeiten durchgeführt.
- Das Projekt FMD Digital zur Vernetzung der »Manufacturing Execution«-Systeme (MES) schreitet voran. Die Server wurden installiert und können nun zusammen mit den anderen Instituten getestet werden.
- In der Optoelektronik wird das Ziel eines gemeinsamen LiDAR-Systems verfolgt. Das Fraunhofer IAF trägt dazu InGaAs-basierte Infrarotdetektoren bei.

## WHAT HAPPENED AT IAF IN 2019 IN CONJUNCTION WITH FMD?

- *Two new machines were put into operation: A multiwafer molecular beam epitaxy system (MBE) and a secondary ion mass spectrometer (SIMS). Extensive preparatory work was carried out for one final machine: an electron beam lithography (e-beam) system.*
- *The »FMD Digital« project to establish a joint Manufacturing Execution System (MES) has made progress. The servers have been installed and can now be tested together with the other institutes.*
- *In optoelectronics, the goal of a joint LiDAR system is being pursued. Fraunhofer IAF contributes InGaAs-based infrared detectors.*



MORE  
INFO



# WEITERE KOOPERATIONSPARTNER

*Other research partners*

## INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME

*Department of Sustainable Systems Engineering*

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

*In the context of the professorship of our Director at INATECH we conduct research into sustainable mobile communication.*



## LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT

*Sustainability Center*

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

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



## FRAUNHOFER-INSTITUTE

*Fraunhofer Institutes*

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

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





## Goddard

### NASA Goddard Space Flight Center

Für die NASA entwickeln wir ultra-breitbandige rauscharme Verstärkerschaltungen bei 600 GHz für ein Messinstrument im Weltraum. Damit sollen Spuren von Chemikalien im Wasserdampf und in Eisparkeln bestimmt werden, die aus Rissen des Saturnmondes Enceladus herausströmen.

*For NASA we are developing ultra-broadband low-noise amplifiers at 600 GHz for a measuring instrument in space. It will measure traces of chemicals in the water vapour plumes and icy particles that emanate from fissures on the Saturn moon Enceladus.*

## Charlottesville

### Virginia Diodes, Inc.

Für VDI erforschen wir breitbandige rauscharme Verstärkerschaltungen bei 183 GHz, die in Wetter-satelliten zum Einsatz kommen. Im Projekt TROPICS sollen beispielsweise Hurrikans und Taifune damit beobachtet werden.

*For VDI, we are developing 183 GHz broadband low-noise amplifier circuits for use in weather satellites. The TROPICS project, for example, will observe hurricanes and typhoons.*



## WELTWEIT VERNETZT

### *A global network*

Mit zahlreichen nationalen und internationalen Industrieunternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten verbinden uns langjährige erfolgreiche Kooperationen. Einige präsentieren wir Ihnen hier.

*We are proud to look back on many years of successful cooperation with numerous national and international industrial partners, research institutes and universities, a few of which are shown here.*

## Glasgow

### Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP

Mit dem Fraunhofer CAP arbeiten wir an einem System, das schnell abstimmbare Quantenkaskadenlaser mit industrieller Bildverarbeitung vereint. Das System kann Proben auf einem Fließband autonom finden und in Echtzeit analysieren.

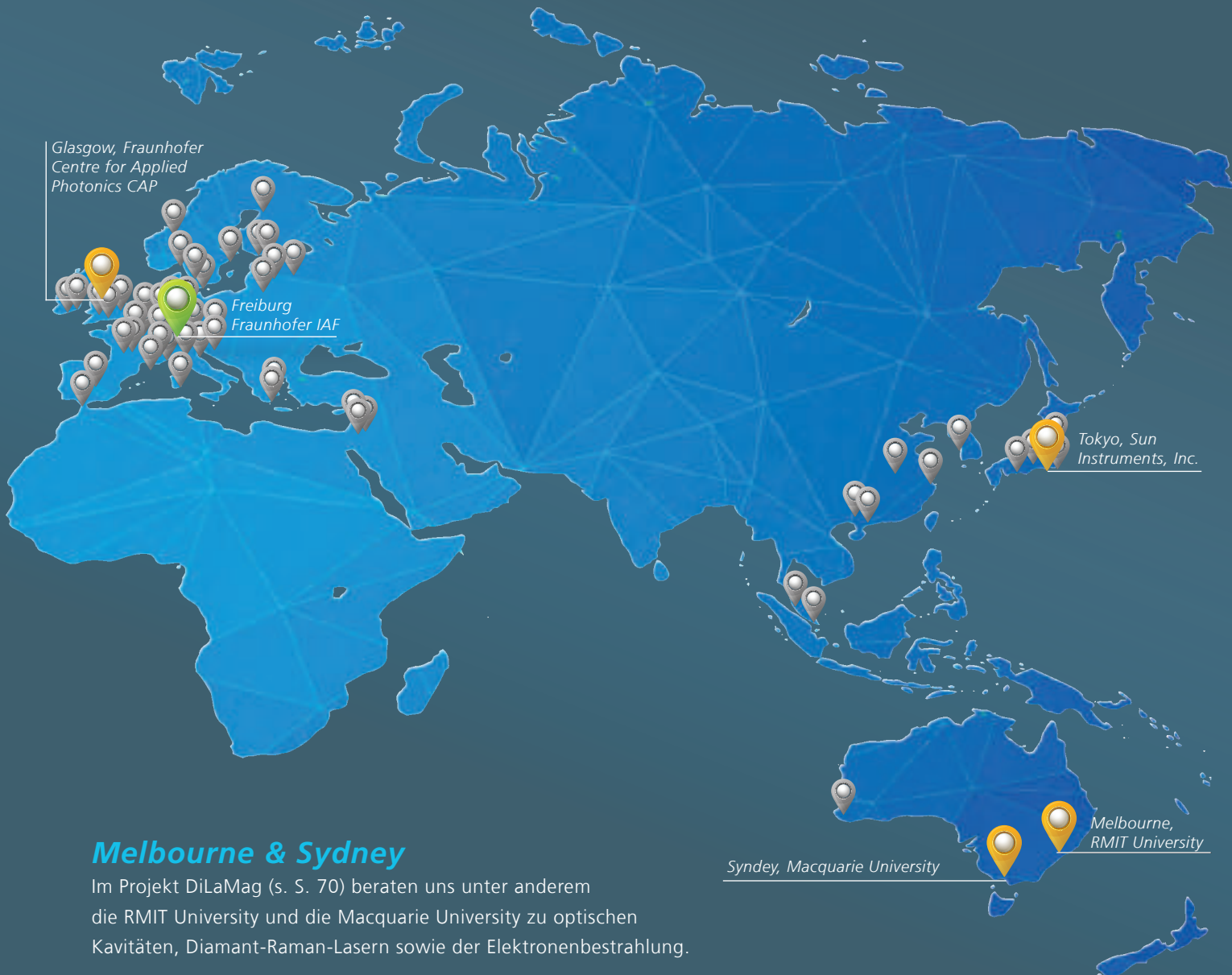
*Together with Fraunhofer CAP, we are working on a system that combines fast tunable quantum cascade lasers with machine vision. The system can autonomously find the point of interest, e. g. on a conveyor belt, and undertake real-time spectroscopy.*

## Tokyo

### Sun Instruments, Inc.

Für diverse Kunden in Japan, vertreten durch Daiki Gomi von Sun Instruments, entwickeln wir Millimeterwellen-Module im Frequenzbereich 100–300 GHz für Kommunikations-Anwendungen.

*For various customers in Japan, represented by Daiki Gomi of Sun Instruments, we are developing millimeter-wave modules in the 100–300 GHz frequency range for use in communications.*



## Melbourne & Sydney

Im Projekt DiLaMag (s. S. 70) beraten uns unter anderem die RMIT University und die Macquarie University zu optischen Kavitäten, Diamant-Raman-Lasern sowie der Elektronenbestrahlung.

*As part of the DiLaMag project (see p. 70), RMIT University and Macquarie University, among others, advise us on optical cavities, diamond Raman lasers and electron irradiation.*

# ORGANIGRAMM

## Organigram

**Dr. Anne-Julie Maurer**  
MARKETING &  
COMMUNICATIONS  
☎ -282



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



**Dr. Sébastien Chartier**  
HIGH FREQUENCY  
ELECTRONICS  
☎ -446



**Dr. Michael Mikulla**  
POWER  
ELECTRONICS  
☎ -267



**Dr. Robert Rehm**  
PHOTO -  
DETECTORS  
☎ -353



**Dr. Ralf Ostendorf**  
SEMICONDUCTOR  
LASERS  
☎ -638



**Dr. Christoph Nebel**  
DIAMOND  
DEVICES  
☎ -291



### KONTAKT / Contact

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

☎ +49 761 5159 + Durchwahl / direct dial





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



**Dr. Jutta Kühn**  
**DIVISION**  
**DIRECTOR**  
**DEPARTMENTS**  
 ☎ -842



**Dr. Martin Walther**  
**DIVISION**  
**DIRECTOR**  
**RESEARCH**  
**INFRASTRUCTURE**  
 ☎ -434



**Dr. Tim Stadelmann**  
**EPITAXY**  
 ☎ -385



**Dr. Beatrix Schwitalla**  
**ADMINISTRATION**  
 ☎ -414



**Dr. Wolfgang Bronner**  
**TECHNOLOGY**  
 ☎ -822



**Christa Wolf**  
**TECHNICAL**  
**SERVICES**  
 ☎ -428



**Dr. Jutta Kühn**  
**MICRO-**  
**ELECTRONICS**  
 ☎ -842



**Jörg Seibel**  
**INFORMATION**  
**TECHNOLOGY**  
 ☎ -559

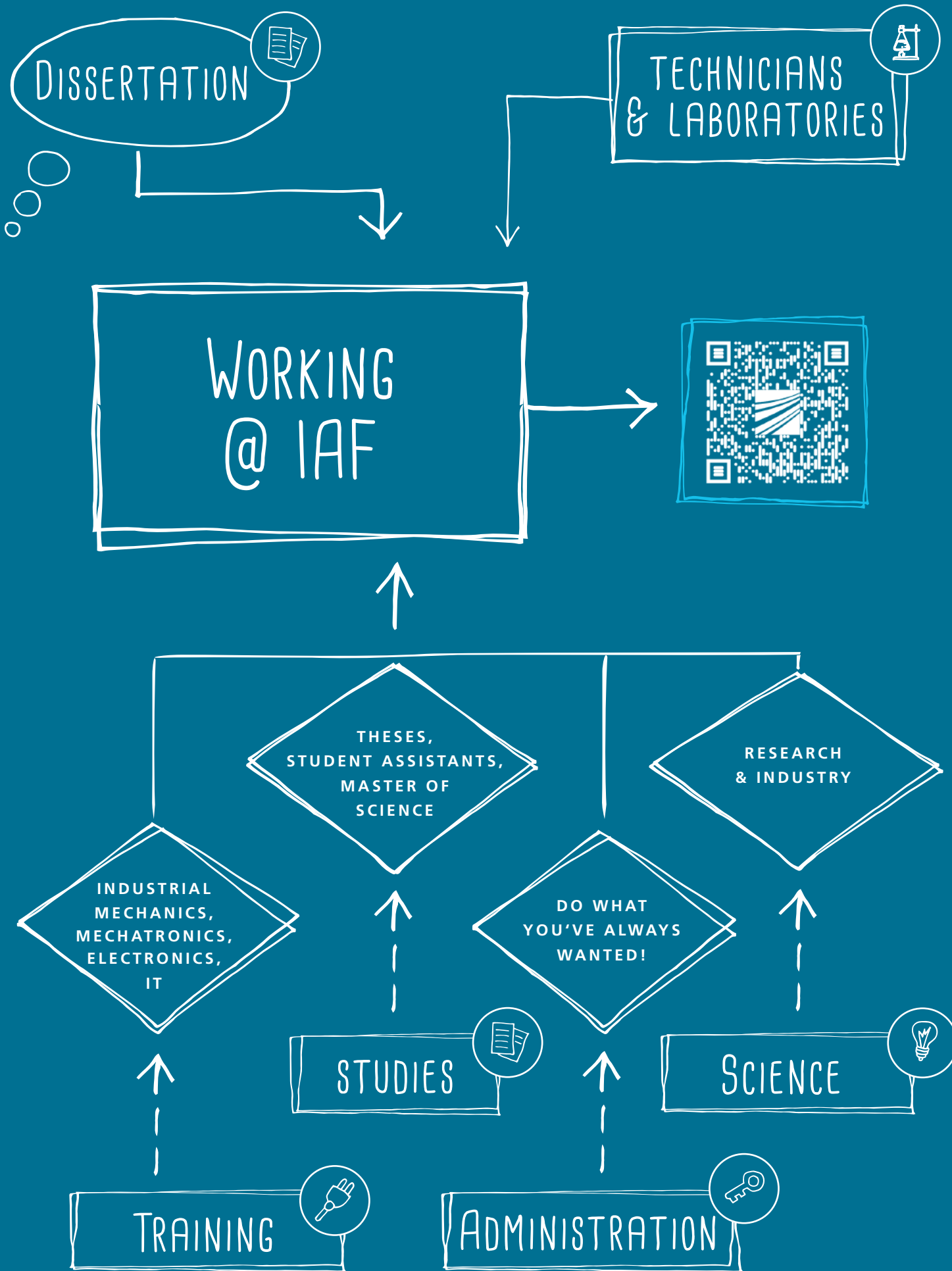


**Dr. Marcel Rattunde**  
**OPTO-**  
**ELECTRONICS**  
 ☎ -643



**Dr. Harald D. Müller**  
**QUALITY**  
**MANAGEMENT**  
 ☎ -458





# FÜR BEWERBER

Jobs@IAF

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

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

## DAS ERWARTET SIE: *What we offer:*

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



»Ich finde die Prozesstechnologie sehr spannend, weil sie Theorie und Anwendung vereint.«  
*»I find process technology very exciting because it combines theory with application.«*



»Die Kombination der Technologien und Anwendungen am IAF ist ein echtes Alleinstellungsmerkmal.«  
*»IAF has a unique combination of technologies and applications.«*



»Ich begleite Projekte von der ersten Idee über die Forschung bis hin zur Markteinführung.«  
*»I support projects from the initial idea through research to the market.«*



»Ich verfolge die Vision, eines Tages alle elektronischen Anwendungen hocheffizient mit Energie zu versorgen.«  
*»My vision is to be able to supply all electronic applications with efficient energy.«*



READ THE FULL  
INTERVIEWS WITH  
YOUR FUTURE  
COLLEAGUES





# MESSEN & VERANSTALTUNGEN 2020

## Fairs & Conferences 2020

Nutzen Sie auch 2020 die Gelegenheit, auf Messen, Konferenzen und öffentlichen Veranstaltungen mit unseren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ins Gespräch zu kommen. Gerne diskutieren wir mit Ihnen unsere Technologien im Hinblick auf Ihre Anwendung. Wir freuen uns auf Sie!

*Take the opportunity to meet our scientists at trade fairs, conferences and public events in 2020. We will be happy to discuss our technologies with you in the context of your application. We look forward to meeting you!*

### »QUANTUM COMPUTING«

**Freiburg, 21. Januar 2020**

Mit Sprechern aus führenden Industrieunternehmen, innovativen Start-ups und State-of-the-Art-Forschungseinrichtungen erwartet Sie in diesem Workshop Vorsprungswissen zu dem dynamischen Feld des Quantencomputings.

**Freiburg, January 21, 2020**

*With speakers from leading industrial companies, innovative start-ups and state-of-the-art research institutions, this workshop will give you cutting edge insight into the dynamic field of quantum computing.*



### ANALYTICA

**München, 31. März–3. April 2020**

Wir stellen ein laserbasiertes Messsystem vor, das in Echtzeit sowohl kleinste Mengen chemischer Substanzen kontaktfrei identifiziert als auch chemische Reaktionsprozesse kontinuierlich verfolgt. Halle A1, Stand 156.

**Munich, March 31–April 3, 2020**

*We present a laser-based real-time measuring system that can identify even the smallest amounts of chemical substances and can continuously monitor chemical reaction processes. Hall A1, booth 156.*

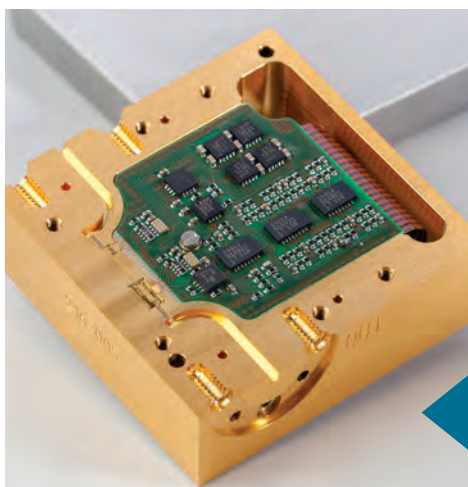
## WISSENSCHAFTSMARKT

### Platz der Alten Synagoge, Freiburg, 19.–20. Juni 2020

Die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute sind mit Forschung zum Anfassen vor Ort. Schneiden Sie Eiswürfel mit Diamant und erleben Sie die Auswirkung verschiedener LED-Beleuchtungsoptionen auf den Betrachter.

### Platz der Alten Synagoge, Freiburg, June 19–20, 2020

*Scientists from the five Freiburg Fraunhofer institutes let you get to grips with research. Cut ice cubes with diamond and experience the effect of different LED lighting options.*



## EUROPEAN MICROWAVE WEEK

### Utrecht, Niederlande, 13.–18. September 2020

Wir präsentieren integrierte Schaltungen für hohe Frequenzen bis 670 GHz, Terahertz-Technologien sowie Millimeterwellen-Schaltungen und -Module für 5G / 6G, Raumfahrt sowie Klima- und Erdbeobachtung.

### Utrecht, The Netherlands, September 13–18, 2020

*We will present integrated circuits for high frequencies up to 670 GHz, terahertz technologies, millimeter-wave circuits and modules for 5G / 6G, aerospace and climate and earth observation.*

## »QUANTUM SENSING«

### Freiburg, 1. Oktober 2020

Das Fraunhofer IAF ist Gastgeber des ersten Quantum Business Network-Treffens zur Quantensensorik mit Themen von neusten Forschungsergebnissen bis zu industriellen Anwendungen und einer Fokus-Session Diamant.

### Freiburg, October 1, 2020

*Fraunhofer IAF is hosting the first Quantum Business Network meeting, which will include topics from state-of-art research to industrial applications and a focus session on diamond.*



# IMPRESSUM

## Publication details

### FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF

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

### MARKETING & KOMMUNIKATION

#### Marketing & Communications

Dr. Anne-Julie Maurer  
Tel. +49 761 5159-282  
anne-julie.maurer@iaf.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur  
mit Genehmigung der Institutsleitung.

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

© Fraunhofer-Institut für  
Angewandte Festkörperphysik IAF,  
Freiburg 2020

### REDAKTION

#### Editorial board

Anne-Julie Maurer, Jennifer Funk,  
Sandra Schneider, Violetta Budak,  
Oliver Ambacher

### KONZEPT, LAYOUT, SATZ, DRUCK

#### Design, layout, typesetting, printing

netsyn, Joachim Würger, Freiburg,  
subculture urban media, Freiburg

### BILDNACHWEIS

#### Picture credits

Lakov Kalinin, Adobe Stock; Alina Buzunova, Adobe Stock;  
map pointer icons: irkus, Adobe Stock, Cover, 1  
Feaspb, Shutterstock, 8, 9  
CNET.com, 10  
IBM Research GmbH, 11  
Lakov Kalinin, Adobe Stock, 12, 13, 26, 27, 76, 77, 103  
Ulf Meiners, Jens Kosch, Johannes Koeth, Andreas Wälti;  
others: Fraunhofer IAF, 16, 17  
Viacheslav Iakobchuk, Adobe Stock; nd3000, Shutterstock; Gorodenkoff,  
Shutterstock, 19 (top to bottom)  
O6photo, Adobe Stock, 28, 29, 34, 35  
VERTIGO: Yusif, Adobe Stock; KoNet: Rudniyvlad, VerctorStock; GaNTraction,  
GaNIAL, ElKaWe, mAgnes Freepik; flaticon, 34, 35 icons  
Kinwun / Nischaporn / vectorfusionart / fotomek / Tierney / junce11,  
Adobe Stock, 36–41 (left to right)  
Xie Chengxin, Shutterstock, 42, 43  
photosforyou, pixabay; Petko Danov S&E, iStock Photo, 44, 45, 50, 51  
B. Fuckert, NOKIA, 47, 48 (left; W. Tempel)  
Freepik; flaticon, 50, 51 (icons)  
yingyaipumi / athitath / sdecoret / metamorworks / Johan Swanepoel /  
rottenman / weerapat1003 / jijomathai, Adobe Stock, 52–59 (left to right)  
Flashmovie, Adobe Stock, 60, 61  
Pandora Studio, 62, 63, 68, 69  
Freepik; flaticon, 68, 69 (icons)  
Freedomz / SergeyBitos / adam121 / yossarian6, Adobe Stock,  
70–73 (left to right)  
Kotkoa, Shutterstock, 74, 75  
University of Freiburg, 79 (bottom)  
K. Wudtke, Fraunhofer IPM (top left) H. Kock,  
Fraunhofer IPM (top right); halbscharf.com (bottom right), 80  
U. Steinert, 81 bottom)  
K. Krebs, INATECH (top); Fraunhofer CAP (bottom), 93  
Es sarawuth, Adobe Stock, 94,95  
Achim Käflein, 101 (bottom)

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



# NEWSLETTER

*Fraunhofer IAF*

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



HIER  
ANMELDEN



**FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR  
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

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

Director:  
Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

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

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