

6G



6G



Inventing a Green Future

Jahresbericht – Annual Report 2021 / 2022



Von nachhaltiger Digitalisierung und Mobilität über innovative Klimatechnologien bis hin zu Quantensystemen: Am Fuße des einmaligen Schwarzwalds in der »Green City« Freiburg entwickelt das Fraunhofer IAF energieeffiziente Mikro- und Nanoelektronik für eine klimaneutrale, sichere und unabhängige Zukunft. Die Forschenden arbeiten an nachhaltigen Lösungen auf Basis von III/V-Halbleitern und gehen neue Wege, um einen Beitrag zur Technologiesouveränität Deutschlands und Europas zu leisten.

From sustainable digitalization and mobility to innovative climate technologies and quantum systems: At the foot of the unique Black Forest in the "Green City" Freiburg, Fraunhofer IAF develops energy-efficient micro- and nanoelectronics for a climate-neutral, secure and independent future. The researchers are working on sustainable solutions based on III-V semiconductors and are breaking new ground to contribute to the technological sovereignty of Germany and Europe.



Resource Efficiency and Climate Technologies



Quantum Technologies



Next Generation Computing



Digital Economy



Mobility Sector



Information and Communications Technology



Aerospace Technology

Inventing a Green Future

Jahresbericht – Annual Report 2021 / 2022

Vorwort

Preface



In Zeiten von Veränderungen verbindet uns die Vision von einer nachhaltigen, sicheren und unabhängigen Zukunft. Doch unsere Zukunft hängt von unseren Entscheidungen zu aktuellen Herausforderungen und unserer Zuversicht in unsere Stärken ab.

Die Wahrnehmung der Klimakrise nimmt weiter zu und der Weltklimarat formuliert eine eindeutige Botschaft: Die Industrienationen müssen ihre CO₂-Emissionen zeitnah und drastisch reduzieren, indem sie u. a. auf grüne und strombasierte Energieproduktion umstellen und ihren Verbrauch anpassen. Gleichzeitig hat die aktuelle Chipkrise die immense Bedeutung von Halbleitern für unsere Gesellschaft und Industrie sowie unsere Abhängigkeit von nur wenigen Chip-Herstellern weltweit vor Augen geführt.

Mit seinen Kernkompetenzen und Forschungsanstrengungen leistet das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF einen wichtigen Beitrag zur Problemlösung und Zukunftsfähigkeit. Wir entwickeln leistungsstarke und energieeffiziente elektronische Komponenten auf Basis der III/V-Halbleiter und damit eine Elektronik, die für unsere Klimaschutzziele arbeitet. Mit unserer Forschungsinfrastruktur haben wir zudem die Möglichkeit, nachhaltige Produktionsprozesse zu konzipieren, Pilotlinien zu betreiben und für industrielle Prozesse zu bewerten.

Um in den globalen Wertschöpfungsketten eine souveräne Position einnehmen, flexibel auf Störungen in den globalen Lieferketten reagieren und die Digitalisierung nach unseren Werten gestalten zu können, brauchen wir eine eigene europäische Fertigung. Technologische Souveränität ist die DNA des Fraunhofer IAF. Wir entwickeln Halbleiterbauelemente in Zusammenarbeit mit unseren europäischen Partnern und unterstützen den Ausbau europäischer Lieferketten. Somit schaffen wir die Voraussetzung für unabhängige und nachhaltige Schlüsseltechnologien europäischen Ursprungs in einer multilateralen Welt.

In times of change, we are united by the vision of a sustainable, secure and independent future. But our future depends on our decisions about current challenges and our confidence in our strengths.

The perception of the climate crisis continues to grow, and the Intergovernmental Panel on Climate Change sends a clear message: Industrial nations must reduce their CO₂ emissions promptly and drastically by, among other things, switching to green and electricity-based energy production and adjusting their consumption. At the same time, the current chip crisis has highlighted the immense importance of semiconductors to our society and industry, as well as our dependence on just a few chip manufacturers worldwide.

With its core competencies and research efforts, Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF makes an important contribution to problem solving and future viability. We develop high-performance and energy-efficient electronic components based on III-V semiconductors and thus electronics that work for our climate protection goals. Our research infrastructure also gives us the opportunity to design sustainable production processes, operate pilot lines and evaluate these for industrial processes.

In order to occupy a sovereign position in global value chains, respond flexibly to disruptions in global supply chains and shape digitalization according to our values, we need our own European manufacturing. Technological sovereignty is the DNA of Fraunhofer IAF. We develop semiconductor devices in cooperation with our European partners and support the expansion of European supply chains. We are thereby creating the conditions for independent and sustainable key technologies of European origin in a multilateral world.

Was uns stark macht, sind unsere Partnerschaften. Bei der Herstellung von Halbleitern und in der Quantenforschung arbeiten wir eng mit der Fraunhofer-Gesellschaft und der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland zusammen. Der Bedarf an neuen Technologien für energieeffiziente nachhaltige Elektronik, den Mobilfunk der 6. Generation, Künstliche Intelligenz sowie Quantensensorik und -computing zeigt, wo die Chancen für Europa liegen, die Wettbewerbsvorteile auszubauen und Schlüsselpositionen in der globalen Wertschöpfungs- und Lieferkette zu sichern.

Enge Kooperationen mit der Industrie sind essentiell für einen gelungenen und schnellen Transfer von Forschungsergebnissen in die Produktion. Solche Pilotproduktionslinien konnten beispielsweise dank der EU-Fördermaßnahme IPCEI (Important Project of Common European Interest) deutlich besser unterstützt werden und haben zur Wettbewerbsfähigkeit der EU beigetragen.

Sicherheit ist und bleibt eines der wichtigsten Bedürfnisse unserer Gesellschaft. Deshalb forschen wir in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Verteidigung (BMVg) an Technologien sowohl für die Bundeswehr als auch für die zivile Sicherheit als Beitrag zur Erhaltung unserer europäischen Unabhängigkeit.

In dem vorliegenden Jahresbericht mit dem Titel »Inventing a Green Future« stellen wir Ihnen unsere Kernkompetenzen, unsere Projekte und Partner vor und informieren Sie über unsere Entwicklungen im Bereich der Materialforschung, der energieeffizienten Elektronik und des Mobilfunks der Zukunft. Außerdem erfahren Sie mehr über unsere Forschungsaktivitäten für die Raumfahrt und neue Technologien, z. B. für eine innovative und nachhaltige Kühlung.

Ich freue mich, dass viele neue wie langjährige Partner zu Wort kommen und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Prof. Dr. Rüdiger Quay

What makes us strong are our partnerships. In the manufacturing of semiconductors and in quantum research, we work closely with the Fraunhofer-Gesellschaft and the Research Fab Microelectronics Germany. The need for new technologies for energy-efficient sustainable electronics, 6th generation mobile communications, artificial intelligence as well as quantum sensing and computing shows where the opportunities lie for Europe to build on its competitive advantages and secure key positions in the global value and supply chain.

Close cooperation with industry is essential for the successful and rapid transfer of research results into production. Such pilot production lines, for example, have received increased support thanks to the EU's IPCEI (Important Project of Common European Interest) funding measure and have contributed to the EU's competitiveness.

Security is and remains one of the most important needs of our society. That is why, in cooperation with the German Federal Ministry of Defence (BMVg), we are researching technologies for both the German armed forces and civil security as a contribution to maintaining our European independence.

In this annual report entitled "Inventing a Green Future," we present our core competencies, our projects and partners, and inform you about our developments in the fields of materials research, energy-efficient electronics and the mobile communication of the future. You can also learn more about our research activities for space and new technologies, e.g., for innovative and sustainable cooling.

I am pleased that many new as well as long-standing partners are featured this year and wish you an inspiring read!



Prof. Dr. Rüdiger Quay

Inhaltsverzeichnis

Contents

Vorwort	2
Preface	
Inhaltsverzeichnis	4
Contents	
Interview: Im Gespräch mit dem neuen geschäftsführenden Institutsleiter	6
Interview: In conversation with the new executive director	
Interview: Wie gelingt die Entwicklung eines energieeffizienten 6G-Mobilfunks?	12
Interview: How do we succeed in developing energy-efficient 6G mobile communication?	
Energieeffiziente Elektronik und neue Ansätze für eine klimaneutrale Zukunft	16
Energy-efficient electronics and new approaches for a climate-neutral future	
Berichte unserer Forschenden Articles from our scientists	
■ Mit Terahertz-Funktechnologien zum 6G-Mobilfunk der Zukunft	20
Terahertz radio technologies for the 6G mobile communications network of the future	
■ MOCVD-Aluminiumscandiumnitrid für nachhaltige Elektronik	24
MOCVD aluminum scandium nitride for sustainable electronics	
■ Niedervoltagelektronik für eine emissionsfreie Zukunft	28
Low-voltage power electronics for an emission-free future	
Interview: Kann Satellitentechnik souverän und nachhaltig sein?	32
Interview: Can satellite technology be sovereign and sustainable?	
Schlüsselfaktor Mikroelektronik für technologische Souveränität	36
Key factor microelectronics for technological sovereignty	
Berichte unserer Forschenden Articles from our scientists	
■ IC- und optische Technologien europäischen Ursprungs	40
IC and optical technologies of European origin	
■ Hochfrequenzelektronik für nachhaltige Erdbeobachtung	44
High-frequency electronics for sustainable Earth observation	
■ Radar sorgt für Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration	48
Radar ensures safety in human-robot collaboration	
Zukunftstechnologie Quantencomputing	52
Future technology quantum computing	

Innovation durch starke Partner	54
Innovation due to strong partners	
Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland	56
Research Fab Microelectronics Germany	
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	57
University of Freiburg	
Wertschöpfungskette am Fraunhofer IAF	66
Value chain at Fraunhofer IAF	
Zwei neue Forschungsbauten in Betrieb	70
Two new research buildings in operation	
Nachhaltige Anlagen: Modernste Ausstattung für Spitzenelektronik	74
Sustainable facilities: Up-to-date equipment for cutting-edge electronics	
Neueste Messtechnik trifft einzigartiges Know-how	78
Latest measurement technology meets unique know-how	
Das Institut in Zahlen	84
The institute in figures	
Kuratorium	86
Advisory Board	
Technologiehighlight: Verstärkersystem mit extrem hoher Ausgangsleistung	88
Technolgy highlight: Amplifier system with extremely high output power	
Patente	89
Patents	
Aus einer Idee wird ein Produkt	90
From idea to product	
Wie Sie mit uns kooperieren können	91
How you can work with us	
Ausbildung und Lehre	92
Education and teaching	
Abschlussarbeiten	94
Theses	
Organigramm	96
Organigram	
Arbeiten am Fraunhofer IAF	98
Working@IAF	
Impressum	100
Publication details	

Im Gespräch mit dem neuen geschäftsführenden Institutsleiter

In conversation with the new executive director

Im Januar 2022 übernahm Prof. Dr. Rüdiger Quay kommissarisch die geschäftsführende Institutsleitung des Fraunhofer IAF. Im Interview blickt er in die Zukunft, auf das Thema Nachhaltigkeit und eine unabhängige europäische Halbleiterfertigung.

In January 2022, Prof. Dr. Rüdiger Quay took over the position of acting executive director at Fraunhofer IAF. In this interview, he looks ahead to the future, to the topic of sustainability and an independent European semiconductor manufacturing.



Was sind Ihre Pläne als kommissarischer Institutsleiter des Fraunhofer IAF?

Quay — Mir ist es wichtig, das Institut moderner zu gestalten – sowohl die Themen als auch die Strukturen. Quantentechnologien sind ein wichtiges Zukunftsthema, bei dem wir eine führende Rolle einnehmen wollen, wobei das nicht im Widerspruch steht zu den vielen Chancen im Bereich der eher klassischen IAF-Themen. Was die Organisationsstrukturen betrifft, ist es mir wichtig, dass wir uns weiter öffnen und neue Arbeitsprozesse erlernen. Beispielsweise sind wir gerade dabei, auch Software zu schreiben. Das ist sehr spannend. Ein anderer neuer Bereich ist die Simulation: Wenn wir neue Konzepte mit neuen Verfahren zuerst am Computer simulieren, bietet uns das viel mehr Flexibilität für unsere Forschung.

What are your plans as executive director of Fraunhofer IAF?

Quay — For me, it is important to make the institute more modern — both the topics and the structures. Quantum technologies are an important future topic in which we want to take a leading role, although this does not contradict the many opportunities in the area of more classical IAF topics. As far as organizational structures are concerned, it is important to me that we open up further and learn new work processes. We are, for example, currently in the process of writing software as well. That is very exciting. Another new area is simulation: If we simulate new concepts with new processes on the computer first, it will offer us much more flexibility for our research.

Der Kern unseres Instituts ist und bleibt der Reinraum. Da wollen wir starke Partnerschaften in der Fraunhofer-Gesellschaft eingehen, die es erlauben, auch größere Projekte zu bedienen. Und mir persönlich ist es sehr wichtig, dass unsere Mitarbeitenden gerne hier sind und Spaß an der Forschung haben.

Warum ist das Thema »energieeffiziente Elektronik« so wichtig?

Quay — Jede Elektronik könnte energieeffizient sein. Von Smartphones und Autos bis hin zu Satellitensystemen – alle Geräte sind darauf angewiesen, möglichst wenig Energie zu verbrauchen, weil Energie immer knapp ist. Außerdem ist Elektronik die Grundlage der Digitalisierung und ich kann mir die Welt von morgen nicht ohne Digitalisierung vorstellen. Während die Anforderungen an die Digitalisierung steigen, ist es extrem wichtig, dass die Elektronik parallel dazu effizienter wird. Das ist ja auch das Bedürfnis unserer Gesellschaft und vor allem der jüngeren Generation: klimaneutral zu leben. Und das ist tatsächlich eine der größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts als Folge des Anwachsens der Weltbevölkerung.

Welchen Beitrag leistet das Fraunhofer IAF?

Quay — Das IAF kann auf sehr vielen Ebenen helfen. Zum einen entwickeln wir elektronische Komponenten, die den Energieverbrauch senken. Zum anderen geht es um nachhaltige Produktionsprozesse. Die Halbleiterherstellung war immer ein Energiefresser und bei uns im Reinraum kann man viel über eine nachhaltigere Produktion lernen. Änderungen lassen sich bei uns viel besser ausprobieren als in einem laufenden Industriebetrieb. Darüber hinaus ist es wichtig, neu zu denken und grundlegend neue Konzepte zu entwickeln. Es muss nicht mit jedem zusätzlichen Bit an Rechenleistung auch der Energieverbrauch steigen. Der Quantencomputer zeigt uns, dass es auch anders geht.



Uns steht das ganze Periodensystem zur Verfügung und ich bin äußerst optimistisch, dass da noch sehr viele Möglichkeiten drinstecken, um die Energieeffizienz zu verbessern.«

“We have the entire periodic table at our disposal, and I am extremely optimistic that there are still many possibilities for improving energy efficiency.”

The core of our institute is and remains the clean room. We want to establish strong partnerships within the Fraunhofer-Gesellschaft in this field that will allow us to realize larger projects. And for me personally, it is very important that our employees enjoy being here and have fun doing research.

Why is the topic “energy-efficient electronics” so important?

Quay — Every electronic device could be energy efficient. From smartphones and cars to satellite systems, all devices rely on using as little energy as possible, because energy is always in short supply. Moreover, electronics are the foundation of digitalization, and I cannot imagine tomorrow’s world without digitalization. While the demands for digitalization are increasing, it is extremely important that, at the same time, electronics become more efficient. After all, this is the need of our society and especially of the younger generation: to live in a climate-neutral way. Considering the growth in the world’s population, that is indeed one of the greatest challenges of this century.

What is Fraunhofer IAF’s contribution?

Quay — IAF can help on many levels. On the one hand, we develop electronic components that reduce energy consumption. On the other, it is about sustainable production processes. Semiconductor manufacturing has always been an energy guzzler and in our clean room you can learn a lot about more sustainable production. Changes can be tried out much better with us than in a running industrial operation. In addition, it is important to think in new ways and develop fundamentally new concepts. Energy consumption does not have to increase with every additional bit of computing power. The quantum computer shows that things can be done differently.

Wie schafft man es denn, in der Forschung »neu zu denken«?

Quay — Die wichtigste Voraussetzung ist die Fantasie. Bei uns sind Materialien wichtig. Uns steht das ganze Periodensystem zur Verfügung und ich bin äußerst optimistisch, dass da noch sehr viele Möglichkeiten drinstecken, um die Energieeffizienz zu verbessern. Im nächsten Schritt muss man Bestehendes hinterfragen. Es steht in keinem Naturgesetz, dass man bei der Datenübertragung bei hohen Frequenzen über 95 Prozent der Energie wegwerfen muss. Das liegt daran, dass wir derzeit noch nicht so weit sind. Hinzu kommt die Bereitschaft, Dinge auch umzusetzen und sich zu verändern. Vor zehn Jahren hätte niemand geglaubt, dass das IAF Software entwickeln kann. Jetzt machen wir es und es klappt!

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 selbst klimaneutral zu forschen. Wie kann das am Fraunhofer IAF gelingen?

Quay — Wir werden unseren Reinraum grundsätzlich umstellen – von der Energiebeschaffung bis zu dem Verbrauch – und die Abläufe der Anlagen so gestalten, dass möglichst wenig Energie verschwendet wird. Langfristig werden wir im Reinraum prüfen, ob man ressourcenintensive Prozesse einsparen kann. Allerdings müssen wir abwägen, was im Betrieb möglich ist, da die Reinheitsanforderungen an die Herstellung hochwertiger Komponenten stetig steigen.

Wie kann man einem zukünftigen Chipmangel entgegenwirken?

Quay — Das IAF hat seit langem eine eigenständige Fertigung und liefert bestimmte Halbleiter in attraktiven Stückzahlen. Das wird auch so bleiben und weiter ausgebaut. Auf Dauer müssen wir in Europa lernen, in der weltweiten Wertschöpfungskette dauerhaft weniger anfällig zu bleiben. Das haben mittlerweile viele erkannt und deshalb ist der European Chips Act auch so relevant. Und es wird wichtig sein, die Unabhängigkeit zu bewahren, wenn es im Schweinezyklus wieder ausreichend Chips gibt.

How can one manage to think “in new ways” in research?

Quay — Imagination is the most important requirement here. For us, materials are important. We have the entire periodic table at our disposal, and I am extremely optimistic that there are still many possibilities for improving energy efficiency. The next step is to question what already exists. There is no law of nature stating that one has to lose over 95 percent of energy in data transmission at high frequencies. The reason is that we are not there yet. In addition, you need the willingness to implement things and to change. Ten years ago, no one would have believed that the IAF could develop software. Now we are doing it and it works!

The Fraunhofer-Gesellschaft has set itself the goal of conducting climate-neutral research by 2030. How can this be achieved at Fraunhofer IAF?

Quay — We will fundamentally transform our clean room — from energy procurement to consumption — and design the equipment processes so that as little energy as possible is wasted. In the long term, we will examine whether resource-intensive processes can be saved in the cleanroom. However, we have to weigh up what is possible in operation, as the cleanroom requirements for manufacturing high-quality components are constantly increasing.

How can you counteract a future chip shortage?

Quay — IAF has long had an independent manufacturing operation and supplies certain semiconductors in attractive quantities. This will remain and will be further expanded. In the long run, we in Europe must learn to remain permanently less vulnerable in the global value chain. Many have realized this, which is why the European Chips Act is so relevant. And it will be important to maintain independence when there are enough chips again in the hog cycle.



read the full
interview





Als Institutsleiter sehe ich mich dafür zuständig, dass die Menschen hier Freude an der Forschung haben, und wir Forschung auf höchstem Niveau betreiben können.«

“As director of the institute, I consider myself responsible to make sure that people enjoy doing research here, and that we can conduct research at the highest level.”

Das Fraunhofer IAF hat ein sehr breites Forschungsspektrum – was ist der gemeinsame Nenner der unterschiedlichen Bereiche?

Quay — Das IAF steht auf vielen Füßen und das ist schon immer klug gewesen. Die Herausforderung besteht darin, auf diesen vielen Gebieten sehr gut zu sein. Wir haben inzwischen rund 300 Mitarbeitende, die ein gemeinsames Verständnis davon haben wollen, wo sie hinmöchten. Deshalb müssen wir manchmal steuern. Als Institutsleiter sehe ich mich dafür zuständig, dass die Menschen hier Freude an der Forschung haben, und wir Forschung auf höchstem Niveau betreiben können. Das ist der gemeinsame Nenner am Ende des Tages – zufriedene Mitarbeitende, die gemeinsam im sehr dynamischen Fraunhofer-Modell Spitzenforschung betreiben.

Was ist Ihre Zukunftsvision von unserer Gesellschaft?

Quay — Ich glaube an eine Gesellschaft, die weiterhin in Verbindung bleiben will, die die Klimaziele ernst nimmt und die frei und demokratisch lebt. Wir werden weiterhin andere Menschen persönlich treffen wollen. Wenn ich in Zukunft nicht mehr fliegen darf, wird die Verständigung und der kulturelle Austausch nicht funktionieren. Meine Vision ist, dass die Kommunikationstechnologie so weit ist, dass uns möglichst viele lästige Reisen erspart werden und dass man mit gutem Gewissen reisen kann, wenn man es trotzdem möchte. Wir müssen daran arbeiten, dass Dinge, die unvereinbar erscheinen, vereinbarer werden. Die Beiträge, die die Wissenschaft liefert, sind in erster Linie technisch, aber gesellschaftlich hoch relevant. Jetzt ist eine herausfordernde Zeit, in der viele Dinge ihren Ursprung nehmen können und auf die ich zuversichtlich blicke. Später wird man darauf zurückschauen und sagen, da wurde vieles angestoßen!

Fraunhofer IAF has a very broad research spectrum — what is the common denominator of the different fields?

Quay — IAF stands on many feet and that has always been wise. The challenge is to be very good in these many fields. We now have about 300 employees who want to have a common understanding of where they want to go. That is why sometimes we have to navigate. As director of the institute, I consider myself responsible to make sure that people enjoy doing research here, and that we can conduct research at the highest level. That is the common denominator at the end of the day — satisfied employees doing cutting-edge research together in the very dynamic Fraunhofer model.

What is your vision of the future of our society?

Quay — I believe in a society that wants to continue to stay connected, that takes climate goals seriously and that lives freely and democratically. Our need to meet people in person will persist. If I am not allowed to fly in the future, understanding and cultural exchange will not work. My vision is of advanced communications technology that saves as many tedious journeys as possible, so that people can travel with a clear conscience, if they still want to. We must work to make things that seem incompatible more compatible. Although primarily technical, the contributions of science are highly relevant to society. I am looking forward to the numerous things that can originate in these challenging times. One day, people will look back and see that many things were kicked off!

Inventing a Green Future: energieeffiziente Elektronik und technologische Souveränität

Inventing a Green Future: energy-efficient electronics and technological sovereignty

Forschende des Fraunhofer IAF arbeiten täglich an Lösungen für eine nachhaltige Elektronik, die gleichermaßen Maßstäbe in Sachen Leistung und Effizienz setzt: Sie kreieren Technologien für einen energieeffizienten Mobilfunk der sechsten Generation (6G), erzeugen neuartige Halbleitermaterialien mit überlegenen Eigenschaften (AlScN per MOCVD) oder entwickeln bereits erprobte und erfolgreiche Technologien (GaN) weiter, um immer energiesparsamere hochperformante Module und Komponenten zu realisieren. Zugleich stärken diese Forschungen die technologische Souveränität und Unabhängigkeit Deutschlands wie Europas: Neben signifikanten Energieeinsparungen durch effiziente Hochfrequenz- und Leistungselektronik tragen die Entwicklungen des Fraunhofer IAF wesentlich dazu bei, innovative Anwendungen im Bereich der Industrie 4.0 (Mensch-Roboter-Kollaboration), der Raumfahrt (Satellitenkommunikation) bis hin zu Quantentechnologien auf den Weg zu bringen.

Researchers at Fraunhofer IAF are working daily on solutions for sustainable electronics that set standards in performance and efficiency in equal measure: They are developing technologies for energy-efficient sixth-generation mobile communications (6G), creating novel semiconductor materials with superior properties (AlScN via MOCVD), or advancing tried and tested technologies (GaN) to realize new energy-saving modules and components. At the same time, this research strengthens the technological sovereignty and independence of Germany as well as Europe: In addition to significant energy savings through efficient high-frequency and power electronics, our developments contribute substantially to launching innovative applications in the field of Industry 4.0 (human-robot collaboration), space travel (satellite communication) up to quantum technologies.

Interview: Wie gelingt die Entwicklung eines energieeffizienten 6G-Mobilfunks?	12
Interview: How do we succeed in developing energy-efficient 6G mobile communication?	
Energieeffiziente Elektronik für eine klimaneutrale Zukunft	16
Energy-efficient electronics for a climate neutral future	
Berichte unserer Forschenden: Terahertz-Funktechnologie für 6G; MOCVD-AIScN für nachhaltige Elektronik; Emissionsfreie Zukunft mit Niedervoltagelektronik	20
Articles from our scientists: Terahertz radio technologies for 6G; MOCVD-AIScN for sustainable electronics; Emission-free future with low-voltage power electronics	
Interview: Kann Satellitentechnik souverän und nachhaltig sein?	32
Interview: Can satellite technology be sovereign and sustainable?	
Schlüsselfaktor Mikroelektronik für technologische Souveränität	36
Key factor microelectronics for technological sovereignty	
Berichte unserer Forschenden: IC- und optische Technologien europäischen Ursprungs; Hochfrequenzelektronik für nachhaltige Erdbeobachtung; Radar für sichere MRK	40
Articles from our scientists: IC and optical technologies of European origin; High-frequency electronics for sustainable Earth observation; Radar for secure HRC	
Zukunftstechnologie Quantencomputing	52
Future technology quantum computing	
Unsere Partner und Kooperationen	54
Our Partners and Cooperations	
Unsere Infrastruktur und Dienstleistungen	66
Our Infrastructure and Services	

Wie gelingt die Entwicklung eines energieeffizienten 6G-Mobilfunks?

How do we succeed in developing energy-efficient 6G mobile communication?

Während der Ausbau des 5G-Mobilfunknetzes in Deutschland immer weiter vorankommt, arbeiten Forschung und Industrie bereits an der nächsten Mobilfunkgeneration: 6G. Im Interview sprechen Wolfgang Templ, Abteilungsleiter »Radio Transceiver Devices« bei Nokia Bell Labs, und Michael Mikulla, Geschäftsfeldleiter Leistungselektronik am Fraunhofer IAF, über den Aspekt der Energieeffizienz sowie über den Nutzen, die Risiken und die Hürden des zukünftigen Mobilfunks.

Nachhaltigkeit und 6G – ist das nicht ein Widerspruch?

Templ — Nein, ganz im Gegenteil. 6G zielt ja auf die Verbesserung der Nachhaltigkeit und insbesondere der Energieeffizienz. Das ist auch aus technischen Gründen wichtig. Da überschüssige Energie weggekühlt werden muss, sind viele Systeme groß, schwer und dadurch teuer. 5G hat bereits einen Fortschritt um den Faktor zehn gebracht und wir gehen davon aus, dass wir bei 6G noch eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz erreichen.



While the rollout of the 5G mobile network in Germany is making ever greater progress, research and industry are already working on the next generation of mobile communications: 6G. In this interview, Wolfgang Templ, Group Manager "Radio Transceiver Devices" at Nokia Bell Labs, and Michael Mikulla, Head of the business unit Power Electronics at Fraunhofer IAF, discuss energy efficiency as well as the benefits, risks and hurdles of the future mobile communication.

Sustainability and 6G — is that not a contradiction?

Templ — No, quite the opposite. After all, 6G aims to improve sustainability and energy efficiency in particular. This is also important for technical reasons. Since excess energy has to be cooled away, many systems are large, heavy and therefore expensive. 5G has already brought progress by a factor of ten, and we expect to achieve even greater improvements in energy efficiency with 6G.

Mikulla — And, of course, it also depends on the application. For example, if you can have operations and repairs done remotely through 6G technologies and save on travel, that is a meaningful contribution. There are many application scenarios where you need the bandwidth, localization capabilities and latency of 6G which can save a lot of energy elsewhere.

Templ — Exactly! Lufthansa in Hamburg, for instance, is already using ultra-high-definition video calls for remote aircraft maintenance. Technicians no longer have to make extra trips. The leverage aspect is huge.

*Dr. Wolfgang Templ, Abteilungsleiter »Radio Transceiver Devices« bei Nokia Bell Labs
Dr. Wolfgang Templ, Group Manager "Radio Transceiver Devices" at Nokia Bell Labs*

Mikulla — Und natürlich kommt es auch auf die Anwendung an. Wenn man durch 6G-Technologien beispielsweise Operationen und Reparaturen remote durchführen lassen kann und sich damit das Reisen spart, ist das ein sinnvoller Beitrag. Es gibt viele Anwendungsszenarien, in denen man die Bandbreite, Lokalisierungsmöglichkeiten und Latenzzeiten von 6G braucht und damit woanders viel Energie einsparen kann.

Templ — Genau! Beispielsweise nutzt die Lufthansa in Hamburg bereits ultrahochauflösende Videocalls für die Flugzeugwartung aus der Ferne. Die Techniker müssen nicht mehr extra anreisen. Der Aspekt der Hebelwirkung ist gewaltig.

Wo wird in Mobilfunksystemen die meiste Energie verbraucht?

Templ — In klassischen Systemen unterhalb von 6 GHz verbraucht der Transceiver selbst am meisten. Vor 15 Jahren hatten wir noch Effizienzwerte von ca. 20 Prozent – das heißt, dass nur maximal 20 Prozent der Energie genutzt werden konnte. Inzwischen können wir zumindest in der Forschung bis zu 70 Prozent erreichen. Bei hohen Frequenzen von über 26 GHz und im Millimeterwellenbereich kommen wir allerdings lediglich auf etwa zehn Prozent. Diese Systeme haben eine ganz andere Netzwerkarchitektur; sie bestehen aus vielen kleinzelligen Systemen mit kurzen Reichweiten und obwohl die einzelnen Transceiver eine niedrige Ausgangsleistung haben, ist der Verbrauch in der Summe dann doch enorm. An diesem Punkt arbeiten wir gemeinsam mit dem Fraunhofer IAF daran, eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz in Richtung 20 Prozent zu erreichen.

Mikulla — Im Projekt »Edge Limit – Green ICT« versuchen wir herauszufinden, wieviel CO₂ wir unter realen Bedingungen einsparen könnten. Bei 30 GHz sind die 20 Prozent auf MMIC-Ebene durchaus denkbar und in größeren Stückzahlen produzierbar. Aber mit der Steigerung der Frequenz nimmt die Effizienz deutlich ab. Also wenn wir die Frequenz verdoppeln, sind wir wahrscheinlich nur noch bei zehn Prozent.

Templ — Auch die digitale Signalverarbeitung und Netzwerksteuerung sind sehr energieaufwändig. Früher wurde eine Basisstation beispielsweise nicht dynamisch der Verkehrslast angepasst, um dem unterschiedlichen Verkehrsaufkommen gerecht zu werden. Nachts um zwei Uhr gibt es natürlich deutlich weniger Gespräche als tagsüber. Diese Schwankungen der Netzauslastung entsprechend auszunutzen, ist ein ganz wichtiger Beitrag zu mehr Energieeffizienz.



*Dr. Michael Mikulla, Geschäftsfeldleiter
Leistungselektronik am Fraunhofer IAF
Dr. Michael Mikulla, Head of the business unit
Power Electronics at Fraunhofer IAF*

Where is the most energy consumed in mobile communication systems?

Templ — In classic systems below 6 GHz, it is in the transceiver itself. 15 years ago, we still had efficiency values of around 20 percent — which means that only a maximum of 20 percent of the energy could be used. Now, at least in research, we can achieve up to 70 percent. At high frequencies of over 26 GHz and in the millimeter wave range, however, we only achieve about ten percent. These systems have a completely different network architecture; they consist of many small-cell systems with short ranges, and although the individual transceivers have a low output power, the consumption in total is enormous. At this point, we are working together with Fraunhofer IAF to achieve a significant increase in energy efficiency towards 20 percent.

Mikulla — In the "Edge Limit — Green ICT" project, we are trying to find out how much CO₂ we could save under real conditions. At 30 GHz, the 20 percent is quite possible at the MMIC level and can be produced in larger quantities. But as the frequency increases, the efficiency decreases significantly. So, if we double the frequency, we are probably only at ten percent.



read the full
interview



Herr Templ, bei Nokia Bell Labs heißt es: »6G soll die menschliche, physische und digitale Welt verbinden.« Was bedeutet das?

Templ — Im Prinzip geht es darum, dass sich die Technologie weiter dem Menschen anpasst und wir eine engere Verbindung von Mensch und Maschine bekommen. In der Praxis sind das zum Beispiel sogenannte Wearables, die man in der Kleidung oder auf der Haut tragen kann. In der ferneren Zukunft geht das in Richtung Bioimplants und Brain Computer Interface. Heute klingt das für uns noch sehr fremd, aber solche Technologien könnten im medizinischen Bereich sehr viel ermöglichen. Außerdem gehören auch Konzepte wie Joint Communication and Sensing, die Verbindung von Sensorik und Kommunikation, Digital Twins, die natürliche Mensch-Maschine-Interaktion oder die holografische Telepräsenz dazu. Videokonferenzen, wie wir sie gerade führen, werden viel naturgetreuer stattfinden können. Je mehr die virtuelle mit der realen Welt verknüpft wird, desto stärker müssen auch die Themen Security und Trustworthiness in diese Technologien eingewoben werden.

Das hört sich an, als würden zukünftig Maschinen vermehrt die Kontrolle übernehmen.

Templ — Ich kann sehr gut verstehen, wenn es uns bei manchen Begriffen unheimlich wird – denn, wie die meisten Technologien, können auch diese missbraucht werden. Angesichts ihres überwiegenden Nutzens sollte man derartige Technologien nicht bannen, sondern dieses Problem kommunizieren und verantwortungsvoll damit umgehen. Nur dann, wenn ein Missbrauch wahrscheinlich und die Konsequenzen gravierend wären, muss man sich eventuell dazu entscheiden, auf eine Technologie zu verzichten. Aber ich fürchte, dass jede Technologie, die umgesetzt werden kann, auch realisiert wird. Und wenn Menschen aufgrund ihres Verantwortungsgefühls die Finger davon lassen, dann machen es andere.

Templ — Digital signal processing and network control are also very energy-intensive. In the past, for example, a base station was not dynamically adjusted to the traffic load in order to cope with varying traffic volumes. At 2 o'clock at night, there are naturally far fewer calls than during the day. Exploiting these fluctuations in network utilization accordingly is a very important contribution to greater energy efficiency.

Mr. Templ, Nokia Bell Labs says: "6G is designed to connect the human, physical and digital worlds." What does that mean?

Templ — In principle, it is about technology adapting further to people and giving us a closer human-machine connection. In practice, this means wearables that can be worn in clothing or on the skin. In the more distant future, this will move towards bioimplants and brain computer interfaces. Today, this still sounds very strange to us, but such technologies could make a great deal possible in the medical field. In addition, concepts such as Joint Communication and Sensing, the combination of sensor technology and communication, Digital Twins, natural human-machine interaction or holographic telepresence are also part of this. Video conferencing, like the one we are having right now, will be able to be done in a much more true-to-life way. The more the virtual world is linked with the real world, the more the issues of security and trustworthiness must be woven into these technologies.

It sounds like machines will increasingly take control in the future.

Templ — I can understand very well if some terms make us feel uneasy — because, like most technologies, they can also be misused. Given their overwhelming benefits, we should not ban such technologies, but we must communicate this problem and deal with it responsibly. Only if misuse is likely and the consequences would be severe, may you have to decide not to use a technology. But I fear that any technology that can be realized will be realized. And if people refrain from it due to their sense of responsibility, someone else will do it.



An welchen Schlüsseltechnologien arbeiten wir gerade?

Mikulla — Am Fraunhofer IAF entwickeln wir Komponenten und können auf einem technologisch hohen Niveau High-End-Lösungen anbieten, die man noch nicht kaufen kann. Natürlich können wir keine Netze ausrüsten, aber für Unternehmen wie Nokia können wir im Labor Dinge unter realistischen Bedingungen ausprobieren. Das verschafft einen gewissen Vorsprung, oder anders gesagt, man nimmt eine Abkürzung in der Entwicklung komplexer Systeme. Außerdem entwickeln wir hochwertige Komponenten für Messgeräte, die man für die Entwicklung von Bauteilen braucht. Hier planen wir eine sehr enge Kooperation mit Rohde & Schwarz im Rahmen von »IPCEI«. Und wir werden dieses Jahr im Projekt »EIVE« gemeinsam mit unseren Partnern einen GaN-basierten Leistungsverstärker ins All schießen, der zum ersten Mal im E-Band und unter realen Bedingungen höhere Datenströme übertragen soll.

Wo liegen die größten technologischen Herausforderungen bei der 6G-Entwicklung?

Templ — Ganz allgemein gilt: »Je höher Frequenz und Bandbreite, desto geringer ist die Reichweite.« Die Ausbreitungsbedingungen nähern sich denen der optischen Sichtverbindungen an und das macht die Konzeption der Systemarchitektur sehr schwierig. Außerdem muss die Architektur der Datenverarbeitung optimiert werden, stets unter Beachtung des allumspannenden Themas Energieeffizienz.

Was kommt nach 6G?

Beide — 7G! (lachen)

Geht es überhaupt noch schneller?

Mikulla — Letztens habe ich gehört, dass, als Goethe damals mit der Postkutsche in 14 Tagen von Karlsbad nach Italien gereist war, er von einer »unmenschlichen Geschwindigkeit« gesprochen hat!

Templ — Vor etwa zehn Jahren hieß es noch, die schnellste Möglichkeit, 10 TB Daten von München nach Hamburg zu transportieren, wäre immer noch der Transport der Festplatte mit dem Auto. Heute ist das nicht mehr so, unsere Netze schaffen das.

Mikulla — Wir als Menschheit passen uns an und wir verändern uns auch. Die Generation unserer Kinder wird eine andere sein als unsere. Davor muss man keine Angst haben, aber man kann es nicht vorhersehen.

What key technologies are we working on right now?

Mikulla — At Fraunhofer IAF, we develop components and can offer high-end solutions at a technologically high level that cannot be bought yet. Of course, we cannot equip networks, but for companies like Nokia we can try things out in the lab under realistic conditions. That gives us a certain edge, or in other words, it allows us to take a shortcut in the development of complex systems. We also develop high-quality components for measuring devices that are needed for the development of components. Here, we are planning a very close cooperation with Rohde & Schwarz within "IPCEI". And this year, together with our partners, we will launch a GaN-based power amplifier into space in the "EIVE" project, which will transmit higher data streams for the first time in the E band and under real conditions.

What are the biggest technological challenges in 6G development?

Templ — Generally speaking: "the higher the frequency and bandwidth, the shorter the range." Propagation conditions are approaching those of optical line-of-sight links and this makes the design of the system architecture very difficult. In addition, the architecture of the data processing must be optimized, always taking into account the all-embracing topic of energy efficiency.

What comes after 6G?

Both — 7G! (laughing)

Is it even possible to go any faster?

Mikulla — The other day I heard that when Goethe traveled by stagecoach from Karlsbad to Italy in 14 days, he spoke of an "inhuman speed!"

Templ — About ten years ago, it was still said that the fastest way to move 10 TB of data from Munich to Hamburg would still be to transport the hard drive by car. Today, that is no longer the case; our networks can handle it.

Mikulla — We as humanity are adapting and we are also changing. Our children's generation will be different from ours. You don't have to be afraid of that, but you can't predict it.

Energieeffiziente Elektronik und neue Ansätze für eine klimaneutrale Zukunft

Energy-efficient electronics and new approaches for a climate-neutral future

Sei es zuhause, im Büro oder unterwegs: Elektronik spielt überall eine wichtige Rolle. Sie ist die Grundlage unserer modernen Gesellschaft und der Digitalisierung. Die technologischen Möglichkeiten, die Nutzung elektronischer Geräte sowie die Anforderungen an Performance und Funktionalität nehmen dabei immer weiter zu. Damit muss jedoch nicht zwangsläufig der Energieverbrauch steigen, denn das Optimierungspotenzial elektronischer Komponenten hinsichtlich Effizienz und Leistungsfähigkeit ist noch längst nicht ausgeschöpft. Darüber hinaus können innovative Ansätze in der Mikro- und Nanoelektronik dazu beitragen, die Klimaschutzziele zu erreichen und sowohl Energieverbrauch als auch CO₂-Ausstoß zu minimieren. Wie das gelingen kann, zeigen aktuelle Forschungsprojekte des Fraunhofer IAF.

Whether at home, in the office or on the road: Electronics play a key role everywhere. It is the foundation of our modern society and of digitization. The technological possibilities, the use of electronic devices and the demands on performance and functionality are constantly increasing. However, this does not necessarily mean that energy consumption needs to increase, because the potential for optimizing electronic components in terms of efficiency and performance is far from exhausted. Innovative approaches in microelectronics and nanoelectronics can help to meet climate protection targets and minimize both energy consumption and CO₂ emissions. Current research projects of Fraunhofer IAF show how this can be achieved.



Energiesparer von morgen

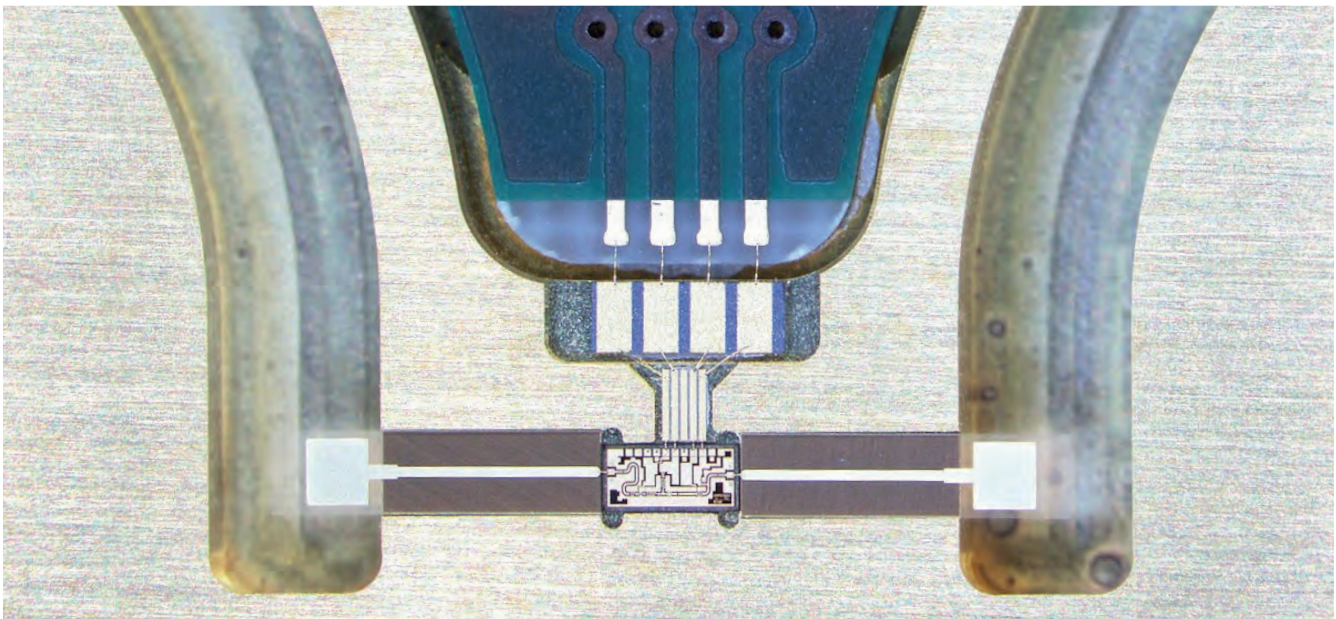
Im Projekt »[ElKaWe](#)« forscht das Fraunhofer IAF unter anderem am emissionsfreien Kühlschrank von morgen, der ohne klimaschädliche Kältemittel auskommt. Gemeinsam mit fünf Fraunhofer-Instituten entwickeln wir elektrokalendarische Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen. Diese versprechen einen deutlich höheren Wirkungsgrad, der die Verbreitung von Wärmepumpen für die Gebäudeklimatisierung befördern wird. In der Kältetechnik hat das Forschungsteam vor allem die industrielle Kühltechnik, Fahrzeugklimatisierung, Server und Schaltschrankkühlungen sowie Laborkühlschränke, aber auch die Haushaltskühltechnik im Blick. Das Fraunhofer IAF entwickelt die elektrische Ansteuerung der elektrokalendarischen Zellen und hat dafür maßgeschneiderte Halbleiterbauelemente entworfen ([siehe S. 28–31](#)).

Wie neue Technologien und digitale Verfahren nicht nur effizient sind, sondern selbst zum Energiesparen beitragen können, zeigt das 2021 erfolgreich abgeschlossene Fraunhofer-Leitprojekt »[ZEPOWEL](#)«, in dem Forschende des Fraunhofer IAF Hardware mitentwickelt haben. Die Projektergebnisse zeigen, wie Sensorsysteme im »Internet der Dinge« extrem wenig Strom verbrauchen oder komplett autonom funktionieren und somit bundesweit bis zu 20 Prozent der Kohlendioxid-Emissionen einsparen können.

Energy saver of tomorrow

In the project "[ElKaWe](#)," Fraunhofer IAF is researching, among other things, the emission-free refrigerator of tomorrow, which does not require any climate-damaging refrigerants. Together with five Fraunhofer institutes we develop electrocaloric heat pumps for heating and cooling. These promise significantly higher efficiency, which will promote the spread of heat pumps for building air conditioning. In the field of refrigeration, the research team is primarily focusing on industrial refrigeration, vehicle air conditioning, server and control cabinet cooling and laboratory refrigerators, but also on household refrigeration. Fraunhofer IAF is developing the electrical control of the electrocaloric cells and has designed customized semiconductor components for this purpose ([see p. 28–31](#)).

The Fraunhofer lead project "[ZEPOWEL](#)," which was successfully completed in 2021 and in which researchers from Fraunhofer IAF helped to develop hardware, shows how new technologies and digital processes are not only efficient but can also contribute to saving energy themselves. The project results show how sensor systems in the Internet of Things can consume extremely little electricity or function completely autonomously and thus save up to 20 percent of carbon dioxide emissions nationwide.



Nahaufnahme der GaN-MMIC des Fraunhofer IAF im Demonstratormodul, das im Fraunhofer-Leitprojekt »ZEPOWEL« entwickelt wurde. Die Projektergebnisse zeigen, wie Sensorsysteme im Internet der Dinge extrem wenig Strom verbrauchen und bundesweit bis zu 20% der Kohlendioxid-Emissionen einsparen können.

Close-up of the GaN MMIC by Fraunhofer IAF in the demonstrator module developed in the Fraunhofer lead project "ZEPOWEL." The project results show how sensor systems in the Internet of Things can consume extremely little power and save up to 20% of carbon dioxide emissions nationwide.

Grüne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)

Das Fraunhofer IAF arbeitet in mehreren Projekten und Netzwerken an neuen Mobilfunklösungen, die sowohl Energieeffizienz und Nachhaltigkeit als auch Leistungsfähigkeit im Blick haben. Wie das Fraunhofer IAF mit innovativen Terahertz-Funktechnologien und nachhaltigen InGaAs-HEMT-Technologien zum 6G-Mobilfunk der Zukunft beiträgt, lesen Sie auf [S. 20–23](#). Im preisgekrönten Projekt »EdgeLimit – Grenzbetrachtung der Leistungselektronik in modernen Edge-Cloud Systemen« arbeiten die Fraunhofer-Institute IAF und IIS sowie das INATECH der Universität Freiburg an energiesparenden Mobilfunkbasisstationen. Das Verbundprojekt will auf Basis von Aluminiumscandiumnitrid (AlScN) die Leistungsdichte und Effizienz von Hochfrequenzverstärkern in 5G-Basisstationen deutlich verbessern und damit nachhaltig zu einer ressourcenschonenderen IKT beitragen. AlScN, das mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOCVD) erstmals am Fraunhofer IAF hergestellt wurde, verspricht aufgrund seiner Eigenschaften eine Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit im Vergleich zu bereits existierender Elektronik ([S. 24–27](#)).

Green Information and Communication Technology (ICT)

Fraunhofer IAF is working in several projects and networks on new mobile radio solutions that focus on energy efficiency and sustainability as well as performance. How Fraunhofer IAF contributes to the 6G mobile communications of the future with innovative terahertz radio technologies and sustainable InGaAs HEMT technologies can be read on [p. 20–23](#). In the award-winning project "EdgeLimit — Frontier Analysis of Power Electronics in Modern Edge Cloud Systems," the Fraunhofer Institutes IAF and IIS and the University of Freiburg's INATECH are working on energy-saving mobile base stations. Based on aluminum scandium nitride (AlScN), the joint project aims to significantly improve the power density and efficiency of high-frequency amplifiers in 5G base stations and thus make a sustainable contribution to more resource-efficient ICT. AlScN, which was produced for the first time at Fraunhofer IAF using metal organic vapor phase epitaxy (MOCVD), promises to increase efficiency and sustainability compared to existing electronics due to its properties ([p. 24–27](#)).

Stimmen unserer Partner

Voices from our Partners



Seit vielen Jahren arbeitet der Technologiekonzern Rohde & Schwarz eng mit dem Fraunhofer IAF zusammen. Gemeinsam gelingt es uns, neueste Forschungsergebnisse auf kürzestem Weg in innovative industrielle Anwendungen zu überführen. Aktuell erforschen wir beispielsweise Verbindungshalbleiter, die ein wichtiger Bestandteil moderner Kommunikationssysteme und unerlässlich für die Hochfrequenzmesstechnik sind. Bei der Weiterentwicklung dieser Technologien nimmt das Fraunhofer IAF eine zentrale Rolle in Europa ein.

The collaboration between Fraunhofer IAF and Rohde & Schwarz is well established. Together, we manage to transfer the latest research results into innovative industrial applications in the shortest possible time. We are currently working on compound semiconductor components as they play a major role in modern communication systems and are essential for radio frequency test and measurement solutions. By constant further development of the compound semiconductor technologies, Fraunhofer IAF has become a leading research facility in Europe.



Robert Ziegler
Director MMIC Development
Corporate R&D
Rohde & Schwarz GmbH &
Co. KG



Eine der Haupteinschränkungen bei der Einrichtung von Funkverbindungen mit großer Reichweite im E-Band liegt heute in der Leistung der Leistungsverstärker (PA). Die vom Fraunhofer IAF entwickelten PAs mit ihrem erstklassigen 0,1 μm GaN-Prozess überwinden diese Einschränkung und ermöglichen die Entwicklung einer neuen Generation von hochintegrierten und leistungsstarken Lösungen.

Today, one of the main limitations in the deployment of long-reach radio links at E band is due to the performance of the power amplifiers (PA). PAs developed by Fraunhofer IAF, with its best-in-class 0.1 μm GaN process, overcome this limitation and enable the development of a new generation of highly integrated and high-power solutions.

Dr. Alessandro Fonte
Senior Engineer, Member of
Technical Staff R&D Laboratory
SIAE Microelettronica



Energieeffizienz und Nachhaltigkeit spielen auch in der Leistungselektronik eine immer größere Rolle. Mit der Entwicklung von kompakten Invertermodulen auf GaN-Basis kann das Fraunhofer IAF die E-Mobilität einen entscheidenden Schritt voranbringen.

Energy efficiency and sustainability play an increasingly important role in power electronics. With the development of compact GaN-based inverter modules, Fraunhofer IAF can take e-mobility a decisive step forward.



Dr. Kristine Bentz
Leiterin Forschungsförderung
Vector Stiftung

Mit Terahertz-Funktechnologien zum 6G-Mobilfunk der Zukunft

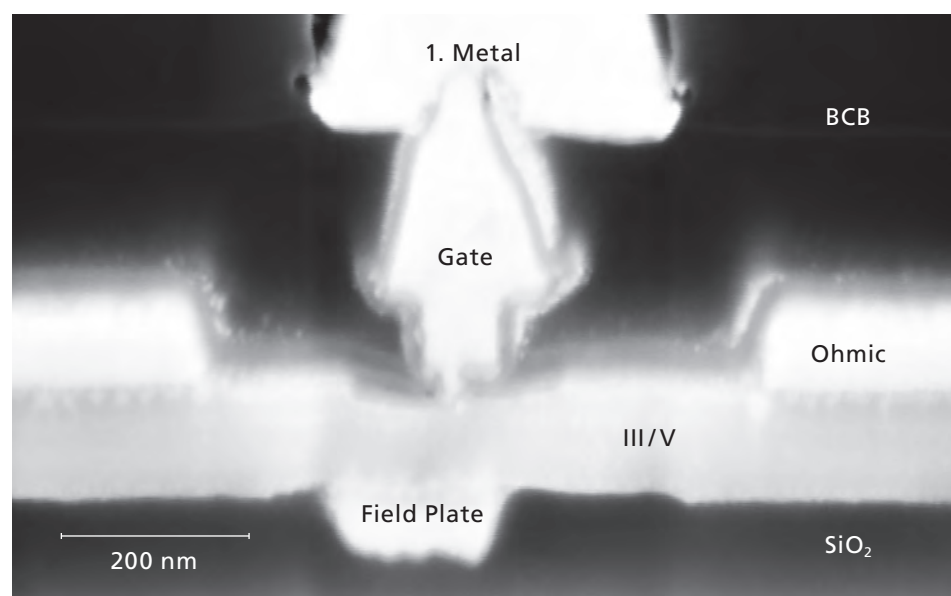
Terahertz radio technologies for the 6G mobile communications network of the future

Die Entwicklung des Mobilfunks der sechsten Generation (6G) setzt in vielen Bereichen des Netzes auf neue Funktechnologien, die im bisher weitgehend ungenutzten Terahertz-(THz-)Frequenzband von 100 GHz bis über 500 GHz funktionieren. Damit sollen Funkzellen, Netzknoten und drahtlose Verbindungen mit sogenannten Superbandbreiten realisiert werden, die aggregierte Übertragungsraten bis zu mehreren Terabit pro Sekunde (Tbit/s) erreichen können und so vollkommen neue Anwendungen in unser berufliches wie privates Leben bringen – zum Beispiel die Nutzung von Virtueller Realität und Künstlicher Intelligenz im Alltag. Mit seinen sub-35-nm-InGaAs-HEMT-Technologien auf Silizium- und Galliumarsenid-Substraten sowie effizienten Galliumnitrid-Leistungstransistoren gestaltet das Fraunhofer IAF die Forschung und Entwicklung von 6G aktiv mit.

The development of many aspects of the sixth-generation (6G) mobile communications network relies on new wireless technology that can function within the — currently largely unused — terahertz (THz) frequency band from 100 GHz to more than 500 GHz. This will be used to help the creation of radio cells, network nodes and “super-bandwidth” wireless connections that can reach aggregated transmission rates up to a range of several terabytes per second (Tbit/s), facilitating completely new applications in our professional and personal lives, such as making virtual reality and artificial intelligence commonplace. Fraunhofer IAF is playing an active role in shaping the research and development of 6G through its sub 35 nm InGaAs HEMT technologies on silicon and gallium arsenide substrates along with efficient gallium nitride power transistors.

Abb. 1: Querschnitt eines auf Siliziumsubstrat gefertigten Thin-Body-InGaAs-HEMTs mit 20 nm Gate-Fußlänge und Rückseiten-Gate

Fig. 1: Cross-section of a thin-body InGaAs HEMT produced on silicone substrate with 20 nm gate length and back-gate





Noch sind die visionären Möglichkeiten der THz-Kommunikation mit großen technologischen Herausforderungen verbunden, die sich vom Transistorbauelement, der Entwicklung integrierter Schaltungen, der Modulintegration bis hin zu neuen Antennenkonzepten und den Netzchnittstellen erstrecken. Das Fraunhofer IAF arbeitet bereits seit zehn Jahren an diesen Herausforderungen, angefangen bei den ersten Hardwarekomponenten und Feldversuchen für einen THz-Backhaul oder den THz-Personal-Area-Network-Bereich. So konnte das Fraunhofer IAF zum Beispiel mit Hilfe seiner 35-nm-mHEMT-Technologie bereits 2012 experimentell zeigen, dass im THz-Frequenzband bei 240 GHz eine drahtlose hochbitratige Datenübertragung über 1 km Entfernung realisierbar ist.

Nachhaltigere InGaAs-HEMT-Technologien für 6G

Die Anforderungen an den Integrationsgrad und die Funktionalität, zum Beispiel im Schaltungsbereich, sind seitdem durch die Systemkonzepte für die Zeit nach 5G («Beyond 5G») stark gestiegen. Dementsprechend hat das Fraunhofer IAF die InGaAs-HEMT-Technologie mit Hochdruck weiterentwickelt: Zum einen wurden in den letzten Jahren die Verdrahtungsebenen der Integrierten Schaltungen mit einem modernen Back-End-of-Line-(BEOL)-Prozess auf vier Metallisierungslagen erweitert, die nun den Entwurf von kompakten hochintegrierten THz-Schaltungen erlauben. Große Anstrengungen wurden auch unternommen, den etablierten metamorphen InGaAs-HEMT-Prozess erstmals von Galliumarsenid auf Siliziumsubstrate zu transferieren, um damit die Einbringung von gesundheitlich problematischem Galliumarsenid in die Umwelt zu vermeiden. 2021 konnte mit dieser neuen Technologie-Plattform der weltweit erste InGaAs-HEMT mit 20 nm Gatelänge auf einem isolierenden Siliziumsubstrat mit Rückseiten-Gate (HEMT-on-Insulator) realisiert werden. Damit konnten Verstärkerschaltungen bis 700 GHz mit mehr als 20 dB Verstärkung demonstriert werden (Abb. 1).

There are still major technological challenges associated with the visionary possibilities of THz communication, ranging from the transistor, the development of integrated circuits, to their module integration with antennas and network interfaces. Fraunhofer IAF has already committed ten years of work to these challenges, starting with the initial hardware components and field tests for a THz backhaul and the THz personal area network. For example, back in 2012, Fraunhofer IAF successfully used its 35 nm mHEMT technology to show experimentally that wireless high-bit-rate data transmission can be achieved over a distance of 1 km at 240 GHz, within the THz frequency band.

More sustainable InGaAs HEMT technologies for 6G

Since then, the system concepts of the post-5G era (“Beyond 5G”) have increased the required degree of circuit integration and functionality significantly. In response, Fraunhofer IAF has been working hard to further develop the InGaAs HEMT technology: For one thing, the interconnect levels of integrated circuits have been expanded to four metallization layers using a modern back-end-of-line (BEOL) process, facilitating the design of compact and highly integrated THz circuits. A great deal of effort has also gone into transferring the established metamorphic InGaAs HEMT process from gallium arsenide to silicon substrates for the first time in order to avoid introducing gallium arsenide into the environment, which would pose health risks. In 2021, this new technology platform was successfully used to create the world’s first InGaAs-HEMT with gate lengths of 20 nm on an insulating silicon substrate with back-gate (HEMT-on-insulator), thereby demonstrating amplifier circuits of up to 700 GHz with power gain of more than 20 dB (fig. 1).

Energieeffiziente rekonfigurierbare THz-Frontends

Motiviert durch die erste klassische THz-Punkt-zu-Punkt-Richtfunkverbindung, die 2012 am Fraunhofer IAF gelang, hat unser Institut mit seinen Forschungs- und Industriepartnern in den letzten Jahren auch maßgeblich die Umsetzung neuer innovativer Systemkonzepte im THz-Bereich vorangetrieben. Mit dem Konzept der virtuellen Glasfaser wurde zum Beispiel die dual-polarisierte kohärente Übertragungstechnik im THz-Fronthaul-Bereich mit DSP-freien elektrooptischen Schnittstellen entwickelt. Der erste Prototyp mit integrierter kohärenter Glasfaserschnittstelle konnte 2021 in Kooperation mit dem Fraunhofer HHI erstmals vom Labortisch in eine THz-Außeneinheit transferiert werden (Abb. 2). Zuvor gelang es den Projektpartnern, über eine 500 m lange Freiraumstrecke erstmals drahtlos [eine rekordhafte Übertragungsleistung von 100 Gbit/s im THz-Bereich](#) zu realisieren. In den Fokus gerückt ist in den vergangenen zwei Jahren auch die Idee von Picozellen-Mobilfunknetzen, die über rekonfigurierbare Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen im THz-Bereich drahtlos angebunden sind. Hierzu haben Forschende des Fraunhofer IAF intensiv an Chipsätzen zur Realisierung von THz-Frontends mit diskret geschalteter Strahlschwenkung und dazu passenden integrierten Transceiver-Schaltungen gearbeitet (Abb. 3).

Energy-efficient reconfigurable THz front ends

Motivated by the first THz point-to-point directional radio connection, which Fraunhofer IAF achieved in 2012, we have made significant progress in implementing new innovative system designs at THz frequencies, in collaboration with our research and industrial partners. For example, as part of the virtual optical fiber concept for the THz fronthaul, the dual-polarized coherent transmission technology with DSP-free electro-optical interfaces was developed using the concept of virtual fiber. In collaboration with Fraunhofer HHI, the first prototype with integrated coherent fiber interfaces was successfully transferred from the lab into a THz outdoor unit for the very first time in 2021 (fig. 2). Previously, the project partners succeeded in realizing [a wireless transmission of record-like 100 Gbit/s in the THz range for the first time](#) over a 500 m long open space link. In the past two years, the focus expanded to the idea of picocell mobile networks, which are linked wirelessly within the THz area via reconfigurable point-to-multipoint connections. For this purpose, Fraunhofer IAF researchers have been working intensively on chipsets that can be used to create THz frontends with discretely switched beams, and the corresponding integrated transceiver circuits (fig. 3).

Abb. 2: Erste autonom arbeitende 300-GHz-Funkeinheit mit integrierter elektrooptischer Glasfaserschnittstelle, die Drahtlos-Übertragungen bis 100 Gbit/s ermöglicht

Fig. 2: The first autonomous 300 GHz wireless outdoor unit with integrated electro-optical fiber interface that enables wireless transmission up to 100 Gbit/s



Gerade wenn die Lösungen mit großen Stückzahlen in zukünftigen 6G-Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen sollen, spielt die Energieeffizienz eine immer wichtigere Rolle. Mit den am Fraunhofer IAF entwickelten Telemetrieschnittstellen soll deshalb zukünftig auch ein datenabhängiges intelligentes Management des Energieverbrauchs möglich werden. Mehr und mehr der erwähnten Forschungsaktivitäten werden zudem gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführt, was der großen Bedeutung der THz-Technologie für 6G zu verdanken ist. Das Fraunhofer IAF bietet Kunden und Partnern dabei mit seiner langjährigen Erfahrung und seinen verschiedenen führenden THz-Technologien einen schnellen Einstieg und kompetente Unterstützung bei der Umsetzung neuer 6G-Systemkonzepte.

Dr. Thomas Merkle

Stellvertretender Geschäftsfeldleiter Hochfrequenzelektronik
Deputy Head of Business Unit High Frequency Electronics

Particularly when the solutions are to be used in large numbers in future 6G mobile networks, energy efficiency plays an increasingly important role. This is why the telemetry interfaces developed at Fraunhofer IAF should also facilitate data-dependent intelligent management of energy consumption in the future. An increasing number of the research activities mentioned are being carried out in collaboration with industrial partners, due to the great importance of the THz technology for 6G. Because of the many years of experience and numerous leading THz technologies at Fraunhofer IAF, we can offer customers and partners rapid entry into this field and skilled support in the implementation of new 6G system designs.

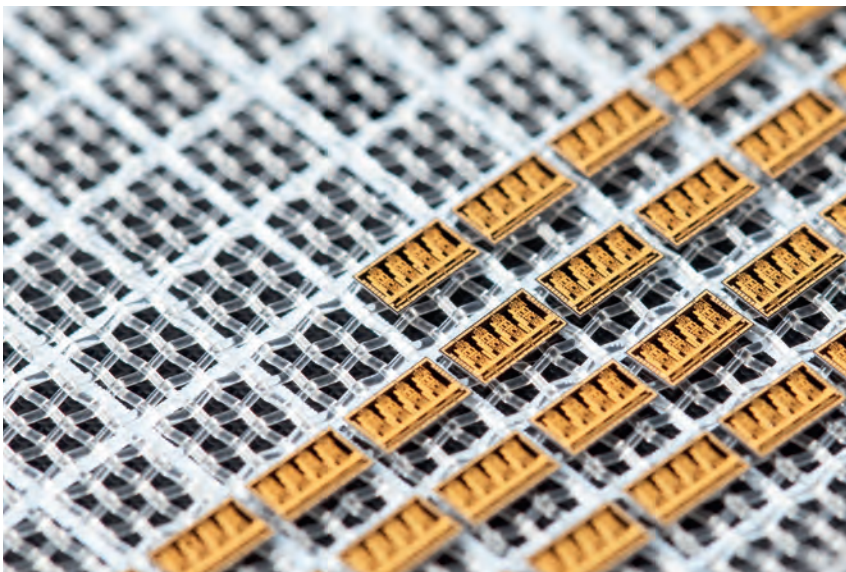


Abb.3: MMICs für die Punkt-zu-Mehrpunkt-THz-Funkkommunikation, entwickelt in Kooperation mit LG Electronics

Fig. 3: Power amplifier MMICs for THz point-to-multipoint communication developed within the collaborative R&D with LG Electronics

MOCVD-Aluminiumscandium-nitrid für nachhaltige Elektronik

MOCVD aluminum scandium nitride for sustainable electronics

Hochfrequenz- und Hochleistungstransistoren werden für industrielle Anwendungen wie Datenübertragung, Satellitenkommunikation sowie für Radarsysteme oder autonomes Fahren benötigt. Die hohe Ladungsträgerdichte, die mit dem Materialsystem Aluminiumscandiumnitrid (AlScN) erreicht werden kann, verspricht eine Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit im Vergleich zu bereits existierender Elektronik. Die erstmals am Fraunhofer IAF realisierte [Herstellung von AlScN mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie \(MOCVD\)](#) erreicht eine für industrielle Anwendungen gleichermaßen benötigte Qualität wie kosteneffiziente Produktivität. AlScN/GaN-basierte Transistoren mit einer hohen Steilheit von knapp 500 mS/mm sowie einer Stromdichte von über 1700 mA/mm wurden bereits demonstriert.

High-frequency and high-power transistors are required for industrial applications such as data transmission, satellite communication, radar systems and autonomous driving. The high charge carrier density that can be achieved using an aluminum scandium nitride (AlScN) material system promises to increase efficiency and sustainability compared to electronics that currently exist. The [production of AlScN by means of metalorganic chemical vapour deposition \(MOCVD\)](#), which was achieved for the first time at Fraunhofer IAF, provides both the level of quality needed for industrial applications and cost-efficient productivity. AlScN/GaN-based transistors with a high conductance of nearly 500 mS/mm and a current density of over 1700 mA/mm have already been demonstrated.



Integriert in Hochfrequenztransistorstrukturen übertrifft das Materialsystem AlScN den physikalischen Leistungshorizont bisher verwendeter Materialien hinsichtlich Bandbreite und erzielbarer Leistung.«

Isabel Streicher
(Epitaxie Nitride)
(nitride epitaxy)

Sebastian Krause
(Mikroelektronik Schaltungen)
(microelectronics circuitry)

“When integrated into high-frequency transistor structures, the AlScN material system exceeds the physical performance range of materials used until now in terms of bandwidth and achievable power.”

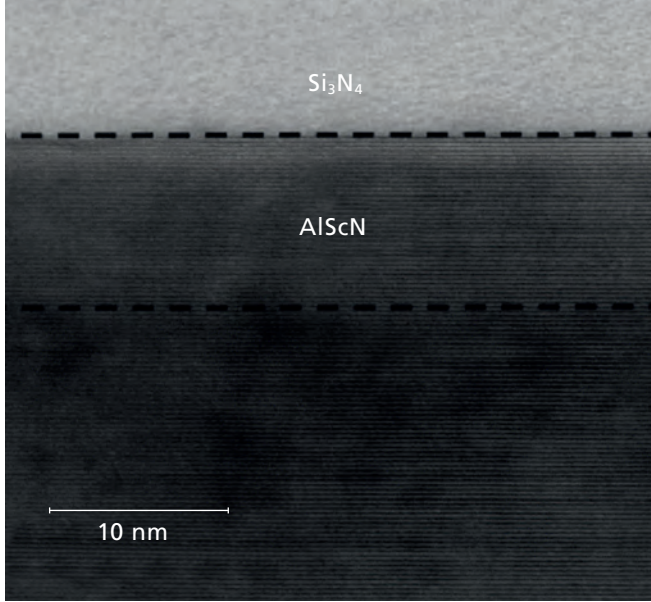


Abb. 1: AlScN-HEMT-Struktur mit einer Sc-Konzentration von ca. 17 % und ohne sichtbare strukturelle Defekte, Aufnahme mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie (Hellfeld, $\langle 01-10 \rangle$ Zonenachse)

Fig. 1: AlScN HEMT structure with an Sc concentration of approx. 17 % and free of any visible structural defects, recorded using high-resolution transmission electron microscopy (brightfield, $\langle 01-10 \rangle$ zone axis)

Wachstum von AlScN mittels MOCVD

Beim MOCVD-Verfahren werden bei hohen Temperaturen bestimmte Moleküle aus Trägergasen freigesetzt und die gewünschten Atome in die Kristallstruktur eines Wafers eingebaut. Die meisten Ausgangsstoffe, sogenannte Präkursoren, müssen jedoch während der Epitaxie erst in den gasförmigen Zustand gebracht werden. Deshalb ist es wichtig, dass das Präkursorenmaterial einen hohen Dampfdruck aufweist. Die meisten Materialien gehen bereits bei Temperaturen zwischen 0 und 25°C in den gasförmigen Zustand über. Die derzeit verfügbaren Sc-Präkursoren haben jedoch einen sehr viel niedrigeren Dampfdruck und müssen auf bis zu 150°C aufgeheizt werden, um den für das Kristallwachstum notwendigen Gasfluss zu generieren. Das stellt besondere Anforderungen an die Hardware des MOCVD-Systems. Am Fraunhofer IAF wurde ein patentiertes Setup entwickelt, mit dem Sc-haltige Schichten mit sehr hoher Kristallqualität und dem richtigen Sc-Gehalt gewachsen werden können (Abb. 1). Derzeit werden zudem neue Sc-Präkursoren und Wachstumsbedingungen entwickelt und getestet, um die bisher bei 0,006 nm/s liegende Wachstumsrate von AlScN zu erhöhen. Je schneller die gewünschte Schichtdicke erreicht wird, desto abrupter verlaufen die Grenzflächen zwischen den gewachsenen Schichten, was die elektrischen Eigenschaften der Transistorstrukturen verbessert.

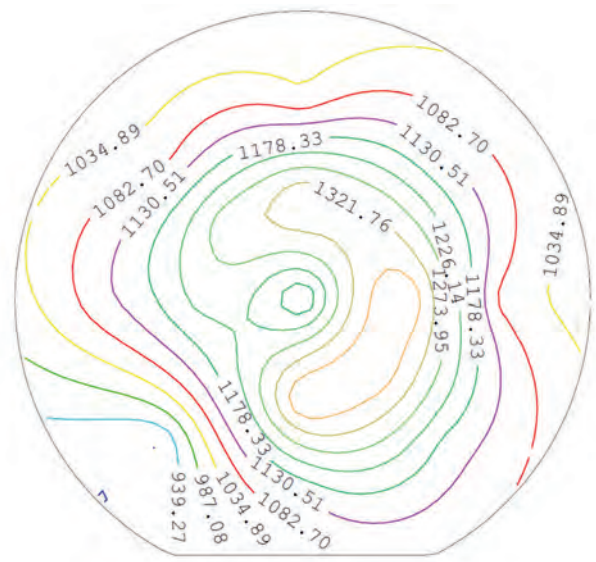


Abb. 2: Mapping der Elektronenmobilität μ eines 4-Inch-Wafers mit einer AlScN-HEMT-Struktur, durchschnittliche Elektronenmobilität: 1203 cm²/Vs

Fig. 2: Mapping of the electron mobility μ of a 4-inch wafer with an AlScN HEMT structure, average electron mobility: 1203 cm²/Vs

Growing AlScN using MOCVD

In the MOCVD process, certain molecules are released from carrier gases at high temperatures and the desired atoms are incorporated into the crystal structure of a wafer. However, most of the starting materials, so-called precursors, must first be brought into the gaseous state during epitaxy. Therefore, it is important that the precursor material has a high vapor pressure. Most materials already enter the gaseous state at temperatures between 0 and 25°C. However, the currently available Sc precursors have a much lower vapor pressure and must be heated up to 150°C to generate the gas flow necessary for crystal growth. This places special demands on the hardware of the MOCVD system. At Fraunhofer IAF, a patented setup has been developed to grow Sc-containing films with very high crystal quality and the right Sc content (fig. 1). Currently, new Sc precursors and growth conditions are also being developed and tested to increase the growth rate of AlScN, which has been 0.006 nm/s so far. The faster the desired layer thickness is achieved, the more abruptly the interfaces between the grown layers run, which improves the electrical properties of the transistor structures.

Breitbandigere Leistungsverstärker mit AlScN/GaN-HEMTs

Anwendungen in der Mess- und Kommunikationstechnik verlangen nach breitbandigen Leistungsverstärkern mit möglichst hoher Leistung. Etablierte GaN-Technologien ermöglichen bereits das Erreichen sehr hoher Leistungen (> 100 W) mit einem einzelnen Chip. In der Regel ist dies aufgrund technologischer Parameter aber nur über einen stark begrenzten Frequenzbereich möglich. Auch die Parallelschaltung mehrerer Chips zur Leistungserhöhung erweist sich aufgrund der begrenzten Bandbreite sowie der zusätzlichen Verluste externer Leistungsteiler als wenig praktikabel. Das Ziel ist daher, die Bandbreite bei gleichbleibend hoher Leistungsfähigkeit pro Bauelement zu erhöhen. Erreicht werden kann dies durch den Einsatz von AlScN. Perspektivisch sind damit Verstärker möglich, die bei gleicher Leistung eine drei- bis fünffach größere Bandbreite abdecken als GaN-Verstärker.

2021 konnte die AlScN-Technologie des Fraunhofer IAF im Innovationswettbewerb »Elektronik für energiesparende Informations- und Kommunikationstechnik« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) überzeugen. Mit dem Preis (siehe Abb. 3) geht die Förderung für das Projekt »EdgeLimit – Green ICT« einher. Darin werden in Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie AlScN/GaN-HEMTs für Anwendungen um 28 GHz im Ka-Band entwickelt. Diese Transistoren bilden die Grundlage für die Entwicklung hocheffizienter und linearer Doherty Verstärker, die im Verbund mit Nokia und Deutscher Telekom in Phased-Array-Basisstationen für den 5G/6G-Mobilfunk integriert werden. Die gesteigerte Effizienz der AlScN/GaN-Technologie ermöglicht sowohl eine Reduktion des ökologischen Fußabdrucks als auch eine Verringerung der Betriebskosten.

Abb. 3: Das Fraunhofer IAF gewinnt im Innovationswettbewerb »Elektronik für energiesparende Informations- und Kommunikationstechnik« des BMBF durch seine disruptiven Ansätze für energieeffizientere Mobilfunkantennensysteme basierend auf AlScN/GaN-HEMTs.

Fig. 3: Fraunhofer IAF wins in the innovation competition "electronics for energy-efficient information and communications technology" of the BMBF with its disruptive approaches for more energy-efficient mobile antenna systems based on AlScN/GaN HEMTs.

Amplifiers with greater bandwidth using AlScN/GaN HEMTs

Applications in measurement and communication technology require broadband power amplifiers with the highest possible power. Established GaN technologies already allow very high power levels (> 100 W) to be achieved with a single chip. However, due to technological parameters, this is usually only possible over a very limited frequency range. The parallel connection of several chips to increase power also proves to be less practical due to the limited bandwidth as well as the additional losses of external power combiner. The goal, therefore, is to increase the bandwidth while maintaining high performance per device. This can be achieved by using AlScN. In the future, this will make it possible to produce amplifiers that cover three to five times the bandwidth of GaN amplifiers with the same power.

In 2021, the AlScN technology of Fraunhofer IAF was able to convince in the innovation competition "Electronics for energy-saving information and communication technology" of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The award (see fig. 3) is accompanied by funding for the project "EdgeLimit — Green ICT". In this project, AlScN/GaN HEMTs are being developed for applications around 28 GHz in the Ka band in cooperation with partners from research and industry. These transistors form the basis for the development of highly efficient and linear Doherty amplifiers, which will be integrated into phased array base stations for 5G/6G mobile communications in collaboration with Nokia and Deutsche Telekom. The increased efficiency of the AlScN/GaN technology enables both a reduction in the environmental footprint and a reduction in operating costs.



Materialentwicklung wesentlich für Optimierung der Transistorstrukturen

Das Fraunhofer IAF hat mit dem MOCVD-Verfahren bereits AlScN/GaN-basierte Transistoren mit einer hohen Steilheit von knapp 500 mS/mm sowie einer Stromdichte von über 1700 mA/mm demonstriert. Die strukturelle und elektrische Qualität wird durch Variation der Wachstumsparameter und durch das Einfügen von Zwischenschichten optimiert. AlScN-HEMT-Strukturen mit Schichtwiderständen von $< 300 \Omega/\text{sq}$, Ladungsträgerdichten von $> 3.0 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-2}$ und einer Elektronenmobilität von bis zu $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (Abb. 2) können so gewachsen werden.

Erste Messungen von AlScN/GaN-HEMTs mit einer Gatelänge von 150 nm zeigen Leistungsdichten von über 8 W/mm und einen Leistungswirkungsgrad (PAE) von mehr als 45 % bei einer Frequenz von 30 GHz (Abb. 4).

Isabel Streicher, Sebastian Krause

Wissenschaftliche Mitarbeitende
am Fraunhofer IAF
Scientists at Fraunhofer IAF

Material development essential for optimizing transistor structures

Fraunhofer IAF has already used the MOCVD process to demonstrate AlScN/GaN-based transistors with a high conductance of almost 500 mS/mm and a current density of over 1700 mA/mm. Optimization of the structural and electrical quality is achieved by varying the growth parameters and by inserting intermediate layers. This allows AlScN HEMT structures with layer resistances of $< 300 \Omega/\text{sq}$, charge carrier densities of $> 3.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ and electron mobility of up to $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ to be grown. Figure 2 shows the mobility mapping of an AlScN-HEMT structure with an average electron mobility of $1203 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Initial measurements of AlScN/GaN HEMTs with a gate length of 150 nm show power densities of more than 8 W/mm and power efficiency (PAE) of more than 45 % at a frequency of 30 GHz (fig. 4).

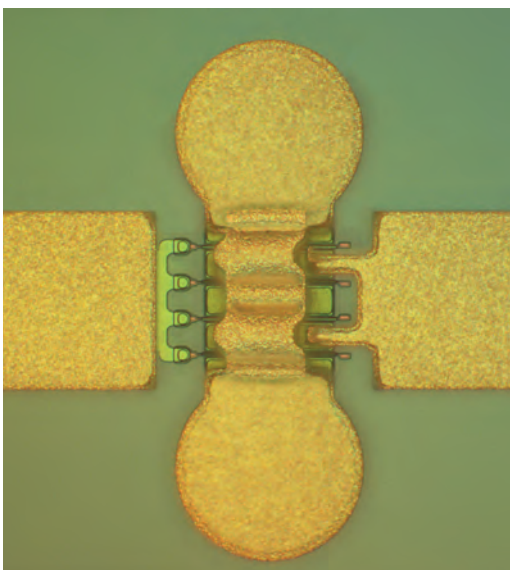


Abb. 4: AlScN/GaN-Transistor mit 150 nm Gatelänge für Anwendungen im Ka-band und einer Leistungsdichte von mehr als 8 W/mm, gemessen bei 30 GHz

Fig. 4: AlScN/GaN transistor with 150 nm gate length for applications in the Ka-band and a power density of more than 8 W/mm, measured at 30 GHz

Niedervoltleistungselektronik für eine emissionsfreie Zukunft

Low-voltage power electronics for an emission-free future

Um in eine emissionsfreie Zukunft durchzustarten, müssen vielversprechende Lösungen aus der Wissenschaft schnellstmöglich in die breite Anwendung gelangen. Viele Forschungsergebnisse schaffen das wegen hoher Komplexität und Kosten allerdings nie. Galliumnitrid-(GaN-)Leistungselektronik hingegen hat es durch verbesserte Performance in Energiewandlern und gleichzeitig kostengünstige Herstellung auf Silizium-(Si-)Substrat in kürzester Zeit in Massenprodukte geschafft. Diese erste Generation GaN-Leistungselektronik macht heute z. B. Ladegeräte für Smartphones, Laptops und Elektroautos effizienter, kompakter und günstiger. Das Fraunhofer IAF erforscht bereits zukunftsweisende Ansätze für die nächste Generation GaN-Leistungselektronik: Einerseits forschen wir an neuen Halbleitermaterialien und monolithischem Schaltungsdesign zur Steigerung der Effizienz, Funktionalität und Kompaktheit, andererseits an anwendungsnahe Demonstratoren für neue Anwendungen wie emissionsfreie elektrokalorische Wärmepumpen.

If we are to make a breakthrough into an emission-free future, promising solutions from the scientific community must be put into widespread use as quickly as possible. Unfortunately, many research results achieve this due to high complexity and costs. Gallium nitride (GaN) power electronics, however, have made it into mass products in a very short time thanks to improved performance in energy converters and simultaneously low-cost production on silicon substrates. This first generation of GaN power electronics is making, for example, chargers for smartphones, laptops and electric cars more efficient, more compact and cheaper. Fraunhofer IAF is already researching forward-looking approaches for the next generation of GaN power electronics: On the one hand, we are researching new semiconductor materials and monolithic circuit design to increase efficiency, functionality and compactness, and on the other hand, we are working on application-oriented demonstrators for new applications such as emission-free electrocaloric heat pumps.

Kompakte und multifunktionale integrierte Schaltungen

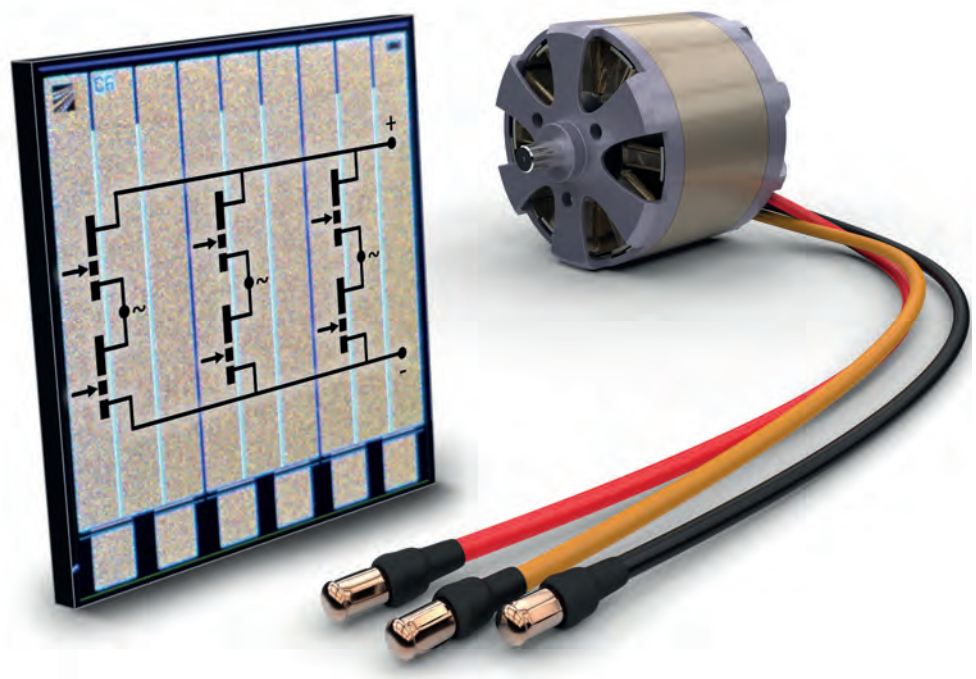
Zur Effizienz- und Leistungsdichtesteigerung werden bisher hauptsächlich GaN-Einzeltransistoren eingesetzt. Die laterale Bauteilgeometrie von GaN-HEMTs ermöglicht allerdings auch die monolithische Integration einer Vielzahl verschiedener Bauelemente und Strukturen in maßgeschneiderten GaN-Leistungsschaltungen (sogenannte Power-ICs). Die GaN-on-Si-Integrationsplattform des Fraunhofer IAF umfasst alle Schritte von Schaltungssimulation, -design, -layout, Epitaxie und Prozess- bis hin zu Modul-Aufbautechnik, Charakterisierung und anwendungsnahen Leistungswandler-Demonstratoren.

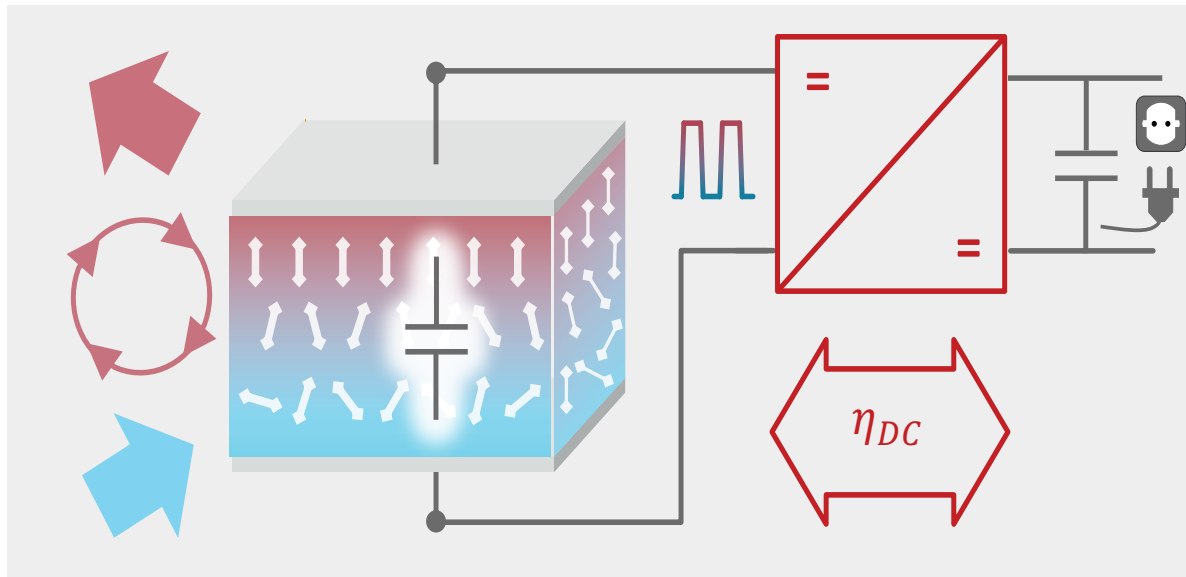
Compact and multifunctional integrated circuits

To date, mainly GaN discrete transistors have been used to increase efficiency and power density. However, the lateral device geometry of GaN HEMTs also enables the monolithic integration of a variety of different devices and structures in tailored GaN power circuits (so-called power ICs). The GaN-on-Si integration platform of Fraunhofer IAF covers all steps from circuit simulation, design, layout, epitaxy and process to module assembly technology, characterization and application-oriented power converter demonstrators.

Abb. 1: Ein $2 \times 2 \text{ mm}^2$ kleiner 48 V, 3-Phasen GaN Motorinverter-IC zur Ansteuerung bürstenloser Gleichstrommotoren

Fig. 1: A $2 \times 2 \text{ mm}^2$ small 48 V, 3-phase GaN motor inverter IC for driving brushless DC motors





Anwendungsabhängig werden auf Step-graded- oder Superlattice-GaN-Epitaxie auf Si-Substrat selbstsperrende und selbstleitende Transistoren sowie Dioden hergestellt. Optimal dimensionierte Kamm- und Matrixlayouts ermöglichen flächeneffiziente Nieder- und Hochvoltstrukturen von 48 V bis über 600 V. Zusammen mit integrierten passiven Bauelementen wie Spulen, Kapazitäten und Verdrahtungsebenen werden damit analoge, digitale und mixed-signal Schaltungen realisiert. Gleichmaßen können Temperatur-, Strom- und Spannungssensoren integriert und zu geschlossenen Regelschleifen verschaltet werden. Zusammen mit Gate-Treibern und integrierten Leistungswandler-Topologien ergeben sich hoch-kompakte und multifunktionale Leistungsschaltungen in einem Chip. Halbbrücken, 3-phasige Motorinverter (Abb. 1), aktive Brückengleichrichter und Point-of-Load-Wandler sind beispielhaft realisierte Schaltungen. Obwohl die GaN-Technologie damit bereits viele Schaltungsteile effizient und mit geringem Platzbedarf realisieren kann, gibt es immer noch Schaltungen wie z. B. programmierbare Controller, die weiterhin am besten in Si-CMOS realisiert werden. Um das Beste beider Technologien zu kombinieren, wurde am Fraunhofer IAF an der Hetero-Integration von GaN und Si-CMOS geforscht, z. B. am Mikro-Transferdruck von angepassten GaN-Chiplets auf Si-CMOS-ICs. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird ein GaN-basierter Hochspannungstreiber zur Ansteuerung von Ringresonatoren erforscht, der für die digitale Holographie in hochpräzisen Koordinatenmessgeräten eingesetzt wird.

Depending on the application, normally-off and normally-on transistors as well as diodes are produced on step-graded or superlattice GaN epitaxy on Si substrate. Optimally dimensioned comb and matrix layouts enable area-efficient low- and high-voltage structures from 48 V to over 600 V. Together with integrated passive components such as inductors, capacitors and interconnection layers, analog, digital and mixed-signal circuits can be realized. Similarly, temperature, current and voltage sensors can be integrated and connected to form closed-loop controls. Together with gate drivers and integrated power converter topologies, this results in highly compact and multifunctional power circuits in one chip. Half-bridges, 3-phase motor inverters (fig. 1), active bridge rectifiers and point-of-load converters are examples of realized circuits. Although GaN technology can thus already realize many circuit parts efficiently and with a small footprint, there are still circuits such as programmable controllers that are best realized in Si-CMOS. To combine the best of both technologies, research has been conducted at Fraunhofer IAF on hetero-integration of GaN and Si-CMOS, e.g., micro-transfer printing of customized GaN chiplets onto Si-CMOS ICs. In a current research project, a GaN-based high-voltage driver for driving ring resonators is being researched for digital holography in high-precision coordinate measuring machines.



Abb. 2: Schematischer Aufbau einer elektrokalendarischen Wärmepumpe (links), die dank GaN-Leistungselektronik eine hohe Leistungszahl erreichen kann, und in einer emissionsfreien Zukunft, beispielsweise zur hocheffizienten Gebäudeklimatisierung (Heizen und Kühlen), eingesetzt werden kann.

Fig. 2: Schematic of an electrocaloric heat pump (left), which, thanks to GaN power electronics, can achieve a high coefficient of performance, and which can be used in an emissions-free future for highly-efficient building air conditioning (heating and cooling).

Anwendung für effiziente elektrokalendarische Wärmepumpen

Bereits in einigen Anwendungen wie z. B. der Elektromobilität (Antrieb von Elektro-Motoren und Ladeelektronik) oder Alltags- und Verbraucherelektronik (Ladegeräte, LED-Ansteuerung) wird GaN-Leistungselektronik vorteilhaft eingesetzt. Das Fraunhofer IAF forscht darüber hinaus an dem Einsatz zur Effizienzsteigerung und Erschließung weiterer Anwendungsfelder. Neben rein elektrischer Energiewandlung sind auch emissionsfreie und effiziente elektro-thermische Anwendungen entscheidend für die Wärmewende als Teil der Energiewende. In dem Fraunhofer-Leitprojekt »ElKaWe« ermöglicht das IAF die effiziente elektrische Ansteuerung neuartiger elektrokalendarischer Wärmepumpen, die perspektivisch die heutige Kompressor-Technologie ablösen können – ohne klimaschädliche Kältemittel, leise, emissionsfrei und mit höherem Wirkungsgrad (Leistungszahl). Die Leistungszahl elektrokalendarischer Wärmepumpen hängt maßgeblich von der elektrischen Effizienz der Ansteuererelektronik ab. Dazu wurden neue Schaltungstopologien mit maßgeschneiderten GaN-Halbleiterbauelementen entworfen, die bereits eine elektrische Effizienz und Energie-rückgewinnung der zum Hervorrufen des elektrokalendarischen Effekts notwendigen Umlade-Blindleistung von über 99 Prozent erreicht haben.

Dr. Stefan Mönch

Projektleiter am Fraunhofer IAF
Project Manager at Fraunhofer IAF

Application for efficient electrocaloric heat pumps

GaN power electronics are already being used to advantage in some applications such as electromobility (driving electric motors and charging electronics) and consumer electronics (chargers, LED control). Fraunhofer IAF is also researching its use to increase efficiency and open up further fields of application. In addition to purely electrical energy conversion, emission-free and efficient electro-thermal applications are also crucial for the heat transition as part of the energy transition. In the Fraunhofer lighthouse project "[ElKaWe](#)," the IAF enables the efficient electrical control of new types of electrocaloric heat pumps, which can prospectively replace today's vapor-compression technology — without climate-damaging refrigerants, emission-free and with higher efficiency (coefficient of performance). The coefficient of performance of electrocaloric heat pumps depends to a large extent on the electrical efficiency of the charging electronics. To this end, new circuit topologies have been designed with tailor-made GaN semiconductor components and have already achieved an electrical efficiency and energy recovery of over 99 percent of the reactive power required to cause the electrocaloric effect.

Kann Satellitentechnik souverän und nachhaltig sein?

Can satellite technology be sovereign and sustainable?

Die Satelliten- und Raumfahrtbranche befindet sich gerade im Umbruch. Unter der Bezeichnung »New Space« krepeln private Akteure den Markt um. Im Interview sprechen Jens Freese, Leiter »Active RF Development« bei TESAT, und Christian Friesicke, Gruppenleiter Schaltungen am Fraunhofer IAF, über aktuelle Veränderungen in der Branche, eine unabhängige europäische Elektronik und den Energieverbrauch im Satelliten.

Wie erleben Sie derzeit die Raumfahrtbranche?

Freese — Wir erleben den Umbruch sowohl bei uns als auch bei unseren Kunden und Endkunden, den Satellitenbauern und -betreibern. Das Thema New Space ist dabei ein wichtiger Faktor, aber auch die neuen Akteure auf dem Markt führen zu spürbaren Veränderungen. Da die Launch-Kosten deutlich gesunken sind, setzen sich Missionskosten künftig anders zusammen und Satelliten müssen nicht zwangsläufig möglichst leicht und langlebig sein. Weiterhin sind neue Betriebskonzepte sowie unterschiedliche Satellitenkonstellationen und -systeme im Gespräch. Ein anderer Faktor ist das veränderte Nutzerverhalten. Viele Menschen schauen beispielsweise nicht mehr um Punkt 20 Uhr die Tagesschau, sondern nutzen Video-on-Demand. Das ist ein neuer und schwieriger Aspekt für klassische Broadcasting-Dienstbetreiber in Europa. Deren Satellitenflotten sind aktuell aktiv und gut ausgelastet, aber es ist schwer vorherzusehen, wie sich dieses Geschäft entwickeln wird.

Friesicke — Diese Veränderungen bekommen wir auch mit. In den Calls geht es oft um kleinere Satelliten und kürzere Missionslaufzeiten. Außerdem haben wir vermehrt internationale Anfragen auch außerhalb von Europa. Wir sind kein industrieller Anbieter und trotzdem gibt es Unternehmen, die eine Technologie evaluieren wollen, die noch nicht industriell nachgewiesen ist. Das hat sicher mit New Space zu tun.

The satellite and space industry is currently under transformation. Under the term "New Space," private players are turning the market upside down. In this interview Jens Freese, Head of "Active RF Development" at TESAT, and Christian Friesicke, Group Leader Circuits at Fraunhofer IAF, discuss current changes in the industry, independent European electronics and energy consumption in satellites.

How are you currently experiencing the space industry?

Freese — We are experiencing changes both for ourselves and for our customers and end users, the satellite builders and operators. New Space is an important factor in this, but the new players in the market are also leading to noticeable changes. As launch costs have dropped significantly, mission costs will be composed differently in the future and satellites do not necessarily have to be as light and durable as possible. Furthermore, new operational concepts and different satellite constellations and systems are being discussed. Another factor is changing user behavior. For example, many people no longer watch the daytime news at 8 p.m. sharp, but use video-on-demand. This is a new and difficult aspect for traditional broadcasting service operators in Europe. Their satellite fleets are currently active and well utilized, but it is difficult to predict how this business will develop.

Friesicke — We are also noticing these changes. The calls are often about smaller satellites and shorter mission durations. We also have an increasing number of international inquiries outside Europe. We are not an industrial supplier, and yet there are companies that want to evaluate a technology that has not yet been industrially proven. That certainly has to do with New Space.



Dr. Jens Freese, Leiter »Active RF Development« bei TESAT
Dr. Jens Freese, Head of "Active RF Development" at TESAT

Warum ist eine unabhängige europäische Elektronik wichtig?

Freese — Für uns ist die langfristige Verfügbarkeit von elektronischen Bauteilen wichtig, um die Entwicklungskosten zu reduzieren. Auf schlechte Bauteilverfügbarkeit folgen Designanpassungen, ungeplante Kosten oder gar Lieferverzögerungen. Ein weiterer Punkt ist der Export: Mit unseren Produkten beliefern wir Kunden auf der ganzen Welt. Hier spielt natürlich die Exportklassifizierung der Bauteile eine wesentliche Rolle. Bei Bauteilen aus den USA kann es sein, dass während der Entwicklung oder Produktion die Klassifizierung geändert wird, was zu einer Nachentwicklung mit erheblichen Kosten führt. Daher bedienen wir unsere Kunden bevorzugt mit europäischen Komponenten.

Wie könnte der Weg zu einer unabhängigen europäischen Halbleiterproduktion aussehen?

Friesicke — Das ist eine Entwicklung, die nicht Jahre, sondern Jahrzehnte dauert und sehr viele Technologien betrifft. Wir sehen, dass es auf dem Foundry-Markt, insbesondere bei den Silizium-Massenmärkten, eine ökonomische Konzentration gibt. Die Technologie wird immer teurer, weil die Strukturen innerhalb der Bauteile immer kleiner werden. Und am Ende können sich das nur noch ein paar Unternehmen leisten, solche Prozesse herzustellen. Wenn diese Konzentration so weitergeht und es irgendwann nur noch einen Hersteller weltweit gibt, dann ist man abhängig und das wird teuer. Unsere Technologien sind noch nicht an ihrem ökonomischen Limit angekommen und wir können dabei unterstützen, eine europäische Lieferkette zu etablieren. Dann muss es aber auch eine Design-Strategie geben von Gremien wie der ESA, der EU oder der European Defence Agency.



Christian Friesicke, Gruppenleiter Schaltungen am Fraunhofer IAF
Christian Friesicke, Group Leader Circuits at Fraunhofer IAF

Why is independent European electronics important?

Freese — For us, the long-term availability of electronic components is important in order to reduce development costs. If component availability is poor, design adaptations, unplanned costs or even delivery delays follow. Another issue is export: We supply our products to customers all over the world. Here, of course, the export classification of the components plays a major role. In the case of components from the USA, the classification may be changed during development or production. In such instances, a re-development is associated with considerable costs. Therefore, we prefer to serve our customers with European components.

What could the path to independent European semiconductor production look like?

Friesicke — This is a development that does not take years, but decades, and affects numerous technologies. We see that there is an economic concentration in the foundry market, especially in the silicon mass markets. The technology is getting more and more expensive, because the structures within the devices are getting smaller and smaller. And in the end, only a few companies will be able to afford to manufacture such processes. If this trend continues and at some point there is only one manufacturer left in the world, then we will be dependent and that will be expensive. Our technologies have not yet reached their economic limit and we can support the establishment of a European supply chain. But then there must also be a design strategy from bodies such as ESA, the EU or the European Defence Agency.

Freese — Absolut! Man darf sich nicht der Illusion hingeben: »Die Märkte regeln das«, denn die Märkte machen genau das, was du eben beschrieben hast. Es wird weiter optimiert, immer weiter regional fokussiert und dann verschwindet die Technologie aus anderen Regionen. Das wird sehr effizient, aber leider auch sehr instabil. Eine Unabhängigkeit kostet eben etwas und ich glaube, andere Nationen in Europa sind bereit, das Geld zu investieren. In Deutschland ist man teilweise noch nicht so weit. Souveränität ist strategisch und Entscheidungen können daher nicht ausschließlich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen werden. Zudem haben wir die Fähigkeiten und Technologien, um in den Märkten mitzuspielen. Für eine unabhängige Herstellung braucht es außerdem eine kontinuierlich laufende Serienproduktion, um reproduzierbar gute Technologien und Spitzenergebnisse zu erzielen.

Was sind die größten Energiefresser bei der Satellitentechnik?

Freese — Eine hohe Energieeffizienz im Satelliten ist das zentrale Thema. Die Energie muss aufwendig mit Solar-Generatoren erzeugt werden und die Abwärme kann durch die fehlende Atmosphäre nicht einfach abgeführt werden. Sendeverstärker sind die größten Power Consumer und bei den flexiblen Satellitennutzlasten verbraucht auch die Digital-elektronik viel Energie. Der Trend zu schnelleren Datenverbindungen und höheren Datenraten ist natürlich prinzipbedingt mit einem höheren Energieverbrauch verbunden.

Friesicke — Es gibt Bodenstationen, bei denen Dauerbetrieb mit Sendeleistung bis in den Kilowattbereich herrscht. Mit effizienten Verstärkern könnte man da viel einsparen. Hier stehen Halbleiter in Konkurrenz zur Wanderfeldröhre. Die Röhre ist schon sehr effizient, aber die Tatsache, dass Halbleiterverstärker viel leichter auszutauschen sind, wenn einer ausfällt, ist in Bezug auf Nachhaltigkeit von Vorteil.

Freese — Ja, genau. Energie ist immer noch verhältnismäßig billig und wir spüren kaum, dass sie limitiert ist. Das wird sich in Zukunft sicher ändern. Wir bei TESAT lassen nicht das Billigste, sondern das Effizienteste fliegen, weil es dann über die gesamte Mission doch das günstigste Produkt ist. Noch ist es tatsächlich so, dass die Wanderfeldröhre bei hohen Frequenzen und Leistungen dem Halbleiterverstärker überlegen ist. Diese Gewichtung verschiebt sich gerade und durch die Umbrüche im Markt werden andere Sichtweisen entwickelt. Ob das dann die nachhaltigeren Optionen sind, wird sich zeigen.

Freese — Absolutely! One must not succumb to the illusion that "the markets will take care of it," because the markets do exactly what you have just described. There is further optimization, more and more regional focus, and then the technology disappears from other regions. That becomes very efficient, but unfortunately also very unstable. Independence comes at a cost and I think other nations in Europe are willing to invest the money. In Germany, some are not yet ready. Sovereignty is strategic, so decisions cannot be made solely on economic grounds. In addition, we have the skills and technologies to take part in the markets. Independent manufacturing also requires continuous series production to achieve reproducible good technologies and top results.

What are the biggest energy guzzlers in satellite technology?

Freese — High energy efficiency in satellites is the central issue. The energy has to be generated expensively with solar generators and the waste heat cannot simply be dissipated due to the lack of atmosphere. Transmit amplifiers are the biggest power consumers, and with flexible satellite payloads, digital electronics also consume a lot of energy. The trend toward faster data links and higher data rates, is of course, associated in principle with higher energy consumption.

Friesicke — There are ground stations with non-stop operation with transmitting power up to the kilowatt range. Efficient amplifiers could save a lot of energy. Here, semiconductors compete with traveling-wave tubes. The tube is already very efficient, but the fact that semiconductor amplifiers are much easier to replace, if one fails, is an advantage in terms of sustainability.

Freese — Correct. Energy is still relatively cheap and we hardly feel that it is limited. That will certainly change in the future. At TESAT, we do not use the cheapest product, but the most efficient one, because it is the most cost-effective product over the entire mission. It is still true that the traveling-wave tube is superior to the semiconductor amplifier at high frequencies and high power levels. This weighting is just shifting and other views are being developed due to the upheavals in the market. Time will tell which technology will be the more sustainable option in the future.

Worin liegt die Schwierigkeit, ein Bauteil für das Weltall zu entwickeln?

Friesicke — Für uns am Fraunhofer IAF sind Performance und Lebensdauer die wichtigsten Kriterien. Wenn wir die Performance hinkriegen, arbeiten wir daran, die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit zu verbessern, ohne dass die Leistungsfähigkeit darunter leidet. Unsere Aufgabe ist die Entwicklung und wir brauchen immer Partner, die – sobald unsere Technologie einen Reifegrad erreicht hat – den Stab übernehmen und die Staffel weiter in Richtung Ziel laufen.

Freese — Im Weltall kann man ja leider nicht schnell etwas reparieren oder austauschen, deshalb sind die Punkte Zuverlässigkeit und Lebensdauer so entscheidend. Und gute Erfahrungen mit bekannten Bauteilen und Geräten spielen für uns eine große Rolle: Viele Kunden wollen ihre Mission erweitern und brauchen dafür genau das Gleiche, was sie bereits vor Jahren gekauft haben. Damit verbinden sie das minimale Risiko und in der Folge vereinfacht dies beispielsweise auch die Versicherung einer Mission.

Würden Sie selbst gerne ins All fliegen?

Freese — Es ist toll, wenn Menschen im All sind, um zu arbeiten, zu forschen und Neues zu erfahren. Ein einfacher Ausflug ins Weltall steht für mich dagegen kaum im richtigen Verhältnis zu den benötigten Ressourcen. Ich bin nach wie vor von der Raumfahrt fasziniert, bleibe mit meiner Arbeit jedoch lieber in meinem Büro im »Ländle« – da kann ich mehr bewirken.

Friesicke — Ein Parabelflug könnte ganz spannend sein, aber so einen richtigen Flug ins All mit der Vorbereitung und den Strapazen und den G-Tests – das würde ich nicht durchhalten. Das überlasse ich lieber den Astronauten.

What is the difficulty in developing a component for space?

Friesicke — For us at Fraunhofer IAF, performance and durability are the most important criteria. If we get the performance right, we will work on improving the lifetime and reliability without compromising the performance. Our job is to develop and we always need partners who — once our technology has reached a readiness level — take over and bring it to a close.

Freese — In space, unfortunately, one cannot repair or replace anything quickly, which is why reliability and durability are so crucial. Good experience with familiar components and equipment plays a major role for us: Many customers want to extend their mission and need exactly the same thing that they already bought years ago. They associate this with minimal risk, and as a consequence, this also simplifies the insurance of a mission, for example.

Would you like to fly into space yourself?

Freese — It is great when people are in space to work, research and learn new things. For me, however, a simple trip into space is hardly in proportion to the resources required. I am still fascinated by space travel, but I prefer to keep my work in my office in the "Ländle" — I can make more impact on the ground.

Friesicke — A parabolic flight could be quite exciting, but a real flight into space with the preparation and the strains and the G-tests — I would not endure that. I will leave that to the astronauts.



read the full
interview



Schlüsselfaktor Mikroelektronik für technologische Souveränität

Key factor microelectronics for technological sovereignty

Eine Führungsrolle im Bereich Halbleitertechnologien bis 2030, Unabhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen, Versorgungssicherheit und Resilienz – diese Ziele verfolgt der »European Chips Act«, den die Europäische Kommission im Februar 2022 vorgestellt hat und für den eine Fördersumme von 43 Milliarden Euro veranschlagt ist. Es ist eine große Aufgabe für die europäische Wissenschaft und Wirtschaft und gleichzeitig eine große Chance für Akteure wie das Fraunhofer IAF, um ihre Stärken in der Forschung und im Technologietransfer einzubringen. Mit seiner Expertise und Infrastruktur im Bereich der III/V-Halbleiter und Quantentechnologien unterstützt das Fraunhofer IAF den Ausbau europäischer Lieferketten in mehreren Initiativen und Projekten.

A leading role in semiconductor technologies by 2030, independence from other economic areas, security of supply and resilience — these are the goals of the “European Chips Act” presented by the European Commission in February 2022, for which funding of 43 billion euros has been budgeted. It is a major task for European science and industry and at the same time a great opportunity for actors like Fraunhofer IAF to contribute their strengths in research and technology transfer. With its expertise and infrastructure in the field of III-V semiconductors and quantum technologies, Fraunhofer IAF supports the expansion of European supply chains in several initiatives and projects.

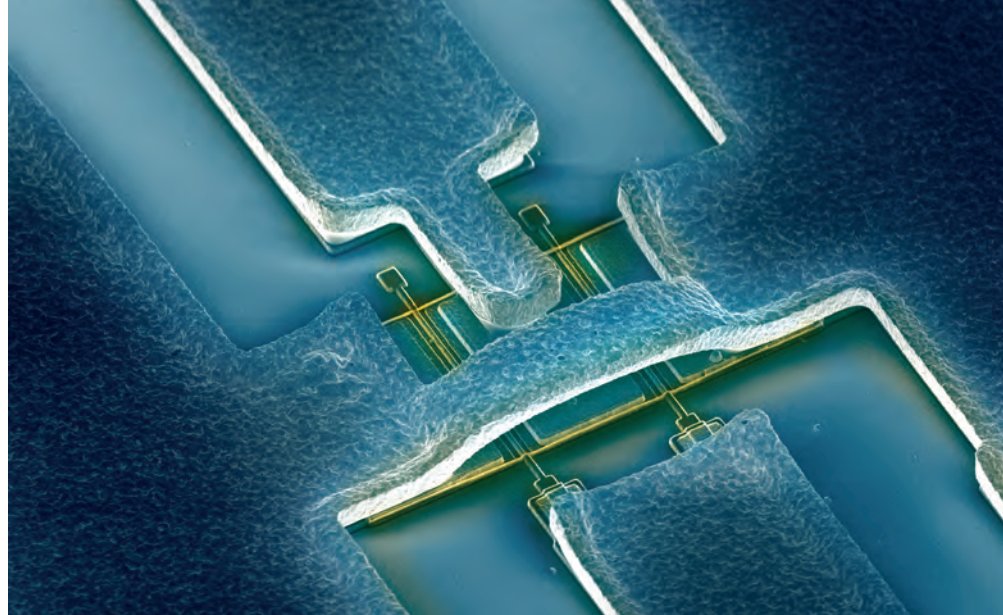


Das Fraunhofer IAF forscht an neuen Technologien, die Europa Chancen bieten, eine souveräne Position in der globalen Wertschöpfung zu sichern.

Fraunhofer IAF is researching new technologies that offer Europe opportunities to secure a sovereign position in global value creation.

Das Fraunhofer IAF entwickelt ICs für hohe Frequenzen, unter anderem für ultraschnelle drahtlose Datenübertragung sowie Klima- und Erdbeobachtung aus dem All.

Fraunhofer IAF develops ICs for high frequencies, including for ultra-fast wireless data transmission as well as climate and earth observation from space.



Eigenständige Fertigung und Transfer in die Praxis

Von der Materialforschung über Simulation und Schaltungsdesign bis zur Entwicklung von Bauelementen und Systemen – das Fraunhofer IAF deckt die gesamte III/V-Halbleiter-Wertschöpfungskette ab und verfügt über eine eigenständige Fertigung für Halbleiter und Chips in Kleinserie ([S. 64–67](#)). Darüber hinaus bietet das Fraunhofer IAF mit seinen Laboren Raum für Experimente unter Realbedingungen. Wie das Institut mit seiner Forschung und umfassenden Infrastruktur den Ausbau einer europäischen Lieferkette für hocheffiziente Leistungs- und Hochfrequenz-Elektronik unterstützt, lesen Sie im Artikel auf [S. 40–43](#).

Starke Partnerschaften

Eine besondere Stärke des Fraunhofer IAF liegt in seinen Partnerschaften. Das Institut engagiert sich umfangreich in Verbänden und Netzwerken wie der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) und treibt den Erhalt und den Ausbau souveräner Lieferketten und Wertschöpfung unter anderem im Bereich der grünen Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Quantentechnologien voran. Mehr über die FMD und unsere Aktivitäten innerhalb der Forschungsfabrik erfahren Sie auf [S. 54](#).

2021 haben viele umfangreiche Projekte begonnen, in denen wir uns einbringen, darunter auch gleich zwei Forschungshubs zum Mobilfunkstandard der Zukunft: 6G. In dem »Open6GHub« designen wir mit 16 Partnern ein ganzheitliches 6G-System und in dem »6G Research and Innovation Cluster« bringen wir unsere leistungsfähigen und energieeffizienten Halbleiterbauelemente ein. Einen Überblick über unsere weitreichenden Forschungs- und Technologiekooperationen sowie Partnersteckbriefe finden Sie ab [S. 54](#).

Independent production and transfer into practice

From materials research, simulation and circuit design to the development of devices and systems — Fraunhofer IAF covers the entire III-V semiconductor value chain and has an independent manufacturing facility for semiconductors and chips in small series ([p. 64–67](#)). Read how the institute's research and comprehensive infrastructure are supporting the expansion of a European supply chain for highly efficient power and high-frequency electronics in the article on [p. 40–43](#).

Strong partnerships

A particular strength of Fraunhofer IAF lies in its partnerships. The institute is extensively involved in associations and networks such as in the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) and drives the preservation and expansion of sovereign supply chains and value creation, among others, in the field of green information and communication technology as well as quantum technologies. Learn more about FMD and our activities within the research factory on [p. 54](#).

In 2021, many extensive projects have begun in which we are involved. These include, to name but two, research hubs for the 6G mobile communications standard of the future. In the "Open6GHub," we are designing an integrated 6G system with 16 partners, and in the "6G Research and Innovation Cluster" we are contributing our high-performance and energy-efficient semiconductor components. An overview of our wide-ranging research and technology collaborations and partner profiles can be found starting on [p. 54](#).

Hochfrequenzelektronik des Fraunhofer IAF im Orbit

2021 fieberten die Forschenden am Fraunhofer IAF dem Start der Falcon-9-Rakete von Cape Canaveral entgegen: An Bord hatte sie den Nanosatelliten »W-Cube« der ESA mit einem Sendermodul des Fraunhofer IAF. Nach dem erfolgreichen Start war die Erleichterung groß und die Freude noch größer als der Satellit ein paar Wochen später erstmals erfolgreich Testsignale im Frequenzbereich des Q- und W-Bands sendete. Auch im Nanosatelliten »TROPICS« der NASA umkreist Hochfrequenzelektronik des Fraunhofer IAF die Erde. Die effizienten und rauscharmen Schaltungen des Freiburger Instituts sind entscheidende Schlüsselkomponenten für eine nachhaltige Erdbeobachtung. Weitere Informationen zu unseren Satellitenprojekten finden Sie auf [S. 44–47](#).

Nachhaltige Ansätze dank Quantencomputing

Das Quantencomputing bietet verschiedene Vorteile, die in vielen Bereichen Nachhaltigkeit fördern können – sei es durch kürzere Rechenoperationen, die weniger Ressourcen fordern als herkömmliche und im Vergleich deutlich langsamere Hochleistungsrechner, oder durch die Simulation komplexer Systeme, die ohne Quantenbits nicht möglich wären. Das Fraunhofer IAF setzt seine breiten Expertisen im Bereich der Nanoelektronik und des synthetischen Diamants ein, um die dritte Generation der Quantensysteme aktiv mitzugestalten. Einen Einblick erhalten Sie auf [Seite 52–53](#). Darüber hinaus haben wir unser Portfolio um Software- und Simulationsarbeiten im Bereich des Quantencomputings erweitert, mehr dazu auf [Seite 69](#).

High-frequency electronics of Fraunhofer IAF in orbit

In 2021, researchers at Fraunhofer IAF were eagerly awaiting the launch of the Falcon 9 rocket from Cape Canaveral: On board it carried the nanosatellite "W-Cube" of ESA with a transmitter module of Fraunhofer IAF. The relief was great after the successful launch and the joy even greater when the satellite successfully transmitted test signals in the frequency range of the Q and W bands for the first time a few weeks later. High-frequency electronics from Fraunhofer IAF also orbit the earth in NASA's "TROPICS" nanosatellite. The efficient and low-noise circuits of the Freiburg institute are crucial key components for sustainable Earth observation. For more information on our satellite projects and our high-frequency electronics for space applications, see [p. 44–47](#).

Sustainable approaches thanks to quantum computing

Quantum computing offers various advantages that can promote sustainability in many areas — be it through shorter computing operations that require fewer resources than conventional and comparatively much slower high-performance computing systems, or through the simulation of complex systems that would not be possible without quantum bits. Fraunhofer IAF applies its broad expertise in nanoelectronics and synthetic diamond to actively shape the third generation of quantum systems. You can get an insight on [page 52–53](#). Furthermore, we have extended our portfolio with software and simulation work in the field of quantum computing, more on [page 69](#).

Stimmen unserer Partner

Voices from our Partners



Halbleiterverstärker (SSPAs) auf GaN-Basis besitzen für die Raumfahrt gerade in den zukünftigen Megakonstellationen ein bedeutendes wirtschaftliches Potenzial. Sie liefern überzeugende Ergebnisse hinsichtlich Verstärkung, Ausgangsleistung und Wirkungsgrad. Nationale Forschungsergebnisse führen dazu, dass sich Deutschland im internationalen Wettbewerb auf Augenhöhe positionieren kann.

Solid State Power Amplifiers (SSPAs) have a considerable commercial potential for aerospace, especially for future mega constellations. The SSPAs deliver convincing results concerning amplification, output power and efficiency. National research results position Germany on an equal footing in international competition.



Dr. Siegfried Voigt
Head of National Program
Satellite Communications
German Space Agency
DLR



Michael Lang
Head of Development
Automation Technologies
AUDI AG



Radarsensorik ermöglicht eine sichere und berührungslose Umfeldwahrnehmung – und das nahezu in Echtzeit. Genau diese Voraussetzungen brauchen wir, damit Roboter zukünftig noch flexibler in komplexen Umgebungen mit Menschen zusammenarbeiten können.

Radar sensor technology enables safe and contactless detection of the environment — and almost in real time. These are precisely the prerequisites we need to enable robots to work even more flexibly with humans in complex settings in the future.

IC- und optische Technologien europäischen Ursprungs

IC and optical technologies of European origin

Der Halbleitermangel bremst seit Monaten die produzierenden Industrien aus. Zusätzlich zur rasant gestiegenen Nachfrage an Chips verschärfen Exportbeschränkungen die angespannte Situation auf dem Halbleitermarkt. Die Europäische Union fördert daher souveräne Halbleitertechnologien, damit diese Schlüsseltechnologien für die Realisierung von energieeffizienter Leistungselektronik und von Telekommunikationssystemen europäischen Ursprungs verfügbar und unabhängig bleiben. Seinem Selbstverständnis gemäß unterstützt das Fraunhofer IAF mit seiner exzellenten Forschung und umfassenden, die gesamte Halbleiter-Wertschöpfungskette abdeckenden Infrastruktur den Ausbau einer europäischen Lieferkette.

The semiconductor shortage has been slowing down manufacturing industries for months. In addition to the rapidly increasing demand for chips, export restrictions further aggravate the tense situation on the semiconductor market. Therefore, the European Union is promoting sovereign semiconductor technologies in order to keep this key technology available and independent for the realization of energy-efficient power electronics and telecommunication systems of European origin. In line with its identity, Fraunhofer IAF supports the development of a European supply chain with its excellent research and comprehensive infrastructure covering the entire semiconductor value chain.

Das Fraunhofer IAF arbeitet eng mit europäischen Schlüssel-Partnern aus der Halbleiterindustrie zusammen und beteiligt sich aktiv an der Erschließung europäischer Halbleiter-Lieferketten.

Fraunhofer IAF works closely with European key partners from the semiconductor industry and actively participates in the development of European semiconductor supply chains.

Branchenübergreifend mussten im zurückliegenden Jahr Hersteller aufgrund fehlender Halbleiterbauelemente ihre Produktion stark drosseln oder sogar zeitweise aussetzen. Für viele betroffene Unternehmen ist daher die aktuell noch andauernde Chipkrise ein Anlass, ihre Lieferketten zu überdenken und mehr auf europäische Produzenten zu setzen.

Erschließung neuer europäischer Pilotlinien durch das Fraunhofer IAF

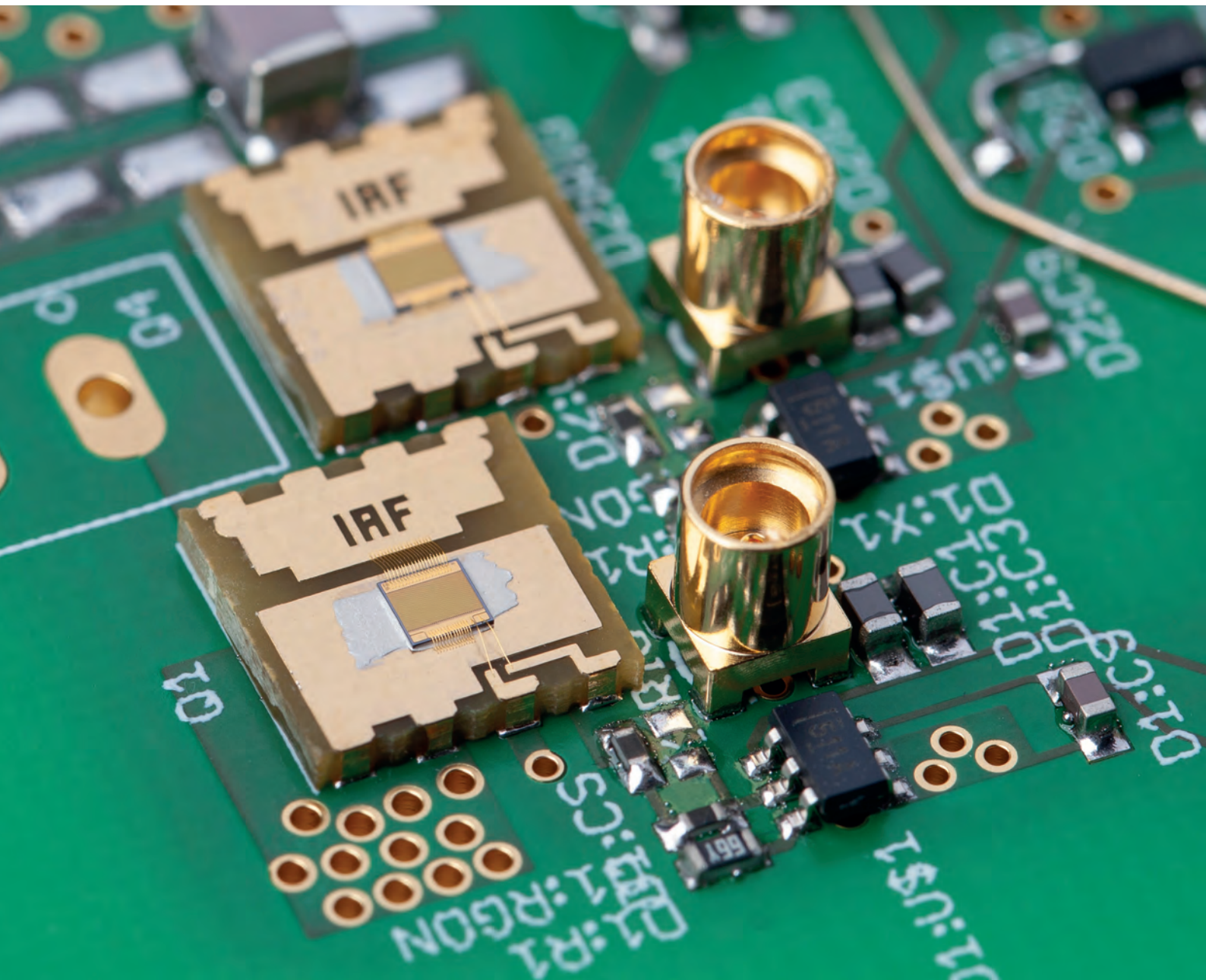
Aktuell beträgt der Anteil der in der EU gefertigten Halbleiter am weltweiten Chipmarkt weniger als zehn Prozent. Die großen Player der Halbleiterindustrie sitzen in den USA, aber vor allem in Asien. Des Weiteren planen die USA und China durch milliardenschwere Investitionen und Förderprogramme auch in Zukunft ihre Vormachtstellung weiter auszubauen. Deshalb hat die EU den »European Chips Act« angekündigt, um die in Europa ansässige Industrie zu fördern und zu unterstützen. Bis 2030 soll Europa ein Fünftel der benötigten Chips selbst herstellen. Als Forschungsinstitut arbeitet das Fraunhofer IAF bereits eng mit europäischen Schlüssel-Partnern aus der

In the past year, manufacturers had to sharply curtail or even temporarily suspend their production due to a lack of semiconductor components. For many affected companies, the current chip crisis is therefore a reason to rethink their supply chains and rely more on European producers.

Development of new European pilot lines by Fraunhofer IAF

Currently, the share of semiconductors manufactured in the EU in the global chip market is less than ten percent. The big players in the semiconductor industry are located in the USA, but mainly in Asia. Furthermore, the U.S. and China are planning to further expand their supremacy in the future through investments and support programs worth billions. For this reason, the EU has announced the "European Chips Act" to promote and support the European-based industry. By 2030, Europe is to produce one fifth of the chips it needs itself. As a research institute, Fraunhofer IAF is already working closely with key European partners from the semiconductor industry such as UMS (United Monolithic Semiconductors), Infineon and





Die maßgeschneiderte Hochvolt-GaN-auf-Si-Technologie für Leistungs-ICs des Fraunhofer IAF bietet neue Möglichkeiten für zahlreiche Anwendungen; unter anderem in Mobilität, Industrie 4.0 und IT.

The customized high-voltage GaN-on-Si technology for power ICs from Fraunhofer IAF offers new possibilities for numerous applications in fields; such as mobility, Industry 4.0 and IT.

Halbleiterindustrie wie UMS (United Monolithic Semiconductors), Infineon und X-FAB zusammen, um souveräne und unabhängige Technologien zu entwickeln. Das Fraunhofer IAF betreibt mehrere MMIC-Prozesse, besonders eine Pilotlinie für integrierte Schaltungen (ICs) auf Basis von GaN, mit der für ausgewählte Kunden spezifische ICs in mittleren Stückzahlen gefertigt werden. Ferner werden mit Hilfe von MPW (Multi-Projekt-Wafern), die auf Basis der von uns entwickelten Design-Tools gefertigt werden, eine Vielzahl von Kunden im industriellen und universitären Umfeld mit maßgeschneiderten MMICs versorgt. Wichtige Adressaten hierfür sind u. a. die ESA und das DLR, mit denen vielfältige Kooperationen bestehen. Unterstützt durch europäische Fördergeber beteiligt sich das Fraunhofer IAF mit Projekten wie »EuGaNIC«, »5G-GaN2« und »UltimateGaN« bereits heute am Aufbau und an der Stärkung einer europäischen Lieferkette.

Ein deutlicher Fokus der Entwicklungsarbeiten am Fraunhofer IAF liegt mittlerweile im Bereich der Mobilkommunikationssysteme der fünften und sechsten Generation. Hier ist eine ganze Reihe von Forschungsprojekten akquiriert worden, die auf eine Umsetzung der Systemanforderungen für das Frequenz-Spektrum bis zum D-Band (110 – 170 GHz) abzielt. Darüber hinaus wird das Fraunhofer IAF zusammen mit namhaften industriellen Partnern im Rahmen der europäischen »IPCEI«-Initiative maßgeblich am Aufbau einer Versorgungskette für besonders leistungsfähige Technologien für die Bereiche Messtechnik und Kommunikation beteiligt sein. Weitere Anwendungsfelder unserer Technologien betreffen hocheffiziente und integrierte (smarte) Lösungen für die Leistungselektronik, z. B. in der Robotik oder für Point-of-Load-Spannungswandler. Das Fraunhofer IAF ist ebenfalls engagiert in der Entwicklung von energieeffizienten und robusten integrierten Schaltungen für Hochfrequenzanwendungen im militärischen Bereich (Radar, Kommunikation) und in der Kleinserien-Fertigung von optischen Matrix-Detektoren. Durch seine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liefert das Fraunhofer IAF wichtige Beiträge für die europäische Souveränität im Bereich der Leading-Edge-Technologien.

Dr. Dirk Schwantuschke

Gruppenleiter am Fraunhofer IAF
Project Manager at Fraunhofer IAF

Dr. Michael Mikulla

Geschäftsfeldleiter Leistungselektronik
Business Unit Manager Power Electronics

X-FAB to develop sovereign and independent technologies. Fraunhofer IAF operates several MMIC processes, especially a pilot line for GaN-based integrated circuits (ICs), which is used to manufacture specific ICs in medium quantities for selected customers. Furthermore, MPW (multi-project wafers), which are fabricated based on design tools developed by us, are used to provide customized MMICs to a large number of customers in the industrial and university environment. Important addressees for this are, to name but a few, the ESA and the DLR, with which a variety of cooperations exist. Supported by European funding bodies, Fraunhofer IAF is already involved in the development and strengthening of a European supply chain for highly efficient GaN-based power and high-frequency electronics with projects such as "EuGaNIC," "5G-GaN2" and "UltimateGaN."

A clear focus of development work is now in the area of fifth and sixth generation mobile communication systems. Here, a whole series of research projects has been acquired, which is aimed at implementing the system requirements for the frequency spectrum up to the D band (110 – 170 GHz). In addition, Fraunhofer IAF will play a major role in establishing a supply chain for particularly high-performance GaN technologies for the fields of metrology and communications together with renowned industrial partners within the framework of the European "IPCEI" initiative. Further application fields of our technologies concern highly efficient and integrated (smart) solutions for power electronics, e.g., in robotics or for point-of-load voltage converters. Fraunhofer IAF is also engaged in the development of energy-efficient and robust integrated circuits for high-frequency applications in the military domain (radar, communications). Through its research and development activities, Fraunhofer IAF provides important contributions to European sovereignty in the field of leading-edge technologies.

Hochfrequenzelektronik für nachhaltige Erdbeobachtung

High-frequency electronics for sustainable Earth observation

Globale Satellitensysteme sollen zukünftig den weltweiten Zugang zu Highspeed-Internet ermöglichen und sind zentraler Bestandteil von Erdbeobachtungssystemen zur hochpräzisen Wettervorhersage sowie Klimaforschung. Effiziente und rauscharme Hochfrequenzschaltkreise sind dabei entscheidende Schlüsselkomponenten für die Realisierung von neuartigen satellitenbasierten Kommunikationssystemen und Mikrowellenradiometern. Diese Schaltungen ermöglichen die Übertragung großer Datenmengen in Satellitenstrecken und hochgenaue Messungen der Atmosphäre zur Beobachtung von Wetterphänomenen. Mit hohen Bandbreiten und ultra-niedrigen Rauschtemperaturen ermöglichen die am Fraunhofer IAF entwickelten extrem schnellen Transistortechnologien die Erschließung neuer Frequenzbänder im Millimeterwellen-Frequenzbereich sowie die Erforschung innovativer Satellitensysteme in Europa.

Global satellite systems will provide worldwide access to high-speed Internet in the future and are a central component of earth observation systems for high-precision weather forecasting and climate research. Efficient and low-noise high-frequency circuits are key components for the realization of novel satellite-based communication systems and microwave radiometers. These circuits enable the transmission of large amounts of data in satellite links and highly accurate measurements of the atmosphere for the observation of weather phenomena. With high bandwidths and ultra-low noise temperatures, the extremely fast transistor technologies developed at Fraunhofer IAF enable the investigation of new frequency bands in the millimeter-wave frequency range as well as the exploration of innovative satellite systems in Europe.

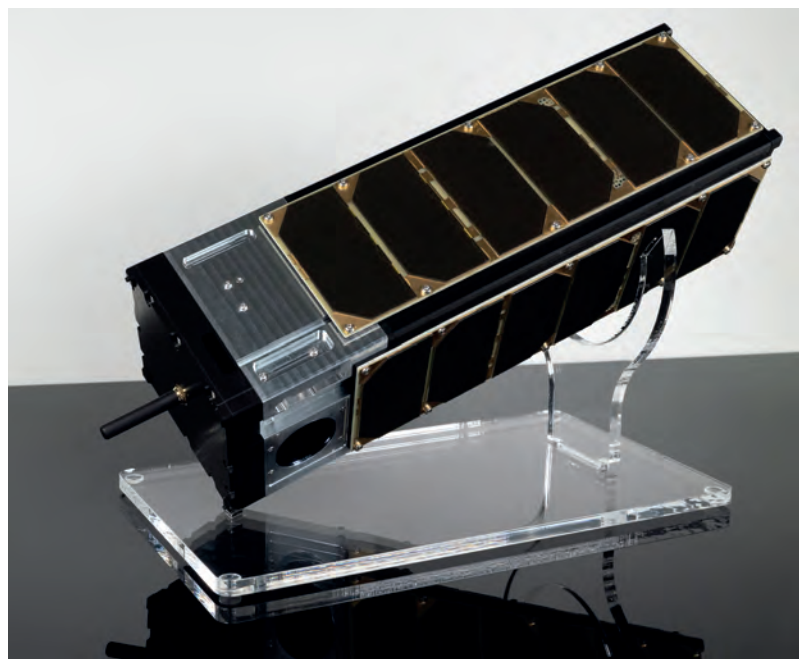
Der CubeSat umkreist seit August 2021 die Erde zur Untersuchung der atmosphärischen Kanalausbreitung im W-Band. Der komplette 10 x 10 x 40 cm³ große CubeSat-Satellite (rechts) wurde im Verbundprojekt »ARTES« entwickelt und gebaut.

The CubeSat has been orbiting the Earth since August 2021 to study atmospheric channel propagation in the W band. The complete 10 x 10 x 40 cm³ CubeSat satellite (right) was developed and built in the joint project "ARTES."



Neben dem Mond als einzigem natürlichen Satelliten umkreist eine schnell wachsende Anzahl an künstlichen Satellitenkonstellationen unsere Erde. Diese Satellitensysteme bilden einen entscheidenden Baustein in unserer stark vernetzten Welt und finden beispielsweise bei der Bestimmung der eigenen Position (GPS) sowie der Abfrage aktuellster Wettervorhersagen Anwendung in unserem Alltag. In der Vergangenheit wurden für diese Anwendungen kleine Satellitenkonstellationen aus hochkomplexen Satelliten installiert. Basierend auf neuen Technologien geht der Trend heute zu der Entwicklung einer großen Anzahl von kleinen Satelliten, die in einer großen Satellitenkonstellation ein weltumspannendes Netzwerk bilden können. Dadurch wird die Erforschung und Realisierung neuartiger Satellitensysteme zur Datenübertragung und Erdbeobachtung vorangebracht. Gleichzeitig können Kosten und Zeit für die Entwicklung neuer Satelliten deutlich reduziert werden. Effiziente und hochempfindliche Hochfrequenzschaltkreise ermöglichen dabei die Erschließung neuer Frequenzbereiche. Mit Rekordwerten für extrem schnelle und rauscharme Transistoren bilden die am Fraunhofer IAF entwickelten Technologien daher einen wichtigen Baustein für die Entwicklung souveräner europäischer Satellitentechnologien.

In addition to the moon as the only natural satellite, a rapidly growing number of artificial satellite constellations orbit our Earth. These satellite systems are a crucial building block in our highly-connected world and are used in our everyday lives, for example, to determine our own position (GPS) and to retrieve the latest weather forecasts. In the past, small satellite constellations with highly complex satellites were installed for these applications. Based on new technologies, the trend today is toward the development of a large number of small satellites that can form a global network in a large satellite constellation. This will advance the research and realization of novel satellite systems for data transmission and Earth observation. At the same time, the costs and time required for the development of new satellites can be significantly reduced. Efficient and highly sensitive high-frequency circuits make it possible to open up new frequency ranges. With record values for extremely fast and low-noise transistors, the technologies developed at Fraunhofer IAF form an important building block for the development of sovereign European satellite technologies.



Satellitenkommunikation mit hohen Bandbreiten

Als wichtiger Schritt für zukünftige satellitengestützte Kommunikationssysteme mit hohen Bandbreiten konnte der im Verbundprojekt »W-Cube« entwickelte CubeSat im Jahr 2021 erfolgreich in Betrieb genommen werden. Seit August 2021 umkreist der Nanosatellit die Erde und sendet Testsignale um 75 GHz aus einem erdnahen Orbit. Durch die Vermessung dieser bisher ungenutzten Frequenzbereiche kann die atmosphärische Kanalausbreitung im W-Band bei unterschiedlichen Wetterlagen erstmals modelliert sowie für zukünftige Satellitensysteme erschlossen und erforscht werden. Dabei bilden die benötigten Hochfrequenzschaltkreise eine wichtige Schlüsselkomponente für hochgenaue Messungen zwischen dem Satelliten und der Erde. Auf Basis der jahrzehntelangen Expertise in der Entwicklung von Hochfrequenztechnologien und Aufbautechnik wurde die hier eingesetzte Elektronik für den Satelliten sowie die Bodenstation am Fraunhofer IAF entwickelt. Während die neuen Kanalmessungen wichtige Erkenntnisse für die Auslegung zukünftiger Satellitenstrecken liefern, werden die Hochfrequenzkomponenten für diese Systeme schon heute am Fraunhofer IAF erforscht. In aktuellen Verbundprojekten wie »EIVE« und »UN:IO« entwickeln wir Hochfrequenzkomponenten sowie Konzepte als Zukunftstechnologien für europäische satellitengestützte Kommunikationssysteme.

Rauscharme Verstärker für Mikrowellenradiometer

Hochempfindliche Verstärker mit niedriger Rauschzahl sind auch eine entscheidende Kernkomponente in der Empfängerseite von Mikrowellenradiometern und ermöglichen die Minimierung der Rauschtemperatur des Gesamtsystems. Daher werden unsere Verstärker wie schon in den Wettersatelliten der Serie »MetOp-SG« auch in dem neuen »Arctic Weather Satellite«-System der Europäischen Weltraumorganisation ESA eingesetzt. Die Verstärkermodule für die Frequenzbänder um 54, 89 und 183 GHz befinden sich aktuell in der Entwicklung und sollen im Laufe des Jahres 2022 geliefert werden. Um zukünftig auch die für Mikrowellenradiometer relevanten Submillimeterwellen-Frequenzen über 300 GHz mit rauscharmen Verstärkern bedienen zu können, wird im Auftrag der ESA seit 2021 die Umsetzung solcher Verstärker für die Frequenzbänder um 325, 448 sowie 664 GHz untersucht. Der hohe Stellenwert der am Fraunhofer IAF entwickelten Transistoren als Zukunftstechnologie für satellitengestützte Erdbeobachtungssysteme ist dabei über die europäischen Grenzen hinweg sichtbar. Eingesetzt von VDI in den für die NASA entwickelten »TROPICS«-CubeSat, ermöglichen unsere rauscharmen Verstärkerschaltungen bei 205 GHz seit Mitte 2021 die Beobachtung von Hurrikans und Taifunen.

Dr. Laurenz John

Projektleiter am Fraunhofer IAF
Project Manager at Fraunhofer IAF

Satellite communication with high bandwidths

As an important step for future satellite-based communication systems with high bandwidths, the CubeSat developed in the joint project "W-Cube" was successfully put into operation in 2021. Since August 2021, the nanosatellite has been orbiting the Earth and transmitting test signals around 75 GHz from a low-Earth orbit. By measuring these previously unused frequency ranges, atmospheric channel propagation in the W band under different weather conditions can be modeled for the first time, as well as accessed and researched for future satellite systems. The required high-frequency circuits are an important key component for high-precision measurements between the satellite and the Earth. Based on decades of expertise in the development of high-frequency technologies and assembly techniques, the electronics used for the satellite as well as the ground station were developed at Fraunhofer IAF. While the new channel measurements provide important insights for the design of future satellite links, the radio frequency components for these systems are already being researched at Fraunhofer IAF. In current joint projects such as "EIVE" and "UN:IO," we develop high frequency components as well as concepts as future technologies for European satellite-based communication systems.

Low-noise amplifiers for microwave radiometers

Highly sensitive amplifiers with a low noise figure are a crucial core element in the receiver chain of microwave radiometers and enable the noise temperature of the overall system to be minimized. For this reason, our amplifiers are also used in the new "Arctic Weather Satellite" system of the European Space Agency (ESA), as well as in the weather satellites of the "MetOp-SG" series. The amplifier modules for the frequency bands around 54, 89 and 183 GHz are currently under development and are scheduled for delivery in the course of 2022. In order to be able to serve the submillimeter wave frequencies above 300 GHz, which are relevant for microwave radiometers, with low-noise amplifiers in the future, the implementation of such amplifiers for the frequency bands around 325, 448 and 664 GHz has been under study on behalf of ESA since 2021. The high significance of the transistors developed at Fraunhofer IAF as a future technology for satellite-based earth observation systems is visible beyond the European borders. Used by VDI in the "TROPICS" CubeSat developed for NASA, our low-noise amplifier circuits at 205 GHz have enabled the observation of hurricanes and typhoons since mid-2021.

Eingesetzt von VDI in den für die NASA entwickelten »TROPICS«-CubeSat-Satelliten, ermöglichen unsere rauscharmen Verstärkerschaltungen bei 205 GHz seit Mitte 2021 die Beobachtung von Hurrikans und Taifunen.

Used by VDI in the "TROPICS" CubeSat satellites developed for NASA, our low-noise amplifier circuits at 205 GHz have enabled observation of hurricanes and typhoons since mid-2021.



Radar sorgt für Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration

Radar ensures safety in human-robot collaboration

Ob im Rahmen des demografischen Wandels länger ein selbstbestimmtes Leben zu führen oder zur körperlichen Entlastung am Arbeitsplatz, der Einsatz von Robotern wird sowohl im industriellen Umfeld als auch im Pflege- und Medizinbereich in den nächsten Jahren stark zunehmen. Dabei muss die Personensicherheit stets im Vordergrund stehen. Abgesehen von der Leichtbaurobotik ist bislang keine Technologie verfügbar, welche die Kollaborationsräume zwischen Mensch und Roboter bei hohen Ausführungsgeschwindigkeiten und Nutzlasten sicher überwachen kann. Die hochsensible und zuverlässige Radarsensorik des Fraunhofer IAF ist aufgrund ihrer Eigenschaften ein idealer Kandidat, diese Lücke in Zukunft zu schließen, und trägt somit zur Erforschung einer effizienten Mensch-Roboter-Kollaboration bei.

Whether leading a longer self-determined life in the light of demographic change or for physical relief at the workplace; the use of robots will increase strongly in the next few years both in the industrial environment as well as in the servicing and medical sector. In this context, personal safety must always be paramount. Apart from lightweight robotics, no technology is yet available that can safely monitor the collaboration spaces between humans and robots at high execution speeds and payloads. Due to its properties, the highly sensitive and reliable radar sensor technology of Fraunhofer IAF is an ideal candidate to close this gap in the future and thus contributes to the research of efficient human-robot collaboration.

Abb. 1: Das Fraunhofer IAF entwickelt Radartechnologie, die Mensch-Roboter-Kollaboration auch bei hohen Ausführungsgeschwindigkeiten und Nutzlasten ermöglichen kann.

Fig. 1: Fraunhofer IAF develops radar technology that can make human-robot collaboration possible even at high execution speeds and payloads.



Bislang trennen Schutzzäune die Arbeitsbereiche von Menschen und Robotern im industriellen Umfeld. Das Öffnen des Zauns geht mit einem Stopp des Roboters einher, eine Kollaboration ist auf diese Weise Prinzip-bedingt ausgeschlossen. Lösungen wie optische Lichtvorhänge oder Laserscanner überwachen lediglich zweidimensionale Ebenen und ersetzen damit den Zaun durch ein unsichtbares Pendant. Sie sind zur Überwachung einer engen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ungeeignet. Kamerasysteme zur Überwachung des Kollaborationsraumes hingegen sind fremdlichtabhängig und können beispielsweise durch Sonnenlicht oder Reflexionen geblendet werden. Sensortechnologien, wie Ultraschall-, kapazitive- oder Kraft-Moment-Sensoren, die heute eine Kollaboration ermöglichen, sind durch geringe Reichweiten und Traglasten auf den Einsatz bei Leichtbaurobotern beschränkt. Für eine sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit schweren Maschinen oder hohen Geschwindigkeiten bedarf es daher einer neuen Sensorlösung.

Radarsensorik als Enabling-Technologie

Die Radarsensorik bietet die Möglichkeit, die Umgebung des Roboters dreidimensional über große Entfernungen zuverlässig zu erfassen. Somit können Menschen frühzeitig erkannt und die Roboterbewegung entsprechend angepasst werden, beispielsweise durch eine Reduzierung seiner Geschwindigkeit oder eine alternative Routenplanung. Radarsensoren arbeiten selbst bei eingeschränkten optischen Sichtverhältnissen (wie etwa durch Rauch, Staub oder Nebel) zuverlässig, sind unabhängig vom Umgebungslicht und auch der Datenschutz ist – im Gegensatz zur Überwachung mit Kamerasystemen – sichergestellt, da Personen zwar erkannt, jedoch nicht identifiziert werden können.

Until now, protective fences have separated the work areas of humans and robots in industrial environments. Opening the fence is accompanied by a stop of the robot, and collaboration is therefore principally excluded. Solutions such as optical light curtains or laser scanners only monitor two-dimensional levels and thus replace the fence with an invisible counterpart. They are unsuitable for monitoring close collaboration between humans and robots. Camera systems for monitoring the collaboration space, on the other hand, depend on extraneous light and can be blinded by sunlight or reflections, for example. Sensor technologies, such as ultrasonic, capacitive or force-torque sensors, that enable collaboration today, are limited to use with lightweight robots due to low ranges and payloads. Thus, safe human-robot collaboration with heavy machines or high speeds, a new sensor solution is needed.

Radar sensor technology as enabling technology

Radar sensor technology offers the possibility of reliably detecting a robot's surroundings in three dimensions over large distances. This means that people can be detected at an early stage and the robot's movement can be adjusted accordingly, for example by reducing its speed or planning an alternative route. Radar sensors work reliably even in restricted optical visibility conditions (such as smoke, dust or fog), are independent of ambient light, and data protection is also ensured — in contrast to monitoring with camera systems — because people can be detected but not identified.

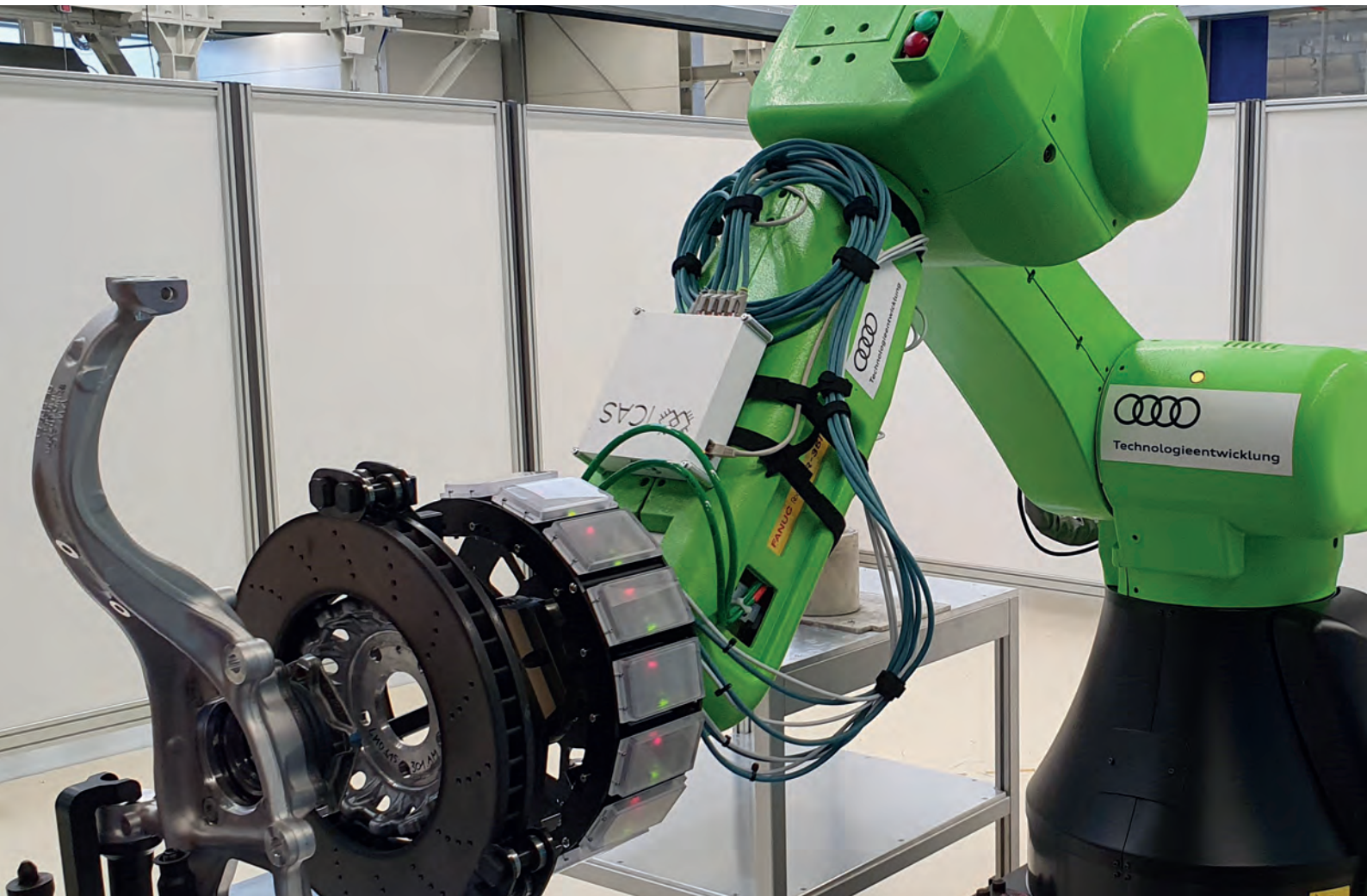


Abb. 2: Im Rahmen des Projekts »RoKoRa« entwickelter Radar-Sensorring in einer Demonstrationsanwendung am Roboter. Der Demonstrator ist in der Lage, dynamisch und erwartungskonform bei der Montage einer Bremsscheibe mit dem Menschen zu kollaborieren.

Fig. 2: Radar sensor ring developed as part of the "RoKoRa" project in a demonstration application on a robot. The demonstrator is able to collaborate dynamically and in line with expectations with humans during the assembly of a brake disc.

As part of the research project "["RoKoRa,"](#)" a radar system in the frequency range around 77 GHz was developed with the participation of Fraunhofer IAF, which successfully demonstrates an application in industrial heavy-duty robotics. Several radar sensors on the arm of the robot monitor its environment in 360° (see Fig. 2). Distance monitoring determines the current maximum permissible speed for the robot so that it can still stop in an emergency in order to avoid a collision with people or obstacles. Since the radar sensors can detect not only the torso of a human, but also individual body parts such as arms, hands or even fingers, close spatial cooperation is possible. The dynamic speed control enables efficient collaboration.

Abb. 3: Aufnahme eines Taschenrechners mit einem ultra-breitbandigen Radarsystem des Fraunhofer IAF um 400 GHz. Aufgrund des hohen Frequenzbereichs ist eine hochauflösende, detailreiche Abbildung mittels Radar möglich.

Fig. 3: Imaging of a calculator with an ultra-wideband radar system of Fraunhofer IAF around 400 GHz. Due to the high frequency range, high-resolution, detailed imaging is possible using radar.

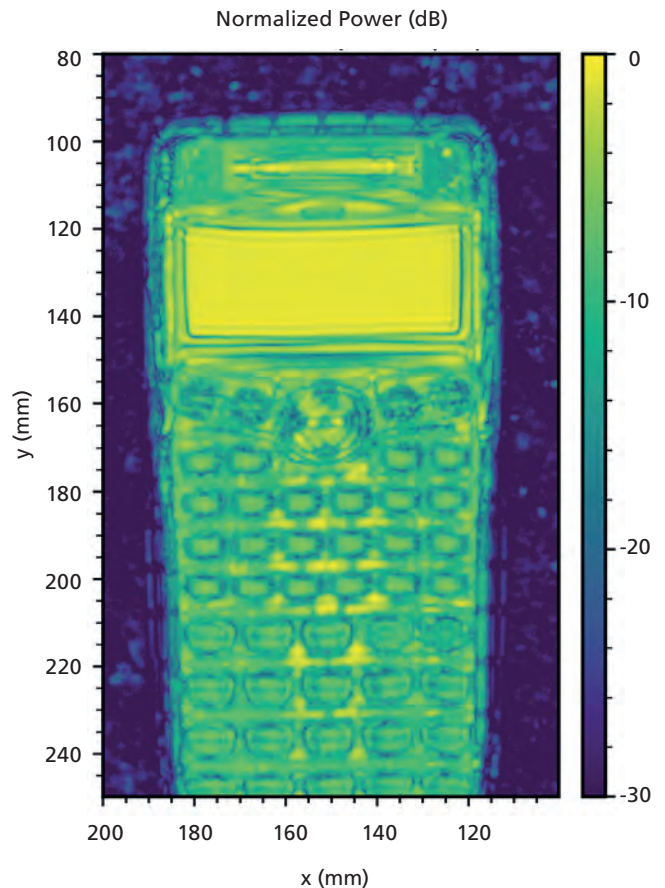
Im Rahmen des Forschungsprojekts »RoKoRa« wurde, unter Beteiligung des Fraunhofer IAF, ein Radarsystem im Frequenzbereich um 77 GHz entwickelt, welches einen Einsatz in der industriellen Schwerlastrobotik erfolgreich demonstriert. Mehrere Radarsensoren am Arm des Roboters überwachen seine Umgebung in 360° (siehe Abb. 2). Eine Abstandsüberwachung ermittelt die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit für den Roboter, sodass dieser im Ernstfall noch stoppen kann, um eine Kollision mit Menschen oder Hindernissen zu vermeiden. Da mit den Radarsensoren nicht nur der Rumpf eines Menschen, sondern auch einzelne Körperteile wie Arme, Hände oder gar Finger erkannt werden können, ist eine räumlich enge Zusammenarbeit möglich. Die dynamische Geschwindigkeitssteuerung ermöglicht somit eine effiziente Kollaboration.

Vielseitiger Einsatz

Der Einsatz von Radarsensoren in der Mensch-Roboter-Kollaboration ist nicht auf industrielle Umgebungen begrenzt. Um zukünftig ein noch detaillierteres »Bild« der Umgebung zu erhalten, können breitbandige Radarsysteme in höheren Frequenzbereichen eingesetzt werden, mit denen eine bessere Auflösung möglich ist. Abbildung 3 zeigt die Aufnahme eines Taschenrechners mit einem ultra-breitbandigen 400 GHz-Radarsystem des Fraunhofer IAF. Hieraus ist deutlich der erzielbare Detailgrad aufgrund des hohen Frequenzbereichs zu erkennen. Die Sensorik ist perspektivisch so auch für mobile Service- und Assistenzroboter, beispielsweise in der Pflege, interessant und kann auf diese Anwendungen übertragen werden. So können in Zukunft nicht nur Fertigungsprozesse, sondern auch personennahe Dienstleistungen durch Radartechnologien in Kombination mit Robotern souveräner werden.

Dr. Christian Zech

Projektleiter am Fraunhofer IAF
Project Manager at Fraunhofer IAF



Versatile use

The use of radar sensors in human-robot collaboration is not limited to industrial environments. In order to obtain an even more detailed "image" of the environment in the future, broadband radar systems can be used in higher frequency ranges, with which better resolution is possible. Figure 3 shows the image of a calculator with an ultra-wideband 400 GHz radar system of Fraunhofer IAF, which shows the high level of detail that can be achieved due to the high frequency range. In perspective, the sensor technology is thus also interesting for mobile service and assistance robots, for example in health-care, and can be transferred to these applications. Thus, in the future, not only manufacturing processes, but also person-related services can become more sovereign through radar technologies in combination with robots.

Zukunftstechnologie Quantencomputing

Future technology quantum computing

Enabling-Technologien für Quantensysteme

Das Fraunhofer IAF erforscht und entwickelt Halbleiterbauelemente und elektronische Komponenten zur Ansteuerung und Manipulation von Farbzentren in Diamant, die als Qubits für das Quantencomputing eingesetzt werden. Wir untersuchen, wie man mit Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant einzelne Qubits realisieren, stabilisieren, manipulieren und diese zu einem größeren Quantenregister verschränken kann, um Quanten-Gate-Operationen durchführen zu können. Darüber hinaus forschen wir im Bereich des Quantum Software Engineering sowie hybrider Quantenanwendungen sowie -algorithmen und leiten gemeinsam mit dem Fraunhofer IAO das Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg«. 2021 sind zahlreiche EU- sowie BMBF-Projekte gestartet und bestehende Projekte erfolgreich fortgeführt worden. Einen Überblick erhalten Sie auf S. 53.

Nachhaltiger Betrieb und technologische Souveränität durch Diamant

Heutige Quantencomputer der zweiten Generation haben schon das Potenzial durch extrem kurze Rechenzeiten Ressourcen einzusparen, obwohl ihr Betrieb sehr aufwändig ist. Um die für Rechenoperationen benötigte Quantenkohärenz erreichen und aufrecht erhalten zu können, enthalten die Geräte kryogene Kühlsysteme, die Qubits auf bis zu -273 °C herunterkühlen. Der vom Fraunhofer IAF erforschte Ansatz, mithilfe der NV-Zentren in Diamant skalierbare Qubits zu realisieren, ermöglicht perspektivisch dagegen Quantencomputing bei Raumtemperatur und somit eine enorme Steigerung der Ressourceneffizienz.

Durch die enorme Härte des Diamantkristallgitters sind daraus erzeugte Qubits zur Quantenverschränkung zum einen nicht auf kryogene Temperaturen angewiesen, zum anderen hält ihre Kohärenz um ein Vielfaches länger an und ist resilienter gegenüber Störeinflüssen. Gemeinsam mit nationalen wie internationalen Partnern arbeitet das Fraunhofer IAF daran, das Potenzial dieser überlegenen Eigenschaften für Deutschland und Europa zu erschließen und technologische Souveränität im Quantencomputing zu gewährleisten.

Enabling technologies for quantum systems

Fraunhofer IAF researches and develops semiconductor devices and electronic components to drive and manipulate color centers in diamond, which are used as qubits for quantum computing. We are investigating how nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond can be used to realize, stabilize, manipulate, and entangle individual qubits into a larger quantum register to perform quantum gate operations. We also conduct research in quantum software engineering and hybrid quantum applications as well as algorithms and, together with Fraunhofer IAO, lead the Competence Center "Quantum Computing Baden-Württemberg." In 2021, numerous EU as well as BMBF projects have started and existing projects were successfully pursued. You can find an overview on p. 53.

Sustainable operating and technological sovereignty due to diamond

Today's second-generation quantum computers already have the potential to save resources through extremely short computing times, despite the fact that their operation is very complex. In order to achieve and maintain the quantum coherence required for computational operations, the devices contain cryogenic cooling systems that cool down qubits to as low as -273 °C . The approach explored by Fraunhofer IAF to realize scalable qubits using NV centers in diamond, on the other hand, enables quantum computing at room temperature in perspective and thus an enormous increase in resource efficiency.

Due to the enormous hardness of the diamond crystal lattice, qubits generated from it are not dependent on cryogenic temperatures for quantum entanglement, and their coherence lasts many times longer and is more resilient to interference. Together with national and international partners, Fraunhofer IAF is working to exploit the potential of these superior properties for Germany and Europe, aiming to ensure technological sovereignty in quantum computing.

Vorhang auf: Fraunhofer und IBM weihen Quantencomputer ein

Im digitalen Beisein der ehemaligen Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel und Bundesforschungsministerin Anja Karliczek sowie dem baden-württembergischen Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann enthüllten die führenden Köpfe von Fraunhofer und IBM im Juni 2021 den ersten IBM Quantum System One in Deutschland für die Öffentlichkeit. Der Quantencomputer mit 27 supraleitenden Qubits steht auch Industrieunternehmen, KMUs, Startups sowie akademischen Einrichtungen für den anwendungsbezogenen Einsatz zur Verfügung.

Curtain up: Fraunhofer and IBM to unveil quantum computer

In the digital presence of former Chancellor Dr. Angela Merkel, Federal Minister of Education and Research Anja Karliczek and Minister-President of Baden-Württemberg Winfried Kretschmann, leading figures from Fraunhofer and IBM officially unveiled Germany's first IBM Quantum System One to the public, in June 2021. The quantum computer with 27 superconducting qubits is also available to industrial companies, SMEs, startups as well as academic institutions for application-related use.

Quantencomputing-Schulungen

Um Quantencomputer schnellstmöglich in den industriellen Einsatz zu bringen, haben die Fraunhofer-Institute IAF und IAO im Rahmen des Kompetenzzentrums »Quantencomputing Baden-Württemberg« eine Schulungsreihe für Forschende und Unternehmen gestartet. Dabei stehen neben der Wissensvermittlung auch das Kennenlernen und die Interaktion mit dem IBM-Quantencomputer in Ehningen auf dem Plan. Vom Einstieg bis in tiefergehende Fragestellungen, ob mit oder ohne Vorkenntnisse – für alle mit Interesse an Quantencomputing ist etwas dabei. Mit IBM ist zudem ein Netzwerkevent mit einer Führung am Quantencomputer in Ehningen geplant.

Quantum computing trainings

In order to bring the quantum computer into industrial use as quickly as possible, the Fraunhofer Institutes IAF and IAO have started a training program for researchers and companies within the Competence Center "Quantum Computing Baden-Württemberg." In addition to knowledge transfer, the program also includes interaction with the IBM quantum computer in Ehningen. From basic to more advanced know-how, with or without prior knowledge — there is something for everyone with an interest in quantum computing. A networking event with a tour of the quantum computer in Ehningen is also planned with IBM.

Erfahren Sie mehr über den Zugang zum Quantencomputer sowie die Schulungen im Fraunhofer-Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg«.



Learn more about the access to quantum computing as well as the trainings at the Fraunhofer Competence Center "Quantum Computing Baden-Württemberg."



Innovation durch starke Partner

Innovation due to strong partners

Innovationen basieren auf Austausch: Ob Know-how, Equipment oder Material – die optimale Verteilung von Ressourcen ermöglicht ihre bestmögliche Nutzung. Deshalb setzt das Fraunhofer IAF auf den Wissenstransfer mit anderen Forschungseinrichtungen, die Verwertungskompetenz von Industrieunternehmen und das hochwertige Equipment und Material unserer Lieferanten. Gemeinsam mit unseren Partnern aus Wissenschaft und Industrie bilden wir ein starkes Netzwerk und entwickeln die technologischen Innovationen, die unsere Wirtschaft und Gesellschaft von morgen prägen.

Innovations are based on exchange: Whether know-how, equipment or material — the optimal distribution of resources enables their optimal use. Therefore, Fraunhofer IAF relies on knowledge transfer with other research institutions, the exploitation expertise of industrial companies, and the high-quality equipment and material of our suppliers. Together with our partners from science and industry, we form a strong network and develop the technological innovations that will shape our economy and society of tomorrow.

Verbünde und Netzwerke innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft Alliances and networks within the Fraunhofer-Gesellschaft

- [Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland FMD](#)
[Research Fab Microelectronics Germany](#)
- [Fraunhofer-Leistungsbereich für Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS](#)
[Fraunhofer Segment for Defense and Security VVS](#)
- [Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing](#)
[Fraunhofer Competence Network Quantum Computing](#)
- [Fraunhofer UK Research](#)
- [Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg«](#)
[Competence Center "Quantum Computing Baden-Württemberg"](#)
- [Verbund Mikroelektronik VμE](#)
[Group for Microelectronics VμE](#)

Forschungshubs und Netzwerke für Forschung, Wissenstransfer und Infrastruktur Research hubs and networks for research, knowledge transfer and infrastructure

- Open6GHub
- 6G Research and Innovation Cluster
- [ASCENT+ – Europäische Nanoelektronik-Netzwerk](#)
[ASCENT+ — Network for European Nanoelectronics Access](#)
- Bitkom
- EPIC
- iQuSense
- Quantum Business Network (QBN)
- [Velektronik – Plattform für vertrauenswürdige Elektronik](#)
[Velektronik — Platform for trustworthy electronics](#)

Partnerschaften für eine grüne und unabhängige Zukunft

Partnerships for a green and independent future

Kooperationspartner aus Wirtschaft und Forschung Cooperation partners from industry and research

- Eine Vielzahl von nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen und Unternehmen
Numerous national and international research institutions and companies
- Transnationales Netzwerk der Fraunhofer-Gesellschaft mit 76 Instituten
Transnational network of the Fraunhofer-Gesellschaft with 76 institutes
- Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH der Universität Freiburg sowie das Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg LZN
Institute for Sustainable Systems Engineering INATECH of the University of Freiburg and the Sustainability Center Freiburg LZN

Anwendungsnahe Verbundprojekte mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft Application-oriented collaborative projects with partners from science and industry

- [6G SENTINEL – Schlüsseltechnologien für den kommenden Mobilfunkstandard 6G](#)
[6G SENTINEL — Key technologies for the future 6G mobile communications standard](#)
- [EdgeLimit-Green ICT – Energieeffizientes Edge-Cloud-Mobilfunksystem](#)
[EdgeLimit -Green ICT — Energy-efficient edge-cloud mobile system](#)
- [T-KOS – Terahertztechnologien für Kommunikation und Sensorik](#)
[T-KOS — Terahertz technologies for communications and sensor technology](#)
- [ZEPOWEL – Elektronik mit geringstem Energieverbrauch](#)
[ZEPOWEL — Towards Zero Power Electronics](#)
- [ElKaWe – Elektrokolorische Wärmepumpen](#)
[ElKaWe — Electrocaloric heat pumps](#)
- [QMag – Quantenmagnetometrie bei Raumtemperatur](#)
[QMag — Quantum magnetometry at room temperature](#)
- Quantencomputing-Projekte rund um die Entwicklung von Quantencomputern sowie den Aufbau von Infrastruktur für Forschung und Lieferketten in Deutschland und Europa:
Quantum computing projects related to the development of quantum computers and the establishment of infrastructure for research and supply chains in Germany and Europe:
 - [SPINNING – Quantencomputer auf Basis von Spin-Qubits in Diamant](#)
[SPINNING — diamond spin-photon-based quantum computer](#)
 - [MATQu – Materialien für das Quantencomputing](#)
[MATQu — Materials for Quantum Computing](#)
 - [De-Brill – Herstellungsprozess und neuartige Steuerungstechniken für Diamant-Quantencomputer](#)
[De-Brill — Manufacturing process and novel control techniques for diamond quantum computers](#)
 - [QC-4-BW – Diamant-basiertes, spintronisches Quantenregister für skalierbaren Quantenprozessor](#)
[QC-4-BW — Diamond-based spintronic quantum register for a scalable quantum processor](#)
 - [QORA – Quantenoptimierung mit resilienten Algorithmen](#)
[QORA — Quantum optimization using resilient algorithms](#)
 - [HPCQS – High-Performance Computer and Quantum Simulator hybrid](#)

Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland



more
info



Research Fab Microelectronics Germany

In der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) bündeln das Fraunhofer IAF, zehn weitere Fraunhofer-Institute sowie zwei Institute der Leibniz-Gemeinschaft ihre Expertise und Infrastruktur zur Erforschung und Entwicklung von Mikro- und Nanosystemen. Die FMD bietet Kunden und Partnern einen einfachen Zugang zu neuen Anwendungen und Hochtechnologien auf internationalem Spitzenniveau. Das Fraunhofer IAF bringt hierfür seine Expertise und einzigartige Infrastruktur im Bereich der Verbindungshalbleiter ein, um hocheffiziente, ressourcenschonende und sichere Lösungen zu realisieren sowie Zukunftstechnologien wie Quantencomputing und 6G in Europa voranzubringen.

Vielversprechende Zukunftsprojekte der FMD

Mit der standort-, technologie- und kompetenzübergreifenden Zusammenarbeit sorgt die FMD für den Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität in Deutschland und Europa entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Das Fraunhofer IAF bringt sich in mehreren Initiativen der Forschungsfabrik ein, um Innovationen im Bereich grüner IKT und Quantentechnologien aus dem Labor in die Praxis zu bringen. In den vergangenen zwei Jahren starteten gleich vier vielversprechende Zukunftsprojekte mit Beteiligung des Fraunhofer IAF, drei davon 2021:

- [ASCENT+](#) – Zugang zur europäischen Infrastruktur für Nanoelektronik
- [MATQu](#) – Materialien für das Quantencomputing
- [T-KOS](#) – Terahertz-Technologien für Kommunikation und Sensorik
- [Velektronik](#) – Vertrauenswürdige Elektronik

2021 wurde das Fraunhofer-Leitprojekt »[ZEPOWEL](#)« (»Towards Zero Power Electronics«) erfolgreich abgeschlossen. Darin arbeiteten acht Fraunhofer-Institute seit 2017 gemeinsam an der Entwicklung besonders energieeffizienter Module, die den Energiebedarf des Internets der Dinge (»Internet of Things« in der Zukunft drastisch senken können.

In the Reserach Fab Microelectronics Germany (FMD), Fraunhofer IAF, ten other Fraunhofer institutes and two institutes of the Leibniz Association pool their expertise and infrastructure for research and development of micro- and nanosystems. The FMD offers customers and partners easy access to new applications and high technologies at the highest international level. To this end, Fraunhofer IAF contributes its expertise and unique infrastructure in the field of compound semiconductors to realize highly efficient, resource-saving and secure solutions as well as to advance future technologies such as quantum computing and 6G in Europe.

Promising future projects of the FMD

With its cross-location, cross-technology and cross-competence collaboration, FMD ensures the preservation and expansion of technological sovereignty in Germany and Europe along the entire value chain. Fraunhofer IAF is involved in several initiatives of the research factory to bring innovations in the field of green ICT and quantum technologies from the laboratory into practice. No less than four promising future projects with Fraunhofer IAF participation started in the past two years, three of them in 2021:

- [ASCENT+](#) — Access to European Infrastructure for Nanoelectronics
- [MATQu](#) — Materials for Quantum Computing
- [T-KOS](#) — Terahertz technologies for communication and sensor technology
- [Velektronik](#) — Trustworthy Electronics

In 2021, the Fraunhofer lead project "[ZEPOWEL](#)" (Towards Zero Power Electronics) was successfully completed. Since 2017, eight Fraunhofer institutes have been working together on the development of particularly energy-efficient modules that can drastically reduce the energy requirements of the Internet of Things in the future.

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

University of Freiburg

Die Albert-Ludwigs-Universität Freiburg gehört zu den Top-100 Universitäten der Welt und wurde für ihre exzellente Forschung und Lehre bereits mehrfach gekürt. Durch intensive Kontakte zu herausragenden Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie Kooperationen mit erfolgreichen Industrieunternehmen gestaltet die Universität Freiburg den Transfer von der Grundlagenforschung in die gesellschaftliche und wirtschaftliche Praxis aktiv mit. So ist die Universität Freiburg für das Fraunhofer IAF der zentrale Kooperationspartner für nachhaltige Forschung.

Zusammen mit den vier weiteren Freiburger Fraunhofer-Instituten unterhält das Fraunhofer IAF mit der Universität Freiburg das Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) und das Leistungszentrum Nachhaltigkeit (LZN), um in Forschung wie Lehre Nachhaltigkeit als Leitgedanken bei der Entwicklung technischer Systeme zu etablieren und neueste Ergebnisse und Ideen aus der Wissenschaft schnellstmöglich in die Praxis zu überführen. Master-Studierende und Promovierende der Universität nutzen die anwendungsorientierte Forschungsinfrastruktur und den Austausch mit den Mitarbeitenden für ihre Arbeiten. Forschende des Fraunhofer IAF teilen ihr Wissen und ihre Erfahrungen wiederum in Lehrveranstaltungen an der Universität ([siehe S. 92](#)).

Die besondere Partnerschaft zwischen Universität Freiburg und Fraunhofer IAF zeigt sich besonders in dem Umstand, dass die Institutsleitung zwei Professuren an der Universität innehat: Seit 2017 ist Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher Gips-Schüle-Professor für Leistungselektronik, seit 2021 ist Prof. Dr. Rüdiger Quay Fritz-Hüttinger-Professor für Energieeffiziente Hochfrequenzelektronik.

The Albert-Ludwigs-University of Freiburg is one of the top 100 universities in the world and has been awarded several times for its excellent research and teaching. Through intensive contacts with outstanding universities and research institutions as well as cooperation with successful industrial companies, the University of Freiburg actively shapes the transfer of basic research into social and economic practice. Thus, the University of Freiburg is the central cooperation partner of Fraunhofer IAF for sustainable research.

Together with the four other Fraunhofer institutes in Freiburg, Fraunhofer IAF and University of Freiburg maintain the Department of Sustainable Systems Engineering (INATECH) and the Sustainability Center Freiburg (LZN) in order to establish sustainability as a guiding principle in the development of technical systems in both research and teaching and to transfer the latest results and ideas from science into practice as quickly as possible. Master's students and doctoral candidates from the university use the application-oriented research infrastructure and the exchange with the collaborators for their work. Fraunhofer IAF researchers in turn share their knowledge and experience in courses at the university ([see p. 92](#)).

The special partnership between the University of Freiburg and Fraunhofer IAF is particularly evident in the fact that the institute's management holds two professorships at the university: Since 2017, Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher has been Gips-Schüle Professor for Power Electronics, and since 2021, Prof. Dr. Rüdiger Quay has been Fritz-Hüttinger Professor for Energy-Efficient High-Frequency Electronics.



more info
INATECH



more info
LZN



AIXTRON SE

Our Technology. Your Future.



With its market-leading MOCVD technology, AIXTRON enables companies to develop applications such as laser, LED and display technologies, data transmission, energy management and conversion, mobile communications, signal and light technology, and electromobility.

Der führende Anbieter von Depositionsanlagen für die Halbleiterindustrie hat seinen Sitz in Herzogenrath (Städteregion Aachen) sowie Niederlassungen und Repräsentanzen in Asien, den USA und in Europa. AIXTRONs Technologielösungen werden weltweit zur Herstellung leistungsstarker Bauelemente für elektronische und optoelektronische Anwendungen insbesondere auf Basis von Verbindungshalbleitern eingesetzt.

The leading provider of deposition facilities for the semiconductor industry is headquartered in Herzogenrath, Germany, with subsidiaries and representative offices in Asia, the United States, and Europe. AIXTRON's technology solutions are used worldwide to manufacture high-performance devices for electronic and optoelectronic applications, in particular based on compound semiconductors.

AIXTRON ist im Bereich der nachhaltigen Leistungselektronik auf Basis der Wide-Band-Gap-Materialklassen Galliumnitrid und Siliziumkarbid international führend. Im Vergleich zur konventionellen Leistungselektronik auf Basis von Silizium-Wafern bieten die neuen GaN- und SiC-Verbindungshalbleiter mit ihrem hohen Wirkungsgrad ein höchst attraktives Potenzial für Energieeinsparung, Wärmereduzierung, Gewichts- und Anlagengrößenreduzierung und damit geringere Gesamtsystemkosten. So ermöglichen sie eine höhere Energieeffizienz in der Anwendung und tragen dadurch erheblich zu einem geringeren CO₂-Ausstoß bei.

AIXTRON is an international leader in the field of sustainable power electronics based on the wide band gap material classes gallium nitride and silicon carbide. Compared to conventional power electronics based on silicon wafers, the new GaN and SiC compound semiconductors, due to their high efficiency, offer highly attractive potential for energy savings, heat reduction, weight and system size reduction, and thus lower overall system costs. In this way, they enable greater energy efficiency in the application and thus contribute significantly to lower CO₂ emissions.

Prof. Dr.-Ing. Michael Heuken

Vice President Advanced
Technologies
AIXTRON SE
m.heuken@aixtron.com



more info



Ericsson

Training experts for 5G and beyond

MIMO by Ericsson combining maximum capacity, industry-leading lightweight, and energy efficiency



Moderne Mobilfunkinfrastrukturen wie die heutigen 5G- und künftigen 6G-3GPP-Netze sind der Schlüssel zu einer nachhaltigen Gesellschaft. Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz, ihrer Fähigkeit, Mensch und Maschine mit hoher Leistung zu verbinden, und ihrer Eigenschaft, ein breites Spektrum maßgeschneiderter Anwendungsfälle abzudecken, können sie das Leben verbessern und die Wirtschaft neu definieren.

Das Fraunhofer IAF ist weltweit technologisch führend in der Erforschung und Herstellung innovativer, energieeffizienter und leistungsstarker III/V-Halbleiterbauelemente. Im Rahmen des Marie-Sklodowska-Curie-Maßnahme »MyWave« (Efficient Millimeter-Wave Communications for Mobile Users) der Europäischen Union haben sich Ericsson, Fraunhofer und andere weltweit führende europäische Forschungseinrichtungen zusammengetan, um junge europäische Forschende darin auszubilden, modernste Antennen- und Halbleitertechnologien zu nutzen, mit dem Ziel, intelligente, energieeffiziente und leistungsstarke Technologiekomponenten für 6G-Mobilfunknetze der nächsten Generation zu entwickeln.

Modern mobile communication infrastructures such as today's 5G and future 6G 3GPP networks are key for a sustainable society due to high-energy efficiency, their ability to connect humans or machines with high performance and their ability to address a wide spectrum of customized use cases improving life and redefining businesses.

Fraunhofer IAF is a world technology leader in research and manufacturing of innovative, energy-efficient and high-power III-V semiconductor devices. In the European Union Marie Skłodowska-Curie project "MyWave" (Efficient Millimeter-Wave Communications for Mobile Users), Ericsson, Fraunhofer and other world-leading European research organizations have partnered up to train young European researchers to use state-of-the-art antenna and semiconductor technologies for building intelligent, energy-efficient and high-performing technology components for next generation 6G mobile radio networks.



[more info](#)



Dr. Jonas Hansryd

Research Leader Microwave
and mmW Hardware Research
Telefonaktiebolaget LM Ericsson
jonas.hansryd@ericsson.com

Infineon Technologies

GaN shaping energy efficiency



Infineon's in-house GaN manufacturing capabilities strengthen the European value chain in semiconductor solutions.

Als führender Anbieter von Hochfrequenz-, Leistungshalbleiter- und Sensorlösungen verfügt Infineon Technologies über mehr als zehn Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der GaN-Technologien einschließlich HF-Leistungstransistoren, Leistungsschaltern und integrierter Lösungen. Das Unternehmen treibt mit einem klaren Fokus auf Energieeffizienz und Zuverlässigkeit maßgeblich Innovationen in diesem Bereich voran und setzt auf eine globale firmeninterne Fertigung von GaN-Produkten. GaN bietet enorme Vorteile wie etwa einen geringeren Energieverbrauch und eine höhere Hochfrequenzbereich-Performance, die sowohl für HF- als auch für Leistungshalbleiteranwendungen ideal geeignet sind. Infineon ist in der Lage, kosteneffektive GaN-on-Si-Lösungen mit hoher Leistung, Qualität und Zuverlässigkeit herzustellen und unterstützt diesen Markt durch hohe Produktionskapazitäten.

Dabei ist die Stärkung der europäischen Wertschöpfungskette von strategischer Bedeutung für den Halbleiterhersteller. Um ideal auf die Zukunft vorbereitet zu sein, wird Infineon weiterhin in die Forschung und Entwicklung rund um GaN investieren. Zudem arbeitet das Unternehmen auch künftig mit dem Fraunhofer IAF im Rahmen mehrerer Projekte zusammen, um die GaN-Halbleitertechnologien von morgen weiter mitzugestalten.

Infineon Technologies is a leader in power, radio frequency, and sensor semiconductor solutions, focusing on energy efficiency and reliability. With more than ten years of experience in GaN technologies including RF power transistors, power switches, and integrated solutions, Infineon is a strong innovator in this field with global in-house GaN manufacturing capabilities. Ideal for both RF and power applications, GaN offers great advantages in lowering power consumption and raising high-frequency performance. Mastering the complexity involved in combining high performance, quality, and reliability to deliver cost-effective GaN on silicon solutions, Infineon supports this market with high-volume production capabilities.

Strengthening the European value chain is of strategic importance for Infineon. The company continues to invest in GaN research and development to be prepared for future applications. Similarly, Infineon continues its collaboration with Fraunhofer IAF in multiple projects to further shape GaN semiconductor technologies of the future.

Dr. Ismail Nasr

Director Wireless Infrastructure
Infineon AG
ismail.nasr@infineon.com



more info



JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft

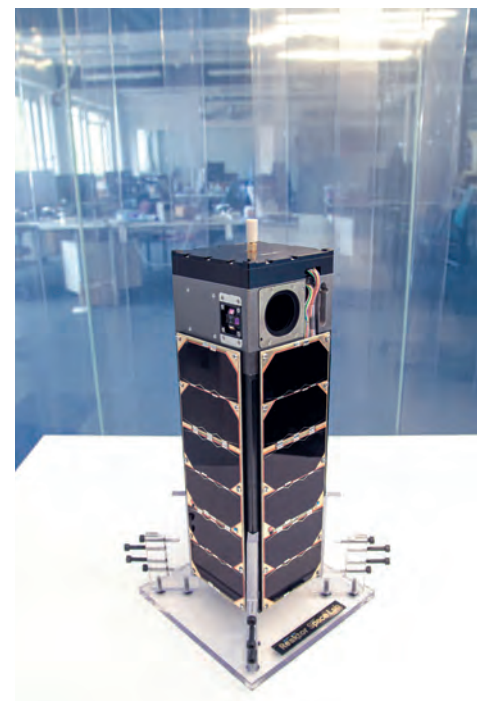
Cutting-edge research for sovereign technologies

JOANNEUM RESEARCH ist eine unternehmerisch orientierte Innovations- und Technologieanbieterin, die seit den 1960er Jahren internationale Spitzenforschung betreibt. Mit dem Fokus auf angewandte Forschung und Technologieentwicklung nimmt sie als INNOVATION COMPANY am Standort eine Schlüsselfunktion im Technologie- und Wissenstransfer ein, insbesondere im Forschungsbereich »Telekommunikation, Navigation und Weltraum«.

In der Satellitenkommunikation sind die Radiobänder sehr begehrt und stark ausgelastet. Um die neue Generation von Satelliten breitbandig an das Internet anzuschließen, werden aktuell das Q/V-Band (38/48 GHz) und das W-Band (75/85 GHz) erforscht. Ein internationales Team unter der Leitung der JOANNEUM RESEARCH hat zuletzt einen CubeSat entwickelt, der Testsignale in diesen neuen Bändern ausstrahlt. Im Sommer 2021 wurde so zum weltweit ersten Mal ein 75-GHz-Signal aus dem All auf eine Bodenstation in Graz gesendet. Das Fraunhofer IAF nahm dabei eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Verstärker ein.

JOANNEUM RESEARCH is an entrepreneurially oriented innovation and technology provider that has been conducting top international research since the 1960s. With its focus on applied research and technology development, JOANNEUM RESEARCH plays a key role in technology and knowledge transfer as the INNOVATION COMPANY at the location, especially in the research area "Telecommunications, Navigation and Space".

CubeSat developed by a cooperation including JOANNEUM RESEARCH and Fraunhofer IAF



In satellite communications, the radio bands are in high demand and heavily utilized. In order to connect the new generation of satellites to the Internet in broadband, the Q/V band (38/48 GHz) and the W band (75/85 GHz) are currently being researched. An international team led by JOANNEUM RESEARCH has recently developed a CubeSat that transmits test signals in these new bands. In summer 2021, a 75 GHz signal was transmitted from space to a ground station in Graz for the first time worldwide. Fraunhofer IAF played a central role in the development of the involved amplifiers.



[more info](#)



Michael Schmidt

W-Cube Projektleiter
JOANNEUM RESEARCH
Forschungsgesellschaft
michael.schmidt@joanneum.at

RPG – Radiometer Physics GmbH

E Band LEO satellite to ground communication link



Headquarter of Radiometer Physics GmbH in Meckenheim

Die RPG Radiometer Physics GmbH arbeitet seit mehr als einem Jahrzehnt mit dem Fraunhofer IAF an der Entwicklung satellitenbasierter Messinstrumente zur Erdbeobachtung im mm-Wellenbereich zusammen. Hierbei kommt der kontinuierlichen Forschung und Entwicklung des Fraunhofer IAF im Bereich der III/V-Halbleitertechnologie eine tragende Rolle zu.

RPG Radiometer Physics GmbH has been collaborating with Fraunhofer IAF for more than a decade on the development of satellite-based measurement instruments for Earth observation in the mm-wave range. Here, the continuous research and development of Fraunhofer IAF in the field of III-V semiconductor technology plays a major role.

Die Übertragung der gewonnenen Messdaten vom Satelliten zur Erde stellt aufgrund der stetig wachsenden Datenmenge eine zunehmende Herausforderung dar. In einer Folge von Projekten unter Förderung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde in Kooperation mit der Universität Stuttgart Sende- und Empfangstechnik in den für Satellitenkommunikation freigegebenen Frequenzbändern 71–76 GHz und 81–86 GHz entwickelt, aufgebaut und getestet. Hierbei wurden Rekorde in der Datenübertragung im E-Band aufgestellt: terrestrische Übertragung über 37 km mit 6 Gbit/s (ACCESS, 2016) und Übertragung vom Flugzeug zum Boden über 5 km mit 9,6 Gbit/s (ELIPSE, 2018). Für 2022 ist der Start eines CubeSat (EIVE) mit weiterentwickelter Sendetechnik im Bereich 71–76 GHz geplant.

The transmission of the acquired measurement data from satellite to earth is an increasing challenge due to the steadily growing amount of data. In a series of projects funded by German Aerospace Center (DLR), transmission and reception technology in the 71–76 GHz and 81–86 GHz frequency bands was developed, built and tested in cooperation with the University of Stuttgart. In the process, records were set for data transmission in the E band: terrestrial transmission over 37 km at 6 Gbit/s (ACCESS, 2016) and transmission from aircraft to ground over 5 km at 9.6 Gbit/s (ELIPSE, 2018). The launch of a CubeSat (EIVE) with advanced transmission technology in the 71–76 GHz range is planned for 2022.

Ralf Henneberger
Project Manager & System
Engineer, 1RP-WS
Radiometer Physics GmbH
ralf.henneberger@
radiometer-physics.de



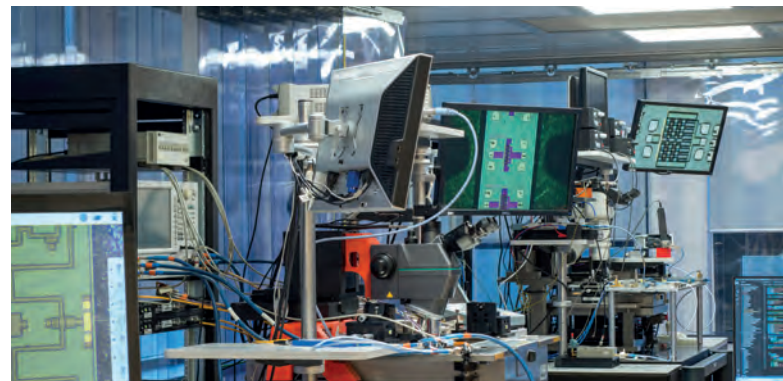
more info



TNO Defence, Safety and Security

Efficient generation of AESA Microwave power

TNO investigates how most modern semiconductors in the microwave domain can deliver maximum power at highest efficiency.



TNO Defence, Safety and Security arbeitet zusammen mit dem Fraunhofer IAF an Projekten im Bereich der GaN/SiC-Halbleiter, insbesondere im Rahmen zukünftiger Active Electronically Scanned Arrays (AESA). In dieser Kooperation wird die performanteste Halbleitertechnologie benötigt, um Leistungsbarrieren zu durchbrechen – eine Herausforderung, die das Fraunhofer IAF aufgrund seiner großen Erfahrung in der Erforschung und Entwicklung von III/V-Halbleitern meistert.

Im Rahmen der Kooperation untersuchen die Experten von TNO, wie die modernsten Halbleiter im Mikrowellenbereich ein Maximum an Leistung bei höchstmöglicher Effizienz liefern können. Dieser Wirkungsgrad ist wichtig, um keine Energie zu verschwenden, aber er ermöglicht es auch, die gleiche Leistung mit weniger Bauteilen zu erzeugen. Gemeinsam modellieren Fraunhofer IAF und TNO innovative Bauelemente und ebnen den besten Technologien den Weg in die Anwendung.

TNO Defence, Safety and Security partners with Fraunhofer IAF on topics related to GaN/SiC semiconductors in the frame of future Active Electronically Scanned Arrays (AESA). In this cooperation, the very best semiconductor technology is needed to break the earlier performance barriers, a trade that is mastered by Fraunhofer IAF and that is based on their huge experience with III-V semiconductor research and development.

Within the cooperation, the experts at TNO investigate how the most modern semiconductors in the microwave domain can deliver a maximum amount of power at the highest efficiency possible. This efficiency is important to avoid wasting energy, but is also an enabler to generate the same amount of power with fewer components. Together, Fraunhofer IAF and TNO are modelling innovative devices and paving the best technologies the way into application.



more info

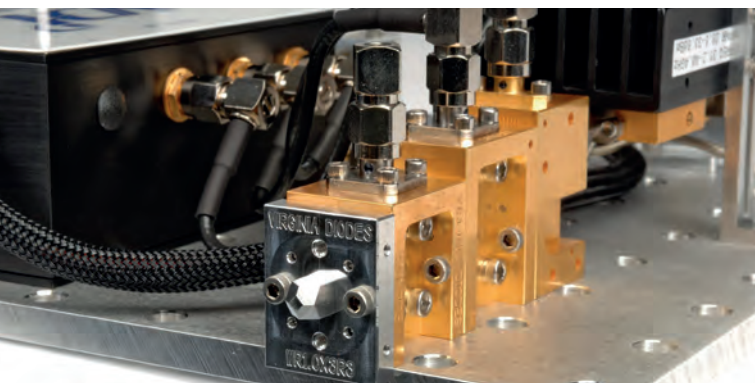


Prof. Dr. Frank van Vliet

Principal Scientist – Radar
TNO Defence, Safety and Security
frank.vanvliet@tno.nl

VDI – Virginia Diodes, Inc.

Advancing the terahertz region



VDI manufactures state-of-the-art test and measurement equipment for mm-wave and THz applications.

VDI hat es sich zur Aufgabe gemacht, den THz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums für wissenschaftliche, militärische und kommerzielle Anwendungen so nutzbar zu machen, wie es die Mikrowellen- und Infrarotbänder heute sind. Hierzu stellt VDI modernste Test- und Messgeräte für mm-Wellen- und THz-Anwendungen her. Seit der Gründung im Jahr 1996 hat VDI die Anzahl der Produktangebote und Mitarbeitende kontinuierlich erhöht, um eine breite Palette von Kunden im Terahertz- und Millimeterwellenbereich zu bedienen.

Zuletzt hat VDI kompakte Hochfrequenz-Radiometer für die Atmosphärenmodellierung und Wettervorhersage entwickelt. Im Jahr 2021 konnte so der erste von sechs TROPICS-CubeSats starten. TROPICS ist eine Millimeterwellen-Radiometer-CubeSat-Konstellation, die von den MIT Lincoln Laboratories entwickelt wurde, um Profile von tropischen Wirbelstürmen mit hoher zeitlicher Auflösung zu erstellen. Ein wesentlicher Baustein zur Durchführung dieser Mission waren die rauscharmen G-Band-Verstärker (140–220 GHz), die vom Fraunhofer IAF entwickelt und von VDI in ein kompaktes Radiometer integriert wurden.

VDI's mission is to make the THz region of the electromagnetic spectrum as useful for scientific, military, and commercial applications as the microwave and infrared bands are today. VDI manufactures state-of-the-art test and measurement equipment for mm-wave and THz applications. Since its founding in 1996, VDI has continued to grow the number of product offerings and employees needed to satisfy a broad range of terahertz and millimeter wave customers.

VDI has been developing compact high-frequency radiometers for atmospheric modeling and weather forecasting. In 2021, the first of six TROPICS CubeSats was launched. TROPICS is a millimeter-wave radiometer CubeSat constellation developed by MIT Lincoln Laboratories to provide high temporal-resolution profiles of tropical cyclones. Essential to this mission are the G band (140–220 GHz) low-noise amplifiers developed by Fraunhofer IAF and integrated by VDI into a compact radiometer.

Dr. Eric W. Bryerton

Vice President of Engineering
Virginia Diodes, Inc.
bryerton@vadiodes.com



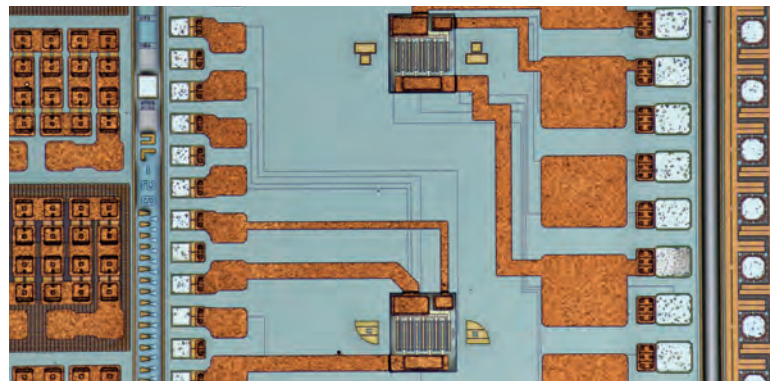
more info



X-FAB Silicon Foundries

Semiconductor technologies addressing today's challenges

Micro-Transfer printed and Cu inter-connected HEMT (designed and processed by Fraunhofer IAF) in an X-FAB test structure with thermal sensitive silicon diodes below the printed HEMT for space-resolved thermal evaluations.



X-FAB ist als sogenannte Foundry ein führender Anbieter für die Fertigung von integrierten Schaltkreisen auf Basis von Analog/Mixed-Signal- und MEMS-Technologien. Dabei kommen hauptsächlich CMOS- und SOI-Prozesse zwischen 130 nm und 1 µm zum Einsatz, aber auch Wide-Bandgap-Technologien basierend auf SiC und GaN. X-FAB unterhält sechs Fertigungsstandorte auf drei Kontinenten, davon drei in Deutschland, und beschäftigt weltweit ca. 4000 Mitarbeitende.

Im Rahmen des MIIMOSYS-Verbundprojekts mit X-FAB als Projektkoordinator erfolgte die weltweit erstmalige Hetero-integration von GaN-Schaltelementen und siliziumbasierter CMOS-Ansteuerelektronik mittels Mikro-Transferdruck. Dadurch können die geringe Verlustleistung und die höhere Schaltgeschwindigkeit von GaN-Bauelementen sowie die hohe Integrationsdichte von Si-CMOS integriert und auf Waferlevel niederohmig und niederkapazitiv verdrahtet werden.

X-FAB is a leading supplier of foundry services for the manufacturing of integrated circuits based on analog/mixed-signal and MEMS technologies. For that it mainly uses CMOS and SOI processes in geometries ranging from 130 nm to 1.0 µm, but also wide-bandgap technologies such as SiC and GaN. X-FAB runs six production facilities on three continents, including three fabs in Germany, and it employs about 4000 people worldwide.

Within the X-FAB coordinated funded project MIIMOSYS the worldwide first heterogeneous integration of GaN transistors on silicon-based CMOS control electronics by Micro-Transfer-Printing was demonstrated. This enables the combination of the low power loss and high switching speed of GaN devices together with the high integration density of silicon-based CMOS as well as the low-resistive and low-capacitive interconnect on wafer level.



[more info](#)



Ralf Lerner

Project Manager Process Development /
Projektkoordinator MIIMOSYS
X-FAB Global Services GmbH
ralf.lerner@xfab.com

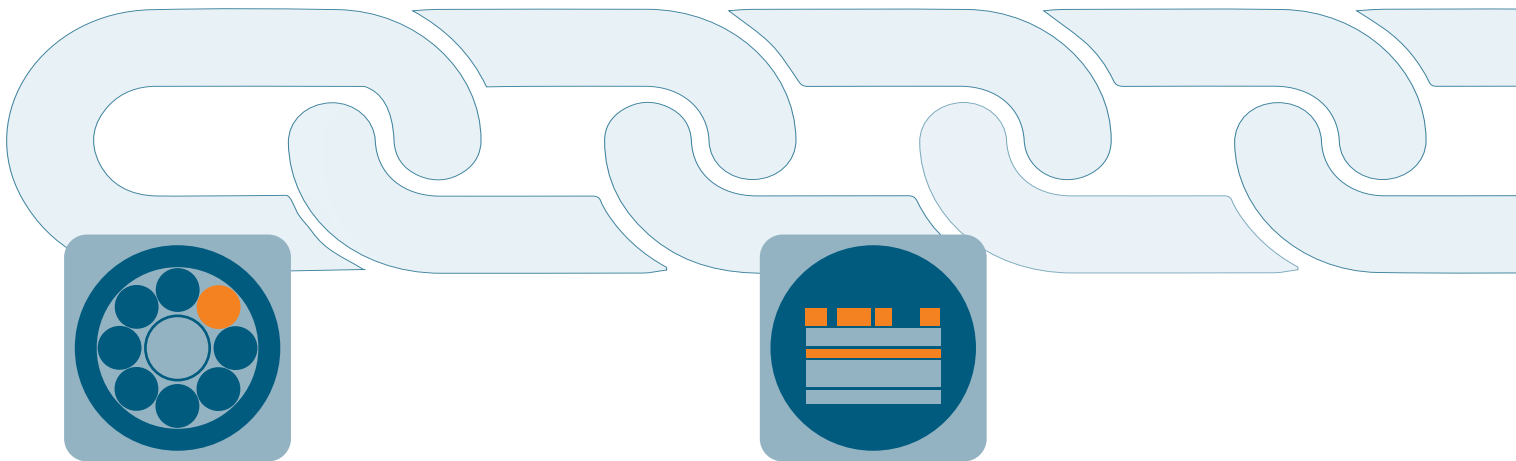
Wertschöpfungskette am Fraunhofer IAF

Value chain at Fraunhofer IAF

Wir bieten Dienstleistungen entlang der gesamten III/V-Halbleiter-Wertschöpfungskette sowie im Bereich Quantencomputing-Software und -Simulation an und stehen Ihnen beratend zur Seite. Sie können bei uns Epitaxie nach Ihren Spezifikationen beauftragen oder Chipfläche auf Wafern buchen. Gerne unterstützen wir Sie bei Design, Modellierung und Herstellung von integrierten Schaltungen sowie Modulen und führen Messungen für Sie durch.

We offer services along the entire III-V semiconductor value chain as well as in the area of quantum computing software and simulation and are available to advise you throughout the entire process. You can order epitaxy from us according to your specifications or book chip area on wafers. We are looking forward to supporting you in design, modeling and manufacturing of integrated circuits as well as modules and perform measurements for you.





Epitaxie

Epitaxy

Epitaxie von III/V-Verbindungshalbleitern und Diamant nach Kundenspezifikationen für:

- Leistungs- und hochfrequenzelektronische Bauteile
- Halbleiterlaser und Detektoren
- Bauteile für Anwendungen in den Quantentechnologien

Epitaxy of III-V compound semiconductors and diamond to customer specifications for:

- Power and high-frequency electronic components
- Semiconductor lasers and detectors
- Components for applications in quantum technologies

Mit unserer umfassenden Infrastruktur vereinen wir die gesamte III/V-Halbleiter-Wertschöpfungskette unter einem Dach.

With our broad infrastructure, we combine the entire III-V semiconductor value chain under one roof.

Prozesstechnologie

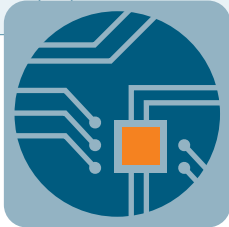
Process technology

Wir verfügen über eine 450 m² große MOCVD-Halle auf dem neuesten Stand der Technik sowie einen 1000 m² großen Reinraum und bieten:

- Prozessierung von Wafern zu Transistoren, integrierten Schaltungen (ICs), optoelektronischen sowie Quantenbauelementen
- Prozessentwicklung
- Fertigung in Kleinserie

With our 450 m² state-of-the-art MOCVD hall and our 1,000 m² clean room we offer:

- Processing of wafers into transistors, integrated circuits (ICs), optoelectronic as well as quantum devices
- Process development
- Small batch production



Bauelemente und Schaltungen

Devices and circuits

Simulationsbasierter Entwurf und Realisierung von Bauelementen aus III/V-Verbindungshalbleitern und synthetischem Diamant für:

- Elektronische und optoelektronische Bauelemente und integrierte Schaltungen (ICs)
- Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)
- Optoelektronische Bauteile für Quantensensing und Quantencomputing

Simulation-based design and realization of devices made of III-V compound semiconductors and synthetic diamond for:

- Electronic and optoelectronic devices and integrated circuits (ICs)
- Microelectromechanical systems (MEMS)
- Optoelectronic devices for quantum sensing and quantum computing



Messtechnik

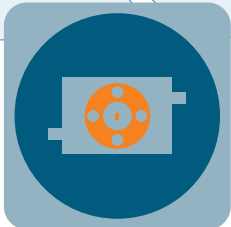
Measurement technology

Das Fraunhofer IAF verfügt über modernste Systeme für Hochfrequenz- und optoelektronische Messungen, für Quantensensorik sowie für die Analytik von Halbleitern:

- Charakterisierung von integrierten Schaltungen und Hochfrequenz-Modulen nach Ihren Spezifikationen
- Kryogene Messtechnik
- Roboter-Messplatz für dreidimensionale Vermessungen mit Millimeterwellen
- Applikationslabor Quantensensorik mit mehreren Magnetometern
- Applikationslabor Quantencomputing
- Applikationslabor Infrarot-Laser-Spektroskopie
- Materialanalytik für Halbleiterschichten und Heterostrukturen

Fraunhofer IAF has cutting-edge systems for high-frequency and optoelectronic measurements, for quantum sensing and for the analysis of semiconductors:

- Characterization of integrated circuits and high-frequency modules according to your specifications
- Cryogenic measurement
- Robot measuring station for three-dimensional measurements with millimeter waves
- Application Laboratory Quantum Sensing with several magnetometers
- Application Laboratory Quantum Computing
- Application Laboratory Infrared Laser Spectroscopy
- Material analysis for semiconductor layers and heterostructures



Module und Demonstratoren

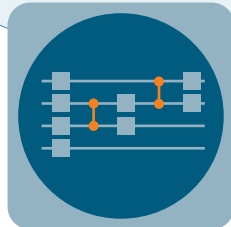
Modules and demonstrators

Wir entwickeln Module und Demonstratoren nach Ihren Spezifikationen:

- Integrierte Schaltungen und Module bis zu 850 GHz mit weltweiten Spitzenwerten im Bereich Rauschzahl, Verstärkung und Effizienz
- Kundenspezifische Lasermodule inklusive Ansteuerelektronik und -software
- Infrarot- und UV-Detektoren

We develop modules and demonstrators according to your specifications:

- Integrated circuits and modules up to 850 GHz with worldwide top values in noise figure, gain and efficiency
- Customized laser modules including control electronics and software
- Infrared and UV detectors



Simulationen und Software

Simulations and software

Bedarfsspezifische Simulation von Anwendungsfällen und Programmierung von Quantenalgorithmen für:

- Kombinatorische Optimierungsprobleme (z. B. Portfoliooptimierung)
- Erhöhung der Resilienz von Berechnungen auf Quantengatter-/Schaltungsebene
- Fehleranalysen

Demand-specific simulation of use cases and programming of quantum algorithms for:

- Combinatorial optimization problems (e.g., portfolio optimization)
- Increasing the resilience of computations on quantum gate/circuit level
- Error analysis

Ob von A bis Z oder nur für einen Teilschritt dieser Kette: Ausgehend von Ihrem Ziel erstellen wir die passende technologische Prozessentwicklung.

Mehr Info:



Whether from A to Z or only for a sub-step of this chain: Based on your objective, we will create the appropriate technological process development.

More info:



Zwei neue Forschungsbauten in Betrieb

Two new research buildings in operation

Mit dem neuen Laborgebäude und der neuen MOCVD-Halle stehen dem Fraunhofer IAF seit 2021 eine erweiterte hochmoderne Forschungsinfrastruktur für die optoelektronische Messtechnik und Quantensensorik sowie für die metall-organische Gasphasenepitaxie zur Verfügung.

Mit der Inbetriebnahme der MOCVD-Halle und dem Umzug der Optik- und Quantensensorik-Labore in das neue Laborgebäude steht dem Fraunhofer IAF nun für die strategische Weiterentwicklung wichtiger Kernkompetenzen eine moderne und den zukünftigen Anforderungen entsprechende Forschungsinfrastruktur zur Verfügung. So kann das Institut mit der neuen MOCVD-Halle die materialwissenschaftlichen Forschungsarbeiten insbesondere auf dem Gebiet der Halbleiter mit hoher Bandlücke weiter ausbauen. Es stehen für die metall-organische Gasphasenepitaxie nun fünf moderne Anlagen bereit, die mit ihrer sehr aufwändigen Medienversorgung optimal in der speziell für diesen Zweck errichteten Halle untergebracht sind.

Über eine Passerelle mit der MOCVD-Halle verbunden ist das neue Laborgebäude mit 900 m² Nutzfläche und 22 Laboren. Die Räumlichkeiten sind für die anspruchsvolle optische Messtechnik für immer kleiner werdende Strukturen konzipiert und entsprechen auch den zukünftigen Anforderungen an Gebäudeschwingungen.

Die Fertigstellung des Laborgebäudes, das aus Mitteln des Bundes und des Landes Baden-Württemberg finanziert wurde, und die Inbetriebnahme der MOCVD-Halle, die aus Mitteln des BMVg erstellt wurde, sind wichtige Meilensteine auf dem Weg des Instituts zu einer modernen und nachhaltig bewirtschafteten Forschungsinfrastruktur.

With the new laboratory building and the new MOCVD hall, Fraunhofer IAF has had an expanded state-of-the-art research infrastructure for optoelectronic metrology and quantum sensing as well as for metal-organic chemical vapour deposition since 2021.

With the commissioning of the MOCVD hall and the relocation of the optics and quantum sensing laboratories to the new laboratory building, Fraunhofer IAF now has a modern research infrastructure that meets future requirements for the strategic further development of important core competencies. With the new MOCVD hall, the institute can further expand its materials science research work especially in the field of semiconductors with high bandgaps. Five modern systems are now available for metal-organic vapor phase epitaxy, which are optimally accommodated in the hall specially built for this purpose with a very elaborate media supply.

The new laboratory building with 900 m² of floor space and 22 laboratories is connected to the MOCVD hall via a skywalk. The building, designed for demanding optical metrology for ever smaller structures provides Fraunhofer IAF with premises that also meet future requirements for building vibrations.

The completion of the laboratory building, which was funded by the German federal government and the state of Baden-Württemberg, and the commissioning of the MOCVD hall, which was built with funds from the BMVg, are important milestones on the institute's way to a modern and sustainably managed research infrastructure.

Seit 2021 stehen dem Fraunhofer IAF ein neues Laborgebäude und eine hochmoderne MOCVD-Halle zur Verfügung.

Since 2021, Fraunhofer IAF has had a new laboratory building and a state-of-the-art MOCVD hall at its disposal.

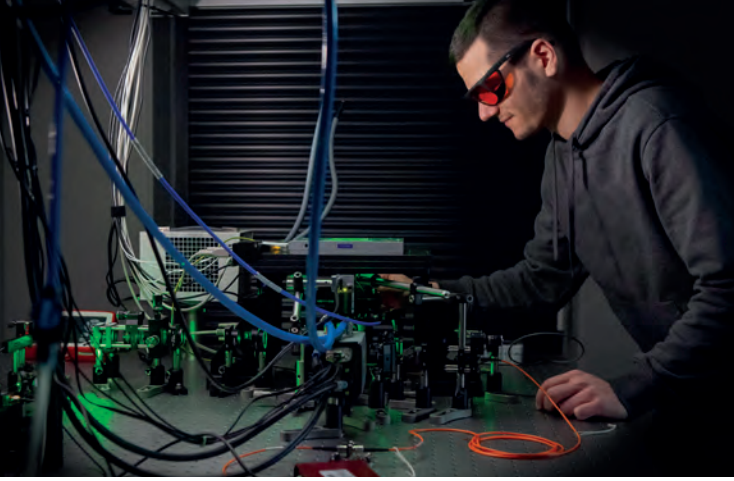
Neues Gebäude für Optiklabore

Das neue Gebäude vereint die Labore für die Aktivitäten des Fraunhofer IAF in den Bereichen Optoelektronik und Quantentechnologie. Hier werden Quantensensoren wie Rastersonden-, Weitfeld- und Laserschwellen-Magnetometer sowie laserbasierte Sensorik und innovative Halbleiterlaser erforscht. Zur engen Einbindung von Industriepartnern und -kunden sind eigens zwei Räume als Applikationslabore für die Quantensensorik und die Infrarotlaser konzipiert worden. Das Fraunhofer IAF verfügt damit über ideale Bedingungen, um Anfragen von Unternehmen mit seinen innovativen Technologien bedienen zu können.

New building for optics laboratories

The new building combines the laboratories for Fraunhofer IAF's activities in the fields of optoelectronics and quantum technology. Quantum sensors such as scanning probe, wide-field and laser threshold magnetometers as well as laser-based sensor technology and innovative semiconductor lasers are researched here. For the close integration of industrial partners and customers, two rooms have been specially designed as application laboratories for quantum sensor technology and infrared lasers. Fraunhofer IAF thus has ideal conditions to serve requests from companies with its innovative technologies.





Das neue Laborgebäude beherbergt die beiden Applikationslabore für Quantensensorik und für Laser-Spektroskopie sowie die gesamte optische Messtechnik des Instituts.

The new laboratory building houses the two application laboratories for quantum sensing and for laser spectroscopy as well as the institute's entire optical measurement technology.



Applikationslabor für Quantensensorik

Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft sind dazu eingeladen, im Applikationslabor das Innovationspotenzial von Quantensensoren für ihre spezifischen Anforderungen zu evaluieren: Im Applikationslabor Quantensensorik stehen für Kunden mehrere Quantenmagnetometer, die speziell für die Nutzung durch Unternehmen optimiert werden, zur Verfügung. Ebenso entstehen Plattformen für Service- und Auftragsmessungen, damit Industriekunden die Leistungsfähigkeit von Quantensensorik mit der von klassischen Sensorsystemen vergleichen können. Um die Nutzung und Bedienung der Quantensensoren zu erleichtern, werden Software-Pakete entwickelt, die sich auf die Anforderungen der jeweiligen Applikation anpassen lassen.

Das Applikationslabor Quantensensorik besteht am Institut im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts »QMag«, kurz für Quantenmagnetometrie. In dem Projekt entwickeln Forschende von sechs Fraunhofer-Instituten in Zusammenarbeit mit den Universitäten Stuttgart und Boulder, Colorado (USA), Quantensensoren für den hochempfindlichen Nachweis von Magnetfeldern.



Applikationslabor für Laser-Spektroskopie

Im Applikationslabor für Infrarotlaser realisiert das Fraunhofer IAF mit spektral durchstimmbaren Quantenkaskadenlasern (QCL) spektroskopische Messungen für Kunden. Die QCLs ermöglichen die schnelle Identifizierung verschiedenster Feststoffe und Flüssigkeiten innerhalb weniger Sekunden bis hin zu Messungen in Echtzeit – ein großer Fortschritt für die In- und Online-Prozesskontrolle. Durch seine breite spektrale Abstimmbarkeit im infraroten Wellenlängenbereich zwischen 4 und 11 μm sowie seine hohe spektrale Brillanz ist der QCL für verschiedenste Messaufgaben hervorragend geeignet. Die innovative Technologie identifiziert chemische Substanzen wesentlich zuverlässiger als vergleichbare Spektroskopie-Techniken im nahen Infrarot.



Application laboratory for quantum sensor technology

Partners from science and industry are invited to evaluate the innovation potential of quantum sensors for their specific requirements in the application laboratory: Several quantum magnetometers, which are optimized specifically for use by companies, are available for customers in the Quantum Sensors Application Laboratory. Likewise, platforms for service and contract measurements are being created so that industrial customers can compare the performance of quantum sensor technology with that of classical sensor systems. To facilitate the use and operation of quantum sensors, software packages are being developed that can be adapted to the requirements of the specific application.

The Quantum Sensors Application Laboratory exists at the Institut as part of the Fraunhofer lighthouse project "QMag," short for quantum magnetometry. In the project, researchers from six Fraunhofer institutes in collaboration with the Universities of Stuttgart and Boulder, Colorado (USA), are developing quantum sensors for the highly sensitive detection of magnetic fields.



Application laboratory for laser spectroscopy

In the application laboratory for infrared lasers, Fraunhofer IAF realizes spectroscopic measurements for customers with spectrally tunable quantum cascade lasers (QCL). The QCLs enable rapid identification of a wide variety of solids and liquids within a few seconds up to measurements in real time — a major advance for in- and online process control. Due to its broad spectral tunability in the infrared wavelength range between 4 and 11 μm as well as its high spectral brilliance, the QCL is ideally suited for a wide variety of measurement tasks. The innovative technology identifies chemical substances much more reliably than comparable spectroscopy techniques in the near infrared.

In der neuen MOCVD-Halle sind fünf moderne Anlagen für die metall-organische Gasphasenepitaxie in Betrieb.

Five modern systems for metal-organic chemical vapour deposition are in operation in the new MOCVD hall.



Neue MOCVD-Halle

Fünf MOCVD-Anlagen sind seit dem Sommer 2021 in der neuen Halle des Fraunhofer IAF in Betrieb: Vier Anlagen wurden dafür aus dem Reinraum des Hauptgebäudes umgezogen, außerdem wurde eine neue Anlage für Scandium-haltige Schichten erfolgreich installiert. Die neue MOCVD-Anlage Aixtron CCS19x2 ist in der Lage, Temperaturen von bis zu 1400 °C zu erreichen. Damit verbessert sich die Kristallqualität (insbesondere für AlN-Schichten) deutlich. Darüber hinaus sind die Homogenität und die Reproduzierbarkeit der Anlage extrem gut. Die außergewöhnlich gute Materialqualität kommt sowohl der institutseigenen Forschung als auch Kunden und Partnern zu Gute.

In der Halle ist die gesamte benötigte Peripherie auf gebündeltem Raum optimal vereinigt. Dazu zählen neue, energieeffiziente Scrubber zur Reduzierung toxischer Gase sowie zwei moderne Gasreiniger, die ihre Reinigungskartuschen selbstständig regenerieren. Des Weiteren werden die benötigten Prozessgase in modernen Gaskabinetten bereitgestellt und eine neue nasschemische Einheit ermöglicht die Reinigung benötigter Komponenten direkt in der MOCVD-Halle.

In der neuen Maschinenhalle stehen folgende MOCVD-Anlagen zur Verfügung:

- Veeco K465i (Nitride bis 3x200 mm)
- Aixtron G4 (Nitride bis 11x100 mm)
- Aixtron CCS (Nitride bis 1x100 mm)
- Aixtron CCS (Nitride bis 1x200 mm oder 5x100 mm)
- Aixtron CCS (Arsenide bis 6x50 mm oder 3x75 mm)

Mit dem vorhandenen Equipment kann das Fraunhofer IAF mannigfaltige Projekte bearbeiten. Geplant sind beispielsweise mehrere neue Projekte auf Scandium-Basis wie das Projekt »PUSH«, bei dem ein neuer Präkursor auf Sc-Basis entwickelt werden soll. Auch Projekte auf Nitrid-Basis werden weiterhin mit der gewohnten Qualität mit den Epitaxieanlagen hergestellt. Durch den gesteigerten Bedarf an nitridischen Wafern ist die Auslastung der neu angeschafften Anlage gewährleistet.

New MOCVD Hall

Five MOCVD systems have been in operation in Fraunhofer IAF's new hall since the summer of 2021: Four systems were moved from the clean room of the main building for this purpose, and a new system for layers alloyed with Scandium was also successfully installed. The new Aixtron CCS19x2 MOCVD system is capable of reaching temperatures of up to 1400 °C. This significantly improves the crystal quality (especially for AlN layers). In addition, the homogeneity and reproducibility of the system are extremely good. The exceptionally good material quality benefits the institute's own research as well as customers and partners.

In the hall, all the necessary peripherals are optimally combined in a bundled space. These include new, energy-efficient scrubbers for reducing toxic gases and two modern gas cleaners that regenerate their cleaning cartridges independently. Furthermore, the required process gases are provided in modern gas cabinets and a new wet chemical unit enables the cleaning of required components directly in the MOCVD hall.

The following MOCVD systems are available in the new machine hall:

- Veeco K465i (nitrides up to 3x200 mm)
- Aixtron G4 (nitrides up to 11x100 mm)
- Aixtron CCS (nitrides up to 1x100 mm)
- Aixtron CCS (nitrides up to 1x200 mm or 5x100 mm)
- Aixtron CCS (Arsenides up to 6x50 mm or 3x75 mm)

With the existing equipment, Fraunhofer IAF can work on a wide range of projects. For example, several new scandium-based projects are planned, such as the "PUSH" project, in which a new Sc-based precursor is to be developed. Nitride-based projects will also continue to be produced with the usual quality using the epitaxy equipment. Due to the increased demand for nitride wafers, the utilization of the newly acquired equipment is guaranteed.

Nachhaltige Anlagen: Modernste Ausstattung für Spitzenelektronik

Sustainable facilities: Up-to-date equipment for cutting-edge electronics

Als international renommierte Adresse für die Erforschung und Entwicklung innovativer Elektronikkomponenten und -module auf Basis von III/V-Verbindungshalbleitern legt das Fraunhofer IAF großen Wert auf modernstes Equipment. Gleichzeitig sind 2022 Maßnahmen angelaufen, um den Ressourcenverbrauch der Halbleiterproduktion zu reduzieren. Diese haben das Ziel, bis 2030 Klimaneutralität zu erreichen. Zudem investiert das Fraunhofer IAF jedes Jahr in neue Anlagen, um auch zukünftig die gesamte Wertschöpfungskette im Bereich der Mikroelektronik abzubilden. Damit stehen Forschenden, Kunden und Partnern nachhaltige technologische Möglichkeiten offen, gemeinsam neue Lösungen für die Anwendungen der Zukunft zu (er)finden.

Fraunhofer IAF is an internationally renowned address for research and development of innovative electronic components and modules based on III-V compound semiconductors. As such, most recent equipment is of great importance to us. At the same time, measures to reduce resource consumption in semiconductor production were launched in 2022. These have the goal of achieving climate neutrality by 2030. In addition, Fraunhofer IAF invests in new equipment every year in order to continue covering the entire value chain in the field of microelectronics. Thus, researchers, customers, and partners have sustainable technological possibilities at hand to jointly discover and invent new solutions for applications of the future.



Im Neubau wurde 2021 eine neue Anlage für (AlSc) N-haltige Materialien installiert, die Temperaturen von bis zu 1400°C erreicht, wodurch sich die Kristallqualität deutlich verbessert.

In 2021, a new plant for (AlSc) N-containing materials was installed in the new building, which reaches temperatures of up to 1400°C temperatures, which significantly improves the crystal quality.

Die Plasmaätzenanlage erzeugt Substratstrukturen, die für hybride Aufbauten in der Hochpräzisionsmesstechnik benötigt werden.

The plasma etcher creates substrate structures required for hybrid setups in high-precision metrology.



Plasmaätzenanlage für jede Temperatur zwischen -150 °C und +150 °C

Plasma etcher for any temperature between -150 °C and +150 °C

Funktionalität und technische Daten

- kryogene Prozesse zwischen -150 °C und +20 °C (LN₂-gekühlt)
- BOSCH-Prozesse zwischen -10 °C und +150 °C
- PTSA (Planar Triple Spiral Antenna) ICP-Quelle mit 2000 W
- HF-Quelle mit 300 W
- Substratelektrode ausgelegt für 6"-Wafer
- Selektivitäten: Si : SiO₂ > 100 : 1; Si : Al₂O₃ >> 10 000 : 1
- Ätzraten: Si-VIA typ. 4 µm/min

Mithilfe der neuen Plasmaätzenanlage erzeugen Forschende am Fraunhofer IAF in Substraten tiefe (> 50 µm) und großflächige (> 500 x 500 µm) Strukturen, wie sie zum Beispiel bei hybriden Aufbauten im Anwendungskontext hochpräziser industrieller Messtechnik nötig sind, um verschiedene Technologien verlustarm zu kombinieren. Die Anlage beherrscht auch das vollständige Durchätzen gedünnten Substrats (~ 100 µm), das etwa GaN-on-Si-Chipdesigns für effiziente und kompakte 48-V-Anwendungen ermöglicht, wie beispielsweise dreiphasige Inverter für Gleichstrommotoren. Wahlweise nutzt die Anlage kryogene Temperaturen oder schnelle Gaswechselprozesse (BOSCH-Prozesse), in denen sie automatisch zwischen Raum- und kryogenen Temperaturen umschaltet.

Die Anschaffung dieser Anlage wurde im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gefördert.

Functionality and technical data

- cryogenic processes between -150 °C and +20 °C (LN₂-cooled)
- BOSCH processes between -10 °C and +150 °C
- PTSA (Planar Triple Spiral Antenna) ICP source with 2,000 W
- HF source with 300 W
- Substrate electrode designed for 6" wafer
- Selectivities: Si : SiO₂ > 100 : 1; Si : Al₂O₃ >> 10,000 : 1
- Etch rates: Si-VIA typ. 4 µm/min

With the help of the new plasma etching system, researchers at Fraunhofer IAF create deep (> 50 µm) and large-area (> 500 x 500 µm) structures in substrates. This is required, for example, in the application context of high-precision industrial metrology where different technologies are combined with low losses in hybrid setups. The equipment also masters full etch-through of thinned substrate (~ 100 µm), which enables, for example, GaN-on-Si chip designs for efficient and compact 48 V applications, such as three-phase inverters for DC motors. Optionally, the system uses cryogenic temperatures or fast gas exchange processes (BOSCH processes) in which it automatically switches between room and cryogenic temperatures.

The purchase of this facility was funded as part of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

Elektronenstrahlschreiber für kleinste Nanostrukturen

Electron beam writer for smallest nanostructures

Funktionalität und technische Daten

- minimale Linienbreite 10 nm
- Overlay-Genauigkeit < 11 nm
- Substrate bis 300 mm
- Autoloader mit Kapazität für 30 100-mm-Wafer
- Strahldrift < 20 nm/h

Mit dem äußerst präzisen Elektronenstrahlschreiber stellen Forschende des Fraunhofer IAF schnellste InGaAs- und GaN-Transistoren mit bis zu 10-nm-Gatelänge her oder bearbeiten Nanostrukturen für Quantentechnologien auf Diamantbasis. Ermöglicht wird dies durch die hohe Justage-Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Belichtungsgeschwindigkeit und Strahlstabilität des Geräts, das kleinste Strukturen mit einer Größe von bis zu 10 nm erzeugt. Die maximale Kapazität des automatischen Ladesystems umfasst 30 100-mm-Wafer. Schreiben kann die Anlage auf Substraten bis zu einem Durchmesser von 300 mm.

Die Anschaffung dieser Anlage wurde im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gefördert.

Functionality and technical data

- minimum line width 10 nm
- Overlay accuracy < 11 nm
- Substrates up to 300 mm
- Autoloader capacity for 30 100 mm wafers
- Beam drift < 20 nm/h

Using the highly precise electron beam writer, researchers at Fraunhofer IAF produce fastest InGaAs and GaN transistors with down to 10 nm gate length, or process nanostructures for diamond-based quantum technologies. This becomes possible by the high alignment accuracy combined with high exposure speed and beam stability of the device, which produces the smallest structures with a size down to 10 nm. The maximum capacity of the automatic loading system includes 30 100 mm wafers. The system can write on substrates up to 300 mm in diameter.

The purchase of this facility was funded as part of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

Mit dem Elektronenstrahlschreiber bearbeiten Forschende kleinste Strukturen bis zu einer Größe von 10 nm.

Using the electronic beam writer, researchers process smallest structures with a size down to 10 nm.



Halbleiter und Diamant kontaktlos lithografieren

Contactless lithography of semiconductors and diamond

Funktionalität und technische Daten

- Maskenfreie Lithografie
- Minimale Strukturgröße: 0,6 μm
- Schreibgeschwindigkeit (1 μm Auflösung): 150 mm^2/min
- Justage-Option für Rückseiten
- Lademöglichkeit für vier 100-mm-Wafer

Den Laser-basierten Direktbelichter nutzen Forschende des Fraunhofer IAF, um hochleistungsfähige InGaAs- wie GaN-Schaltungen anzufertigen und synthetischen Diamant für Quantentechnologien zu strukturieren. Die Anlage ermöglicht es, Strukturen bis zu 0,6 μm ohne die Verwendung einer Maske optisch zu lithographieren. Dank der automatischen Fokussysteme können im Gegensatz zur Kontaktlithografie auch Substrate mit erheblicher Krümmung ohne Lackabrisse und ohne die Notwendigkeit einer Maskenreinigung prozessiert werden.

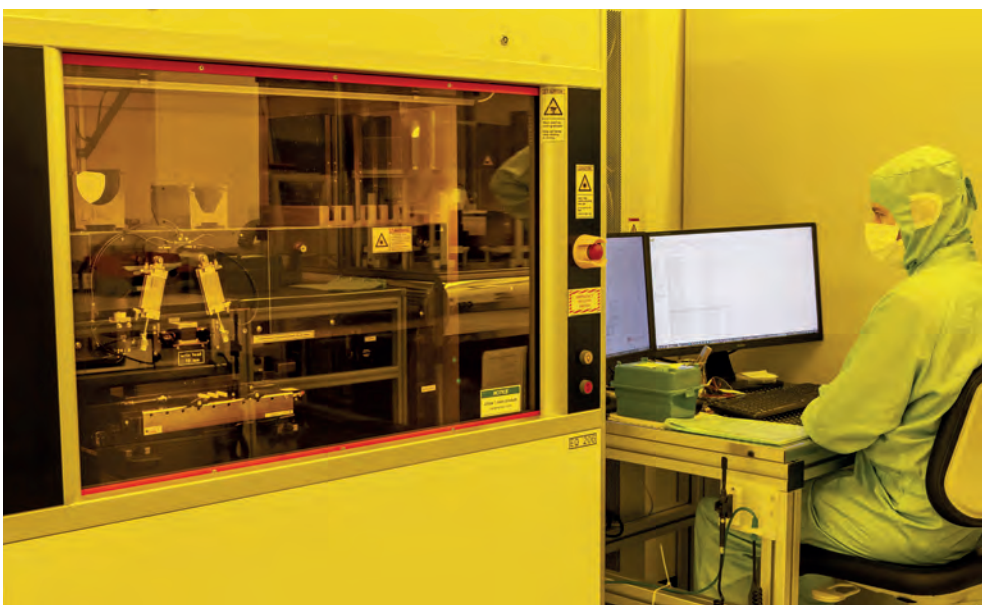
Die Anschaffung dieser Anlage wurde im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gefördert.

Functionality and technical data

- Mask-free lithography
- Minimum structure size: 0.6 μm
- Writing speed (1 μm resolution): 150 mm^2/min
- Backside alignment option
- Loading of up to four 100 mm wafers

Researchers at Fraunhofer IAF use the laser lithography tool to fabricate high-performance InGaAs and GaN circuits, and to structure synthetic diamond for quantum technologies. The system makes maskless optical lithography of structures down to 0.6 μm possible. Thanks to the automatic focus systems, and in contrast to contact lithography, substrates with considerable curvature can also be processed without resist cracking and without the need for mask cleaning.

The purchase of this facility was funded as part of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD).



Der Laser-Direktbelichter kann Strukturen bis zu 0,6 μm maskenfrei lithographieren. Forschende nutzen ihn beispielsweise zur Anfertigung von hochleistungsfähigen GaN-Schaltungen.

The laser lithography tool is able to lithograph structures down to 0.6 μm without using a mask. Researchers use it to fabricate high-performance GaN circuits, for example.

Neueste Messtechnik trifft einzigartiges Know-how

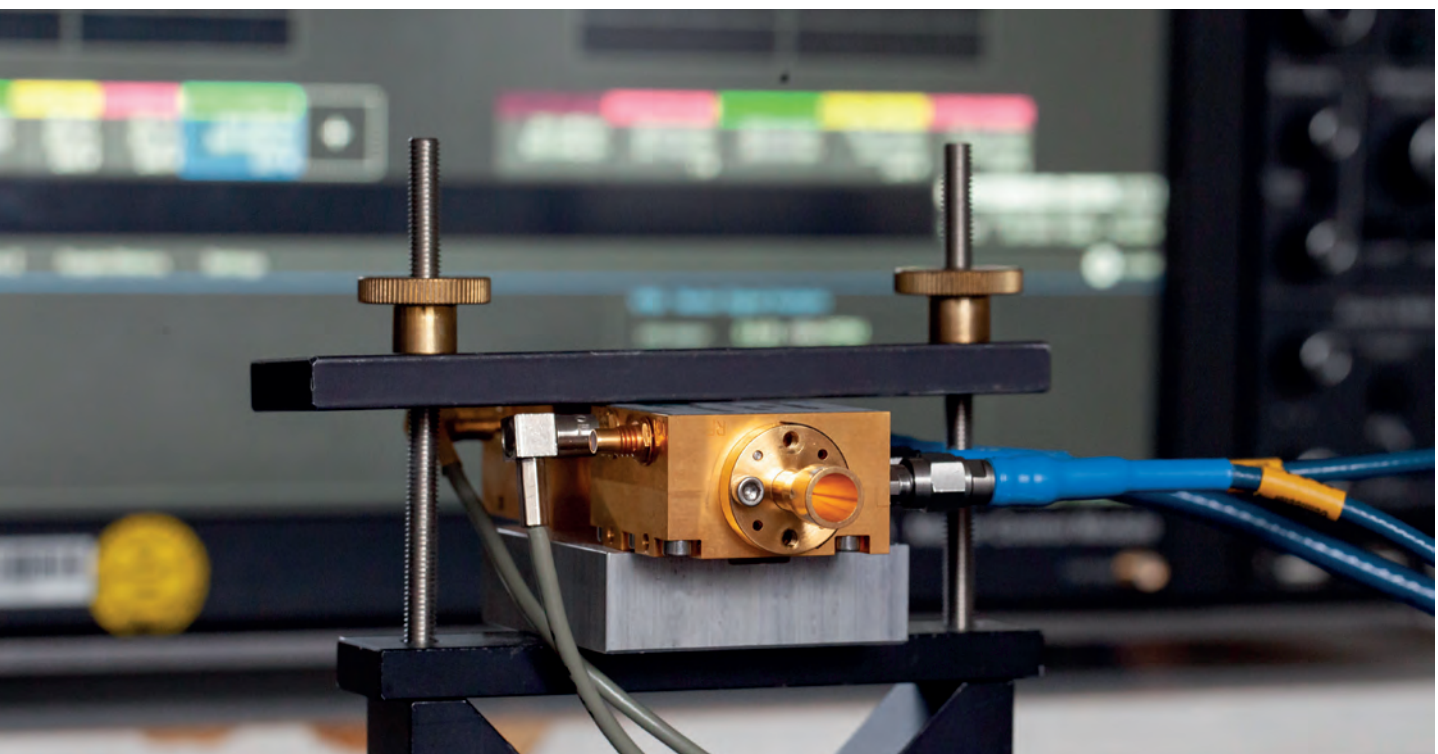
Latest measurement technology meets unique know-how

Labora Aufbau zur Untersuchung von MIMO und dual-polarisierten Übertragungsverfahren bei 300 GHz mit Datenraten von mehr als 100 Gbit/s

Laboratory setup for investigating MIMO and dual-polarized transmission methods at 300 GHz with data rates of more than 100 Gbit/s

Kunden und Partnern bietet das Fraunhofer IAF eine breite Palette an Messdienstleistungen zur strukturellen, elektronischen und optischen Charakterisierung von Halbleitermaterialien, Heterostrukturen und den aus ihnen prozessierten Bauelementen und Systemen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Hochfrequenzmesstechnik. Im Kontext der Quantentechnologien baut das Institut zudem spezifische elektrische und optische Messplätze zur gezielten Manipulation von Quantensystemen auf.

Fraunhofer IAF offers customers and partners a wide range of measurement services for the structural, electronic and optical characterization of semiconductor materials, heterostructures and devices and systems processed from them. One focus is on high-frequency metrology. In the context of quantum technologies, the institute is also establishing specific electrical and optical measurement setups for the targeted manipulation of quantum systems.



Die Mitarbeitenden des Fraunhofer IAF verfügen über einzigartige experimentelle Expertise in der Messtechnik. Sie kombinieren und optimieren unterschiedliche Analysemethoden. Das kommt sowohl institutseigenen Entwicklungen von Halbleiterbauelementen als auch Partner- und Kundenprojekten zugute. Von der grundlegenden Materialanalyse und Charakterisierung auf Wafer-Ebene über die Modulmesstechnik bis zur Evaluation von integrierten Systemen: Das Angebot deckt die gesamte Entwicklungskette ab und stellt eine wirkungsvolle Prozessentwicklung und -stabilität sicher.

FMD-Messlabor für hochfrequente breitbandige Datenkommunikations-Systeme

Der mobile Datenverkehr wächst exponentiell, d. h. immer größere Datenmengen müssen an entlegenen Orten terrestrisch oder über Satelliten zur Verfügung gestellt werden, aber auch zeitlich begrenzt an lokalen Hot-Spots. Eine kabelgebundene Lösung ist oft nicht möglich oder zu teuer. Breitbandige Funk-systeme können diese Lücken schließen. Das Fraunhofer IAF entwickelt zu diesem Zweck Komponenten mit InGaAs sowie GaN-Halbleiterbauelemente für sehr hohe Betriebsfrequenzen und Leistungen, um neue Frequenzbänder im Millimeterwellen- und THz-Bereich kommerziell nutzbar zu machen. Zur Charakterisierung von integrierten Schaltungen (ICs) für die drahtlose Kommunikation in möglichen zukünftigen 6G-Frequenzbändern verfügt das Fraunhofer IAF über ein Messlabor, das die Untersuchung unter anwendungsnahen Betriebsbedingungen ermöglicht:

- Träger-Frequenzen bis 500 GHz
- Erzeugung und Analyse komplexer Modulationsverfahren
- Symbolraten bis 32 GBaud und Datenraten bis 64 Gbit/s
- Untersuchung von Trägersignalquellen bis über 300 GHz

Das Messlabor ist Teil der FMD und wird in diesem Rahmen stetig ausgebaut, um zum Beispiel Multiple Input Multiple Output (MIMO) Datenkommunikations-Systeme mit bisher unerreichten Bandbreiten und Frequenzen (4 x 64 Gbit/s bei sub-mm-Wellen-Trägerfrequenzen) erforschen zu können.

The employees of Fraunhofer IAF have unique experimental experience in metrology. They combine and optimize different analysis methods. This benefits both the institute's own semiconductor device research as well as partner and customer projects. From basic material analysis and characterization at wafer level to module metrology and evaluation of integrated systems: The offer covers the entire development chain and ensures effective process development and stability.

FMD measurement laboratory for high-frequency broadband data communication systems

Mobile data traffic is growing exponentially, which means that ever greater volumes of data must be made available at remote locations, terrestrially or via satellite, but also for a limited time at local hot spots. A wired solution is often not possible or too expensive. Broadband radio systems can close these gaps. For this purpose, Fraunhofer IAF is developing components with InGaAs as well as GaN semiconductor devices for very high operating frequencies and powers to make new frequency bands in the millimeter-wave and THz range commercially viable. For the characterization of integrated circuits (ICs) for wireless communication in possible future 6G frequency bands, Fraunhofer IAF has a measurement laboratory that allows the investigation under realistic operating conditions:

- Carrier frequencies up to 500 GHz
- Generation and analysis of complex modulation schemes
- Symbol rates up to 32 GBaud and data rates up to 64 Gbit/s
- Investigation of carrier signal sources up to over 300 GHz

The measurement laboratory is part of the FMD and is being continuously expanded within this framework in order to be able, for example, to research multiple input multiple output (MIMO) data communication systems with previously unattained bandwidths and frequencies (4 x 64 Gbit/s at sub-mm wave carrier frequencies).

Kryogene Messtechnik für ultrarauscharme Elektronik

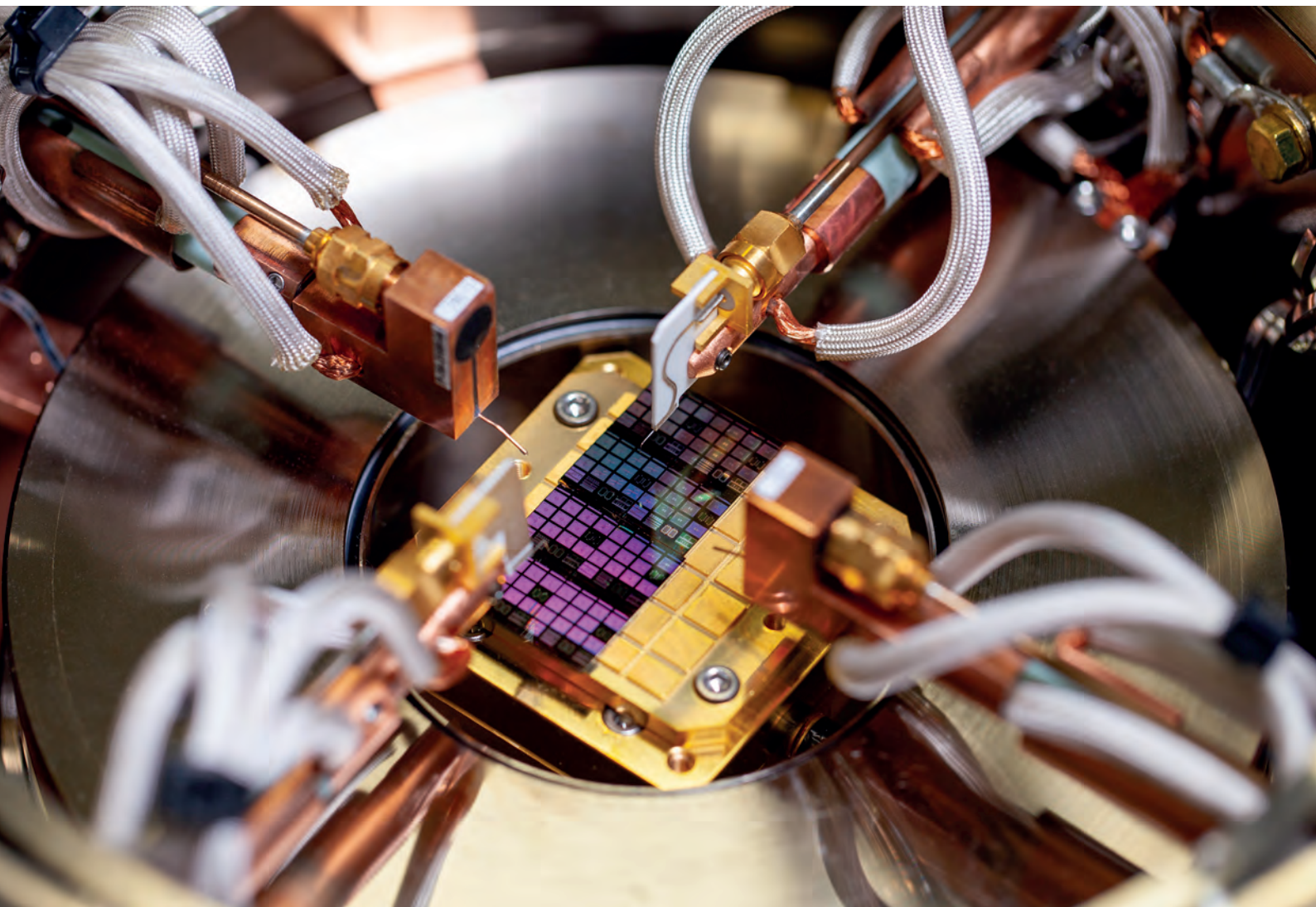
Das Fraunhofer IAF entwickelt ultrarauscharme und kompakte Hochfrequenzelektronik, unter anderem für den Einsatz in der Weltraumkommunikation, Klima- und Erdbeobachtung aus dem All und im Quantencomputing. Elektronik in Quantencomputern, die in direkter Nähe der Qubits zum Einsatz kommt, muss nicht nur mit dem Betrieb bei extrem niedrigen Temperaturen kompatibel sein, sondern auch ein extrem geringes Rauschen sowie eine vernachlässigbare Erwärmung aufweisen.

Um die Performance kryogener elektronischer Bauelemente zu bestimmen und weiter zu verbessern, verfügt das Institut über hochmoderne Tiefsttemperatur-Messtechnik. Die kryogenen Probestationen des Fraunhofer IAF ermöglichen DC-Messungen sowie Streuparameter- und Rauschtemperaturmessungen von kryogen gekühlten Einzelbauelementen und integrierten Schaltkreisen innerhalb einer Kryokammer bis zu Temperaturen von 2 K (ca. -271 °C). Das Institut bringt seine Expertise der kryogenen Messtechnik, dem Design von Tieftemperatur-Schaltungen sowie Verstärkern unter anderem in den EU-Projekten »Sequence« und »MATq« sowie den vom BMBF geförderten Projekten »MUNIQ-SC« und »qBriqs« ein.

Cryogenic measurement technology for ultra-low noise electronics

Fraunhofer IAF develops ultra-low noise and compact high frequency electronics, for applications such as space communication, climate and Earth observation from space and quantum computing. Electronics in quantum computers, which are used in close proximity to the qubits, must not only be compatible with operation at extremely low temperatures, but also exhibit extremely low noise as well as negligible heating.

In order to determine and further improve the performance of cryogenic electronic components, the institute has state-of-the-art cryogenic measurement technology at its disposal. The cryogenic test stations of Fraunhofer IAF allow DC measurements as well as scattering parameter and noise temperature measurements of cryogenically cooled single devices and integrated circuits inside a cryochamber down to temperatures of 2 K (approx. -271 °C). The institute contributes its expertise in cryogenic measurement techniques, the design of cryogenic circuits as well as amplifiers to the EU projects "Sequence" and "MATq" as well as to the BMBF-funded projects "MUNIQ-SC" and "qBriqs," among others.



Neuartiger kryogener On-Wafer-Prober

Das Fraunhofer IAF nimmt europaweit bereits eine gute Position im Bereich der charakterisierenden Messverfahren festkörperbasierter Qubits bei Tieftemperaturen ein und baut seine Kompetenz weiter aus: Mit Unterstützung des BMBF schafft das Institut einen neuartigen On-Wafer-Prober an, der mehr als 200 Bauelemente gleichzeitig bei Qubit-Betriebstemperaturen von unter 2 K charakterisieren kann. Ab 2022 wollen Forschende des Fraunhofer IAF damit erstmals in Europa statistische Daten zur Varianz von Qubits vorlegen, die mit unterschiedlichen Halbleitertechnologien erzeugt werden. Die zu gewinnenden Daten sind essenziell für den Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette industriell fertiger Quantencomputer auf Festkörperbasis.

Novel cryogenic on-wafer prober

Fraunhofer IAF already holds a good position in Europe in the field of characterizing measurement techniques of solid-state based qubits at cryogenic temperatures and is further expanding its competence: With support from the BMBF, the institute is creating a novel on-wafer prober that can simultaneously characterize more than 200 devices at qubit operating temperatures of below 2 K. Starting in 2022, researchers at Fraunhofer IAF want to use the prober to present statistical data on the variance of qubits generated with different semiconductor technologies for the first time in Europe. The data to be obtained are essential for the establishment of a European value chain of industrially ready solid-state quantum computers.

Ein Kryo-on-Wafer-Messplatz, der Charakterisierungen von Wafern bei extrem niedrigen Temperaturen ermöglicht.

A cryo-on-wafer measuring station, which enables characterizations of wafers at extremely low temperatures.

Messdienstleistungen nach Maß

Das Fraunhofer IAF verfügt über modernste Systeme für Hochfrequenz- und optoelektronische Messungen, für Quantensensorik sowie für die Analytik von Halbleitern.

Einen Überblick über unser gesamtes Portfolio erhalten Sie hier:



Customized measurement services

Fraunhofer IAF has state-of-the-art systems for high-frequency and optoelectronic measurements, for quantum sensing as well as for semiconductor analytics.

Here, you can learn more about our entire portfolio:



Anhang

Appendix

Das Institut in Zahlen	84
The institute in figures	
Kuratorium	86
Advisory Board	
Technologiehighlight: Verstärkersystem mit extrem hoher Ausgangsleistung	88
Technology highlight: Amplifier system with extremely high output power	
Patente	89
Patents	
Aus einer Idee wird ein Produkt	90
From idea to product	
Wie Sie mit uns kooperieren können	91
How you can work with us	
Ausbildung und Lehre	92
Education and teaching	
Fakten und Zahlen	93
Facts and figures	
Abschlussarbeiten	94
Theses	
Organigramm	96
Organigram	
Arbeiten am Fraunhofer IAF	98
Working@IAF	
Impressum	100
Publication details	



Das Institut in Zahlen

The institute in figures

Das Fraunhofer IAF verfügte im Jahr 2021 über einen gegenüber dem Vorjahr um 6,7 Mio. € geringeren Betriebshaushalt von 31,9 Mio. €. Der deutlich höhere Betriebshaushalt im Vorjahr kam insbesondere durch den außergewöhnlichen Anstieg der Sachaufwendungen im Zusammenhang mit der vom Land Baden-Württemberg finanzierten Startleasingrate eines Quantencomputers zu Stande. Die Personalkosten liegen für das Jahr 2021 mit geschätzten 19,1 Mio. € um 0,8 Mio. € unter dem Vorjahreswert. Aufgrund Pandemie-bedingter Unsicherheiten in der Ertragslage wurden im Jahr 2021 weniger Neueinstellungen vorgenommen als vorgesehen. Das Investitionsvolumen beträgt ca. 6,3 Mio. €. Investitionen im Rahmen des BMBF-finanzierten Programms »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« wurden im Jahr 2020 letztmalig getätigt – insbesondere aus diesem Grund fielen die Investitionen um ca. 2,7 Mio. € geringer aus als im Jahr davor.

Für 2022 wurde mit einem moderaten Anstieg des Personalkörpers zzgl. der Tarifsteigerungen geplant. Die Sachkostensteigerung resultiert im Wesentlichen aus der Annahme steigender Energiekosten. Die Höhe der laufenden Investitionen wird auf dem Niveau des Vorjahres angenommen (rd. 6,5 Mio. €).

Ein sehr großer Teil des Gesamthaushalts wurde in 2021 weiterhin vom BMVg mit einem Anteil von ca. 42 % finanziert, wobei aufgrund der Vielzahl von Projekten im Bereich der Quantentechnologien der zivile Anteil im Vergleich zu den Jahren 2019 und früher hoch bleibt. Positiv zu bewerten ist der Anstieg der Industrieerträge auf rd. 5,3 Mio. €. Damit übersteigt der Industrieertrag im Jahr 2021 das Niveau der Vorjahre, was als großer Erfolg zu bewerten ist, da die Industrie von den Auswirkungen der Corona-Pandemie deutlich mehr getroffen wurde als der öffentliche Bereich. Deutliche Steigerungen bei der Einwerbung Fraunhofer-interner Mittel führen ebenfalls dazu, dass das Fraunhofer IAF nach dem negativen Ergebnis im vergangenen Jahr im Jahr 2021 wieder mit einem deutlichen Aufbau der Institutsreserven rechnen kann.

Die Zahl der Vollzeitäquivalent-Beschäftigten liegt 2021 bei 224. In absoluten Zahlen arbeiten 287 Beschäftigte am Fraunhofer IAF, davon sind ca. 33 % weiblich. Von diesen 287 sind 190 Mitarbeitende, inklusive 29 Doktoranden, direkt in den wissenschaftlichen Abteilungen aktiv. 86 Beschäftigte sind in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Stand Dezember unterstützen zudem elf wissenschaftliche Hilfskräfte die Arbeiten am Fraunhofer IAF.

In 2021, Fraunhofer IAF had an operating budget of € 31.9 million, which is about € 6.7 million lower than in the previous year. The significantly higher operating budget in the previous year was due in particular to the extraordinary increase in material expenses in connection with the initial leasing rate of a quantum computer financed by the state of Baden-Württemberg. At an estimated € 19.1 million, personnel costs for 2021 are € 0.8 million lower than in the previous year. Due to pandemic-related uncertainties in the earnings situation, fewer new hires were made in 2021 than planned. The investment volume amounts to approximately € 6.3 million. Investments under the BMBF-funded "Research Fab Microelectronics Germany" program were made for the last time in 2020 — for this reason in particular, investments were around € 2.7 million lower than in the previous year.

For 2022, a moderate increase in the number of employees plus pay rises was planned. The increase in material costs is mainly due to the assumption of rising energy costs. The level of current investments is assumed to be the same as in the previous year (around € 6.5 million).

A very large part of the overall budget continued to be financed by the MoD in 2021, with a share of around 42 %. Due to the large number of projects in the area of quantum technologies, the civilian share remains high compared to 2019 and earlier. The increase in industrial revenue to around € 5.3 million is a positive development. This means that the industrial revenue in 2021 exceeds the level of previous years, which can be considered a major success, as industry was hit much harder by the effects of the Corona pandemic than the public sector. Significant increases in the acquisition of internal Fraunhofer funds also mean that Fraunhofer IAF can expect a significant build-up of the institute's reserves again in 2021, following the negative result last year.

The number of full-time equivalent employees in 2021 is 224. In absolute numbers, 287 employees work at Fraunhofer IAF, of which approximately 33 % are female. Of these 287, 190 employees, including 29 PhD students, work directly in the scientific departments. 86 employees work in the infrastructure, including the management area. As of December, eleven scientific assistants support the work at Fraunhofer IAF.

287

38.2 million €

Mitarbeitende Employees

Davon | Of which

110

Wissenschaftliche Mitarbeitende
in Fachabteilungen
Scientists in R&D departments

Inklusive | Including

Promovierenden sowie
Masterstudierende in Fachabteilungen
Master & PhD students in R&D departments

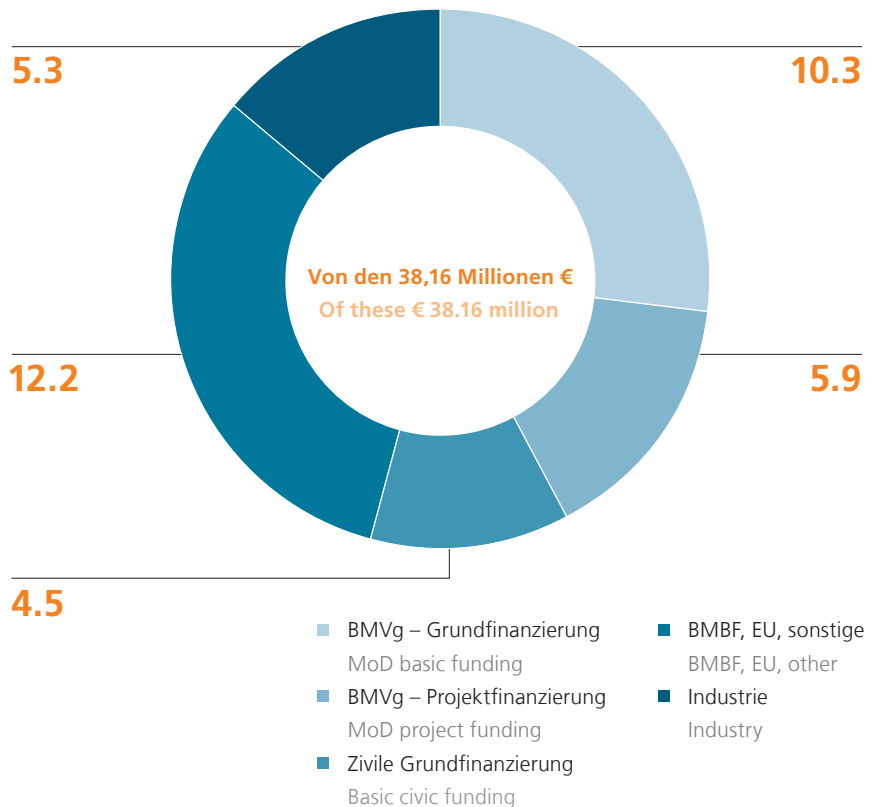
80

Mitarbeitende
in Fachabteilungen
Other staff in R&D departments

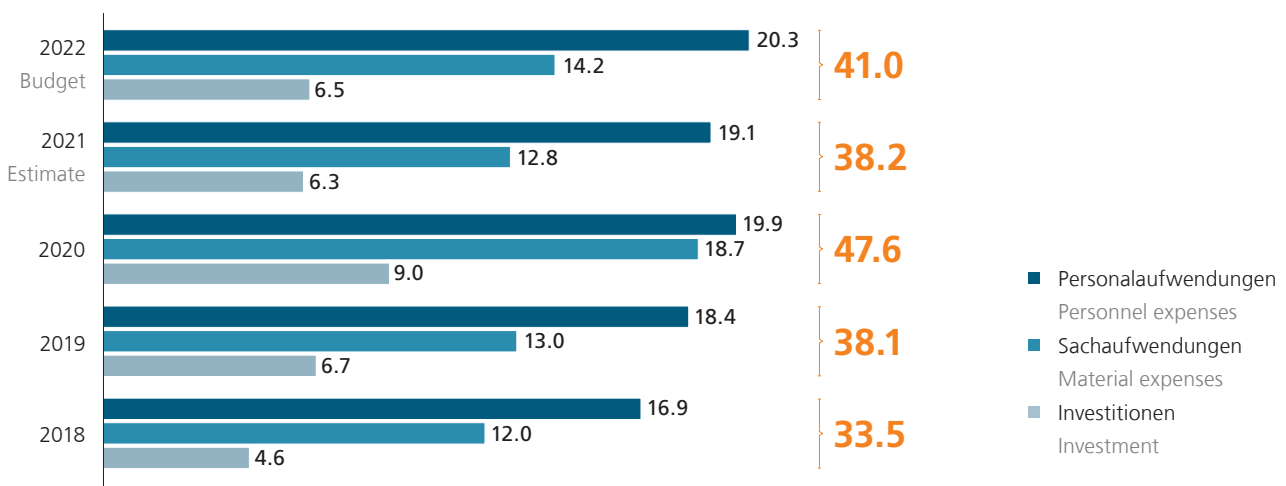
91

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

Gesamthaushalt (Stand 12/2021) Total budget (as of 12/2021)



Gesamthaushaltsausgaben in Mio. € Total budget outlay in million €



Kuratorium

Advisory Board

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

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

Barbara Becker, MdL

Bayerischer Landtag, CSU Fraktion, München

Dr. Klaus Beilenhoff

United Monolithic Semiconductor GmbH, Ulm

Prof. Dr. Jérôme Faist

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Johannes Koeth

nanoplus GmbH, Gerbrunn

Dr. Jens Kosch

X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt

Prof. Dr. Juerg Leuthold

ETH Zürich, Schweiz

Dr. Tomas Krämer

Institutsbetreuer / Institute Liaison
Fraunhofer-Gesellschaft, München

Dr. Nicolai Künzner

Diehl Defence GmbH & Co. KG, Überlingen

MinR Dipl.-Phys. Claus Mayer

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

Dr. Ulf Meiners

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

Dr. Thomas Metzger

Qualcomm Germany RFFE GmbH, München

Dr. Thomas Roedle

Ampleon Netherlands B. V., Nijmegen,
Niederlande

Dr. Dietmar Schill

Sony Europe B. V., Stuttgart

Andreas Wälti

Evatec AG, Trübbach, Schweiz

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart



Das Fraunhofer IAF ist für mich ein Forschungswunderland. Die mutige, pragmatische, visionäre Art hier zu arbeiten begeistert mich. Form follows function: Organisationsstruktur und Führung müssen der Wissenschaft dienen. Diesen Gedanken bringe ich als Beraterin ins Kuratorium ein.«

“For me, Fraunhofer IAF is a research wonderland. The courageous, pragmatic, visionary way of working here inspires me. Form follows function: Organizational structure and management must serve science. This is the idea I bring to the Advisory Board as an advisor.”



Barbara Becker, MdB
Bayerischer Landtag,
CSU Fraktion



Ich schätze die Freude und Leidenschaft der Menschen am Fraunhofer IAF bei der Erforschung von Schlüsseltechnologien für die industrielle Zukunft – stets offen für Gespräche, Ideen und interessiert an Kooperation.«

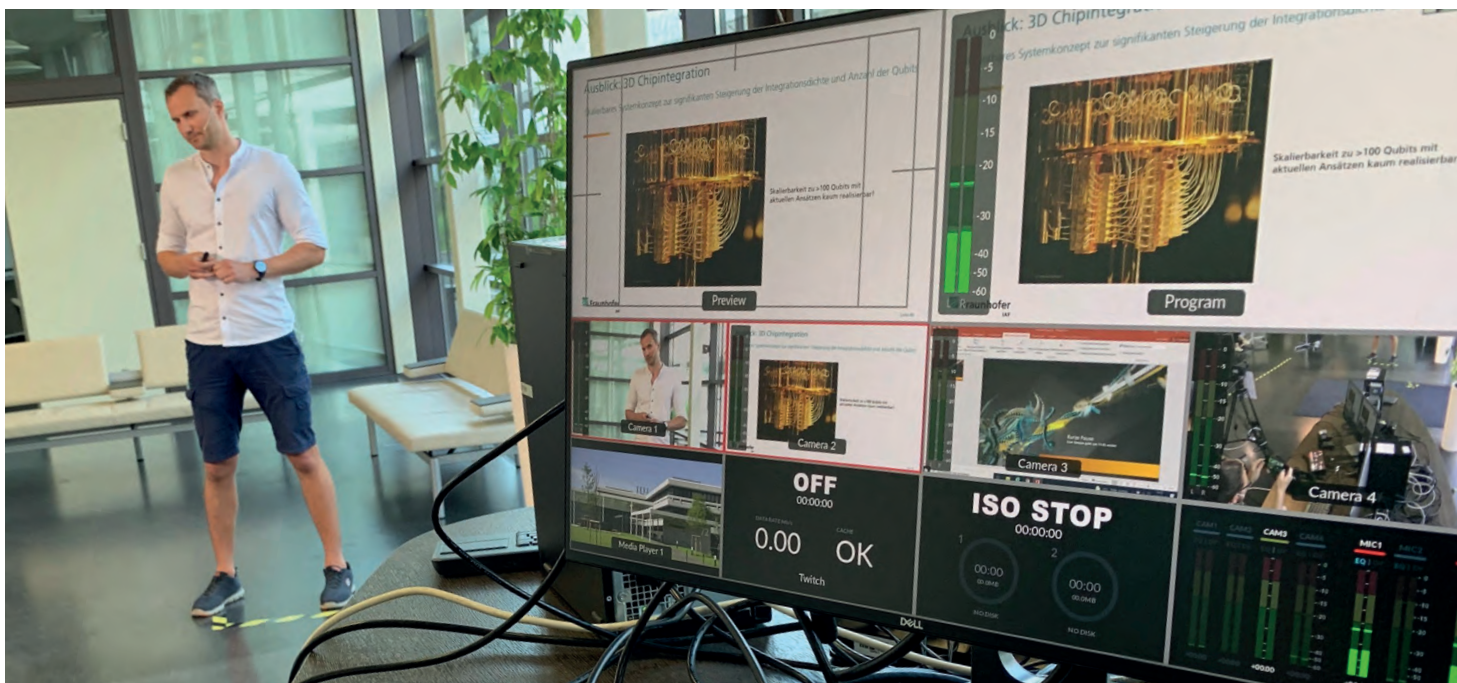
“I appreciate the joy and passion of the people at Fraunhofer IAF in researching key technologies for the industrial future — always open for discussion, ideas and interested in cooperation.”

Dr. Nicolai Künzner
Diehl Defence GmbH & Co. KG

Kuratoriumssitzung 2021: »QUANTUM« Advisory Board Meeting 2021: “Quantum”

»QUANTUM« war das Schlagwort für die Kuratoriumssitzung des Fraunhofer IAF, die im Juni 2021 als digitales Event stattfand. In interessanten Vorträgen, die live aus dem Institut gestreamt wurden, gaben die Forschenden Einblicke in spannende Projekte und -vorhaben aus den Bereichen Quantensensorik und Quantencomputing; alle mit dem Ziel, die zweite Generation der Quantentechnologien aktiv mitzugestalten.

“QUANTUM” was the buzzword for the Fraunhofer IAF Advisory Board meeting, which took place in June 2021 as a digital event. In interesting talks streamed live from the institute, researchers provided insights into exciting projects and ventures in the fields of quantum sensing and quantum computing; all with the goal of actively shaping the second generation of quantum technologies.



Verstärkersystem mit extrem hoher Ausgangsleistung

Amplifier system with extremely high output power

Forschende des Fraunhofer IAF haben einen neuartigen festkörperbasierten Leistungsverstärker (Solid State Power Amplifier – SSPA) entwickelt, der herkömmliche Röhrenverstärker ersetzen kann. Im Gegensatz zu herkömmlichen Leistungsverstärkern, die bei steigenden Frequenzen stark an Effizienz einbüßen, erzielen die von Philipp Neiningger in seiner Promotion entwickelten Chips und der korrespondierende Power Combiner dank des innovativen Systementwurfs und Aufbaus extrem hohe Leistungen von über 100 W – und das bei Frequenzen von 28–38 GHz. In diesen Leistungs- und Effizienzklassen gibt es bisher keine vergleichbare Technologie, die diese Bandbreite erzielt. Die gesamte Wertschöpfungskette von der Epitaxie und Prozessierung der Wafer über den Entwurf bis zur Fertigung der Module für dieses System ist am Fraunhofer IAF angesiedelt.

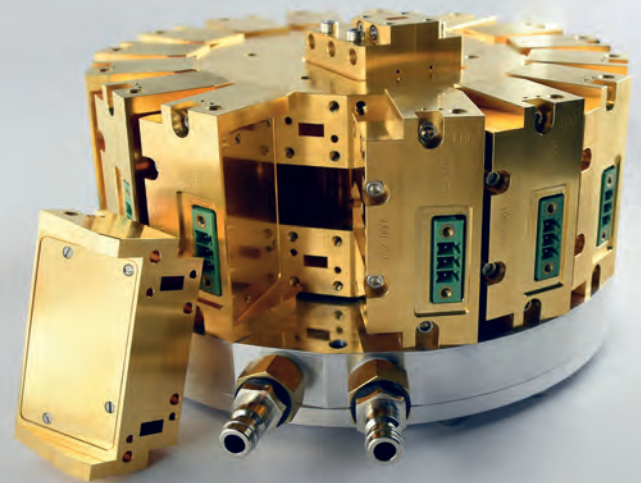
Researchers at Fraunhofer IAF have developed a novel Solid State Power Amplifier (SSPA). In contrast to conventional power amplifiers, which strongly lose efficiency at increasing frequencies, the chips and the corresponding power combiner developed by Philipp Neiningger during his doctoral research achieve extremely high powers of more than 100 W at frequencies of 28–38 GHz. This is due to their innovative system design and realization. To date, there is no comparable technology in these power and efficiency classes that achieves this bandwidth. The entire value chain from epitaxy and processing of the wafers to the design and manufacture of the modules for this system is located at Fraunhofer IAF.

Das Verstärkersystem nutzt 16 radial angeordnete Verstärker-Module und führt deren Ausgangsleistung mit einem Wirkungsgrad von 95 % zusammen. Das Gesamtsystem erreicht dadurch eine Leistung von bis zu 127 W und einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 23 %.

The amplifier system uses 16 radially arranged amplifier modules and combines their output power with an efficiency of 95 %. The overall system achieves a power of up to 127 W and an overall efficiency of up to 23 %.



read more in an interview



Philipp Neiningger vereint in seiner Promotion und Forschung am Fraunhofer IAF Chipdesign mit Hochfrequenzelektronik. **Philipp Neiningger** combines chip design with high frequency electronics in his PhD and research at Fraunhofer IAF.

Patente

Patents

Patenterteilungen

Patents granted

M. Seelmann-Eggebert, R. Weber

Anordnung zum Kalibrieren einer Messeinrichtung
10 2012 205 943, 29.07.2021; Deutschland

B. Albrecht, S. Kopta

Verfahren zur Herstellung eines differentiellen, zweifarbigen UV-Detektors und differentieller, zweifarbiger UV-Detektor
10 2012 217 961, 18.11.2021; Deutschland

M. Kunzer

Vorrichtung zur Mikrostrukturierung von Oberflächen
10 2013 215 739, 21.10.2021; Deutschland

R. Reiner

Schaltungsanordnung
10 2014 203 851, 04.11.2021; Deutschland

R. Ostendorf, K. Rieblinger, T. Tybussek

Verfahren zum berührungslosen und zerstörungsfreien Bestimmen eines Anteils mindestens einer freien Fettsäure oder mindestens eines Oxidationsprodukts auf einer Oberfläche eines Lebens- oder Futtermittels
10 2015 223 436, 30.12.2021; Deutschland

M. Knapp

Acoustic wave resonator and electronic filter circuit
10,903.815 B2, 26.01.2021; USA

M. Cwiklinski

Integrierter Schaltkreis
10 2019 216 400, 11.02.2021; Deutschland

A. Bächle, R. Aidam, F. Rutz

Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterbauelementes
10 2020 208 748, 21.10.2021; Deutschland

Patentanmeldungen

Patent applications

P. Knittel, N. Lang, A. Götze

Verfahren zur Herstellung von Farbzentren in Diamant und damit hergestelltes Substrat
10 2021 210 096.1, 13.09.2021; Deutschland

F. Hahl, J. Jeske, T. Luo

Substrat und Verfahren zu seiner Herstellung
10 2021 209 666.2, 02.09.2021; Deutschland

Aus einer Idee wird ein Produkt

From idea to product

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

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



more
info



Warum Fraunhofer IAF?

Zusammenarbeit: maßgeschneidert!

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

Gebündelte Kompetenzen

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

Ihre Anfrage im Mittelpunkt

Bei Auftragsforschung gehen wir spezifisch auf Ihre Anfrage ein.

Kostengünstige Lösungen

Der Zugriff auf unsere Infrastruktur und Prozesse schont Ihre internen Ressourcen.

Geschütztes Umfeld

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

Why Fraunhofer IAF?

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.

Bundled competence

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

The focus is on your needs

Contract research allows us to provide you with customized responses.

Cost-effective solutions

Access to our infrastructure and processes saves your internal resources.

Protected environment

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

Wie Sie mit uns kooperieren können

How you can work with us

Industriekunden Industry

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

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



Forschungsinstitute Research Institutes

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

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



Start-ups Start-ups

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

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



Ausbildung und Lehre

Education and teaching



Ich hatte schon immer Freude daran, anderen etwas beizubringen. Ich möchte mein Wissen gerne weitergeben und darum habe ich angefangen, die Vorlesung Leistungselektronik für Bachelorstudierende der Dualen Hochschule Baden-Württemberg zu halten.«

“I have always enjoyed teaching others. I like to pass on my knowledge and that’s why I started teaching the Power Electronics lecture to bachelor students at the Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.”

Michael Basler

unterrichtet an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)
teaches at the Baden-Wuerttemberg Cooperative State University

Mitarbeitende des Fraunhofer IAF waren in 2021 in der Lehre tätig.
Scientists of Fraunhofer IAF were active in teaching in 2021.

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

»Verbindungshalbleiter«, »System-Design-Projekt«, »Masterprojekt SSE«, »Mechanik«, »Nanobiotechnologie«, »Bauelemente und Schaltungen der Leistungselektronik«, »Elektrodynamik und Optik«

Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 16

»RF and Microwave Circuits and Systems«, »RF and Microwave Circuits and Systems«, »RF and Microwave Devices and Circuits«, »Bauelemente und Schaltungen der Leistungselektronik«, »Circuit technology«, »Sustainable Systems Engineering«

Prof. Dr. Rüdiger Quay

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 14

»Mechanik«, »Elektrodynamik und Optik«

Dr. Josef Rosenzweig, Dr. Klaus Köhler

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 8

»Optoelektronische Quantenbauelemente«

Dr. Martin Walther

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 2

»Quantencomputer«

PD Dr. Thomas Wellens

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 2

Universität Stuttgart

»SiGe BiCMOS Monolithic Microwave Integrated Circuit Design«

Dr. Sébastien Chartier

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 2

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Leistungselektronik«

Michael Basler

Lehrdeputat SWS | Teaching hours per week: 2

Fakten und Zahlen

Facts and figures

29

Fachgremien
Committees

Das Fraunhofer IAF ist in 29 Fachgremien vertreten, von Mitgliedschaften in Lenkungs- und Programmausschüssen, Facharbeitsgruppen und Kuratorien bis hin zu Gast- und Mitherausgeberschaften von Fachzeitschriften.

Fraunhofer IAF scientists sit on 29 expert committees, ranging from steering and program committees to technical working groups and advisory boards to guest and associate editorships of scientific journals.

60

Ausbildung
Education

Im Laufe des Jahres 2021 befanden sich insgesamt 60 Personen am Fraunhofer IAF in Ausbildung; darunter Auszubildende, Bachelorstudierende, Masterstudierende sowie Promovierende.

During 2021, 60 people were in training at Fraunhofer IAF; including bachelor's, master's and doctoral students as well as apprentices.

92

Publikationen
Publications

Von Wissenschaftlichen Mitarbeitenden des Fraunhofer IAF erschienen 2021 insgesamt 92 Publikationen, darunter Dissertationen und Open-Access-Veröffentlichungen, wissenschaftliche Aufsätze und Konferenzbeiträge.

Fraunhofer IAF scientists authored and co-authored 92 publications in 2021, including dissertations and open access publications as well as journal and conference papers.

Abschlussarbeiten

Theses

Dissertationen

Doctoral Theses

Johannes Anzt

AlGaIn / GaN-basierte ionenselektive Feldeffekttransistoren zur pH-Wert-Messung in nichtwässrigen Lösungen, Universität Freiburg

Anli Ding

Surface acoustic wave devices based on c-plane and a-plane AlScN, Universität Freiburg

Philipp Döring

Experimental evaluation of the device design and process technology of the current aperture vertical electron transistor for power electronics applications, Universität Freiburg

Laurenz John

Integrated Sub-Millimeter-Wave High-Power Amplifiers in Advanced InGaAs-Channel HEMT Technology, Karlsruher Institut für Technologie KIT

Tobias Kemmer

Reliability and Degradation Mechanisms of GaN High Electron Mobility Transistors with Short Gate Length, Universität Freiburg

Florian Maier

Untersuchungen von Leistungsverstärkern für hochdynamische Plasmalasten, Universität Freiburg

Stefan Mönch

Switching Characteristics of Integrated GaN-on-Si Half-Bridge and Driver Circuits, Universität Stuttgart

Philipp Neininger

Power Combining Solutions for High-Power GaN MMIC at mm-Wave Frequencies, Karlsruher Institut für Technologie KIT



Das Kernthema meiner Doktorarbeit ist die Erforschung hochkompakter Schaltungskonzepte für neuartige Leistungsverstärker als Schlüsselkomponente für zukünftige drahtlose THz-Kommunikationssysteme. Besonders faszinierend an dieser Arbeit war für mich die Möglichkeit, mit weltweit einzigartigen Hochfrequenztransistoren und Technologien an hochkomplexen und integrierten Schaltungen zu forschen.«

Dr. Laurenz John

Projektleiter am Fraunhofer IAF

Christian Zech

Untersuchung von Rauscheinflüssen auf die präzise Abstandsbestimmung von mmW FMCW-Radaren im Nahbereich, Universität Freiburg

Andreas Zibold

Langlebige LED-Beleuchtung für raue Umgebungen mit elektrolytfreiem Treiber durch Oberwelleneinfügung, Universität Freiburg

Masterarbeiten

Master Theses

Carlos Alvarado

Investigation of a Low-Cost Metallization for Highly Efficient III-V/Si Tandem Cells, Universität Freiburg

Marc Johannes Aslan

Entwicklung und Integration eines industrietauglichen, modularen Embedded Systems zur Ansteuerung und Auswertung verschiedener Holographie-Sensorfamilien, Universität Freiburg

Christina Maurette Blasini

Investigation of a mHEMT based Millimeter-Wave True-Time Delay, Universität Freiburg

Jan Braun

Entwurf und Charakterisierung einer Stromsensorik für 48 V GaN-Traktionsinverter, Universität Freiburg

Aaron Ensslin

Nitrogen-Vacancy Center Spin Manipulation for Quantum Magnetometry by Magnetic Nanoparticles, Karlsruher Institut für Technologie KIT

“The investigation of highly-compact circuit topologies for novel power amplifiers as key components for future THz wireless communication systems is the core topic of my PhD thesis. The opportunity to work on highly-complex and integrated circuit concepts by utilizing state-of-the-art high-frequency transistors and technologies has been a particular fascination about my work.”

Dr. Laurenz John

Project Manager at Fraunhofer IAF



Jannick Fammels

Development of Tensile (Al,Sc)N Thin Films, Universität Freiburg

Heinrich Fries

Quantum-Classical hybrid algorithms for the determination of ground state energies, Universität Freiburg

Denis Gebauer

Untersuchung von Hochfrequenz-Transistoren mit einem neuartigen aktiven Load-Pull Messsystem im Millimeterwellen Frequenzbereich (75 – 110 GHz), Universität Freiburg

Mario Groschupf

Investigations of Millimetre-Wave GaN Doherty PAs for Broadband Operation, Universität Freiburg

David Karcher

Quantensensorische HF-Signalanalyse mittels NV-Zentren in Diamant, Karlsruher Institut für Technologie KIT

Konstantin Kuliabin

Investigation of a mHEMT – Ultra-Wideband Vector Modulator, Universität Freiburg

Saikat Maity

Investigations of Harmonic-Injection on GaN50 HEMT Based Doherty Power Amplifiers, Universität Freiburg

Kareem Ahemd Mansour

Design and Implementation of a Highly Efficient Bidirectional DC-DC Converter for Multi-Phase Control of Capacitive Loads, Universität Freiburg

Timm Müller

Dielectric Characterization of Aluminium Scandium Nitride on Silicon Substrates, Universität Freiburg

Lena Mutter

Entwicklung eines Onboard DC/DC-Wandlers zum Laden der Traktionsbatterie eines E-Autos mittels in der Karosserie integrierter PV-Module, Universität Freiburg

Rama Narayanan

Investigation of D-Band SiGe BiCMOS Building Blocks for Implementation in a PLL, Universität Freiburg

Marc Andre Schüler

Development of a Photovoltaic Module Integrated Power Converter with GaN Semiconductors, Universität Freiburg

Jagannath Srinivasan

Investigation of In-Package Calibration Structures for Power Bars from Sub 6 GHz up to 3rd Harmonic Frequency, Universität Freiburg

Sondre Michler Ziel Stenersen

Investigation of Interface Properties in Quantum Cascade Structures, Universität Freiburg

Gerrit Stiefvater

Untersuchung und Bewertung eines neuen Messverfahrens zur Messung von extremen Impedanzen über die Netzwerkanalyse, Universität Freiburg

Vanshaj Taxali

Simulation-based Conception of Front-side MSL Technologies for GaN HEMT MMICs > 100 GHz, Universität Freiburg

Ali Yassine

Error Characterization and Reduction with Qiskit, Universität Freiburg

Organigramm

Organigram

Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher
Director (until 06/30/2022)



Lukas Kübler
Marketing &
Communications
☎ -261



Prof. Dr. Rüdiger Quay
Division Director
Business Units
☎ -410



Dr. Sébastien Chartier
High Frequency Electronics
☎ -446



Dr. Michael Mikulla
Power Electronics
☎ -267



Dr. Robert Rehm
Photodetectors
☎ -353



Dr. Ralf Ostendorf
Semiconductor Lasers
and
Quantum Systems (acting)
☎ -638



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. Rüdiger Quay
Executive Director (acting)
☎ -411



Dr. Jutta Kühn
Division Director
Departments
☎ -842



Dr. Martin Walther
Division Director
Research Infrastructure
☎ -434



Dr. Tim Stadelmann
Epitaxy
☎ -385



Anne-Kathrin Hummel
Administration
☎ -414



Dr. Wolfgang Bronner
Technology
☎ -822



Andreas Wagner
Technical Services
☎ -428



Dr. Jutta Kühn
Microelectronics
☎ -842



Jörg Seibel
Information Technology
☎ -559



Dr. Marcel Rattunde
Optoelectronics
☎ -643



Dr. Harald D. Müller
Quality Management
☎ -458



Dr. Daniel Hähnel
Quantum Technology
☎ -291

Arbeiten am Fraunhofer IAF

Working@IAF

Ob Sie während des Studiums, zum Berufsbeginn 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 ambience
- Enge Kontakte zur Industrie und zu öffentlichen Auftraggebern
Close contacts with industry and public bodies
- Eigenverantwortliches Arbeiten und kreatives Mitgestalten
Independent work 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 environment, e.g. a parent-child office
- Wöchentliche Sportangebote zum Ausgleich und zur Fitness
Weekly sporting activities for work-life balance and fitness



Es ist sehr spannend, Quantentechnologien zur Anwendung zu bringen.«

“It is very exciting to bring quantum technologies to application.”



Niklas Mathes
wissenschaftlicher Mitarbeiter
in der Quantensensorik

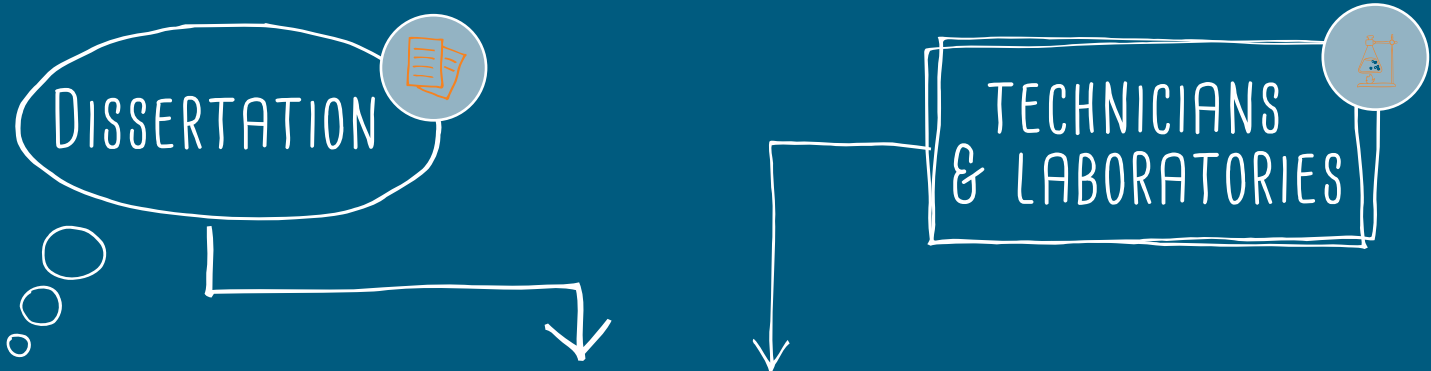


Am Fraunhofer IAF treffen anspruchsvolle Aufgaben auf eine kollegiale Arbeitsatmosphäre. Diese Mischung macht Spaß.«

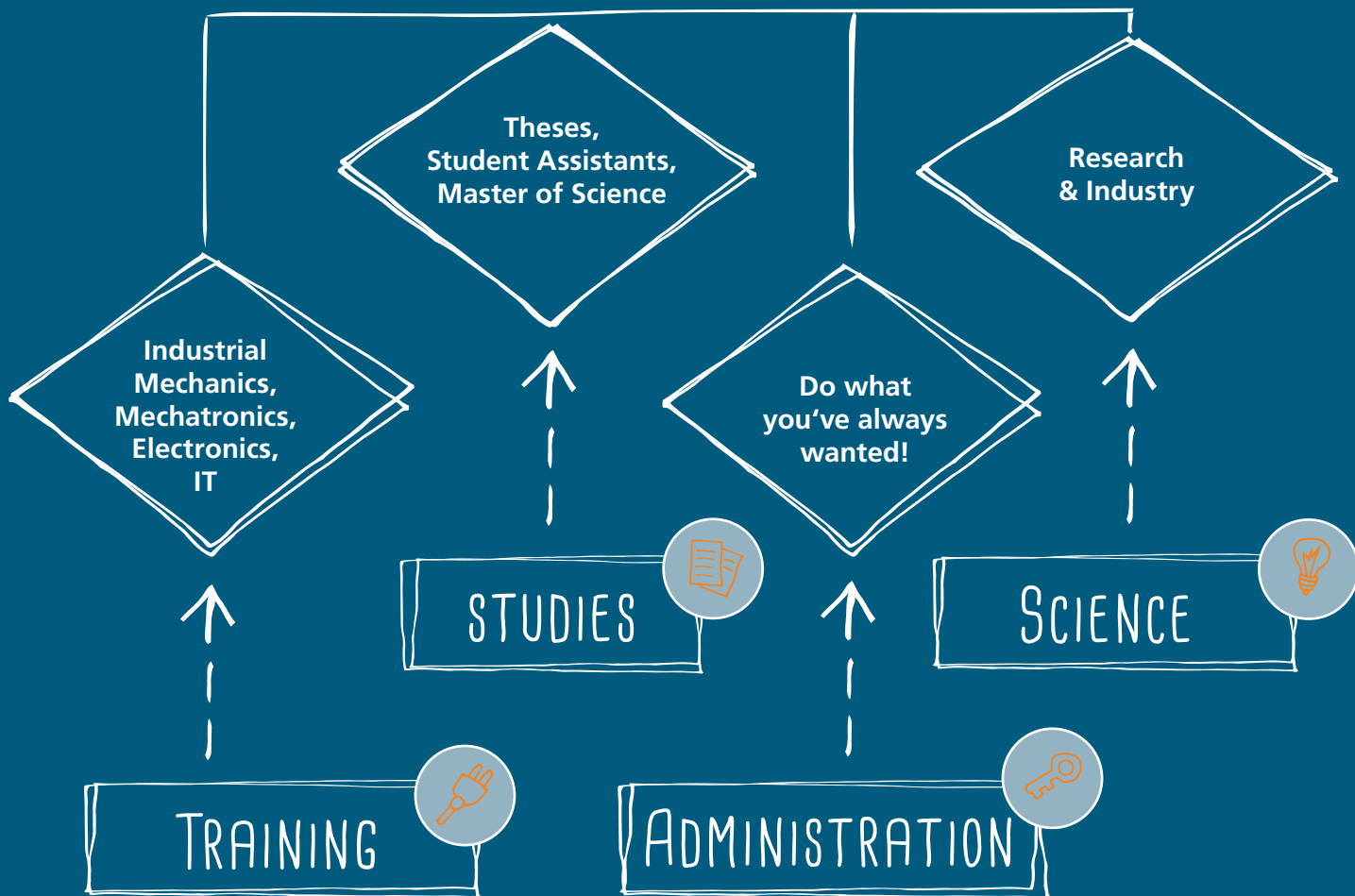
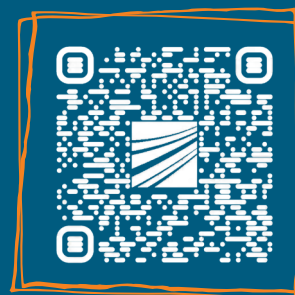
“At Fraunhofer IAF, challenging tasks meet a collegial working atmosphere. This mix is fun.”



Armin Müller
Mitarbeiter Marketing
und Kommunikation



WORKING @ IAF



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

Geschäftsführende Institutsleitung

Executive Director
Prof. Dr. Rüdiger Quay

Marketing & Kommunikation

Marketing & Communications

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

Redaktion

Editorial Board

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

Konzept, Layout, Satz, Druck

Design, layout, typesetting, printing

netsyn, Joachim Würger, Freiburg,
Fraunhofer Verlag – Mediendienstleistungen

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 2022

Bildnachweise

Picture credits

© Olexandr – www.stock.adobe.com | Fraunhofer IAF, title;
© BillionPhotos.com – stock.adobe.com, 4–5;
© whyframeshot – stock.adobe.com, 10–11;
© Nokia Bell Labs, 12;
© putilov_denis – stock.adobe.com, 14;
© metamorworks – stock.adobe.com, 17;
© Rohde & Schwarz, SIAE Microelettronica,
Vector Stiftung, 19 (top to bottom);
© New Africa – stock.adobe.com, 21;
© frog – stock.adobe.com | Fraunhofer IAF, 29;
© Studio Harmony – stock.adobe.com, 31;
© TESAT, 33 (left) /
© Victoria – Fotolia | Fraunhofer IAF, 36;
© DLR, Audi, 39 (top to bottom) ;
© j-mel – stock.adobe.com, 41;
© VTT Technical Research Centre of Finland, 45 (left);
© dimazel – stock.adobe.com | Holly Sullivan, MIT Lincoln
Laboratory | BlueCanyon Technologies, 47
© ipopba – stock.adobe.com, 48;
© RoKoRa, 50;
© IBM Research, 53;
© AIXTRON SE, 58;
© Ericsson, 59;
© Infineon Technologies, 60;
© JOANNEUM RESEARCH, 61;
© Radiometer Physics GmbH, 62;
© TNO, 63;
© Virginia Diodes, Inc., 64;
© X-FAB, 65;
© zephyr_p – stock.adobe.com, 82–83;
© Barbara Becker, MdL; Diehl Defence GmbH & Co. KG,
87 (top to bottom);
© opolja – stock.adobe.com | Viktor Cap – Fotolia |
Me studio – stock.adobe.com, 91 (top to bottom)

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

Newsletter



Wir informieren Sie über aktuelle Veranstaltungen,
neue Pressemitteilungen und neue Forschungsergebnisse.
We keep you up to date with current events, new press
releases and latest research results.

hier anmelden
subscribe here





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

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