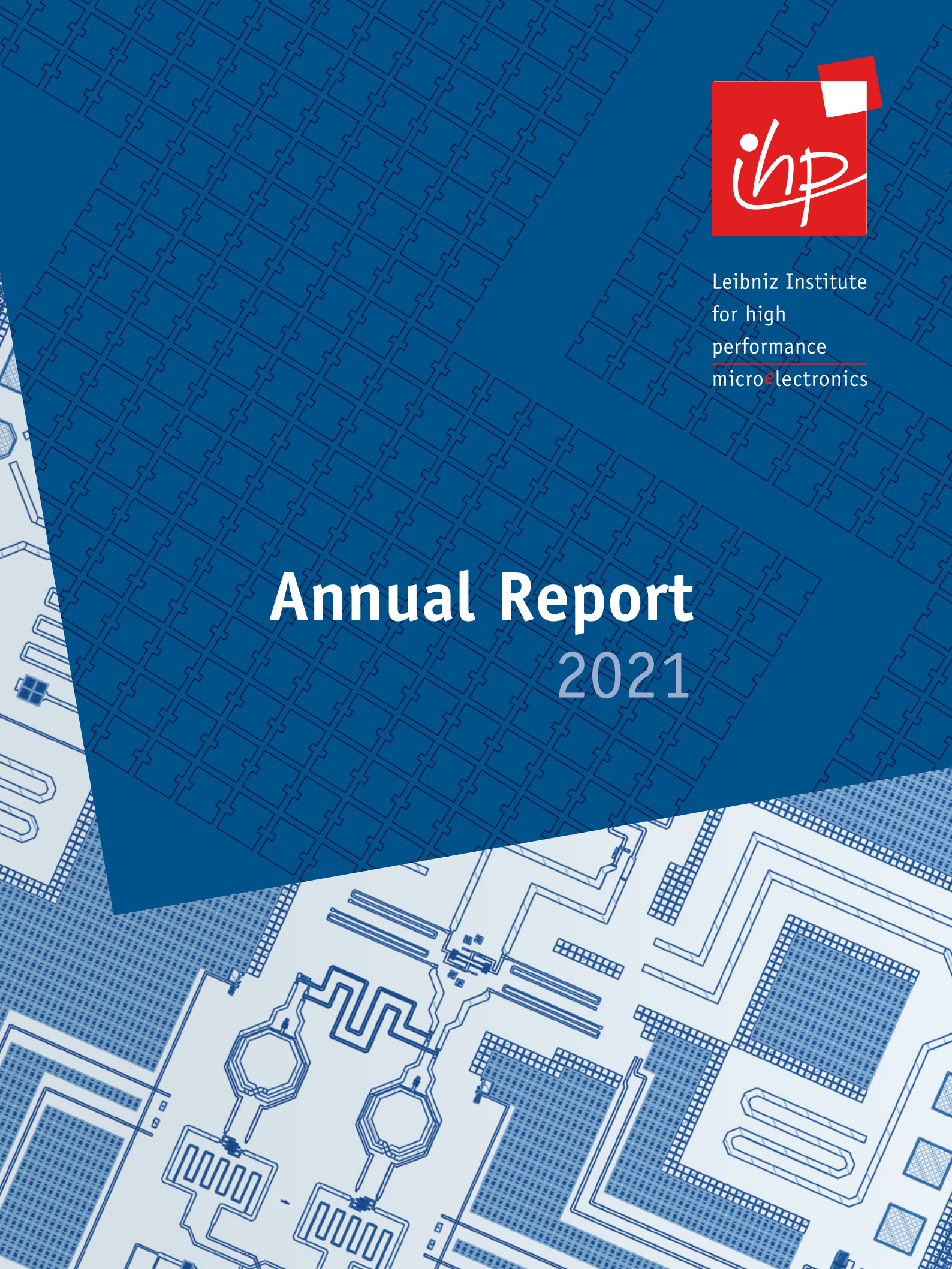




Leibniz Institute
for high
performance

microelectronics

Annual Report 2021





Annual Report
2021

Inhalte Contents

Vorwort	2
Foreword	
Organe und Gremien der IHP GmbH	4
Governing Body of IHP	
Das Jahr 2021	7
Update 2021	
Forschung des IHP	19
IHP's Research	
Ausgewählte Projekte	49
Selected Projects	
Gemeinsame Labore	81
Joint Labs	
Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland	93
Research Fab Microelectronics Germany	
Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus	97
Innovation Campus Electronics and Microsensor Technology Cottbus	
Angebote und Leistungen	101
Offers and Services	
Publikationen	113
Publications	
Wegbeschreibung zum IHP	132
Directions to IHP	
Impressum	133
Imprint	

Annual Report
2021

Vorwort Foreword



Prof. Dr. Gerhard Kahmen
Wiss.-Techn. Geschäftsführer

Nicolas Hübener
Adm. Geschäftsführer

Liebe Leserinnen und Leser, Freunde und Partner des IHP, dankbar schauen wir auf das Jahr 2021 als eines der erfolgreichsten in der Institutsgeschichte zurück.

Themen wie Vertrauenswürdigkeit von Telekommunikations- und IT-Netzen, Technologiehoheit für Deutschland und Europa aber auch die Chip-Krise haben die öffentliche Diskussion in 2021 geprägt und unterstreichen, dass die Mikroelektronik zu den zukünftigen Schlüsseltechnologien zählt.

Als eine der weltweit führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der siliziumbasierten Mikroelektronik und darauf basierenden Systemen trägt das IHP maßgeblich zur Innovationskraft und Souveränität auf dem Gebiet der Elektronik und Hochfrequenzsysteme in Deutschland und Europa bei. Mit unseren fünf aufeinander abgestimmten Forschungsprogrammen erforschen und entwickeln wir ganzheitliche Lösungen für gesellschaftlich relevante Aufgaben und zukünftige Herausforderungen.

Im März 2021 wurde am IHP die Reinraumerweiterung feierlich eingeweiht, die dank dem hohen Einsatz zahlreicher Personen am und außerhalb des IHP termingerecht fertiggestellt werden konnte. Die Erweiterung der Reinraumfläche um 500 m² ermöglicht es dem IHP einerseits den Anlagenpark bei laufendem Betrieb kontinuierlich auf modernstem Stand zu halten und andererseits in einer Exploratory Pilot Line Forschung an neuen, auch nicht CMOS-kompatiblen Materialien zu betreiben.

Mit 100 laufenden Projekten, darunter 38 Bund- und Land-Projekte, 25 EU-Projekte, 19 DFG-Projekte und 18 Projekte in direkter Kooperation mit der Industrie, wurde auch 2021 wieder eine hervorragende Drittmittelquote erreicht. Die ausgewogene Verteilung der Projekte veranschaulicht eindrucksvoll die große Bandbreite und Leistungsfähigkeit des IHP.

Die FMD (Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland), ein Verbund von 11 Instituten des Fraunhofer Verbundes Mikroelektronik und den beiden Leibniz-Instituten FBH und IHP, stellt für das Institut eine zunehmend wichtige und erfolgreiche Kooperation dar.

Dear readers, friends and partners of the IHP, we look back in gratitude on the year 2021 as one of the most successful in the history of the institute.

Topics like trustworthiness of telecommunication and IT networks, technology sovereignty for Germany and Europe but also the chip crisis have shaped the public discussion in 2021 and underline that microelectronics is one of the future key technologies.

As one of the world's leading research institutions in the field of silicon-based microelectronics and systems based on it, IHP contributes significantly to the innovative power and sovereignty in the field of electronics and high frequency systems in Germany and Europe. With our five coordinated research programs, we research and develop holistic solutions for socially relevant tasks and future challenges.

In March 2021, the clean room extension was ceremonially inaugurated at IHP, which was completed on schedule thanks to the great commitment of numerous people at IHP and outside the IHP. The extension of the clean room area by 500 m² enables IHP on the one hand to keep the equipment continuously up to date and on the other hand to conduct research on new, also non-CMOS compatible materials in an Exploratory Pilot Line.

With 100 ongoing projects, including 38 federal and state projects, 25 EU projects, 19 DFG projects and 18 projects in direct cooperation with industry, an excellent third-party funding ratio was achieved again in 2021. The balanced distribution of projects impressively illustrates the wide range and performance of IHP.

FMD (Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland), a network of 11 institutes of the Fraunhofer Group for Microelectronics and two Leibniz Institutes, FBH and IHP, represents an increasingly important and successful cooperation for the institute. The extensive FMD investment project was successfully completed at IHP with the commissioning and acceptance of the last systems at the end of 2021. At the same time, the continuation of the FMD office, in which IHP participates with a person directly

Das umfangreiche FMD-Investitionsprojekt wurde am IHP mit der Inbetrieb- und Abnahme der letzten Anlagen Ende 2021 erfolgreich abgeschlossen. Parallel wurde die Versteigerung der FMD-Geschäftsstelle, an der sich das IHP mit einer direkt dort verorteten Person beteiligt, über das Projektende hinaus sichergestellt. Die FMD kann somit national aber auch zunehmend auf europäischer Ebene ihre wichtige Rolle als Impulsgeber wahrnehmen und ausbauen.

Ende 2021 wurde die erste Phase des iCampus (Innovations-Campus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus) erfolgreich abgeschlossen. Der iCampus stellt eine weitere wichtige regionale Forschungs- und Vernetzungskooperation des IHP dar, mit dem die Transformation der Lausitz vorangetrieben wird. Die zweite Phase des iCampus startete nahtlos im Januar 2022 und wird die erfolgreiche Forschungskooperation bis mindestens 2027 fortsetzen.

Auch unsere Tochterfirma, die IHP Solutions GmbH, konnte 2021 wieder ein sehr erfolgreiches Geschäftsjahr aufweisen. Mit Dienstleistungen im Bereich MPW- (Multi Project Wafer) und Prototypenfertigung sowie IP-Transfer konnte die IHP Solutions Forschungsergebnisse des IHP gewinnbringend für Partner aus Wissenschaft und Industrie verfügbar machen.

Wie schon im Vorjahr war auch in 2021 die Arbeit des IHP in hohem Maße durch die COVID-19-Pandemie geprägt. Umso mehr freuen wir uns über die hervorragenden Leistungen und Ergebnisse des IHP im vergangenen Jahr, in dem das IHP seine wissenschaftlichen Leistungen und Drittmittelträge weiter ausbauen konnte.

Dieser Erfolg ist der Verdienst des hohen Engagements und der hervorragenden Arbeit unserer Mitarbeitenden, denen unser großer und herzlicher Dank gilt. An dieser Stelle bedanken wir uns ebenfalls bei unseren Förderern aus Bund und Land Brandenburg für ihre langjährige und vertrauensvolle Unterstützung sowie bei unseren Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Wir wünschen Ihnen eine interessante und spannende Lektüre in unserem Jahresbericht und freuen uns auf die Zusammenarbeit in 2022.

located there, was ensured beyond the end of the project. Thus, FMD can expand its important role as a driving force on a national but also increasingly on a European level.

At the end of 2021, the first phase of the iCampus (Innovation Campus Electronics and Microsensorics Cottbus) was successfully completed. The iCampus represents another important regional research and networking cooperation of IHP, with which the transformation of Lusatia is being advanced. The second phase of iCampus will start in January 2022 and will continue the successful research cooperation until at least 2027.

Our subsidiary, IHP Solutions GmbH, also had another very successful year 2021. With services in the field of MPW (Multi Project Wafer) and prototype manufacturing as well as IP transfer, IHP Solutions was able to make IHP's research results profitably available to partners from science and industry.

As in the previous year, IHP's work in 2021 was also largely characterized by the COVID-19 pandemic. We are therefore all the more pleased with the outstanding achievements and results of IHP in the past year, in which IHP was able to further expand its scientific achievements and third-party funding income.

This success is due to the high commitment and excellent work of our staff, to whom we owe our great and heartfelt thanks. We would also like to take this opportunity to thank our sponsors from the federal government and the state of Brandenburg for their long-standing and trusting support, as well as our partners from science and industry.

We wish you an interesting and exciting read in our annual report and look forward to working with you in 2022.



Prof. Dr. Gerhard Kahmen
Wiss.-Techn. Geschäftsführer



Nicolas Hübener
Adm. Geschäftsführer

Organe & Gremien der IHP GmbH

Governing Body of IHP

Aufsichtsrat Supervisory Board

Dr. Inge Schlotzhauer

Vorsitzende | Chair
Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur
Land Brandenburg
Ministry of Science, Research and Culture
State of Brandenburg

MinR Dr. Stefan Mengel

Stellv. Vorsitzender | Deputy Chair
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Federal Ministry of Education and Research

Antje Fischer

Ministerium der Finanzen und für Europa
Land Brandenburg
Ministry of Finance and for Europe
State of Brandenburg

Dr. Gunter Fischer

IHP GmbH, Frankfurt (Oder)
IHP GmbH, Frankfurt (Oder)

Dr. Roland Sorge

IHP GmbH, Frankfurt (Oder)
IHP GmbH, Frankfurt (Oder)

Dr. Walter Riess

IBM Research Zürich, Schweiz
IBM Research Zurich, Switzerland

Dr. Fiona Williams

Ericsson Eurolab Deutschland GmbH, Herzogenrath
Ericsson Eurolab Deutschland GmbH, Herzogenrath

Prof. Dr. Robert Weigel

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg

Prof. Dr. Gesine Grande

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg

Wissenschaftlicher Beirat Scientific Advisory Board

Prof. Dr. Hans D. Schotten

Vorsitzender | Chair
Technische Universität Kaiserslautern
Technical University of Kaiserslautern

Prof. Dr. Christian Schäffer

Stellv. Vorsitzender | Deputy Chair
Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
Helmut Schmidt University, Hamburg

Prof. Dr. Amelie Hagelauer

Fraunhofer EMFT, München
Fraunhofer EMFT, Munich

Prof. Dr. Thomas Mikolajick

NaMLab gGmbH, Dresden
NaMLab gGmbH, Dresden

Dr. Kirsten E. Moselund

IBM Research Zürich, Schweiz
IBM Research Zürich, Switzerland

Dr. Klaus Pressel

Infineon Technologies AG, Regensburg
Infineon Technologies AG, Regensburg

Dr. Michael Schlechtweg

Fraunhofer-Institut IAF, Freiburg
Fraunhofer Institute IAF, Freiburg

Prof. Dr. Ulla Wollenberger

Universität Potsdam
University of Potsdam

Prof. Dr. Friedel Gerfers

Technische Universität Berlin
Technical University of Berlin

Geschäftsführer Managing Directors

Prof. Dr. Gerhard Kahmen

Wiss.-Techn. Geschäftsführer
Scientific Director

Manfred Stöcker bis 31.03.2021

Nicolas Hübener ab 01.06.2021

Adm. Geschäftsführer
Administrative Director

Mission des IHP

Mission of IHP

Das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) ist eine vom Bund und Land institutionell geförderte, außeruniversitäre Forschungseinrichtung und Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft.

IHP is a non-university research establishment institutionally funded by the German federal and state governments and a member of the Leibniz Association.

Satzungsgemäßer Zweck des IHP ist die Erforschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Mikroelektronik und der Informationstechnologie, insbesondere die Förderung von siliziumbasierten Hochtechnologien zur Stärkung der mikroelektronischen Forschung und Industrie in Deutschland und Europa. Das IHP soll dazu beitragen, das Zusammenwirken von wissenschaftlicher Grundlagenforschung, Technologien und Anwendungen zu stärken und eine enge Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Einrichtungen und mit Wirtschaftsunternehmen zu erreichen. Das Institut entwickelt Technologien für Wissenschaft und Industrie, durch deren Anwendung Alleinstellungsmerkmale erreicht werden, die in einem globalen Wettbewerb bestehen können.

Das Spektrum der Forschungsarbeiten reicht von innovativen Materialien bis zu komplexen Systemen, z. B. für die Kommunikation, was ein Alleinstellungsmerkmal in der Forschungslandschaft darstellt. Das IHP deckt die gesamte F&E-Wertschöpfungskette, von Grundlagenforschung bis zur Herstellung von Prototypen und Kleinserien, ab. Die Basis für diese Leistungsfähigkeit des IHP beruht auf der institutseigenen, durchgehend (24/7) betriebenen Pilotlinie mit ihren qualifizierten 0,25/0,13- μm -SiGe-BiCMOS-Technologien.

Die Arbeiten des Instituts konzentrieren sich auf siliziumbasierte Systeme, Hochfrequenzschaltungen und -technologien sowie neue Materialien. Durch die enge Verzahnung seiner vertikal aufeinander aufbauenden Forschungsprogramme Materials for Micro- and Nanoelectronics, Technologies for Smart Systems, Radio Frequency Circuits, Communication- and embedded System Architectures und Wireless Systems and Applications liefert das Institut wesentliche Beiträge und Impulse zu den gegenwärtigen und zukünftigen gesellschaftlichen Aufgabenstellungen wie Kommunikation, Life Science, Mobilität, Bioökonomie, Smart X, Sicherheit und Industrie 4.0.

Die Sicherung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses ist eine zentrale Voraussetzung für den zukünftigen Erfolg hochtechnologischer Gesellschaften. Das IHP sieht sich in der Verpflichtung auf allen Bildungsebenen, angefangen in der Nachwuchsförderung, bspw. durch Kooperationen mit regionalen Schulen, über die duale Berufsausbildung, durch Hochschullehre, Praktika und Betreuung von Abschlussarbeiten, über die Betreuung von Dissertationen bis zur Post-Doc-Phase den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs auszubilden und zu begleiten.

Das IHP nimmt mit seinen wissenschaftlich-technischen Kompetenzen und als Arbeitgeber eine wichtige Rolle zur Stärkung der Region und zur Unterstützung des regionalen Transformationsprozesses, der sich aus der Energiewende ergibt, wahr.

The statutory purpose of IHP is research and development in the field of microelectronics and information technology, in particular the promotion of silicon-based high technologies to strengthen microelectronic research and industry in Germany and Europe. IHP shall contribute to strengthen the interaction of basic scientific research, technologies and applications and to achieve a close cooperation with scientific institutions and with commercial enterprises. The institute develops technologies for science and industry, through the application of which unique selling propositions can be achieved that can stand up to global competition.

The spectrum of research work ranges from innovative materials to complex systems, e.g. for communication, which is a unique selling point in the research landscape. IHP covers the entire R&D value chain, from basic research to the production of prototypes and small series. The basis for this performance of IHP is based on the institute's own continuously (24/7) operated pilot line with its qualified 0.25/0.13 μm SiGe BiCMOS technologies.

The institute's work focuses on silicon-based systems, high-frequency circuits and technologies and new materials. Through the close integration of its vertically interrelated research programs Materials for Micro- and Nanoelectronics, Technologies for Smart Systems, Radio Frequency Circuits, Communication- and embedded System Architectures and Wireless Systems and Applications, the institute provides essential contributions and impulses to current and future societal tasks such as communication, life science, mobility, bioeconomy, Smart X, security and Industry 4.0.

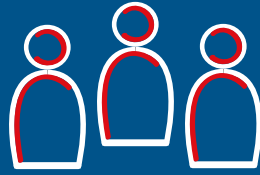
Securing the next generation of scientists and engineers is a central prerequisite for the future success of highly technological societies. IHP is committed to educating and supporting young scientists and engineers at all levels of education, starting with the promotion of young scientists, e.g. through cooperation with regional schools, through dual vocational training, through university teaching, internships and supervision of final theses, through the supervision of dissertations up to the post-doctoral phase.

With its scientific-technical competencies and as an employer, IHP plays an important role in strengthening the region and supporting the regional transformation process resulting from the energy turnaround.

Fakten und Zahlen

Facts and Figures

Mitarbeitende Employees



365

- davon **172** Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler
- davon **19** Auszubildende
- davon **34** Studierende
- **172** of them are scientists
- **19** of them are trainees
- **34** of them are students

Publikationen Publications



260

- davon **114** Journalartikel
- including **114** journal articles

Patente Patents

12



Förderung Funding



- Institutionelle Förderung: 32 Millionen Euro
- Drittmittelerträge (ohne FMD):
 - EU-Förderung: 2,8 Millionen Euro
 - Förderung Bund: 4,8 Millionen Euro
 - Förderung Land Brandenburg: 1,5 Millionen Euro
 - DFG-Förderung: 1,5 Millionen Euro
 - Wirtschaft und Technologietransfer: 11 Millionen Euro
- Institutional funding: 32 million euros
- Third-party funding (without FMD):
 - EU funding: 2.8 million euros
 - Federal funding: 4.8 million euros
 - Funding from the state of Brandenburg: 1.5 million euros
 - DFG funding: 1.5 million euros
 - Industry and technology transfer: 11 million euros

Projekte Projects

100



davon:

- DFG-Projekte: **19**
- EU-Projekte: **25**
- Bund- & Land-Projekte: **38**

thereof:

- DFG projects: **19**
- EU projects: **25**
- Federal & State projects: **38**



Das Jahr 2021
Update 2021

Inbetriebnahme der Reinraumerweiterung

Commissioning of the Clean Room Extension



Die Festreden zur feierlichen Eröffnung des Reinraumerweiterungsbaus erfolgten online: Herr Prof. Dr. Albert Sickmann, wissenschaftlicher Direktor des Leibniz-Instituts ISAS und Sprecher der Sektion D der Leibniz-Gemeinschaft; Herr René Wilke, Oberbürgermeister der Stadt Frankfurt (Oder); Herr Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas, Staatssekretär des Bundesministeriums für Bildung und Forschung; Frau Dr. Manja Schüle, brandenburgische Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kultur; Herr Dipl.-Ing. Marcus Fissan, Partner bei Henn Architekten sowie Prof. Dr. Christoph Kutter, Direktor Fraunhofer EMFT (von links unten nach rechts unten). Prof. Dr. Gerhard Kahmen startete per Knopfdruck symbolisch den Betrieb in der Reinraumerweiterung.

The speeches at the ceremonial opening of the cleanroom extension were made online: Prof. Dr. Albert Sickmann, Scientific Director of the Leibniz Institute ISAS and spokesman of Section D of the Leibniz Association; Mr. René Wilke, Lord Mayor of the City of Frankfurt (Oder); Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas, State Secretary of the Federal Ministry of Education and Research; Dr. Manja Schüle, Brandenburg Minister for Science, Research and Culture; Mr. Dipl.-Ing. Marcus Fissan, partner at Henn Architekten; and Prof. Dr. Christoph Kutter, Director Fraunhofer EMFT (from bottom left to bottom right). Prof. Dr. Gerhard Kahmen symbolically started the operation of the clean room extension by pressing the red button.

Als Investition in die Zukunft und wichtigen Beitrag für die Mikroelektronik in Deutschland konnte im März 2021 am IHP eine 500 Quadratmeter große Reinraumerweiterung eröffnet werden. Der komplexe Bau war innerhalb von zweieinhalb Jahren bei Aufrechterhaltung des laufenden Betriebes realisiert worden. Die Inbetriebnahme ermöglicht es dem IHP, auch zukünftig technologische Maßstäbe zu setzen.

Die feierliche Inbetriebnahme beging das IHP in einer hybriden Veranstaltung gemeinsam mit zahlreichen Gästen und Vertretern aus Politik, Wissenschaft und Forschung. Grußworte zur Fertigstellung des Projektes sprachen Frau Dr. Manja Schüle, die brandenburgische Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kultur, Herr Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas, Staatssekretär des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Herr Prof. Dr. Albert Sickmann, wissenschaftlicher Direktor des Leibniz-Instituts ISAS und Sprecher der Sektion D der Leibniz-Gemeinschaft, Herr Dipl.-Ing. Marcus Fissan, Partner bei Henn Architekten, der Oberbürgermeister der Stadt Frankfurt (Oder), Herr René Wilke sowie Prof. Dr. Christoph Kutter, Direktor Fraunhofer EMFT.

Die Ministerin Frau Dr. Manja Schüle hob hervor: „Zum Glück gibt es das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik im Land Brandenburg. Hier werden die Grundlagen für unsere Zukunft gelegt: Am IHP werden smarte Systeme, intelligente Technologien und neue

As an investment in the future and an important contribution to microelectronics in Germany, a 500 square metre clean room extension was opened at the IHP in March 2021. The complex construction was realised within two and a half years while maintaining ongoing operations. The commissioning enables IHP to continue setting technological standards in the future.

IHP celebrated the ceremonial commissioning in a hybrid event together with numerous guests and representatives from politics, science and research. Dr Manja Schüle, the Brandenburg Minister for Science, Research and Culture, Prof. Dr Wolf-Dieter Lukas, State Secretary of the Federal Ministry of Education and Research, Prof. Dr Albert Sickmann, Scientific Director of the Leibniz Institute ISAS and spokesman of Section D of the Leibniz Association, Dipl.-Ing. Marcus Fissan, partner at Henn Architekten, the Lord Mayor of the City of Frankfurt (Oder), Mr René Wilke and Prof. Dr. Christoph Kutter, Director Fraunhofer EMFT, spoke words of welcome to mark the completion of the project.

Minister Dr Manja Schüle emphasised: "Fortunately, the Leibniz Institute for High Performance Microelectronics exists in the state of Brandenburg. The foundations for our future are being laid here: Smart systems, intelligent technologies and new materials for

Materialien für Mikro- und Nanotechnologien erforscht – für die Energiewende ebenso wie für innovative Verkehrskonzepte und intelligente Medizinprävention. Deswegen haben wir, zusammen mit dem Bund und der EU, gerne 15 Millionen Euro in die Reinraumerweiterung investiert. Damit schaffen wir Platz für neue Ideen. Denn: Das IHP steht für Zukunft 'Made in Brandenburg'."

Der nun insgesamt 1.500 m² große Reinraum ermöglicht es dem IHP einerseits Partnern aus Wissenschaft und Forschung eine stabile BiCMOS-Technologieplattform zur Verfügung zu stellen und schafft gleichzeitig die Möglichkeit, neue, u. a. nicht CMOS-kompatible Materialien, zu erforschen. Neue Anlagen, die im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland angeschafft wurden, bilden die Basis für die Exploratory Pilotlinie im neuen Teil des Reinraums und sollen zukünftig das Arbeiten mit neuen, hochleistungsfähigen Kontaktmaterialien ermöglichen. Darüber hinaus wird der zusätzlich gewonnene Raum auch für eine kontinuierliche Modernisierung der 24/7-betriebenen, hochmodernen Pilotlinie zur Fertigung zukunftssträchtiger Chip-Prototypen genutzt.

micro- and nanotechnologies are being researched at IHP - for energy transformation as well as for innovative transport concepts and intelligent medical prevention. That's why we, together with the federal government and the EU, were happy to invest 15 million euros in the clean room extension. In doing so, we are creating space for new ideas. Because: IHP stands for the future 'Made in Brandenburg'."

The clean room, which now has a total area of 1,500 m², enables IHP to provide partners from science and research with a stable BiCMOS technology platform on the one hand, and at the same time creates the opportunity to research new, among others non-CMOS compatible materials. New facilities acquired as parts of the Research Fab Microelectronics Germany, lay the foundation for the Exploratory Pilot Line in the new part of the clean room and will enable work with new, high-performance contact materials in the future. Furthermore, the additional space gained will also be used for continuous modernisation of the 24/7 operated, state-of-the-art pilot line for the production of promising chip prototypes.

Weltrekord für ultraschnelle Germanium-Fotodioden

World Record for Ultra-fast Germanium Photodiodes

Einen neuen Geschwindigkeitsweltrekord stellte 2021 die am IHP entwickelte, wellenleiter-gekoppelte Germanium-Fotodiode auf. Der Durchbruch gelang durch ein spezielles Design, in dem eine ultradünne Germanium-Lamelle als Teil einer Fotodiode auf einem Silizium-Wellenleiter integriert wurde. Die optoelektronische Bandbreite der Germanium-Fotodiode konnte im Vergleich zum bisherigen IHP-Rekord von 2020 ohne Beeinträchtigung wichtiger Parameter, wie Effizienz und Dunkelstrom, mehr als verdoppelt werden. Die Ergebnisse der Spitzenforschung wurden in der renommierten Fachzeitschrift Nature Photonics veröffentlicht, die eine Illustration der Fotodiode für ihr Cover der Dezember-Ausgabe wählte und damit den Stellenwert dieses Forschungsergebnisses betonte.

A new world speed record was set in 2021 by the waveguide-coupled germanium photodiode developed at IHP. The breakthrough was achieved through a special design in which an ultra-thin germanium lamella was integrated as part of a photodiode on a silicon waveguide. The opto-electronic bandwidth of the germanium photodiode was more than doubled compared to the previous IHP record of 2020 without compromising important parameters such as efficiency and dark current. The results of the cutting-edge research were published in the renowned journal Nature Photonics, which chose an illustration of the photodiode for the cover of the December issue, thus emphasising the significance of this research result.



Das Cover der Dezember-Ausgabe der Zeitschrift "Nature Photonics" zeigte eine Illustration der am IHP entwickelten Germanium-Fotodiode. The cover of the December issue of the journal Nature Photonics featured an illustration of the germanium photodiode developed at IHP.

Digitaler Zukunftstag

Digital Future Day



Aus dem Vortragsraum des IHP wurde der Zukunftstag 2021 übertragen. Vor der Kamera sprachen Kolleginnen und Kollegen über ihre Arbeit. Ein professionelles Kamerateam sorgte für den reibungslosen Ablauf.

The Future Day 2021 was broadcast from the IHP lecture room. Colleagues spoke about their work in front of the camera. A professional camera team ensured that everything ran smoothly.

Ein Materialpaket per Post, professionelle Videoübertragung sowie Gesprächsrunden und Experimente per Live-Übertragung – der Zukunftstag für Mädchen und Jungen in Brandenburg wurde am IHP 2021 digital umgesetzt. 20 Schülerinnen und Schüler folgten der Einladung und informierten sich über naturwissenschaftliche Berufe und weitere Möglichkeiten am IHP. Bei der Entwicklung des aufwendigen Konzeptes erhielt das IHP Unterstützung vom Förderforum Frankfurt e. V.. Über die Plattform Zoom realisierte ein professionelles Videoteam den dreistündigen Live-Stream.

Seit mehreren Jahren engagiert sich das IHP aktiv im Bereich der Nachwuchsförderung, der Zukunftstag ist dabei eine der aufwendigsten Aktionen. Das erstmals getestete, digitale Konzept wird künftig weiterentwickelt und wiederholt. Es bietet die Möglichkeit, Interessierte in einem größeren Radius zu erreichen.

A material package by post, professional video streaming as well as discussion rounds and experiments via live broadcast - the Future Day 2021 for girls and boys in Brandenburg was conducted digitally at the IHP. 20 pupils accepted the invitation and found out about scientific professions and other opportunities at IHP. IHP received support from Förderforum Frankfurt e. V. in developing the sophisticated concept. A professional video team realised the 3-hour live stream via the platform Zoom.

For several years, IHP has been actively involved in promoting young talent, with the Future Day being one of the most elaborate campaigns. The digital concept, which was tested for the first time, will be further developed and repeated in the future. It offers the possibility to reach interested people in a larger radius.

Relaunch für IHP-Internetseite

Relaunch of the IHP Website

Modern, professionell und übersichtlich präsentiert sich das IHP auf seiner neuen Internetseite. Ein groß angelegter Relaunch konnte mit der Freischaltung der Seite im Mai 2021 abgeschlossen werden. Neue Bilder und Elemente sowie eine überarbeitete Menüführung zeichnen den Internetauftritt aus. Interessierte finden alle Informationen rund um das Institut, seine Forschungsprogramme und Serviceleistungen, zu Karrieremöglichkeiten und aktuellen Pressethemen. Die Mediathek ist eine sinnvolle Ergänzung zu den öffentlichkeitswirksamen Printprodukten. Die Überarbeitung der gesamten Internetseite sorgt für eine gelungene Darstellung des IHPs für alle Zielgruppen: Kooperationspartnerinnen und -partner, Kundinnen und Kunden, Bewerberinnen und Bewerber, Politikerinnen und Politiker, Schülerinnen und Schüler und alle Interessierten.

The IHP's new website is modern, professional and clearly structured. A large-scale relaunch was completed with the release of the site in May 2021. Appealing images, a revised menu navigation and responsive elements characterise the website. Interested parties can find all information about the Institute, its research programmes and services as well as career opportunities and current press topics. The media library is a valuable addition to the printed products, which have a high impact on the public. The revision of the entire website ensures a successful presentation of the IHP for all target groups: Cooperation partners, clients, applicants, politicians, pupils and other interested parties.

Leading for Equality

Leading for Equality

Es ist erklärtes Ziel des IHP, seine Mitarbeitenden chancengerecht zu fördern und die Potentiale aller Mitarbeitenden zur Geltung zu bringen. Darum wurde ein breiter, partizipativer Prozess mit dem Arbeitstitel „Leading for Equality“ aufgesetzt, um alle Führungskräfte für Gleichstellung und chancengerechtes Führen zu sensibilisieren. Gleichzeitig sollte dem Thema deutlich Sichtbarkeit gegeben werden. Insgesamt 40 Personen, darunter die Geschäftsführung, die Leitungen der wissenschaftlichen Abteilungen und Forschungsgruppen, das technische und administrative Führungspersonal, die Gleichstellungsbeauftragte und ihre Stellvertreterinnen, der Schwerbehindertenvertreter, der Vorsitzende des Betriebsrates, ein Mitglied des Wissenschaftlich-Technischen Rats und der Qualitätsmanagementbeauftragte, nahmen am Prozess teil und befassten sich in mehreren Workshops im Zeitraum von Herbst 2020 bis Frühsommer 2021 mit den theoretischen Grundlagen von Gleichstellung sowie mit Instrumenten chancengerechten Führens. Sie erarbeiteten in einer Gruppenarbeitsphase passgenaue Gleichstellungsmaßnahmen für das IHP, stets in Zusammenarbeit mit zwei externen Expertinnen. Die so erarbeiteten Maßnahmenvorschläge fanden Eingang in den Gleichstellungsplan, zusammen mit bereits etablierten und bewährten Standards. Der im partizipativen Prozess gemeinsam erarbeitete Gleichstellungsplan, hinter dem alle Schlüsselpersonen des Instituts stehen, enthält Maßnahmen, die in Zukunft mit Überzeugung umgesetzt werden.

It is the declared goal of IHP to promote its employees in an equal opportunity manner and to bring out the potential of all employees. Therefore, a broad participatory process with the working title "Leading for Equality" was set up in order to sensitise all managers to gender equality and opportunity-oriented leadership. At the same time, the topic was to be given clear visibility. A total of 40 people, including the management, the heads of the scientific departments and research groups, the technical and administrative management staff, the Equal Opportunities Officer and her deputies, the representative of the severely disabled, the chairperson of the works council, a member of the Scientific and Technical Council and the Quality Management Officer, took part in the process and dealt with the theoretical foundations of equality as well as instruments of equal-opportunity leadership in several workshops in the period from autumn 2020 to early summer 2021. In a group work phase, they developed customised gender equality measures for IHP, always with the advice of two external experts. The proposals for measures developed in this way found their way into the gender equality plan, together with already established and proven standards. The gender equality plan, which was jointly developed in the participatory process and behind which all key staff members of the Institute stand, contains measures that will be implemented with commitment in the future.

Leibniz-Gründungspreis für IHP-Ausgründung HyPhoX

Leibniz Start-up Prize for IHP Spin-off HyPhoX

Ein universales Analysegerät für Flüssigkeiten, basierend auf einem photonischen Sensor, ist Kern der geplanten Ausgründung HyPhoX. Für ihr Gründungsvorhaben erhielten die Wissenschaftler Dr. Patrick Steglich und Prof. Dr. Andreas Mai den Leibniz-Gründungspreis 2021, verbunden mit einem Preisgeld in Höhe von 25.000 Euro.

HyPhoX ermöglicht die Analyse von Flüssigkeiten wie Wasser, Urin oder Blut zum Nachweis von Viren, Bakterien, Giftstoffen oder Proteinen. Mithilfe des photonischen Sensors können die Analyseergebnisse vor Ort und in Echtzeit ausgewertet werden. Konkrete Einsatzbereiche finden sich in der Medizin, um beispielsweise mittels eines Antikörpertests Covid-19 nachzuweisen oder in der Hygieneüberwachung, um Legionellen bei der Wasseranalyse zu entdecken.

Dem Verfahren zugrunde liegen Sensor-Chips mit einer siliziumbasierten und industriell nutzbaren Halbleitertechnologie, die eine kostengünstige Massenproduktion erlauben. Das patentierte Verfahren, bei dem Herstellungsprozesse aus der Mikroelektronik genutzt werden, ermöglicht eine einfache und kostengünstige Weiterverarbeitung zu fertigen Produkten und bietet neben den ökonomischen Vorteilen auch eine hohe Zuverlässigkeit und Integrierbarkeit in bestehende Systeme.

A universal analysis tool for liquids, based on a photonic sensor, is the core of the planned spin-off HyPhoX. For their start-up project, the scientists Dr Patrick Steglich and Prof. Dr Andreas Mai received the Leibniz Start-up Prize 2021, together with prize money of 25,000 euros.

HyPhoX enables the analysis of liquids such as water, urine or blood to detect viruses, bacteria, toxins or proteins. With the help of the photonic sensor, the analysis results can be evaluated on site and in real time. Concrete areas of application can be found in medicine, for example to detect Covid-19 by means of an antibody test, or in hygiene monitoring to detect Legionella in water analysis.

The process is based on sensor chips with a silicon-based and industrially usable semiconductor technology that allows for cost-effective mass production. The patented process, which uses manufacturing processes from microelectronics, enables simple and cost-effective further processing into finished products and, in addition to the economic advantages, also offers high reliability and integrability into existing systems.

Wolfgang-Mehr-Fellowship 2020 und 2021

Wolfgang Mehr Fellowship 2020 and 2021

Auf internationaler Ebene würdigt das IHP Spitzenforschung seit 2016 mit dem Wolfgang-Mehr-Fellowship-Award. Ausgezeichnet werden Forschungsarbeiten mit stark interdisziplinärem Fokus in den IHP-Forschungsbereichen. Pandemiebedingt wurde im April 2021 die Auszeichnung des Preisträgers aus dem Jahr 2020 nachgeholt. Prof. Gadi Eisenstein vom Israel Institute of Technology (Technion) erhielt den Preis für seine Forschung im Bereich der Halbleiterphotonik, insbesondere von Lasern und Verstärkern, die auf Quantenpunkten basieren. Im Dezember 2021 erhielt Prof. Dr. José Camacho Páez von der Universität Granada für seine Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz und dem Internet der Dinge, insbesondere im Bereich E-Health, den Preis. Die Auszeichnung ermöglicht es, in enger Kooperation mit den Kolleginnen und Kollegen des IHP zu forschen und ist verknüpft mit einem oder mehreren Aufenthalten zum gegenseitigen Austausch am IHP.

On an international level, the IHP honours top research with the Wolfgang Mehr Fellowship Award since 2016. The award is given for research work with a strong interdisciplinary focus in IHP's research areas. Due to the pandemic, the award of the winner from 2020 was made up for in April 2021. Prof. Gadi Eisenstein from the Israel Institute of Technology (Technion) received the award for his research in the field of semiconductor photonics, in particular lasers and amplifiers based on quantum dots. In December 2021, Prof. Dr. José Camacho Páez from the University of Granada received the award for his research in the field of Artificial Intelligence and the Internet of Things, particularly in the field of e-health. The fellowship enables research to be carried out in close cooperation with colleagues at the IHP and is linked to one or more stays for mutual exchange at the IHP.



Prof. Dr. Gerhard Kahmen (links) und Prof. Dr. Peter Langendörfer (rechts) gratulierten dem Gewinner des Wolfgang-Mehr-Fellowship-Awards 2021: Prof. Dr. José Camacho Páez von der Universität Granada.
Prof. Dr. Gerhard Kahmen (left) and Prof. Dr. Peter Langendörfer (right) congratulated the winner of the Wolfgang Mehr Fellowship Award 2021: Prof. Dr. José Camacho Páez from the University of Granada.

Spitzenforschung im Bereich des 6G-Datennetzes

Cutting-edge Research in the Field of the 6G Data Network

Dem IHP ist es gelungen, als Forschungspartner in gleich zwei der insgesamt vier großen, bundesweiten Hubs zur Erforschung der Zukunftstechnologie 6G involviert zu sein. Im Rahmen des 6GRIC-Projekts leitet das IHP auch ein Arbeitspaket. Im Rahmen der europäischen 5GPPP-Initiative hatte das IHP signifikant zur Entwicklung und Definition der Architektur und Standards von 5G beigetragen. Diese exzellente Arbeit ist nun Grundlage für die 6. Generation Mobilfunk (6G).

Die vom BMBF auf den Weg gebrachte 6G-Initiative zur Erforschung innovativer Kommunikationstechnologien wird über die nächsten fünf Jahre mit insgesamt 700 Millionen Euro gefördert, rund 250 Millionen Euro sind für die vier Hubs vorgesehen. Die 6G-Hubs basieren auf der wissenschaftlichen Exzellenz herausragender Forschungsinstitute sowie Hochschulen und zielen darauf ab, die nationalen Forschungsaktivitäten zu verbinden, um die technologischen Grundlagen für zukünftige Mobilfunkgenerationen zu legen. Im Mittelpunkt stehen die Technologien und Schlüsselkomponenten, die in Deutschland und Europa erfunden und gefertigt werden. Expertinnen und Experten aller Technologieebenen werden sich bei der Anwendung neuer Materialien, der Entwicklung von Komponenten, wie etwa Antennen und Verstärker sowie von vollständigen Modulen, Netzwerksteuerung und der Software für 6G-Komponenten einbringen. Dadurch sollen die hervorragenden Expertisen zur drahtlosen Übertragung und der glasfaserbasierten, leitungsgebundenen Systeme gebündelt werden.

Die digitale Souveränität von drahtlosen Kommunikationstechnologien ist entscheidend, um Datensicherheit zu gewährleisten und Weltmarktchancen in der Digitalisierung verschiedener Branchen zu eröffnen. Die 6G-Technologie wird die Höchstleistungsdatentechnologie der Zukunft sein und die Kommunikation im nächsten Jahrzehnt noch einmal revolutionieren. Datenübertragungen, 100 Mal schneller als mit 5G bei gleichzeitig höherer Energieeffizienz und Ausfallsicherheit, sind das Ziel.

IHP has succeeded in being involved as a research partner in two of the four large, nationwide hubs for research into the future technology 6G. In the 6GRIC project, IHP also leads one work package. As part of the European 5GPPP initiative, IHP contributed significantly to the development and definition of the 5G architecture and standards. This excellent work is now the basis for 6th generation mobile communications (6G).

The 6G initiative launched by the BMBF for research into innovative communication technologies will be funded with a total of 700 million euros over the next five years, with around 250 million euros earmarked for the four hubs. The 6G Hubs are based on the scientific excellence of outstanding research institutes as well as universities and aim to link national research activities to lay the technological foundations for future generations of mobile communications. The focus is on technologies and key components that are invented and manufactured in Germany and Europe. Experts from all technology levels will contribute to the application of new materials, the development of components such as antennas and amplifiers as well as complete modules, network control and the software for 6G components. This will bring together the outstanding expertise on wireless transmission and optical systems.

The digital sovereignty of wireless communication technologies is crucial to ensure data security and open up world market opportunities in the digitalisation of various industries. 6G technology will be the high-performance data technology of the future and will revolutionise communications once again in the next decade. Data transmissions 100 times faster than with 5G with simultaneously higher energy efficiency and reliability are the goal.

In Kontakt bleiben: IHP gründet Alumni-Netzwerk

Staying in Touch: IHP Finds Alumni Network

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind die wichtigste Ressource in einem Unternehmen. Aus verschiedensten Gründen entscheiden sich Menschen, neue Wege zu gehen und verlassen ihre bisherige Wirkungsstätte. Das IHP sieht in diesen Personen großes Potential und möchte daher langfristig mit Ehemaligen in Kontakt bleiben. Im Dezember 2021 wurde aus diesem Grund ein Alumni-Netzwerk gegründet. Das IHP nutzt diese Kontakte, um auf eigene Forschungsthemen, Veranstaltungen und Stellenausschreibungen aufmerksam zu machen.

Innerhalb des Netzwerkes steht zudem der Austausch von aktiven und ehemaligen Mitarbeitenden im Vordergrund. Das Wissen und die Erfahrung, die Alumni zunächst am IHP und nach dem Ausscheiden dann häufig über viele Jahre in sehr unterschiedlichen Berufsfeldern sammeln, können beispielsweise für gemeinsame Projekte und Kooperationen genutzt werden.

Employees are the most important resource in a company. For a variety of reasons, people decide to go new ways and leave their previous workplace. IHP sees great potential in these people and would therefore like to stay in contact with alumni in the long term. For this reason, an alumni network was founded in December 2021. The IHP uses these contacts to draw attention to its own research topics, events and job advertisements.

Within the network, the focus is also on the exchange of active and former employees. The knowledge and experience that alumni initially gain at the IHP and then, after leaving, often over many years in very different professional fields, can be used, for example, for joint projects and cooperations.

Freunde des IHP: Forschungs- und Nachwuchspreise

Friends of the IHP: Research and Young Talent Awards

Als wichtiges Element der Nachwuchsförderung vergibt der Förderverein Freunde des IHP e. V. jährlich Preise an Schülerinnen und Schüler, Studierende und Promovierende. Eine Fachjury bewertet die Arbeiten und wählt herausragende aus. Nachdem der Wettbewerb 2020 pandemiebedingt ausgesetzt wurde, erfolgte 2021 ein Neustart. Vier Facharbeiten von Brandenburger Schulen und vier Facharbeiten vom Marie Skłodowska-Curie-Lyceum in Gorzów wurden eingereicht. Erstmals konnte die Jury neben den Forschungspreisen auch ein Forschungsstipendium vergeben: Eine Schülerin entwickelte nach der Teilnahme am digitalen Zukunftstag ein Projekt weiter, das durch ein Preisgeld in Höhe von 350 Euro eine große finanzielle Unterstützung erhielt. Die Auszeichnung fand im Rahmen des Tages der offenen Tür statt.

Acht Abschlussarbeiten wurden für den Nachwuchspreis 2021 eingereicht. Die Studierenden von Hochschulen aus ganz Deutschland befassten sich mit Forschungsthemen des IHP. Die Verleihung der Preise fand digital statt.

As an important element in the promotion of young talent, the Friends of the IHP e. V. annually awards prizes to pupils, students and doctoral candidates. An expert jury evaluates the works and selects outstanding ones. After the competition was suspended in 2020 due to the pandemic, it was relaunched in 2021. 4 submissions from schools in Brandenburg and 4 submissions from the Marie Skłodowska-Curie-Lyceum in Gorzów were sent in. For the first time, the jury was able to award a research grant in addition to the research prizes: After participating in the Digital Future Day, a pupil further developed a project that received great financial support in the form of prize money of 350 euros. The ceremony took place during the Open Day.

8 final theses were submitted for the 2021 Young Talent Award. The students from universities all over Germany dealt with research topics of the IHP. The awards ceremony took place digitally.



Elise Funke, Personalleiterin am IHP (links) und Anja Bölicke, Vorsitzende des Fördervereins "Freunde des IHP e. V." (rechts) zeichneten Kaja Hartmann mit einem Stipendium für ihre Forschungsarbeit aus. Kaja Hartmann hatte im Nachgang zum Zukunftstag 2021 ihre Idee von Pflanzenfarben für Epoxidharz weiterentwickelt. Das Stipendium wurde erstmals vergeben.
Elise Funke, Human Resources Manager at IHP (left) and Anja Bölicke, Chairwoman of the support association "Friends of the IHP e. V." (right) awarded Kaja Hartmann with a scholarship for her research work. Kaja Hartmann had further developed her idea of plant-based paints for epoxy resin in the follow-up to Future Day 2021. The scholarship was awarded for the first time.

Tag der offenen Tür

Open Day

Der Tag der offenen Tür ist traditionell das größte öffentliche Ereignis am IHP. Rund 400 Gäste nutzten die Gelegenheit, das Institut kennenzulernen. In der Magistrale stellte das IHP aktuelle Forschungsthemen vor und begeisterte mit allgemeinen Erläuterungen zur Mikroelektronik. Partnerinnen und Partner aus dem Bereich der Forschung, der Hochschulbildung, der Industrie, aber auch der Stadt Frankfurt (Oder) und der Bildung ergänzten das breite Angebot.

Da viele kleinere Labore aufgrund der Hygienebestimmung geschlossen bleiben mussten, wurden erstmals 360°-Rundgänge im Vortragsraum angeboten. So war es möglich, den Interessierten auch einen Blick in sonst verschlossene Labore zu ermöglichen, darunter das NanoLab und das Integrationslabor. Auch das MBE-Labor und das Photonik-Labor wurden gezeigt.

Besonderer Beliebtheit erfreute sich erneut der IHP-Reinraum. Durch den im März fertiggestellten Anbau führt der Besuchergang nun komplett um den Reinraum herum, sodass mehrere Gruppen gleichzeitig die Möglichkeit hatten, das Herzstück des Institutes zu sehen.

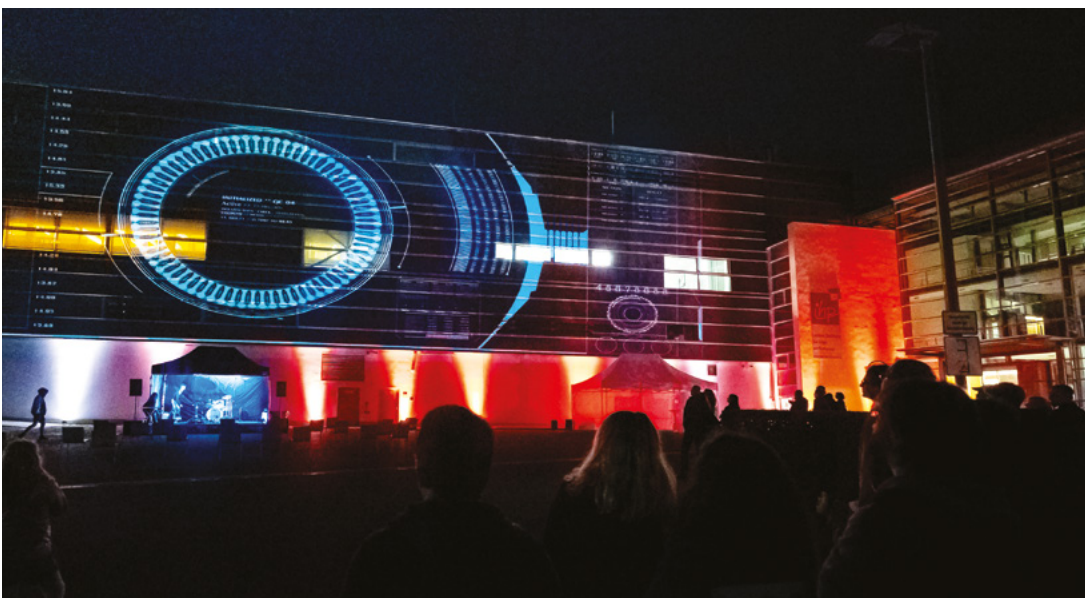
Die traditionelle Kinderuniversität fand 2021 im Freien statt: Die Kinder informierten sich zum Thema „Fliegen“ und bauten unter anderem eigene Flugobjekte. Ebenfalls vor dem Gebäude wurde die Preisvergabe des Fördervereins Freunde des IHP e. V. durchgeführt. Im direkten Anschluss endete der Tag der offenen Tür mit einer Lichtkunstinstallation. Zwei Hochleistungsbeamer projizierten einen technischen Imagefilm auf das Gebäude des IHP-Reinraums, das entspricht einer Fläche von fast 1000 m².

The "Open Day" is traditionally the largest public event at the IHP. Around 400 visitors took the opportunity to become acquainted with the institute. In the main hall, the IHP presented current research topics and inspired with general explanations about microelectronics. Partners from the fields of research, higher education, industry, but also the city of Frankfurt (Oder) and education complemented the wide range of offers.

Since many smaller laboratories had to remain closed due to hygiene regulations, 360° tours were offered in the lecture hall for the first time. This made it possible for those interested to also take a look at otherwise closed labs, including the NanoLab and the integration lab. The MBE lab and the photonics lab were also shown.

The IHP clean room was again particularly popular. Due to the extension completed in March, the visitor corridor now leads completely around the clean room, so that several groups had the opportunity to see the heart of the institute at the same time.

The traditional Children's University took place outside in 2021: The children learned about the topic of "flying" and built their own flying objects, among other things. The award ceremony of the "Friends of the IHP" was also held in front of the building. Immediately afterwards, the "Open Day" ended with a light art installation. Two high-performance beamers projected a technical image film onto the building of the IHP clean room, corresponding to an area of almost 1000 m².



Die Fassade des IHP-Reinraums war Hintergrund für einen zum Abschluss des Tages der offenen Tür gezeigten Imagefilm.
The facade of the IHP clean room was the background for an image film shown at the end of the open day.

Smarte Lösungen für ein nachhaltiges Wassermanagement

Smart Solutions for Sustainable Water Management

Bereits zum 11. Mal fand im November 2021 der Brandenburger Sensornetztag am IHP statt. Die Veranstaltung bringt regionale Firmen, Kommunen, Wirtschaftseinrichtungen und Forschende zusammen, um gemeinsam Fachvorträge zu einem Thema zu hören und sich anschließend in Diskussionsrunden darüber auszutauschen. „Smarte Lösungen für ein nachhaltiges Wassermanagement“ wurden aus diversen Teilaspekten betrachtet. Dabei reichten die Themen von der Qualitätsprüfung des sauberen Trinkwassers über eine gesicherte und für Cyberangriffe resiliente Wasserversorgung, zur effizienten Regenwassernutzung, zur Vermeidung überdrockneter und waldbrandgefährdeter Böden, zum Hochwasserschutz durch Überschwemmungs- und Starkregensimulationen bis zur effizienten Abwasserreinigung.

The Brandenburg Sensor Network Day was held at the IHP for the 11th time in November 2021. The event brings together regional companies, municipalities, economic institutions and researchers to listen to expert presentations on a topic and then exchange ideas in discussion rounds. "Smart solutions for sustainable water management" were considered from various sub-aspects. The topics ranged from the quality testing of clean drinking water to a secure water supply that is resilient to cyber attacks, to the efficient use of rainwater, to the prevention of over-dried soils that are at risk of forest fires, to flood protection through flood and heavy rain simulations, to efficient wastewater treatment.



Der Vortrag von Dr.-Ing. Krzysztof Piotrowski stellte eine Plattform für Umwelt Monitoring im SmartRiver-Projekt vor.
The presentation by Dr.-Ing. Krzysztof Piotrowski introduced a platform for environmental monitoring in the SmartRiver project.

Kooperation mit X-FAB

Cooperation with X-FAB

X-FAB Silicon Foundries, einer der führenden Halbleiterhersteller in Europa, kooperiert seit März 2021 mit dem IHP. Zu den Zielen der Partnerschaft gehören die Verbindung der Kompetenzen in der Halbleiterfertigung sowie der Austausch von Wissen und die Schaffung von für beide Seiten vorteilhaften technischen Synergien.

IHP-Bauelemente werden in die 130-nm-XR013-RF-SOI-Prozesslinie von X-FAB integriert und mit Kupfer metallisiert. Diese Integration bereitet den Weg für die Erprobung einer breiten Palette von drahtlosen Systemkonzepten der nächsten Generation. Ein weiterer Schwerpunkt der gemeinsamen Arbeit ist die Entwicklung fortschrittlicher SiGe-BiCMOS-Technologien. Die Grundlage dafür bilden die SiGe-Hetero-Bipolartransistoren des IHP. Diese bieten bereits jetzt starke Leistungsparameter, die durch die Verwendung von verlustarmen Kupferverbindungen aber noch gesteigert werden können.

Das IHP und EUROPRACTICE bieten Prototyping-Dienstleistungen für die RF-SOI- und SiGe-BiCMOS-Technologien an. Die vom IHP und X-FAB entwickelten Technologien können künftig in der Optoelektronik und bei 5G-Drahtloskommunikationssystemen sowie bei innovativen Radarimplementierungen eingesetzt werden.

X-FAB Silicon Foundries, one of the leading semiconductor manufacturers in Europe, has been cooperating with IHP since March 2021. The goals of the partnership include the combination of competences in semiconductor manufacturing as well as the exchange of knowledge and the creation of mutually beneficial, technical synergies.

The IHP devices will be integrated into X-FAB's 130nm XR013 RF SOI process line and metallised with copper. This integration paves the way for testing a wide range of next-generation wireless system concepts. Another focus of the joint work is the development of advanced SiGe BiCMOS technologies. IHP's SiGe hetero-bipolar transistors form the basis for this. These already offer strong performance parameters, but can be increased even further by using low-loss copper interconnects.

IHP and EUROPRACTICE offer prototyping services for RF SOI and SiGe BiCMOS technologies. The technologies developed by IHP and X-FAB can be used in the future in optoelectronics and 5G wireless communication systems as well as in innovative radar implementations.



Ein weiterer Schwerpunkt der gemeinsamen Arbeit ist die Entwicklung fortschrittlicher SiGe BiCMOS-Technologien. Die Grundlage dafür bilden die SiGe-Heterobipolartransistoren des IHP. Diese bieten starke Leistungsparameter mit f_r/f_{max} -Werten von bis zu 250/340 GHz für SG13SCu und bis zu 300/500 GHz für SG13G2Cu.

Another key focus for the collaborative work that has been conducted is the development of advanced SiGe BiCMOS technologies. At the foundation of this will be IHP's SiGe heterojunction bipolar transistors. These offer strong performance parameters, with f_r/f_{max} figures of up to 250/340 GHz for SG13SCu and up to 300/500 GHz for SG13G2Cu.



Forschung des IHP

IHP's Research

Forschung des IHP

Das IHP verbindet gezielt Grundlagenforschung mit angewandter Forschung auf den Gebieten siliziumbasierte Systeme, Höchsthfrequenzschaltkreise und -technologien einschließlich neuer Materialien. Sämtliche Arbeiten verfolgen das Ziel eines Transfers der Erkenntnisse und Ergebnisse in die Anwendung, um Beiträge und Impulse zur Lösung aktueller und zukünftiger gesellschaftlicher Herausforderungen zu liefern. Das Institut entwickelt Technologien für die Wissenschaft und Industrie, durch deren Einsatz technische Alleinstellungsmerkmale realisiert werden und in einem weltweiten Wettbewerbsumfeld bestehen können. Ebenso leistet das Institut einen aktiven und wichtigen Beitrag bei der Ausbildung des wissenschaftlich-technischen aber auch des nicht-akademischen Fachkräftenachwuchses. Mit seinen Arbeitsbereichen besitzt das IHP eine wesentliche forschungsstrategische Bedeutung zur Erzielung einer technologischen Souveränität Deutschlands und Europas.

Die enge Verzahnung der Abteilungen ermöglicht dem IHP, neben Einzellösungen, technologieübergreifende komplexe Systeme hoher Leistungsfähigkeit und Funktionalität zu erforschen und bis zur Prototypenreife zu entwickeln. Neben der siliziumbasierten qualifizierten Technologieplattform stellt die Arbeit an komplexen Systemen am IHP eine wichtige zukünftige Säule für den Erfolg des Institutes dar.

Ein wesentliches Erfolgs- und Alleinstellungsmerkmal des IHP ist sein vertikales Forschungskonzept (siehe Abb. A), das diesen systemischen Ansatz unterstützt. In jedem seiner Forschungsprogramme verfügt das Institut über Kernkompetenzen, die weltweit Spitzenpositionen einnehmen und die das Ergebnis langjähriger und kontinuierlicher Forschungsarbeit sind. Durch die eng aufeinander abgestimmte Zusammenarbeit der Forschungsprogramme werden Synergieeffekte und Hebelwirkungen erzielt, die zu vertikal optimierten Lösungen führen. Diese Fähigkeit stellt in der internationalen Forschungslandschaft ein Alleinstellungsmerkmal dar.

IHP's Research

IHP specifically combines basic research with applied research in the fields of silicon-based systems, ultrahigh-frequency circuits and technologies including new materials. All work pursues the goal of transferring findings and results into application in order to provide contributions and impulses for solving current and future societal challenges. The institute develops technologies for science and industry, through the use of which unique technical features can be realized and survive in a worldwide competitive environment. The institute also makes an active and important contribution to the training of the next generation of scientists and engineers, but also of the next generation of non-academic specialists. With its work areas, the IHP has an essential strategic research significance for the achievement of a technological sovereignty of Germany and Europe.

The close interlocking of the departments enables the IHP, in addition to individual solutions, to research cross-technology complex systems of high performance and functionality and to develop them to prototype maturity. In addition to the silicon-based qualified technology platform, the work on complex systems at IHP represents an important future pillar for the success of the institute.

A key success and unique selling point of IHP is its vertical research concept (see Fig. A), which supports this systemic approach. In each of its research programs, the institute has core competencies that occupy leading positions worldwide and are the result of many years of continuous research work. The closely coordinated collaboration of the research programs generates synergies and leverage effects that lead to vertically optimized solutions. This capability represents a unique selling point in the international research landscape.

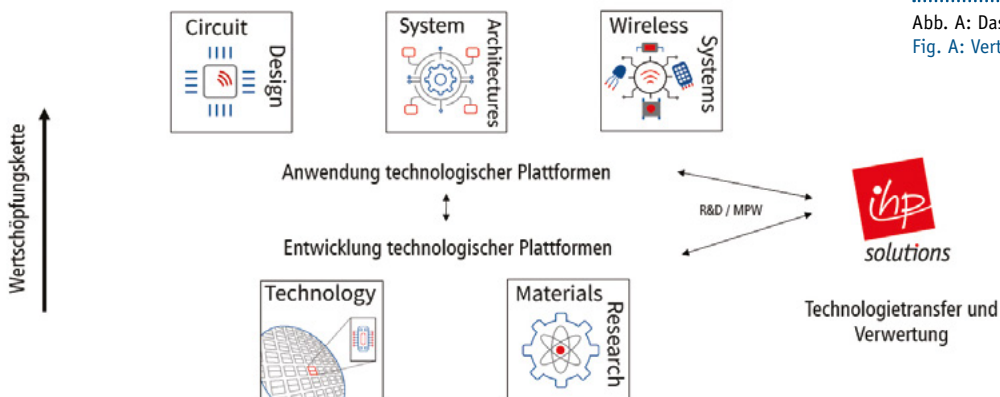


Abb. A: Das vertikale Forschungskonzept des IHP
 Fig. A: Vertical research concept of the IHP

In den strategischen Arbeitsgebieten (siehe Abb. B) werden die Kernkompetenzen aus den verschiedenen Forschungsprogrammen des IHP zu abteilungsübergreifenden Themenstellungen gebündelt mit dem Ziel, eine große Hebelwirkung und Synergie für Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft zu erzielen.

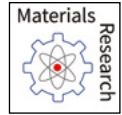
In the strategic Fields of Activity (see Fig. B), the core competencies from the various research programs of IHP are bundled into cross-departmental topics with the aim of achieving a large leverage effect and synergy for partners from science and industry.

Abb. A: Strategische Arbeitsgebiete des IHP
Fig. B: Strategic Fields of Activity of the IHP



Materialien für die Mikro- und Nanoelektronik

Materials for Micro- and Nanoelectronics



In diesem Forschungsprogramm werden neue Materialien für die Nano- und Mikroelektronik untersucht. In den drei Arbeitsgruppen des Forschungsprogramms werden vielversprechende Ansätze der Materialwissenschaft für zukünftige Bauelemente in der Mikroelektronik identifiziert. Das Forschungsprogramm umfasst ein weites Spektrum - von den Materialwissenschaften bis zur angewandten Forschung an modernen Bauelementen. In komplexen Bauelementen wird eine Vielfalt heterogener Materialsysteme zur analogen, digitalen, neuromorphen, quantenmechanischen und optischen Signal- und Datenverarbeitung zusammengeführt. Neben diesen Forschungskonzepten für moderne Bauelemente bietet die „More than Moore“-Strategie der Mikroelektronik eine gute Ausgangsposition für Innovationen im medizintechnischen Bereich. Die drei Arbeitsgruppen der Abteilung Materialforschung: 2D-Materialien, Halbleiter-Optoelektronik und Adaptive Materialien haben die folgenden Forschungsschwerpunkte:

In this research program new materials for nano- and microelectronics are investigated. In three working groups of the research program, promising approaches in materials science for future components in microelectronics are identified. The research program covers a broad spectrum: from basic research in materials science to applied research on modern construction elements. A variety of heterogeneous material systems for analog, digital, neuromorphic, quantum mechanical and optical signal and data processing are combined in complex components. In addition to these research concepts for modern components, the “More than Moore” strategy of microelectronics offers a good starting position for innovations in the medical technology sector. The three research groups of the Materials Research Department: 2D Materials, Semiconductor Optoelectronics and Adaptive Materials have the following research foci:

2D-Materialien

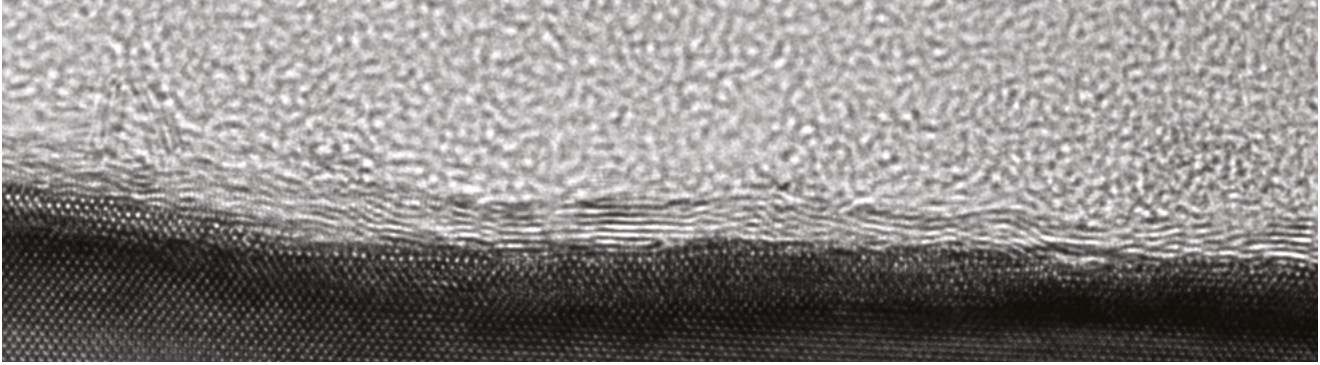
Die Gruppe beschäftigt sich mit fundamentalen Fragen zur metallfreien Synthese von 2D-Materialien auf Germaniumsubstraten, zur Passivierung oder zur elektrischen Kontaktierung dieser innovativen Materialien. Die Synthese von Graphen hoher Qualität in Bezug auf geringe Flächenwiderstände und hohe Ladungsträgermobilität bleibt ein Schlüsselfaktor für die Herstellung von Graphenbauelementen mit hoher Leistungsfähigkeit.

Graphen ist ein 2D-Material, das für seine außergewöhnlichen elektronischen Eigenschaften bekannt ist. Um diese Eigenschaften in realen Bauelementen nutzen zu können, muss die elektronische Kopplung mit dem Substrat und mit dem umgebenden Material jedoch stark reduziert werden. Hexagonales Bornitrid (hBN), ein weiteres 2D-Material, ist für diesen Zweck sehr vielversprechend. Es könnte sowohl zur Isolierung von Graphen vom Substrat als auch als Gate-Dielektrikum verwendet werden. Obwohl durch mechanische Exfoliation und Transfer erhaltene Bauelemente die Möglichkeiten von Graphen/hBN-Heterostrukturen bestätigten, muss eine skalierbare und zuverlässige Wachstumstechnik noch demonstriert werden: Die Entwicklung neuer Ansätze zur Herstellung von 2D-Heterostrukturen ist von großer Bedeutung. Durch die Kombination des Know-hows und der Ressourcen der Projektpartner innerhalb des FLAG-ERA-Projektes 2DHetero sollen verschiedene Möglichkeiten zur Herstellung von Graphen/hBN-Heterostrukturen auf Substraten, die mit der Si-Mikroelektronik kompatibel sind, erforscht und entwickelt werden. Um diese Ziele zu erreichen,

2D Materials

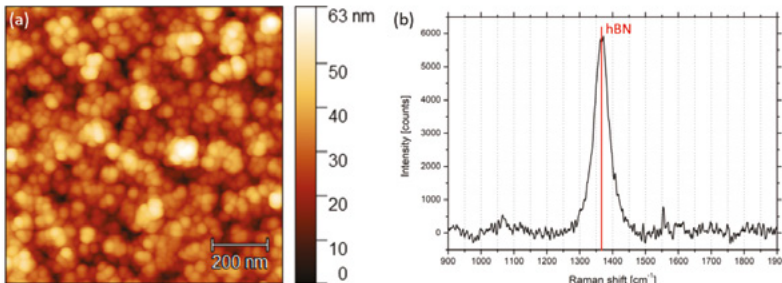
The group addresses fundamental questions on metal-free synthesis of 2D materials on germanium substrates, passivation or electrical contacting of these innovative materials. The synthesis of high quality graphene in terms of low sheet resistance and high carrier mobility remains a key factor for the fabrication of high performance graphene devices.

Graphene is a 2D material known for its exceptional electronic properties. However, to exploit these properties in real devices, the electronic coupling with the substrate and with the surrounding material must be greatly reduced. Hexagonal boron nitride (hBN), another 2D material, is very promising for this purpose. It could be used both to isolate graphene from the substrate and as a gate dielectric. Although devices obtained by mechanical exfoliation and transfer confirmed the potential of graphene/hBN heterostructures, a scalable and reliable growth technique remains to be demonstrated: the development of new approaches to fabricate 2D heterostructures is of great importance. By combining the know-how and resources of the project partners within the FLAG-ERA project 2DHetero, different ways to fabricate graphene/hBN heterostructures on substrates compatible with Si microelectronics will be explored and developed. To achieve these goals, graphene/hBN heterostructures will be fabricated using two main methods: Molecular Beam Epitaxy and Chemical Vapor Deposition. Atomistic calculations using ab initio density functional theory, complemented by large scale kinetic Monte Carlo simulations, will be



TEM-Querschnittsbild eines hBN-Films, der auf Ge(001) gewachsen ist: Die kristalline Qualität der hBN-Schichten wurde zusätzlich mittels TEM untersucht. Das Bild zeigt einen hBN-Film, der aus 5 - 12 gut ausgerichteten Schichten mit einem Zwischenschichtabstand von 3,35 Å besteht, was mit dem Literaturwert von 3,33 Å gut übereinstimmt. Das Wachstum von nanokristallinen, dreidimensionalen Inseln tritt immer noch auf, der Ursprung dieser erfordert weitere Untersuchungen.

Cross-section TEM image of hBN film grown on Ge(001): The crystalline quality of the hBN films was additionally investigated by TEM. The image shows a hBN film consisting of 5-12 well-aligned layers with an interlayer distance of 3.35 Å, which is in good agreement with the literature value of 3.33 Å. Growth of nanocrystalline, three-dimensional islands still occurs, the origin of these require further investigation.



(a) AFM-Bild eines auf Ge(001) gewachsenen Bornitridfilms
(b) entsprechendes Ramanspektrum: Erste Ergebnisse deuten auf ein Wachstum von wenigen Schichten Bornitrid auf Ge(001)-Oberflächen bei 10^{-3} mbar und 980 °C hin. (a) zeigt ein AFM-Bild des Films, das auf ein dreidimensionales Wachstum hinweist. Die Raman-Spektroskopie bestätigte das Vorhandensein von hBN mit dem charakteristischen hBN-E2g-Peak, der bei 1366 cm^{-1} auftritt (siehe (b)).

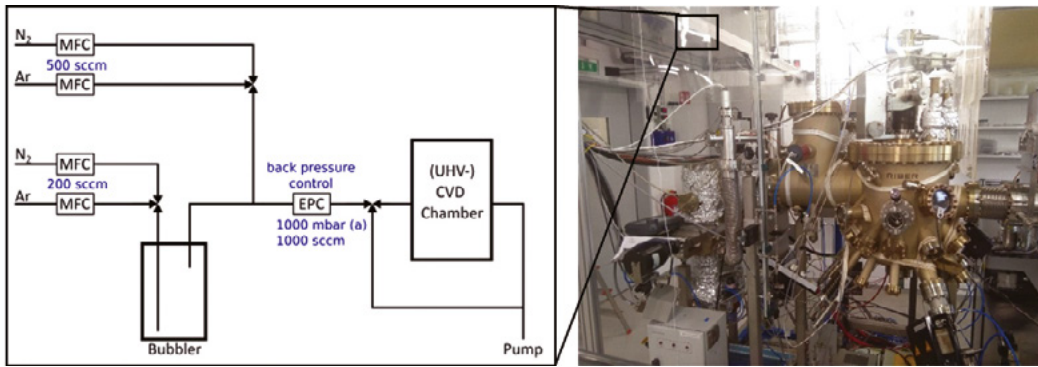
(a) AFM image of boron nitride film grown on Ge(001),
(b) corresponding Raman spectrum: First results indicated growth of few layers of boron nitride on Ge(001) surfaces at 10^{-3} mbar and 980 °C. (a) shows an AFM image of the film, indicating a three-dimensional growth mode. Raman spectroscopy confirmed the presence of hBN with the characteristic hBN E2g peak appearing at 1366 cm^{-1} , see (b).

sollen Graphen/hBN-Heterostrukturen mit zwei Hauptmethoden hergestellt werden: Molekularstrahlepitaxie und chemische Gasphasenabscheidung. Atomistische Berechnungen mittels ab-initio-Dichtefunktionaltheorie, ergänzt durch kinetische Monte-Carlo-Simulationen im großen Maßstab, werden durchgeführt, um die Wachstumsmechanismen und optimalen Prozessbedingungen zu verstehen. Das Verständnis der Mechanismen ist nicht nur von grundlegendem wissenschaftlichem Interesse, sondern auch für die weitere Entwicklung von Graphen/hBN und ähnlichen Systemen von Bedeutung. Die Experimente werden an CMOS-kompatiblen Materialien durchgeführt, was diese Studie einzigartig macht, da ihre Ergebnisse direkt den Weg zur weiteren Graphen/hBN-Integration und zum Bauelement-Prototyping innerhalb der gängigen Si-Technologien ebnen könnten.

Das EU-Projekt GreEnergy strebt die Entwicklung eines graphenbasierten optischen Breitband-Antennenarrays mit sehr hohem Wirkungsgrad an. Das GreEnergy-Bauelement wird die Energiegewinnungskomponente in ein selbstversorgendes graphenbasiertes Nanosystem integrieren. Ein Prototyp wird optische Nanoantennen mit Nanogleichrichtern (Rectennas) und eine Mikro-Energiespeicherkomponente enthalten. Die Entwicklung aller Komponenten hat das Ziel, deren Integration auf einem Mikrochip in einem einzigen Herstellungsprozess zu ermöglichen.

performed to understand the growth mechanisms and optimal process conditions. Understanding the mechanisms is not only of fundamental scientific interest, but also important for further development of graphene/hBN and similar systems. The experiments are performed on CMOS-compatible materials, which makes this study unique as its results could directly pave the way for further graphene/hBN integration and device prototyping within current Si technologies.

The EU GreEnergy project aims to develop a graphene-based broadband optical antenna array with very high efficiency. The GreEnergy device will integrate the energy harvesting component into a self-powered graphene-based nanosystem. A prototype will include optical nanoantennas with nano-rectifiers (rectennas) and a micro-energy storage component. Fabrication of all components will be developed with the goal of integration on a single microchip in a single manufacturing process.



(UHV)-CVD-Anlage für hBN-Wachstum (rechts) und Schema des Borazin-Gasversorgungssystems (links): Für das hBN-Wachstum wurde die Hochvakuum-CVD-Kammer mit einem Gasversorgungssystem für Borazin ausgestattet. Der flüssige Precursor wird in einem Bubbler gelagert und auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt, um eine Polymerisation zu verhindern. Sowohl Ar als auch N_2 können als Trägergas für den Transport des Borazindampfes in die Kammer verwendet werden. Außerdem kann das Borazin-Trägergas-Gemisch entweder mit Ar oder N_2 verdünnt werden, um die Wachstumsrate besser kontrollieren zu können. Das CVD-System kann bei Drücken von 10^{-8} mbar bis 10^{-3} mbar und bei Wachstumstemperaturen im Bereich von $150 - 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrieben werden. Die Probengröße ist klein ($\sim 10 \times 40\text{ mm}^2$), sodass drei oder mehr verschiedene Proben parallel bearbeitet werden können. Die derzeit untersuchten Substratmaterialien sind Si(001), Ge(001)/Si und Graphen/Ge(001)/Si.

(UHV)-CVD system for hBN growth (right) and schematic of the borazine gas supply system (left): For hBN growth the high vacuum CVD chamber was equipped with a gas supply system for borazine. The liquid precursor is stored in a bubbler and cooled to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to prevent polymerization. Both Ar and N_2 can be used as the carrier gas to transport borazine vapor to the chamber. Additionally, the borazine/carrier gas mixture can be diluted with either Ar or N_2 , for better control of the growth rate. The CVD system can be operated at pressures from 10^{-8} mbar to 10^{-3} mbar and at growth temperatures in the range of $150\text{--}980\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sample size is small ($\sim 10 \times 40\text{ mm}^2$), so three or more different samples can be processed in parallel. Currently investigated substrate materials are Si(001), Ge(001)/Si and Graphene/Ge(001)/Si.

Halbleiter-Optoelektronik

Diese Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit der Integration alternativer Halbleitermaterialien (insbesondere III-V-Halbleiter mit InP und GaN) und Gruppe IV-Materialien (Germanium, GeSn und SiGeSn) in die Siliziumtechnologie, deren optoelektronische Eigenschaften denen des Siliziums im Bereich der Photonik- und der THz-Anwendungen überlegen sind. Die Kontrolle und Herstellung der Verspannungseigenschaften von Mikro- und Nano-Heterostrukturen zur weiteren Leistungssteigerung des Materials nimmt hierbei eine zentrale Rolle ein. Seit einigen Jahren beschäftigt sich die Arbeitsgruppe auch mit halbleiterbasierten Spinqubits.

Halbleiterbasierte Spinqubits sind aufgrund ihrer ausgezeichneten Kohärenzeigenschaften und demonstrierten Kompatibilität mit der Halbleitertechnologie eine vielversprechende Plattform, um langfristig Quantencomputer mit Fehlerkorrektur und der für eine weitreichende Nutzung erforderlichen Qubitzahl zu realisieren. Ein-Qubit-Fidelitäten entsprechen den Anforderungen und bereits demonstrierte Zwei-Qubit-Gatter lassen dies mit Optimierung ebenfalls erwarten. Verglichen mit supraleitenden Qubits haben Spinqubits die Vorteile einer geringeren Größe und bei höheren Temperaturen (bis zu etwa 1 K) funktionsfähig zu sein. Eine ungelöste Herausforderung ist jedoch die Demonstration einer skalierbaren Quanten-Architektur.

Im Rahmen des BMBF-Projektes QUASAR soll eine Mikroarchitektur ohne geometrische Skalierungsgrenzen auf der Quantenebene mit in Deutschland industriell verfügbarer Halbleitertechnologie realisiert werden. Kernidee ist dabei, zweidimensionale Konnektivität durch spin-kohärentes „Shutteln“ von Elektronen in gatterdefinierten Quantenpunktstrukturen zu erreichen. Unterstützt durch realistische Simulationen soll im Projekt die industriekompatible Fertigung entwickelt und die Funktionsfähigkeit der einzelnen Quantenbauelemente demonstriert werden: ein-Qubit-Gatter mit 99 Prozent Fidelität,

Semiconductor Optoelectronics

This research team evaluates the integration opportunities of alternative semiconductor materials (especially III-V semiconductors with InP and GaN) and group IV materials (germanium, GeSn and SiGeSn) into silicon technology, whose optoelectronic properties are superior to those of silicon in the field of photonics and THz applications. The control and fabrication of the straining properties of micro- and nano-heterostructures to further enhance the performance of the material takes a central role here. For several years, the group has also been working on semiconductor-based spin qubits.

Due to their excellent coherence properties, semiconductor-based spin qubits demonstrated their compatibility with semiconductor technology and are promising candidates to realize quantum computers with error correction in the long term. Single-qubit fidelities meet the requirements and already demonstrated two-qubit gates also suggest this with optimization. Compared to superconducting qubits, spin qubits have the advantages of being smaller in size and functional at higher temperatures (up to about 1 K). However, an unsolved challenge is the demonstration of a scalable quantum architecture.

The BMBF project QUASAR aims to realize a microarchitecture without geometric scaling limits at the quantum level using semiconductor technology that is industrially available in Germany. The core idea is to achieve two-dimensional connectivity by spin-coherent "shuttling" of electrons in gate-defined quantum dot structures. Supported by realistic simulations, the project will develop industry-compatible fabrication and demonstrate the functionality of the individual quantum devices: One-qubit gates with 99 percent fidelity, two-qubit gates with 95 percent fidelity, spin-coherent "shuttling" of electrons, and optional coupling of up to five qubits. Si/SiGe quantum wells, for which the reproducibility and feasibility of multi-qubit structures has already been demonstrated, will be used as

Zwei-Qubit-Gatter mit 95 Prozent Fidelität, Spin-kohärentes „Shutteln“ von Elektronen und optional die Kopplung von bis zu fünf Qubits. Als technologische Basis werden Si/SiGe-Quantentöpfe, für die die Reproduzierbarkeit und Realisierbarkeit von Multi-Quantenpunkt-Strukturen bereits gezeigt wurde, verwendet und hinsichtlich ihrer qubitrelevanten Eigenschaften weiterentwickelt.

Das Projekt schafft somit die Grundlage für einen Demonstrator mit ca. 25 2D-gekoppelten Qubits, welcher in einem Nachfolgeprojekt realisiert und über die „Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing“ (JUNIQ) mit Cloud-Zugang in die modulare HPC-Umgebung des Jülich Supercomputing Centers eingebunden werden soll. Eine darauf aufbauende Weiterentwicklung zu 1000 und mehr Qubits wird angestrebt. Hervorzuheben ist, dass die gesamte technologische Wertschöpfungskette für Si-basierte Quantenprozessoren im Rahmen des Projekts bereits industriell oder mit direktem Transferpotential in Deutschland aufgebaut wird. Die Einbindung von Infineon Dresden (mit dem größten Fabrikationsanteil) und eines geplanten Startups (als zukünftigen Systemintegrator) eröffnet konkrete Perspektiven für eine Kommerzialisierung.

Fortgeschrittene, selektive Epitaxieverfahren sind ein elementares Forschungsthema im Bereich der Wachstumsphysik, um für diverse Anwendungen in der Halbleitertechnologie (z. B. Sensoren, Einzelphotonenquellen für Quantentechnologie etc.), Heterostruktursysteme hoher Qualität zur Verfügung zu stellen. Eine Möglichkeit der Relaxation von Verspannungen ist neben der plastischen Relaxation durch Segregationseffekte gegeben. Ein Beispiel hierzu ist durch das innovative SiGeSn-Materialsystem gegeben, das für die künftige Gruppe-IV-Halbleiter-Optoelektronik intensiv erforscht wird. Hierbei ist das Wachstum von SiGeSn-Schichtsystemen entsprechender Qualität auf Silizium eine hohe Herausforderung. Basierend auf einem DFG-Projekt mit dem Institut für Halbleitertechnologie (IHT) der Universität Stuttgart, dem Forschungszentrum Jülich und der RWTH Aachen erfolgt eine „proof of principle“-Studie, um einen elektrisch gepumpten Doppelheterostrukturlaser im nahen Infrarotbereich mit GeSn als aktivem Material zu realisieren.

Optische Konzepte für Gassensorik beruhen darauf, dass Gasmoleküle Licht charakteristischer Wellenlängen absorbieren können und damit einen „Fingerabdruck“ in Absorptionsspektren hinterlassen. Die Halbleiterlegierung GeSn ermöglicht die adressierbare Wellenlänge durch Anpassung der Sn-Konzentration präzise einzustellen. Als Herstellungsmethode wird dazu die Molekularstrahlepitaxie verwendet. Im Oberflächenlabor der Abteilung Materialforschung werden begleitend die Oberflächeneigenschaften von verspanntem Ge und GeSn in einem Multiskalen-Ansatz (von der atomaren zur Mikrometer-Skala) untersucht.

the technological basis and further developed with respect to their qubit-relevant properties.

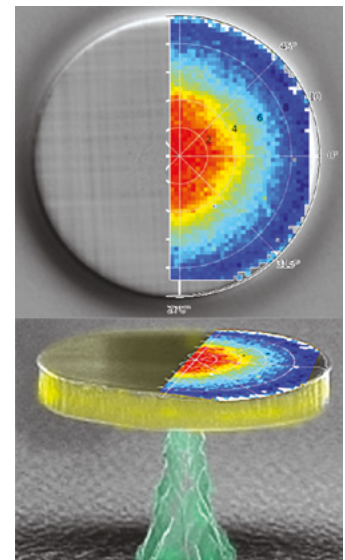
Thus the project creates the basis for a demonstrator with about 25 2D-coupled qubits, which will be realized in a follow-up project and integrated into the modular HPC environment of the Jülich Supercomputing Center via the "Jülich User Infrastructure for Quantum Computing" (JUNIQ) with cloud access. A further development to 1000 and more qubits based on this is envisaged. It should be emphasized that the entire technological value chain for Si-based quantum processors is already being established industrially or with direct transfer potential in Germany as part of the project. The involvement of Infineon Dresden (with the largest fabrication share) and a planned startup (as a future system integrator) opens up concrete commercialization prospects.

Advanced selective epitaxy processes are an elementary research topic in the field of growth physics in order to provide high quality heterostructure systems for various applications in semiconductor technology (e.g. sensors, single photon sources for quantum technology, etc.). In addition to plastic relaxation, one possibility for relaxation of strains is provided by segregation effects. An example is given by the innovative SiGeSn material system, which is intensively researched for future group IV semiconductor optoelectronics. Here, the growth of SiGeSn layer systems of corresponding quality on silicon is a high challenge. Based on a DFG project with the Institute of Semiconductor Technology (IHT) at the University of Stuttgart, the Forschungszentrum Jülich and the RWTH Aachen, a "proof of principle" study is being carried out to realize an electrically pumped double heterostructure laser in the near infrared range with GeSn as active material.

Optical concepts for gas sensing rely on the fact that gas molecules can absorb light of characteristic wavelengths, leaving a "fingerprint" in absorption spectra. The semiconductor alloy GeSn allows the addressable wavelength to be precisely adjusted by adjusting the Sn concentration. Molecular beam epitaxy is used as the fabrication method for this purpose. In the surface laboratory of the Materials Research Department, the surface properties of strained Ge and GeSn are investigated in a multi-scale approach (from atomic to micrometer scale).

Eine GeSn-Mikroscheibe für optisch gepumptes Laserlicht im MIR. In der Überlagerung wird die durch Raman-Spektroskopie gemessene Gitterdehnung dargestellt.

A GeSn micro-disk for optically pumped lasing in the MIR. In the overlay the lattice strain as measured by Raman spectroscopy is shown.



Adaptive Materialien

Die Gruppe ist stark mit anderen IHP-Abteilungen vernetzt, um mittels des vertikalen IHP-Ansatzes innovative Lösungen technologisch zu bewerten. Die Aktivitäten umfassen zur Zeit Biosensorik mittels Halbleiterplasmonik und memristive Schaltkreise mit künftig neuromorpher Funktionalität.

Derzeit verwendete Technologien, wie Halbleitersensoren und anspruchsvolle optische Systeme, weisen oftmals signifikante Nachteile auf, insbesondere können exotische, aber leistungsfähigere Materialien für sensitive Schichten und Detektoren bislang nicht in Standard-Halbleiterfertigungsprozesse integriert werden. Die Performance der in der ersten Phase des iCampus entwickelten resistiven und optischen Sensoren soll in der zweiten Phase zunächst durch gezielte Design- und Materialoptimierungsschritte gesteigert werden.

Aus Anwendungssicht stellt die Verwendung chemisch aktiver Metalloxide, wie Ceroxid in nanostrukturierten Widerstandssensoren zur H₂-Detektion, eine attraktive Möglichkeit dar, funktionale Materialien mit existierender Silizium-CMOS-Technologie zu verknüpfen und damit die Sensoren insgesamt preiswerter herzustellen. Zusätzlich kann der Sensor durch kontrollierte Beimischung geeigneter Übergangsmetalle in die aktive Oxidschicht und die damit verbundene Modulation der aktiven Zentren hinsichtlich kritischer Kenngrößen, wie Nachweis- und Querempfindlichkeit, verbessert werden.

In analoger Weise ermöglicht der gezielte Einsatz von Nanostrukturen eine Vergrößerung des Wellenlängenbereichs optischer Sensoren auf Siliziumbasis im Nahinfrarotbereich, wobei außerdem die Quanteneffizienz durch die Dickenreduzierung der Metallkontaktschicht und die Verstärkung plasmonischer Effekte gesteigert wird. Eine besondere Herausforderung ist hierbei die Optimierung der Geometrie und ihre technologische Umsetzung.

Die Einsatzmöglichkeiten für On-Chip-Brechungsindexsensoren umfassen unter anderem Prozessdiagnose, Biosensorik und Chemosensorik. Als Ergebnis der Phase I des iCampus liegt ein On-Chip-Brechungsindexsensor vor, der auf der IHP-Technologieplattform gefertigt wurde und durch seine hohe Sensitivität auch kleine Brechungsindexänderungen detektieren kann. Die potentiellen Anwendungsbereiche für On-Chip-Brechungsindexsensorik sind breit, ein konkreter Einsatz erfordert allerdings im Anschluss an die Ergebnisse der Phase I weitere Entwicklungsarbeit, insbesondere auf Systemebene, um den Brechungsindexsensor in seine Anwendungsumgebung einbetten zu können. Hier sei als beispielhaftes Anwendungsszenario die Messung der Zusammensetzung von Kühlschmierstoffen genannt – ein Brechungsindexsensormassensystem muss hier beispielsweise die Kompatibilität mit existierender Anlagensteuerung aufweisen, Temperaturschwankungen berücksichtigen und das Einbetten des Sensors in vorgegebene Gehäuseformen ermöglichen. Daher soll eine anwendungsorientierte Weiterentwicklung und die Demonstration von Sensorfunktionalität verfolgt werden.

Memristive Bauelemente weisen eine variable, widerstandsbasierte Speicherfunktion auf. Von besonderem Interesse ist diese Art von Bauelementen als schaltbares Element für nichtflüchtige RRAM-Speicher, aber auch für den Bereich der analogen neuronalen Schaltungstechnik. In der neuronalen Schaltungstechnik eröffnen die memristiven Bauelemente die Möglichkeit, die derzeit existierenden Hürden digitaler Datenverarbeitung im Bereich kognitiver Aufgabenstellungen, wie z. B. der Mustererkennung, zu überwinden. Im Mittelpunkt

Adaptive Materials

The team is strongly networked with other IHP departments to technologically evaluate innovative solutions by means of the vertical IHP approach. Activities currently include biosensing using semiconductor plasmonics and memristive circuits with future neuromorphic functionality.

Currently used technologies such as semiconductor sensors and sophisticated optical systems often have significant drawbacks; in particular, exotic but higher-performance materials for sensitive layers and detectors cannot yet be integrated into standard semiconductor manufacturing processes. The performance of the resistive and optical sensors developed in the first phase of the iCampus is to be increased in the second phase, initially through targeted design and material optimization steps.

From an application perspective, the use of chemically active metal oxides such as cerium oxide in nanostructured resistive sensors for H₂ detection represents an attractive opportunity to combine functional materials with existing silicon CMOS technology, thereby making the sensors cheaper to produce overall. In addition, the sensor can be improved in terms of critical parameters such as detection and cross-sensitivity by controlled admixture of suitable transition metals into the active oxide layer and the associated modulation of the active centers.

In an analogous way, the targeted use of nanostructures enables an enlargement of the wavelength range of silicon-based optical sensors in the near-infrared range, while also increasing quantum efficiency by reducing the thickness of the metal contact layer and enhancing plasmonic effects. A particular challenge here is the optimization of the geometry and its technological implementation.

Possible applications for on-chip refractive index sensors include process diagnostics, biosensing and chemosensing. As a result of phase I of the iCampus, an on-chip refractive index sensor is available, which was manufactured on the IHP technology platform and can detect even small refractive index changes due to its high sensitivity. The potential application areas for on-chip refractive index sensor technology are broad, but a concrete application requires further development work following the results of Phase I, especially at the system level, in order to be able to embed the refractive index sensor in its application environment. An example application scenario is the measurement of the composition of cooling lubricants - a refractive index sensor system must, for example, be compatible with existing plant control systems, take temperature fluctuations into account and enable the sensor to be embedded in specified housing shapes. Therefore, application-oriented further development and demonstration of sensor functionality will be pursued.

Memristive devices exhibit a variable resistance-based memory function. This type of device is of particular interest as a switchable element for non-volatile RRAM memories, but also for the field of analog neural circuitry. In neural circuit technology, memristive devices open up the possibility of overcoming the currently existing hurdles of digital data processing in the field of cognitive tasks, such as pattern recognition. The research focuses on the development of memristive devices for future electronic circuits with a strong orientation towards biological systems.

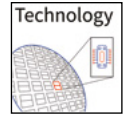
der Forschung steht die Entwicklung der memristiven Bauelemente für zukünftige elektronische Schaltungen mit starker Orientierung an biologischen Systemen.

Die Arbeiten der Gruppe konzentrieren sich auf die Entwicklung der Konzepte für die Nutzung der memristiven Bauelemente sowohl für die Speicherung als auch für die Verarbeitung der Daten im selben Bauelement. Somit können aufwendige Datentransfers zwischen Speicher und CPU vermieden und dadurch Rechenzeit und Energie gespart werden. Eine spezielle und besonders vielversprechende Variante davon sind neuronale Netze. Dabei wird grundsätzlich zwischen künstlichen neuronalen Netzen (artificial neural networks ANNs) und den biologisch inspirierten gepulsten neuronalen Netzen (spiking neural networks SNNs) unterschieden. In beiden Konzepten eröffnen die memristiven Systeme die Möglichkeit, die derzeit bestehenden Hürden digitaler Datenverarbeitung im Bereich kognitiver Aufgabenstellungen, wie z. B. der Mustererkennung, zu überwinden. Mittels memristiver Bauelemente können wichtige Eigenschaften der neuronalen Signalverarbeitung, wie z. B. die sogenannte spike time depending plasticity (STDP) für SNNs in memristiven Speicherarrays, abgebildet werden. Eines der wichtigen Ziele des Projektes KI-IoT wird es sein, die Verwendung von memristiven Bauelementen in KI-Systemen zur Beschleunigung, z. B. der Bildverarbeitung, im Anwendungsbe- reich automatisiertes Fahren zu untersuchen. In diesem Zusammen- hang wird die entwickelte RRAM-Technologie am IHP verwendet, um das Speicherarray zu erzeugen, in welchem die notwendigen hoch parallelen Rechenoperationen energieeffizient durchgeführt werden können. Der Hauptforschungsschwerpunkt wird auf dem Zusammen- spiel von memristiven Bauelementen, CMOS-Ansteuerungselektronik und Logikeinheiten sowie den implementierten KI-Algorithmen liegen. Fehlertolerante Mechanismen (einschließlich Trainingsprogrammen für die memristiven Bauelemente) sollen den korrekten Betrieb eines solchen Beschleunigers auch bei Vorhandensein von technologischen Toleranzen ermöglichen.

The team's work is focused on developing the concepts for using the memristive devices for both storage and processing of data in the same device. Thus, costly data transfers between memory and CPU can be avoided, saving computing time and energy. A special and particularly promising variant of this is neural networks. A basic distinction is made between artificial neural networks (ANNs) and biologically inspired spiking neural networks (SNNs). In both concepts, memristive systems open up the possibility of overcoming the currently existing hurdles of digital data processing in the field of cognitive tasks, such as pattern recognition. Using memristive devices, important properties of neural signal processing, such as the so-called spike time depending plasticity (STDP) for SNNs can be mapped in memristive memory arrays. One of the important goals of the KI-IoT project will be to investigate the use of memristive devices in AI systems to accelerate e.g. image processing in the application area of automated driving. In this context, the developed RRAM technology at IHP will be used to create the memory array in which the necessary highly parallel computing operations can be performed in an energy-efficient manner. The main research focus will be on the interaction of memristive devices, CMOS drive electronics and logic units as well as the implemented AI algo- rithms. Fault-tolerant mechanisms (including training programs for the memristive devices) will enable the correct operation of such an accelerator even in the presence of technological tolerances.

Technologien für smarte Systeme

Technologies for Smart Systems



Smarte Systeme beruhen auf smarten Technologien! Die Erweiterung existierender hochleistungsfähiger SiGe-Bi-CMOS-Technologien durch neuartige Bauelemente und Funktionen ist daher weiterhin das Kernthema der Technologieforschung am IHP, um weiterhin smarte Technologien bereitzustellen. Die Anforderungen und Komplexität einzelner Technologien nehmen dabei stetig zu. Unter Nutzung verschiedener Integrationstechniken auf Basis einer 200-mm-Si-Technologieplattform wird die Herstellung dieser smarten Technologien entwickelt. Das Anwendungsspektrum wird zunehmend breiter. Neben Entwicklungen, die für die drahtlose und Breitbandkommunikation auf Basis von siliziumbasierten elektrischen und optoelektrischen Hochfrequenztechnologien genutzt werden, stehen auch Forschungs- und Entwicklungsprojekte für sensorische Anwendungen (z. B. photonischer Sensoren) sowie die Integration neuartiger Bauelemente und Prozesse für den Bereich Künstliche Intelligenz und Quantentechnologien im Fokus. Das Forschungsprogramm verfolgt dabei verschiedene Schwerpunkte mit dem Ziel, performante Si-Technologien und deren Überführung in den Forschungsservice, z. B. auf Basis des Multi-Projekt-Wafer (MPW)-Programms des IHP, zu erreichen. Die Stabilisierung und Überführung der Technologien in den IHP-Forschungsservice ist somit weiterhin zentrales Ziel und Alleinstellungsmerkmal des IHP. Für die Forschungsschwerpunkte werden insbesondere Heterointegrationstechniken genutzt, um zukünftige Technologiegenerationen zu entwickeln. Die Erweiterungen der Prozessbasis zum Ausbau dieser Fähigkeiten wurden durch das vom BMBF geförderte Projekt zum Aufbau der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) auch in 2021 gefördert und waren zentraler Schwerpunkt des Forschungsprogramms. Hinzu kommt die Inbetriebnahme neuer Reinraumflächen nach Eröffnung der strategischen Reinraumerweiterung am IHP. Damit verfügt die Forschungsinfrastruktur um 50 Prozent mehr Fläche für neue Prozess- und Technologieentwicklungen und wird zukünftig in zahlreichen Projekten genutzt werden.

Smart systems are based on smart technologies! The expansion of existing high-performance SiGe-BiCMOS technologies by novel devices and functions is therefore still the core topic of technology research at IHP to continuously provide smart technologies. The requirements and complexity of individual technologies are constantly increasing. Using various integration techniques based on an 8" Si technology platform, the fabrication of these smart technologies is being developed. The range of applications is becoming increasingly broad. In addition to developments used for wireless and broadband communication based on silicon-based electrical and optoelectrical high-frequency technologies, the focus is also on research and development projects for sensory applications (e.g. photonic sensors) and the integration of novel components and processes for the field of artificial intelligence and quantum technologies. The research program pursues various focal points with the goal of achieving performant Si technologies and their transfer to the research service, e.g. use of the multi-project wafer (MPW) program of the IHP. Thus, the stabilization and transfer of technologies into the IHP research service remains the central goal and unique selling point of the IHP. In particular, heterogeneous integration techniques are used for the research in order to develop future technology generations. The expansion of the process base to develop these capabilities were also supported in 2021 by the BMBF-funded project to establish the Research Factory Microelectronics Germany (FMD) and were a central focus of the research program. Added to this is the commissioning of new cleanroom space following the opening of the strategic cleanroom extension at IHP. This provides the research infrastructure with plus 50 percent more space for new process and technology developments and will be used in numerous projects in the future.

Erweiterung hochleistungsfähiger Si-Technologien

Für die Entwicklung von neuartigen Bauelementen und Technologien werden Thematiken aus verschiedenen Forschungsgruppen genutzt. Alle beschäftigen sich mit der Erforschung neuer Bauelement- und Modulkonzepte für Si-basierte Plattformen sowie Technologieentwicklungen und -erweiterungen auf Basis der SiGe-BiCMOS-Plattformen für spezielle Anwendungsfälle. Nachdem das TARANTO-Projekt mit dem Ziel der Entwicklung der weltweit fortschrittlichsten SiGe-BiCMOS-Technologie erfolgreich abgeschlossen werden konnte, widmet sich das IHP nun der weiteren Überführung dieser SG13G3-Technologie in den instituts-eigenen Forschungsservice. Des Weiteren wurden im Jahr 2021 zahlreiche Projekte erfolgreich fortgesetzt, wie z. B. das INTENS-Projekt, welches vom Bundesland Brandenburg gefördert wird. Hier werden IHP-SiGe-BiCMOS-Komponenten als integrierbare Elektronik in Naturstoffen, wie z. B. Holz, untersucht. Die Entwicklung und Evaluierung von Bauelementen und Gesamttechnologien, die in strahlenbelasteten Umgebungen, wie beispielsweise im Bereich der Teilchenphysik, zur Entwicklung spezieller Detektorelektronik genutzt werden können, wurde ebenfalls fortgesetzt, haben sich jedoch, bedingt durch die Pandemie und beschränkten Zugangszeiten zu Charakterisierungsmöglichkeiten, verzögert. In Kooperation mit der Europäischen Weltraumorganisation (European Space Agency, ESA) wurde das Projekt zur Evaluierung einer fortschrittlichen 130-nm-SiGe-BiCMOS-Technologie des IHP für Anwendungen im Weltraum fortgeführt. Die entwickelten Technologien können darüber hinaus auch in Bereichen wie Medizintechnik Verwendung finden und kombinieren widerstandsfähige Digital- und HF-Elektronik. Die Erforschung neuer Prozesse, Bauelemente und Technologien, z. B. im Bereich der widerstandsbasierten Hafniumdioxidzellen (sogenannte memristive Zellen), wurde auf Basis neuer Prozessmöglichkeiten weitergeführt. Die ALD-Anlage zur Abscheidung der funktionalen Schichten unter hochqualitativen Prozessbedingungen steht nun in verschiedenen Projekten zur Verfügung und unterstützt Anwendungen im Bereich hardwarebasierter Künstlicher Intelligenz (KI) und neuromorphen Computing. Die Projekte laufen in enger Zusammenarbeit mit den Forschungsprogrammen Materialien für die Mikro- und Nanoelektronik und Kommunikations- und eingebettete Systemarchitekturen am IHP. Sie sind damit ein gutes Beispiel für die vertikale Zusammenarbeit. Ein weiteres Beispiel dieser guten Zusammenarbeit ist die Integration von 2D-Materialien in 200-mm-Si-Technologien. Neue Projekte konnten durch die Abteilung Materials Research akquiriert werden. Der Schwerpunkt liegt hier mittlerweile auf einer geeigneten Co-Integrationsplattform für die 2D-Graphenschichten mit einer SiN-basierten Photonik-Umgebung. Das GIMMIK-Projekt steht kurz vor dem Abschluss und wird zusammen mit nationalen Industriepartnern, wie AIXTRON und Infineon, Prozesse entwickeln, um eine Bauelementfertigung auf 200-mm-Waferlevel zu ermöglichen. Ergänzt wurden diese Aktivitäten durch das vom Land geförderte GeTiT-Projekt. In Zusammenarbeit mit der TH Wildau forscht das IHP hier an neuen chipletbasierten Transfermethodiken für 2D-Materialien, um diese unter industriellen Bedingungen anzuwenden. Als neues Forschungsgebiet werden zunehmend Projekte im Bereich Quantentechnologien (QT) erschlossen. Im QUASAR-Projekt werden zusammen mit Infineon, dem Fraunhofer IPMS und Partnern der RWTH Aachen eine Technologieplattform entwickelt, die elektrostatische, SiGe-basierte Qubit-Architekturen nutzt. Diese Plattformen

Extension of High Performance Si Technologies

For the development of novel devices and technologies, skills from different research groups of the Technology Department are used. All of them are engaged in the research of new device and module concepts for Si-based platforms as well as technology developments and extensions based on SiGe-BiCMOS platforms for special applications. After successfully completing the TARANTO project with the goal of developing the world's most advanced SiGe-BiCMOS technology, IHP is now dedicated to further transferring this SG13G3 technology into the institute's own research service. Furthermore, numerous projects were successfully continued in 2021, such as the INTENS project, which is funded by the Federal State of Brandenburg. Here, IHP-SiGe-BiCMOS components are investigated as integrable electronics in natural materials, such as wood. The development and evaluation of devices and overall technologies that can be used in radiation-stressed environments, such as in the field of particle physics, to develop specialized detector electronics has also continued, but has been delayed due to the pandemic and limited access times to characterization capabilities. In cooperation with the European Space Agency (ESA), the project to evaluate an advanced 130 nm SiGe BiCMOS technology from IHP for applications in space continued. The developed technologies can also be used in areas such as medical technology, combining resilient digital and RF electronics. Research into new processes, devices and technologies, e.g. in the field of resistance-based hafnium dioxide cells (so-called memristive cells), was continued on the basis of new process options. The ALD facility for the deposition of functional layers under high-quality process conditions is now available in various projects and supports applications in the field of hardware-based artificial intelligence (AI) and neuromorphic computing. The projects are running in close collaboration with the Materials for Micro- and Nanoelectronics and Communication- and Embedded System Architectures research programs at IHP. They are thus a good example of vertical collaboration. Another example of this good collaboration is the integration of 2D materials into 200 mm Si technologies. New projects were acquired by the Materials Research department. The focus here is now on a suitable co-integration platform for the 2D graphene layers with a SiN-based photonics environment. The GIMMIK project is nearing completion and will work with national industry partners, such as AIXTRON and Infineon, to develop processes to enable device fabrication at the 200 mm wafer level. These activities were complemented by the GeTiT project funded by the state of Brandenburg. In cooperation with TH Wildau, IHP is conducting research here on new chiplet-based transfer methodologies for 2D materials for their application under industrial conditions. As a new research area, projects in the field of quantum technologies (QT) are increasingly being developed. In the QUASAR project, together with Infineon, Fraunhofer IPMS and partners from RWTH-Aachen, a technology platform is being developed using electrostatic SiGe-based qubit architectures. These platforms have the potential of high scalability and thus efficient on-chip error correction. Here, IHP contributes its expertise in material growth of the special SiGe substrates. Another topic in the QT area is the development of usable cryo-electronics. Most quantum systems for future quantum computing applications only work at temperatures below 4K, but require electrodynamic manipulation e.g. by an appropriate high frequency signal. For this, the electronics must be

haben das Potential einer hohen Skalierbarkeit und damit einer effizienten Fehlerkorrektur auf dem Chip. Das IHP steuert hier seine Kompetenz im Bereich des Materialwachstums der speziellen SiGe-Substrate bei. Eine weitere Thematik im QT-Bereich ist die Entwicklung einer nutzbaren Kryo-Elektronik. Die meisten Quantensysteme für zukünftige Quantencomputing-Anwendungen funktionieren nur bei Temperaturen unterhalb von 4K, verlangen jedoch eine elektrodynamische Manipulation, z. B. durch ein entsprechendes Hochfrequenzsignal. Dafür muss die Elektronik auch bei diesen geringen Temperaturen charakterisiert, modelliert und funktionsfähig sein und durch ein sogenanntes Prozess-Design-Kit abgebildet sein. Nur damit lassen sich dann integrierte Schaltkreise entwickeln, die zur Manipulation der QC-Systeme genutzt werden können. Dieses Ziel verfolgt das HiQuP-Projekt, in welchem das Forschungsprogramm zusammen mit dem Forschungsprogramm Hochfrequenz-Schaltungen entsprechende Plattformen und Schaltkreise entwickelt.

Als weiteres neues Forschungsgebiet konnten im Jahr 2021 zwei Projekte gestartet werden, die sich der Entwicklung von sicherer und robuster Technologiefertigung widmet, um vertrauenswürdige Elektronikfertigung in Deutschland zu ermöglichen. Hierzu zählen das Velektronik- und das HEP-Projekt. Im erstgenannten werden die vom IHP verfolgten Ansätze für einen Split-Manufacturing-Ansatz weiterentwickelt und in Kooperation mit Partnern umgesetzt.

Siliziumphotonik

Die Siliziumphotonik am IHP stützt sich auf eine Prozessumgebung, die auf Basis von Gruppe-IV-Elementen wie Silizium und Germanium neue elektrooptische Technologien erforscht und entwickelt. Diese werden für Anwendungen in der Kommunikation und Sensorik genutzt. Das Forschungsgebiet muss sich jedoch zunehmend auf die Integration neuer Materialien in diese elektrooptischen Technologien, wie z. B. SiGe-BiCMOS, fokussieren, um zukünftigen Anforderungen gerecht werden zu können. Dies ist notwendig, da Silizium und Germanium in ihren elektrooptischen Eigenschaften begrenzt sind und so speziell für die Integration von Modulatoren und Lichtquellen auch alternative Wege erforscht werden müssen. Aktuell wird dies in enger Zusammenarbeit mit Partnern umgesetzt. Das IHP hat aber begonnen eine neue Prozessbasis aufzubauen, um dies zukünftig eigenständig voranzutreiben. Hierfür werden hybride Integrationstechniken für alternative Materialien zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese hybriden Integrationstechniken werden in verschiedenen Forschungsprojekten, wie dem vom BMBF geförderten Projekt PEARLS und dem von der EU geförderten Projekt CALADAN, bearbeitet. Weitere alternative Materialintegrationen in eine CMOS-Plattform auf Wafer Ebene werden im Projekt plaCMOS erforscht. Hier wird die CMOS-Integration von Photonik, Plasmonik und Elektronik für die Massenfertigung von 200-Gbit/s-NRZ-Transceivern für eine kostengünstige Terabit-Konnektivität in Rechenzentren angestrebt. Zentrales Ziel bleibt weiterhin die Entwicklung von photonischen Bauelementen sowie die Integration von photonischen Modulen innerhalb bzw. mit den SiGe-BiCMOS-Basistechnologien. Ein besonderes Highlight war das wiederholte Erreichen eines neuen Weltrekordes für die Bandbreite von Ge-basierten Photodetektoren mit nun 265 GHz! Mit diesem Ergebnis werden aktuelle Bestwerte von konkurrierenden III/V-Bauelementen übertroffen, was zu einem Beitrag in der renommierten Zeitschrift Nature Photonics geführt hat.

characterized, modeled and functional even at these low temperatures, and applicable by a so-called process design kit (PDK). Only with this, an integrated circuit can be developed which could be used to manipulate the QC systems. This goal is being pursued by the HiQuP project in which the research program, together with the RF Circuits research program, is developing appropriate platforms and circuits.

As another new research area, two projects were started in 2021 that are dedicated to the development of secure and robust technology manufacturing to enable trustworthy electronics manufacturing in Germany. These include the Velektronik and the HEP projects. In the former, the approaches pursued by IHP for a split manufacturing approach will be further developed and implemented in cooperation with partners.

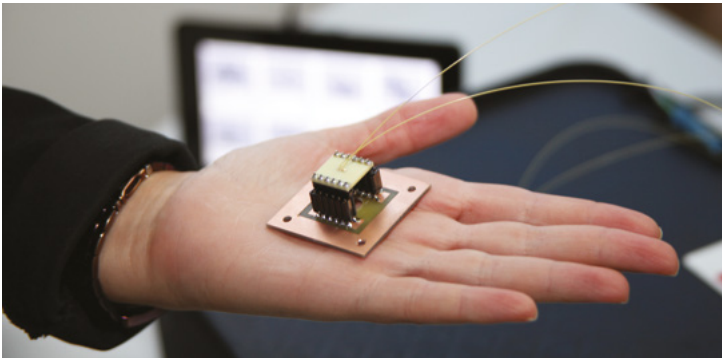
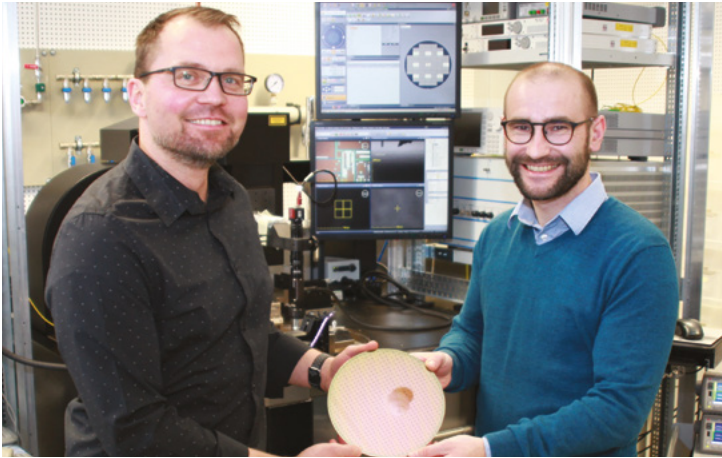
Silicon Photonics

Silicon photonics at IHP is based on a process environment that researches and develops new electro-optical technologies based on Group IV elements such as silicon and germanium. These are used for applications in communications and sensor technology. However, the research field must increasingly focus on the integration of new materials into these electro-optic technologies, such as SiGe-BiCMOS, to meet future requirements. This is necessary because silicon and germanium are limited in their electro-optical properties and thus alternative paths have to be explored especially for the integration of modulators and light sources. Currently, this is being implemented in close cooperation with partners. However, the IHP has started to build up a new process basis to drive this forward independently in the future. For this purpose, hybrid integration techniques for alternative materials will become increasingly important. These hybrid integration techniques are being worked on in various research projects, such as the BMBF-funded PEARLS project and the EU-funded CALADAN project. Other alternative material integrations into a CMOS platform at wafer level are being explored in the plaCMOS project. Here, CMOS integration of photonics, plasmonics and electronics is targeted for mass production of 200 Gbit/s data center transceivers for low-cost terabit connectivity in data centers. The central goal continues to be the development of photonic devices as well as the integration of photonic modules within or with SiGe BiCMOS base technologies. A special highlight was the repeated achievement of a new world record for the bandwidth of Ge-based photodetectors with now 265 GHz! This result surpasses current best values of competing III/V devices, leading to an article in the renowned journal Nature Photonics.

The co-integration of silicon organic hybrid devices is another focus of the work. For this purpose, special integration techniques have been developed that allow backside integration of organic

Die Co-Integration von Silizium-Organik-Hybrid-Bauelementen ist ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten. Hierfür wurden spezielle Integrationsstechniken entwickelt, die eine rückseitige Integration von organischen Materialien und damit eine räumliche Trennung zur elektrooptischen Umgebung erlauben. Basierend auf diesem Ansatz wurden neue Projekte für sensorische Anwendungen (EU-BioPIC) initiiert, weitere sind in Vorbereitung. Im Jahr 2021 konnte die Idee dieser Sensorentwicklungen als StartUp Initiative HyPhoX weiterentwickelt werden und erfolgreich am Leibniz-Gründerwettbewerb teilnehmen.

materials and thus spatial separation from the electro-optical environment. Based on this approach, new projects for sensory applications (EU-BioPIC) have been initiated and more are in preparation. In 2021, the idea of these sensor developments was further developed within the StartUp Initiative "HyPhoX" and successfully participated in the Leibniz Start-Up Competition.



Durch die rückseitige Integration organischer Materialien und damit die räumliche Trennung zur elektrooptischen Umgebung können neue Sensoren entwickelt werden. Diese werden im Rahmen der Gründungsinitiative HyPhoX, die erfolgreich am Leibniz-Gründerwettbewerb teilgenommen hat, weiterentwickelt. By backside integration of organic materials, and thus spatial separation from the electro-optical environment, new sensors can be developed. These will be further developed as part of the HyPhoX start-up initiative, which successfully participated in the Leibniz Start-Up Competition.

Heterointegration von Bauelementen und Technologien

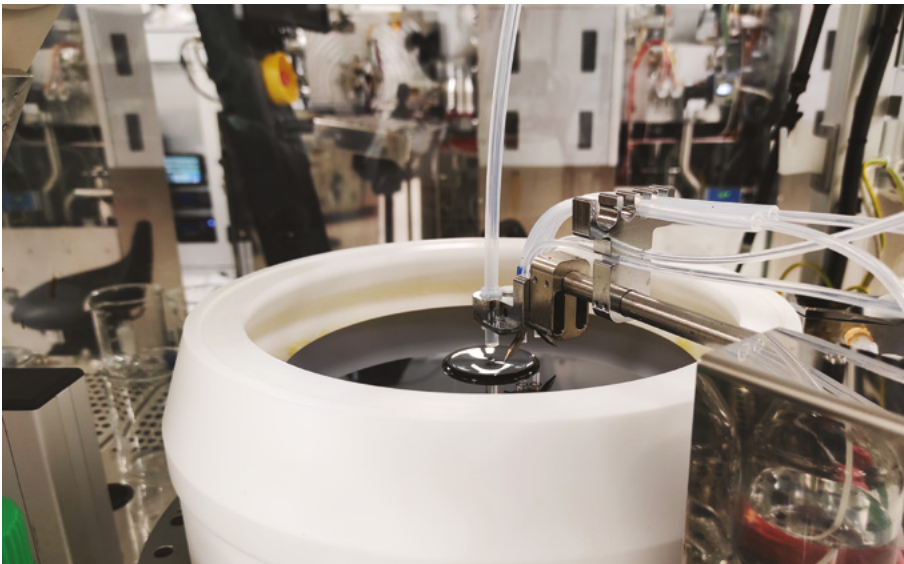
Heterointegrationsansätze bilden zukünftig die Basis der IHP-Technologien, um die Integration neuer Funktionalitäten mit den vorhandenen SiGe-BiCMOS- und photonischen Basistechnologien zu ermöglichen. Dabei werden die Entwicklungen dieses Forschungsgebietes zunehmend dafür genutzt, die inhaltlichen Aspekte anderer Forschungsthemen der Technologie zu verbinden. Sie bilden damit eine wichtige Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Basistechnologien. Ein wesentlicher Komplex sind hier die Entwicklungen im Bereich des sogenannten Layer-Transfers und die Arbeiten im PEARLS- und CALADAN-Projekt. Hierbei werden beispielsweise auf 200 mm prozessierte Si- oder SiGe-Layer mit speziell vorprozessierten Zielwafern verbunden und weiter verarbeitet. Zukünftig sollen diese Techniken in neuartigen Integrationsansätzen Verwendung finden und durch neue Prozesstechniken, wie einem Transferdruckverfahren für Chiplet-Layer-Transfer,

Heterointegration of Devices and Technologies

Heterointegration approaches will form the basis of IHP technologies in the future to enable the integration of new functionalities with existing SiGe BiCMOS and photonic enabling technologies. In this context, the developments in this research area will be increasingly used to combine the content aspects of other research topics of the technology. Thus, they will form an important basis for the development of future enabling technologies. An essential complex here are the developments of the so-called layer transfer and the work in the PEARLS and CALADAN projects. Here, for example, Si or SiGe layers processed to 8" are connected with specially preprocessed target wafers and processed further. In the future, these techniques will be used in novel integration approaches and extended by new process technologies, such as a transfer printing process for chiplet layer transfer. Process developments based on metal-to-metal bonding were

erweitert werden. Die Prozessentwicklungen auf Basis von Metall-zu-Metall-Verbindungen wurden 2021 unter Nutzung des neuen Hochvakuum-Bonding-Equipments erfolgreich weitergeführt. Insbesondere sind hier die Aluminium-zu-Aluminium-Ansätze von entscheidender Bedeutung. Sie werden zukünftig für hybride Verbindungen von aktiven Interposern mit SiGe-BiCMOS und auch skalierten CMOS-Technologien genutzt werden. Hier werden thermisch und elektrisch leitfähige vertikale Verbindungen zwischen verschiedenen Wafern realisiert. Ergänzt werden diese Techniken durch Prozesse für temporäre und permanente Waferverbindungen, die durch die Installation neuer Anlagen zum gezielten Abdünnen und spezieller Kantenbearbeitungen, unter anderem für die Herstellung strukturierter Metalllagen auf der Waferrückseite, genutzt werden können. Auch chipletbasierte Verbindungsmethoden nehmen wie erwähnt an Bedeutung zu. Das vom BMBF geförderte Projekt T-KOS fertigt hierfür notwendige Interposer bzw. SiGe-BiCMOS-Wafer, um darauf aufbauend, neue InP-Chipletintegrationen mit dem Partnerinstitut FBH zu ermöglichen.

successfully continued in 2021 using the new high-vacuum bonding equipment. In particular, aluminum-to-aluminum approaches are crucial here and will be used in the future for hybrid interconnections of active interposers with SiGe-BiCMOS and also scaled CMOS technologies. Here, thermally and electrically conductive vertical interconnects between different wafers will be realized. These techniques are complemented by processes for temporary and permanent wafer interconnects, which can be exploited by installing new equipment for targeted thinning and special edge processing, including the production of patterned metal layers on the wafer backside. Chiplet-based interconnection methods are also growing in importance, as mentioned. The T-KOS project, which is funded by the BMBF, is producing the necessary interposers or SiGe-BiCMOS wafers to enable new InP chiplet integrations with the partner institute FBH.



Im Nanolab
In the Nanolab

IHP-Technologien für den Forschungsservice

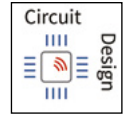
Alle F&E-Aktivitäten aus den unterschiedlichen Forschergruppen haben weiterhin ein wesentliches gemeinsames Ziel, welches das Alleinstellungsmerkmal des IHP ist. Es ist, ausgewählte Ergebnisse des Forschungsprogramms Technologien für smarte Systeme in den IHP-Forschungsservice zu überführen. Diese Technologien werden dann regelmäßig internen und externen Partnern für Schaltungsentwicklungen im Rahmen von Multi-Projekt-Wafer (MPW)-Abläufen und in Zusammenarbeit mit der IHP Solutions zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden auch Einzelprozesse und Modulentwicklungen an Forschungs- und Industriepartnern angeboten. Aktuelle Schwerpunkte sind weiterhin die gezielte Stabilisierung der Elektronisch-Photonischen-IC (EPIC)-Technologien sowie Weiterentwicklungen des Technologieangebotes in der 130-nm-SiGe-BiCMOS-Familie. Weiterführende Prozess-Design-Kit-Entwicklungen, wie z. B. für Tieftemperaturanwendungen, sind ebenfalls im Fokus der Aktivitäten.

IHP Technologies for the Research Service

All R&D activities from the different research groups continue to have one essential common goal, which is a unique selling point of the IHP. This goal is to transfer selected results from the Technologies for Smart Systems research program to the IHP research service. These technologies are then regularly made available to internal and external partners for circuit developments as part of multi-project wafer (MPW) workflows and in collaboration with IHP Solutions. In addition, single process and module developments are also offered to research and industry partners. Current focus areas continue to be the targeted stabilization of Electronic Photonic IC (EPIC) technologies and further developments of the technology offering in the 130 nm SiGe BiCMOS family. Further process design kit developments, such as for low-temperature applications, are also in the focus of the activities.

Hochfrequenz-Schaltungen

RF Circuits



Im Forschungsprogramm Hochfrequenz-Schaltungen werden integrierte Mikrowellen- und Millimeterwellen-Schaltungen, Breitband-Mischsignal-Schaltungen sowie Schaltungen mit hoher Energieeffizienz für die Kommunikation und die Sensorik entworfen und realisiert.

In the research program RF Circuits integrated microwave- and millimeter-wave circuits, broadband mixed-signal circuits, and circuits with high energy efficiency for communication and sensing applications are designed and realized.

Millimeterwellen- und THz-Sensorschaltungen

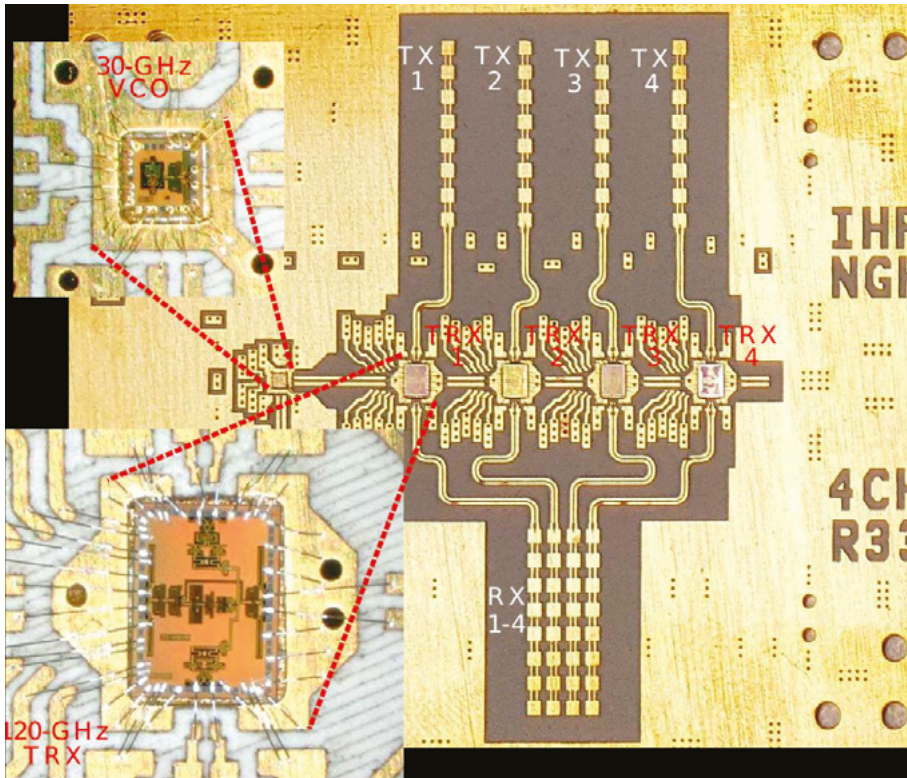
Innerhalb des Forschungsprogramms Hochfrequenz-Schaltungen ist die Realisierung von integrierten Millimeterwellen-Schaltungen ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt. Dazu zählen sowohl Sende- und Empfangsschaltungen als auch Frequenz-Synthesizer für Systeme mit Arbeitsfrequenzen bis zu 720 GHz. Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben konzentrieren sich auf den Entwurf von Schaltungen für die IHP-eigenen SiGe-BiCMOS-Prozesse. In der Zukunft sollen Radarsensoren in robusten und hochauflösenden Systemen eingesetzt werden, die neuartige, innovative Anwendungen im Bereich der kontaktlosen Sensorik und mehrdimensionalen Umfelderkennung mit hohem Miniaturisierungsgrad ermöglichen. Um vielfältige Anwendungsfälle vom einfachen Radarsensor bis hin zu Multiple-In-Multiple-Out (MIMO)-Systemen mit den ähnlichen Front-End-ICs bedienen zu können, wurde eine Plattform mit kaskadierbaren Radar-ICs entwickelt. Die Palette der entwickelten Radartransceiver deckt Arbeitsfrequenzen von 60 - 320 GHz ab.

Millimeter-Wave & THz Sensor Circuits

One important key activity within the program RF Circuits is the realization of integrated millimeter-wave circuits. In particular, transmit and receive circuits as well as frequency synthesizers with operating frequencies up to 720 GHz are in the focus of the research and development activities, all based on the IHP in-house SiGe BiCMOS processes. In the future, radar sensors shall enable robust and high-resolution systems as well as novel innovative applications in the area of contactless sensing and multidimensional surround scanning with a high level of miniaturization. In order to provide transceiver frontend circuits for many applications ranging from single radar sensors up to multiple-input multiple-output (MIMO) systems, a platform with cascadable radar-ICs was developed. The portfolio contains transceiver ICs targeting operation frequencies from 60 - 320 GHz.



Testboard Multimode-Radarsensor 80 GHz
Test board multimode radar sensor 80 GHz



Skalierbares MIMO-Radarsystem bei 120 GHz
MIMO Scalable Radar System at 120 GHz

Ein spezieller Fokus liegt derzeit auf verbrauchsarme, batteriebetriebene Geräte. In diesem Zusammenhang wurde ein sehr energieeffizienter Radar-Sende- und Empfangs-Chipsatz entwickelt und im Rahmen eines Live-Monitorings von Vitalparametern (Atmung, Herzschlag) demonstriert und verifiziert.

Ein neuer Trend bei den Millimeterwellen-Anwendungen ist die Verbindung von Sensorik- und Kommunikationsfähigkeiten. Um diesem Trend Rechnung zu tragen, werden Radar Chipssets mit Modulations- und Demodulationsmöglichkeiten ausgestattet.

Im Feld der On-Chip-Antennen wurde die schon vorhandene Expertise bei Local-Backside-Etching-Ansätzen durch neue Designs mit Siliziumlinsen erweitert, die zunächst in einer Gasspektroskopie-Anwendung eingesetzt werden. Diese Antennen werden in integrierten Schaltungen zur Analyse des Atemgases durch Gasspektroskopie bei 220 - 270 GHz und 440 - 540 GHz im Dual-Mode eingesetzt. Die Gesamtempfindlichkeit des Systems ist durch die Fokuswirkung der Si-Linsen signifikant verbessert worden. Aktuell wird an der Einführung des Frequenzbandes bei der doppelten Frequenz (440 - 540 GHz) in das System gearbeitet, was die Anwendungsvielfalt der Gasanalyse weiter deutlich erweitern wird.

Die stetige Erforschung des THz-Frequenzbereiches ermöglicht zunehmend Anwendungen im Bereich der Spektroskopie und Sensorik im Rahmen der Materialcharakterisierung. Die laufenden Aktivitäten sind nach wie vor auf die Integration von Mikrofluidik, Nahfeldsensoren und Ausleseelektronik auf einem Chip gerichtet, um so höchst kompakte und preiswerte Lab-on-Chip-Lösungen zu ermöglichen.

A special focus lies on low power, battery powered devices. In this context an ultra-low power radar transceiver chipset was developed, verified and demonstrated during the live monitoring of vital parameters (respiration, heartbeat).

A new trend in millimeter wave applications is the combination of sensing and communication capabilities. This aspect is carefully addressed by the current program to design radar chipsets which are also eligible for communicating data across the sensing nodes.

In the area of on-chip antennas, existing experience in on-chip antennas based on local back-side etching was expanded to new designs with silicon lenses, first developed and demonstrated in gas spectroscopy applications. The antenna was employed in integrated circuits for the analysis of human breath by gas spectroscopy at frequencies of 220 - 270 GHz and 450 - 550 GHz with dual mode options. The overall sensitivity of the system was significantly improved with the Si-lens approach. Currently, the introduction of a second band at twice the frequency (440 - 540 GHz) is under development, which will further broaden the variety of applications.

The continuing technical exploration of the THz range in circuit design increasingly enables applications in the area of spectroscopy and sensing for material characterization. The activities are still focused on the on-chip integration of micro-fluidics, nearfield sensors and readout electronics aiming for highly compact and cost effective lab-on-chip solutions.

Kommunikationsschaltungen für hohe Datenraten

Der Schwerpunkt dieses Teils des Forschungsprogrammes adressiert breitbandige elektronische Schaltungen als entscheidende Komponenten für die glasfasergestützte und drahtlose Breitbandkommunikation. Hier werden neue Konzepte für höchste Datenraten und damit extrem großen Signalbandbreiten entwickelt. Die innovative Kombination von Silizium-Photonik mit der Treiber- bzw. der Verstärkerelektronik auf einem Chip erlaubt die kostengünstige Vollintegration komplexer Systeme in Silizium-Technologie und führt zu einer signifikanten Reduktion parasitärer Elemente an der elektrooptischen Schnittstelle. Hierdurch können neuartige Anwendungen der optischen Verbindungstechnik, z. B. in Datenzentren, bedient werden. Um den permanenten Bedarf nach der Verarbeitung immer größerer Datenmengen erfüllen zu können, werden senderseitig Treiberschaltungen und empfängerseitig Transimpedanz-Verstärker mit immer größerer Signalbandbreite und Linearität entwickelt. Das längerfristige Ziel ist, Datenraten von bis zu 400 Gbit/s pro Faser und Wellenlänge zu ermöglichen, womit dann zukünftig Systemübertragungsraten von 1 Tbit/s und mehr erzielbar sind. Die ultrakompakte Integration mit optischen Komponenten (beispielsweise Laser) ist ein weiteres Forschungsziel. Hier wurde zum Beispiel ein differentieller 120-Gbit/s-Transimpedanz-Verstärker entwickelt.

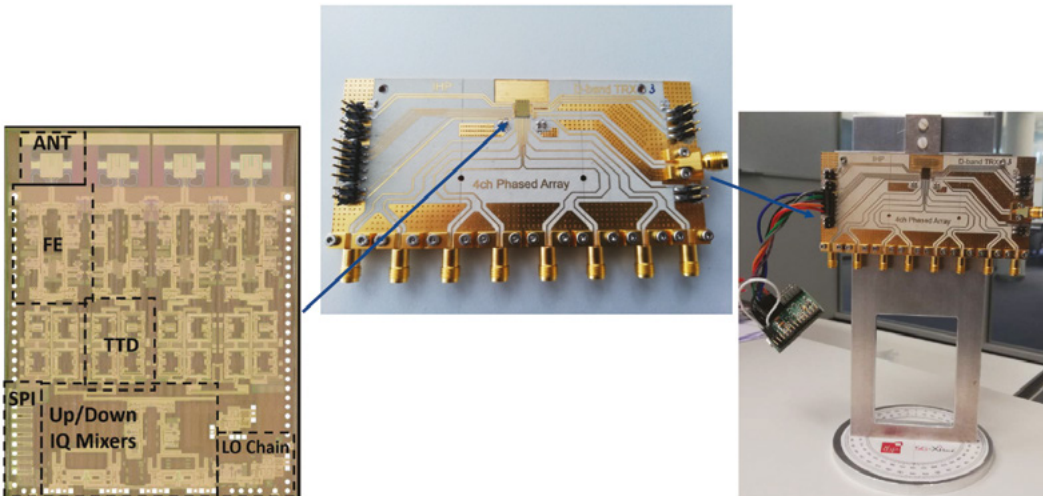
Die Entwicklung von Funk-Frontend-Lösungen für die drahtlose Datenübertragung mit extrem hohen Datenraten (bis zu 100 Gbit/s) hat signifikante Fortschritte gemacht. Typische Anwendungen liegen im Feld der Mobilfunkkommunikation (aktuelle Generation 5G und zukünftige Generationen), Satellitenkommunikation und Nahbereichsanwendungen. Erhebliche Fortschritte wurden bei Sende- und Empfangsschaltungen für die Frequenzbereiche um 26,5 - 29,5 GHz, 50 - 75 GHz, 110 - 170 GHz und 225 - 255 GHz erzielt. In einer Labor demonstration wurden drahtlos Daten mit einer Rate von mehr als 25 Gbit/s mittels QPSK-Modulation und mehr als 100 Gbit/s mittels QAM16-Modulation übertragen. Weiterführende Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die Erhöhung der Trägerfrequenzen auf 300 GHz.

High Data-Rate Communication Circuits

The key activity within this part of the research program addresses broadband electronic circuits as important components for fiber-optical and wireless broadband communication. Here, novel concepts for very high data rates will be developed requiring extremely high signal bandwidth. The innovative combination of Si-Photonic with driver and amplifier electronics on one chip allows the cost effective integration of complex systems in Si-technology and leads to a significant reduction of parasitic elements at the optic-electrical interface. Hereby, novel applications of optical connections, for instance in data centers, become feasible. New driver circuits on the transmitter side and trans-impedance amplifiers on the receiver side with enhanced signal bandwidth and linearity are developed in order to satisfy the permanent demand for increasing data throughput. The long-term goal is to reach data rates of 400 Gbit/s per fiber and wavelength and an overall system data throughput above 1 Tbit/s. The ultra-compact integration with optical components like laser is another research goal. Here, one example is the development of a differential 120 Gbit/s trans-impedance amplifier.

The development of radio frontends for wireless data transmission providing extremely high data rates (up to 100 Gbit/s) has shown significant progress. Typical applications for such circuits lie in the field of mobile communication (5G and beyond), satellite communication and short range communication. Considerable progress has been shown for transceivers at operation frequencies of 26.5 - 29.5 GHz, 50 - 75 GHz, 110 - 170 GHz, and 225 - 255 GHz. Recent laboratory demonstrations prove wireless data transmissions with more than 25 Gbit/s using QPSK modulation and more than 100 Gbit/s using QAM16 modulation. Ongoing research activities in frontend design will focus on carrier frequencies around 300 GHz.

4-Kanal D-Band Phased Array IC - Wireless Link
4 Channel D-Band Phased Array IC - Wireless Link



Energieeffiziente drahtlose und analoge Schaltungen

Die Energieeffizienz von HF-Sende- und Empfangsschaltungen bekommt vor allem bei mobilen elektronischen Anwendungen im Batteriebetrieb eine immer höhere Bedeutung. Dies betrifft z. B. zukünftige drahtlose Sensorknoten und -netzwerke im Internet der Dinge, welche Anwendungen in allen Bereichen des Lebens von der Industrie 4.0-Vision bis zur körpernahen Überwachung von Vitalitätsparametern ermöglichen. In diesem Arbeitsschwerpunkt des Forschungsprogramms HF-Schaltkreise werden hierfür energieeffiziente HF-Schaltungskonzepte und deren Anwendung in der Kommunikation, Lokalisierung und Sensorik erforscht. Die Herausforderungen reichen von robusten und strahlungsharten, effizienten Designmethoden bis hin zu einem intelligenten, systemspezifischen Power-Management.

Neben der Datenübertragung spielt auch die Abstands- oder Positionsbestimmung in vielen Wireless-Netzwerken eine zunehmend wichtigere Rolle. Impulse-Radio-UWB-Schaltungen erlauben in diesem Feld eine besonders gute Ortsauflösung bei hohen Aktualisierungsraten, wodurch sie hier wieder an Bedeutung gewinnen. Aktuell stehen Funklösungen nach dem zukünftigen Standard IEEE 802.15.4z im Fokus des Interesses. In enger Kooperation von System- und Schaltungsentwurf wurde eine 3D-Lokalisierungslösung mit Zentimeter-Genauigkeit entwickelt und demonstriert. Aktuell werden Anwendungsprojekte verfolgt, in denen die Technik als Ergänzung zur Navigation von autonom agierenden Flugdrohnen eingesetzt werden soll, um die Limitierungen der GPS-Technik in anspruchsvollen Situationen (automatische Starts und Landungen, städtisches Umfeld) zu umgehen. Dabei sind Herausforderungen bezüglich sich schnell ändernder Funkkanalbedingungen und der 360°-Rundumsicht von sich schnell bewegenden Flugdrohnen zu bewältigen.

Die Entwicklung von Wake-Up-Empfängern wird weiter fortgesetzt. Solche Empfänger können bei der Verbesserung der Energieeffizienz in drahtlosen Sensornetzwerken eine wichtige Rolle spielen. Derzeit wird ein Ansatz eines speziellen SAW-Resonators verfolgt.

Konverter und Hochgeschwindigkeits-Logikschaltungen

Eine neue Forschungsgruppe wurde etabliert, die sich mit dem Design von Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandlern sowie mit Schaltungen für Neuromorphic-Computing befasst. Eines der ersten Ziele ist, bereits existierende Sende- und Empfangsschaltungen mit ADCs und DACs auszustatten, die als Daten-Interface zum Basisbandprozessor dienen. Konkret wird an einem energieeffizientem ADC für Radarempfänger gearbeitet. Darüber hinaus werden A/D- und D/A-Ansätze entwickelt, um analoge Signale mit Bandbreiten bis zu 30 GHz zu handhaben.

Basierend auf den kürzlich entwickelten RRAM-Strukturen aus der Materialforschung des IHP wurde eine neue Forschungsaktivität zum Thema Schaltungen für Neuromorphic-Computing begonnen. Mithilfe dieser Bauelemente sollen Ansätze zur analogen Signalverarbeitung und zum Analog-Computing untersucht und implementiert werden. Aktuell wird an Schaltungen gearbeitet, die die Auflösung der RRAM-Zellen verbessern sollen und die Programmierung dieser Zellen über ein Standard-Interface ermöglichen.

Energy-Efficient Wireless & Analog Circuits

Energy efficiency of radio transmit and receive circuits becomes more and more important, especially in mobile electronic applications powered by battery. For instance, this affects future wireless sensor nodes and networks in the Internet of Things, which enables applications in all areas of life from industrial automation (Industry 4.0) all the way to body centric vitality monitoring concepts. In this key activity of the research program radio frequency (RF) circuits, energy-efficient RF circuit techniques, and their application in communication, localization, and sensing are explored. The related challenges range from robust, resilient and radiation-hard energy-efficient design methodologies to intelligent system-specific power management solutions.

Besides data transmission the determination of distances and positions of members in wireless networks become more and more important. In this field, Impulse-Radio UWB circuits allow very good spatial precision while having high update rates, which put them back into consideration again. Today, radio circuits following the standard IEEE 802.15.4z are of interest. In tight collaboration of the system and circuit design a 3D-localization solution with centimeter accuracy was developed and demonstrated. Currently, application projects target the deployment of this technique as an extension for the navigation of autonomous flying drones in addition to GPS-based techniques. The aim is to overcome limitations of GPS in critical situations like automated starting and landing as well as in urban areas. Current challenges are the rapid change in radio channel conditions of flying drones and securing their 360° radio connectivity while moving.

The development of wake-up receivers continues. Such receivers can play an important role in improving the energy efficiency of wireless sensor networks. Currently, one ongoing project follows an approach of using a special SAW resonator.

Converters & High-Speed Logic Circuits

A new research group has been established focusing on circuit design research and development in the field of analog-to-digital and digital-to-analog converters, as well as in the area of neuromorphic computing. One of the first targets is to expand already existing transceiver front-ends by ADC and DAC on-chip interfaces to baseband processors. One activity provides an energy-efficient ADC interface to Radar receiver front-ends. Another activity focuses on high-speed A/D and D/A solutions, which shall handle analog signals with bandwidth up to 30 GHz.

Based on recently developed RRAM devices a new research activity has been started dealing with neuromorphic computing. Here, current topics are investigating RRAM-based analog signal processing approaches, improving the RRAM resolution by circuit design techniques, and development of an RRAM-cell programming IC.

Kommunikations- und eingebettete Systemarchitekturen

Communication and Embedded System Architectures



Um den vertikalen Ansatz des IHP zu unterstützen, bezieht sich eine der Schlüsselrollen auf Systemarchitekturen der Kommunikation und allgemein auf eingebettete Systeme. Die Abteilung System Architectures ist in vier Forschungsteams organisiert, die sich mit drahtlosen Breitbandkommunikationssystemen, Entwurfs- und Testmethoden, Hardware Security sowie fehlertolerantem Computing befassen. Die Arbeitsgruppe Hardware-Security entstand aus der abteilungsübergreifenden Forschungsgruppe Total Resilience und ist seit September 2021 der Abteilung System Architectures zugeordnet. Zwei der vier Arbeitsgruppen betreiben parallel Joint Lab mit Universitäten aus Brandenburg und Berlin. In 2021 wurde von den Wissenschaftlern der Arbeitsgruppen an insgesamt 31 extern finanzierten Projekten gearbeitet. Die Drittmittelfinanzierung lag bei etwa 72 Prozent.

To support the vertical approach of IHP, one of the key roles is related to system architectures of communication and in general to embedded systems. The System Architectures Department is organized into four research teams dealing with wireless broadband communication systems, design and test methods, fault-tolerant computing and hardware security. The Hardware-Security working group emerged from the interdepartmental working group "Total Resilience" and has been assigned to the System Architectures department since September 2021. Two of the four working groups run joint labs with universities from Brandenburg and Berlin. In 2021, the scientists in the working groups worked on a total of 31 externally funded projects. Third-party funding was around 72 percent.

Drahtlose Breitbandkommunikation

Zur Abdeckung des steigenden Bedarfs an Datenraten sind die Erhöhung der spektralen Übertragungseffizienz und die Nutzung weiterer Spektralbereiche, z. B. im Millimeterwellen-Band und im D-Band (~ 140 GHz), notwendig. Insbesondere sind Strahlformung und MIMO-Techniken im Fokus unserer Forschung und Entwicklung. Strahlformung (Beamforming) erlaubt größere Reichweiten für drahtlose Kommunikation und die Verringerung von Interferenz- und Abschattungseffekten. Durch die geringe Wellenlänge kann die Größe des benötigten Antennen-Arrays klein gehalten werden. Weiterhin wird die Belastung der Umwelt durch elektromagnetische Wellen verringert und die Energieeffizienz steigt. Die in der Gruppe Drahtlose Breitbandkommunikation seit langer Zeit laufenden Arbeiten zur Lokalisierung mittels drahtloser Kommunikationssysteme bilden eine exzellente Grundlage für den neuen Themenkomplex Joint-Communication and Sensing (JCAS). Diese Techniken werden unter anderem zur Realisierung von 5G/6G-Netzen weiterentwickelt und eingesetzt.

Als drittes großes IHP-Projekt im Rahmen der europäischen 5G Public Privat Partnership (5GPPP) wurde 5GENESIS im Dezember 2021 erfolgreich abgeschlossen. In diesem Projekt wurden vom IHP mm-Wellen-Links für latenzarme Edge-Computing-Anwendungen entwickelt und eingesetzt. Im November 2021 wurde dazu am IHP eine große abschließende Demonstration der entwickelten 5G-Technik erfolgreich gezeigt. Dazu kam erstmalig das am IHP im

Wireless Broadband Communication

To cover the increasing demand for data rates, the increase in the spectral transmission efficiency and the use of higher spectral ranges, e.g. in the millimetre wave band and in the D band (~ 140 GHz), is necessary. In particular, beam-forming and MIMO techniques are in the focus of our research and development activities. Beamforming allows greater ranges for wireless communication and the reduction of interference and shadowing effects. Due to the short wavelength, the size of the antenna array required can be kept small. Furthermore, the environmental pollution by electromagnetic waves is reduced and the energy efficiency increases. Our long-standing work on localization using wireless communications systems forms an ideal basis for the new topic of Joint Communication and Sensing (JCAS). These technologies are required and used, among other things, to implement 5G/6G networks.

As the third large IHP-project within the H2020-5GPPP initiative, 5GENESIS was successfully completed in December 2021. In this project, mm-wave links for fast and low-latency edge-computing applications were developed and used by the IHP. In November 2021, a large final demonstration of the developed 5G technology was successfully shown at IHP. For this purpose the newly established 5G/6G Testbed at IHP was deployed. This new testbed will be further developed and forms an excellent basis for future project experiments and project work.

Aufbau befindliche 5G/6G-Testbed zum Einsatz. Dieses dient als wichtige Grundlage für weitere Projekte und Demonstrationen.

Im Rahmen des 5G-PPP-Phase-IIIb-Projektes mit dem Akronym 5G-VICTORI wurde die Spezifikation der geplanten Demonstratoren weitgehend abgeschlossen. Ein wesentliches Ziel des IHP in diesem Projekt ist die Erweiterung des Berliner 5G-Testbed durch Einbeziehung des Berliner Hauptbahnhofes für die Versorgung von Reisenden sowie Zügen. Für zwei weitere H2020-EU-Projekte, 5G-CLARITY und 5G-COM-LETE, die in der H2020-5G-PPP-Initiative in der Kategorie beyond 5G angesiedelt sind, wurden wichtige Komponenten entwickelt und erfolgreich getestet. Im Rahmen des BMBF-Projektes 6GKom werden gemeinsam mit dem Fraunhofer IZM und weiteren Partnern skalierbare D-Band-Module für extrem hohe Datenraten entwickelt und prototypisch realisiert.

Das von Dr. Lopacinski beantragte Emmy-Noether-Projekt (DFG) wurde im Sommer 2020 bewilligt. Im Rahmen dieses Projektes werden ultraschnelle MAC-Prozessoren für Datenraten von 100 Gb/s entwickelt. Dieses Projekt ermöglicht es Dr. Lopacinski, eine eigene Forschungsgruppe mit drei Doktoranden aufzubauen und sich so für eine spätere Führungsposition zu qualifizieren. Erste Ergebnisse dieser Arbeiten haben bereits zu einer Reihe hochwertiger Veröffentlichungen geführt.

Auf Basis der geleisteten Arbeiten im Rahmen von europäischen 5G-Projekten wurden im Jahr 2021 zwei neue große BMBF-geförderte Projekte zur Entwicklung von 6G-Technologie gestartet. Im Vorhaben 6G-RIC liegt der Fokus unserer Arbeiten auf der Entwicklung von sub-THz-Kommunikationssystemen sowie rekonfigurierbaren intelligenten Oberflächen (RIS). Im Projekt open6GHub beschäftigt sich das IHP vor allem mit Themen des Joint Communication and Sensing (JCAS) sowie der Verbesserung der Resilienz von Kommunikationssystemen. Im Projekt 6G-RIC wird das Modul 1 (6G Radio Unit and Propagation) vom IHP geleitet.

Am Joint Lab der HU Berlin begann im September 2020 das DFG-Projekt AgileHyBeams, welches sich mit der Entwicklung und Optimierung von Hybrid-Beamforming-Verfahren beschäftigt. Erste Ergebnisse, die auf Kanalmessungen gemeinsam mit dem IHP basieren, konnten 2021 auf einer international renommierten Konferenz (5G-WF'21) veröffentlicht werden.

In the 5G-PPP phase IIIb project with the acronym 5G-VICTORI the specification of the planned demonstrators was largely completed. One of the main goals of the IHP in this project is to expand the 5G test bed in Berlin by integrating Berlin's main train station and supplying passengers and trains with media contents over a 5G-network infrastructure. For two further H2020 EU projects, 5G-CLARITY and 5G-COM-LETE, which are part of the H2020-5G-PPP initiative in the "beyond 5G" category, first components were successfully developed and tested. In a BMBF-funded project on communication in the D-band with the acronym 6GKom, together with Fraunhofer IZM and other partners, scalable D-band modules for extremely high data rates are developed and prototyped.

Dr. Lopacinski's Emmy Noether Project (DFG) was approved in summer 2020. As part of this project, ultra-fast MAC processors for data rates of 100 Gb/s are being developed. This successful acquisition enables Dr. Lopacinski to set up his own research group with three doctoral researchers and thus qualify for a later leading research position. First results of this work have already led to a number of high-level publications.

On the basis of our work on European 5G-projects we were able to acquire two new large BMBF-funded projects on the development of 6G technology in 2021 – 6G-RIC and open6GHub. In 6G-RIC our focus is on sub-THz communication systems and Intelligent Reflective Surfaces (RIS). In open6GHub we deal with topics of Joint communication and sensing (JCAS) as well as techniques for increasing the resilience of communications systems. In 6G-RIC IHP leads the work in Module 1 (6G Radio Unit and Propagation).

At the Joint Lab of the HU Berlin, the DFG project AgileHyBeams began in September 2020, which deals with the development and optimization of hybrid beamforming techniques. First results, based on joint channel measurements with IHP were published at a internationally renowned conference (5G-WF'21).

Abschließende Präsentation der im Rahmen des Projekts 5GENESIS entwickelten 5G-Technologie
Final demonstration of the 5G technology developed within the framework of 5GENESIS project



Design & Testmethodik

Die Forschungsgruppe Design & Testmethodik bearbeitet Themenfelder in den Bereichen neue Designmethoden für zuverlässige Schaltungen sowie Testmethodik am Chip bzw. Wafer. Neue Anforderungen an Fehlertoleranz und Strahlenhärte führen zu innovativen Ansätzen im Schaltkreisdesign, um integrierte Schaltungen in Weltraumanwendungen einsetzen zu können.

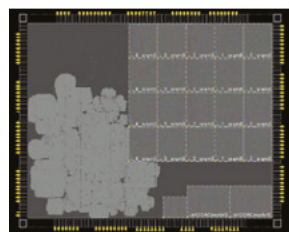
Eine wichtige Aktivität der Gruppe umfasst die Entwicklung neuartiger strahlengehärteter (rad-hard) IPs. Diese sind aus Forschungssicht interessant und wichtig, sollen aber auch zu neuen IP-Blöcken im IHP-IP-Portfolio führen. In diesem Zusammenhang waren 2021 drei Projekte aktiv. Das Projekt SPAD (ILB) widmet sich der Implementierung von rad-hard ADC. Schließlich gibt es zwei Projekte, die eine effektive Vernetzung im Bereich der Weltraumanwendungen ermöglichen: das EU-Projekt ELICSIR und das INTERREG-Projekt SpaceRegion. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Aktivitäten mit der ESA und anderen wichtigen Interessengruppen für Raumfahrtanwendungen.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit im gemeinsamen Labor mit der Universität Potsdam wurde fortgesetzt. Im DFG-Projekt ENROL haben wir uns auf die Analyse der Auswirkungen der Multi-Bit-Upsets und der Mitigationstechnik konzentriert. Die ersten Ergebnisse wurden auf den entsprechenden Veranstaltungen präsentiert.

Ein wichtiger Teil der Aktivitäten der Gruppe bezieht sich auf verschiedene Dienstleistungen: von der Integration über das Testen bis hin zum Designservice. In 2021 bestand die größte Herausforderung in den allgemeinen COVID-19-Beschränkungen, die die Arbeitsorganisation und den Zeitplan für Lieferungen beeinträchtigten. Dennoch gelang es uns sehr erfolgreich, internen und externen Kunden einen kontinuierlichen Service zu bieten.

MORAL-Projekt: Das vollständige RTL-Modell des Peaktop-Kerns, mit Hinzufügung der FPU und der neu gestalteten MPU, wurde entwickelt, in der Simulation verifiziert und kürzlich im FPGA getestet.

MORAL Project: The complete RTL model of the Peaktop core, with additions of the FPU and the redesigned MPU, has been developed, verified in simulation, and more recently tested in FPGA.



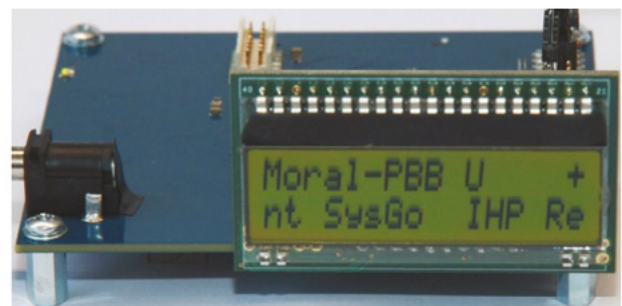
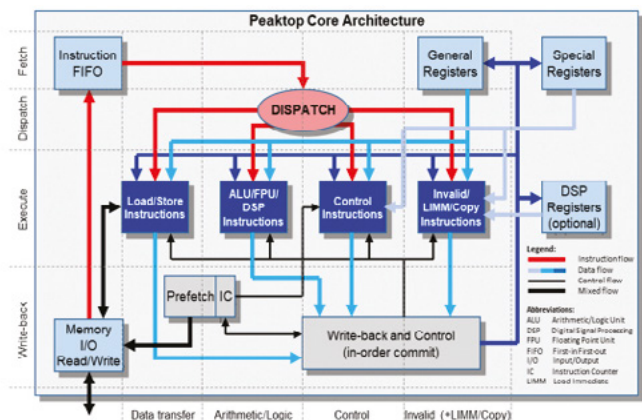
Design & Test Methodology

The research group Design & Test Methodology works on topics in the areas of new design methods for reliable circuits, as well as test methodology on the chip or wafer. New requirements for fault tolerance and radiation hardness lead to innovative approaches at the level of IC design in order to be able to use integrated circuits in space applications.

An important activity of the group includes the development of novel radiation-hardened (rad-hard) IPs. These are interesting and important from a research perspective, but should also lead to new IP blocks in the IHP-IP portfolio. In this context, three projects were active in 2021. The project SPAD (ILB) is dedicated to the implementation of rad-hard ADC. Finally, there are two projects that enable effective networking in the field of space applications: the EU project ELICSIR and the INTERREG project SpaceRegion. Additionally, there are plenty of activities together with ESA and other important stakeholders for space applications.

The successful collaboration in the joint laboratory with the University of Potsdam was continued. In the DFG project ENROL we have been focused on the analysis of the effects of the multi-bit upsets and the mitigation techniques against them. The corresponding initial results have been presented at the related events.

An important part of the activities of the group is related to various services: from integration, over testing to design service. In 2021 the major challenge was related to general COVID-19 restrictions which affected work organisation and timeline of supplies. Nevertheless, we have been very successful in providing continuous service to internal and external customers.



Fault Tolerant Computing

Hochautomatisierte, prozessorbasierte Systeme halten seit einigen Jahren deutlich stärkeren Einzug in viele Bereiche des privaten und professionellen Umfelds. Da sie dabei mit immer wichtigeren Aufgaben betraut werden, die teilweise das Wohlbefinden oder die Gesundheit der Nutzer betreffen, müssen sie steigenden Anforderungen an Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz gerecht werden. Die Arbeitsgruppe zum Thema Fault Tolerant Computing hat als Teil der Abteilung für System Architectures das Ziel, unterschiedliche Methoden zur Minderung von Alterungs- und Fehlereffekten zu untersuchen und diese auf Systemebene zu implementieren. Dadurch bildet sie die Brücke von der reinen Entwicklung von state-of-the-art-Systemen hin zu ihrem Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen mit hohen Anforderungen an deren Zuverlässigkeit.

In den vergangenen Jahren hat die System-Architectures-Abteilung in verschiedenen Projekten aktiv an der Entwicklung von Multiprozessor-Frameworks mit mehreren Sensoren gearbeitet, um die Fehlertoleranz und Lebensdauer der Systeme zu verbessern. Dabei hat sich nun der Schwerpunkt von kommerziellen oder proprietären Prozessoren auf die Arbeit mit Open-Source-Hardware verschoben. Ein Beispiel hierfür ist das 2020 gestartete Projekt Scale4Edge. Nach dem Vorbild des PISA IC wurde hier der Pulpissimo SoC als adaptives Vierkernsystem ausgelegt und mit einer Kontrolleinheit zur Zustandssteuerung ausgelegt. Ausgestattet mit Alterungs- und Temperatursensoren sowie dem im RESCUE-Projekt entwickelten SEU-Sensor ist das System so in der Lage, aktiv auf Umwelteinflüsse oder innere Zustände zu reagieren. Die Konfigurierbarkeit wurde dabei über sogenannte Schattenregister

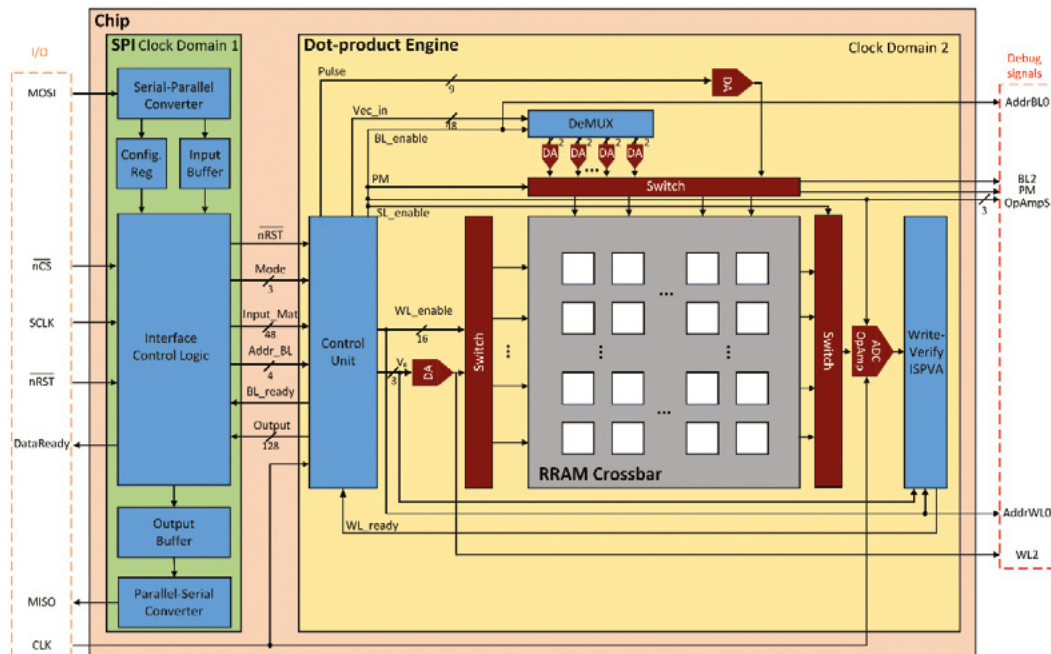
Fault Tolerant Computing

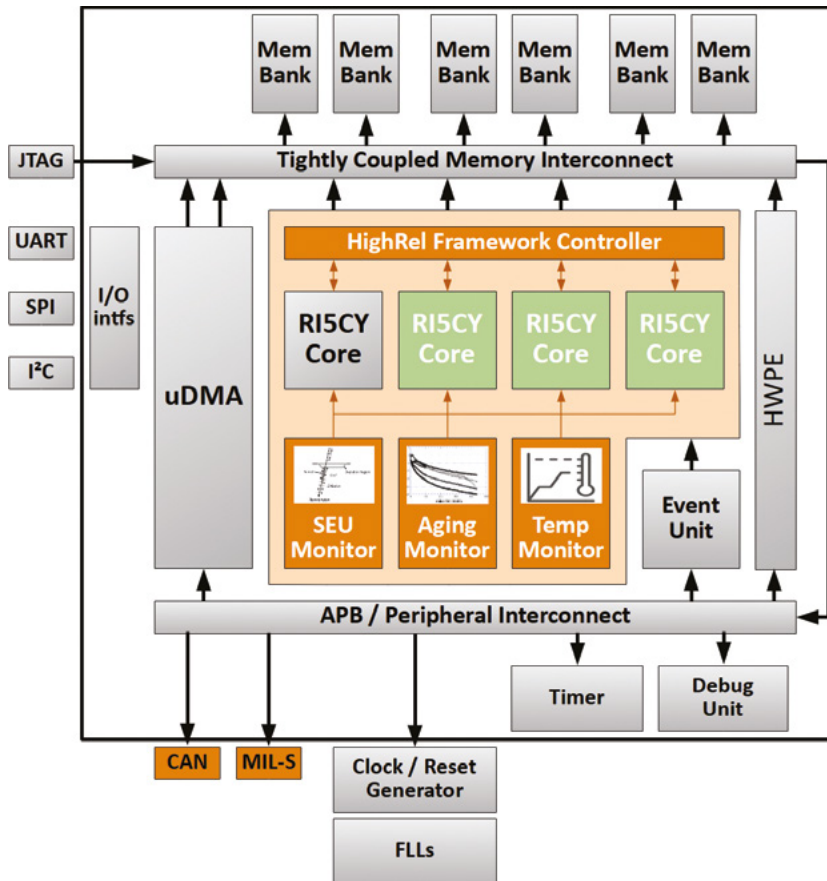
For several years, highly automated, processor-based systems have found their way into many areas of the private and professional environment. Since they are performing increasingly important tasks, some of which affect the well-being or health of the users, they have to meet increasing demands on reliability and fault tolerance. The research team focused on Fault Tolerant Computing, as part of the System Architectures department, aims to investigate different methods for mitigating aging and fault effects and to implement them at the system level. It thus forms the bridge from the pure research of fault tolerant systems to their use in safety-critical applications with high demands on their reliability.

In the past few years, the department has been actively involved in various projects on the development of multiprocessor frameworks with multiple sensors in order to improve the fault tolerance and service life of the systems. The focus has now shifted from commercial or proprietary processors to working with open source hardware. One example of this is the Scale4Edge project launched in 2020. Following the example of the PISA IC, the Pulpissimo SoC was re-designed as an adaptive four-core system and extended with a special control unit for status control. Equipped with aging and temperature sensors, as well as the SEU sensor developed in the RESCUE project, the system is able to react actively to environmental influences or internal conditions. The configurability was ensured via so-called shadow registers. These additional memory cells, actually developed for system recovery, are used in Scale4Edge to mirror the status of each processor into the control and data path of another processor within a few cycles. This

Das Bild zeigt den schematischen Aufbau der sogenannten Dot-product Engine – unseren Prototypen für einen RRAM-basierten Beschleuniger für Matrix-Vektor-Multiplikationen. Zu sehen sind links die SPI-Schnittstelle in grün, in der Mitte die weiß gefärbten RRAM-Zellen in Array-Anordnung, darum die rot markierten analogen Bauteile wie ADCs, DACs und Schalter sowie in blau die digitalen Bauteile zur Programmierung der Zelle (Wite-Verify ISPVA) und der Control-Unit für die Ablaufsteuerung.

The picture shows the schematic structure of the so-called dot-product engine - our prototype for an RRAM-based accelerator for matrix-vector multiplications. On the left you can see the SPI interface in green, in the middle the white colored RRAM cells in Array-arrangement, around them the red marked analog components like ADCs, DACs and switches, and in blue the digital components for programming the cell (Wite-Verify ISPVA) and the control unit for sequencing.





Die Grafik zeigt den schematischen Aufbau unseres TETRISC (TETra Core System based on RISC5) SoC – einer adaptiven und fehlertoleranten RISC5-basierten Quad-Core-Plattform, die gesteuert durch Daten der Zuverlässigkeitssensoren online zwischen diversen Performance und NMR-Modi wechseln kann. Der ursprünglich auf dem Pulpissimo basierende TETRISC SoC wurde um die drei grün dargestellten RISCY-Prozessoren, den orange angedeuteten HighRel Framework Controller, sowie die SEU-, Alterungs- und Temperatursensoren und die beiden zusätzlichen Interfaces CAN und MIL-S erweitert.

The diagram shows the schematic structure of our TETRISC (TETra Core System based on RISC5) SoC - an adaptive and fault-tolerant RISC5-based quad-core platform that can switch online between various performance and NMR modes controlled by reliability sensor data. The TETRISC SoC, originally based on the Pulpissimo, has been extended by the three RISCY processors shown in green, the HighRel framework controller indicated in orange, as well as the SEU, aging and temperature sensors and the two additional interfaces CAN and MIL-S.

sichergestellt. Diese, eigentlich für die Systemwiederherstellung entwickelten zusätzlichen Speicherzellen, dienen in Scale4Edge dazu, den Zustand jedes Prozessors innerhalb weniger Takte in den Kontroll- und Datenpfad eines anderen Prozessors zu spiegeln. Dadurch können diese zu einem Lockstep-System zusammenschaltet und eventuelle Diskrepanzen bei der Datenverarbeitung erkannt und durch Mehrheitsentscheid behoben werden. Die Arbeiten in diesem Projekt erfolgen in enger Zusammenarbeit mit der Universität Paderborn und Arquimea Deutschland.

Das spannende Thema zuverlässiger RRAM-basierter AI-Beschleuniger ist Kern des BMBF-Projekts KI-PRO. Nachdem 2020 das Design und die Modellierung des auf einem RRAM-Crossbar basierenden Beschleunigers für die Matrix-Vektor-Multiplikation im Fokus stand, konnten diese Arbeiten 2021 inklusive der Interface-Beschreibung abgeschlossen werden und mündeten in einen tape-out. Diese, noch ohne RRAM-Zellen ausgelegte Schaltung, kann nun geprüft und für den finalen Chip verwendet werden. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Entwicklung entsprechender Simulationsmodelle. Basierend auf einem System Verilog Model des Dot Product Engine genannten Beschleunigers, konnte die Inferenzphase eines Multi Layer Perceptrons erfolgreich simuliert und mit einem Datenset für die Erkennung von Brustkrebs als Benchmark gute Ergebnisse erzielt werden. Außerdem ist ein High-Level Model der kachelbasierten Architektur in Entwicklung, um auch die wesentlich komplexeren Convolutional Neural Networks abbilden zu können. Um vor allem die Zuverlässigkeit der Operationen im Beschleuniger sicher zu stellen, fanden weiterhin intensive

enables them to form a lockstep system, where discrepancies in data processing can be recognized and even resolved by majority vote. The tasks in this project are carried out in close cooperation with the University of Paderborn and Arquimea Germany.

The exciting topic of reliable RRAM-based AI accelerators is the core of the BMBF project KI-PRO. After the focus in 2020 was on the design and modelling of the accelerator based on an RRAM crossbar for matrix-vector multiplication, we were able to complete this work in 2020, including the interface description, and perform a tape-out. This resulting circuit, which was designed without RRAM cells, can now be tested and used for the final chip. Another important point was the development of corresponding simulation models. Based on a System Verilog model of the Dot Product Engine called accelerator, the inference phase of a multi-layer perceptron was successfully simulated and good results were achieved with a data set for the detection of breast cancer as a benchmark. In addition, a high-level model of the tile-based architecture is in development in order to be able to map the much more complex convolutional neural networks. In order to ensure, above all, the reliability of the operations in the accelerator, intensive investigations into the variability and susceptibility of the accelerator to errors were carried out. These have shown that the variability between two RRAM cells is a much greater problem than the variability between several cycles of the same cell. In addition, the decrease in the conductivity of the cells over time and thus a shift to other states was identified as a problem. Correction automatisms and fault-aware training of the neural network are examined as countermeasures.

Untersuchungen zur Variabilität und Fehleranfälligkeit des Beschleunigers statt. Diese haben gezeigt, dass die Variabilität zwischen zwei RRAM-Zellen ein wesentlich größeres Problem darstellt, als die Variabilität zwischen mehreren Zyklen derselben Zelle. Außerdem wurde das Nachlassen der Leitfähigkeit der Zellen über die Zeit und somit eine Verschiebung in andere Zustände als Problem identifiziert. Korrektur-Automatismen und Fault Aware Training des Neuronalen Netzes werden als Gegenmaßnahmen untersucht.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt ist die Entwicklung von automatisierten Mechanismen zur Härtung von Systemen. Hier wurden KI-basierte Methoden zur Identifikation von Schwachstellen im System untersucht. Dies umfasst den Vergleich zwischen logistischer Regression und neuronalen Netzen zur ad-hoc Identifizierung kritischer Gatter, um die Fehlersimulation zu beschleunigen sowie den Einsatz graphenbasierter neuronaler Netze zur Erkennung kritischer Flip-Flops. Außerdem wurden im 2021 gestarteten HEP-Projekt erste Schritte zur Erweiterung des von Google entwickelten RISC-V-Instruktionsgenerator für RISC-V-Architekturen unternommen. Hieraus soll ein Framework entstehen, mit dem unter anderem der im Projekt benutzte VexRISC-V-Prozessor automatisch verifiziert und darauf aufbauend gehärtet werden kann.

Hardware Security

Sicherheitsanforderungen an komplexen Systemen wie Internet of Things, drahtlose Sensornetze, Industrie 4.0, Medizin 4.0, autonomes Fahren und viele andere sind hoch, da diese Systeme kritische Inhalte zu Personen, Umgebung und Infrastruktur erfassen und bearbeiten. Die Vertraulichkeit der Kommunikation der vernetzten drahtlosen Geräte, ihre (gegenseitige) Authentifizierung, Datenintegrität und viele andere Sicherheitsanforderungen sind mittels kryptographischer Methoden realisierbar. Kryptographische Verfahren sind ein essentieller Teil der komplexen Systeme unserer Zukunft geworden, die ihre zuverlässige und sichere Funktionalität gewährleisten kann.

Implementierung kryptographischer Algorithmen ist eine sehr komplexe Aufgabe, die ohne tiefe Kenntnisse des Designers im Bereich physikalischer Angriffe nicht erfolgreich erfüllt werden kann. Die Vision der Hardware-Security-Gruppe ist es, dass Designer eine security-optimisation-Option in Zukunft verwenden können, die, wenn sie ausgewählt wird, dazu führt, dass ein automatisiertes Design-Tool eine Implementierung von Schaltungen mit einer hohen Resistenz gegen mehrere Angriffe generiert.

Vorarbeiten und Teillösungen zur Reduktion des Erfolges der Manipulations- und Seitenkanalangriffe wurden bis einschließlich August 2021 in der Abteilung Wireless Systems in der Arbeitsgruppe Totale Resilienz durchgeführt. Um die Ergebnisse vollständig und nachvollziehbar darzustellen, sind sie im Abschnitt „Wireless Systems and Applications“ beschrieben. Weitere Untersuchungen sowie Sammeln, Analysieren, Überprüfen und Systematisieren möglicher „Teillösung“-Erkenntnisse mit der Vision, einen Weg zum Integrieren der gewonnenen Kenntnisse in Designflow zu finden, sind die Hauptinhalte der Hardware-Security-Arbeitsgruppe für das nächste Jahr.

Another important focus is the development of automated mechanisms for hardening systems. On the one hand, AI-based methods for identifying weak points in the system were examined here. This includes the comparison between logistic regression and neural networks for the ad-hoc identification of critical gates in order to accelerate the error simulation, as well as the use of graph-based neural networks for the detection of critical flip-flops. In addition, the HEP project, which started in 2021, took the first steps to expand the RISC-V instruction generator for RISC-V architectures developed by Google. This is to create a framework with which, among other things, the VexRISC-V processor used in the project can be automatically verified and then hardened.

Hardware Security

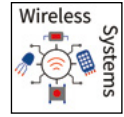
Security requirements for complex systems such as Internet of Things, Wireless Sensor Networks, Industry 4.0, Medicine 4.0, Autonomous Driving, and many others are high, as these systems collect and process personal data, information about the environment and infrastructure, and other security-sensitive data. Cryptographic methods can be used for realizing the confidentiality of the wireless communication of devices, their (mutual) authentication, data integrity, and other security requirements. Cryptographic methods have become an essential part of the complex systems of our future, which can ensure their reliable and secure functionality.

The implementation of cryptographic algorithms is a complex task that cannot be successfully completed by designers without a deep knowledge of physical attacks. The vision of the hardware security group is that designers will be able to use a "security optimization" option that, when selected, will allow to produce an implementation of circuits with high resistance to many different kinds of attacks automatically.

Preliminary work and partial solutions to reduce the success of manipulation and side-channel attacks were carried out up to August 2021 in the Wireless Systems Department in the Total Resilience working group. In order to present the results comprehensively, they are described in section Wireless Systems and Applications. Further investigations as well as the collection, analysis, and systematization of knowledge about the partial solutions, with the vision of finding a way to integrate this knowledge into the design flow, are the main goals of the hardware security working group for the next year.

Drahtlose Systeme und Anwendungen

Wireless Systems and Applications



Das Programm Drahtlose Systeme und Anwendungen befasst sich mit der Entwicklung komplexer Cyber-Physischer Systeme von Systemen (CPSoS). Dabei wird ein holistischer Ansatz verfolgt, dem intrinsisch eine extrem hohe Komplexität bei der Untersuchung und Realisierung von Lösungen inne wohnt. Es müssen hier sowohl Hardware- als auch Softwareansätze inklusive ihrer Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Die Untersuchungen adressieren alle Anwendungsbereiche, in denen ressourcenbeschränkte Systeme miteinander kommunizieren. Das sind u. a. das Internet der Dinge (IoT), E-Health, Industrie 4.0, Landwirtschaft 4.0 und Umweltmonitoring. Die Kernforschungsthemen sind Energieeffizienz, IT-Sicherheit, Zuverlässigkeit und Resilienz sowie die energieeffiziente Implementierung von Methoden der Künstlichen Intelligenz. Diese Themen werden seit September 2021 in den folgenden Gruppen bearbeitet: Sensornetzwerke und Middleware-Plattformen, Elastic Computing, Resilienz Engineering und Sicherheits Engineering. Die letzten beiden Gruppen sind aus der Gruppe Totale Resilienz hervorgegangen. Das Thema Hardware-Sicherheit wird seit September in der Abteilung System Architectures untersucht.

Im Rahmen des Programms werden zwei Joint Labs betrieben: eines mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg und eines mit der Universität Zielona Gora, Polen. In 2021 wurde von den Wissenschaftlern der Arbeitsgruppen an insgesamt 17 extern finanzierten Projekten gearbeitet. In allen Projekten konnten die wesentlichen Ergebnisse trotz der pandemiebedingten Einschränkungen, entsprechend der ursprünglichen Planung, erreicht werden. Ausschlaggebend hierfür war und ist das extrem hohe Engagement aller Mitarbeitenden.

The Wireless Systems and Applications program deals with the development of complex Cyber-Physical Systems of Systems (CPSoS). A holistic approach is taken, which intrinsically involves an extremely high level of complexity in the investigation and realization of solutions. Both hardware and software approaches, including their dependencies, must be taken into account. The investigations address all application areas in which resource-constrained systems communicate with each other. These include the Internet of Things (IoT), e-health, Industry 4.0, Agriculture 4.0 and environmental monitoring. The core research topics are energy efficiency, security, reliability and resilience and the energy-efficient implementation of artificial intelligence methods. Since September 2021 these topics are researched in the following groups: Sensor Networks and Middleware Platforms, Elastic Computing, Resilience Engineering and Security Engineering. The last two groups have emerged from the Total Resilience group. The topic of hardware security is now investigated in the System Architectures department.

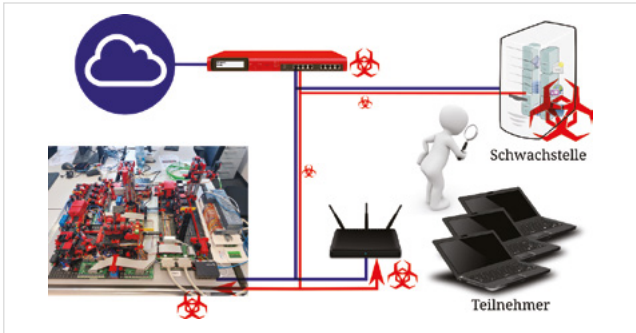
Two joint labs are part of the program: one with the Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg and one with the University of Zielona Gora, Poland. In 2021, scientists from the working groups worked on a total of 17 externally funded projects. In all projects, the main results were achieved according to the original planning despite the pandemic-related restrictions. The decisive factor here was and is the extremely high level of commitment of all employees.

Sensornetzwerke und Middleware-Plattformen

Drahtlose Sensornetze (WSN) bestehen aus kostengünstigen Komponenten mit beschränkten Ressourcen. Sie nehmen eine spannende Entwicklung mit dem Potential, einen signifikant positiven Einfluss auf jeden Aspekt unseres Lebens zu erlangen. Mit dem Aufkommen des Future Internet oder des Internet of Things (IoT) werden drahtlose Sensornetze zu einem wesentlichen Bestandteil des Internets. Neben den relativ bekannten Anwendungen im Bereich des Umweltmonitorings gewinnen Anwendungsfelder wie Smart City und Fabrikautomatisierung kontinuierlich an Bedeutung. In diesen Anwendungsgebieten werden drahtlose Sensornetze mehr und mehr als Teil der Netzwerke betrachtet. Im Bereich des Heimatschutzes (Homeland Security)

Sensor Networks and Middleware Platforms

Wireless sensor networks (WSNs) consist of low-cost components with limited resources. They are experiencing an exciting evolution with the potential of making a significantly positive impact on every aspect of our lives. With the advent of the Future Internet or the Internet of Things (IoT), wireless sensor networks are becoming an essential part of the Internet. In addition to the relatively well-known applications in the field of environmental monitoring, application areas such as smart city and factory automation are continuously gaining importance. In these application areas, wireless sensor networks are being more and more considered as part of the networks. In the field of homeland security, wireless sensor networks are seen as a potential



Fischertechnik „Produktionsanlage“
Fischertechnik "production plant"

werden drahtlose Sensornetze als ein potentielles Mittel zur Überwachung von kritischen Infrastrukturen wie Stromleitungen, Pipelines etc. angesehen. Ein weiteres wesentliches Anwendungsgebiet sind körpernahe Funknetzwerke in den Bereichen Telemedizin und Telerehabilitation.

Die Arbeitsgruppe Sensornetzwerke und Middleware-Plattformen arbeitete seit November 2017 im Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Cottbus mit und war für die Aspekte IT-Sicherheit und Datenschutz verantwortlich. Die hervorragende Arbeit hat dazu geführt, dass die Förderung des Kompetenzzentrums um zwei Jahre verlängert wurde. Das Kompetenzzentrum IT-Sicherheit KITS wird seit Januar 2020 gefördert und bietet ergänzend zum Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Cottbus Trainings- und Informationsveranstaltungen im Bereich IT-Sicherheit, insbesondere in Hinblick auf Social Engineering und Angriffe gegen Automatisierungsanlagen, an. Trotz der Corona-Pandemie konnten einige Präsenz- bzw. Hybridveranstaltungen durchgeführt werden, allerdings in deutlich kleinerer Zahl als geplant. Als Reaktion auf die pandemische Situation wurde ein hybrides Trainingskonzept umgesetzt das es Teilnehmern erlaubt, Schwachstellenanalysen und die Umsetzung von Sicherheitsmechanismen in einer Fischertechnik „Produktionsanlage“ zu erlernen und erleben.

Das umfassende Angebot und die wachsende Sichtbarkeit des IHP in diesem Bereich (IT-Sicherheitstag, Kooperation mit der Zentralen Ansprechstelle Cybercrime des Landes Brandenburg) sind eine ideale Voraussetzung dafür, dass das IHP zur zentralen Anlaufstelle für IT-Sicherheitsfragen in Brandenburg wird. Darüber hinaus konnten mehrere Artikel zu Angriffen gegen Industrieanlagen veröffentlicht werden. Diese Arbeiten werden jetzt in der Gruppe Sicherheits Engineering fortgeführt.

Kryptographie ist ein Mittel, das die Vertraulichkeit der Kommunikation und die Datenintegrität gewährleisten kann. Elliptische-Kurven-Kryptographie (ECC) ermöglicht die sichere Kommunikation auch für eingebettete ressourcenbeschränkte Systeme. Die Fertigung des unifizierten ECC-Beschleunigers, der vier standardisierte elliptische Kurven (EC) unterstützt, der im Rahmen des Projektes Fast-Sign entwickelt wurde, war leider nicht erfolgreich. Das 2021 in die Fertigung eingesteuerte ReDesign ist, obwohl alle Tests erfolgreich durchgeführt wurden, wieder nicht funktional, während die FPGA-Implementierung ein korrektes Verhalten zeigt. Die Untersuchungen zur Resistenz des unifizierten Beschleunigers hinsichtlich Seitenkanalangriffen, die im Rahmen des Projektes Totale Resilienz (D-SY-TR) durchgeführt wurden, waren jedoch sehr erfolgreich. Einerseits konnte nachgewiesen werden,

means for monitoring critical infrastructure such as power lines, pipelines, etc. Another major application area is body-worn (body area) wireless networks in the fields of telemedicine and telerehabilitation.

The Sensor Networks and Middleware Platforms working group has been involved in the Mittelstand 4.0 Competence Center Cottbus since November 2017 and was responsible for the aspects of IT security and data protection. The excellent work has resulted in the funding of the competence center being extended by two years. The IT Security Competence Center KITS has been funded since January 2020 and offers training and information events in the area of IT security, particularly with regard to "social engineering" and attacks against automation systems, to complement the Mittelstand 4.0 Competence Center Cottbus. Despite the Corona pandemic, some face-to-face or hybrid events could be held, albeit in significantly smaller numbers than planned. In response to the pandemic situation, a hybrid training concept was implemented that allows participants to learn and experience analyses and the implementation of security mechanisms in a Fischertechnik "production plant".

The comprehensive range of services and the growing visibility of the IHP in this area (IT Security Day, cooperation with the Central Cybercrime Contact Point of the State of Brandenburg) are ideal prerequisites for the IHP to become the central contact point for IT security issues in Brandenburg. In addition, several articles on attacks against industrial facilities were published. This work is now being continued in the Security Engineering group.

Cryptography is a means that can guarantee the confidentiality of communication and data integrity. Elliptic curve cryptography (ECC) enables secure communications even for embedded resource-constrained systems. Unfortunately, the fabrication of the unified ECC accelerator supporting four standardized elliptic curves (EC) and which was developed as part of the Fast-Sign project, was not successful. The 2021 re-design, which was pushed into manufacturing, although all tests were successfully performed, is again non-functional, while the FPGA implementation shows correct behavior. However, the investigations on the resistance of the unified accelerator with respect to side-channel attacks, performed within the Total Resilience (D-SY-TR) project, were very successful. On the one hand, it was demonstrated that the resistance of the implementations of the B-curves in the unified design is better than in individual designs for single EC, and on the other hand, it was shown that keys can be successfully extracted from the design of the P-curves despite the use of the atomicity principle to ensure side-channel resistance to horizontal attacks. These results led to 1 journal paper, 4 conference papers, 3 online publications, and a patent application. This hardware security work is now being continued in the Hardware Security group in the System Architectures department.

The Sensor Networks and Middleware Platforms group has already started to investigate how Artificial Intelligence (AI) methods can be efficiently implemented or supported by suitable hardware so that they can be used in embedded resource-constrained systems, cf. also "Cornerstones of the Federal Government for an Artificial Intelligence Strategy". Different areas of application are to be considered here. The obvious application is in the field of IT security. In the Morfeus project, which has been part of the Security Engineering group since September 2021 and which is funded in the BMBF call "Methods and Tools for Aggregation and Disaggregation of Processes in the Internet of Things - Resilience and Failure Safety in Open, Emergent

dass die Resistenz der Implementierungen der B-Kurven im unifizierten Design besser ist als in individuellen Designs für einzelne EC, andererseits konnte gezeigt werden, dass aus dem Design der P-Kurven trotz der Verwendung des Atomicity-Prinzips, das Seitenkanalresistenz gegen horizontale Angriffe sicherstellen soll, Schlüssel erfolgreich extrahiert werden können. Diese Ergebnisse führten zu einem Journalpaper, vier Konferenzbeiträgen, drei online-Publikationen und einer Patentanmeldung. Diese Hardware-Security-Arbeiten werden jetzt in der Hardware-Sicherheit-Gruppe in der System-Architectures-Abteilung fortgeführt.

Die Arbeitsgruppe Sensornetzwerke und Middleware-Plattformen hat bereits damit begonnen zu untersuchen, wie Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) effizient so implementiert bzw. durch geeignete Hardware unterstützt werden können, dass sie in eingebetteten ressourcenbeschränkten Systemen eingesetzt werden können, vgl. auch „Eckpunkte der Bundesregierung für eine Strategie Künstliche Intelligenz“. Betrachtet werden sollen hier unterschiedliche Anwendungsgebiete. Naheliegender ist der Einsatz im Bereich IT-Sicherheit. Im Projekt Morfeus, das seit September 2021 zur Gruppe Sicherheits Engineering gehört und das im BMBF-Ausschreibung „Methoden und Werkzeuge für Aggregation und Disaggregation von Prozessen im Internet der Dinge – Resilienz und Ausfallsicherheit in offenen, emergenten IT-Systemen“ gefördert wird, wurde eine skalierbare Hardware-Implementierung für Support Vector Machines entworfen. Mit dieser können z. B. „return oriented programming (RoP)“-Angriffe erkannt werden. Parallel hierzu konnten erste Ansätze zur Überwachung der Korrektheit des Kontrollflusses umgesetzt werden.

Das Projekt KISS_KI, in dem KI-Methoden für die Realisierung von „Intrusion Detection Systemen“ untersucht werden, wurde im August 2020 begonnen. Eine der wissenschaftlichen Fragestellungen ist, ob mit KI-Methoden bei wenig Trainingsdaten eine ausreichend gute Erkennung von bekannten, wie auch bislang unbekanntem Angriffen erreicht werden kann. Um dieses zu untersuchen wurden und werden Ansätze aus der Literatur, die auf den öffentlich zugänglichen SWAT-Daten der Universität Singapur basieren, analysiert und teilweise nachgebaut. In einem nächsten Schritt wird untersucht, ob KI-Ansätze, die mit Datensätzen aus den im Konsortium geplanten hybriden Demonstrator geeignet sind, reale Daten, die beim assoziierten Partner DNWAB aufgezeichnet wurden, zu klassifizieren. Dieses Projekt ist jetzt Teil der Gruppe Elastic Computing.

Das zweite Anwendungsfeld für Methoden der KI ist der Bereich E-Health. Im Projekt Fast Gait soll „freezing of gait“ (FoG) bei Parkinson-Patienten so frühzeitig erkannt werden, dass ein möglicher Sturz durch Auslösen eines Triggersignals noch verhindert werden kann. Wichtig hierfür ist eine gute Datenbasis, die Episoden mit und ohne freezing enthält und in der die Phasen durch Experten eindeutig markiert sind. Hierfür wurde ein ghostbasiertes Sensorknotenset mit einer IR-Fernbedienung kombiniert. Die Datenaufnahme durch Physiotherapeuten wird hierdurch deutlich erleichtert. Das Set wurde bereits durch eine nicht am Projekt beteiligte Klinik eingesetzt. Das Training eines recurrent neural network wurde individualisiert im Sinne, dass Daten der jeweiligen Testperson zu 50 Prozent in das Trainingsset übernommen wurden. Das ist sinnvoll, da die Ausprägung der Veränderung des Gangbildes vom jeweiligen Patienten abhängt. Mit dieser Anpassung wurde eine korrekte Erkennung des freezing of gait von über 95 Prozent erreicht, was deutlich über den in der Literatur berichteten Werten liegt. Dieses herausragende Ergebnis wurde in IEEE Access

IT Systems", a scalable hardware implementation for Support Vector Machines was designed. This can be used, for example, to detect "return oriented programming (RoP)" attacks. In parallel, first approaches for monitoring the correctness of the control flow could be implemented.

The project KISS_KI in which AI methods for the realization of "Intrusion Detection Systems" are investigated, was started in August 2020. One of the scientific questions is whether AI methods can achieve sufficiently good detection of known as well as previously unknown attacks with little training data. To investigate this, approaches from the literature based on publicly available SWAT data from the University of Singapore have been and will be analyzed and partially replicated. The next step is to investigate whether AI approaches using datasets from the hybrid demonstrator planned in the consortium are suitable to classify real data recorded at the associated partner DNWAB. This project is now part of the Elastic Computing group.

The second field of application for AI methods is e-health. In the Fast Gait project, the freezing of gait in Parkinson's patients is to be detected early enough that a possible fall can be prevented by triggering a signal. Important for this is a good database that contains episodes with and without freezing and in which the phases are clearly marked by experts. For this purpose, a ghost-based sensor node set was combined with an IR remote control. This makes data acquisition by physiotherapists much easier. The set has already been used by a clinic not involved in the project. The training of a recurrent neural network was individualized in the sense that 50 percent of the data of the respective test person was transferred to the training set. This is reasonable because the expression of the change in gait pattern depends on the individual patient. With this adaptation, a correct detection of freezing of gait of over 95 percent was achieved, which is significantly higher than the values reported in the literature. This outstanding result was published in IEEE Access. Additionally, a Time Convolutional Network was trained and subsequently implemented on an FPGA using the Vitis-AI Tool Suite. After manual optimization, an average detection of FoG events of 78 percent was achieved, with wide variation between patients. In some patients it is 94 in others only 60 percent. However, the speed of detection is extremely high at less than one millisecond. These results were published at the 16th EAI BodyNets conference. This work is being continued in the Resilience Engineering group.

The projects SmartRiver and SpaceRegion are currently being carried out within the framework of INTERREG funding. The latter project serves the networking of academic and industrial partners on the German and Polish side and has the additional goal of developing robust solutions, i.e. solutions suitable for space missions. The SmartRiver project investigates sensor networks for environmental monitoring for applications such as flood protection, drought monitoring, air quality monitoring. The specifications for the monitoring stations (software and hardware) have been defined and the first components have been successfully implemented. These are now being integrated, tested and will soon be manufactured and deployed in larger quantities. The project is also intended to provide a basis for a smart city platform. Methods and components for data storage and processing are being investigated and developed. These are referred to as the middleware layer - our solution - is called the smartDSM middleware.

veröffentlicht. Zusätzlich wurde ein Time Convolutional Network trainiert und anschließend mit Hilfe der Vitis-AI Tool Suite auf einem FPGA implementiert. Nach der manuellen Optimierung wurde im Durchschnitt eine Erkennung von FoG-Ereignissen von 78 Prozent erreicht, wobei die Schwankungen zwischen den Patienten sehr groß sind. Bei einigen Patienten liegt sie bei 94 bei anderen bei nur 60 Prozent. Die Geschwindigkeit der Erkennung ist mit unter einer Millisekunde jedoch extrem hoch. Diese Ergebnisse wurden bei der 16ten EAI BodyNets Conference veröffentlicht. Diese Arbeiten werden in der Gruppe Resilienz Engineering fortgeführt.

Im Rahmen der INTERREG-Förderung werden aktuell die Projekte SmartRiver und SpaceRegion durchgeführt. Letzteres dient der Vernetzung akademischer und industrieller Partner auf deutscher und polnischer Seite und hat sich zusätzlich zum Ziel gesetzt, robuste, also für Raumfahrtmissionen taugliche, Lösungen zu entwickeln. Im Projekt SmartRiver werden Sensornetze zum Umweltmonitoring für unterschiedliche Anwendungen, wie z. B. Hochwasserschutz, Dürremonitoring, Luftqualitätsmonitoring, untersucht. Es wurden die Spezifikationen für die Messstationen (Soft- und Hardware) festgelegt und erste Komponenten erfolgreich realisiert. Diese werden jetzt integriert, getestet und sollen demnächst in größeren Stückzahlen gefertigt und ausgebracht werden. Das Projekt soll eine Grundlage für die Realisierung einer Smart-City-Plattform bereitstellen. Hierfür werden Methoden für Datenhaltung und -verarbeitung untersucht und entwickelt. Solche Komponenten werden allgemein als Middleware bezeichnet – unsere Lösung ist bzw. wird – die smartDSM Middleware.

In dem BMBF-Projekt AMMOD sollen Messstationen für Biodiversität entwickelt werden. Unsere Aufgaben in dem Projekt sind verbunden mit der Energieversorgung der Messstationen und Energiemonitoring und -management. Wir entwickelten dafür Energiefluß-Sensorik und arbeiten an Softwarelösungen, die anhand der Messungen eine Vorhersage der verfügbaren Energiemenge machen. Die Basisstation soll auch eine Variante der smartDSM Middleware beinhalten, um die Messdaten und Parameter zu speichern und deren Verarbeitung zu ermöglichen.

Die smartDSM Middleware wurde ursprünglich in dem EU-FP7-Projekt e-balance entwickelt. Sie wird in dem Folgeprojekt ebalance-plus eingesetzt und weiter entwickelt. Das EU-H2020-Projekt ebalance-plus soll Lösungen für das Energiemanagement entwerfen. Diese Lösungen sollen die energetische Flexibilität und Resilienz unterstützen. Zusammen mit den Projektpartnern entwickeln wir eine Energie-Management-Plattform auf Basis der Middleware. Die Lösungen werden in vier Demonstratoren evaluiert.

Im Projekt Digital Agricultural Knowledge and Information (DAKIS) konnte ein erster Prototyp eines drahtlosen Sensorknotens zur Erfassung meteorologischer Parameter (Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck, UV-Index, Sonnenscheindauer) mit entsprechender Software zum Auslesen der Sensoren und Übertragung der Sensordaten realisiert werden. Für den langfristigen Betrieb im Feld wurde ein Energy Harvesting-Modul mit Batterie, Solarpanel und Solarladeschaltung entwickelt. Im September 2021 konnten bereits über 30 Feuchtigkeitssensoren in unterschiedlichen Tiefen in eines der Testfelder eingebracht werden.

Im Projekt zUckerrübe wird seit Mai 2021 untersucht, ob mit Hilfe von Drohnen und KI-gestützten Bilderkennungsverfahren Zuckerrüben von Beikräutern unterschieden und die Beikräuter anschließend mit Hilfe von Robotern mechanisch entfernt werden können. Erste Drohnenflüge über dem Testfeld wurden bereits durchgeführt. Dieses Projekt ist jetzt Teil der Gruppe Elastic Computing.



Prototyp einer meteorologischen Station, die im Rahmen des SmartRiver-Projekts entwickelt wurde.

Prototype of a meteorological station developed within the SmartRiver project.

In the BMBF project AMMOD measuring stations for biodiversity will be developed. Our tasks in the project are connected with the energy supply of the measuring stations and energy monitoring and management. For this purpose we developed energy flow sensor technology and work on software solutions which make a prediction of the available energy amount based on the measurements. The base station should also include a variant of the smartDSM middleware to store the measurement data and parameters and to enable their processing.

The smartDSM middleware was originally developed in the EU FP7 project e-balance. It will be further developed and used in the follow-up project ebalance-plus. The EU H2020 project ebalance-plus aims to design solutions for energy management. These solutions shall support energy flexibility and resilience. Together with the project partners, we are developing an energy management platform based on our middleware. The solutions will be evaluated in four demonstrators.

In the Digital Agricultural Knowledge and Information (DAKIS) project, a first prototype of a wireless sensor node for the acquisition of meteorological parameters (air temperature, humidity and pressure, UV index, sunshine duration) with corresponding software for reading the sensors and transmitting the sensor data could be realized. For long-term operation in the field, an energy harvesting module with battery, solar panel and solar charging circuit was developed. In September 2021, more than 30 moisture sensors could already be placed in one of the test fields at different depths.

Since May 2021, the zUckerrübe project has been investigating whether drones and AI-supported image recognition processes can be used to distinguish sugarbeet from weeds and then mechanically remove the weeds with the help of robots. Initial drone flights over the test field have already been conducted. This project is now part of the Elastic Computing group.

Totale Resilienz

Es gibt viele Definitionen von Resilienz, die die Widerstandsfähigkeit beschreiben, d. h. die Fähigkeit, widrige Bedingungen zu überleben, verlorene Funktionalität wiederherzustellen und weiter korrekt zu funktionieren. Angewandt auf (komplexe) technische Systeme, wie Cyber-Physische Systeme von Systemen (CPSoS), ist die Resilienz die Eigenschaft, widrige Arbeitsbedingungen zu antizipieren und nach Möglichkeit sogar zu vermeiden. Das Ziel der Untersuchungen im Rahmen der Totale-Resilienz-Thematik ist, den Entwurf und die Realisierung resilienter Systeme zu ermöglichen. Ein Schwerpunkt der Resilienz Core Gruppe war die Entwicklung von Methoden zur Unterstützung resilienter Funktionalität von CPS(oS). Der andere Aspekt der durchgeführten Arbeiten ist das Engineering resilienter Systeme. Beide Aspekte werden in der neuen Gruppe Resilience Engineering weiter untersucht.

Unsere Literaturrecherchen zu Maßen und Metriken der Resilienz haben gezeigt, dass die Resilienz ein sehr anwendungsorientierter Begriff ist und dass es kein einheitliches Maß bzw. Metriken und Kriterien für die Bewertung sowie auch kein einheitliches Mittel zur Erreichung von der Resilienz technischer Systeme gibt. Wir betrachten Resilienz als Menge der Eigenschaften: Zuverlässigkeit, Datensicherheit und Autonomie. Zuverlässigkeit und Datensicherheit sind sehr eng miteinander verbunden. Autonomie kann als eine große Menge sogenannter SELF-X-Funktionen definiert werden: self-monitoring, self-aware, self-calibrating, self-(re)configuring usw. Das System soll seine Probleme ohne Interaktion durch Menschen lösen können. Hieraus ergeben sich die Mittel zum Erreichen von Resilienz: die Redundanz, kryptographische Methoden und Methoden der Künstlichen Intelligenz. Überlegungen zu theoretischen Aspekten haben wir 2021 in einer Fachzeitschrift veröffentlicht. Das Verständnis schnellen Lernens und Entscheidens biologischer Systeme, z. B. von Oktopussen, kann eine Basis für die Implementierung von verteilten Methoden der KI sein. Unsere Untersuchungen hierzu wurden als Konferenz-Beitrag veröffentlicht.

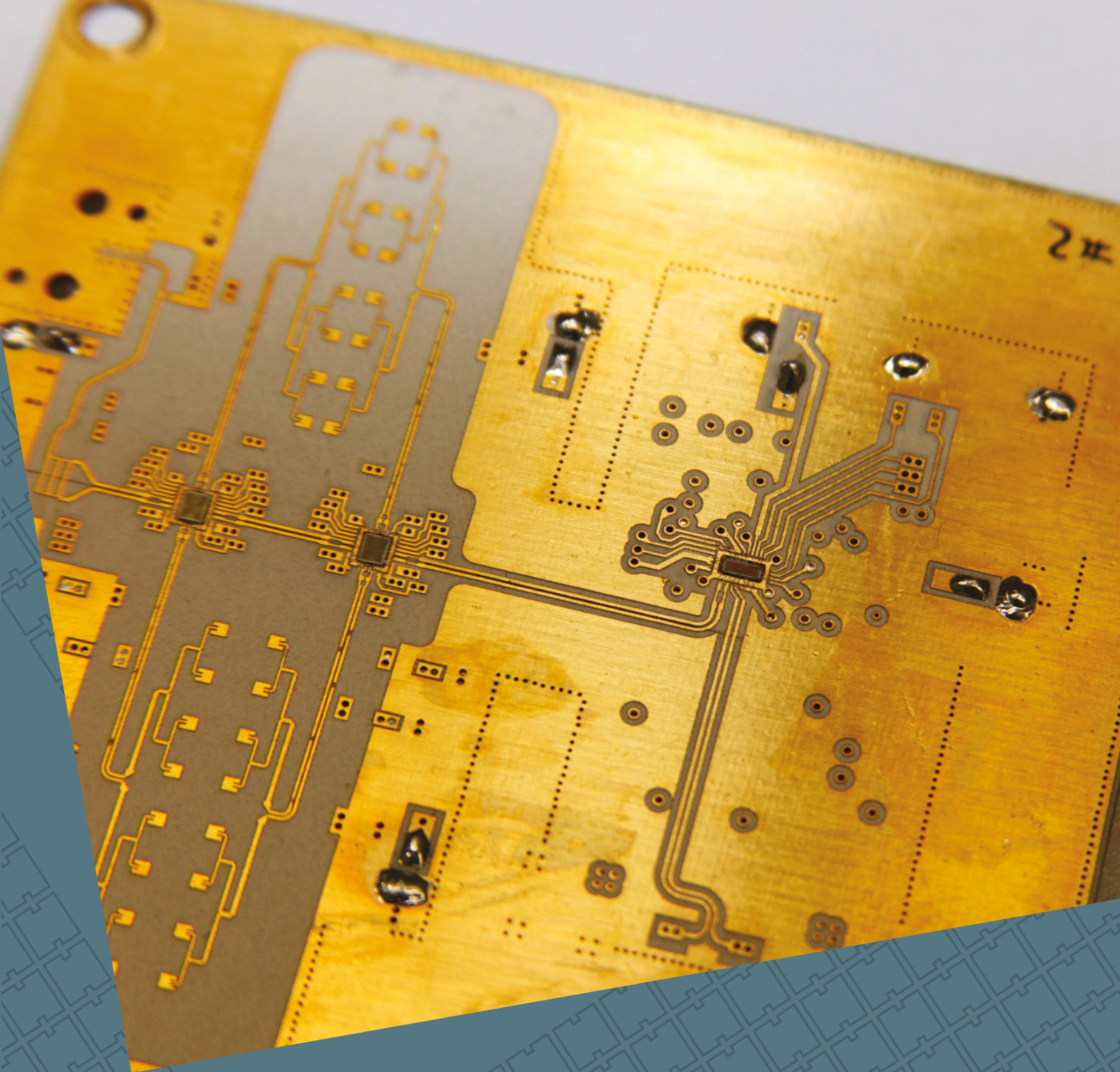
Künstliche Intelligenz ist das Hauptmittel zur Erreichung von Autonomie, aber auch eine zusätzliche Funktionalität, die wiederum zuverlässig, manipulationsfrei und sicher sein muss. Matrizen-Multiplikation sind Basisoperationen von Methoden der KI und sind zeit- und energieaufwendig. Crossbar RRAM-Strukturen können als Basiselement für Hardware-Beschleuniger für KI-Methoden verwendet werden. Die Resistenz der am IHP entwickelten RRAM-Strukturen wurde im Hinblick auf Fehlerinjektionen (auch im Rahmen des Projektes Rescue) teilweise geprüft. Die Ergebnisse wurden 2021 in einer Fachzeitschrift veröffentlicht. Es wurde gezeigt, dass die RRAMs manipuliert werden können. Weitere Untersuchungen von RRAM-Strukturen sind notwendig, um in Zukunft die Schutzmechanismen für KI-Beschleuniger entwickeln zu können. Weitere Untersuchungen bzgl. der Manipulationsresistenz der radiation hard Register (mit IHP-JICG-Transistoren) wurden durchgeführt und bei einer renommierten Konferenz veröffentlicht. Diese Forschung wird in der neuen Hardware-Sicherheitsgruppe in der Abteilung System Architectures fortgesetzt.

Total Resilience

There are many definitions of resilience that describe resistance, i.e. the ability to survive adverse conditions, restore lost functionality and continue to function correctly. Applied to (complex) technical systems, such as cyber-physical systems of systems (CPSoS), resilience is the property of anticipating and, if possible, even avoiding adverse working conditions. The aim of the research in the Total Resilience theme is to enable the design and realization of resilient systems. One focus of the Resilience Core group has been the development of methods to support resilient functionality of CPS(oS). The other aspect of the work carried out is the engineering of resilient systems. Both aspects will be further investigated in the new Resilience Engineering group.

Our literature reviews on measures and metrics of resilience have shown that resilience is a very application-oriented concept, and that there is no single measure, or metrics and criteria for assessment, nor a single means of achieving resilience of engineering systems. We consider resilience as a set of properties: Reliability, Data Security and Autonomy. Reliability and data security are very closely related. Autonomy can be defined as a large set of so called SELF-X functions: self-monitoring, self-aware, self-calibrating, self-(re)configuring, etc. The system should be able to solve its problems without interaction with humans. This provides the means to achieve resilience: redundancy, cryptographic methods and artificial intelligence methods. We have published reflections on theoretical aspects in a scientific journal in 2021. The understanding of fast learning and decision making of biology systems, e.g. octopuses, can be a basis for implementing distributed methods of AI. Our research on this has been published as a conference paper.

Artificial intelligence, is the main means to achieve autonomy, but is also an additional functionality, which in turn must be reliable, tamper-free and secure. Matrix multiplication are basic operations of methods of AI and are time and energy consuming. Crossbar RRAM structures can be used as a basic element of hardware accelerators for AI methods. The resistance of the RRAM structures developed at IHP was partially tested with regard to fault injections (also as part of the Rescue project). The results were published in a scientific journal in 2021. It was shown that the RRAMs can be manipulated. Further investigations of RRAM structures are necessary in order to be able to develop protective mechanisms for AI accelerators in the future. Further research into the tamper resistance of radiation hard registers (using IHP JICG transistors) has been carried out and published at a prestigious conference. This research will be continued in the new hardware security group in the system architectures department.



Ausgewählte Projekte

Selected Projects

Mikrokonfektionierte Terabit/s-fähige optische Transceiver für Datacom-Anwendungen

Micro-assembled Terabit/s Capable Optical Transceivers for Datacom Applications

Der stetig wachsende Bedarf an cloudbasierten Softwareanwendungen setzt Betreiber von Rechenzentren stark unter Druck, und die Pandemie hat diesen Trend noch weiter beschleunigt. Da die Kapazität und Dichte von Serverknoten weiter zunimmt, müssen auch die Verbindungen zwischen diesen Serverknoten die steigende Kapazitätsnachfrage bewältigen. Hersteller und Anbieter der dafür benötigten Hardware schätzen mit einem Bedarf an 800-Gbit/s- und 1,6-Tbit/s-fähigen Transceivern bis 2025.

Trotz der Verwendung komplexer photonisch integrierter Schaltkreise (PICs) die es ermöglichen, eine große Anzahl optischer Komponenten wie Modulatoren, Photodetektoren und Laser sowie Multiplexfunktionen in einem einzigen Chip zu integrieren, erfordert die Herstellung eines optischen Transceivers heute immer noch eine große Menge an aufeinanderfolgenden Fertigungsschritte. So müssen photonische und elektronische Bauelemente, Faserbefestigungselemente, wie Faserblöcke usw., Stück für Stück zusammengebaut werden. Darüber hinaus muss das Testen, um sicherzustellen, dass die Module funktionsfähig sind, Stück für Stück durchgeführt werden, was insbesondere bei hohen Stückzahlen ineffektiv ist. Selbst mit der heutigen Umstellung auf 300-mm-Wafer-Fertigungslinien für die Siliziumphotonik benötigt die erhöhte (im Vergleich zu früheren 200-mm-Wafer-Linien) Menge an Chips, die aus einem einzelnen Wafer extrahiert werden können, eine lineare Erhöhung der Menge an Flip-Chip, Drahtbonden, Faserbefestigungen und anderen Montageschritten, um den Durchsatz aufrechtzuerhalten.

Angesichts der obigen Überlegungen besteht das Ziel von CALADAN darin, die automatisierte Integration von Photonik und Elektronik auf Wafer-Level in Terabit/s-fähige optische Transceiver-Chips unter Verwendung des Micro-Transfer-Printings zu demonstrieren. Diese Transceiver-Chips werden mittels industriellen und skalierbaren Prozessen mit Faserarrays verbunden. Auf diese Weise wird das Projekt CALADAN Durchsatzengpässe in den heutigen Fertigungslinien beseitigen. Zudem werden optische Transceiver zu geringeren Kosten bis zu 50 Prozent im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen hergestellt werden können, wobei $< 0,1$ €/Gbit/s für Durchsätze von über 1 Million Transceivern pro Jahr erreichbar sind. CALADAN soll demonstrieren, wie die Integration von Lasern und elektronischen Schaltkreisen auf einem PIC unter Verwendung des etablierten Micro-Transfer-Printings vollständig auf Wafer-Level erfolgen kann. Ausgehend von bewährten Konzepten aus dem EU-Projekt PIXAPP wird ein neuartiger schneller Faserbefestigungsprozess entwickelt, der die für die Faserbefestigung benötigte Zeit um eine Größenordnung reduziert. Bei Verwendung dieser Techniken betragen die Transceiver-Kosten 0,1 Euro/Gbit/s für Volumina von mindestens 1.000.000 Einheiten.

Das Konsortium, das aus drei KMUs (X-Celeprint, Innolume und ficonTEC), einer LE (EVGroup), drei Forschungsinstituten (IMEC, Tyndall und IHP), einem Transceiver-Hersteller (Mellanox) und einem

The continuously growing popularity of Cloud-based software applications is putting data center operators under severe pressure and the pandemic has accelerated this progress even further. As the capacity and density of server nodes continues to grow, the links between these server nodes need to handle increasing capacity as well. Transceiver manufacturers and data center equipment providers are now anticipating a need for 800 Gbit/s and 1.6 Tbit/s capable transceivers by 2025.

Today, despite the use of complex Photonic Integrated Circuits (PICs) which allow integrating a large number of optical components such as modulators, photodetectors, lasers and multiplexing functions into a single chip, the fabrication of an optical transceiver still requires a large amount of sequential fabrication steps. Indeed photonics (incl. lasers), high-speed electronics, fiber attachment parts such as fiber blocks, V-grooves, etc. need to be assembled piece-by-piece. In addition, testing to ensure operational functionality of the modules also needs to be done piece-by-piece, which is ineffective and costly especially at high production volumes. It is important to note that even with today's move to 300 mm wafer manufacturing lines for Silicon Photonics, the increased (compared to previous 200 mm wafer lines) amount of chips that can be extracted from a single 300mm wafer will require a linear increase in the amount of flip-chip, wirebonding, fiber attachment and other assembly equipment to maintain throughput.

Given the above considerations, the objective of CALADAN is to demonstrate automated, wafer-level integration of photonics and electronics into Terabit/s capable optical engines using micro transfer printing and connect these optical engines with fiber arrays using an industrially scalable vision-based automatic fiber attachment process. In this way, CALADAN will remove throughput bottlenecks in today's assembly lines and will be able to manufacture optical transceivers at 50% less cost compared to conventional solutions, achieving < 0.1 €/Gb/s for throughputs above 1 million transceivers per year. CALADAN will demonstrate how integration of lasers and electronics onto a PIC can be fully done at the wafer-level using the established micro transfer printing technique, thus eliminating this bottleneck. Starting from proven concepts from the EU project PIXAPP, a novel fast fiber attachment process will be demonstrated that reduces the time required for fiber attachment by an order of magnitude. Using these techniques, transceiver cost will be 0.1 Euro/Gb/s for volumes of at least 1,000,000 units.

The consortium, which consists of three SMEs (X-Celeprint, Innolume and ficonTEC), an LE (EVGroup), three research institutes (IMEC, Tyndall and IHP), a transceiver manufacturer (Mellanox) and a multinational (Xilinx) encompasses all the partners to start production of the targeted optical transceivers after the end of the project. Exploitation of the technology will be supported by an end-user (British Telecom), a semiconductor foundry setting up a micro transfer

multinationalen Unternehmen (Xilinx) besteht, umfasst alle Partner, die nach Abschluss des Projekts mit der Produktion der angestrebten optischen Transceiver beginnen können. Das Projekt wird begleitet von einem Endnutzer (British Telecom), einem Halbleiterchiphersteller, der eine Micro-Transfer-Printing-Pilotlinie eingerichtet hat (MICROPRINCE, X-FAB), einem Hersteller optischer Kommunikationstechnik (ADVA) und dem European Photonic Industry Consortium (EPIC).

Das Hauptziel besteht darin, Transceiver mit einer Gesamtkapazität von mindestens 800 Gbit/s und bis zu 1,6 Tbit/s unter Verwendung von 56 GBaud PAM-4-fähiger-Siliziumphotonik und SiGe-BiCMOS-Elektronik zu demonstrieren, insbesondere der erforderlichen linearen Transimpedanzverstärker und Hochgeschwindigkeits-Treiberelektronik. Um dies zu erreichen hat das IHP zusammen mit X-Celeprint eine neue Technologie entwickelt, die kompatibel ist mit dem Micro-Transfer-Printing (Abb. 1a). Die angestrebte Energieeffizienz beträgt 2,5 pJ/Bit für den Empfänger und 3,5 pJ/Bit für den Treiber, wobei letzterer auf eine Ansteuerspannung von 1 V abzielt. Ein erster Treiberschaltkreis ist in Abb. 1b und erste transferierte Schaltkreise sind in Abb. 1c zu sehen.

Das IHP ist verantwortlich für die Entwicklung der Micro-Transfer-Printing-kompatiblen Version seiner 130-nm-SiGe-BiCMOS-Technologie auf einem geeigneten Substrat. Darüber hinaus entwickelt und testet das IHP für den PAM-4-Demonstrator eine 56-GBaud-fähige Treiber- und Empfängerelektronik.

printing Pilot Line (MICROPRINCE, X-FAB), an optical equipment manufacturer (ADVA) and the European Photonic Industry Consortium (EPIC).

The main goal is to demonstrate optical transceivers with a total capacity of at least 800 Gb/s up to 1.6T b/s using 56Gbaud PAM-4 capable Silicon Photonics and SiGe BiCMOS electronics; in particular including the required linear transimpedance amplifiers and high-speed driver electronics using the SiGe BiCMOS process. Towards this, IHP and the collaborator X-Celeprint have developed a micro-transfer-printable technology with released SiGe BiCMOS integrated circuits, as illustrated in Fig. 1a. The target energy efficiency is 2.5pJ/bit for the receiver and 3.5pJ/bit for the driver, the latter targeting 1V drive voltage. A first driver circuit is shown in Fig. 1b and first transfer printed circuits are shown in Fig. 1c.

IHP is responsible for developing the micro transfer printable compatible version of its high performance 130 nm SiGe BiCMOS SG13G2 technology on a suitable silicon-on-insulator substrate. In addition, IHP develops and tests 56Gbaud capable driver and receiver electronics for the PAM-4 demonstrator.

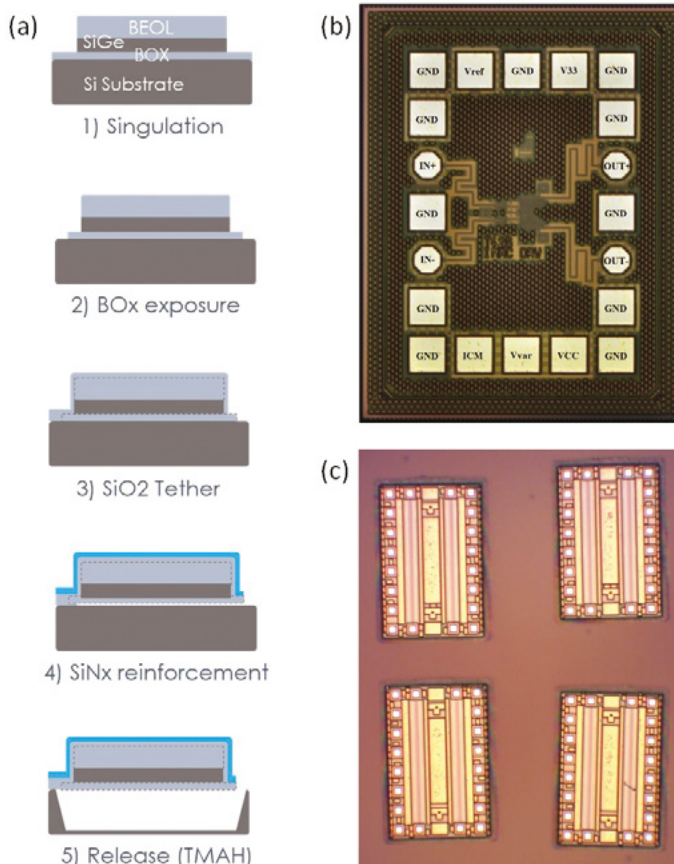


Abb. 1: (a) Freilegung von SiGe BiCMOS integrierten Schaltkreisen für das Micro-Transfer-Printing. (b) Micro-Transfer-Printable Treiberschaltkreis. (c) Transferierte integrierte Schaltkreise.

Fig. 1: (a) Release of a SiGe BiCMOS integrated circuit for Micro-Transfer-Printing. (b) Micro-Transfer-Printable driver circuit in an area of $200 \times 300 \mu\text{m}^2$. (c) Transfer-printed integrated circuits.

Methoden und Werkzeuge zur Erzeugung von Resilienz mittels Selbstrekonfiguration und -überwachung für eingebettete und verteilte Systeme

Methods and Tools to create Resilience by Self-reconfiguration and -observation for Embedded and Distributed Systems

Im BMBF-Projekt MORFEUS beschäftigt sich das IHP zusammen mit der Hochschule Nordhausen, der Universität Passau, Cadence und Dresden Elektronik mit der Diversifizierung von eingebetteten Sensornetzen durch Programmcode-Permutation im Feld. Dies soll, angelehnt an die Biologie, dazu dienen, dass die Resistenz des Netzwerkes gegen Angriffe zunimmt. Angriffe, die auf einem Knoten zum Erfolg führen, können auf einem anderen Knoten schon nicht mehr funktionieren. Der Fokus in diesem Projekt lag dabei auf sogenannten Return-Oriented-Programming (ROP)-Angriffen. Diese Angriffe verändern die Rücksprungadressen und damit den Kontrollfluss eines Programmes so, dass die bereits vorhandenen Befehle in einer anderen Reihenfolge ausgeführt werden. Damit lässt sich schädliches Verhalten erzeugen.

Die Aufgaben des IHP im Konsortium beschäftigen sich hauptsächlich mit der rechtzeitigen Erkennung solcher Angriffe durch eine Überwachung des Kontrollflusses. Hierbei werden zwei unterschiedliche Methoden evaluiert. Die erste Methode beschäftigt sich mit der Auswertung von Hardware Performance Countern (HPC). HPC sind Register in einem Prozessor die dazu gedacht sind, bestimmte Ereignisse zu zählen. Diese Daten können dann dazu genutzt werden, Programme zu optimieren. In MORFEUS sollen diese Zähler jedoch dazu genutzt werden, um abweichendes Programmverhalten zu identifizieren und so Angriffe zu erkennen. Die Auswertung geschieht dabei durch Künstliche Intelligenz in Form einer Support Vector Maschine (SVM) (siehe Abb. 2).

In the BMBF project MORFEUS the IHP together with the partners Hochschule Nordhausen, Universität Passau, Cadence, and Dresden Elektronik work on the diversification of embedded sensor networks by code permutation in the field. Based on similar mechanisms in biology, this should increase the resistance of the network against attacks. Attacks that are successful on one node might no longer work on another node. The focus in this project was on so-called Return-Oriented-Programming (ROP) attacks. These attacks change the return addresses of a program and with that the control flow so that the already present instructions are executed in a different order. In this manner, malicious behavior can be realized.

The tasks of the IHP in the consortium focus on the detection of these attacks by observation of the control flow. Two different methods are evaluated. The first method deals with the evaluation of Hardware Performance Counters (HPCs). HPCs are registers in the processor that can be used to count events. These data can then be used to optimize a program. In MORFEUS these counters are used to detect diverging program behavior and with that to detect attacks. The evaluation is done with Artificial Intelligence in the form of a Support Vector Machine (SVM) (see Fig. 2).

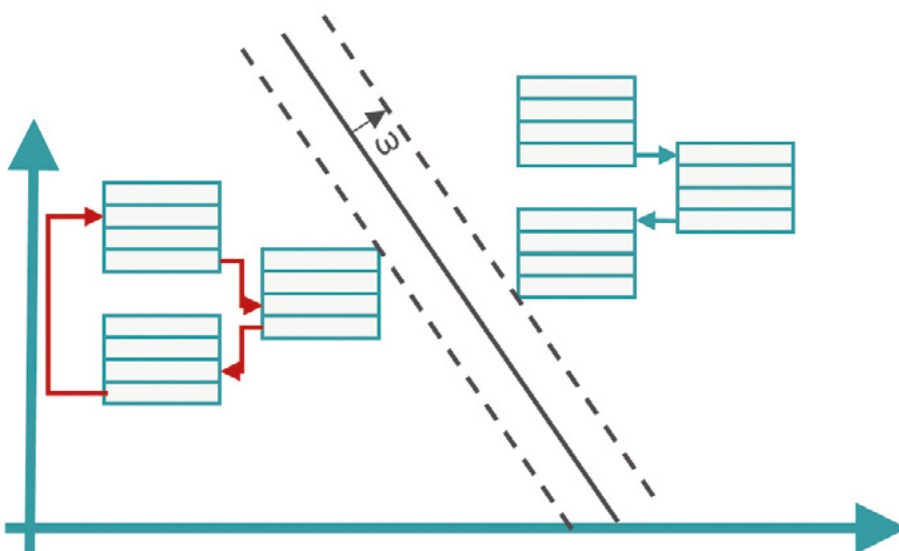


Abb. 2: Die Unterscheidung zwischen normalem Kontrollfluss und manipuliertem Kontrollfluss durch eine Support Vector Maschine

Fig. 2: Differentiation between normal control-flow and manipulated control-flow with a Support Vector Machine

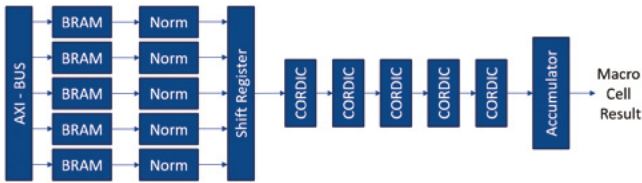


Abb. 3: Aufbau einer Makrozelle des SVM-Hardwarebeschleunigers

Fig. 3: Layout of a Macro Cell of the SVM-Hardware-Accelerator

Um eine möglichst schnelle und energieeffiziente Abarbeitung der HPC zu leisten wurde die SVM neben einer Software-Implementierung auch in einem Hardware-Beschleuniger realisiert. Die SVM selbst ist in einzelne identische Makrozellen gegliedert (siehe Abb. 3), die jeweils Teile der Berechnungen übernehmen. Die Makrozellen wurden so entworfen, dass sie sich gut für unterschiedliche Modellparameter skalieren lassen und einen möglichst hohen Durchsatz bieten.

Der andere Ansatz beschäftigt sich mit der sogenannten Kontrollfluss-Integrität (CFI). Dabei soll durch Überprüfungen während der Laufzeit sichergestellt werden, dass der Kontrollfluss nicht vom normalen Verhalten abweicht. Klassischerweise werden dafür in den Programmcode Markierungen eingesetzt, deren Vorhandensein vor einem Sprung überprüft werden kann. Ein vereinfachter Ansatz besteht darin, vor einem Rücksprung zu prüfen, ob die Zieladresse hinter einem Unterprogrammaufruf führt. Dieser Ansatz erfordert keine statische Analyse des Programmes und kann mit weniger Änderungen der Binärdatei realisiert werden. Der Nachteil ist jedoch, dass ein Angreifer gezielt die Positionen im Programm anspringen kann, die hinter einem solchen Unterprogrammaufruf führen und damit nicht von der Überprüfung erkannt werden können. In Kombination mit der Permutation des Programmes ist dies jedoch nicht mehr möglich, da ein Angreifer diese Positionen nicht mehr erkennt.

Dieser Ansatz wurde mittels zusätzlicher Instruktionen für die Xtensa-Architektur implementiert. Vor jedem Rücksprung wird eine zusätzliche *callcheck*-Instruktion eingefügt, die die Rücksprungadresse auf Gültigkeit überprüft (siehe Abb. 4). Schlägt die Überprüfung fehl, wird die Rücksprungadresse so verändert, dass sie auf eine Fehleroutine zeigt, die dann an Stelle des vom Angreifer gewünschten Codes ausgeführt wird.

Zusätzlich wurde diese Implementierung auch verallgemeinert, damit sie auch ohne die Permutation sinnvoll eingesetzt werden kann. Hierfür werden die Rücksprungadressen zusätzlich durch eine XOR-Operation mit einem Zufallswert verschleiert, sodass ein Angreifer nicht weiß, welchen Wert er injizieren muss, um zu einer gewünschten Adresse zu springen. Diese Erweiterung lässt sich auch mit der Permutation kombinieren.

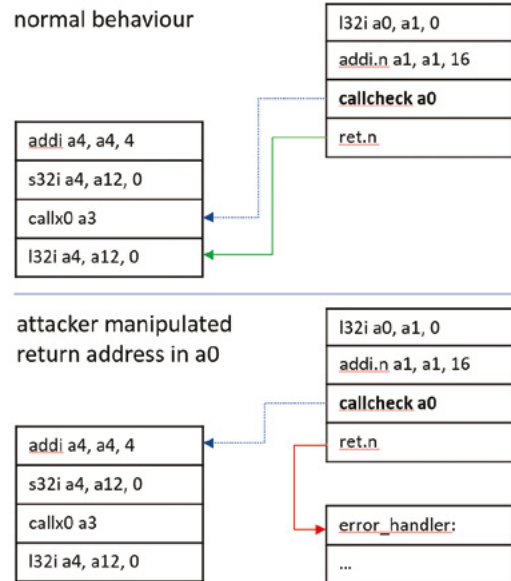


Abb. 4: Die Funktionsweise der Instruktionssatz-Erweiterung bei einem ROP-Angriff

Fig. 4: Operation of the Instructionset-Extension for a ROP attack

To allow fast and energy-efficient processing of the HPCs the SVM was implemented as a hardware accelerator along with a software implementation. The SVM itself is structured into identical macro cells (see Fig. 3), which are responsible for parts of the calculation. The macro cells are designed to be scalable for different model parameters and to have a maximum throughput.

The other approach is the so-called Control-Flow-Integrity (CFI). This should guarantee that the intended control flow does not divert from normal behavior by implementing runtime checks. Typically these checks are done by placing labels inside the program code which can be checked before a jump. A simplification of this approach is to check if the return address points to an instruction which is preceded by a sub-routine call before returning for said sub-routine. This approach does not require any static analysis of the program and can be achieved with just a few changes of the binary. However, the disadvantage is that an attacker could still target these instructions that are preceded by a sub-routine call to stay undetected. In combination with the code permutation this disadvantage is negated, as the attacker does not recognize these positions anymore.

This approach was implemented as an instruction set extension for the Xtensa architecture. Before every return, an additional *callcheck* instruction is inserted that checks the return address (see Fig. 4). If this check fails, the return address is modified to point to an error handler instead of the attacker's intended position.

Additionally, this implementation was generalized to also work without the permutation. This is accomplished by obfuscating the return address by xor-ing it with a random value. This way the attacker is not able to know the value he has to inject to jump to a specific target address. This extension is also compatible with the permutation approach.

Medizinisches Radar zur berührungslosen Erfassung von Vitaldaten

Medical Radar for Contactless Vital Signs Detection

Die moderne Radartechnik ist in der Lage, kleinste Bewegungen zu erfassen und zu überwachen, ohne dass ein Körperkontakt erforderlich ist. Jüngste Entwicklungen im Bereich von hochintegrierten Hochleistungs-Radar-Sensorchips beweisen, dass der Herzschlag und die Atemfrequenz von sitzenden oder liegenden Personen aus kurzer bis mittlerer Entfernung auf nichtinvasive Weise genau erfasst werden können.

Typischerweise bewegt sich die Brustwand eines Menschen bei jedem Atemzyklus etwa 12 - 20 Mal pro Minute um etwa 4 - 12 mm und bei jedem Herzschlagzyklus etwa 60 - 100 Mal pro Minute um etwa 0,2 - 0,5 mm. Diese kleinen Bewegungen überlagern sich mit den zufälligen Körperbewegungen und können schwer zu erkennen sein. Mit Hilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens können die Vitalzeichen jedoch aus den Radarabstandsmessungen extrahiert werden. Es ist sogar möglich, Herzgeräusche zu erkennen und in Herzgeräuschsegmente zu klassifizieren, die in Kurzstreckenszenarien verwendet werden.

Die kontinuierliche Überwachung des Vitalzustands der Patienten und die frühzeitige Alarmierung bei Unregelmäßigkeiten wird von der Medizin angestrebt, da viele Erkrankungen wie Herzrhythmusstörungen, Herzinfarkte und Epilepsie unmittelbar gesundheits- oder sogar lebensgefährlich sind. Die Nützlichkeit wird im Vergleich zur derzeitigen Methode der klassischen Elektrokardiographie hervorgehoben, da die Radarabtastung keinen physischen Kontakt und weniger Anwesenheit des medizinischen Personals erfordert, was die Ausbreitung von Krankheiten verhindert. Da das Radarsignal dünne Oberflächen durchdringen kann, kann der Sensor bequem unter dem Bett platziert werden und der Patient kann Kleidung tragen. Außerdem ist eine kontinuierliche Überwachung bei Tag und Nacht möglich, da der Radarsensor ohne Beleuchtung funktioniert.

Im Rahmen der ersten Phase des iCampus-Projekts wird ein medizinisches Radarsystem entwickelt, das mit unmodulierten Signalen bei 60 GHz arbeitet. Das System besteht aus hochintegrierten Hochleistungs-Radarsensorchips, hochdirektiven Empfänger- und Senderantennengruppen, Basisbandverarbeitungsschaltungen und einer digitalen Signalverarbeitungseinheit. Der zu testende Demonstrator ist in Abb. 5 dargestellt. Die Radarsensorchips werden im IHP entwickelt und

Modern radar technology is able to detect and monitor very small movements without requiring any physical contact. Recent developments in highly integrated high performance radar sensor chips prove that the heartbeat and breathing rates of sitting or lying people can be accurately recorded from short to mid-range distances in a non-invasive way.

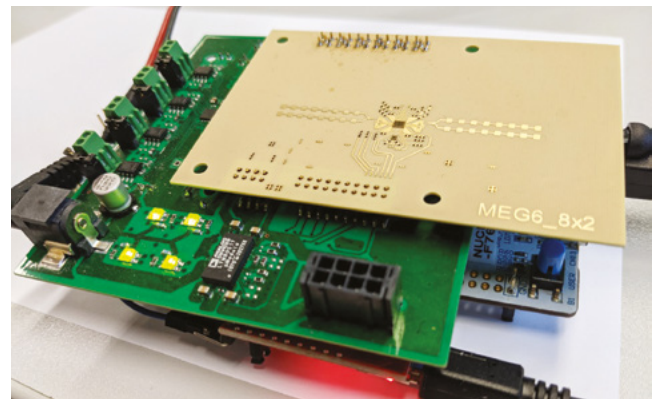
Typically, the chest-wall of a human being moves by approximately 4 - 12 mm in every breathing cycle about 12 - 20 times a minute and by approximately 0.2 - 0.5 mm in every heartbeat cycle about 60 - 100 times a minute. These small movements are superimposed on the random body movements and can become difficult to detect. However with the help of machine learning algorithms the vital signs can be extracted from the radar distance measurements. It is even possible to detect the heart beat sounds and classify them into heart beat sound segmentations in short range scenarios.

Continuous monitoring of the patients' vital states and an early alarm in case of an irregularity is well appreciated by the health care system as many conditions such as cardiac arrhythmia, heart attacks, and epilepsy are direct health hazards or even life-threatening. The usefulness is emphasized when compared to the current method of classical electrocardiography, because the radar sensing requires no physical contact and needs less attendance from the medical staff which prevents disease spreading. As the radar signal can penetrate thin surfaces, the sensor can be conveniently placed under the bed and the patient may wear clothing. Also, continuous monitoring during day and night is feasible since the radar sensor works without lighting.

As part of the first phase of the iCampus project, a medical radar system operating with unmodulated signals at 60 GHz is developed. The system consists of highly integrated high performance radar sensor chips, highly directive receiver and transmitter antenna arrays, baseband processing circuitries, and a digital signal processing unit. The demonstrator to be tested is shown in Fig. 5. The radar sensor chips are developed and fabricated within IHP, the RF board and the antenna arrays are designed by IZM, and the baseband board and final integration are done by BTU. Initial experiments performed using the

Abb. 5: Demonstrator eines medizinischen Radarsystems im Test

Fig. 5: Medical radar system demonstrator under test



hergestellt, die HF-Platine sowie die Antennengruppen werden vom IZM entworfen, die Basisbandplatine und die endgültige Integration werden von der BTU durchgeführt. Erste Experimente mit dem endgültigen Demonstratorsystem zeigen, dass die Atmung und die Herzfrequenz deutlich sichtbar sind und die Herztöne aus kurzer Entfernung erkannt werden können (siehe Abb. 6).

Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im IHP durchgeführt, um die Versorgungsspannung und den Betriebsstrom der Radarchips zu verringern. Ziel ist es, den Stromverbrauch um ein Vielfaches zu senken, um ein Modul mit höherem Wirkungsgrad zu ermöglichen, das mit Batterien betrieben werden kann und somit auch tragbare Anwendungen erlaubt. Die erste Generation des in Abb. 7 gezeigten 60-GHz-Ultra-Low-Power-Radar-Transceiver-Chip wurde entwickelt, hergestellt und durch On-Wafer-Messungen verifiziert. Der Transceiver-Chip verbraucht weniger als 75 mW bei kontinuierlicher Ansteuerung und erreicht einen Wirkungsgrad von mehr als 12 Prozent in der Sendeeinheit.

Die zweite Phase des Projektes wird Anfang 2022 beginnen und zielt darauf ab, die Anwendungsszenarien zu erweitern, z. B. in einer Krankenhausumgebung mit mehreren Patienten, um Vitaldaten von mehreren Personen gleichzeitig zu erfassen, indem MIMO-Radarsensoren (Multiple-Input Multiple-Output) verwendet werden, die innerhalb des IHP entwickelt werden. Zukünftige Arbeiten umfassen auch die Analyse der Genauigkeit der medizinischen Parameterextraktion und den Beginn der klinischen Versuche, um ein höheres Maß an Vertrauen und technologischer Bereitschaft zu erreichen.

final demonstrator system show that the respiration and heart rates are clearly visible and the heart beat sounds are detectable from short range as illustrated in Fig. 6.

Further research and development activities have been pursued within IHP to decrease the supply voltage and the operating current required by the radar chips. The goal is to reduce the dc power consumption many times over to enable a higher efficiency module which can be powered by batteries allowing portable applications as well. The first generation of the 60 GHz ultra-low-power radar transceiver chip shown in Fig. 7 has been designed, fabricated, and verified by on-wafer measurements. The transceiver chip consumes less than 75 mW under continuous drive and achieves more than 12 percent power-added efficiency in the transmitter section.

The second phase of the project will start at the beginning of 2022 and aims at extending the application scenarios, for example in a multi-patient hospital environment to gather vital data from several people simultaneously by utilizing multiple-input multiple-output (MIMO) radar sensors which will be developed within IHP. Future work also includes analyzing the accuracy of the medical parameter extraction and starting the clinical trials for achieving higher confidence and technology readiness levels.

Abb. 6: Atmung und Pulswellen zusammen mit den Herztönen, die von dem entwickelten System erkannt werden

Fig. 6: Respiration and pulse waves along with the heart sound detected by the developed system

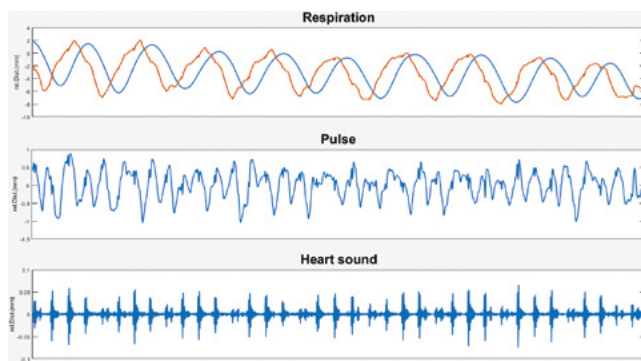
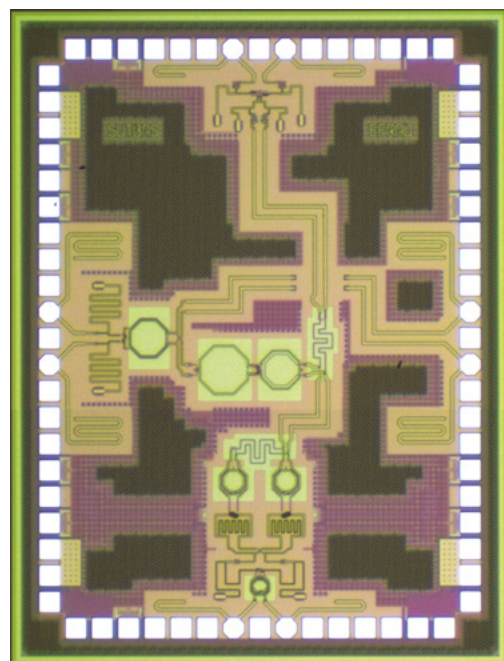


Abb. 7: Mikrografische Darstellung des 60-GHz-Ultra-Low-Power-Radar-Transceiver-Chip

Fig. 7: Micrograph of the 60 GHz ultra-low-power radar transceiver chip



Atemgassensor in SiGe-BiCMOS

Breath Gas Sensor in SiGe BiCMOS

In diesem DFG-Projekt entwickelten wir einen Sensor zum Nachweis flüchtiger organischer Bestandteile (VOCs) in Atemgas. Der Atemgassensor basiert auf der hochempfindlichen und hochspezifischen Molekülspektroskopie im Millimeterwellenlängenbereich. Die Atemgasanalyse ist ein vielversprechendes nichtinvasives Verfahren zur medizinischen Diagnose. Das Projekt wird durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) über das Schwerpunktprogramm „Elektromagnetische Sensoren für Life Sciences (ESSENCE)“ (SPP 1857) mit den Projektpartnern Technische Universität Berlin, DLR Berlin und Universität Marburg gefördert.

Die jüngste Entwicklung von Komponenten in SiGe-BiCMOS- oder CMOS-Technologien für Anwendungen bei mmW/THz-Frequenzen hat einen Weg hin zu einem kompakten und kostengünstigen System für die Gasspektroskopie eröffnet. Transmitter (TX) und Receiver mit integrierten Antennen, die in der 0,13- μm -SiGe-BiCMOS-Technologie des IHP entwickelt und gefertigt wurden, sind zuvor für eine Gasspektroskopie im Bereich 238 - 252 GHz vorgestellt worden. Dieses TX/RX-System mit einem einzelnen Frequenzband wurde zu einem 2-Band-System erweitert, um den Frequenzbereich von 225 - 273 GHz zu überdecken, wobei zwei Antennen mittels LBE (Localized Backside Etching) in der SiGe-BiCMOS-Technologie des IHP gefertigt wurden. Hierbei wurden ein 2-Band-TX-Chip und ein 2-Band-RX-Chip vorgestellt, die zwei TX-Schaltkreise bzw. zwei RX-Schaltkreise mit ihren eigenen integrierten Antennen auf den entsprechenden TX- und RX-Chips enthalten, um eine effektive Bandbreite von 222 - 270 GHz für unser Gasspektroskopie-System realisieren zu können [1].

Unser verbessertes TX/RX-System enthält jetzt einen TX und einen RX mit jeweils einer integrierten Bowtie-Antenne und einer Siliziumlinse für eine Gasspektroskopie bei 222 - 270 GHz. Der TX und RX verwenden jeweils zwei integrierte Lokaloszillatoren für 222 - 256 GHz und 250 - 270 GHz, die für einen dualen Betrieb geschaltet werden. Die einzelne integrierte Bowtie-Antenne mit der Siliziumlinse ermöglichte infolge ihrer hohen Direktivität von etwa 27 dBi eine EIRP von etwa 25 dBm für den TX und somit einen wesentlich höheren Wert für die EIRP im Vergleich zu bisher publizierten Systemen. Eine Absorptionsspektroskopie von gasförmigen Methanol wurde von uns verwendet, um die Performanz unseres Gasspektroskopie-Systems mit seinen TX- und RX-Modulen zu bewerten [2].

In this DFG project we developed a sensor for the detection of volatile organic compounds (VOCs) in exhaled air. The breath gas sensor is based on high-sensitivity and high-specificity molecular spectroscopy at millimeter-wave (mmW)/terahertz (THz) frequencies. Breath gas analysis is a promising non-invasive tool for medical diagnosis. This research is funded by the German Research Foundation (DFG) within the Priority Program SPP 1857/1 - ESSENCE – Electromagnetic Sensors for Life Sciences with the project partners Technical University of Berlin, DLR Berlin, and University of Marburg.

The recent development of components in SiGe BiCMOS or CMOS technology for applications at mmW/THz frequencies offers a path towards a compact and low-cost system for gas spectroscopy. Transmitters (TXs) and receivers (RXs), fabricated in IHP's 0.13 μm SiGe BiCMOS technology, with integrated antennas were demonstrated previously for gas spectroscopy at 238 - 252 GHz. This single-band TX/RX system was extended to a 2-band system to cover the range 225 - 273 GHz with two antennas realized by using LBE (Localized Backside Etching) technology. A 2-band TX-chip and a 2-band RX-chip were presented, which were implemented by combining two TX- and two RX-circuits with their own on-chip antennas on corresponding single chips to realize an effective bandwidth of 222 - 270 GHz for our gas spectroscopy system [1].

Our improved TX/RX system now includes a TX and a RX with bowtie-antenna and silicon lens for gas spectroscopy at 222-270 GHz. The TX and RX use two integrated local oscillators for 222 - 256 GHz and 250 - 270 GHz, which are switched for dual-band operation. Due to its directivity of about 27 dBi, the single integrated bowtie-antenna with silicon lens enables an EIRP of about 25 dBm for the TX, and therefore a considerably higher EIRP for the 2-band TX compared to previously reported systems. The double sideband noise temperature of the RX is 20,000 K (18.5 dB noise figure) as measured by the Y-factor method. Absorption spectroscopy of gaseous methanol was used as a measure for the performance of our gas spectroscopy system with TX- and RX-modules [2].

- [1] K. Schmalz, N. Rothbart, M. H. Eissa, J. Borngräber, D. Kissinger, H.-W. Hübers, "Transmitters and receivers in SiGe BiCMOS," in *AIP Advances* **9**, 015213 (2019); doi: 10.1063/1.5066261.
- [2] K. Schmalz, N. Rothbart, A. Glück, M. H. Eissa, T. Mausolf, E. Turkmen, S. B. Yilmaz, H.-W. Hübers, "Dual-Band Transmitter and Receiver With Bowtie-Antenna in 0.13 μm SiGe BiCMOS for Gas Spectroscopy at 222 - 270 GHz," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 124805-124816, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110210.

Die TX/RX-Chips wurden auf Steckkarten gebondet (siehe Abb. 8), die auf Basisband-Platinen montiert sind. Der PLL-Schaltkreis (Analog Devices ADF4169) ist in die Basisband-Platine integriert, welche die Verwendung von zwei Frequenzbändern ermöglicht, indem die entsprechenden Lokaloszillatoren ein- bzw. ausgeschaltet werden. Hierdurch wird eine Bandbreite von fast 50 GHz für das Frequenzband des Spektroskopie-Systems realisiert. Ein interner Referenztakt von 100 MHz auf der Basisband-Platine ermöglicht, die vier verwendeten Fraktion-N-PLL-Schaltkreise zu synchronisieren und diesen Referenztakt auch als externen Referenztakt für den Messaufbau zu verwenden. Die Referenzfrequenz für einen externen Lock-In-Verstärker im Fall der Gasspektroskopie lässt sich aus dem 100-MHz-Referenztakt mittels eines Fraktion-N-Teilers (Analog Devices HMC983LP5E) auf der Basisband-Platine ableiten.

Um den Frequenzbereich für unser Gasspektroskopie-System zu erweitern, haben wir TX- und RX-Teilschaltungen für den Frequenzbereich um 480 GHz entwickelt. Ein 4-Weg-kombinierter-Frequenzvervielfacher in 0,13- μm -SiGe-BiCMOS wurde publiziert, der ein Single Ended 110 – 135 GHz Eingangssignal in ein differentielles 440 – 540 GHz Ausgangssignal umwandelt [3] (siehe Abb. 9). Er verwendet vier identische Vervielfacher-Ketten mit jeweils zwei Frequenzverdopplerstufen. Ein subharmonischer Mischer (SHM) in 0,13- μm -SiGe-BiCMOS wurde mit Messergebnissen für 450 – 500 GHz veröffentlicht [4]. Inzwischen haben wir erfolgreich einen TX und einen RX in 0,13- μm -SiGe-BiCMOS mit einer dual-polarisierten Bowtie-Antenne und einer Siliziumlinse entwickelt, um Gasspektroskopie bei 222 - 270 GHz und der doppelten Frequenz bei 444 - 540 GHz zu betreiben.

The TX/RX chips were bonded on plug-in boards, see Fig. 8, which were mounted on baseband boards. The baseband board contains multiple linear voltage regulators to supply all of the chips' bias voltages from a single 5 V DC supply, an amplifier to amplify the divider output of the local oscillators (LOs) of TX and RX to the level required by the PLL, and a loop filter to determine the loop stability of the PLL circuit. The PLL device (Analog Devices ADF4169) is integrated on the baseband board. Our baseband board realizes a 2-band operation. The bands can be switched electronically by switching the LOs on and off, respectively. This allows realizing a width of the frequency band of almost 50 GHz for the spectroscopy system. An internal reference clock of 100 MHz is placed on the baseband board to allow synchronization of the four fractional-N PLLs, and it is used as an external reference clock for the experimental setup. The reference frequency for the external lock-in amplifier, which is used in the case of gas spectroscopy, is derived from the 100 MHz reference clock by a fractional-N divider (Analog Devices HMC983LP5E) on the baseband board.

Many gas molecules have stronger absorption lines at higher frequencies than around 240 GHz. To extend the frequency range of our gas spectroscopy system, we developed TX- and RX-subcircuits for the frequency band around 480 GHz. A 4-way combined frequency multiplier chain in 0.13 μm SiGe BiCMOS was presented, which converts a single ended 110 – 135 GHz input signal to a differential 440 – 540 GHz output signal [3], see Fig. 9. It uses four identical multiplier chains with two frequency doubling stages. A subharmonic mixer (SHM) in 0.13 μm SiGe BiCMOS was reported with measured results for the range 450–500 GHz, which uses a single-balanced topology [4]. Now, we have developed a TX and a RX in 0.13 μm SiGe BiCMOS with a dual-polarized bowtie-antenna on silicon lens for gas spectroscopy at 222-270 GHz and the doubled frequency at 444-540 GHz.

Abb. 8: Foto der TX-Adapterplatine mit Silikonlinse. Links: Rückseite mit TX-Chip gebondet. Rechts: Vorderseite mit Si-Linse.

Fig. 8: Photograph of TX adapter board with silicon lens. Left: Back with bonded TX-chip. Right: Front with Si-lens.

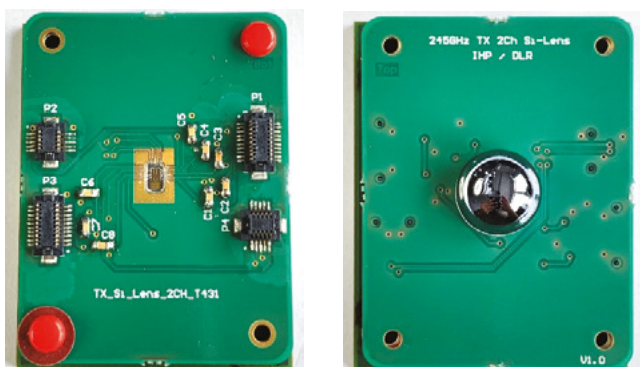
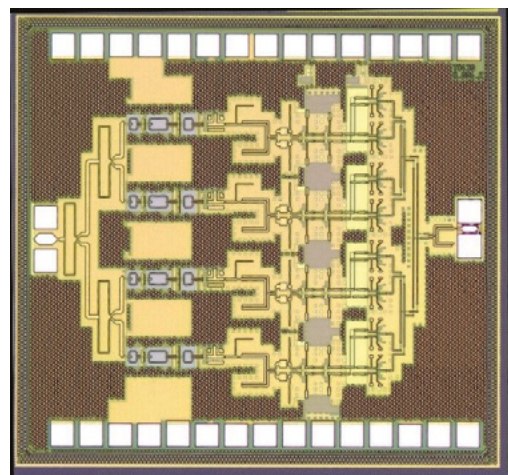


Abb. 9: Chipfoto der 4-fach kombinierten Frequenzvervielfacherkette.

Fig. 9: Chip photo of the 4-way combined frequency multiplier chain.



[3] A. Güner, T. Mausolf, J. Wessel, D. Kissinger and K. Schmalz, "A 440–540-GHz Transmitter in 130-nm SiGe BiCMOS," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 6, pp. 779–782, June 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3060820.

[4] A. Güner, T. Mausolf, J. Wessel, D. Kissinger and K. Schmalz, "A 440–540-GHz Subharmonic Mixer in 130-nm SiGe BiCMOS," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1161–1164, Dec. 2020, doi: 10.1109/LMWC.2020.3030315.

Skalierbare Infrastruktur für Edge-Computing

Scalable Infrastructure for Edge-Computing

Das BMBF-Projekt Scale4Edge zielt auf die Bereitstellung eines kommerziellen Ökosystems für eine skalierbare und flexibel erweiterbare Edge-Computing-Plattform. Dies wird mit Hilfe der freien RISC-V-Instruktionsarchitektur ermöglicht, die einen kommerziell nutzbaren, standardisierten Basisinstruktionsatz bietet, der applikationsspezifische Erweiterungen ohne einschränkende IP-Rechte gestattet. Auf diesem Weg können die sonst hohen Entwurfs- und Verifikationskosten für anzupassende CPU-Komponenten signifikant gesenkt werden. Durch resultierende Synergieeffekte im Projekt können mittels des Plattformkonzepts kostengünstig und professionell Lösungen als Scale4Edge-Ökosystem angeboten werden, die in Summe eine günstige und effiziente Entwicklung von Edge-Komponenten erlauben.

Das Internet der Dinge wird sowohl den Lebensstandard im Privaten als auch die Produktivität der Industrie dramatisch verbessern und viele Anwendungsgebiete (u. a. Automobil, Medizintechnik, Wettervorhersage) nachhaltig beeinflussen. Wichtige Voraussetzung für dieses Ziel ist die Bereitstellung von intelligenten Edge-Komponenten in großer Variantenzahl, die maßgeschneidert in ihre Umgebung eingebettet werden müssen und mit dieser selbstständig interagieren, wobei Sicherheit (Safety und Security) und Privacy mit vollständiger Datensouveränität garantiert werden sollen. Momentan verfügbare Standardkomponenten sind für diese Anwendungsszenarien aufgrund der stark unterschiedlichen Ausprägungen und Anforderungen ungeeignet, so dass ein großer Bedarf an anwendungsspezifischen Edge-Komponenten mit hohem Marktpotential besteht. Scale4Edge zielt auf die signifikante Reduzierung der momentan relativ langen Entwicklungszeiten und hohen Entwicklungskosten von applikationsspezifischen Edge-Komponenten ab (Plattformkonzept). Dies ermöglicht gerade für KMU die Entwicklung von effizienten und kostengünstigen Edge-Endgeräten und darauf aufbauenden Mehrwertdiensten in vielen Marktsegmenten.

The BMBF project Scale4Edge aims to provide a commercial ecosystem for a scalable and flexibly expandable edge computing platform. This is made possible with the help of the free RISC-V instruction set architecture, which offers a commercially usable, standardized basic instruction set that allows application-specific extensions without restrictive IP rights. In this way, the otherwise high design and verification costs for the adaptation of CPU components can be significantly reduced. Thanks to the resulting synergy effects in the project, the platform concept can be used to offer cost-effective and professional solutions as a Scale4Edge ecosystem, which all in all allows a cheap and efficient development of edge components.

The Internet of Things will dramatically improve both the standard of living in private and the productivity of industry and will have a lasting impact on many areas of application (including automotive, medical technology, weather forecasting). An important prerequisite for this goal is the provision of intelligent edge components in a large number of variants, which must be embedded in their environment in a tailor-made way and interact with it independently, while guaranteeing security (safety and security) and privacy with complete data sovereignty. Currently available standard components are unsuitable for these application scenarios due to the very different characteristics and requirements, so that there is a great need for application-specific edge components with high market potential. Scale4Edge aims to significantly reduce the currently relatively long development times and high development costs of application-specific edge components (platform concept). This enables the development of efficient and cost-effective edge devices and value-added services based on them in many market segments, especially for SMEs.

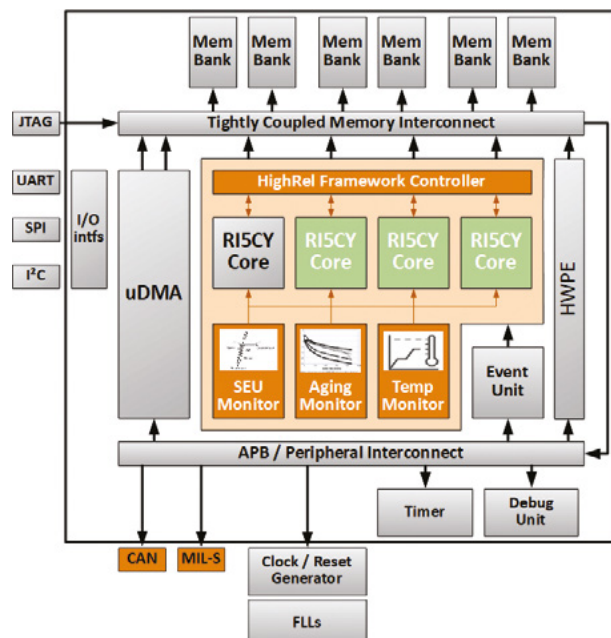


Abb. 10: Das fehlertolerante Multiprozessorsystem

Fig. 10: The fault-tolerant multiprocessor system

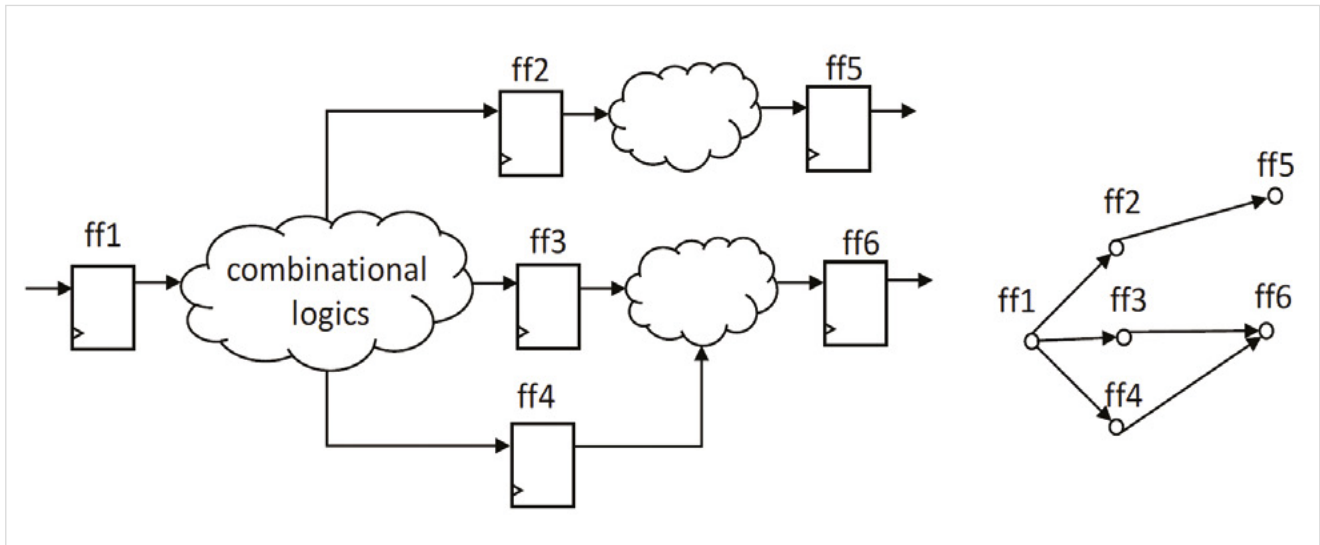


Abb. 11: Untersuchungen zur selektiven Härtung von Flip-Flops über graphenbasierte neuronale Netze

Fig. 11: Investigations into the selective hardening of flip-flops via graph-based neural networks

Das Scale4Edge-HORIZON-Teilvorhaben setzt sich zum Ziel, gemeinsam mit ARQ-D und UPD einen hochzuverlässigen Multiprozessor auf Basis des RISC-V-Instruktionssatzes umzusetzen und stellt damit dem Ökosystem eine konkrete Plattform für sicherheitskritische Anwendungen zur Verfügung. So erweitert das Teilvorhaben das Ökosystem um Anwendungsbereiche in der Medizin, Nukleartechnik, Automobilindustrie sowie Luft- und Raumfahrt. Das IHP übernimmt mit seinen Erfahrungen in der Umsetzung fehlertoleranter Systeme in diesem Zusammenhang zwei wesentliche Aufgaben: das Design eines fehlertoleranten Multiprozessorframeworks mit Zuverlässigkeitssensoren und die Entwicklung eines Entwurfsprozesses zur selektiven Härtung des Systems. Basis für das vom IHP entwickelte fehlertolerante Multiprozessorframework (siehe Abb. 10) ist die Pulpissimo-Plattform. Diese, ursprünglich mit nur einem Prozessorkern ausgestattete System-on-Chip, wurde im Projekt um drei baugleiche RI5CY-Cores, ausgewählte Zuverlässigkeitssensoren und verschiedene Interfaces sowie den sogenannten HighRel Framework Controller erweitert. Letzterer versetzt das System dabei in die Lage, aufgrund der Sensordaten verschiedene Performance-Modi zu unterstützen und die Prozessoren zu Gruppen mit unterschiedlichen Graden an fehlertoleranter Ausführung zusammenzufassen. Die selektive Härtung wurde über Fehlerinjektionskampagnen zur Lokalisierung anfälliger Baugruppen implementiert. Hier findet derzeit aktive Forschung an der Beschleunigung der Kampagnen statt, die mit verschiedenen Methoden der Künstlichen Intelligenz (z. B. graphenbasierte neuronale Netze wie in Abb. 11) erreicht werden soll.

The Scale4Edge-HORIZON sub-project aims to implement a highly reliable multiprocessor based on the RISC-V instruction set together with ARQ-D and UPD, thus providing the ecosystem with a concrete platform for safety-critical applications. The sub-project expands the ecosystem to include areas of application in medicine, nuclear technology, automotive and aerospace. With its experience in the implementation of fault-tolerant systems, the IHP takes on two essential tasks in this context: the design of a fault-tolerant multiprocessor framework with reliability sensors and the development of a design process for selective hardening of the system. The Pulpissimo platform is the basis for the fault-tolerant multiprocessor system developed by IHP (see Fig. 10). This system-on-chip, originally equipped with only one processor core, was expanded in the project by three identical RI5CY cores, selected reliability sensors and various interfaces, as well as the so-called HighRel Framework Controller. The latter enables the system to support different performance modes based on the sensor data and to combine the processors into groups with different degrees of fault-tolerant execution. Selective hardening was implemented via fault injection campaigns to locate vulnerable circuitry. Active research is currently taking place on accelerating the campaigns, which is to be achieved using various methods of artificial intelligence (e.g. graph-based neural networks as in Fig. 11).

Lösungen für Energieausgleich und Resilienz, um die Flexibilität zu aktivieren und die Marktmöglichkeiten für das Distributionsnetz zu verbessern

Energy Balancing and Resilience Solutions to Unlock the Flexibility and Increase Market Options for the Distribution Grid

Das europäische Projekt e-balance, das vom IHP koordiniert wurde, hat eine Plattform definiert, die einen ganzheitlichen Ansatz für die Steuerung und Verwaltung in intelligenten Netzumgebungen bietet. Auf der Grundlage dieses Ansatzes entwickelt das Projekt ebalance-plus Lösungen, die für Resilienz und Flexibilität im Energienetz sorgen.

Die Steigerung der Effizienz im Energienetz ermöglicht es, die Emissionen und den Einfluss auf den Klimawandel zu reduzieren. Das Energiemanagement war niemals eine triviale Aufgabe und ist mit der breiten Anwendung erneuerbarer Energiequellen noch komplexer geworden. Ihre sehr wetterabhängigen und stark verteilten Produktionseigenschaften führen häufig dazu, dass das Stromnetz Ereignissen ausgesetzt ist, die einer Gefährdung nahe kommen. Um das Netz in einem stabilen Zustand zu halten ist es sinnvoll, beide Seiten der Energieaustauschkette - Erzeugung und Verbrauch - zu überwachen und zu steuern. Um dies zu ermöglichen, haben wir die verteilte Energiemanagement-Plattform aus dem Projekt e-balance weiterentwickelt. Bei diesem Ansatz führen die verteilten Recheneinheiten, die sogenannten Management Units (MU), die lokalen Algorithmen aus, die auf der Grundlage des lokalen Zustands und der gemeinsamen (nicht lokalen) Informationen lokale Entscheidungen treffen. Dieser Ansatz ermöglicht die Implementierung hierarchischer Managementsysteme, ähnlich der Struktur des Stromnetzes selbst. Die richtige Definition der Systemebenen innerhalb der Stromnetzstruktur ermöglicht es, die Implementierung der Algorithmen gleichmäßig zu verteilen, um noch bessere Optimierungsergebnisse zu erzielen und Kommunikationsengpässe zu vermeiden. Ein Beispiel für die Verteilung von Management Units ist, dass sich diese in den Knotenpunkten des Energienetzes in den Kundenhaushalten, den sekundären Umspannwerken und den primären Umspannwerken befinden. Auf jeder Ebene sind die Probleme, die gelöst werden müssen, ähnlich, aber in unterschiedlicher Größenordnung. Eine Lösung, die auf diesem fraktalartigen Ansatz basiert, ermöglicht daher die Verarbeitung ähnlicher Daten auf jeder Ebene unter Verwendung ähnlicher Algorithmen. Die Entscheidungen werden auf der lokalen Ebene getroffen.

Das Szenario ist ein Beispiel für ein verteiltes Mess- und Steuerungssystem, bei dem die Daten der zentrale Teil sind. Zu den Daten gehören die Messungen, die den Systemzustand darstellen, sowie die Steuersignale, die erzeugt werden, um die Prozesse innerhalb des Systems zu beeinflussen. In der ebalance-plus-Lösung werden die Daten zwischen den Management Units mit Hilfe der smartDSM-Middleware ausgetauscht, die die Funktion der verteilten Datenspeicherung bietet. Der Datenaustausch ist mit Hilfe von Kryptographie gesichert und die Privatsphäre der Dateneigentümer (Ersteller) ist geschützt.

The European project e-balance, which was coordinated by IHP, has defined a platform to provide a holistic approach for control and management in smart grid environments. Based on this approach, the ebalance-plus project is developing solutions to provide resilience and unlock flexibility in the energy grid.

Increasing efficiency in the energy grid allows reducing emissions and the influence on climate change. Energy management was never a trivial task and has become even more complex with the wide application of renewable energy sources. Their very weather-dependent and highly distributed production characteristics often cause the grid to be exposed to events close to hazards. To keep the grid in a stable state, it is advisable to monitor and control both sides of the energy exchange chain - production and consumption. To enable this, we have further developed the distributed energy management platform stemming from the e-balance project. In this approach, the distributed computing units, called the Management Units (MU), execute the local algorithms that make local decisions based on the local state and shared (not local) information. This approach allows implementing hierarchical management systems, similar to the structure of the grid itself. Proper definition of the system levels within the grid structure allows balancing the implementation of the management algorithms to achieve even better optimization results and to avoid communication bottlenecks. An example of the distribution of Management Units is to have these in the nodes of the energy grid located in the customer households, secondary substations, and primary substations. On each level the problems to solve are similar, but on a different scale. Thus, a solution based on this fractal-like approach allows processing similar data on each level using similar algorithms. And it keeps the decision making on the local level.

This scenario is an example of a distributed measurement and control system, with data being the crucial part. The data includes the measurements representing the system state, as well as the control signals that are generated to influence the processes within the system. In the ebalance-plus solution the data is shared among the Management Units using the smartDSM middleware, which provides the distributed data storage functionality. The data exchange is secured by the means of cryptography and the privacy of the data owners (creators) is protected. The data owners define data access policies that are then implemented by the middleware. The algorithms that support energy grid resilience and flexibility management are located on top of the middleware and realize their tasks using the data. These algorithms operate on behalf of specific

Die Dateneigentümer definieren Datenzugriffsrichtlinien, die dann von der Middleware umgesetzt werden. Die Algorithmen, die die Resilienz und Flexibilität des Energienetzes unterstützen, sitzen auf der Middleware und realisieren ihre Aufgaben unter Verwendung der Daten. Diese Algorithmen handeln im Auftrag bestimmter Systembeteiligter, was die Durchführung von Datenschutzprüfungen ermöglicht.

Die ebalance-plus-Plattform ermöglicht die Implementierung effizienter und skalierbarer Algorithmen, die bei der Bewältigung der Probleme des Energiemanagements aufgrund des hohen Anteils an erneuerbaren Energien helfen. Der Schwerpunkt liegt hier im Umgang mit der verfügbaren Flexibilität und in der Überwachung und Reaktion auf ungewöhnliche Ereignisse. Auf diese Weise lassen sich die Effizienz und Resilienz des zukünftigen Stromnetzes verbessern, die Investitionen in Übertragungs- und Erzeugungskapazitäten reduzieren und gleichzeitig wird der Einfluss auf den Klimawandel verringert.

Neben den Algorithmen für das Energiemanagement werden im Rahmen des ebalance-plus-Projekts auch direkt die Technologien für die intelligente Speicherung, Verbrauch und Erzeugung von Energie entwickelt. Dies ist entscheidend für die Verfügbarkeit von steuerbaren Geräten, mit denen die Algorithmen interagieren können. Ohne solche Technologien und Geräte sind die Auswirkungen des Energiemanagements begrenzt. Ein weiteres wichtiges Ziel des Projekts ist die Untersuchung der sozio-ökonomischen Aspekte im Zusammenhang mit dem Wandel des Energienetzes und der Akzeptanz neuer Technologien und Prozesse. Letztendlich wird für die Unterstützung der Algorithmen eine Reihe von Vorhersagealgorithmen entwickelt. Diese nutzen Künstliche Intelligenz (KI), aber auch statistische Ansätze, um die Werte der für das Energiemanagement wichtigen Systemparameter vorherzusagen.

Die Ergebnisse des Projekts werden in vier realen Demonstratoren in Dänemark, Frankreich, Spanien und Italien demonstriert. Am IHP wird auch ein Labor-Demonstrator (In-Lab) entwickelt, um Fälle zu untersuchen, die in realen Energienetzen nicht erlaubt sind, z. B. weil sie potentiell gefährlich sind (siehe Abb. 12).

system stakeholders, what allows performing the data privacy protection checks.

The ebalance-plus platform allows implementing efficient and scalable algorithms that will help to cope with the energy management problems due to the high coverage of renewable energy. The focus here is on handling the available flexibility and on monitoring and reacting to unusual events. It allows increasing the efficiency and resilience of the future grid, reducing the investments in transmission and production capacity, but also reducing the influence on climate change.

Besides the energy management algorithms the ebalance-plus project is also directly developing technologies related to smart energy storage, consumption and generation. This is crucial for the availability of controllable devices the algorithms can interact with. Without such technologies and devices the effects of energy management are limited. A further important goal of the project is to investigate the socio-economic aspects related to the energy grid transition, the acceptance of new technologies and processes. Finally, in order to support the algorithms a series of prediction algorithms is being developed. These employ Artificial Intelligence (AI) but also statistical approaches to foresee the values of the system parameters important for the energy management.

The results of the project will be demonstrated in four real demonstrators, located in Denmark, France, Spain and Italy. A laboratory (In-Lab) demonstrator will also be developed at IHP to investigate cases that are not allowed in real energy grids, e.g., because they are potentially hazardous (see Fig. 12).

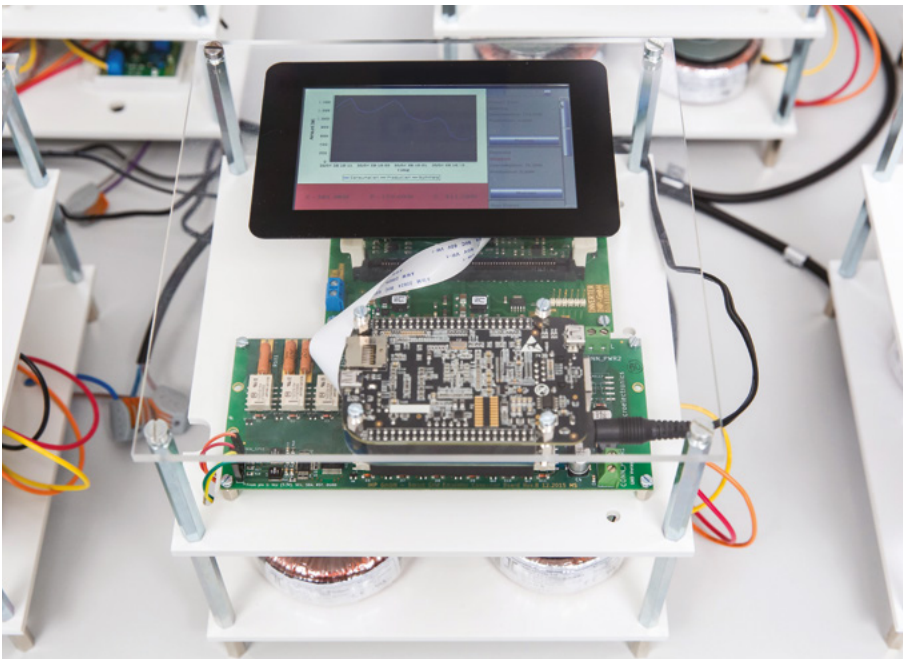


Abb. 12: Prosumer-Block des In-Lab-Demonstrators.

Fig. 12: Prosumer block of the In-Lab demonstrator.

Ultraschnelle wellenleitergekoppelte Germanium-Fotodiode stellt Geschwindigkeitsweltrekord auf

Ultra-fast Waveguide-coupled Germanium Photodetector Sets World Speed Record

Großrechenzentren ermöglichen eine Vielzahl von cloudbasierten Anwendungen und Diensten - sie sind somit eine der wichtigsten Treiber des digitalen Kommunikationszeitalters. Während optische Verbindungen die Anforderungen für höchstmögliche Datenraten erfüllen müssen, besteht gleichzeitig ein enormer Kostendruck, da diese zu einem der Hauptkostenfaktoren in Rechenzentren geworden sind.

Die derzeit wichtigsten Technologieplattformen für integrierte Photonik basieren auf Indiumphosphid (InP) und Siliziumphotonik. Beide Plattformen ermöglichen Hochgeschwindigkeits-Transceiver mit Bandbreiten von einigen zehn Gigahertz. Um den in naher Zukunft rasant steigenden Datenraten (> Tbit/s) gerecht werden zu können, sind jedoch höhere Geschwindigkeiten der photonischen Komponenten dringend erforderlich.

Bisher konnten Ansprüche an höchste Datenraten lediglich durch InP-basierte Fotodetektoren erfüllt werden, die mit Bandbreiten von mehr als 100 GHz als Maßstab galten. Dagegen liegt die Bandbreite von Germanium-Fotodioden, die in Siliziumphotonik-Plattformen angeboten werden, üblicherweise im Bereich von 50 - 70 GHz. Allerdings profitiert die Siliziumphotonik von etablierten CMOS-Fertigungsprozessen und bietet außerdem die Möglichkeit der Co-Integration mit Hochfrequenzelektronik und zwar auf 300-mm-Wafern. Die Siliziumphotonik entwickelte sich daher in den letzten 10 Jahren zu einer äußerst kostengünstigen Technologie zur Fertigung von optischen Transceivern.

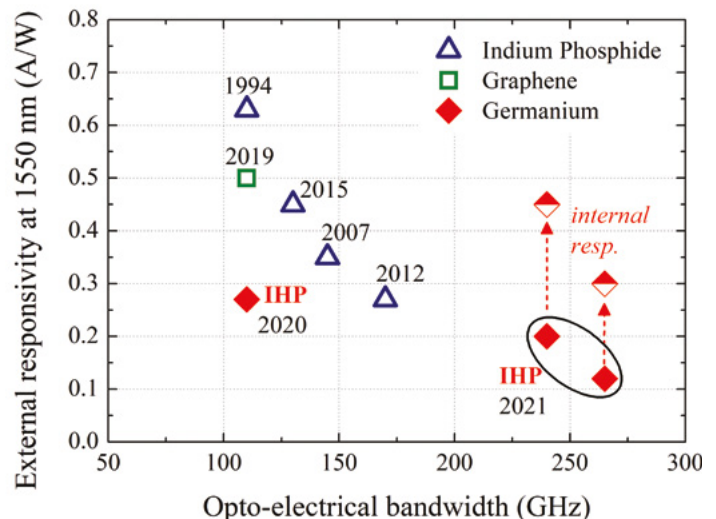
Large scale data centers enable various applications and services and are therefore one of the main drivers of the digital communication age. They require highly integrated cost-efficient optical communication solutions. While optical interconnects need to provide the highest possible data rates there is at the same time a tremendous cost pressure because interconnects have become one of main cost factors within data centers.

Currently, there are two main integrated photonic technology platforms, Indium-Phosphide (InP) based technologies and Silicon photonics. Both enable high speed transceivers in the range of several tens of Gigahertz bandwidth. For quickly increasing data rates in the near future (> Tbits/sec), increased device speed is highly desired.

So far, the ultimate and benchmark photodetector performance remained with InP-based devices, offering devices with bandwidths well beyond 100 GHz. By contrast, germanium photodiodes, which are available on the major silicon photonics platforms, typically show bandwidths in the range of 50–70 GHz. On the other hand, Silicon Photonics has benefited from established CMOS fabrication processes and offers scalability up to 300 mm wafers as well as wafer-level co-integration with high-speed electronics. Thus, Silicon Photonics has emerged as a cost-efficient technology for optical transceivers over the last decade.

Abb. 13: Vergleich der optoelektrischen Bandbreite von wellenleitergekoppelten Germanium-, InP- und graphenbasierten Fotodioden. Gezeigt sind die externen Responsivitäten gegenüber den optoelektrischen Bandbreiten. Für einen fairen Vergleich der Fotodioden, unabhängig von der Lichteinkopplung, haben wir zusätzlich die interne Responsivität unserer neuen Fotodioden dargestellt. Bei InP-Plattformen wird direkt aus der optischen Faser in den Wellenleiter gekoppelt, wohingegen bei siliziumbasierten Plattformen Gitterkoppler zur Anwendung kommen, deren Effizienz die externe Responsivität bestimmt.

Fig. 13: Benchmark of opto-electrical bandwidth of waveguide-coupled germanium-, InP-based and graphene photodiodes. Shown is the external responsivity vs. the opto-electrical -3 dB bandwidth. For fair benchmarking of photodiode performances independently from the coupling approach we inserted the internal responsivities for our novel devices too. In fact, for InP-platforms, fibre-to-waveguide coupling is usually performed while in silicon-based platforms grating couplers are most commonly used whose efficiencies dominate the external responsivities.



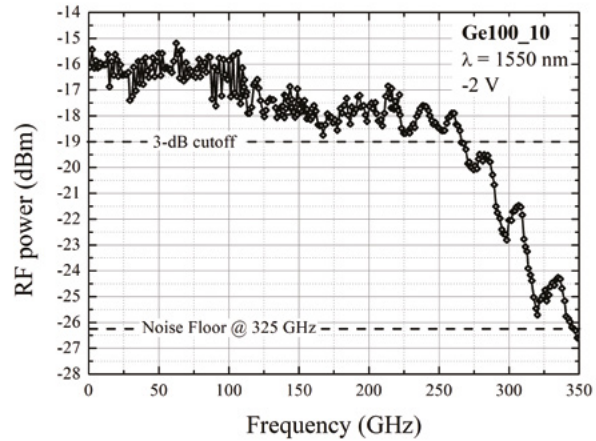
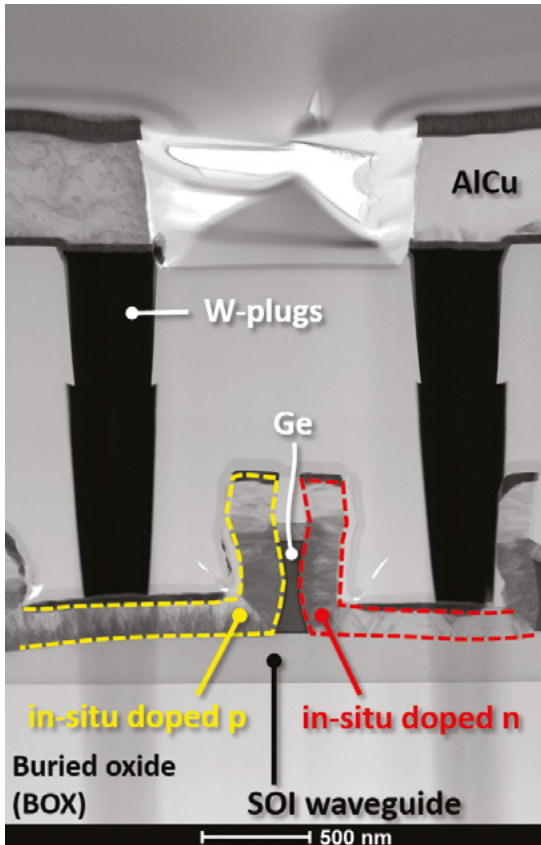


Abb. 14: Transmissionselektronenmikroskop-Querschnittsbild der neuentwickelten Germaniumlamellen-Fotodiode mit in-situ-dotierten (verschiedene Farben für p- und n-Dotierung) Siliziumkontaktgebieten (links) und die Frequenzantwort aus einem Heterodyn-Messaufbau bei einem Photostrom von 1 mA. Die Messungen wurden bei einer Sperrspannung von 2 V durchgeführt.

Fig. 14: Cross-sectional image by scanning transmission electron of a germanium-fin photodiode that features in-situ-doped (different colours for p- and n-doping) silicon contact regions (left) and frequency response from a heterodyne measurement set-up at a DC photocurrent of 1 mA. Measurements were performed at a reverse bias of 2 V.

Im Jahr 2021 hat das IHP wellenleitergekoppelte Fotodioden mit Rekord -3-dB-Bandbreiten von 240 und 265 GHz demonstriert, bei gleichzeitig hohen Responsivitäten von 0,45 und 0,3 A/W bei einer Wellenlänge von 1550 nm. Bezüglich der Geschwindigkeit übertreffen unsere neuen Fotodioden sogar die bisher fortschrittlichsten wellenleitergekoppelten InP-basierten Fotodioden. Mit internen Quanteneffizienzen von 24 Prozent und 36 Prozent konnten Bandbreiten-Effizienz-Produkte von 63 und 86 GHz erreicht werden. Derart hohe Werte wurden bislang von keiner anderen wellenleitergekoppelten Fotodiode erreicht. In Abb. 13 werden die Ergebnisse der bislang schnellsten wellenleitergekoppelten Fotodioden aus verschiedenen Materialplattformen verglichen.

Bereits im Jahr 2020 demonstrierte das IHP ein neuartiges Herstellungsverfahren, bei dem ein zunächst breites Germaniumgebiet durch zwei Lithographie- und Ätzschritte definiert wird. Die Kontakte werden hierbei mithilfe von zwei gegensätzlich in-situ-dotierten Siliziumschichten realisiert. Durch diesen neuartigen Ansatz konnte eine Fotodiode mit einer -3 dB-Bandbreite von 110 GHz hergestellt werden. Diese Ergebnisse wurden auf der renommierten Konferenz IEEE Electron Device Society IEDM im Dezember 2020 in einem virtuellen Meeting präsentiert, der renommiertesten Konferenz auf dem Gebiet elektrischer Bauelemente.

Auf der Grundlage eines ähnlichen Herstellungsablaufs, aber mit einigen Weiterentwicklungen, konnte die Geschwindigkeit der Fotodioden noch deutlich verbessert werden. Diese weisen nun eine

In 2021, IHP demonstrated waveguide-coupled germanium photodetectors with record -3dB bandwidths of 240 and 265 GHz and notably high responsivity of 0.45 and 0.3 A/W, resp., both at 1550 nm wavelength. Referring to speed, our novel devices even outperform the hitherto most sophisticated waveguide-coupled InP-based photodetectors. With internal quantum efficiencies of 24 % and 36 %, resp., bandwidths-efficiency products yielding 63 and 86 GHz were realized. Such values were not reached by any other waveguide-coupled photodetector before. Fig. 13 compares results from most sophisticated and emerging waveguide-coupled photodetectors realized in different material platforms from the last decades.

In the year 2020, IHP demonstrated a novel fabrication approach where an initially broad germanium region is defined by two lithography and etching steps and the contacts were realized by complementary in-situ doped Si layers, showing -3 dB bandwidth of 110 GHz. These results were presented at the prestigious meeting of the IEEE Electron Device Society IEDM in December 2020, being held virtually.

Based on a similar fabrication flow, but with several further developments, we were able to significantly improve the photodetector performance. In this advanced fabrication process we realized a vertically aligned germanium fin which is sandwiched between two complementary in-situ-doped silicon regions. The lateral size of the germanium region was drastically narrowed to about 60 nm in the center of the photodiode. This leads to even higher electric-fields and shorter photo carrier drift times. By deploying in-situ doped Si

vertikal ausgerichtete Germaniumlamelle auf, die von in-situ-dotierten Siliziumschichten umgeben ist. Die laterale Breite des Germaniumgebiets beträgt im Zentrum der Fotodiode lediglich circa 60 nm. Diese geringe Breite führt zu stärkeren elektrischen Feldern und kürzeren Ladungsträgerdriftzeiten. Die Verwendung von in-situ-dotierten Silizium-Schichten erlaubt es, auf Ionenimplantation zu verzichten, so dass unbeabsichtigte Dotierung im lichtsensitiven Germanium umgangen werden konnte. Dies ist ausschlaggebend für die Hochfrequenzeigenschaften von Fotodioden, da „langsame“ Minoritätsladungsträgerdiffusionseffekte somit unterdrückt werden.

Abb. 14 zeigt ein Querschnittsbild (links, Transmissionselektronenmikroskop) und das Frequenzantwortverhalten aus einer Heterodyn-Messung bis 350 GHz (rechts).

Neben der Rekordgeschwindigkeit dieser Fotodioden ist hervorzuheben, dass die Herstellung dieser neuen Komponenten vollständig mit den Anlagen der IHP-8-Zoll-BiCMOS-Pilotlinie erfolgte. Es kamen also ausschließlich Herstellungsverfahren zur Anwendung, die bereits in Silizium-Photonik-Technologien und/oder CMOS Foundries zur Verfügung stehen. Letztlich beweist unser Ansatz, dass konventionelle, siliziumbasierte Technologien, die für 200 mm oder 300 mm Silizium-Substrate zur Verfügung stehen, bezüglich der optoelektrischen Bandbreite von wellenleitergekoppelten InP-basierten Fotodioden mithalten können und diese sogar übertreffen, ohne auf aufwendige III-V-Materialtransferverfahren zurückgreifen zu müssen.

Alle grundlegenden Herstellungsschritte für diese neuen ultraschnellen Fotodioden erfolgen analog zu den Prozessschritten zur Fertigung unserer vorherigen Fotodiodengeneration, die Teil unserer IHP-ePIC (electronic photonic integrated circuit) -Technologie SG25H5ePIC ist. Die selektive Germanium-Epitaxie bleibt unverändert, inklusive der Schichtdicke des Germaniums und der darüberliegenden dünnen Siliziumschicht. Alle Prozesse zur separaten Abscheidung der komplementär in-situ-dotierten Schichten wurden oberhalb einer Isolatorschicht durchgeführt, die die darunterliegenden Bauelemente einbettet. Wir gehen deshalb davon aus, dass es keine substanzielle Beeinflussung der darunterliegenden Komponenten, wie Modulatoren oder Transistoren, geben sollte und sind zuversichtlich, dass die Integration in die IHP-PIC- oder ePIC-Technologien prinzipiell möglich sind. Letztendlich ebnet diese neuen Komponenten den Weg für siliziumphotonikbasierte Empfänger für Anwendungen mit Symbolraten von 400 GBaud oder mehr.

Die Ergebnisse dieser Spitzenforschung wurden in dem renommierten Fachmagazin *Nature Photonics* veröffentlicht. Für das Cover der Dezemberausgabe wurde eine Illustration unserer neuartigen Fotodiode ausgewählt, was die Signifikanz dieses Forschungsergebnisses noch einmal verdeutlicht.

layers, ion implantation could entirely be waived such that unintended ion implantation into the light-sensitive germanium is avoided. This is crucial for the high-speed performance as “slow” minority-carrier diffusion effects are efficiently suppressed. Fig. 14 shows a cross-section by scanning transmission electron microscopy (left) and frequency response curves estimated from heterodyne measurements up to 350 GHz (right).

Besides the record speed of these photodetectors, another important achievement is that the fabrication flow of these new devices was entirely conducted on IHP's 8-inch BiCMOS pilot line facilities solely by using fabrication technologies that are readily available in silicon photonics and/ or CMOS foundries. Our approach proves that the conventional silicon technology available for standard 200 mm or 300 mm silicon substrates can match or even outperform InP-based technologies in terms of high-speed waveguide-coupled photodetector performance, without the need to resort to more cumbersome III-V material transfer approaches.

In fact, all basic fabrication steps for these ultra-fast photodiodes are analogous to those of our previous photodetector generation process, which is part of IHP's ePIC (electronic photonic integrated circuit) technology 'SG25H5ePIC'. The selective epitaxial growth remains unchanged, including the thickness of the germanium body and the subsequent encapsulation in a thin Si layer. All processes for the separate depositions of the complementary in situ-doped silicon layers were conducted above the thick isolator stack. Accordingly, we do not expect substantial interference with underlying encapsulated devices such as modulators or transistors and believe that the integration into PIC or ePIC processes should be feasible. Eventually, these new devices pave the way for silicon photonics-based receivers for applications with symbol rates of 400 GBaud or even beyond.

The results of the cutting-edge research were published in the renowned journal *“Nature Photonics”*, which chose an illustration of the photodiode for the cover of the December issue, thus emphasizing the significance of this research result.

Verbesserung der Empfindlichkeit von germaniumbasierten Plasmonik-Biosensoren im THz-Bereich

Improving the Sensitivity of Germanium-based Plasmonics Biosensors in the THz Range

Der THz-Frequenzbereich umfasst die charakteristischen Energien (Fingerabdrücke) von molekularen Schwingungen, Rotationen, Librationen und ermöglicht THz-Messungen, z. B. für die Überwachung der flüchtigen organischen Verbindungen. Allerdings ist die Größe der THz-Wellen im Vergleich zu den entsprechenden (Bio-)Molekülen relativ groß. Um diese grundlegende Einschränkung zu überwinden, könnten Plasmonics (d. h. Quasiteilchen, die aus Licht-Materie-Wechselwirkungen entstehen) genutzt werden, da sie eine starke Feldverstärkung und Eingrenzung in Subwellenlängenvolumina ergeben. Unser interdisziplinärer Ansatz basiert auf die Subwellenlängen-THz-Feldverstärkung innerhalb von Hotspots von n-hochdotierten Ge-Resonanzantennen (d. h. im Antennenabstand), wie in der Abb. 15 gezeigt wird. Ortsspezifisches Einfangen von Molekülen kann an den Hotspots durch Verwendung von materialelektiver Oberflächenbiofunktionalisierung realisiert werden.

Der Betrieb und die Empfindlichkeit des plasmonischen Sensors hängen stark von der Materialqualität und Physik hinter dem Design der Antenne ab. In der ersten Iteration werden von der Arbeitsgruppe Computational Electronics and Photonics (CEP) der Universität Kassel theoretische Simulationen durchgeführt, um die Geometrien zu bestimmen, bei denen lokalisierte Plasmonenresonanzen am unteren Ende des THz-Spektrums erhalten werden können. Daher konzentrierten sich die Bemühungen des IHP darauf, die Qualität des Ge-Materials zu verbessern. In Bezug auf die Materialeigenschaften ist die Qualität der hochdotierten Ge-Schicht der im Reinraum des IHP hergestellten Antennen kaum noch zu verbessern. Wir sind an der Grenze dessen, was das Material leisten kann. Gemeinsam mit der Abteilung Biophysik der Universität Osnabrück werden Schichten von α -Liponsäure (ALA) als Rotverschiebung der Antennenresonanzen nachgewiesen. Damit wird die Fähigkeit der plasmonisch verstärkten Ge-Antennen demonstriert, eine ALA-Schicht mit einer Dicke von zwei bis drei Größenordnungen kleiner als die THz-Wellenlänge ist zu erkennen.

The THz frequency range comprises the characteristic energies (fingerprints) of molecular vibrations, rotations and librations and enables e.g. the monitoring of volatile organic compounds. However, the size of the THz waves is relatively large in comparison with the (bio)molecules of interest. To overcome this fundamental limitation, plasmons (i.e. quasiparticles arising from light-matter interactions) could be exploited since they provide strong field enhancement and confinement into subwavelength volumes. Our interdisciplinary approach is based on subwavelength THz field enhancement within hotspots of highly doped n-doped Ge resonant antennas (i.e. at the antenna gap), as shown in Fig. 15. Site-specific capturing of molecules at the hotspots can be realized by making use of material-selective surface biofunctionalization.

The operation and sensitivity of the plasmonic sensor relies heavily on the material quality and physics behind the antenna's design. In the first iteration, theoretical simulations were realized by the Computational Electronics and Photonics (CEP) working group from Kassel University, to determine the geometries at which localized plasmon resonances can be obtained at lower end of the THz spectrum. Therefore, IHP's efforts were dedicated to improving the quality of the Ge material. In terms of material properties, the quality of IHP's highly doped Ge layer can hardly be further improved, as we are at the limit of what the material can achieve. Together with the Biophysics division of Osnabrück University layers of α -Lipoic Acid (ALA) were detected as a red-shift of the antennas resonances. This demonstrates the ability of the plasmonic-enhanced Ge antennas to detect an ALA layer with a thickness of two to three orders of magnitude smaller than the THz wavelength.

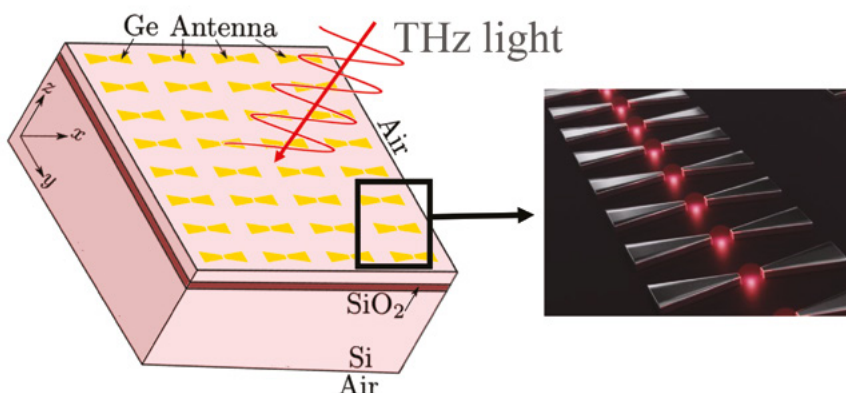


Abb. 15: Skizze der Anordnung der Ge-Antennen. Die Antennen konzentrieren sich und damit verstärken sich die elektrischen THz-Felder (rote Kugeln in der Abbildung) an ihren Lücken.

Fig. 15: Sketch of Ge antennas arrangement. The antennas concentrate and enhance the THz electric fields (red spheres in the illustration) at their gaps.

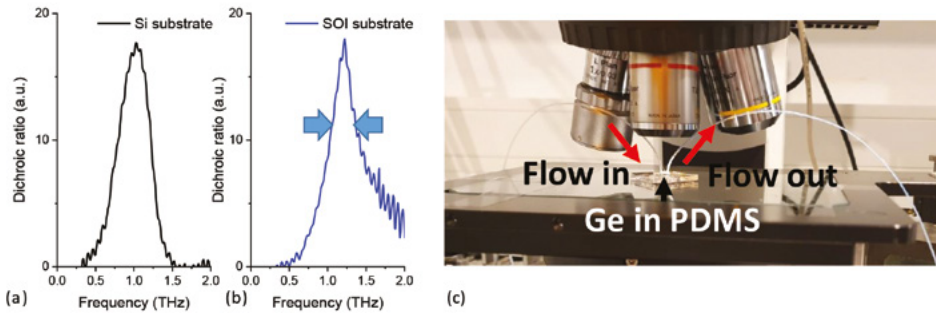


Abb. 16: Hochdotierte n-Ge-Antennen auf (a) Siliziumsubstrat und (b) Silizium-auf-Isolator (SOI)-Substrat. Sichtbar sind die Verschiebungen der Mittenfrequenz und die Verringerung der Resonanzbreite durch das Vorhandensein des verlustarmen SOI-Substrats. (c) Der Antennenwafer, der in einem strukturierten PDMS mit mikrofluidischen Schläuchen umschlossen ist.

Fig. 16: Highly doped n-Ge antennas on (a) silicon substrate and (b) silicon on insulator (SOI) substrate. The shift of the center frequency and the reduction of the resonance width by the presence of the low-loss SOI substrate is visible. (c) Antennas wafer die enclosed by a structured PDMS with microfluidic tubing.

Um die Empfindlichkeit der Antennen über die intrinsischen Materialeigenschaften hinaus weiter zu verbessern, wird die Breite der Resonanzspitze unter Verwendung physikalischer Prinzipien verringert. Zu diesem Zweck schlugen neue theoretische Simulationen vor, dass die Verwendung eines Substrats mit einem hohen spezifischen Widerstand die Resonanz aufgrund geringerer Strahlungsverluste begünstigt. Die Herstellung von Ge-Antennen direkt auf einem hochohmigen Substrat wird jedoch die Qualität von Ge und damit die Resonanzqualität drastisch reduzieren. Dies liegt daran, dass Ge epitaktisch (nahezu defektfrei) auf Si aufwachsen kann, aber ein Ge-Wachstum auf beispielsweise SiO_2 viele Defekte erzeugt. Um diese Herausforderung zu meistern, verwendeten die Wissenschaftler des IHP Silizium-auf-Isolator (SOI)-Substrate, was eine dünne Si-Schicht auf einer dicken SiO_2 -Schicht mit hohem Widerstand darstellt. Das epitaxiale Wachstum von Ge auf der dünnen Si-Schicht war nun möglich, aber nicht einfach. Mehrere Anpassungen in den Herstellungsprotokollen waren notwendig, um das Wachstum und die Materialqualität auf dem zuvor erreichten Niveau zu stabilisieren. Die Reduzierung der Antennenresonanzbreite durch ein verlustarmes Substrat ist in den Abb. 16a und 16b zu sehen. Das Vorhandensein der Siliziumoxidschicht verringert nicht nur die Breite, sondern verschiebt auch die Mittenfrequenz und ändert die Form auf der Hochfrequenzseite der Resonanz.

Während Verbesserungen der Antennenempfindlichkeit gegenüber (Bio-)Chemikalien auf ihrer Oberfläche noch getestet werden müssen, werden Fortschritte bei der Integration eines des Ge-Antennenwaferstück (die Größe $< 0,4 \text{ cm}^2$) in PDMS-mikrofluidische Kanäle erreicht, die die Analyse unter dynamischen Bedingungen in der Zukunft ermöglichen. Wie in der Abb. 16c dargestellt ist, werden die ersten Experimente erfolgreich durchgeführt, bei denen ein Flüssigkeitsfluss zu den Ge-Antennen (innerhalb von PDMS) durch mikrofluidische Schläuche gebracht wird. Das Flüssigkeitsvolumen an den Ge-Antennen kann durch das Design der PDMS-Kanäle gesteuert werden, während der Flüssigkeitsfluss durch eine Mikropumpe mit Werten im Bereich von Nanolitern bis Mikrolitern pro Sekunde gesteuert wird. Verschiedene interessierende Biochemikalien werden auf die Biofunktionalisierung der Antennen und ihren Einfluss auf ihre Resonanz getestet. Neben der Dynamik mikrofluidischer Kanäle strebt das IHP an, in naher Zukunft hochintegrierte Mixed-Signal-Elektronik mit More-than-Moore-Funktionalitäten anzubieten.

A further step to enhance the sensitivity of the antennas beyond its intrinsic material properties, is to reduce the width of the resonance peak using principles of physics. To this end, new theoretical simulations proposed that the use of a substrate with high resistivity will benefit the resonance due to lower radiation losses. However, the fabrication of Ge antennas directly on top of a high resistivity substrate would reduce the quality of Ge drastically and thus the resonance's quality. This is because Ge can grow epitaxially (almost defect-free) on top of Si, but Ge growth on top of, for example SiO_2 , would produce a lot of defects. To overcome this challenge, scientists at IHP used Silicon-On-Insulator (SOI) substrates which provide a thin layer of Si on top of a thick layer of a high resistivity SiO_2 . The epitaxial growth of Ge on the thin Si layer was now possible, but not straight-forward. Adjustments in the fabrication protocols were necessary to stabilize the growth and the material quality to the levels reached before. The reduction of the antennas resonance width due to a low-loss substrate can be seen in Fig. 16a and 16b. The presence of the silicon oxide layer not only reduces the width, but it also shifts the center frequency and changes the shape on the high frequency side of the resonance.

While the improvements in the antennas sensitivity to (bio)molecules on its surface is yet to be tested, advances in the integration of the Ge-antennas wafer piece (die size $< 0.4 \text{ cm}^2$) with PDMS microfluidic channels allow the analysis under dynamic conditions in the future. As shown in Fig. 16c, the first experiments where a liquid flux is brought to the Ge antennas (inside PDMS) by microfluidic tubing were successfully performed. The liquid volume at the Ge antennas can be controlled by the design of the PDMS channels while the liquid flux is controlled by a micropump with values ranging from nanoliters to microliters per second.

Different biochemicals of interest are being tested for biofunctionalization of the antennas and their influence on their resonance. Along with the dynamics of microfluidic channels IHP is aiming to offer highly integrated mixed signal electronics with more-than-Moore functionalities in the near future.

Digitales Wissens- & Informationssystem für die Landwirtschaft

Digital Agricultural Knowledge & Information System

Biodiversitätsverlust, Ressourcenverknappung, Klimawandel sowie eine zunehmende Nachfrage nach Nahrungsmitteln führen weltweit zu Zielkonflikten in der Landbewirtschaftung. Die Harmonisierung dieser Zielkonflikte, durch eine optimal ausbalancierte Bereitstellung von Ökosystemleistungen (ÖSL), stellt für die Agrarsysteme der Zukunft eine wesentliche Herausforderung dar. Die optimale Bereitstellung von ÖSL steht im Fokus des Projektes DAKIS und soll durch ein neuartiges digitales Entscheidungsunterstützungssystem sowie eine kleinteilige und diversifizierte Landbewirtschaftung ermöglicht werden.

Das Ziel des vom BMBF geförderten Verbundprojektes DAKIS ist es, ein neues Entscheidungssystem zu kreieren, das es ermöglicht, heute nicht marktfähigen Gütern wie ÖSL und Biodiversität als Produkte bzw. Ergebnisse landwirtschaftlichen Tuns einen ökonomischen Wert zu verleihen. In DAKIS werden landwirtschaftliche Aktivitäten, die auf Echtzeitinformationen von Sensoren und Modellen basieren, in Kooperation zwischen den Landwirten durchgeführt. Autonome, vernetzte kleinskalige Roboter führen die Arbeit auf markt- und gesellschaftlichen Bedarf zugeschnitten flexibel aus. Am Ende des Projektes wird ein Prototyp des DAKIS vorliegen, welcher die Machbarkeit und positiven Auswirkungen der diversifizierten und kleinskaligen Landnutzung in den Testregionen demonstrieren soll.

Das IHP konzentriert sich auf die Entwicklung von Sensorplattformen als FuE-Projekt zur Erschaffung eines kostengünstigen und energiesparenden Sensornetzes für ein sensorgestütztes Landschaftsmonitoring, das die kleinteilige Erfassung von standortspezifischen Anforderungen in Echtzeit unterstützen soll, um sowohl eine kleinräumige Bewirtschaftung jeweils zum optimalen Zeitpunkt als auch eine Erfolgskontrolle von Maßnahmen zu ermöglichen.

Im bisherigen Projektverlauf wurden drei Arten von Sensorknoten (Abb. 17 - 19) auf Grundlage neuer Sensorplattformen sowie dem wiederverwendbaren und universell einsetzbaren Kernmodul ATLAS entwickelt. Diese bilden ein heterogenes Sensornetz zur Erfassung von mikrometeorologischen- und Bodenparametern und werden seit Ende 2021 an zwei Standorten, dem Agroforst-Experimentierfeld Großmutz

Loss of biodiversity, scarcity of resources, climate change and an increasing demand for food are leading to conflicting goals in land management around the world. The harmonization of these conflicting goals through an optimally balanced provision of ecosystem services (ESS) represents a major challenge for the agricultural systems of the future. The optimal provision of ESS is the focus of the DAKIS project and should be made possible by a new digital decision support system as well as small-scale and diversified land management.

The goal of the DAKIS project funded by the BMBF is to develop a new decision support system, which enables the management of the non-commodity products of today, such as ESS and biodiversity, as "products" of agricultural activities with an economic value. DAKIS will introduce a flexible work organization that will enable resource-efficient sustainable production controlled by market and societal demand and cooperation among farms. This will be achieved via the use of real-time digital information systems, and autonomous, interlinked, small-scale robots. By the end of the project, a proto-type of the DAKIS will be delivered, which will demonstrate the feasibility and beneficial effects of diversified small-scale land use in two test regions.

The IHP focuses on the development of sensor platforms as an R&D project to create a low-cost and low-power wireless sensor network for sensor-based landscape monitoring, which is intended to support the small-scale recording of site-specific requirements in real time, in order to enable both small-scale management at the optimal point in time as well as monitoring the success of measures.

In the course of the project so far, three types of sensor nodes (Fig. 17 - 19) have been developed on the basis of new sensor platforms and the reusable and universally applicable core module ATLAS. These form a heterogeneous sensor network for recording micrometeorological and soil parameters and have been tested as prototypes since the end of 2021 at two locations, the agroforestry experimental field in Großmutz and the grassland experimental field in Dahmsdorf (Müncheberg). The sensor data recorded in the field is transmitted wirelessly and encrypted via Sub-1 GHz to the gateway node, buffered

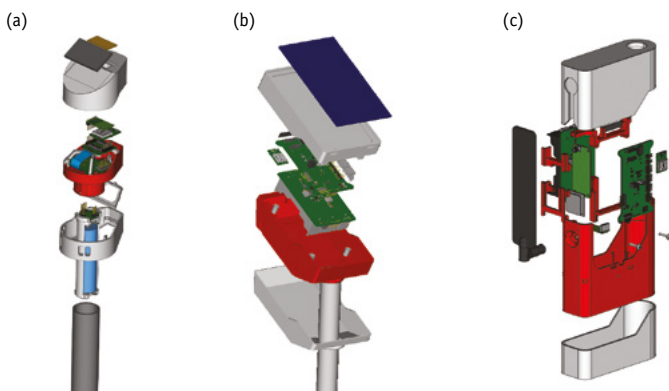


Abb. 17: Explosivdarstellung entwickelter Sensorknoten auf Basis neuer Sensorplattformen (a) Sensorknoten für mikrometeorologische Parameter (b) Sensorknoten für bis zu 6 Bodensensoren (c) Gateway-Knoten

Fig. 17: Exploded-view drawing of developed sensor nodes based on new sensor platforms (a) Sensor Node for micrometeorological parameters (b) Sensor Node for up to 6 soil sensors (c) Gateway Node

und dem Grünland-Experimentierfeld Dahmsdorf (Müncheberg) prototypisch erprobt. Die im Feld erfassten Sensordaten werden drahtlos und verschlüsselt über Sub-1 GHz zum Gateway-Knoten übertragen, zwischengespeichert und über NarrowBand IoT, einer Low Power Wide Area (LPWA) -Funktechnologie mit niedrigem Energiebedarf und hoher Reichweite, verschlüsselt auf einen Server hochgeladen. Dort werden die Daten nach Prüfung und Validierung in eine Datenbank eingepflegt und unter anderem über ein Dashboard zur Verfügung gestellt. Die solarbetriebenen Sensorknoten werden mit Hilfe von modularen Energy-Harvestern betrieben. Sie reduzieren den Wartungsaufwand und ermöglichen einen autarken und langlebigen Betrieb im Feld. Zur Erhöhung der Batterielaufzeit wurden Energiesparmaßnahmen ergriffen und flexible Strategien in der Software entwickelt, beispielsweise die präzise jahreszeitengesteuerte Nutzung der Solarladeschaltung oder die im Betrieb und aus der Ferne veränderbaren Intervalle zur Netzkommunikation oder Sensorwerterfassung. Da landwirtschaftliche Flächen nicht zwingend eingezäunt sind, verfügen Sensorknoten über Bewegungssensoren zur Diebstahlerkennung. Gateway-Knoten verfügen zudem über GPS und einen Mechanismus zur Meldung von erkannten Bewegungen. Für eine vereinfachte Wartung mehrerer, weit voneinander installierter Sensornetze verfügen diese über einen Code-Update-Mechanismus. Damit Sensorknoten im Rahmen der Projektlaufzeit und des Budgets nicht nur entwickelt, sondern auch idealerweise über mehrere Jahre erprobt werden können, kommt Rapid Prototyping zum Einsatz. So werden zum Beispiel für die Fertigung von Gehäusen, Windsensoren oder Hilfsmitteln verschiedene 3D-Drucker und 3D-Druckverfahren genutzt. Auch die Verwendung von biokompostierbaren Materialien und die Erprobung anderer druckbarer Materialien im realen Feldeinsatz wird über längere Zeit mituntersucht.

and uploaded encrypted to a server via NarrowBand IoT (NB-IoT), a Low Power Wide Area (LPWA) radio technology with low energy consumption and high range. There, after checking and validation, the data is entered into a database and made available via a dashboard, among other things. The solar-powered sensor nodes are operated using modular energy harvesters. They reduce the maintenance effort and enable self-sufficient and long-lasting operation in the field. Energy-saving measures were taken to increase the battery life and flexible strategies were developed in software, for example the precise seasonal use of the solar charging circuit or the intervals for network communication or sensor value acquisition that can be changed during operation and remotely. Since agricultural areas are not necessarily fenced in, sensor nodes have motion sensors to detect theft. Gateway nodes also have GPS and a mechanism for reporting detected motion. For simplified maintenance of several sensor networks installed far from each other, they have a code update mechanism. Rapid prototyping is used so that the sensor nodes can not only be developed within the project period and budget, but also ideally tested over several years. For example, various 3D printers and 3D printing processes are used to manufacture housings, wind sensors or tools. The use of biocompostable materials and the testing of other printable materials in real field use is also being investigated over a long period of time.

Abb. 18: Installierte Sensorknoten am DAKIS-Grünlandstandort Dahmsdorf (Müncheberg)
Fig. 18: Installed sensor nodes at DAKIS grassland site Dahmsdorf (Müncheberg)



Abb. 19: Installiertes Gateway am DAKIS-Agroforststandort Großmutz, Löwenberger Land
Fig. 19: Installed gateway node at DAKIS agroforestry site Großmutz, Löwenberger Land



Vergleichende Analyse und Optimierung der analogen SystemC-AMS-Simulationen von resistiven Crossbar-Arrays

Comparative Analysis and Optimization of the SystemC-AMS Analog Simulation Efficiency of Resistive Crossbar Arrays

Analoge Beschleuniger führen Berechnungen innerhalb eines Speicherarrays durch und gewinnen zunehmend an Bedeutung, um die Energieeffizienz zu verbessern und die fortgesetzte Skalierung datenintensiver Anwendungen (z. B. Deep Learning[1], Bildverarbeitung[2]) zu ermöglichen. Das grundlegende Verarbeitungselement in solchen Systemen ist ein Crossbar-Array aus resistiven Bauelementen wie Resistive RAMs (RRAMs), die für In-Memory-Computing-Operationen verwendet werden.

Ein grundlegendes Designproblem besteht in den nichtidealen Eigenschaften dieser neuen Bauelemente (z. B. Variabilität, zeitabhängiges Rauschen, Nichtlinearität). Diese Effekte werden mit Hilfe von Simulationen auf elektrischer Ebene [3] oder in Kombination mit Verilog-AMS-Modellen [4] untersucht. Die größte Einschränkung besteht darin, dass sie die Entwicklung von Bauelementen isoliert betrachten und somit die Systemsicht außer Acht lassen. Tatsächlich sind Parameter und Qualitätsmetriken in allen Schichten des Beschleunigerentwurfs in komplexer Weise voneinander abhängig, unter anderem in Bezug auf Rechengenauigkeit, Geschwindigkeit und Crossbar-Größe. Herkömmliche Ansätze zur Gewinnung der schichtenübergreifenden Transparenz sind bei weitem nicht zufriedenstellend (z. B. übermäßig vereinfachte Bauelementmodelle [5], aufwendige Tool-Chains [6]).

Eine bahnbrechende Innovation für die Entwickler wäre die Einführung eines einheitlichen Simulationswerkzeuges, das in der Lage ist, die Interaktionen zwischen den Systemkomponenten und Abstraktionsschichten zu modellieren. SystemC-AMS erfreut sich zunehmender Beliebtheit als Simulationsplattform, die in der Lage ist, das ganzheitliche Verhalten von heterogenen AMS-Systemen auf verschiedenen Ebenen zu erfassen. Da das SystemC-AMS direkt mit den gängigen virtuellen Prototyping-Plattformen kompatibel ist, ist es ein vielversprechendes Werkzeug, um diese Aufgabe zu erfüllen. Sein Einsatz für die elektrische Modellierung und Simulation von resistiven Crossbar-Arrays steckt jedoch noch in den Kinderschuhen [7].

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, SystemC-AMS in Bezug auf die analoge Simulationsleistung von resistiven Crossbar-Arrays konkurrenzfähig zu den gängigen elektrischen Simulationswerkzeugen zu entwickeln. Wir wählen dazu zwei repräsentative Plattformen aus diesem Bereich aus: Cadence Spectre und Ngspice. Obwohl diese Werkzeuge im Vergleich zu SystemC nicht über eine gleichwertige Simulationsfähigkeit für die gemischte Abstraktion verfügen, sind sie konsolidierte Lösungen für die Charakterisierung des analogen Verhaltens von neuen Speicherbauelementen und werden daher in dieser Arbeit als Benchmarks verwendet.

Unseres Wissens ist dies die erste Arbeit, die sich mit der Modellierung von RRAM-Crossbar-Arrays in SystemC-AMS und der Optimierung subtiler Ineffizienzen im Simulator beschäftigt. In dieser Arbeit werden mehrere RRAM-Modelle betrachtet, die auf der memristiven IHP-Technologie [8] aufbauen und verschiedene Abstraktionsstufen aufweisen.

Analog accelerators perform computation within a memory array and are gaining momentum to improve the energy efficiency and enable the continued scaling of data-intensive applications (e.g., deep learning [1], image processing[2]). The basic processing element in such systems is a crossbar array of emerging resistive devices as Resistive RAMs (RRAMs) used for in-memory computing operations.

A fundamental design issue consists of the non-ideal properties of such emerging devices (e.g., variability, time-dependent noise, non-linearity). These effects are investigated through electrical-level simulations [3] eventually combined with Verilog-AMS models [4]. The main limitation of these frameworks is that they view device development in isolation, hence missing the system view. In fact, parameters and quality metrics throughout all layers of the accelerator design stack are largely interdependent in complex ways, encompassing among others computation accuracy, speed, and crossbar size. Common approaches to gain cross-layer visibility are far from satisfactory (e.g., oversimplified device models [5], elaborated tool-chains [6]).

A breakthrough innovation for the designers would be the introduction of a unified framework capable of modeling the interactions across system components and abstraction layers. SystemC-AMS is gaining popularity as a simulation language able to capture the holistic behavior of heterogeneous AMS systems at several levels. Being directly compatible with mainstream virtual prototyping platforms, SystemC-AMS is a promising tool to accomplish this task. However, its deployment for the electrical modeling and simulation of resistive crossbar arrays is still in its infancy [7].

The main goal of this research is to make SystemC-AMS competitive with mainstream electrical simulation tools in terms of analog simulation performance of resistive crossbar arrays. We select two representative tools from this domain: Cadence Spectre and Ngspice. Although such tools lack an equivalent mixed-abstraction simulation capability compared to SystemC, they are consolidated solutions to characterize the analog behavior of emerging memory devices and are therefore used as benchmarks in this paper.

To our knowledge, this is the first work to target SystemC-AMS modeling of RRAM crossbar arrays and the optimization of subtle inefficiencies in the simulator. Several RRAMs' models calibrated on IHP memristive technology [8] and with different levels of abstraction are considered in this research. We presented a new modeling approach for variable resistors that allows to speed-up the LU decomposition, namely the most time-consuming operation performed by SystemC-AMS analog solver. Thanks to this optimization, we observed comparable performance between SystemC-AMS and the other CAD tools for DC as well as transient simulations.

Beside these kinds of simulation, Monte Carlo (MC) analysis is also a mandatory step in the array characterization flow to provide an estimate of crossbar robustness. While Spectre and Ngspice support

Wir haben einen neuen Modellierungsansatz für variable Widerstände entwickelt, der es ermöglicht, die LU-Zerlegung zu beschleunigen, d. h. die zeitaufwändigste Operation, die vom analogen Solver von SystemC-AMS durchgeführt wird. Dank dieser Optimierung konnten wir eine vergleichbare Leistung zwischen SystemC-AMS und den anderen CAD-Tools für DC- und transiente Simulationen feststellen.

Neben diesen Simulationsarten ist auch die Monte-Carlo-Analyse (MC) ein obligatorischer Schritt im Array-Charakterisierungsablauf, um eine Abschätzung der Crossbar-Robustheit zu erhalten. Während Spectre- und Ngspice-MC-Analysen von Haus aus unterstützen, muss der Benutzer in SystemC-AMS iterative Simulationsläufe manuell durchführen. Der bisherige Versuch, diese Hürde zu überwinden, stützt sich auf einen Wrapper, der mehrere Läufe der Simulationsengine verwaltet [9]. Dies führt zu einer starken Belastung der Simulationszeit aufgrund von mehrfachen Initialisierungen. Wir stellen einen alternativen Ansatz vor, der darin besteht, eine MC-Analyse eines resistiven Crossbar-Arrays durch eine einzige transiente Simulation durchzuführen, bei der jeder Zeitschritt als ein unabhängiger MC-Versuch betrachtet wird.

Um alle möglichen Methoden zu bewerten, haben wir eine MC-Analyse für verschiedene MVM-Designs in Spectre (blau), Ngspice (grün), SystemC-AMS mit dem bisherigen Ansatz (rot), mit unserem neuen Ansatz (orange) und mit demselben neuen Ansatz und dem neuen Modell für variable Widerstände (violett) verglichen.

Unsere MC-Implementierungen zeigen erhebliche Leistungsverbesserungen, sogar im Vergleich zu Spectre und Ngspice, mit einer Reduzierung der Simulationszeit um bis zu 93 Prozent bzw. 57 Prozent (Abb. 20).

Insgesamt beweist diese Forschung nicht nur, dass SystemC-AMS ein konkurrenzfähiges Werkzeug für die elektrische Simulation skalierbarer Widerstands-Arrays sein kann, sondern identifiziert sogar ein Spezialgebiet der MC-Analyse, die eine Leistungsoptimierung ermöglicht.

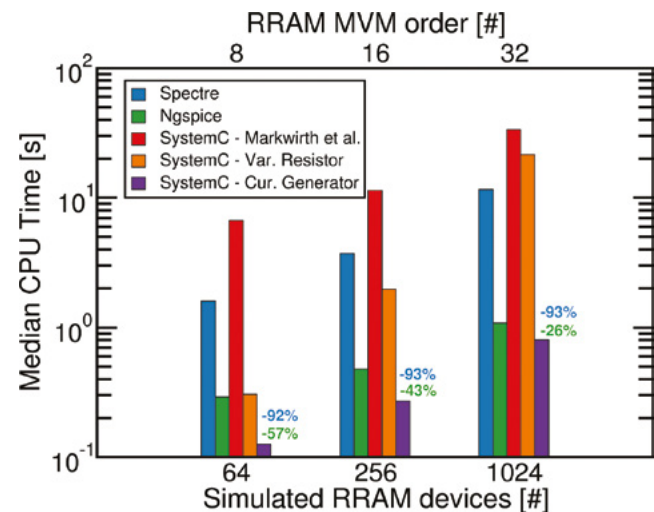
MC analysis by construction, in SystemC-AMS the user must manually handle iterative simulation runs. The previous attempt to overcome this hurdle relies on a wrapper managing multiple runs of the simulation engine [9]. This entails a heavy burden on the simulation time due to multiple initializations. We present an alternative approach that consists of performing an MC analysis of a resistive crossbar array through a single transient simulation where each timestep is considered as an independent MC trial.

To evaluate all possible methodologies, we compared an MC analysis for different MVM designs performed in Spectre (blue), Ngspice (green), SystemC-AMS with the previous approach (red), with our novel approach (orange), and with the same novel approach and also the new model for variable resistors (violet).

Our MC implementations show major improvements in performance even with respect to Spectre and Ngspice, with reduced simulation time up to 93 percent and 57 percent, respectively (Fig. 20).

Overall, this research proves that not only SystemC-AMS can be a competitive tool for the electrical simulation of scalable resistive crossbar arrays, but even identifies an area of specialty in MC analysis enabled by the proposed performance optimization techniques.

Abb. 20: Monte-Carlo-Leistung für verschiedene Simulationsprogramme
Fig. 20: Monte Carlo performance for several simulation engines



References

- [1] S. Yu, "Neuro-inspired computing with emerging nonvolatile memories," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 2, pp. 260–285, 2018.
- [2] C. Li et al., "Analogue signal and image processing with large memristor crossbars," *Nature electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 52–59, 2018.
- [3] X. Guan, et al., "A spice compact model of metal oxide resistive switching memory with variations," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 33, no. 10, pp. 1405–1407, 2012.
- [4] Z. Jiang, et al., "A compact model for metal-oxide resistive random access memory with experiment verification," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 5, pp. 1884–1892, 2016.
- [5] Z. Sun et al., "Solving matrix equations in one step with cross-point resistive arrays," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 10, pp. 4123–4128, 2019.
- [6] M. Fritscher, et al., "Simulating memristive systems in mixed-signal mode using commercial design tools," in *2019 ICECS. IEEE*, 2019, pp. 225–228.
- [7] D. Fey, et al., "Simulating memristive networks in systemc-ams," *Memristor and Memristive Neural Networks*, p. 147, 2018.
- [8] V. Milo et al., "Multilevel hfo2-based ram devices for low-power neuromorphic networks," *APL Materials*, vol. 7, no. 8, 2019.
- [9] T. Markwirth, et al., "Statistical modeling with systemc-ams for automotive systems," in *2008 Forum on Specification, Verification and Design Languages*, 2008, pp. 247–248.

Experimentelle Netzwerke der 5. Generation für Wissenschaft und Industrie

5th Generation Experimental Networks for Academia and Industry

Das europäische Projekt 5GENESIS baut europaweit 5G-Experimentallplattformen für eine End-to-End-Evaluierung von 5G-Netzen auf. Dies geschieht im Rahmen verschiedener 5G-Anwendungsfälle sowohl in kontrollierten Einrichtungen (z. B. Labore) als auch bei groß angelegten Veranstaltungen mit Endnutzern, wie vertikalen Branchen.

Kommerzielle 5G-Einsätze sind weltweit zahlreich, was heutzutage ein Trend in der öffentlichen terrestrischen Mobilkommunikation ist. Parallel zu diesem Trend und im Hinblick auf die Integration, Prüfung und Validierung vieler bestehender und neuartiger Technologien mit 5G-Systemen besteht ein offensichtlicher Bedarf an privaten 5G-Infrastruktureinrichtungen, die über einen flexiblen und offenen Experimentierrahmen Prüf- und Validierungsmöglichkeiten bieten. Neue vertikale Anwendungen stellen große Herausforderungen in Bezug auf die Leistung sowie auf Verwaltungs- und Betriebsebene dar. In diesem Zusammenhang zielen Funktionen wie Network Slicing darauf ab, die Anforderungen verschiedener Branchen in einer einzigen Infrastruktur zu erfüllen und verschiedene Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) zu erfüllen.

5GENESIS besteht aus fünf Versuchsplattformen, die sich in Malaga, Athen, Limassol, Surrey und Berlin befinden. Diese Plattformen werden als eigenständige Experimentiereinrichtungen betrieben. Die Berliner Plattform umfasst ultradichte Gebiete, die von verschiedenen Netzwerken abgedeckt werden, von Knoten in Gebäuden bis hin zu nomadischen Clustern im Freien, die über fortschrittliche Backhauling-Technologien koordiniert werden, um die Bereitstellung von immersiven Diensten zu demonstrieren. Sie ist eine Erweiterung des Fraunhofer FOKUS 5G Playgrounds, der in das IHP-Testfeld in Frankfurt (Oder) integriert ist, und hat den Standort der Humboldt-Universität (HU) für Feldversuche und Großveranstaltungen mit einem nomadischen 5G-Knoten instanziiert.

The European project 5GENESIS builds up 5G experimental platforms across Europe for an end-to-end evaluation of 5G networks. This is done in the framework of various 5G applications in both controlled setups (e.g. laboratories), and large-scale events involving end users such as vertical industries.

Commercial 5G deployments are numerous worldwide, which is a trend nowadays in public terrestrial mobile communication. In parallel to this trend, and in view of the integration, testing and validation of many existing and novel technologies with 5G systems, there is an apparent need for private 5G infrastructure facilities that offer testing and validation capabilities through a flexible and open experimentation framework. New vertical applications pose great challenges in performance and at both management and operational levels. In this context, features like network slicing aim to facilitate multiple verticals' requirements in a single infrastructure, and to meet various Key Performance Indicators (KPIs).

5GENESIS consists of five experimental platforms located in Malaga, Athens, Limassol, Surrey, and Berlin. These platforms operate as standalone experimentation facilities. The Berlin platform encompasses ultra-dense areas covered by various network deployments, ranging from indoor nodes to nomadic outdoor clusters, coordinated via advanced backhauling technologies to showcase immersive service provisioning. It is an extension of the Fraunhofer FOKUS 5G Playground that is integrated with the IHP testfield in Frankfurt (Oder), and has instantiated the Humboldt University (HU) site for field trials and large-scale events using a nomadic 5G node.

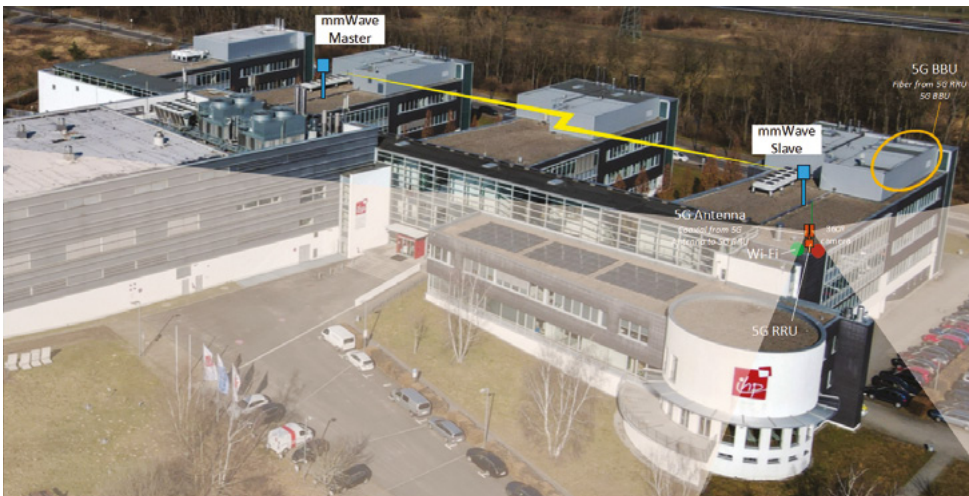


Abb. 21: 5G-Testfeld des IHP, unterstützt durch mmWave-Backhaul.

Fig. 21: IHP's 5G testfield supported by mmWave backhaul.

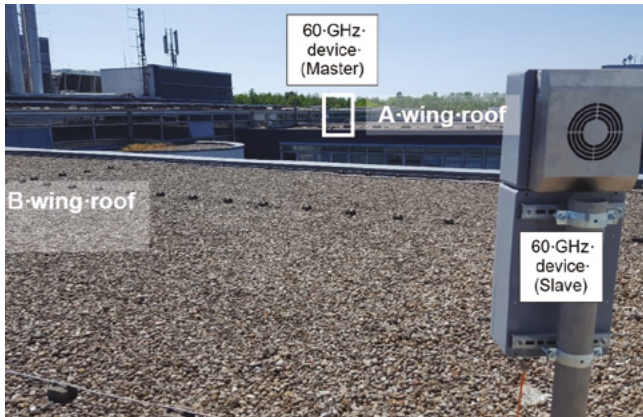


Abb. 22: Beispiel des IHP-60-GHz-Knotens mit Beamforming-Funktionen.
Fig. 22: Example of IHP's 60 GHz Nodes with beamforming capabilities.

Das Hauptziel der Berliner Plattform war die Einrichtung einer technologie- und standortübergreifenden End-to-End-5G-Umgebung in einem städtischen Testfeld im Rahmen der jährlichen Veranstaltung Festival of Lights. Die Berliner Plattform demonstrierte den Anwendungsfall im Zusammenhang mit dem enhanced Mobile Broadband (eMBB) 5G-Dienst durch den Einsatz mehrerer Hardware/Software-Kern- und Randkomponenten an verschiedenen Standorten in Berlin.

Im Jahr 2021 wurde diese 5G-Netzinfrastruktur am IHP eingerichtet. Die verschiedenen Elemente des Netzes können flexibel in verschiedenen Teilen der Infrastruktur eingesetzt werden (Abb. 21). Es wurde ein Panorama-Livestreaming-Feldversuch durchgeführt, um einer großen Anzahl von Nutzern den Zugang zu einem Video-Livestream zu ermöglichen, der von einer 360°-Kamera erzeugt wurde. Die meisten Nutzer, die an dem Versuch teilnahmen, waren IHP-Mitarbeiter, die sich über ihre Smartphones mit dem 5G-System verbinden konnten. Die Verbindung zwischen der Kamera und dem Medienserver wird über den Zugang zum 5G-Netz einschließlich der 60-GHz-mmWave-Verbindung hergestellt (Abb. 22).

Für den Versuch wird ein vollständiger 5G-Kern auf einem Edge-Computer-Knoten auf der IHP-Seite bereitgestellt. Dieser Kern steuert die am IHP installierte 5G-Ausrüstung. Somit ermöglicht die Basisimplementierung für den Versuch die Bewertung lokaler, nomadischer Edge-basierter Implementierungen (z. B. Abb. 23) sowie von Verbindungen, die an einem entfernten Standort, d. h. dem FOKUS-Standort, enden.

Die vielfältigen Evaluierungsaktivitäten, bei denen entweder das 5G-System allein oder zusammen mit den verschiedenen Teilen der Infrastruktur und als Teil eines Videoserver-Szenarios getestet wurde, haben gezeigt, dass das Testbed die Anforderungen der Dienste erfüllt und auch anspruchsvollere Dienste aufnehmen kann.

Die Arbeit in 5GENESIS hat auch die enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer FOKUS ermöglicht, mit dem das IHP die Einrichtung der Berliner Anlage im ICT-19-Projekt 5G-VICTORI leitet und mehrere Anwendungsfälle für Bahn/Medien/Future Mobility demonstriert. Das IHP wird das 5G-Testfeld für die weitere Evaluierung von 5G- über 5G/6G-Technologien nutzen, die intern für die Migration zu 6G-Netzen mit den neuen mmWave/THz/Photonic-Entwicklungen des IHP entwickelt wurden.



Abb. 23: Fraunhofer FOKUS Nomadischer Knoten auf dem IHP-Campus in Frankfurt (Oder).

Fig. 23: Fraunhofer FOKUS Nomadic node at the IHP campus in Frankfurt (Oder).

The main objective of the Berlin Platform was to set up a multi-technology, multi-site end-to-end 5G environment in a city testbed in the context of the yearly event Festival of Lights. The Berlin Platform demonstrated the application related to enhanced Mobile Broadband (eMBB) 5G service by deploying several hardware/software core and edge components at different sites in Berlin.

In 2021 this 5G network infrastructure was deployed at IHP. The different elements in the network can be flexibly deployed across different parts of the infrastructure (Fig. 21). A panoramic live streaming field trial was executed to allow a large number of users to gain access to a video live stream generated by a 360° camera. The majority of users that were involved in the trial were IHP employees that could connect to the 5G system using their smartphones. The connectivity from the camera to the media server is achieved via access to the deployed 5G network including the 60 GHz mmWave link (Fig. 22).

For the trial, a full 5G Core is deployed on an edge-compute node residing at the IHP side. This core controls the 5G equipment installed at IHP. Thus, the baseline deployment for the trial allows to assess local, nomadic edge-based deployments (e.g. Fig. 23), as well as connections terminating at a remote location, i.e. the FOKUS site.

The manifold evaluation activities involving either the 5G system alone, or tested together with the different parts of the infrastructure, and as part of a video server scenario, have shown the validity of the testbed to fulfill the services' requirements and to accommodate even more demanding services.

The work in 5GENESIS has also enabled the tight collaboration with Fraunhofer FOKUS, with which IHP is leading the Berlin Facility deployment in the ICT-19 project 5G-VICTORI, with the demonstration of several Rail/Media/Future Mobility applications. IHP will use the 5G testfield for further evaluation of 5G/beyond 5G/6G technologies developed in-house for the migration to 6G networks with IHP novel mmWave/THz/photonic developments.

Charakterisierung und Trennung von lebenden und toten Hefezellen mit CMOS-basierter DEP-Mikrofluidik

Characterization and Separation of Live and Dead Yeast Cells using CMOS-Based DEP Microfluidics

Die Charakterisierung und Manipulation von Zellen sind für klinische und diagnostische Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Die Immobilisierung und Isolierung spezifischer Zellen zur Erkennung von Krankheiten, die Trennung von lebenden und toten Zellen zur Diagnose von Krankheiten im Frühstadium sowie die Filterung und Reinigung von Zellen, Viren, Proteinen und Nanopartikeln sind wesentliche Beispiele für eine Vielzahl von medizinischen, biologischen und biomedizinischen Anwendungen. Dies ermöglicht eine frühzeitige Behandlung und erhöht die Chance, ein Leben zu retten.

Die Entwicklung von Lab-on-a-Chip (LOC)-Geräten, wie z. B. mikrofluidischen Plattformen, hat die Handhabung komplexer und kostspieliger laborgestützter Probenvorbereitungen und -analysen vereinfacht. Diese können die arbeitsintensiven und zeitaufwändigen traditionellen Verfahren ersetzen. Durch die Integration von mikrofluidischen Kanälen mit CMOS können mehrstufige Laborverfahren in einem einzigen Chip skaliert und Mikro- und Nanoliterproben vollständig isoliert verarbeitet werden.

Hier werden CMOS-basierte interdigitale Elektroden (IDEs) vorgeschlagen und entwickelt, um Zellen zu charakterisieren und zu manipulieren (Abb. 24). Diese IDE-Plattform kann mit mikrofluidischen Kanälen und Schaltkreisen durch die CMOS-Prozesslinie des IHP integriert werden, um gleichzeitig Zellen zu immobilisieren, zu erfassen und nachzuweisen. In diesem Projekt wurde die Dielektrophorese (DEP) als Zellcharakterisierungstechnik eingesetzt. Die Analyse des DEP-Spektrums verschiedener Zellsuspensionen wurde gründlich durch Finite-Elemente-Simulation und experimentell untersucht.

Experimente mit lebenden und toten Hefezellsuspensionen zeigten, dass Zellen durch positive DEP-Kraft an den Elektroden gefangen werden können. Abhängig von der relativen Permittivität der Zellen und des Mediums, das über die Elektroden fließt, sowie von Amplitude und Frequenz des Wechselstroms, zeigen die Hefezellen eine Translationsbewegung in positiver (p) und negativer (n) Richtung (Abb. 25).

Cell characterization and manipulation are critical when it comes to clinical and diagnostic applications. Immobilization and isolation of specific cells as a way to detect diseases, separation of live and dead cells as a means for early-stage disease diagnosis, as well as filtering and purification of cells, viruses, and proteins are essential examples in a variety of healthcare and biological applications. This allows early treatment and increases the chance of saving a life.

The development of lab-on-a-chip (LOC) devices such as microfluidic platforms has simplified the handling of complex and costly laboratory-based sample preparations and analyses. This can replace the labor-intensive and time-consuming traditional procedures. The integration of microfluidic channels with CMOS can scale down multiple-stage laboratory procedures all in a single chip and process micro and nanolitres samples in a fully isolated manner.

CMOS-based interdigitated electrodes (IDEs) are proposed and designed here to characterize and manipulate the cells (Fig. 24). This IDE platform can be integrated with microfluidic channels and circuits by the CMOS process line of IHP, for simultaneous cell immobilization, sensing, and detection. Herein, dielectrophoresis (DEP) was used as the cell characterization technique. The DEP spectrum analysis of various cell suspensions was investigated thoroughly by finite element simulation and experimentally.

Experiments with live and dead yeast cell suspensions showed that cells can be trapped at the electrodes by positive DEP force. Depending on the relative permittivity of the cells and medium flow over electrodes as well as amplitude and frequency of the AC, yeast cells exhibit translational movement in positive (p) and negative (n) directions (Fig. 25).

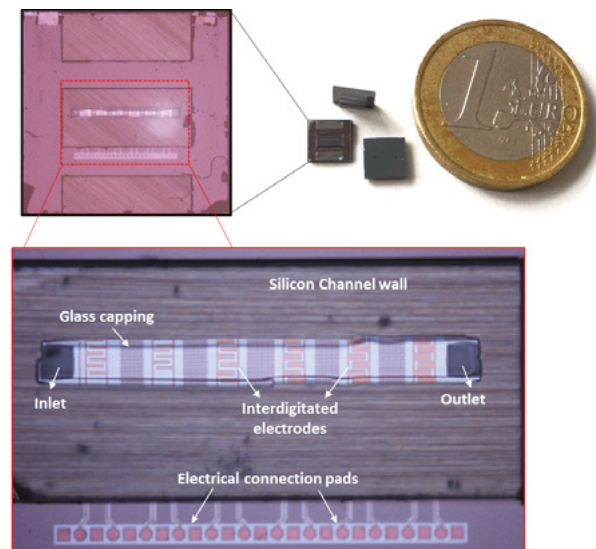


Abb. 24: CMOS-integriertes mikrofluidisches LOC-Gerät.

Fig. 24: CMOS integrated microfluidic LOC device.

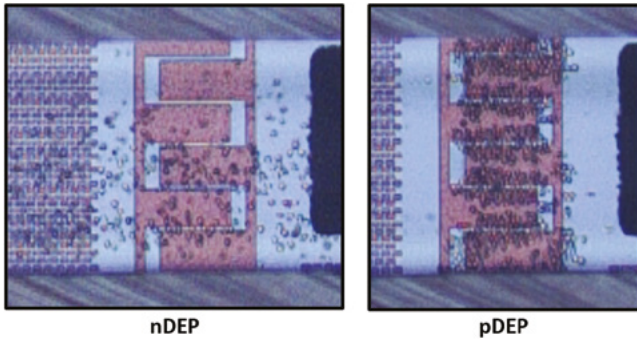


Abb. 25: Zellcharakterisierung innerhalb des mikrofluidischen Kanals mittels DEP.
Fig. 25: Cell characterization within the microfluidic channel using DEP.

Mit dieser Methode konnten wir die Antriebsrichtung der Zellen ändern, indem wir die Frequenz des angelegten elektrischen Feldes variierten. Das DEP-Kraft-Frequenz-Profil zeigte, dass eine Änderung der Frequenz die Zelltrajektorie beeinflusst und sich auf die Fallenausbeute im pDEP-Band auswirkt (Abb. 26).

Es wurde auch festgestellt, dass die Entwicklung des pDEP im Suspensionsmedium mit hoher Leitfähigkeit verschwindet. Neben den Errungenschaften der Zellmanipulation und des Zellfangs ermöglicht dieses System eine effektive Kontrolle verschiedener Zellen gleichzeitig. Bei unterschiedlichen DEP-Antworten lebensfähiger und nicht lebensfähiger Zellen könnte mit der gleichen Struktur auch eine Zellisolierung und -trennung mit hohem Durchsatz in einem nichtinvasiven Format erreicht werden (Abb. 27).

Das integrierte mikrofluidische LOC-Gerät mit ineinandergreifenden Elektroden ermöglichte die Charakterisierung und Manipulation der Zellen für Nachweis- und Trennanwendungen. Der Ansatz der differentiellen Trennung erwies sich als ausreichend gut, um das endgültige Design zu implementieren. Diese Validierungen waren vielversprechend für den Einsatz dieses mikrofluidischen Geräts in einer komplexeren LOC-Plattform für biologische und klinische Anwendungen. Die monolithische Integration des Geräts und sein Potential für die Probenvorbereitung, -erfassung, -trennung und -analyse auf einer einzigen Plattform sowie die Einfachheit des Betriebs bieten hervorragende Vorteile in Bezug auf Kosten und Vermarktung.

This method allowed us to switch the propulsion direction of cells by varying the frequency of the applied electric field. DEP force-frequency profile indicated that changing the frequency influences the cell trajectory and impacts the trapping yield over the pDEP band (Fig. 26).

It was also seen that the evolution of the pDEP disappears in high conductivity suspending mediums. Beyond the achievements of cell manipulation and trapping, this system permits effective control of different cells simultaneously. Upon distinct DEP responses of live and dead cells, high-throughput cell isolation and separation could also be achieved using the same structure in a noninvasive format (Fig. 27).

The proof-of-concept microfluidic integrated LOC device with interdigitated electrodes ensured the cells' characterization for detection and separation applications. The differential separation approach was found to work sufficiently well to be suited for implementing the ultimate design. These validations were promising towards using this microfluidic device in a more complex LOC platform for biological and clinical applications. Monolithic integration of the device and its potential for sample preparation, sensing, separation and analysis on a single platform as well as operational simplicity offer excellent benefits from a cost and commercialization perspective.

Abb. 26: Auswirkung der Frequenz auf die Fallenausbeute von immobilisierenden Zellen

Fig. 26: Frequency impact on trapping yield of immobilizing cells

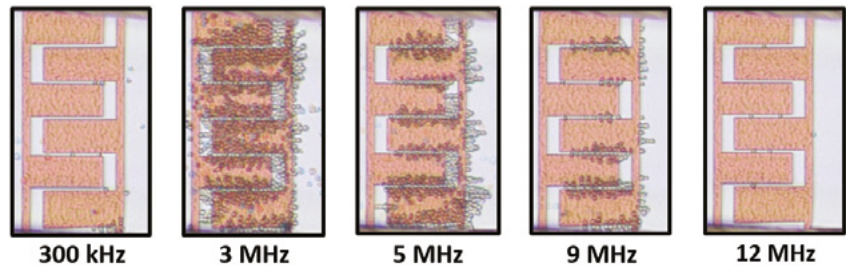
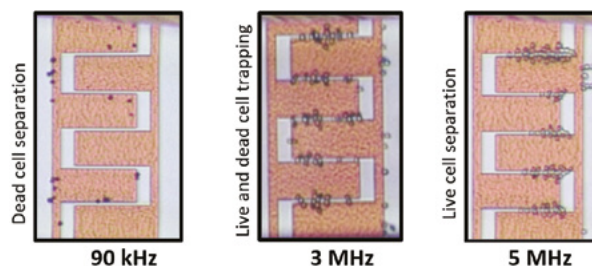


Abb. 27: Trennung von lebenden und toten Zellen beim Umschalten der Frequenz.

Fig. 27: Live and dead cell separation upon switching frequency.



Hybridintegrationsplattform für zuverlässige Hochfrequenz-Schaltkreise

GaN Densily Integrated with Si-CMOS for Reliable, Cost Effective High Frequency Power Delivery Systems

Das Ziel des Projektes Hyteck war die Erforschung und Entwicklung einer Packaging-Technologieplattform für die Hybridintegration verschiedener Halbleitertechnologien wie SiGe BiCMOS und GaN auf Basis einer Fan-out Wafer-level Packaging (FOWLP) -Technologie für Hochfrequenzanwendungen. Die Verfügbarkeit von FOWLP-Technologien, wie die hier angewandte eWLB-Technologie, erlangt eine zunehmend hohe Wichtigkeit, um den Anforderungen bezüglich Schaltungskomplexität, maximaler Verlustleistungen und der Kombination verschiedener Halbleitertechnologien gerecht zu werden. Die wesentlichen Inhalte und Arbeitspakete sind schematisch in Abb. 28 dargestellt.

The objective of the project Hyteck was the research and development of a packaging platform for the hybrid integration of different semiconductor technologies such as SiGe BiCMOS and GaN based on a fan-out wafer-level packaging (FOWLP) technology for high frequency applications. The availability of FOWLP technologies such as the well-known eWLB technology is becoming increasingly important to meet the requirements of circuit complexity, maximum power dissipation and the combination of different semiconductor technologies. The main contents and work packages are schematically summarized in Fig. 28.

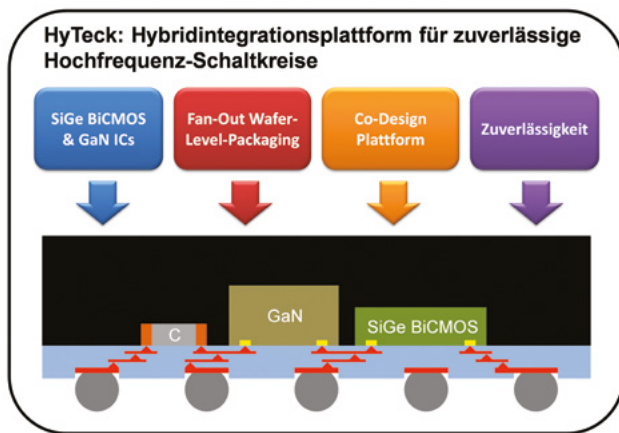


Abb. 28: Überblick über Inhalte und Hauptarbeitspakete des Projektes HyTeck.

Fig. 28: Overview about main content and workpackages of HyTeck project.

Im Rahmen des Projektes lag der Fokus des IHP auf folgende drei wissenschaftliche Kernthemen: 1) Hochfrequenz-Design und Charakterisierung der FOWLP-Technologie, 2) Entwicklung einer Methodik für das Co-Design von BiCMOS und FOWLP sowie 3) die thermische Evaluierung von SiGe BiCMOS und FOWLP-Technologie.

Die FOWLP-Technologie wurde bezüglich ihrer Hochfrequenzeigenschaften und Eignung für Millimeterwellenanwendungen untersucht. Dazu wurde die FOWLP-Technologie und hier speziell die Umverdrahtung systematisch analysiert und optimiert, um sehr gute HF-Performance bei hohen Frequenzen zu ermöglichen. Für eine Fan-Out-Technologie spielen HF-Leitungen mit minimaler Signaldämpfung eine entscheidende Rolle. Hierzu wurden die elektromagnetischen Eigenschaften verschiedener Signalleitungen, wie Mikrostreifen- und Koplanarleitungen, evaluiert. In Abb. 29 sind beispielhaft die gemessenen S-Parameter einer CPW-Signalleitung mit einer Leitungslänge von 4 mm gezeigt. Es konnten Signalleitungen mit sehr geringen Verlusten von < 0.5 dB/mm bis 110 GHz gezeigt werden. Vergleichbare Untersuchungen wurden für weitere passive Komponenten wie Spulen und Kapazitäten realisiert, um die technologische Leistungsfähigkeit der FOWLP-Technologie nachzuweisen.

Within the project, IHP focused on the following three core scientific topics: 1) high frequency design and characterization of the FOWLP technology, 2) development of a methodology for the co-design of BiCMOS and FOWLP, and 3) the thermal evaluation of SiGe BiCMOS and FOWLP technology.

The FOWLP technology was investigated regarding the high frequency performance and suitability for millimeter wave applications. Therefore the FOWLP technology and especially the redistribution layer were systematically analyzed and optimized enabling very good RF performance. For fan-out technologies, transmission lines with minimum insertion loss play a crucial role. For this purpose, the electromagnetic properties of different signal lines such as microstrip and coplanar lines were evaluated. Fig. 29 shows an example of the measured S-parameters of a CPW signal line with a line length of 4 mm. Signal lines with very low losses of < 0.5 dB/mm up to 110 GHz could be shown. Comparable investigations were realized for further passive components like inductors and capacitors to prove the performance of the FOWLP technology.

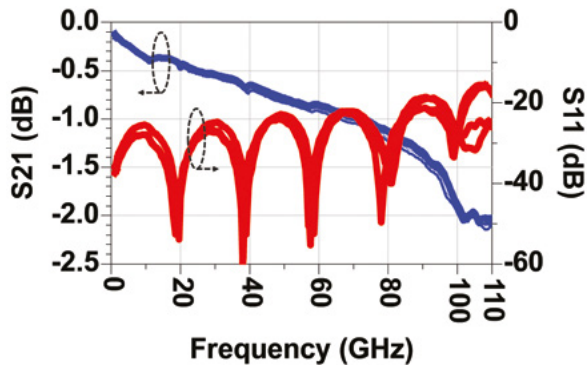


Abb. 29: Gemessene S-Parameter von CPW mit 4 mm Länge zeigt sehr geringe Einfügedämpfung bis in den Millimeterwellen-Frequenzbereich.

Fig. 29: S-parameter measurements of CPW with 4 mm line length showing the low insertion loss in the millimeter wave frequency range.

Das effiziente Design von ICs in FOWLP-Technologie, speziell im Hochfrequenzbereich, erfordert ein Chip-Package Co-Design. Hierzu wurde eine Designmethodik und ein initiales Process Design Kit entwickelt (Abb. 30). Neben dem gemeinsamen Layout von Chip und Package ermöglicht dies einen nachfolgenden automatisierten Design Rule Check (DRC) und Vergleich zwischen Layout und Schematic (LVS) zur effizienten Fehlerüberprüfung. Dies ermöglicht ein „First-time-Right“-Ansatz, was aufgrund der hohen Fertigungskosten der SiGe-BiCMOS- als auch der Packaging-Technologie unabdingbar ist.

Die thermische Leistungsfähigkeit einer FOWLP spielt eine entscheidende Rolle für die Anwendbarkeit bei signifikanten Verlustleistungen. Im Rahmen des Projektes wurden die thermischen Eigenschaften der SiGe-BiCMOS-Technologie mit FOWLP untersucht. Dazu wurde ein dedizierter Thermo-test-Chip (TTC) mit einer Vielzahl von Heizelementen und Temperatursensoren innerhalb der SiGe-BiCMOS-Technologie entwickelt, um ein Temperatur-Mapping sowie die Generation variabler Verlustleistungen auf dem Chip, z. B. mittels Hot Spots, zu ermöglichen. Der TTC in FOWLP sowie das Ergebnis einer beispielhaften elektrothermischen Messung zeigt die Möglichkeiten für die thermische Charakterisierung. Diese Ergebnisse sind essentiell, um genaue Vorhersagen der thermischen Leistungsfähigkeit derartiger BiCMOS-FOWLP-Systeme zu ermöglichen.

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten sind elementar für verschiedenste Anwendungen im Bereich Wafer-level Packaging. Speziell für Hochfrequenzanwendungen sowie 2.5/3D-Heterointegration sind diese Ergebnisse von großer Wichtigkeit und lassen sich unmittelbar auf zukünftige Forschungsfragen applizieren.

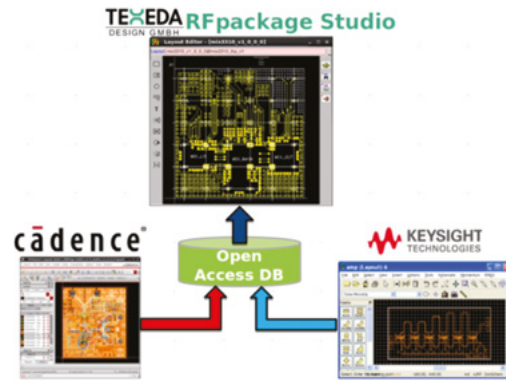


Abb. 30: Designmethodik für Chip-Package Co-Design, basierend auf der kommerziell verfügbaren Software TexEDA.

Fig. 30: Design methodology for chip-package co-design based on the commercially available EDA software TexEDA.

The efficient design of integrated circuits in FOWLP technology, especially for millimeter wave applications, requires a chip package co-design. A design methodology and an initial process design kit were developed (Fig. 30). In addition to the joint layout of the semiconductor chip and the package, this enables a subsequent automated design rule check (DRC) and a comparison between layout and schematic (LVS) which is mandatory for a “first-time-right” approach, which is essential due to the high manufacturing costs of SiGe BiCMOS as well as the packaging technology.

The thermal performance of a FOWLP is highly important for applications with high power dissipation. In this project, the thermal characteristics of the SiGe BiCMOS technology together with the FOWLP were investigated. A dedicated thermal test chip (TTC) with a variety of heating elements and temperature sensors was developed within the SiGe BiCMOS technology enabling a temperature mapping as well as generation of variable power dissipation on the chip, e.g., using hot spots. The TTC in FOWLP as well as the result of an exemplary electro-thermal measurement shows the possibilities for thermal characterization. These results are essential to enable accurate predictions of the thermal performance of such BiCMOS-FOWLP systems.

The work carried out in the project is essential for various applications in the field of wafer-level packaging. Especially for high-frequency applications and 2.5/3D heterogeneous integration, these results are of great importance and can be directly applied to future research activities.

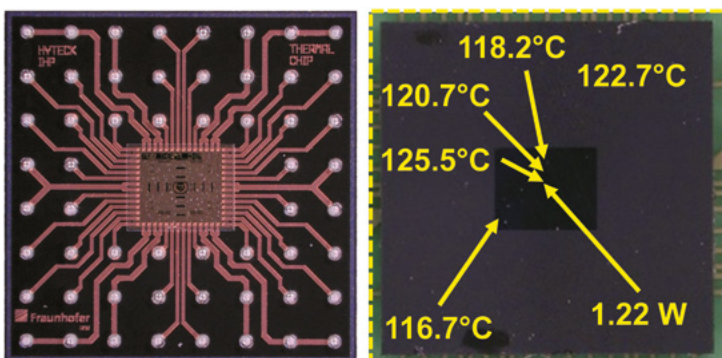


Abb. 31: Mikroskopaufnahme vom Thermo-test-Chip im FOWLP (links) sowie Temperatur-Mapping zur Messung eines FOWLP mit konzentrierter Verlustleistung.

Fig. 31: Microscope image of thermotest IC in FOWLP technology (left) and temperature mapping for a thermo-electric measurement with a concentrated heat generation in the center of the SiGe BiCMOS chip.

Entwicklung eines weltraum-qualifizierten Analog-Digital-Wandlers

Development of a Space-Qualified Analog-to-Digital Converter

Im Rahmen des SPAD-Projektes, welches mit Mitteln aus dem ProFIT-Förderprogramm der ILB unterstützt wird, entwickelt das IHP zusammen mit der Firma Arquimea Deutschland einen Analog-Digital-Wandler (engl. ADC), der für die Weltraumqualifizierung vorbereitet ist. Dieser anwendungsspezifische integrierte Schaltkreis (ASIC) könnte in zukünftigen Weltraumanwendungen, z. B. im Bereich der Telemetrie, die Verarbeitung und Digitalisierung analoger Eingangssignale übernehmen.

Die meisten in Europa verwendeten ADC stammen jedoch von außereuropäischen Unternehmen und unterliegen in vielen Fällen Ausfuhrbeschränkungen (ITAR). Ein dadurch entstehender Trend, nicht qualifizierte, sog. Commercial-off-the-shelf (COTS)-Produkte für diesen Anwendungsbereich einzusetzen, bringt jedoch kostspielige Screening-Tests mit sich, in welchen die Funktionalität, die Leistungsfähigkeit, aber auch die Robustheit gegenüber Strahlung überprüft werden. Alternative, europäische Lösungen hingegen weisen jedoch meist einen höheren Energieverbrauch oder geringere Auflösung bei der Signalkonvertierung auf. An diesem Punkt setzt das SPAD-Projekt an. Der resultierende Schaltkreis zeichnet sich durch eine ähnliche Leistungsfähigkeit bei geringem Leistungsverbrauch, eine hohe Auflösung und eine Robustheit gegenüber Strahlung aus. Das IHP ist im Rahmen dieses Projektes für die Entwicklungen und Implementierungen des digitalen Kerns des ADC, als auch für die elektrischen Messungen und die Fertigung der SPAD ADC Chips verantwortlich gewesen.

Das Ziel ist ein strahlungsrobuster Analog-Digital-Wandler mit einer 14-bit-Auflösung sowie einem Arbeitstakt von 125 MHz. Die Ausgangsrate ist im Bereich von 7.5 - 15.6 MSPS über ein Serial-Peripheral-Interface (SPI) konfigurierbar. Darüber hinaus ist der Kern des ADC (gelbe Markierung in Abb. 32) so konzipiert, dass er sich später leicht in komplexe Chips integrieren lässt.

Within the SPAD project, which is supported by funds from the ProFIT funding program of the ILB, the IHP together with the company Arquimea Deutschland is developing an Analog-to-Digital Converter (ADC), which is prepared for space qualification. This Application Specific Integrated Circuit (ASIC) can process and digitize analog input signals in future space applications, e.g. in the field of telemetry.

However, most ADC used in Europe originate from non-European companies and are in many cases subject to ITAR export restriction. A resulting trend to use non-qualified, so-called commercial-off-the-shelf (COTS) products for this application area, however, entails costly screening tests in which the functionality, the performance, but also the robustness against radiation are checked. Alternative European solutions on the other hand, usually have higher energy consumption or lower resolution in signal conversion. This is where the SPAD project comes in. The resulting circuit features similar performance with low power consumption, high resolution and robustness against radiation. IHP has been responsible for the development and implementation of the digital core of the ADC as well as for the electrical measurements and the fabrication of the SPAD ADC chips.

The main objective is a radiation-robust ADC with a 14-bit resolution and an operating clock of 125 MHz. Moreover, the output rate is configurable in the range of 7.5-15.6 MSPS via a serial-peripheral interface (SPI). Furthermore, the main core of the ADC (yellow marking in Fig. 32) has to be designed to be easily integrated into more complex future chips.

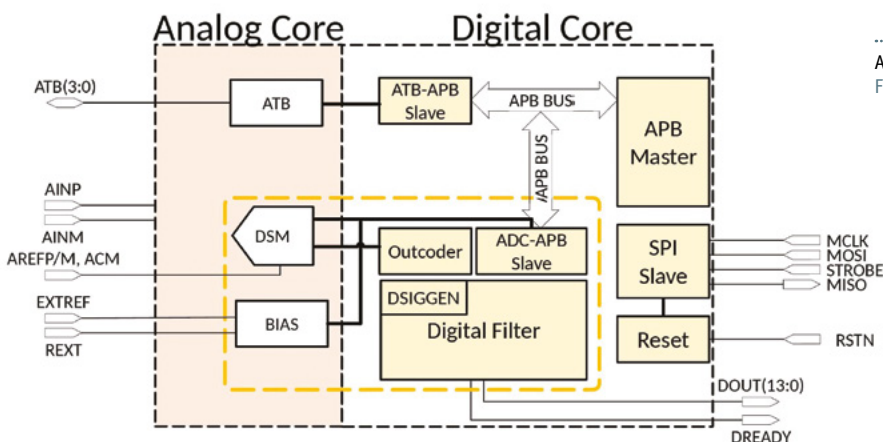


Abb. 32: Vereinfachtes Blockschnittbild
Fig. 32: Simplified Block Diagram

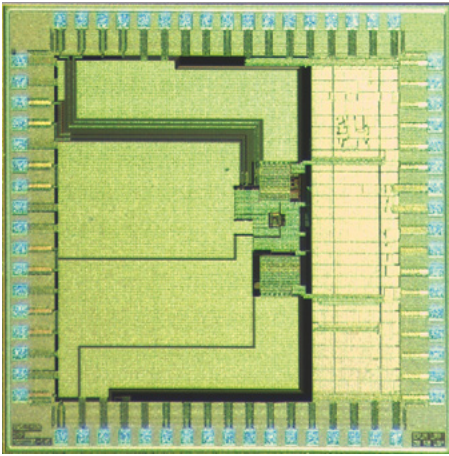


Abb. 33: Chip-Foto des SPAD-ADC-Chips

Fig. 33: Micro-photograph of SPAD ADC Chip

Die analogen Eingangssignale werden im analogen Teil abgetastet und digitalisiert. Ein Kodierer übergibt diese Daten an einen digitalen Filterblock für die Weiterverarbeitung. Dieser prozessiert den binären Datenstrom und konvertiert das Ergebnis zu einem 14-bit-Digitalwort.

Um eine robuste Implementierung gegenüber Strahlung gewährleisten zu können, sind IHP-strahlungsharte Speicherzellen (Δ TMR Flip-Flops) verwendet worden. Darüber hinaus ist die Designmethodik des IHP für das Erhalten von strahlungsharten Designs (Radiation-Hardening-by-Design) mit Standardtechnologien verfeinert und erweitert worden. Das Portfolio des IHP kann somit in naher Zukunft um weitere strahlungsharte Standardzellen erweitert werden. Dazu zählen im Besonderen Zellen, die es erlauben, den Systemtakt sicher abzuschalten sowie Flip-Flops, die Daten dennoch verändert halten oder korrigieren können.

Für die Implementierung und Fertigung ist die hauseigene SG13 BiCMOS Technologie gewählt worden. Die Gesamtfläche der Test Chips des SPAD ADC beträgt 15 mm^2 (Abb. 33). Wie mit elektrischen Messungen nachgewiesen werden konnte, ist der gemessene Leistungsverbrauch im Bereich heutiger kommerzieller Lösungen und beläuft sich für den digital Teil um $10 - 30 \text{ mW}$ in Abhängigkeit von der Konfiguration.

Die Chips sind nach den elektrischen Messungen in Keramikpackages integriert worden, erneut gemessen worden (Abb. 34) und anschließend für Strahlungstests vorbereitet worden. Diese wurden schließlich von Arquimea bei RADEF (SEE/SEL, Finnland) sowie RADLAB (TID, Spain) durchgeführt.

Nach den ersten, vorläufigen Ergebnissen weisen die SPAD ADC Chips keine Leistungseinbußen unter Strahlung auf. Zudem ist kein durch Strahlung induzierter Kurzschluss (engl. Latch-Up) detektiert worden. Ebenso können die selbstkorrigierenden Flip-Flops, die sogenannten resultierende Fehler (engl. Upsets), auch unter Strahlung korrigieren.

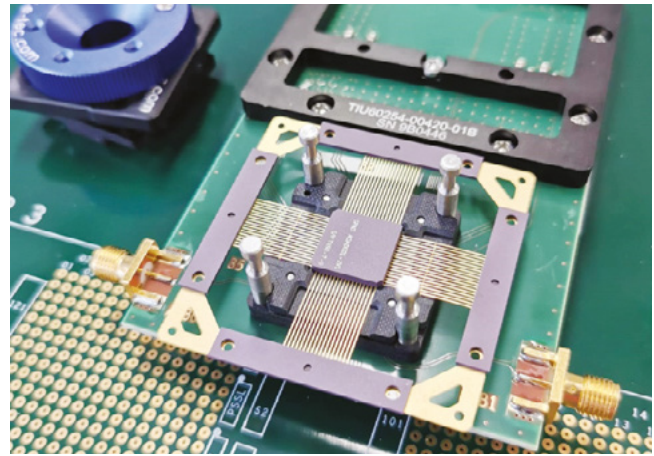


Abb. 34: Integrierter SPAD ADC Chip im Test-Sockel

Fig. 34: Integrated SPAD ADC Chip in Test Socket

The analog input signals are sampled and digitized in the analog section. An encoder passes this data to a digital filter block for further processing. This processes the binary data stream and converts the result to a 14-bit digital word.

To be able to ensure a robust implementation against radiation, IHP radiation-hard memory cells (Δ TMR flip-flops) have been used. In addition, IHP's design methodology for obtaining Radiation-Hardening-by-Design (RHBD) applications using standard technologies has been refined and extended. Thus, the future portfolio of the IHP can consist of further radiation-hard standard cells in the near future. In particular, this includes cells that allow the system clock to be switched off safely and flip-flops that can keep data unchanged or correct it otherwise.

In-house SG13 BiCMOS technology has been chosen for implementation and manufacturing. The total area of the test chips of the SPAD ADC is 15 mm^2 (Fig. 33). As could be proven with electrical measurements, the measured power consumption is in the range of today's commercial solutions and amounts for the digital part around $10 - 30 \text{ mW}$ depending on the configuration.

After the electrical measurements, the chips were integrated into ceramic packages, remeasured (Fig. 34) and prepared for radiation tests. These were finally performed by Arquimea at RADEF (SEE/SEL, Finland) and RADLAB (TID, Spain).

According to the first, preliminary results, the SPAD ADC chips do not show any performance degradation under radiation. Furthermore, no radiation induced latch-up has been detected. Likewise, the self-correcting flip-flops can correct resulting errors (upsets) even under radiation.

IHP Joint Labs

mit



b-tu

Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Sabancı
Üniversitesi



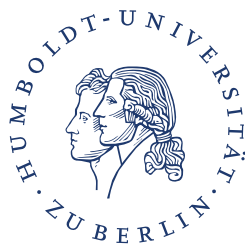
Gemeinsame Labore
Joint Labs

Gemeinsame Labore

Die Brücke zwischen Forschung und Hochschulen bilden am IHP die neun Joint Labs. In der Leibniz-Gemeinschaft gehörte das IHP zu den ersten Einrichtungen mit dieser Kooperationsform und ist auch jetzt eine der aktivsten. In Potsdam, Cottbus, Wildau und Berlin sowie auf internationaler Ebene in Poznań, Zielona Góra und Istanbul arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts eng mit den universitären Einrichtungen zusammen. Die Ziele der Zusammenarbeit in Joint Labs bestehen in der Erweiterung der Grundlagenforschung, der schnelleren Umsetzung von universitärer Forschung in die Anwendung sowie der Förderung und der Gewinnung von technisch-wissenschaftlichem Nachwuchs durch gemeinsame Lehre sowie Betreuung und Begutachtung von Qualifikationsarbeiten der Partnerhochschulen. Die Themen der Kooperationen, intensiv und erfolgreich durch zahlreiche gemeinsame Forschungsprojekte bearbeitet, sind strategisch ausgerichtet und orientieren sich an den Forschungsprogrammen des IHP.

Joint Labs

The bridge between research and universities is built at IHP by the nine Joint Labs. Within the Leibniz- Association, IHP was one of the first institutions with this form of cooperation and is still one of the most active. In Potsdam, Cottbus, Wildau and Berlin as well as on an international level in Poznań, Zielona Góra and Istanbul, scientists of the institute are working closely together with the universities. The goals of the cooperation in Joint Labs are the enhancement of basic research, the faster transfer of university research into application as well as the promotion and recruitment of young technical-scientific talents through joint teaching as well as supervision and review of qualification theses of the partner universities. The topics of the cooperations, intensively and successfully worked on through numerous joint research projects, are strategically oriented and aligned with the research programs of the IHP.



Joint Lab IHP < > Universität Potsdam

Entwurf von drahtlosen und eingebetteten Systemen

Wireless and Embedded System Design

Kontakt Contact	Prof. Dr. Miloš Krstić (IHP), Prof. Dr. Bettina Schnor (UP)
Partner Partner	Universität Potsdam, Institut für Informatik und Computational Science
Gründung und Eröffnung Opening	2014/2015
Ausgewählte Projekte Selected Projects	ENROL (DFG), MORFEUS (BMBF)
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/universitaet-potsdam

Die Erforschung und Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung eines effizienten Entwicklungsprozesses von komplexen energieeffizienten und zuverlässigen eingebetteten Chips und Systemen sind ein Schwerpunkt des Joint Lab. Das DFG-Projekt ENROL beschäftigt sich mit fehlertoleranten Methoden für den asynchronen Logikentwurf. Im Projekt MORFEUS liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Resilienz der eingebetteten Systeme. Die Forschungsaktivitäten des Joint Lab umfassten im Jahr 2021 drei veröffentlichte Konferenz-/Workshop-Beiträge, die sich insbesondere mit strahlungsharten Lösungen für asynchrone Architekturen und KI-Chip-Design, das mit den Studierenden der Universität Potsdam durchgeführt wurde, befassten. Außerdem wurden in 2021 vier Bachelorarbeiten im Joint Lab verteidigt. Die Arbeiten der Studierenden konzentrierten sich hauptsächlich auf die aufkommenden Themen, wie z. B. KI-Verarbeitungsarchitekturen aber auch auf fehlertolerantem Computing. Ein weiteres Thema des Joint Lab ist die Lehre. Es wurden Vorlesungen über Hardware-Architekturen für KI-Anwendungen und Einführung in HDL- und SDL-Sprachen gehalten. Die Studierenden konnten ihr Wissen im neuen Joint Lab im Campus Golm vertiefen, welches mit modernsten Testgeräten und FPGA-Evaluierungsplattformen ausgestattet ist. Dieses Joint Lab ist Teil des Neubaus des Instituts für Informatik (IFI), das seit Frühjahr 2021 in Betrieb ist. Abschließender Höhepunkt dieses Joint Lab ist das Kick-off-Meeting des Projekts BB-KI-Chips im Dezember 2021, das sich mit Hardware-Themen für KI-Anwendungen in der Lehre beschäftigt.

The research and development of methods and tools for supporting an efficient development process of complex energy-efficient and reliable embedded chips and systems are a main focus of the Joint Lab. The DFG-Project ENROL focuses on fault-tolerant methods for asynchronous logic design. In the MORFEUS project, the research is focused on the resiliency of the embedded systems. The research activities of the Joint Lab included three published conference/workshop contributions in 2021, addressing in particular the radiation hard solutions for asynchronous architectures and AI chip design that has been performed with the students at the University of Potsdam. Moreover, four bachelor theses have been defended in the Joint Lab in 2021. The works of the students have been mainly focused on the emerging topics, such as AI processing architectures but also on fault-tolerant computing. Another topic of the Joint Lab is teaching. Lectures on hardware architectures for AI applications and introduction to HDL and SDL languages were held. Students could strengthen their knowledge in the new Joint Lab at the campus Golm, which is equipped with state-of-the-art test devices and FPGA evaluation platforms. This Joint Lab is a part of the new building of the Institute for Computer Science that has been operating since spring 2021. Final highlight of this Joint Lab is the kick-off meeting of the project BB-KI-Chips, devoted to hardware topics for AI applications in teaching that started in December 2021.

Das Joint Lab befindet sich seit dem Frühjahr 2021 im Neubau des Instituts für Informatik auf dem Campus Golm.
Joint Lab is since spring 2021 in new building of Institute for Computer Science in campus Golm.



Joint Lab IHP < > University of Zielona Góra

Verteilte Messsysteme und drahtlose Sensor-Netzwerke

Distributed Measurement Systems and Wireless Sensor Networks

Kontakt Contact	Dr. Krzysztof Piotrowski (IHP), Prof. Dr. Ryszard Rybski (UZ)
Partner Partner	University of Zielona Góra
Gründung und Eröffnung Opening	2019
Ausgewählte Projekte Selected Projects	SmartGrid Plattform, SmartRiver
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/universitaet-zielona-gora

Dieses Joint Lab untersucht alle Aspekte der praktischen Ansätze der verteilten Messsysteme. Solche Messsysteme beinhalten einen ressourceneingeschränkten Teil, normalerweise unter den Namen drahtloses Sensornetzwerk, Internet of Things (IoT) oder Cyber-physisches System (CPS) bekannt. Dieses Sensor- und Aktuator-Netzwerk wird in der überwachten Umgebung installiert, interagiert mit dieser Umgebung und kommuniziert mit dem leistungsfähigerem Teil des Messsystems, welches sich z. B. in der Cloud befindetet. Die Kombination dieser zwei Teile erlaubt Anwendungen in Bereichen wie Umweltmonitoring, Smart Grid, Smart City und Ähnlichen zu implementieren. Solche Anwendungen bearbeiten sehr große Datenmengen aus verschiedenen Quellen und von verschiedenen Besitzern. Sie brauchen Zuverlässigkeit und Sicherheit, welche zusammen mit einer weiteren und wichtigen Eigenschaft von verteilten Systemen – Verfügbarkeit - die Entwicklung von solchen Messsystemen nicht trivial machen.

Dieses Joint Lab ist ein Ergebnis einer schon länger existierenden Zusammenarbeit mit der Universität Zielona Gora. Die Kooperation wurde im Februar 2016 vertraglich fixiert und zeichnet sich durch gemeinsame Vortrags- und Lehraktivitäten sowie fachspezifische Projekte aus.

Im Rahmen der Zusammenarbeit wurde seit dem Jahr 2018 ein gemeinsames INTERREG-Projekt (SmartGrid Plattform) schon finalisiert, ein weiteres ist gerade in Bearbeitung (SmartRiver).

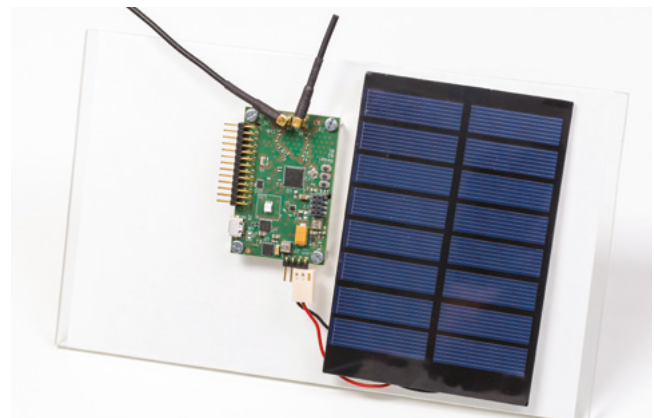
Es gibt auch weitere Forschungsprojekte, die in diesem Themenbereich realisiert werden (EU-H2020-ebalance plus, BMBF-AMMOD, INTERREG-SpaceRegion). Im Rahmen der Kooperation wurden auch mehrere Diplomarbeiten realisiert – seit dem Jahr 2018 waren es 14 Bachelorarbeiten und fünf Masterarbeiten. Seit dem Jahr 2020 wurden elf gemeinsame Publikationen veröffentlicht.

This Joint Lab focuses on all aspects related to practical approaches of distributed measurement systems. Such measurement systems contain a resource-constrained part usually known as a wireless sensor network (WSN), Internet of Things (IoT) or cyber-physical system (CPS). The sensor and actuator network installed within the monitored environment interacts with it and communicates with the other, more powerful part of the measurement system located, e.g., in the cloud. Combination of these two parts allows implementing applications in areas such as environmental monitoring, smart grid, smart city or the like. All these applications handle huge amounts of data from different sources and owned by different parties. They require reliability and security, and together with another feature important in distributed systems – availability, which make the design of such measurement systems far from trivial.

This Joint Lab is a result of an already longer existing cooperation with the University of Zielona Gora. The cooperation was contractually agreed in February 2016. The cooperation is characterized by joint lectures and teaching activities as well as subject-specific projects.

Within this cooperation, since the year 2018, we have already realized one INTERREG Project (SmartGrid Plattform) and another one is currently in progress (SmartRiver).

There are also further research projects realized in this subject area (EU H2020 – ebalance plus, BMBF – AMMOD, INTERREG - Space-Region). Within this cooperation, multiple diploma theses have also been realized – since 2018 there were 14 bachelor theses and five master theses. Since 2020, eleven joint papers were published.



Joint Lab IHP < > TU Berlin

Bioelektronik

Bioelectronics

Kontakt Contact	Prof. Dr. Mario Birkholz (IHP), Prof. Dr. Peter Neubauer (TU Berlin)
Partner Partner	Technische Universität Berlin, Institut für Biotechnologie
Gründung und Eröffnung Opening	2012/2013
Ausgewählte Projekte Selected Projects	Photonische Biosensorik, Zellseparation
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/technische-universitaet-berlin-bioelektronik

Biosensorik und die elektrische Zellmanipulation mittels Dielektrophorese waren auch in 2021 die zentralen Arbeitsthemen am Joint Lab für Bioelektronik.

Im Rahmen eines BMBF-Förderprogramms für die Photonik-Forschung wurde am TUB-Zweig des Joint Labs das EvaDetekt-Projekt gestartet, in dem „evaneszente optische Felder zur ultrasensitiven Detektion von Pathogenen“ eingesetzt werden. Das Vorhaben setzt ein 2020 abgeschlossenes DFG-Projekt fort, in dessen Rahmen Mikroringresonatoren als Biosensoren mit dem Effekt der Dielektrophorese kombiniert wurden. Nachdem das Prinzip nachgewiesen war, wird das innovative Biosensorprinzip nun auf erste Modellsysteme angewandt, wofür medizinisch besonders relevante Pathogene ausgewählt wurden.

Im neu gestarteten Projekt zeigt sich der Vorteil der Zusammenarbeit mit einem Partner aus den Lebenswissenschaften: So verfügt das Institut für Biotechnologie der TU Berlin auf der einen Seite über die Labore der entsprechenden Sicherheitsklasse und ist auf der anderen Seite in der Lage, nichtpathogene Mikroorganismen für die Untersuchungen bereitzustellen.

Für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit wurde ein neuer Weg eingeschlagen, indem das Joint Lab mit regelmäßigen Berichten auf der Mastodon-Instanz social.tchncs.de startete. Mastodon ist ein soziales Netzwerk, das ähnlich wie das bekanntere Twitter arbeitet und einen Teil der Funktionen gewährt, die oft mit Facebook-Auftritten realisiert werden. Anders als bei diesen weit verbreiteten Social Media erfolgt die Kommunikation über Mastodon jedoch unter Schutz der Privatsphäre der Nutzer und in völliger Übereinstimmung mit der DSGVO. Das Urteil des Europäischen Gerichtshofs zur Ungültigkeit des EU-US-Datenschutzabkommens von 2016, dem sog. Privacy Shields, hat gezeigt, dass ein Umdenken notwendig ist. Mit dem Start des Mastodon-Kanals social.tchncs.de/@jlb wird das Joint Lab dieser Vorgabe gerecht, siehe Abbildung.

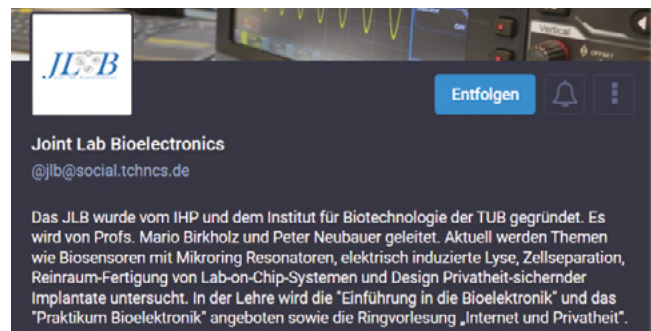
Biosensor technology and electrical cell manipulation by means of dielectrophoresis were again the central working topics in 2021 at the Joint Lab for Bioelectronics.

As part of a BMBF funding program for photonics research, the EvaDetekt project was launched at the TUB branch of the Joint Lab, using "evanescent optical fields for ultrasensitive detection of pathogens." The project continues a DFG project completed in 2020, which combined microring resonators as biosensors with the effect of dielectrophoresis. Now that the principle has been proven, the innovative biosensor approach is being applied to first model systems, for which pathogens of particular medical relevance have been selected.

In the newly launched project, the advantage of working with a partner from the life sciences becomes evident: on the one hand, the Institute of Biotechnology at TU Berlin has the laboratories with appropriate safety class and, on the other hand, is able to provide non-pathogenic microorganisms for the investigations.

For the communication with the public a new route was taken by starting the Joint Lab with regular reports on the Mastodon instance social.tchncs.de. Mastodon is a social network that works similarly to the better-known Twitter, granting some of the functionality often realized with Facebook sites. However, unlike these widely used social media, communication via Mastodon is done in a way that protects the privacy of users and is fully compliant with the GDPR. The ruling of the European Court of Justice on the invalidity of the EU-US data protection agreement of 2016, the so-called Privacy Shields, has shown that a rethinking is necessary. With the launch of the Mastodon channel social.tchncs.de/@jlb, the Joint Lab meets this requirement, see figure.

Soziales Netzwerk Mastodon
Mastodon social network



Joint Lab IHP < > BTU Cottbus-Senftenberg

Zuverlässige Sensor-Netzwerke

Dependable Sensor Networks

Kontakt Contact	Prof. Dr. Peter Langendörfer (IHP), Prof. Dr. Michael Hübner (BTU Cottbus-Senftenberg)
Partner Partner	BTU Cottbus-Senftenberg
Gründung und Eröffnung Opening	2014 gegründet, offizielle Eröffnung 2015 (Frühjahr)
Ausgewählte Projekte Selected Projects	KISS_KI: https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/kiss_ki iCampus: https://www.b-tu.de/icampus/ Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Cottbus: https://www.kompetenzzentrum-cottbus.digital/
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/btu-cottbus-senftenberg

Dieses Joint Lab untersucht zuverlässige und sichere verteilte Systeme mit einem Schwerpunkt auf zeitkritische Systeme. In den vergangenen Jahren sind verteilte Systeme und sensorbasierte Netze in den weltweiten Fokus des Forschungsinteresses gerückt. Solche Systeme bestehen aus Computern und Netzwerkverbindungen. Sie werden zur Kontrolle und Signalverarbeitung in realen Umgebungen eingesetzt, wie beispielsweise in Anwendungen von Smart Power Grids, Flugsicherheitskontrolle, der Steuerung von Fahrzeugen, in medizinischen Anwendungen und im Umweltmonitoring. In der Literatur werden sie auch als Cyber Physical Systems bezeichnet. Die Systemumgebungen sind typischer Weise durch hohe Realzeitanforderungen und durch die Notwendigkeit charakterisiert, Ausnahmestände und Fehler in sicherheitskritischen Anwendungen zu bearbeiten. Gleichzeitig werden die Zuverlässigkeitsanforderungen an verteilte Computersysteme immer höher. Die Fehlerbehandlung in solchen Systemen verursacht einen signifikanten zusätzlichen Stromverbrauch und bedarf zusätzlicher Hardware, insbesondere, wenn die Fehlerbehandlung in extrem kurzer Zeit, z. B. einem Clockzyklus, erfolgen muss. Es existieren partiell konkurrierende Herausforderungen: Einerseits muss ein ausreichendes Niveau an Zuverlässigkeit mit minimalem Aufwand erreicht werden, andererseits müssen Schutzfunktionen für die Sicherheit realisiert werden, sodass die Systemfunktion sowohl unter Fehlerbedingungen als auch unter Angriffsbedingungen abgesichert ist. Vorfälle wie der Angriff auf das Wasserwerk in Oldsmar, Florida, USA im Februar 2021 zeigen eindrucklich, wie wichtig IT-Sicherheit in vernetzten Systemen und für die Gesellschaft ist. Die Erkennung und Verhinderung ebensolcher Angriffe sind das Ziel des Projektes KISS_KI, in dem Methoden der Künstlichen Intelligenz zur Erkennung von Angriffen gegen Automatisierungsnetze im Bereich kritischer Infrastrukturen, hier Wasserwerke, untersucht werden. Mit diesem Ansatz können u. U. auch Fehlfunktionen in den Anlagen erkannt werden.

Das Joint Lab bringt seine Kompetenzen seit 2021 im Bereich IT-Sicherheit auch in das Erasmus+ Projekt Cyber F-I-T ein, das 2021 begonnen wurde.

Im Innovationscampus μ Sensorik-Projekt ForTune wurden sehr erfolgreich Methoden der Künstlichen Intelligenz zur Bestimmung des Zustandes von Werkzeugen untersucht und erste Demonstratoren realisiert. Hier gibt es zudem eine enge Kooperation mit dem Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Cottbus, das inzwischen auch Beratung zu Themen der Künstlichen Intelligenz anbietet.

Ende 2021 wurden die Projekte Waldwächter und iCampus II bewilligt. In beiden wird die Zusammenarbeit in den Bereichen Künstliche Intelligenz und heterogene Netzwerke fortgesetzt und vertieft.

The Joint Lab focuses on the dependability and security of distributed computer systems with an emphasis on the role of timing constraints. In recent years, the technology of distributed computer- and sensor-based systems has become a worldwide focus of research. Such systems incorporate computers and computer networks that perform control and signal processing in a real-world environment, recently also labelled as cyber physical systems. The real-world environment in which these systems function is typically characterized by realtime constraints and by the need to handle exceptional conditions and errors in safety-critical applications. At the same time, reliability requirements for distributed computer systems are constantly growing. Error management in these systems generally induces considerable power-consumption and hardware overhead, especially if the error management has to be performed in a short time such as a single clock cycle (e.g., based on "hot" backup elements). The emerging challenge is two-fold. First, error management must be performed at minimum cost and overhead. Second, security aspects may have a further impact, requiring system design approaches that consider dependability and security in close combination. Essentially this means that critical system functions must be secured even under error conditions and in case of attacks by various mechanisms. Incidents such as the attack on the waterworks in Oldsmar, Florida, USA, in February 2021 are a powerful reminder of the importance of IT security in networked systems and for society. The detection and prevention of such attacks are the goal of the KISS_KI project, in which methods of artificial intelligence for the detection of attacks against automation networks in the area of critical infrastructures, such as waterworks, are being investigated. This approach may also be able to detect malfunctions in the systems.

The Joint Lab is also contributing its competences in the field of IT security to the Erasmus+ project Cyber F-I-T, which was started in 2021.

In the Innovation Campus μ Sensorik project ForTune, methods of artificial intelligence for determining the condition of tools were investigated very successfully and the first demonstrators were realized. There is also close cooperation with the Mittelstand 4.0 competence center in Cottbus, which now also offers advice on artificial intelligence topics.

The two projects Waldwächter and iCampus II were approved at the end of 2021. In both, the cooperation in the areas of artificial intelligence and heterogeneous networks will be continued and deepened.

Joint Lab IHP < > TH Wildau

Photonische Bauelemente & Dünnschichttechnologien

Photonic Devices & Thin Film Technologies

Kontakt Contact	Prof. Dr. Andreas Mai (IHP), Prof. Dr. Sigurd Schrader (TH Wildau), Dr. Patrick Steglich (IHP)
Partner Partner	Technische Hochschule Wildau AG für Photonik, Laser- und Plasmatechnologien
Gründung und Eröffnung Opening	2006
Ausgewählte Projekte Selected Projects	DoGeALD, GETiT, INTENS, NET4AI
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/technische-hochschule-wildau

Das Joint Lab IHP/TH Wildau konnte die gemeinsamen Arbeiten aus der Kooperation der Technischen Hochschule Wildau und dem IHP erfolgreich fortsetzen. Die Lehre wurde auch 2021 im Wesentlichen online durchgeführt. Sie wird zunehmend durch den Gruppenleiter und weitere Mitarbeiter der Prozess- und Bauelementforschung am IHP unterstützt. Laborpraktika und Studentenexkursionen sowie die jährlichen Praktika für Studierende der TH Wildau aus den Bachelor- und Masterstudiengängen wurden unter angepassten Bedingungen und hoher Anstrengung trotz der Pandemie-Bedingungen wieder aufgenommen, was nicht nur die Studierenden, sondern auch die Betreuer gefreut hat. Im Bereich der Erforschung von kohlenstoff-basierten Dünnschichttechnologien konnte das vom Land Brandenburg finanzierte Projekt GETiT erfolgreich fortgesetzt werden. Der speziell für diesen Zweck installierte Fine-Placer für den Transfer der 2D-Schichten wurde im Forschungsbetrieb intensiv genutzt. Ein besonderer Erfolg der gemeinsamen Kooperation war der Gewinn des Leibniz-Gründerpreises für die Gründungsinitiative HyPhoX, die im Wesentlichen auf den gemeinsamen Forschungsergebnissen des Joint Lab beruht. Im Jahr 2021 konnten die Demonstratorentwicklungen in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialanalyse BAM abgeschlossen werden und neue Industriepartnerschaften aufgebaut werden. Auch die Arbeiten des an der TH Wildau lokalisierten Instituts für Angewandte Physik (IAP) konnten fortgesetzt werden. Diese hochschulinterne Kooperationsform, welche durch die beiden Joint-Lab-Leiter Prof. Schrader und Prof. Mai initiiert wurde, erlaubt neue Möglichkeiten in der internen Kooperation und kann aktuell auf eine hohe Anzahl an Partner seitens der Hochschule und Partnerinstitutionen zurückgreifen.

Link IAP: <https://www.th-wildau.de/forschung-transfer/institut-fuer-angewandte-physik/>

The Joint Lab IHP/TH Wildau was able to successfully continue the joint work based on the cooperation of the Technical University Wildau and the IHP. Lectures were essentially carried out online in 2021 and were increasingly supported by the group leader and other employees of the Process and Device Research Group at the IHP. Laboratory internships and student excursions as well as the annual internship for students of TH Wildau from the bachelor's and master's programs were resumed under adapted conditions and high effort despite the pandemic situation, which pleased not only the students but also the supervisors. In the field of carbon-based thin-film technologies the research project GETiT financed by the state of Brandenburg was successfully continued. The fine placer especially installed for the transfer of 2D layers was intensively used for these research operations. A particular success of the joint cooperation was the Leibniz Start-up Prize for the start-up initiative HyPhoX, which is essentially based on the joint research results of the Joint Lab. In 2021, the demonstrator developments were completed in cooperation with the Federal Institute for Materials Analysis BAM and new industrial partnerships were established. It was also possible to continue the work of the Institute of Applied Physics (IAP) located at TH Wildau. This form of cooperation within the university, which was initiated by the two Joint Lab heads Prof. Schrader and Prof. Mai, allows new possibilities in internal cooperation and can currently draw on a large number of partners at the university as well as from partner institutions.

Link IAP: <https://www.th-wildau.de/forschung-transfer/institut-fuer-angewandte-physik/>

HyPhoX-Demonstrator
HyPhoX Demonstrator



Joint Lab IHP < > Poznań University of Technology

Połączyć – Verbinden – Interfacing

Połączyć – Verbinden – Interfacing

Kontakt Contact	Dr. Wolfgang M. Klesse (IHP), Dr. Tomasz Grzela (PUT)
Partner Partner	Poznań University of Technology (PUT), Institute of Physics
Gründung und Eröffnung Opening	2014
Ausgewählte Projekte Selected Projects	Development of germanium-based plasmonics nanoantennas
Internetseite Homepage	www.ihp-microelectronics.com/put

Unter dem Motto "Połączyć-Verbinden-Interfacing" verfolgte das gemeinsame IHP/PUT-Labor das Ziel, den grenzüberschreitenden Austausch von Studierenden und jungen Wissenschaftlern aus Deutschland und Polen zu fördern. Die Kooperation zwischen der Technischen Universität Poznan und dem IHP ermöglichte es den Studierenden, sich mit den Materialwissenschaften für die moderne Silizium-Mikroelektronik vertraut zu machen. Praktika und MSc- und BSc-Arbeiten von PUT-Studierenden wurden unterstützt, um erste wissenschaftliche Erfahrungen auf diesem Gebiet am IHP zu sammeln. Ende 2021 wurde beschlossen, die Zusammenarbeit in ihrer jetzigen Form zu beenden. Diese Entscheidung wurde durch die Abwesenheit der Schlüsselpersonen, die das Joint Lab ins Leben gerufen und geleitet haben, in beiden Institutionen getroffen. Das IHP dankt den Partnern aus Poznan für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit und freut sich auf deren Fortsetzung, zum Beispiel in gemeinsamen Forschungsprojekten.

Under the motto "Połączyć-Verbinden-Interfacing" the joint IHP/PUT laboratory has pursued its goal of fostering cross-border exchanges of students and young scientists from Germany and Poland. The cooperation between Poznan University of Technology and IHP provided an ideal platform for students to become acquainted with material science for modern silicon microelectronics. Internships and MSc and BSc theses of PUT students were supported to gain first scientific experience in this field at IHP. At the end of 2021, it was decided to end the cooperation in its current form. The decision was driven by the absence of the key people from both institutions who created and led the Joint Lab. IHP thanks the partners from Poznan for many years of fruitful cooperation, and looks forward to its continuation, for example in joint research projects.

Joint Lab IHP < > HU Berlin

Drahtlose Breitbandkommunikationssysteme

Wireless Communication Systems

Kontakt Contact	Prof. Dr. Eckhard Grass (IHP/HU)
Partner Partner	Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik
Gründung und Eröffnung Opening	2011/2012
Ausgewählte Projekte Selected Projects	5GENESIS: https://5genesis.eu/ , AgileHyBeams: https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/421544431
Internetseite Homepage	https://www.ihp-microelectronics.com/joint-labs/humboldt-universitaet-berlin

Innerhalb des Joint Lab wird in der Lehre im Modul „Drahtlose Breitbandkommunikation“ auf Grundlagen der Nachrichtentechnik sowie auf spezielle aktuelle Entwicklungen (z. B. Mobilfunkstandards 5G und 6G) eingegangen. Der wachsende Anteil an Smartphones und drahtlos verbundenen Sensoren führt zu einem rasanten Anstieg der notwendigen Übertragungsraten für mobile Endgeräte. Ausgehend von den Kanaleigenschaften werden Algorithmen, Architekturen und Implementierungsaspekte für drahtlose Kommunikationssysteme mit höchsten Datenraten erörtert und den Studierenden vermittelt. Aus Forschungsprojekten zur 5. Generation Mobilfunk (5G) fließen Ergebnisse direkt in die Lehre ein. Aufgrund der COVID-19-Beschränkungen wurde die Lehre (Vorlesung und Praktikum) im Wintersemester 2021/22 vollständig digital per Zoom-Videokonferenz durchgeführt.

Neben der Lehre charakterisieren Forschungsprojekte die Arbeit des Joint Lab. Im Jahr 2021 wurde die Arbeit an dem neuen DFG-Projekt AgileHyBeams aufgenommen. In diesem Projekt geht es um die Erhöhung der spektralen Effizienz durch den Einsatz effizienter Spatial-Multiplexing-Verfahren in Verbindung mit Hybrid Beamforming. Im Rahmen dieses DFG-Projekts wurden 2021 umfangreiche Untersuchungen und Messungen durchgeführt, die zum Ziel haben, die Geometrie von Räumen durch Auswertung der Kanalimpulsantworten zahlreicher Beams zu identifizieren. Basierend auf den Messergebnissen, konnte eine erste Veröffentlichung auf einer renommierten Konferenz (IEEE 5G World Forum - 5GWF 2021) platziert werden.

Nach einer erfolgreichen ersten Messkampagne im Herbst 2019 musste der Aufbau und Betrieb eines 5G-Testbeds vor dem Hauptgebäude der Humboldt-Universität Berlin im Rahmen der gemeinsamen Arbeit im H2020-Projekt-5GENESIS auf Grund der andauernden COVID-19-Beschränkungen um ein Jahr auf den Herbst 2021 verschoben und an das IHP verlegt werden. Gemeinsam mit dem Fraunhofer-FOKUS wurden im November 2021 Messungen zu spezifischen Aspekten der 5G-Technologie am IHP durchgeführt. Vom Lehrstuhl Technische Informatik der Humboldt-Universität wurden in diesem Kontext Aspekte der Anonymisierung und Wahrung der Privatsphäre bearbeitet.

Im Zusammenhang mit dem Joint Lab wurde im Jahr 2021 eine interdisziplinäre Promotion mit dem Titel „Development, Implementation and Validation of Thermal Magnetic Resonance Technology: A New Instrument to Define the Role of Temperature in Biological Systems and Disease“ (Haopeng Han) eingereicht und erfolgreich verteidigt.

One main aspect of the Joint Lab is teaching a Masters Course on the basics of communications engineering as well as recent developments and standards (for example cellular network standards such as 5G and 6G). The growing percentage of smartphones, wireless sensors and other wireless devices results in a dramatic increase of required data rates. Algorithms, architectures, and implementation aspects of wireless communication systems are presented and introduced to the students. Results of research projects on the development of the 5th Generation of Mobile Communication Systems (5G) are directly used in the lectures. Due to the COVID-19 restrictions, the lectures and lab exercises in the Winter semester 2021/22 were conducted fully digitally using the videoconferencing tool Zoom.

Another aspect is the cooperative work in research projects. The DFG-Projekt “AgileHyBeams”, which concentrates on increasing the spectral efficiency using hybrid beamforming technology based on high-resolution phased array antenna topologies, was started in fall 2020. In the context of this DFG project, comprehensive investigations and measurements were conducted in 2021. The goal of this work is establishing a digital twin of the physical environment by only using the information derived from wireless communication systems. We established a setup in an anechoic chamber for first investigations based on the Power Delay Profiles of the beamforming nodes. The results of this work were published at the IEEE 5G World Forum (5GWF 2021).

After successful construction and operation of a 5G-Testbed at the main building of the Humboldt University within the H2020 Project “5GENESIS” in fall 2019, another large experimental evaluation was planned for fall 2020. However, due to the continuing COVID-19 restrictions, this demonstration had to be postponed until fall 2021 and relocated to the building of IHP. Together with the Fraunhofer-FOKUS Institute, we performed detailed measurements on specific aspects of the 5G-technology. One goal of the experiments was to verify the efficiency of edge-computing for delivering media contents with low latency for large crowds. The Chair “Technische Informatik” at Humboldt University investigates and contributes aspects of anonymization and protection of privacy in this context.

In the context of the Joint-Lab a PhD Thesis with the title „Development, Implementation and Validation of Thermal Magnetic Resonance Technology: A New Instrument to Define the Role of Temperature in Biological Systems and Disease“ (Haopeng Han) was submitted and successfully defended.

Joint Lab IHP < > Sabanci University

More-than-Moore

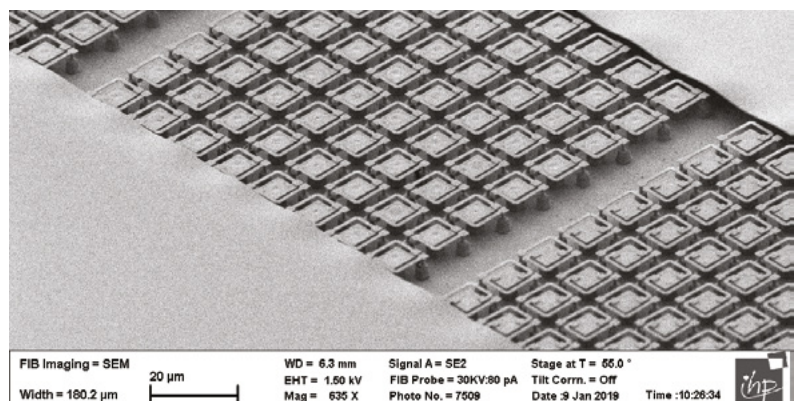
More-than-Moore

Kontakt Contact	Dr. Mehmet Kaynak (IHP), Prof. Yasar Gurbuz (Sabanci University)
Partner Partner	Sabanci University, Istanbul
Gründung und Eröffnung Opening	2014
Ausgewählte Projekte Selected Projects	MtM RD
Internetseite Homepage	www.ihp-microelectronics.com/sabanci

Das gemeinsame Labor bündelt das Know-how der beiden akademischen Institutionen, um dem Motto "More-than-Moore", der technologischen Diversifizierung, zu folgen. Der Schwerpunkt liegt auf der Erforschung und Entwicklung von mm-Wellen/THz-Bauelementen und integrierten Schaltungen auf der Grundlage von BiCMOS-Technologien und -Schaltungen. Das Hauptziel besteht darin, die Forschungskapazitäten durch einen komplementären Forschungsansatz zu erweitern und die internationale Sichtbarkeit zu erhöhen. Seit 2014 hatten mehr als 60 Studierende der Universität Sabanci die Möglichkeit, ihre Praktika am IHP zu absolvieren. Einige der Studierenden setzen nach ihrem erfolgreichen Praktikum ihr Promotionsstudium als Vollzeitmitarbeiter am IHP fort. Sie alle leisten einen wesentlichen Beitrag zu den gemeinsamen Forschungsarbeiten. Dem Joint Lab ist es gelungen, Mittel der Türkischen Anstalt für Wissenschaftliche und Technologische Forschung (TUBITAK) zur Finanzierung der Kooperation und zur gemeinsamen Entwicklung von RF-MEMS-Technologien zu erhalten. Die Joint-Lab-Kooperation beinhaltet mittlerweile nicht mehr nur den Austausch von Studierenden, sondern auch eines leitenden Wissenschaftlers. Im Sommer 2019 haben 11 Studierende der Sabanci-Universität ihr Praktikum am IHP absolviert. Während des COVID-Pandemiezeitraums (2020 und 2021) wurde die Zusammenarbeit fortgesetzt, und mehr als 15 Studierende haben ihre Praktika am IHP online oder vor Ort absolviert. Aus der Forschung, die sie während des Praktikums durchgeführt haben, haben sie als Koautoren zu einer akademischen Publikation beigetragen. Bislang wurden 14 Zeitschriften- und 20 Konferenzbeiträge in angesehenen Verlagen und Communities veröffentlicht.

The Joint Lab bundles the expertise of both academic institutions to follow the motto of "More-than-Moore", technology diversification. The focus is on the exploration and development of mm-wave/THz devices and integrated circuits on top the baseline BiCMOS technologies and circuitries. The main objective is extending the research capabilities by using a complementary research approach and increasing international visibility. Since 2014, more than 60 undergrad and grad students from Sabanci University have had the opportunity to perform their internships at IHP. They have provided significant contributions to the joint research, with contributions to the academic publications during their bachelor studies. Some of the students are continuing their PhD studies as a full-time employee at IHP after their successful internship period. The Joint Lab has succeeded in receiving funds from the Turkish Government funding agency, TUBITAK, for cooperation and joint development of RFMEMS technologies. Today, the Joint Lab cooperation is not only based on student exchange, but also on exchange at the senior researcher level. During the summer of 2019, 11 students from Sabanci University have performed their internship at IHP. During the COVID pandemic period (2020 and 2021), the cooperation has continued and more than 15 students have performed their internships at IHP online or on-site. Out of the research they have done during the internship, they have contributed to an academic publication as coauthors. So far, 14 journal and 20 conference papers have been published in respectable publishing houses and communities.

Si/SiGe-Multi-Quantum-Well (MQW)-Mikrobolometer-Array
Si/SiGe Multi-Quantum Well (MQW) Microbolometer Array



Joint Lab IHP < > TU Berlin

Siliziumphotonik

Silicon Photonics

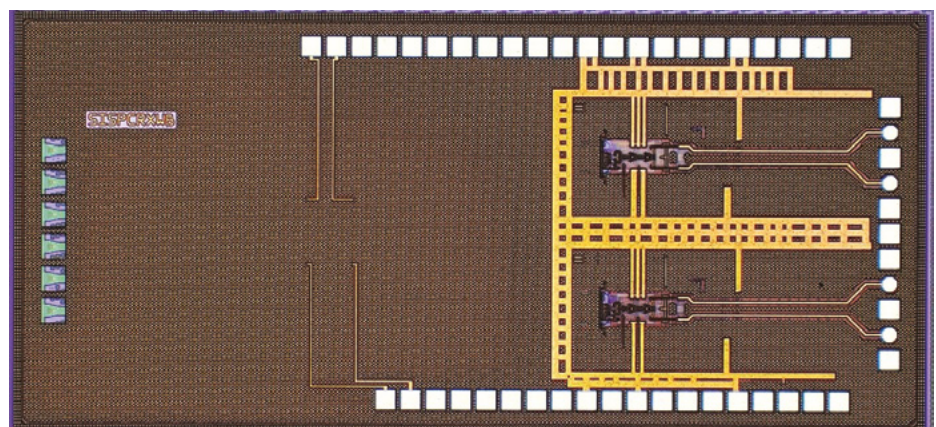
Kontakt Contact	Prof. Dr. Lars Zimmermann (TU Berlin/IHP)
Partner Partner	Technische Universität Berlin, Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-Systemtechnologien
Gründung und Eröffnung Opening	2010
Ausgewählte Projekte Selected Projects	DFG ZI 1283-6-1, BMBF-PEARLS
Internetseite Homepage	www.ihp-microelectronics.com/jlphotonics

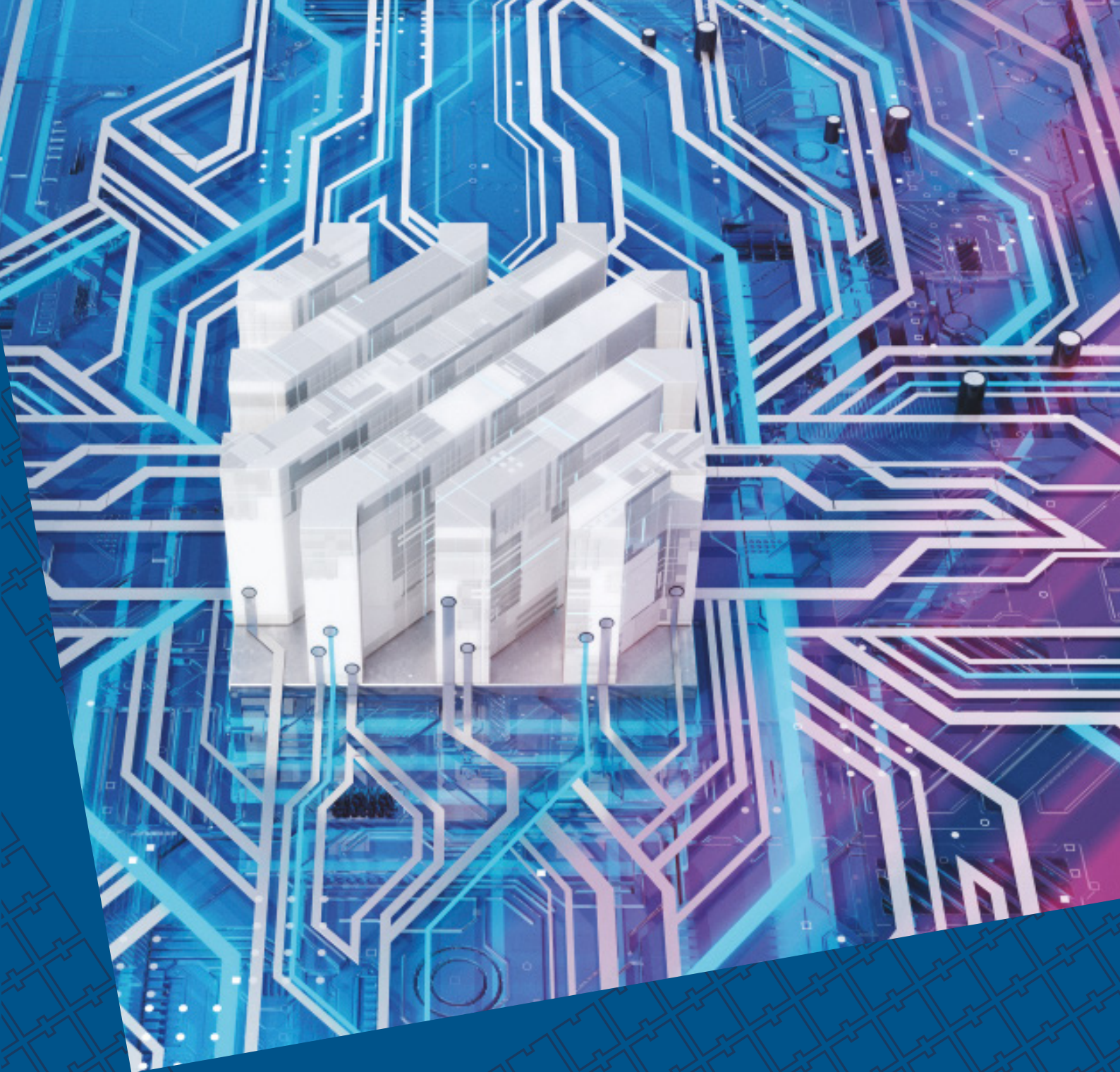
Die Siliziumphotonik hat sich in den vergangenen Jahren zu einer Schlüsseltechnologie der optischen Kommunikation entwickelt. Die wichtigsten Anwendungen sind hier im Bereich Datenzentrum und Metronetze angesiedelt. Einen Schwerpunkt der gegenwärtigen Forschung und Entwicklung bildet insbesondere die Vereinigung von Silizium-IC-Elektronik mit integrierter Optik. Die Entwicklung der photonischen BiCMOS-Technologie des IHP erfolgt in enger Kooperation mit der TU Berlin. Im gemeinsamen Joint Lab profitiert das IHP von dem verfügbaren photonischen Know-how, die TU Berlin erhält für ihre photonischen Forschungen und Entwicklungen Zugang zu den IHP-Technologien. Es besteht eine enge Kooperation mit international führenden Einrichtungen und Forschergruppen auf dem Gebiet der Siliziumphotonik. Ausdruck dafür ist die Zusammenarbeit in zahlreichen Photonik-Projekten. Neben den Forschungsaktivitäten verbessert das Joint Lab Siliziumphotonik auch die akademische Anbindung des IHP. Das Joint Lab ist mit einer Vorlesung, einem Seminar und einem Projektlabor an der TU Berlin vertreten. Außerdem werden zahlreiche Studien-, Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten bis zum erfolgreichen Abschluss betreut.

Silicon photonics is becoming a key technology in optical communications for deployment in high-throughput networks such as datacenters or in the metro area. Present developments focus in particular on the convergence of silicon IC technology and integrated optics. In order to develop IHP's photonic BiCMOS technology, a close collaboration with the TU Berlin has been established. In the Joint Lab, IHP benefits from the photonics know-how available in Berlin, while Berlin gains access to the technology of IHP for photonic research purposes. Our work is closely linked to top-level research in this area, which is reflected by the cooperation in a considerable number of international and national projects with the focus on photonics. In addition to extensive research activities the Joint Lab actively links IHP to academia. Currently, one lecture, a seminar, and a project lab at TU Berlin are taught. A considerable number of training, Bachelor, Master and PhD theses are conducted in the frame of the Joint Lab.

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen TU Berlin und dem IHP wurde 2021 auf der ECOC ein Postdeadline-Artikel zu einem 0- und C-Band kohärentem Receiver mit 64 Gbaud präsentiert (Chipfoto).

In the frame of the collaboration between TU Berlin and IHP a successful ECOC 2021 post-deadline paper was submitted regarding a dual band 64Gbaud coherent receiver for 0- and C-band.





Forschungsfabrik
Mikroelektronik Deutschland
Research Fab
Microelectronics Germany

Das IHP in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

The IHP in the Research Factory Microelectronics Germany

Das IHP bildet seit 2017 zusammen mit elf Instituten des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik sowie dem Leibniz-FBH die standortübergreifende Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, kurz FMD.

13 Institute der beiden Forschungsorganisationen Fraunhofer und Leibniz bündeln ihre Kompetenzen unter einem virtuellen Dach und bringen so eine neue Qualität in die Forschung und Entwicklung von Mikro- und Nanosystemen. Mit den mehr als 2.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ist die FMD der weltweit größte FuE-Zusammenschluss dieser Art. Sie trägt mit ihrer einzigartigen Kompetenz- und Infrastrukturvielfalt an den Instituten dazu bei, dass Deutschland und Europa ihren Spitzenplatz in Forschung und Entwicklung weiter ausbauen.

Neue Prozesse für innovative Forschung

Bis Ende 2021 befand sich die FMD in der Aufbauphase. Die umfangreichen Investitionen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in die Modernisierung der Institute konnten Ende 2021 bis auf wenige, durch die Covid19-Pandemie bedingte, Verzögerungen abgeschlossen werden. Das IHP konnte trotz der Herausforderungen die geplanten Anlageninvestitionen umsetzen und zusammen mit der im Frühjahr in Betrieb genommenen strategischen Reinraumerweiterung seine Prozessbasis für neue, innovative Technologieentwicklungen ausbauen.

Anfang 2021 startete die FMD in den verstetigten Betrieb. Diesen Übergang markierte die Digitalkonferenz »Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how« am 22. April 2021. Das Modell einer interdisziplinären und interorganisationalen Zusammenarbeit der deutschen Forschungslandschaft trägt bereits erste Früchte und soll zukünftig auch europäisch als Vorbild dienen.

Seit 2021 beschäftigt das IHP einen eigenen Referenten innerhalb der FMD-Geschäftsstelle, der als Interessensvertretung und direkter Kontakt fungiert. Durch diese Zuordnung von personellen Ressourcen aus dem IHP wird die Verstetigung der Geschäftsstelle unterstützt.

Mit Vernetzung und Kooperation zur technologischen Souveränität

Inzwischen gilt die FMD als Vorbild, wenn es darum geht, die Kompetenzen unterschiedlicher FuE-Institutionen mit einer gemeinsamen Strategie und einem gebündelten Angebot an die Industrie aufzustellen. Mit der standort-, technologie- und kompetenzübergreifenden Zusammenarbeit trägt die FMD zum Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität entlang der gesamten Wertschöpfungskette bei. Das IHP bringt hier mit seinen einzigartigen Kompetenzen im Bereich der SiGe-THz- und Photoniktechnologien einen wichtigen Baustein im Portfolio des FMD-Angebotes ein.

Since 2017, the IHP, together with eleven institutes of the Fraunhofer Group for Microelectronics and the Leibniz-FBH, has formed the cross-location Research Factory Microelectronics Germany, or short the FMD.

13 institutes of the two research organisations Fraunhofer and Leibniz are pooling their expertise under one virtual roof, thus bringing a new quality to the research and development of micro- and nanosystems. With more than 2,000 scientists, the FMD is the largest R&D association of its kind in the world. With its unique diversity of expertise and infrastructure at the institutes, it is helping Germany and Europe to further expand their leading position in research and development.

New processes for innovative research

Until the end of 2021, the FMD was in the set-up phase. The extensive investment by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in modernising the institutes was completed by the end 2021, except for a few delays caused by the Covid19 pandemic. Despite the challenges, the IHP was able to implement the planned tool investments and, together with the strategic cleanroom extension commissioned in the spring, expand its process base for new, innovative technology developments.

At the beginning of 2021, the FMD started regular operations. This transition was marked by the digital conference "Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial - Köpfe & Know-how" on 22 April 2021. The model of interdisciplinary and interorganisational cooperation in the German research landscape is already bearing its first fruits and should also serve as a model in Europe in the future.

Since 2021, the IHP has employed a designated officer within the FMD office to act as an interest representative and direct contact. This allocation of staff resources from the IHP supports the consolidation of the office.

With networking and cooperation to technological sovereignty

In the meantime, the FMD is regarded as a role model when it comes to setting up the competences of different R&D institutions with a common strategy and a bundled offer to industry. With its cross-location, cross-technology and cross-competence cooperation, the FMD ensures that technological sovereignty is maintained and expanded along the entire value chain. With its unique competences in the field of SiGe-THz and photonics technologies, the IHP contributes an important component to the FMD portfolio.

Vielseitige Kooperationsmöglichkeiten

Neben dem Leistungsangebot für ihre Kunden aus der Wirtschaft, bietet die FMD ebenfalls unterschiedlichste Kooperationsmöglichkeiten für ihre Partner in Wissenschaft und Bildung. Diese zielen direkt auf eine kooperative Bearbeitung von Forschungsfragestellungen, wie die gemeinsame Arbeit in Verbundprojekten und den Betrieb der gemeinsamen Labore, den sogenannten Joint Labs, ab.

Das IHP beteiligte sich an den jährlich stattfindenden Strategiediskussionen und wirkte auch an mehreren Expertengesprächen mit Vertretern aus der Wirtschaft und der Politik mit, um die Kooperationen weiter zu vertiefen und Souveränität im Bereich der Hochtechnologie zurückzugewinnen.

Vertrauenswürdige und nachhaltige Mikroelektroniksysteme für Innovationskraft

Eine zukunftsorientierte Gesellschaft ist in allen relevanten technischen Anwendungsdomänen – ob in kritischen Infrastrukturen, in der Industrie 4.0, im Automobilbereich oder auch bei medizinischen Geräten – auf elektronische Komponenten angewiesen. Auf diese müssen sich die Menschen verlassen können, um darauf vertrauenswürdige Produkte, Systeme und Infrastruktur aufbauen zu können.

Die technologieübergreifenden Kompetenzen, die man für die Bewältigung dieser Herausforderungen benötigt, entwickeln die Institute der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland in Großprojekten, wie z. B. Velektronik, mit. In diesem Projekt wird die komplette Wertschöpfungskette beleuchtet, um durchgehende Konzepte für vertrauenswürdige Elektronik in Deutschland und Europa zu erstellen. Neben dem IHP sind 10 Institute der FMD sowie das edacentrum beteiligt. Innerhalb des Projekts sollen entsprechende Standards, Normen und Prozesse auf der Grundlage einer nationalen und europäischen Chipsicherheitsarchitektur entwickelt und in die Anwendung gebracht werden.

Versatile cooperation opportunities

In addition to the range of services for its customers from industry, FMD also offers a wide variety of cooperation opportunities for its partners in science and education. These are aimed directly at cooperative processing of research questions, such as joint work in collaborative projects and the operation of joint laboratories, the so-called Joint Labs.

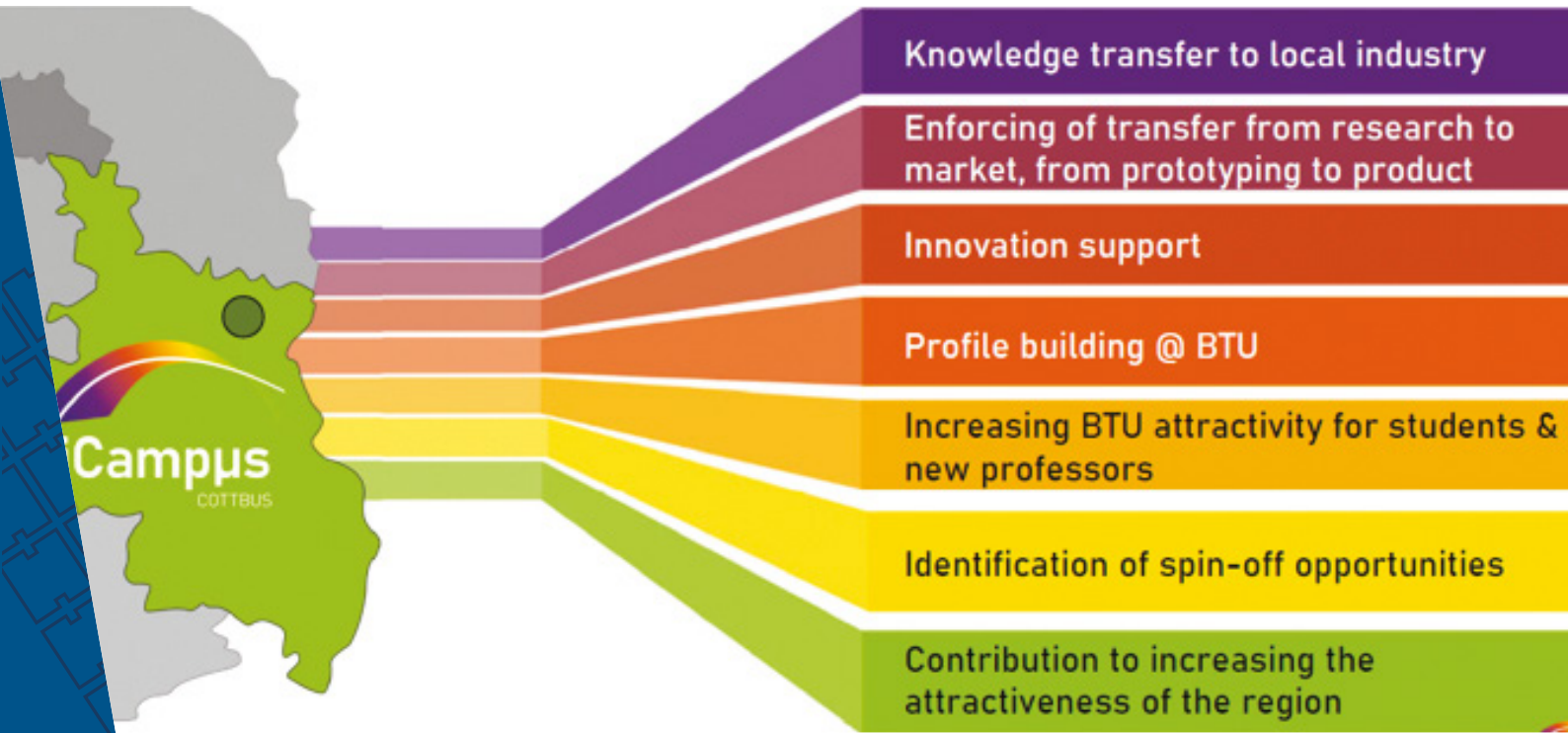
The IHP participated in the annual strategy discussions and also took part in several expert discussions with representatives from industry and politics in order to further deepen the cooperations and regain sovereignty in the field of high technology.

Trustworthy and sustainable microelectronics systems for innovative strength

A future-oriented society depends on electronic components in all relevant technical application domains - whether in critical infrastructures, in Industry 4.0, in the automotive sector or even in medical devices. People must be able to rely on these to build trustworthy products, systems and infrastructure.

The cross-technology competencies needed to meet these challenges are being developed by the institutes of the Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland in large-scale projects such as Velektronik. In this project, the entire value chain is addressed in order to create end-to-end concepts for trustworthy electronics in Germany and Europe. In addition to the IHP, 10 institutes of the FMD and the edacentrum are involved. Within the project, corresponding standards, norms and processes are to be developed on the basis of a national and European chip security architecture and brought into application.





Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus

Innovation Campus Electronics and Microsensor Technology Cottbus

Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus

Innovation Campus Electronics and Microsensor Technology Cottbus

Der „Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus (iCampus)“ wurde im Rahmen des Sofortprogramms der Bundesregierung in diesem Kontext als Element zur Unterstützung dieser Ziele ausgewählt. Die Förderung der ersten Phase begann im November 2019 und endete im Dezember 2021. Bereits nach gut zwei Jahren hat der iCampus Cottbus signifikant zur regionalen und nationalen sowie zur thematischen Schwerpunktbildung der Lausitz beigetragen. Trotz pandemiebedingter Einschränkungen ist es gelungen, die inhaltlichen und terminlichen Zwischenziele zu erreichen, viel Aufmerksamkeit bei vor allem regionalen Firmen zu erzielen und damit die übergeordneten Ziele von lokaler Kompetenzbündelung im Bereich der Mikrosensorik bis hin zur Durchführung von F&E-Arbeiten mit hohem Transfer- und Ausgründungspotential signifikant zu unterstützen. Der iCampus fokussiert sich dabei auf das enorm an Bedeutung gewinnende Feld der Mikrosensorik. Die Anwendungsbreite der „Sinnesorgane der Digitalisierung“ ist äußerst hoch. So weitreichend jedoch das Anwendungsfeld von Mikrosensoren ist, so unterschiedlich sind in den meisten Fällen die Anforderungen an deren Funktionalität und Leistungsprofil. „Off-the-shelf“-Lösungen erfüllen gerade für besondere Anwendungen, wie beispielsweise in den Bereichen Smart Health oder Smart Farming, nicht die gestellten Anforderungen. Vielmehr müssen in enger Abstimmung mit dem Anwender applikationsspezifische Lösungen entwickelt werden. Der Innovationscampus zielt darauf, diesen Bedarf konkret zu erfassen und durch Zusammenführung der Kompetenzen von Universität und außeruniversitären Forschungseinrichtungen derart zu adressieren, dass Wissens- und Technologietransfer zu nachhaltig wirksamen Innovationen in der Region führen. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen sollen so beim Anschluss an innovative Lösungen aus dem Hochtechnologiebereich unterstützt werden.

Die Phase I des iCampus wurde 2021 erfolgreich abgeschlossen. Die in dieser Phase erreichten Ergebnisse der sechs dort adressierten Themenblöcke bilden die Grundlage für die Fortführung und den Ausbau der Arbeiten in der zweiten Phase. Zusätzlich wurden drei weitere Themenblöcke aufgenommen. Die Arbeiten sind in fünf Technologieplattformen, bei denen vorhandene Kompetenzen der Partner zielgerichtet ausgebaut werden, und drei spezifische Anwendungslösungen, welche auf die Kompetenzen der Plattformen zurückgreifen, strukturiert. Ein eigenes Arbeitspaket widmet sich unter Einbeziehung aller Partner dezidiert dem Innovationsmanagement und dem Wissenstransfer sowie der Entwicklung eines tragfähigen Modells zur Fortführung der Aktivitäten des iCampus über die Projektlaufzeit hinaus (nachhaltigen Verstetigung). Die Phase II des iCampus wird im Januar 2022 starten. Das Vorhaben ist auf eine Laufzeit von fünf Jahren ausgelegt. Das Projektvolumen beträgt 21,5 Mio. €. Es ordnet sich in hervorragender Weise zu den förderpolitischen Zielen des Bundes und des Landes Brandenburg ein.

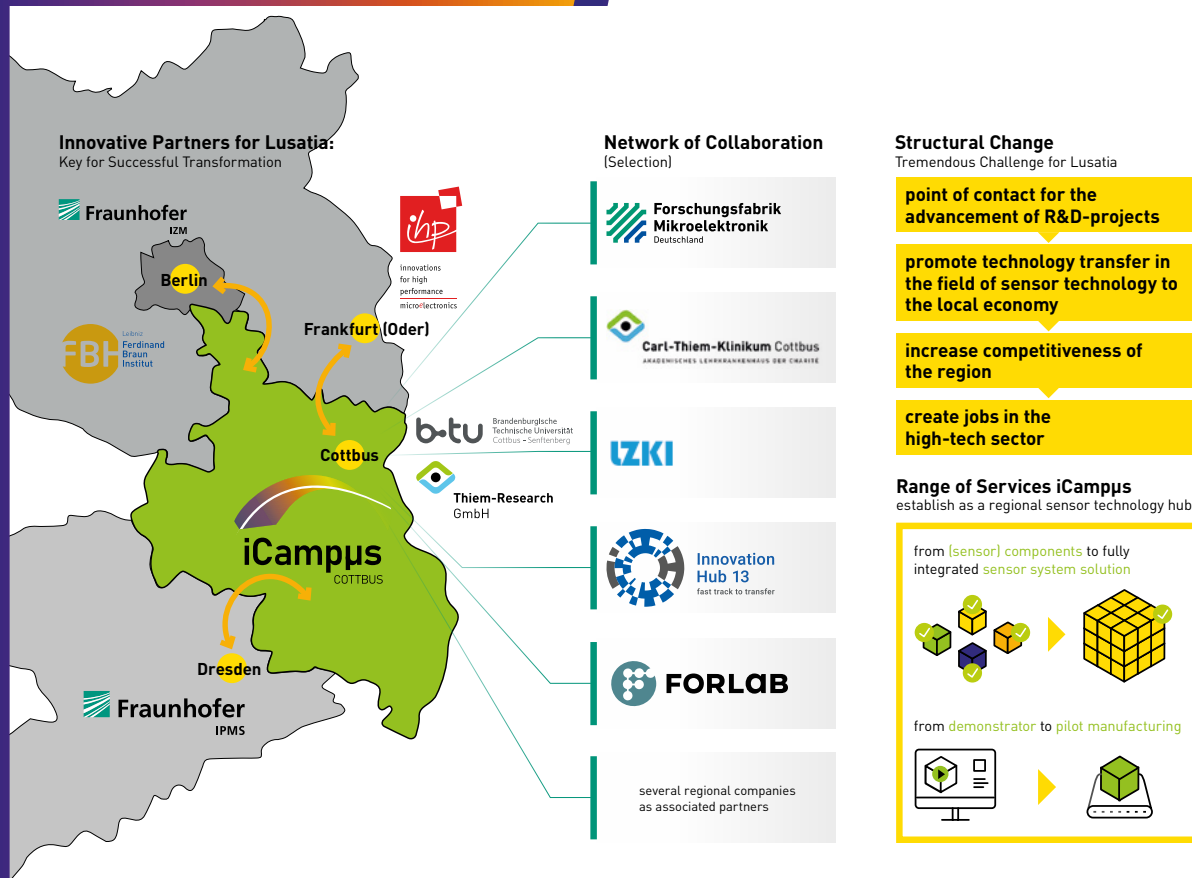
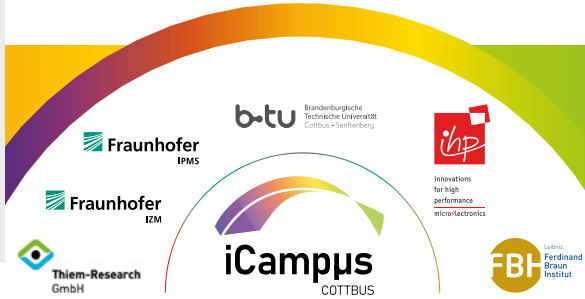
The “Innovation Campus Electronics and Microsensors Cottbus (iCampus)” was selected as an element to support the goals within the framework of the immediate program of the Federal Government. Funding for the first phase began in November 2019 and ended in December 2021. After just two years, the iCampus Cottbus has already made a significant contribution to the regional and national as well as the thematic focus of Lusatia. Despite pandemic-related restrictions, it has succeeded in achieving the interim goals in terms of content and deadlines, attracting a great deal of attention, especially from regional companies, and thus significantly supporting the overarching goals of local competence bundling from the field of microsensor technology to the implementation of R&D work with high transfer and spin-off potential. The iCampus focuses on the enormously growing field of microsensorics. The range of applications for the “sensory organs of digitization” is extremely broad. However, as wide-ranging as the field of application of microsensors is, in most cases the requirements for their functionality and performance profile are very different. “Off-the-shelf” solutions do not meet the requirements set, especially for special applications, such as in the areas of smart health or smart farming. Instead, application-specific solutions must be developed in close coordination with the user. The Innovation Campus aims to identify this need in concrete terms and to address it by bringing together the expertise of the university and non-university research institutions in such a way that knowledge and technology transfer lead to sustainably effective innovations in the region. In this way, small and medium-sized enterprises in particular are to be supported in connecting to innovative solutions from the high-tech sector.

Phase I of the iCampus was completed in 2021. The results achieved in this phase for the six thematic blocks addressed there form the basis for the continuation and expansion of the work in the second phase. In addition, three further thematic blocks have been included. The work is structured into five technology platforms, in which existing competencies of the partners are expanded in a targeted manner, and three specific application solutions, which draw on the competencies of the platforms. A separate work package, involving all partners, is dedicated to innovation management and knowledge transfer as well as the development of a sustainable model for the continuation of the iCampus activities beyond the project duration (sustainable continuation). Phase II of the iCampus will start in January 2022. The project is designed to run for five years. The project volume amounts to € 21.5 million. It fits in excellently with the funding policy goals of the federal government and the state of Brandenburg.

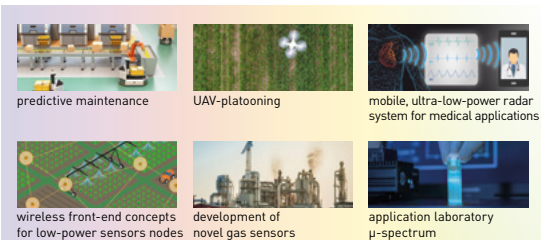
iCampus – Cottbus

Innovationcampus
Electronics and Microsensors

www.icampus-cottbus.de

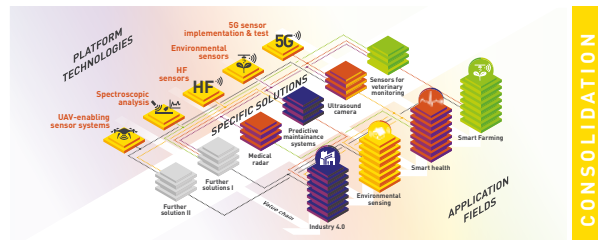


Topics of Innovationcampus Cottbus: iCampus phase I – demonstration

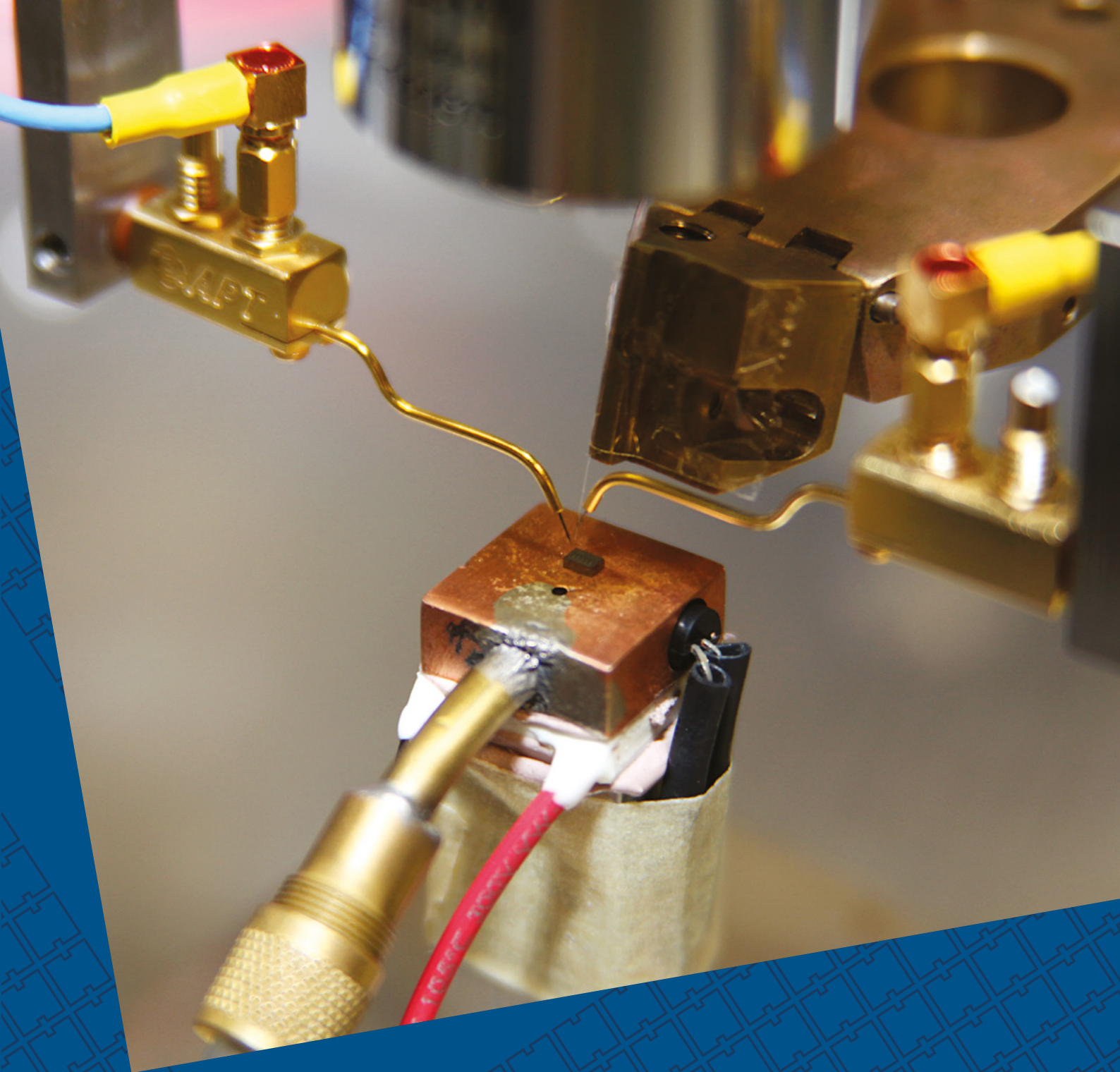


11/2019 concurrent projects & spin-offs 12/2021

iCampus phase II – application-oriented further development



starting 01/2022 concurrent projects & spin-offs 12/2026



Angebote und Leistungen

Offers and Services

Angebote und Leistungen

Offers and Services

Multi-Projekt-Wafer (MPW)- und Prototyping-Service

Das IHP bietet Forschungspartnern und Kunden Zugang zu seinen leistungsstarken SiGe:C-BiCMOS-Technologien mit speziellen integrierten RF- und Silizium-Photonik-Modulen.

Weiterhin bietet das IHP einen Multi Project Wafer Service mit 0,13- und 0,25- μm -SiGe-BiCMOS-Technologien auf 8"-Silizium-Wafern an. Integrierte SiGe-Heterobipolartransistoren mit 500 GHz f_{max} sind für Forschung und Produktdesign qualifiziert, Bauelemente mit bis zu 700 GHz f_{max} sind in Entwicklung. Weiterhin ist ein Cadence-basiertes Mixed-Signal-Design-Kit verfügbar. Für Hochfrequenz-Designs kann ein analoges Design Kit mit Keysight ADS verwendet werden.

Verfügbar sind folgende SiGe-BiCMOS- und Siliziumphotonik-Technologien:

- SG13S: Eine hochleistungsfähige 0,13- μm -BiCMOS-Technologie mit npn-HBTs mit Grenzfrequenzen bis zu $f_T = 250$ GHz und $f_{\text{max}} = 340$ GHz, mit 3,3 V I/O CMOS und 1,2 V Logik CMOS.
- SG13G2: Eine 0,13- μm -BiCMOS-Technologie mit dem gleichen Bauelemente-Portfolio wie SG13S, aber deutlich höherer bipolarer Leistung mit $f_T/f_{\text{max}} = 350/450$ GHz.
- SG13SCu und SG13G2Cu: FEOL-Prozess SG13S und SG13G2 zusammen mit Cu-BEOL-Option von X-FAB mit 4 dünnen Cu-Lagen, zwei 3 μm Cu-Lagen, einer dünnen Al-Lage mit 2 fF/ μm MIM-Kondensator und einer 2,8 μm -Aluminium-Decklage.

Verbesserung der passiven Komponenten im Vergleich zu Al BEOL:

- 2 dicke Kupfer-Metalleitungen,
- Höhere Strombelastbarkeit der dünnen Metallschichten
- Höhere Strombelastbarkeit der kleinen Durchkontaktierungen
- 40% höhere Flächendichte des MIM-Kondensators

Multi Project Wafer (MPW) and Prototyping Service

IHP offers research partners and customers access to its powerful SiGe:C BiCMOS technologies with dedicated integrated RF and silicon photonics modules.

IHP provides a Multi Project Wafer Service with 0.13 and 0.25 μm SiGe BiCMOS technologies on 8" silicon wafers. Integrated SiGe heterobipolar transistors with 500GHz f_{max} are qualified for research and product design, devices with up to 700 GHz f_{max} are under development. A Cadence-based mixed-signal design kit is available. For high frequency designs an analog Design Kit using Keysight ADS can be used.

The following SiGe BiCMOS technologies are available:

- SG13S: A high-performance 0.13 μm BiCMOS technology with npn-HBTs with cutoff frequencies up to $f_T = 250$ GHz and $f_{\text{max}} = 340$ GHz, with 3.3 V I/O CMOS and 1.2 V logic CMOS.
- SG13G2: A 0.13 μm BiCMOS technology with same device portfolio as SG13S, but significantly higher bipolar performance with $f_T/f_{\text{max}} = 350/450$ GHz.
- SG13SCu and SG13G2Cu: FEOL process SG13S and SG13G2 together with Cu BEOL option from X-FAB containing 4 thin Cu layers, two 3 μm Cu layers, a thin Al layer with 2 fF/ μm MIM capacitor and a 2.8 μm Aluminum top layer.

Improvement of passive components compared to Al BEOL:

- 2 thick copper metal lines,
- Higher current handling of thin metal layers
- Higher current handling of the small vias
- 40% higher area density of MIM capacitor

SG25H5_EPIC: Eine hochleistungsfähige BiCMOS-Technologie mit integrierten Siliziumphotonik-Bauelementen. Sie kombiniert einen BiCMOS-Prozess mit sehr hoher bipolarer Leistung 210-GHz-Transitfrequenzen und bis zu 280 GHz maximale Oszillationsfrequenzen und photonische Bauelemente aus der SG25_PIC-Basistechnologie.

Details zum photonisch-integrierten

Schaltungsmodul:

- 220 nm Si auf 2 μm SiO_2
- 3 Ätztiefen
- 4 Dotierungsebenen (p, n, p+, n+)
- 3 + 2 dicke Al-Backend-Metallschichten
- Germanium-Photodioden ($f_{3\text{dB}} > 60$ GHz)
- HBTs ($f_T/f_{\text{max}} = 220/290$ GHz)
- Optionales lokalisiertes Rückseiten-Ätzen

SG25H3: Eine 0,25- μm -BiCMOS-Technologie mit npn-HBTs, die von höherer RF-Leistungsfähigkeit ($f_T/f_{\text{max}} = 110/180$ GHz) zu höheren Durchbruchsspannungen von bis zu 7 V reicht.

SGB25V: Eine kostengünstige BiCMOS-Technologie mit einer Reihe von npn-HBTs bis zu einer Durchbruchsspannung von 7 V.

SGB25RH: Eine spezielle Variante der SGB25V-BiCMOS-Technologie, die strahlungsfeste IPs für Weltraumwendungen enthält. Es ist nicht erlaubt, die hier enthaltene strahlungsfeste Process Design Kit-IP zusammen mit der SGB25V-Technologie zu verwenden.

Es finden technologische Durchläufe nach einem festen, unter www.ihp-microelectronics.com verfügbaren, Zeitplan statt.

Ein Cadence-basiertes Mixed-Signal-Design-Kit ist verfügbar. Wiederverwendbare Schaltungsblöcke und IPs des IHP für die drahtlose- und Breitbandkommunikation werden zur Unterstützung von Designs Dritter angeboten.

Zusätzliche Module sind für bestimmte SiGe-BiCMOS-Technologien verfügbar:

LBE: Das Localized Backside Etching Modul wird angeboten, um Silizium lokal zu entfernen, um die passiven Eigenschaften zu verbessern (verfügbar in allen Technologien).

PIC: Enthält spezielle photonische Design-Ebenen, zusammen mit den BiCMOS-BEOL-Ebenen auf SOI-Wafern.

SG25H5_EPIC: A high performance BiCMOS technology with integrated Silicon Photonic devices. It combines a BiCMOS process with very high bipolar performance 210 GHz transit frequencies and up to 280 GHz maximum oscillation frequencies and photonic devices from SG25_PIC base technology.

Details on Photonic Integrated

Circuit Module:

- 220 nm Si on 2 μm SiO_2
- 3 etch depths
- 4 doping levels (p, n, p+, n+)
- 3 + 2 thick Al backend metal layers
- Germanium photodiodes ($f_{3\text{dB}} > 60$ GHz)
- HBTs ($f_T/f_{\text{max}} = 220/290$ GHz)
- Optional localized backside etching

SG25H3: A 0.25 μm BiCMOS technology with npn-HBTs that ranges from higher RF performance ($f_T/f_{\text{max}} = 110/180$ GHz) to higher breakdown voltages up to 7 V.

SGB25V: A low cost BiCMOS technology with a range of npn-HBTs up to a breakdown voltage of 7 V.

SGB25RH: A special variant of SGB25V BiCMOS technology which includes radiation hard IPs for space applications. It is not allowed to use the radiation hard Process Design Kit IPs included here together with SGB25V technology.

The schedule for MPW & Prototyping runs is published at www.ihp-microelectronics.com.

A Cadence-based mixed-signal design kit is available. For high frequency designs an analog Design Kit in ADS can be used. IHP's reusable blocks and IPs are offered to support third party designs.

Additional modules for certain SiGe-BiCMOS technologies are available:

LBE: The Localized Backside Etching module is offered to locally remove silicon to improve passive properties (available in all technologies).

PIC: Includes additional photonic design layers along with BiCMOS BEOL layers on SOI wafers.

TSV: Ist eine zusätzliche Option in der SG13S- und SG13G2-Technologie, die RF-Rückseitenerdung mittels Durchkontaktierungen durchs Silizium anbietet, um die RF-Eigenschaften zu verbessern.

- Through-Silicon-Via-Modul für RF-Erdung ist in SG13-Technologien verfügbar.
- Einzelne TSVs bieten eine niedrige GND-Induktivität ≈ 30 pH, um die RF-Schaltungseigenschaften zu verbessern.
- Die Rückseiten-Metallisierung kann auch zur verbesserten Chip-zu-Gehäuse-Kontaktierung verwendet werden.

TSV: An additional option in SG13S and SG13G2 technology that provides RF backside grounding by vias through silicon to improve RF performance.

- Through-Silicon Via Module for RF Grounding is available in SG13 technologies.
- Single TSVs can provide low GND inductance ≈ 30 pH to improve RF circuit performance.
- Backside metallization can also be used for improved chip-to-package contacting.

Die wesentlichen Parameter der Technologien

Technical key-parameters of the technologies

Key Specification

Feature	SG13S	SG13G2	SG25H3	SGB25V
Technology node (nm)	130	130	250	250
CMOS core supply (V)	1.2, 3.3	1.2, 3.3	2.5	2.5
CMIM (fF/ μm^2)	1.5	1.5	1.0	1.0
Poly Res (Ω/\square)	250	275	210 - 280	210 - 310
High Poly Res (Ω/\square)	1300	1360	1600	2000
BEOL	7 × Al	7 × Al	5 × Al	5 × Al
Varactor ($C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$)	1.7	1.7	3	3
Q inductor	37*	37*	37*	37*

*1 nH (with LBE)

Bipolar Transistors

Feature	SG13S	SG13G2	SG25H3	SGB25V
NPN1 f_T/f_{max} (GHz)	250/340	350/450	110/180	75/95
NPN2 f_T/f_{max} (GHz)	45/165	120/330	45/140	45/90
NPN3 f_T/f_{max} (GHz)			25/80	25/70
NPN1 BV_{CEO} (V)	1.7	1.7	2.3	2.4
NPN2 BV_{CEO} (V)	3.7	2.5	5	4
NPN3 BV_{CEO} (V)			7	7
NPN1 BV_{CBO} (V)	5	4.8	6	7
NPN2 BV_{CBO} (V)	15	8.5	10.5	15
NPN3 BV_{CBO} (V)			21	20

CMOS Section

Feature		SG25H3*	SG13S**
Core Supply Voltage (V)		2.5	1.2
nMOS	V_{TH} (V)	0.6	0.71
	I_{OUT}^{***} ($\mu A/\mu m$)	540	480
	I_{OFF} (pA/ μm)	3	500
pMOS	V_{TH} (V)	-0.6	-0.61
	I_{OUT} ($\mu A/\mu m$)	-230	-200
	I_{OFF} (pA/ μm)	-3	-500

* Parameters for SGB25V are similar

** Parameters for SG13G2 are similar

*** @ $V_G = 2.5$ V

Passive Section

Feature	SG25H3	SGB25V	SG13S	SG13G2
MIM Capacitor (fF/ μm^2)	1	1	1.5	1.5
N+ Poly Resistor (Ω/\square)	210	205	-	-
P+ Poly Resistor (Ω/\square)	280	310	250	260
High Poly Resistor (Ω/\square)	1600	2000	1300	1360
Varactor C_{max}/C_{min}	3	3	1.7	1.7
Inductor Q@5 GHz	18 (1 nH)	18 (1 nH)	18 (1 nH)	18 (1 nH)
Inductor Q@10 GHz	20 (1 nH)	20 (1 nH)	20 (1 nH)	20 (1 nH)
Inductor Q@5 GHz	37 (1 nH)*	37 (1 nH)*	37 (1 nH)*	37 (1 nH)*

* with LBE

Fast Design-Enablement

Wir unterstützen IHP-Designer, externe Projektpartner und Kunden dabei, ihren Designzyklus von der Designidee bis zum erfolgreichen TAPE OUT zu beschleunigen.

Für unsere qualifizierten Technologien bieten wir getestete und zuverlässige Prozess Design Kits (PDKs) innerhalb modernster elektronischer und optischer Design-Plattformen an. Dies ermöglicht es Designern, in ihren Projekten, für Produkte, Fallstudie oder Forschung, im ersten TAPE OUT funktionierendes Silizium zu erhalten.

IHP-Standard-Design-Kits unterstützen RF-MMIC-Designs, Mixed-Signal-Designs und einen digitalen Design-Flow. Spezielle Tools unterstützen die Simulation passiver Bauelemente, die thermische Simulation und Alterungssimulation.

Als Forschungseinrichtung bietet das IHP auch Design-Tool-Support für in der Entwicklung befindliche Technologien und Module

Fast Design Enablement

We support IHP designer, external project partners and customers to accelerate their design cycle from design idea to successful TAPE OUT.

For our qualified technologies we offer tested and reliable process design kits (PDKs) within state-of-the-art electronic and optical design platforms. This enables designers to obtain working silicon in their product development projects in the first TAPE OUT.

IHP standard design kits support RF MMIC designs, mixed signal designs and a digital design flow. Furthermore special tools support passive device simulation, thermal simulation and aging simulation.

A new area covers applications for harsh environments. Here we provide and develop design methodologies for radiation-hardened design.

As a research facility IHP is also offering design tool support for technologies under development to offer designers the possibility to

an, um Entwicklern die Möglichkeit zu geben, Designs für Forschungs- und Benchmark-Studien in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung durchzuführen.

Ein neuer Bereich sind Anwendungen für extrem raue Umgebungen. Hier bieten und entwickeln wir Entwurfsmethodiken für das strahlungsharte Design. Für kryogene Designs ist die PDK-Entwicklung in Arbeit.

Um die Besonderheiten der IHP-PDKs zu erlernen, stehen eine ausführliche Dokumentation, Video-Tutorials und Designbeispiele zur Verfügung. Regelmäßige PDK-Tutorials werden angeboten, um neue Benutzer zu schulen und neue Design-Tools und Funktionen einzuführen. Ein spezieller Support-Service ist über die PDK-Web-Plattform des IHP verfügbar, um Lösungen für spezielle Probleme direkt von IHP-Experten zu erhalten.

Analog/Mixed-Signal Flow:

- Verifikation
 - Cadence Assura und PVS DRC/LVS/QRC
 - Calibre DRC/LVS
 - POLYTEDA PowerDRC/LVS
- Ausgewählte PDKs bieten Cadence VPS für EMIR-Analyse
- Sonnet Support für alle Design Kits
- Empire Support für alle Design Kits
- EMX Stack verfügbar für SG13-Technologie mit Aluminium-Backend
- ADS Support via Golden Gate/RFIC dynamic link zu Cadence verfügbar
- Eigenständiges ADS Kit, einschließlich Momentum substrate layer file

Digital Design Flow:

- Digitale Standardzellen- und IO-Bibliotheken sind für 0,25 µm CMOS und 0,13 µm CMOS verfügbar, einschließlich Verhaltenssimulation (Verilogmodelle), Timing (LIB) und Abstracts (LEF)
- Simulation: ModelSim (Mentor Graphics), Incisive Enterprise Simulator IES (Cadence)
- Logiksynthese: Design Compiler (Synopsys), RTL Compiler (Cadence)
- Formale Verifikation: Formality (Synopsys)
- Scan Insertion und Testpatterngenerierung: DFT Compiler/TetraMax (Synopsys)
- Place & Route: Innovus Digital Implementation System (Cadence)
- OA der digitalen Bibliotheken für Mixed-Signal Design Flow
- Statische Timing Analyse: PrimeTime (Synopsys)
- Power Analyse: PrimeTime mit PrimePower Option (Synopsys)

perform designs for research and benchmark studies in a very early stage of development. For example PDK development is underway for cryogenic designs.

Detailed documentation, video tutorials, and design examples are available to learn the ins and outs of IHP PDKs. Regular PDK tutorials are offered to train new users and introduce new design tools and features. A dedicated support service is available through IHP's PDK web platform. For special problems, customers obtain answers directly from IHP experts.

Analog/Mixed-Signal Flow:

- Verification
 - Cadence Assura and PVS DRC/LVS/QRC
 - Calibre DRC/LVS
 - POLYTEDA PowerDRC/LVS
- Selected PDKs offer Cadence VPS for EMIR Analysis
- Sonnet support for all design kits
- Empire support for all design kits
- EMX stack for SG13 technology with aluminum backend
- ADS Support via Golden Gate/RFIC dynamic link to Cadence available
- Standalone ADS Kit including Momentum substrate layer file

Digital Design Flow:

- Digital CMOS libraries and IO Cells for 0.25µm CMOS and 0.13µm CMOS are available:
 - Behavioral Models (Verilog)
 - Timing Files (LIB)
 - Abstracts (LEF)
- Simulation: ModelSim (Mentor Graphics), Incisive Enterprise Simulator IES (Cadence)
- Logic Synthesis: Design Compiler (Synopsys), RTL Compiler (Cadence)
- Formal Verification: Formality (Synopsys)
- Scan Insertion and Test Pattern Generation: DFT Compiler/TetraMax (Synopsys)
- Place & Route: Encounter Digital Implementation System (Cadence)
- OA views of digital libraries are available for mixed-signal flow
- Power Analysis: PrimeTime with PrimePower Option (Synopsys)
- Static Timing Analysis: PrimeTime (Synopsys)

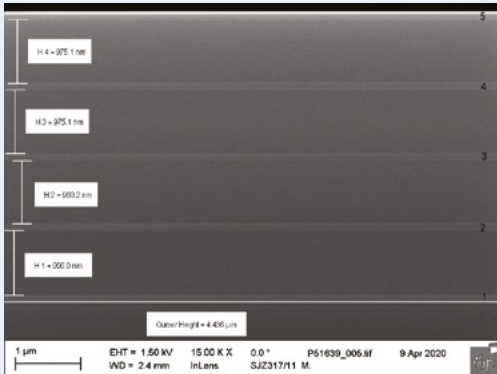
Technologie-Entwicklungsservice

Das IHP bietet eine Unterstützung bei der Entwicklung von dedizierten Prozessschritten und Modulen für Forschungs- und Entwicklungszwecke sowie für das Prototyping in kleinen Stückzahlen in folgenden 3 Kategorien von Dienstleistungen an:

- dedizierte Prozessentwicklungen auf Einzelanlagen
- Prozessablaufentwicklungen für spezielle Bauelemente oder Interposerabläufe
- Adaption von vorhandenen Standard-Technologieabläufen

Dedizierte Prozessentwicklungen auf Einzelwerkzeugen

- Standardprozesse (Implantation, Ätzen, CMP & Abscheidung von Schichtstapeln, wie thermisches SiO_2 , PSG, Si_3N_4 , Al, TiN, W)
- Epitaxie (Si, Si:C, SiGe, SiGe:C)
- Optische Lithographie (i-Linie und 248 nm bis zu 100 nm Strukturgröße)
- Beispiel Si/SiGe-Schichtstrukturen: Si/SiGe-Schichtstruktur nach Kundenspezifikation auf einem 8-Zoll-Wafer.

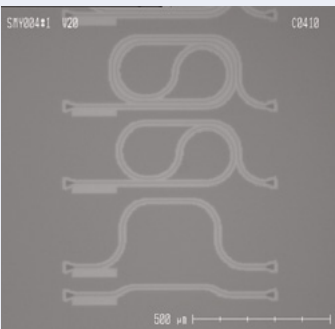


Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von einer kundenspezifischem Si/SiGe Abscheidung
Transmission electron image of a custom Si/SiGe deposition

Prozessablaufentwicklungen für spezielle Bauelemente oder Interposerabläufe

Basierend auf bestehende Prozessschritte bietet das IHP Entwicklungen von Prozessabläufen an. Hierbei können spezielle Bauelemente oder Teile bestehender Technologien (z. B. Backend of line Module) für Prototypen oder als Basis für eigene Entwicklungen gefertigt werden.

- **Beispiel:** Spezielle Si-Photonic Strukturen



Spezielle photonische Si-Strukturen
Dedicated Si photonic structures

Technology Development Service

IHP offers support for development of dedicated process steps and modules for research and development purposes and small volume prototyping.

IHP is offering 3 categories of services:

- Dedicated process developments on single tools
- Process flow developments for special devices or interposer flows
- Adaption of existing standard technology flows

Dedicated process developments on single tools

- Standard processes (implantation, etching, CMP & deposition of layer stacks such as thermal SiO_2 , PSG, Si_3N_4 , Al, TiN, W)
- Epitaxy (Si, Si:C, SiGe, SiGe:C)
- Optical lithography (i-line and 248 nm down to 100 nm structure size)
- Example Si/SiGe layer structures: Si/SiGe layer structure on customer specification on an 8 inch wafer.

Process flow developments for special devices or interposer flows

IHP offers developments of process flows based on existing process steps. Here special devices or part of existing technologies (part of Backend of line modules) can be fabricated for prototypes or as basis for own developments.

- **Example:** Special Si Photonic Structures

Adaption bestehender Standard-Technologieabläufe

In diesem Fall basiert der Service auf bestehenden Standardtechnologien, die IHP-Standard-MPW-Abläufe können genutzt werden, um leicht modifizierte Technologien anzubieten. Mögliche Modifikationen sind die Verwendung von Nicht-Standard-Wafermaterial, die Anpassung einzelner Prozessschritte oder das Stoppen der Prozessierung an einem geeigneten Schritt.

Falls komplette Wafer benötigt werden, sind ein eigener Maskensatz oder zusätzliche Masken zur Ausblendung anderer Kundendaten erforderlich. In diesem Fall können Entwicklungen mit Standard-Backend-Prozessen, wie Rückseitenschleifen, Dicing und einer Reduzierung der Standard-Wafergröße auf 6, 4 oder 3 Zoll, kombiniert werden.

- **Beispiel 1:** Fertigung von Standardtechnologie auf einem hochohmigen Wafer über einen 130-nm-MPW-Ablauf.
- **Beispiel 2:** Fertigung in MPW-Standardtechnologie und Planarisierung für die Nachbearbeitung

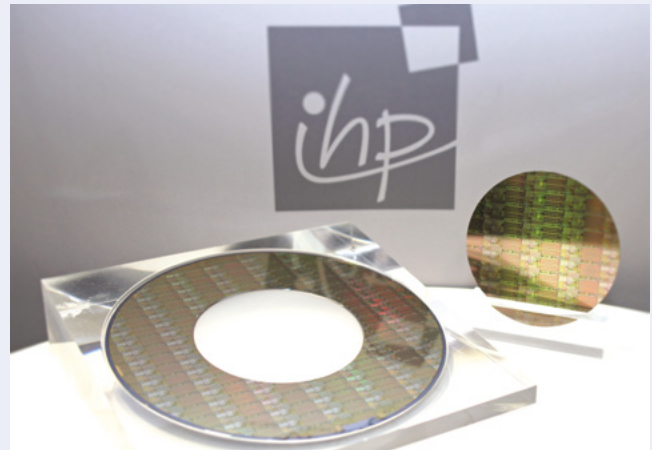
4-Zoll-Wafer, geschnitten aus
8-Zoll-MPW-Wafer
4-inch wafer cut from an
8-inch MPW wafer

Adaption of existing standard technology flows

In this case service is based on existing standard technologies and IHP standard MPW runs can be used to offer slightly modified technologies. Possible modifications are the use of non-standard wafer material, adaption of a single process steps or stopping processing at an appropriate step.

In case complete wafers are required an own mask set or additional masks to disguise other customer data are needed. In this case developments can be combined with standard Backend processes like backside grinding, dicing and a reduction of standard wafer size to 6, 4 or 3 inches.

- **Example 1:** Fabrication of standard technology on a high resistive wafer via a 130 nm MPW run.
- **Example 2:** Fabrication of MPW standard technology and planarisation for post processing



Transfer von Technologien und Technologiemodulen

Das IHP entwickelt siliziumbasierte Technologien und qualifiziert diese nach JEDEC-Standards und Testmethoden. Die Prozessabläufe, die Prozesssteuerung und -wartung folgen Industriestandards mit produktionsstauglichem Equipment. IHP-Technologien werden über einen MPW-Service für Prototyping und Kleinserienfertigung angeboten. Dies ist eine ideale Voraussetzung für den Transfer dieser Technologien in kommerzielle Großserienfertigungen. Das IHP kann den Transfer von kompletten Technologien oder Technologiemodulen anbieten. Im Rahmen eines Transferprojektes kann eine Machbarkeitsstudie, ein Eins-zu-Eins-Prozesstransfer oder eine Prozessanpassung an die Bedürfnisse der empfangenden Produktionsstätte angeboten werden.

Neben dem Transfer bestehender Technologien können auch Prozessabläufe und spezielle Geräte entwickelt werden, die auf bestehenden Prozessfähigkeiten und Forschungsergebnissen basieren. Diese Entwicklungen können auf kommerzielle Fertigungsstätten übertragen werden, die in vereinbarten Entwicklungsprojekten definiert sind.

Transfer of Technologies and Technology Modules

IHP develops Si-based technologies and qualifies them in compliance to JEDEC standards and test methods. Process flows, process control and maintenance follow industry standards with equipment suitable for production. IHP technologies are offered through an MPW Service for prototyping and low volume fabrication. This is an ideal fit for transferring these technologies to commercial high volume fabrication sites. IHP can offer transfer of complete technologies or technology modules. Within a transfer project IHP can offer a feasibility study, one to one process transfer or a process adaption to the needs of the receiving production facility.

In addition to transferring existing technologies, IHP can also develop process flows and dedicated devices based on existing process capabilities and research results. These developments can be transferred to commercial fabrications sites as defined in agreed development projects.

Das IHP kann auch siliziumbasierte Technologieentwicklungen in kommerziellen Fabrikationsstätten oder Forschungseinrichtungen unterstützen. Detaillierte Aktivitäten können Beratungstätigkeiten oder die Unterstützung von Prozessentwicklungen beinhalten, die den Austausch von Wafern und die teilweise Bearbeitung im IHP beinhalten.

Kontaktieren Sie uns, um Ihre speziellen Anforderungen im Detail zu besprechen und Ihr spezielles Transferszenario zu diskutieren.

Fehleranalyse und Diagnostik

Das IHP bietet Unterstützung für Ausbeuteerhöhung durch Fehleranalyse mit modernster Ausrüstung, einschließlich AES, AFM, FIB, LST, SEM, SIMS, STM und TEM. Tester und Geräte für RF-Messungen sind vorhanden.

Verfügbare analoge und digitale Blöcke und Designs

Zur Unterstützung von Entwürfen bietet das IHP eine breite Palette von Blöcken und Entwürfen für Drahtlos- und Breitbandlösungen an.

Analoge IP

- **Drahtlose Kommunikation**
 - 60, 240 GHz
- **Radarsensoren**
 - 60, 80, 120, 160, 256 GHz
- **THz-Sensoren**
 - 245, 500 GHz
- **Frequenzsynthesizer**
 - 6 - 60 GHz
- **Faseroptische Kommunikation**
 - VCSEL, MZM
- **Mixed-Signal Komponenten**
 - ADC, DAC
- **Impulse Radio UWB**
- **Demonstratoren und Evaluationskits**
 - 60-GHz-Frontend-Demonstrator-Modul für analoge Strahlformungskommunikation
 - Skalierbares 60/120-GHz-FMCW- und PRN-Radarsensor-Frontend-Demonstratormodul
 - UWB-Impulsfunk-Lokalortungs- und Kommunikations-Demonstratorsystem
 - LiDAR-Transimpedanzverstärker-Evaluierungskit mit hohem Dynamikbereich
 - Strahlungsbeständiger Mehrkanal-VCSEL-Treiber + TIA-Demonstrator-Modul

The IHP may also support Si-based technology developments at commercial fabrication sites or research facilities. Detailed activities may include consulting activities or process development support involving wafer exchange and partial processing at IHP.

Contact us to discuss your specific requirements in detail and your dedicated transfer scenario.

Failure Mode Analysis and Diagnostics

IHP offers support for yield enhancement through failure mode analysis with state-of-the-art equipment, including AES, AFM, FIB, LST, SEM, SIMS, STM and TEM. Tester and equipment for RF measurements are available.

Available Analog and Digital Blocks and Designs

To support designs, IHP offers a wide range of blocks and designs for wireless & broadband solutions

Analog IP

- **Wireless Communication**
 - 60, 240 GHz
- **Radar Sensors**
 - 60, 80, 120, 160, 256 GHz
- **THz Sensors**
 - 245, 500 GHz
- **Frequency Synthesizers**
 - 6 - 60 GHz
- **Fiberoptical Communication**
 - VCSEL, MZM
- **Mixed-Signal Components**
 - ADC, DAC
- **Impulse Radio UWB**
- **Demonstrators and Evaluation Kits**
 - 60 GHz analog beamforming communication frontend demonstrator module
 - 60/120 GHz FMCW and PRN scalable radar sensor frontend demonstrator module
 - UWB impulse-radio local positioning and communication demonstrator system
 - LiDAR high dynamic range transimpedance amplifier evaluation kit
 - Radiation-hard multi-channel VCSEL Driver + TIA demonstrator module

Digitale IP

- **Schnittstellen**
 - I²C Slave, SPI Slave, MDIO Slave, 10BASE-T und 100BASE-TX Digital Controller
- **Kommunikationskerne**
 - PTMP-MAC-Prozessor mit ultrahoher Datenrate und Strahlformungsunterstützung
 - Breitband-OFDM-Basisbandprozessor mit ultrahoher Datenrate
 - LDPC-Kodierer/-Dekodierer
 - RS-Kodierer/-Dekodierer
 - Viterbi-Dekodierer/Faltungskodierer
 - Peaktop-Prozessorkern (32 Bit)
 - Waterbear Multiprozessor-Framework
 - PISA-Multiprozessor
- **Beratung**
 - (Point-to-Multipoint) MAC-Protokolldesign und -implementierung
 - Entwurf und Implementierung von Kommunikationssystemen mit niedriger Latenz
 - Entwicklung und Implementierung eines Gigabit-WLAN-Systems
 - 5G-Backhaul-Systeme
 - Entwicklung und Implementierung von Lokalisierungs- und Ortungssystemen für Innenräume
 - Strahlungshärtung von digitalen ASICs

Kommerzielle Dienstleistungen: IHP Solutions GmbH

Die IHP Solutions GmbH, eine 100%ige Tochtergesellschaft des IHP, ist eine kommerzielle, marktorientierte Schnittstelle für Kunden zum IHP und seinen Forschungsergebnissen. Zu den Aktivitäten gehören der Transfer von Ergebnissen aus Forschung, Technologieentwicklung und Dienstleistungen für das IHP, einschließlich Patentmanagement und Startup-Unterstützung. Im Bereich Industrieservice ist das Unternehmen Auftragnehmer für Industriekunden und ermöglicht ihnen die Nutzung der Fertigungsdienstleistungen der IHP-Pilotlinie. Weitere Informationen: www.ihp-solutions.com

Digital IP

- **Interfaces**
 - I²C Slave, SPI Slave, MDIO Slave, 10BASE-T und 100BASE-TX Digital Controller
- **Communication Cores**
 - Ultra-high data rate PTMP MAC processor with beamforming support
 - Ultra-high data rate broadband OFDM baseband processor
 - LDPC Encoder / Decoder
 - RS Encoder / Decoder
 - Viterbi decoder / convolutional encoder
 - Peaktop processor core (32-bit)
 - Waterbear multiprocessor framework
 - The PISA multiprocessor
- **Consulting**
 - (Point-to-Multipoint) MAC protocol design and implementation
 - Design and implementation of low-latency communication systems
 - Gigabit WLAN system development and implementation
 - 5G backhaul systems
 - Indoor localization and positioning system development and implementation
 - Radiation hardening of digital ASICs

Commercial Services: IHP Solutions GmbH

IHP Solutions GmbH, a 100% subsidiary of IHP, is a commercial, market-oriented interface for customers to IHP and its research results. Among the activities are the transfer of results from research, technology development and services for IHP, including patent management and start-up support. In the field of "Industry Service", the company is a contractor for industrial customers and allows them to use the manufacturing services of the IHP pilot line. More information: www.ihp-solutions.com

**Für weitere Informationen kontaktieren Sie bitte:
For more information please contact:**

Dr. René Scholz
(Technology Research Service)

IHP
Im Technologiepark 25
15236 Frankfurt (Oder), Germany

Email: scholz@ihp-microelectronics.com

Tel : +49 335 56 25 647
Fax: +49 335 56 25 327



Publikationen

Publications

Erschienenene Publikationen

Published Papers

- (1) **Extended Horizontal SCA Attack using Clustering Algorithm**
M. Aftowicz, D. Klann, I. Kabin, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 32nd Crypto Day Matters 2021, (2021)
- (2) **Clustering versus Statistical Analysis for SCA: When Machine Learning is better**
M. Aftowicz, I. Kabin, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2021), 174 (2021)
- (3) **IoT-Ready Millimeter-Wave Radar Sensors**
W. Ahmad, J. Wessel, H.J. Ng, D. Kissinger
Proc. IEEE Global Conference on Artificial Intelligence & Internet of Things (IEEE GCAIoT 2020), (2021)
- (4) **Multimode W-Band and D-Band MIMO Scalable Radar Platform**
W. Ahmad, M. Kucharski, A. Ergintav, S. Abouzaid, J. Wessel, H.J. Ng, D. Kissinger
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **69**(1), 1036 (2021)
- (5) **A D-Band Stacked Patch Antenna with Air Trenches in BiCMOS Technology**
W. Ahmad, S. Schmitz, H.J. Ng, D. Kissinger
Proc. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APS 2021), 1637 (2021)
- (6) **A Planar Differential Wide Fan-Beam Antenna Array Architecture: Modular High-Gain Array for 79-GHz Multiple-Input, Multiple-Output Radar Applications**
W. Ahmad, M. Kucharski, A. Ergintav, H.J. Ng, D. Kissinger
IEEE Antennas and Propagation Magazine **63**(4), 21 (2021)
- (7) **Contactless Vital Signs Monitoring by mmWave Efficient Modulatorless Tracking Radar**
W. Ahmad, J. Lu, B. Sütbas, H.J. Ng, D. Kissinger
Proc. IEEE Global Conference on Artificial Intelligence & Internet of Things (IEEE GCAIoT 2021), (2021)
- (8) **Experimental Evaluation of Millimeter-Wave FMCW Radar Ranging Precision**
W. Ahmad, A. Ergintav, J. Wessel, D. Kissinger, H.J. Ng
Proc. IEEE Radio & Wireless Week (RWW 2021), 70 (2021)
- (9) **Scalable 2×2 MIMO Radar Demonstrator with BPSK Data Communications at 79 GHz**
W. Ahmad, A. Ergintav, M. Kucharski, D. Kissinger, H.J. Ng
Proc. 17th European Radar Conference (EuRAD 2020), 234 (2021)
- (10) **Non-Isothermal Phase-Field Simulations of Laser-Written In-Plane SiGe Heterostructures for Photonic Applications**
O. Aktas, Y. Yamamoto, M. Kaynak, A.C. Peacock
Communication Physics **4**, 132 (2021)
- (11) **A Fully-Blind False Data Injection on PROFINET I/O Systems**
W. Alsabbagh, P. Langendörfer
Proc. 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2021), (2021)
- (12) **A Stealth Program Injection Attack against S7-300 PLCs**
W. Alsabbagh, P. Langendörfer
Proc. 22nd International Conference on Industrial Technology (ICIT 2021), 986 (2021)
- (13) **Patch Now and Attack Later - Exploiting S7 PLCs by Time-Of-Day Block**
W. Alsabbagh, P. Langendörfer
Proc. 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS 2021), 144 (2021)
- (14) **A Control Injection Attack against S7 PLCs - Manipulating the Decompiled Code**
W. Alsabbagh, P. Langendörfer
Proc. 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2021), (2021)
- (15) **Biomolecule Sensing in THz Range with N-Ge/Si Antennas**
C. Alvarado Chavarin, A.A. Wiciak, E. Hardt, S. Guessing, O. Skibitzki, I. Costina, W. Seifert, W.M. Klesse, C.L. Manganelli, C. You, J. Flesch, J. Piehler, M. Missori, W. Koczorowski, L. Baldassarre, B. Witzigmann, G. Capellini, D. Spirito
Proc. 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021), (2021)
- (16) **Physical Attacks through the Chip Backside: Threats, Challenges and Opportunities**
E. Amini, K. Bartels, C. Boit, M. Eggert, N. Herfurth, T. Kiyan, T. Krachenfels, J.-P. Seifert, S. Tajik
Proc. 39th Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Symposia 2021), (2021)
- (17) **Monitoring of Particle Count Rate and LET Variations with Pulse Stretching Inverters**
M. Andjelkovic, J.-C. Chen, A. Simevski, O. Schrape, M. Krstic, R. Kraemer
IEEE Transactions on Nuclear Science **68**(8), 1772 (2021)
- (18) **A Tunable Single Event Transient Filter Based on Digitally Controlled Capacitive Delay Cells**
M. Andjelkovic, O. Schrape, A. Breitenreiter, J.-C. Chen, M. Krstic
Proc. 34th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFTS 2021), (2021)
- (19) **Standard Delay Cells with Improved Tolerance to Single Event Transients**
M. Andjelkovic, C. Calligaro, O. Schrape, U. Gatti, F.A. Kuentzer, M. Krstic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 329 (2021)

- (20) **Edge Computing for 5G Networks**
D. Artunedo, B. Sayadi, P. Bisson, J.P. Wary, H. Lonsethagen, C. Anton-Haro, A. Oliva, A. Kaloxylas, J. Cosmas, R. Muller, B. Meunier, Y. Zhang, X. Zhang, J. Mangués, C. Bernardos, X. Li, Q. Wang, M. Barros, A. Werbrouck, J. Gutierrez Teran, M. Molla, M. Lorenzo, D. Warren, V. Frascolla, F. Setaki, D. Tsolkas, G. Xiloutis, H. Koumaras, M. Muehleisen, A. Heider, K. Trichias, G. Tzanettis, K. Katsaros, L. Zanzi, G. Carozzo, B. Al-Jammal, A. Gopalasingham, A. Fornés Leal, M. Iordache, S. Kuklinski, L. Tomaszewski, D. Breitgand, P. Giaccone, P.S. Yanez-Mingot, C. Papagianni, G. Tsolis, C. Tselios, J. Cosmas, D. Levi, K. Trichias, H. Khalili, P.S. Khodashenas
5GPPP Technology Board (2021)
- (21) **A TOPSIS-Assisted Feature Selection Scheme and SOM-Based Anomaly Detection for Milling Tools under Different Operating Conditions**
M. Assafo, P. Langendörfer
IEEE Access **9**, 90011 (2021)
- (22) **Tackling the Low Conductance State Drift through Incremental Reset and Verify in RRAM Arrays**
A. Baroni, C. Zambelli, P. Olivo, E. Perez, Ch. Wenger, D. Ielmini
Proc. IEEE International Integrated Reliability Workshop (IIRW 2021), (2021)
- (23) **5G-VICTORI: Optimizing Media Streaming in Mobile Environments using mmWave, NBMP and 5G Edge Computing**
L. Bassbouss, M.B. Fadhel, S. Pham, A. Chen, S. Steglich, E. Troudt, M. Emmelmann, J. Gutierrez Teran, N. Maletic, E. Grass, S. Schinkel, A. Wilson, S. Glaser, C. Schlehuber
Proc. 6th Workshop on 5G – Putting Intelligence to the Network Edge (5G-PINE 2021), in: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, IFIP AICT **628**, 38 (2021)
- (24) **Bestimmung der optischen Konstanten und Streueigenschaften von transparenten Kunststoffen auf Polyurethanbasis für den Einsatz in der Optoelektronik**
J. Bauer, O. Fursenko, F. Heinrich, M. Gutke, B. Dietzel, E. Kornejew, O. Broedel, A. Kaltenbach, M. Burkhardt, M. Edling, S. Pulwer, P. Steglich, M. Herzog, S. Schrader
Proc. 122. Tagung der DGaO (Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik), A17 (2021)
- (25) **Impedance Matching in Dielectrophoresis Experiments**
N. Boldt, D.E. Malti, S. Damm, A. Barai, M. Birkholz, R. Thewes
Proc. IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCas 2021), (2021)
- (26) **Fiber-to-Chip Light Coupling using a Graded-Index Lensed Fiber Collimator**
S. Bondarenko, M. Hülsemann, A. Mai, P. Steglich
Optical Engineering **60**(1), 014105 (2021)
- (27) **Zuverlässigkeitsanalyse digitaler Schaltungen durch Answer Set Programming**
A. Breitenreiter, O. Schrape, M. Andjelkovic, M. Krstic
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 41 (2021)
- (28) **Reliability Analysis in less than 200 Lines of Code**
A. Breitenreiter, O. Schrape, M. Andjelkovic, M. Krstic
Proc. 12th IEEE Latin America Symposium on Circuits and System (LASCAS 2021), (2021)
- (29) **A 239-298 GHz Power Amplifier in an Advanced 130 nm SiGe BiCMOS Technology for Communications Applications**
T. Bücher, J. Grzyb, P. Hillger, H. Rücker, B. Heinemann, U.R. Pfeiffer
Proc. 47th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC 2021), 369 (2021)
- (30) **An Academic Framework for IC Physical Design Algorithms Development**
D. Bulakh, A. Korshunov, A. Datsuk
Proc. International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2021), (2021)
- (31) **The Wafer-Level Package Integration of a K/ Ka Band Diplexer-on-PCB**
Z. Cao, M. Stocchi, M. Wietstruck, M. Kaynak
Proc. International Microwave Filter Workshop (IMFW 2021), (2021)
- (32) **N-Type Ge/Si Antennas for THz Sensing**
C.A. Chavarin, E. Hardt, S. Gruessing, O. Skibitzki, I. Costina, D. Spirito, W. Seifert, W.M. Klesse, C.L. Manganelli, C. You, J. Flesch, J. Piehler, M. Missori, L. Baldassarre, B. Witzigmann, G. Capellini
Optics Express **29**(5), 7680 (2021)
- (33) **Perspectives on Electrically Pumped Ge/SiGe QW Emitters at THz Frequencies**
C. Ciano, M. Montanari, L. Persichetti, D. Stark, G. Scaliari, J. Faist, L. Di Gaspare, G. Capellini, C. Corley, T. Grange, S. Birner, M. Virgilio, L. Baldassarre, M. Ortolani, M. De Seta
Proc. 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020), (2021)
- (34) **Liquid-Phase Exfoliated Gallium Selenide for Light-Driven Thin-Film Transistors**
N. Curreli, M. Serri, M.I. Zappia, D. Spirito, G. Bianca, J. Buha, L. Najafi, Z. Sofer, R. Krahne, V. Pellegrini, F. Bonaccorso
Advanced Electronic Materials **7**(3), 2001080 (2021)
- (35) **Experimental Evaluation of Line-of-Sight MIMO Transmission for Sub-6GHz Carrier Frequencies**
D. Cvetkovski, T. Schlegel, E. Grass
Frequenz: Journal of RF-Engineering and Telecommunications **75**(5-6), 165 (2021)
- (36) **Four-Stream Line-of-Sight Spatial Multiplexing for 60 GHz Backhaul Applications**
D. Cvetkovski, T. Hälsig, B. Lankl, E. Grass
IEEE Wireless Communications Letters **10**(8), 1648 (2021)
- (37) **An Integrated Development Environment for Robust Interoperable PDK Implementation**
A. Datsuk, C. Wieden, D. Bulakh, T. Krupkina
Proc. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021), 2067 (2021)

- (38) **Mechanical Switching of Orientation-Related Photoluminescence in Deep-Blue 2D Layered Perovskite Ensembles**
B. Dhanabalan, A. Castelli, L. Ceseracciu, D. Spirito, F. Di Stasio, L. Manna, R. Krahne, M.P. Arciniegas
Nanoscale **13**(7), 3948 (2021)
- (39) **Support Region of μ -Law Logarithmic Quantizers for Laplacian Source Applied in Neural Networks**
M. Dincic, Z. Peric, M. Tancic, D. Denic, Z. Stamenkovic, B. Denic
Microelectronics Reliability **124**, 114269 (2021)
- (40) **A V-Band Vector Modulator based Phase Shifter in BiCMOS 0.13 μ m SiGe Technology**
K.E. Drenkhahn, A. Gadallah, A. Franzese, Ch. Wagner, A. Malignaggi
Proc. 15th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC 2020), 65 (2021)
- (41) **Single-Trace Address Bit SCA: Atomicity and Regularity are not Effective Countermeasures**
Z. Dyka, I. Kabin, D. Klann, P. Langendörfer
Proc. 33rd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (42) **Multiplier as a Mean for Reducing Vulnerability of Atomic Patterns to Horizontal Address-Bit Attacks**
Z. Dyka, I. Kabin, D. Klann, P. Langendörfer
Proc. 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2021), 183 (2021)
- (43) **A Monolithic-Integrated Broadband Low-Noise Optical Receiver with Automatic Gain Control in 0.25 μ m SiGe BiCMOS**
G. Dziallas, A. Fatemi, A. Malignaggi, G. Kahmen
Proc. 21st IEEE Topical Meetings on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF 2021), 1 (2021)
- (44) **A -115 dBc/Hz Integrated Optoelectronic Oscillator in a BiCMOS Silicon Photonic Technology**
G. Dziallas, A. Fatemi, A. Peczek, M. Tarar, D. Kissinger, L. Zimmermann, A. Malignaggi, G. Kahmen
Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2021), 23 (2021)
- (45) **A 97 GHz 66 dB Ω SiGe BiCMOS Low-Noise Transimpedance Amplifier for Optical Receivers**
G. Dziallas, A. Fatemi, A. Malignaggi, G. Kahmen
IEEE Solid-State Circuits Letters **31**(12), 1295 (2021)
- (46) **Plesiochronous Spread Spectrum Clocking with Guaranteed QoS for In-Band Switching Noise Reduction**
X. Fan, M. Babic, S. Zhang, E. Grass, M. Krstic
IEEE Transactions on Circuits and Systems I **68**(7), 3031 (2021)
- (47) **A Multi-Mode Linear Optical Modulator Driver Circuit in 130 nm SiGe BiCMOS Technology**
A. Fatemi, G. Kahmen, A. Malignaggi
Proc. IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2021), (2021)
- (48) **A 96-Gb/s PAM-4 Receiver using Time-Interleaved Converters in 130-nm SiGe BiCMOS**
A. Fatemi, G. Kahmen, A. Malignaggi
IEEE Solid-State Circuits Letters **4**, 60 (2021)
- (49) **Three-Dimensional Interfacing of Cells with Hierarchical Silicon Nano/Microstructures for Midinfrared Interrogation of In Situ Captured Proteins**
J. Flesch, M. Bettenhausen, M. Kazmierczak, W.M. Klesse, O. Skibitzki, O.E. Psathaki, R. Kurre, G. Capellini, S. Guha, T. Schroeder, B. Witzigmann, C. You, J. Piehler
ACS Applied Materials & Interfaces **13**(7), 8049 (2021)
- (50) **Millimeter-Wave Amplifier-Based Noise Sources in SiGe BiCMOS Technology**
H. Forstén, J.H. Saijets, M. Kantanen, M. Varonen, M. Kaynak, P. Piironen
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **69**(11), 4689 (2021)
- (51) **Power- and Area-Optimized Neural Network IC-Design for Academic Education**
F. Frankreiter, A. Breitenreiter, O. Schrape, M. Krstic
Proc. 28th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2021)
- (52) **2x4 VGA-Less Bidirectional Dual-Polarization 28 GHz Beamformer in 130-nm SiGe BiCMOS**
A. Franzese, N. Maletic, M.H. Eissa, R. Negra, A. Malignaggi
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **31**(8), 981 (2021)
- (53) **Vector Modulator Phase Shifters in 130-nm SiGe BiCMOS Technology for 5G Applications**
A. Franzese, M.H. Eissa, D. Kissinger, A. Malignaggi
Proc. IEEE Radio and Wireless Week (RWW 2021), 64 (2021)
- (54) **Electro-Thermal Limitations and Device Degradation of SiGe HBTs with Emphasis on Circuit Performance**
S. Fregonese, C. Mukherjee, H. Rücker, P. Chevalier, G.G. Fischer, D. Céli, M. Deng, F. Marc, C. Maneux, T. Zimmer
Proc. IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2021), (2021)
- (55) **Modeling and Analysis of the Electrolyte Voltage Drop in Dielectrophoresis Actuators**
A. Frey, N. Boldt, A. Barai, M. Birkholz, I. Kuehne, R. Thewes
Proc. IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCas 2021), (2021)
- (56) **Mitigating the Effects of RRAM Process Variation on the Accuracy of Artificial Neural Networks**
M. Fritscher, J. Knödtel, M. Mallah, S. Pechmann, E. Perez-Bosch Quesada, T. Rizzi, Ch. Wenger, M. Reichenbach
Proc. 21st International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation (SAMOS 2021), (2021)

- (57) **Challenges in Developing a Wireless Sensor Network for an Agricultural Monitoring and Decision System**
M. Froberg, St. Weidling, P. Langendörfer
Proc. 12th International Networking Conference (INC 2020), in: Selected Papers from the 12th International Networking Conference, Springer, LNNS **180**, 224 (2021)
- (58) **A 4-Channel V-Band Beamformer Featuring a Switchless PALNA for Scalable Phased Array Systems**
A. Gadallah, A. Franzese, M.H. Eissa, K.E. Drenkhahn, D. Kissinger, A. Malignaggi
Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2021), 839 (2021)
- (59) **Research on ADC Architectures Suitable for Space Applications and Technology Scaling**
E.P. Garcia, O. Schrape, A. Breitenreiter, L. Pallares, M. Krstic, M. Lopez-Vallejo
Proc. 8th International Workshop on Analogue and Mixed-Signal Integrated Circuits for Space Applications (AMICSA 2021), (2021)
- (60) **2D Grating Coupler Induced Polarization Crosstalk in Coherent Transceivers for Next Generation Data Center Interconnects**
G. Georgieva, P.M. Seiler, Ch. Mai, K. Petermann, L. Zimmermann
Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2021), W1C.4 (2021)
- (61) **A 112 Gb/s Radiation-Hardened Mid-Board Optical Transceiver in 130-nm SiGe BiCMOS for Intra-Satellite Links**
S. Giannakopoulos, I. Sourikopoulos, L. Stampoulidis, P. Ostrovskyy, F. Teply, K. Tittelbach-Helmrich, G. Panic, G. Fischer, A. Grabowski, H. Zirath, P. Ayzac, N. Venet, A. Maho, M. Sotom, S. Jones, G. Wood, I. Oxtoby
Frontiers in Physics **9**, 672941 (2021)
- (62) **Heterodyne Spectroscopy with a 225 – 255 GHz SiGe BiCMOS Receiver for Space Applications**
A. Glück, K. Schmalz, N. Rothbart, H.-W. Hübers
Proc. 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021), (2021)
- (63) **Low-Complexity Subspace Method for I/Q Imbalance Estimation in Low-IF Receivers with Unknown Fading**
A. Gomaa, A. Elezabi, M.H. Eissa
Transactions on Emerging Telecommunications Technologies **32**(3), e4181 (2021)
- (64) **Synchronization in 5G Networks: A Hybrid Bayesian Approach Towards Clock Offset/Skew Estimation and its Impact on Localization**
M. Goodarzi, D. Cvetkovski, N. Maletic, J. Gutierrez Teran, E. Grass
EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking **91** (2021)
- (65) **BEOL Modifications of a 130 nm SiGe BiCMOS Technology for Monolithic Integration of Thin-Film Wafer-Level Encapsulated D-Band RFMEMS Switches**
A. Göritz, S. Tolunay Wipf, M. Wietstruck, M. Kaynak, M. Fraschke, A. Krüger, M. Lisker
23rd IEEE Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2021), (2021)
- (66) **A 440 – 540-GHz Transmitter in 130-nm SiGe BiCMOS**
A. Güner, T. Mausolf, J. Wessel, D. Kissinger, K. Schmalz
Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2021), (2021)
- (67) **A 440 - 540-GHz Transmitter in 130-nm SiGe BiCMOS**
A. Güner, T. Mausolf, J. Wessel, D. Kissinger, K. Schmalz
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **31**(6), 779 (2021)
- (68) **Impact of Data Preparation in Freezing of Gait Detection using Feature-Less Recurrent Neural Network**
A. Haddadi Esfahani, Z. Dyka, St. Ortmann, P. Langendörfer
IEEE Access **9**, 138120 (2021)
- (69) **Multi-Channel RF Supervision Module for Thermal Magnetic Resonance based Cancer Therapy**
H. Han, E. Oberacker, A. Kuehne, S. Wang, T.W. Eigentler, E. Grass, T. Niendorf
Cancers **13**(5), 1001 (2021)
- (70) **Reduced-Complexity Decoding Implementation of QC-LDPC Codes with Modified Shuffling**
A. Hasani, L. Lopacinski, R. Kraemer
EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking **183** (2021)
- (71) **Functionalization of Oxide-Free Silicon Surfaces for Biosensing Applications**
A. Henriksson, P. Neubauer, M. Birkholz
Advanced Materials Interfaces **2100927** (2021)
- (72) **Design, Simulations and Manufacturing of a Microring Resonator Biosensor Assisted by Dielectrophoresis**
A. Henriksson, M. Jäger, L. Kasper, P. Neubauer, M. Birkholz
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)
- (73) **Meticulous SPEM System Calibration as a Key for Extracting Correct Photon Emission Spectra**
N. Herfurth, C. Boit
Proc. 28th edition of the IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA 2021), (2021)
- (74) **Anthropomorphized Artificial Intelligence, Attachment, and Consumer Behavior**
E. Hermann
Marketing Letters (2021)
- (75) **Artificial Intelligence and Mass Personalization of Communication Content - An Ethical and Literacy Perspective**
E. Hermann
New Media & Society (2021)
- (76) **Artificial Intelligence in Marketing – Friend or Foe of Sustainable Consumption?**
E. Hermann
AI & Society (2021)

- (77) **Artificial Intelligence in Research and Development for Sustainability: The Centrality of Explicability and Research Data Management**
E. Hermann, G. Hermann
AI and Ethics (2021)
- (78) **Leveraging Artificial Intelligence in Marketing for Social Good - An Ethical Perspective**
E. Hermann
Journal of Business Ethics (2021)
- (79) **Social Change, Cultural Resistance: A Meta-Analysis of the Influence on Television Viewing on Gender Role Attitudes**
E. Hermann, M. Morgan, J. Shanahan
Communication Monographs (2021)
- (80) **Ethical Artificial Intelligence in Chemical Research and Development: A Dual Advantage for Sustainability**
E. Hermann, G. Hermann, J.-C. Tremblay
Science and Engineering Ethics **27**, 45 (2021)
- (81) **A Novel Approach to Fractional-N PLLs Generating Ultra-Fast Low-Noise Chirps for FMCW Radar**
F. Herzel, A. Ergintav, G. Fischer
Integration, the VLSI Journal **76**, 139 (2021)
- (82) **The Formation of a Sn Monolayer on Ge(100) Studied at the Atomic Scale**
E.V.S. Hofmann, E. Scalise, F. Montalenti, T.J.Z. Stock, S.R. Schofield, G. Capellini, L. Miglio, N.J. Curson, W.M. Klesse
Applied Surface Science **561**, 149961 (2021)
- (83) **AC Electrokinetic on the Nanoscale: Immobilisation of Nanoparticles and Molecules**
R. Hölzel, X. Knigge, E.-M. Laux, M. Noffke, S. Stanke, Ch. Wenger, F.F. Bier
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)
- (84) **Erratum to "High-Power Radiation at 1 THz in Silicon: A Fully Scalable Array Using a Multi-Functional Radiating Mesh Structure"**
Z. Hu, M. Kaynak, R. Han
IEEE Journal of Solid-State Circuits **56**(10), 3202 (2021)
- (85) **Power Silicon Carbide Schottky Diodes as Current Mode γ -Radiation Detectors**
S. Ilic, M. Andjelkovic, M. Carvajal, A. Lallena, M. Krstic, S. Stankovic, G. Ristic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 337 (2021)
- (86) **Recharging Process of Commercial Floating-Gate MOS Transistor in Dosimetry Application**
S. Ilic, M. Andjelkovic, R. Duane, A. Palma, M. Sarajlic, S. Stankovic, G. Ristic
Microelectronics Reliability **126**, 114322 (2021)
- (87) **Compact and Transfer Printable 64 Gb/s Differential Transimpedance Amplifier in 130-nm BiCMOS**
M. Inac, A. Fatemi, F. Gerfers, A. Malignaggi
Proc. 50th European Microwave Week (EuMW 2021), 1166 (2021)
- (88) **Performance Comparison of Broadband Traveling Wave Amplifiers in 130 nm SiGe:C SG13G2 and SG13G3 BiCMOS Technologies**
M. Inac, A. Fatemi, F. Korndörfer, H. Rücker, F. Gerfers, A. Malignaggi
Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2021), (2021)
- (89) **Transfer Printable 64 Gbps Lumped Driver for Optical Communication**
M. Inac, A. Fatemi, F. Gerfers, A. Malignaggi
Proc. 9. MikroSystemTechnik Kongress (MST 2021), 547 (2021)
- (90) **Performance Comparison of Broadband Traveling Wave Amplifiers in 130 nm SiGe:C SG13G2 and SG13G3 BiCMOS Technologies**
M. Inac, A. Fatemi, F. Korndörfer, H. Rücker, F. Gerfers, A. Malignaggi
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **31**(6), 744 (2021)
- (91) **Modulation Linearity Characterization of Si Ring Modulators**
Y. Jo, Ch. Mai, St. Lischke, L. Zimmermann, W.-Y- Choi
IEEE Journal of Lightwave Technology **39**(24), 7842 (2021)
- (92) **Breaking of an Open Source Fully Balanced Elliptic Curve Design using Automated Simple SCA**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
Proc. 32nd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (93) **Fast Dual-Field ECDSA Accelerator with Increased Resistance against Horizontal SCA Attacks**
I. Kabin, D. Klann, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR 2021), 273 (2021)
- (94) **FFT based Horizontal SCA Attack against ECC**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, M. Aftowicz, P. Langendörfer
Proc. 11th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility & Security (NTMS 2021), (2021)
- (95) **On the Complexity of Attacking Commercial Authentication Products**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, J. Schäffner, P. Langendörfer
Microprocessors and Microsystems **80**, 103480 (2021)
- (96) **EC P-256: Successful Simple Power Analysis**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
zu finden unter: <https://arxiv.org/abs/2106.12321>
- (97) **EC Scalar Multiplication: Successful Simple Address-Bit SCA Attack against Atomic Patterns**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
Proc. 22nd IEEE Latin-American Test Symposium (LATS 2021), (2021)
- (98) **Resistance of the Montgomery Ladder against Simple SCA: Theory and Practice**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, M. Aftowicz, P. Langendörfer
Journal of Electronic Testing **37**, 289 (2021)

- (99) **Oxides based Resistive Switching Memories**
S. Kalem, S. B. Tekin, Z. E. Kaya, E. Jagaluier, R. Roelofs, S. Yildirim, O. Yavuzcetin, Ch. Wenger
Proc. SPIE Oxide-based Materials and Devices XII (SPIE OPTO 2021), **11687**, 116871L (2021)
- (100) **A Broadband 110-170-GHz Stagger-Tuned Power Amplifier with 13.5-dBm Psat in 130-nm SiGe**
A. Karakuzulu, M.H. Eissa, D. Kissinger, A. Malignaggi
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **31**(1), 56 (2021)
- (101) **A Broadband 110-170 GHz Frequency Multiplier by 4 Chain with 8 dBm Output Power in 130 nm BiCMOS**
A. Karakuzulu, M.H. Eissa, D. Kissinger, A. Malignaggi
Proc. 47th IEEE European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC 2021), 451 (2021)
- (102) **Full D-Band Transmit-Receive Module for Phased Array Systems in 130-nm SiGe BiCMOS**
A. Karakuzulu, M.H. Eissa, D. Kissinger, A. Malignaggi
IEEE Solid-State Circuits Letters **4**, 40 (2021)
- (103) **Numerical Optimization and CW Measurements of SOI Waveguides for Ultra-Broadband C-to-O-Band Conversion**
T. Kernetzky, G. Ronniger, U. Höfler, L. Zimmermann, N. Hanik
Proc. 47th European Conference Optical Communications (ECOC 2021), (2021)
- (104) **Synthesis and Realization of Multiband Bandpass Filters Based on Frequency Transformation for the Encoding of Chipless RFID Tags**
M. Khaliel, J. Wen, A. Prokscha, A. El-Awamry, A. Fawky, T. Kaiser
Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC 2021), 184 (2021)
- (105) **Si Photonic-Electronic Monolithically Integrated Optical Receiver with a Built-In Temperature-Controlled Wavelength Filter**
H.-K. Kim, M. Kim, M.-H. Kim, Y. Jo, St. Lischke, Ch. Mai, L. Zimmermann, W. Choi
Optics Express **29**(6), 9565 (2021)
- (106) **Silicon Electronic-Photonic Integrated 25-Gb/s Ring Modulator Transmitter with a Built-In Temperature Controller**
M. Kim, M.-H. Kim, Y. Jo, H.-K. Kim, St. Lischke, Ch. Mai, L. Zimmermann, W.-Y. Choi
Photonics Research **9**(4), 507 (2021)
- (107) **Terahertz Signal Source and Receiver Operating Near 600 GHz and their 3-D Imaging Application**
J. Kim, D. Yoon, H. Son, D. Kim, J. Yoo, J. Yun, H.J. Ng, M. Kaynak, J.-S. Rieh
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **69**(5), 2762 (2021)
- (108) **A Temperature-Aware Large-Signal SPICE Model for Depletion-Type Silicon Ring Modulators**
M. Kim, Y. Jo, St. Lischke, Ch. Mai, L. Zimmermann, W.-Y. Choi
IEEE Photonics Technology Letters **33**(17), 947 (2021)
- (109) **Millimeter-Wave and Terahertz Transceivers in SiGe BiCMOS Technologies**
D. Kissinger, G. Kahmen, R. Weigel
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **69**(10), 4541 (2021)
- (110) **Precipitation of Suboxides in Silicon**
G. Kissinger, D. Kot, A. Huber, R. Kretschmer, T. Müller, A. Sattler
ECS Meeting Abstracts **MA2021-01**(34), 1093 (2021)
- (111) **Efficient Implementation of Unified ECC Accelerators based on the Karatsuba Multiplication Method**
D. Klann, I. Kabin, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 32nd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (112) **Fast Scatterometric Measurement of Periodic Surface Structures in Plasma-Etching Processes**
W.M. Klesse, A. Rathsfeld, C. Groß, E. Malguth, O. Skibitzki, L. Zealouk
Measurement **170**, 108721 (2021)
- (113) **Plasmonics - High-Speed Photonics for Co-Integration with Electronics**
U. Koch, C. Uhl, H. Hettrich, Y. Fedoryshyn, D. Moor, M. Baumann, C. Hoessbacher, W. Heni, B. Baeuerle, B.I. Bitachon, A. Josten, M. Ayata, H. Xu, D.L. Elder, L.R. Dalton, E. Mentovich, P. Bakopoulos, St. Lischke, A. Krüger, L. Zimmermann, D. Tsiokos, N. Pleros, M. Möller, J. Leuthold
Japanese Journal of Applied Physics **60**(SB), SB0806 (2021)
- (114) **Adaptation Strategies for Personalized Gait Neuroprosthetics**
A.D. Koelewijn, M. Audu, A.J. del-Ama, A. Colucci, J.M. Font-Llagunes, A. Gogeochea Hernandez, S. Hnat, N. Makowski, J.C. Moreno, M. Nandor, R. Quinn, M. Reichenbach, R.-D. Reyes, M. Sartori, S. Soekader, R.J. Triolo, M. Vermehren, Ch. Wenger, U.S. Yavuz, D. Fey, P. Beckerle
Frontiers in Neurobotics **15**, 750619 (2021)
- (115) **Parallel Sequence Spread Spectrum based Ultra-Reliable Low Latency Communication for Factory Automation**
K. Krishnegowda, E.L. Peter, M. Scheide, L. Wimmer, R. Kays, E. Grass, R. Kraemer
Proc. 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2021), (2021)
- (116) **THz Transmission Experiments – A Data Rate of 80 Gbps was Demonstrated using Kasami Codes**
K. Krishnegowda, P.R. Vazquez, L. Lopacinski, U.R. Pfeiffer, E. Grass, R. Kraemer
Proc. 8th IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering & Electronic Systems (COMCAS 2021), (2021)
- (117) **Cross-Layer Digital Design Flow for Space Applications**
M. Krstic, M. Andjelkovic, O. Schrape, A. Breitenreiter, J.-C. Chen, A. Balashov, A. Simevski
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 45 (2021)

- (118) **Generic Energy Production Model for Smart Grid Emulation**
M. Krysiak, K. Piotrowski, R. Rybski
Measurement Systems in Theory and Practice, 1st Edition, Editor: R. Rybski, Generic Energy Production Model for Smart Grid Emulation, Verlag der Universität Zielona Góra, 11 (2021)
- (119) **Monostatic and Bistatic G-Band BiCMOS Radar Transceivers with On-Chip Antennas and Tunable TX-to-RX Leakage Cancellation**
M. Kucharski, W. Ahmad, H.J. Ng, D. Kissinger
IEEE Journal of Solid-State Circuits **56**(3), 899 (2021)
- (120) **Assessing AFEDC Architecture's Robustness to Timing Faults**
F.A. Kuentzer, M. Krstic
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 43 (2021)
- (121) **AC Electrokinetic Immobilization of K562 Exosomes on Nanoelectrode Arrays**
E.-M. Laux, Ch. Wenger, R. Hölzel
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)
- (122) **Simplified Control Flow Integrity Method for Permuted Programs**
K. Lehniger, M. Schölzel, P. Tabatt, M. Aftowicz, P. Langendörfer
Proc. 32nd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (123) **Ultra-Fast Germanium Photodiode with 3-dB Bandwidth of 265 GHz**
St. Lischke, A. Peczek, J.S. Morgan, K. Sun, D. Steckler, Y. Yamamoto, F. Korndörfer, Ch. Mai, St. Marschmeyer, M. Fraschke, A. Krüger, A. Beling, L. Zimmermann
Nature Photonics **15**, 925 (2021)
- (124) **Very High-Speed Waveguide Integrated Germanium Photo Detectors**
St. Lischke, A. Peczek, D. Steckler, F. Korndörfer, J. Morgan, A. Beling, L. Zimmermann
Proc. 47th European Conference on Optical Communication (ECOC 2021), (2021)
- (125) **Waveguide-Coupled Ge Photodiodes with 3-dB Bandwidth ≥ 110 GHz**
St. Lischke, A. Peczek, D. Steckler, F. Korndörfer, Ch. Mai, L. Zimmermann
Proc. IEEE Photonics Conference (IPC 2021), (2021)
- (126) **Epitaxial GeSn/Ge Vertical Nanowires for P-Type Field-Effect Transistors with Enhanced Performance**
M. Liu, D. Yang, A. Shkurmanov, J.H. Bae, V. Schlykova, J.-M. Hartmann, Z. Ikonic, F. Bärwolf, I. Costina, A. Mai, J. Knoch, D. Grützmacher, D. Buca, Q.-T. Zhao
ACS Applied Nano Materials **4**(1), 94 (2021)
- (127) **Fast Algorithms for Generating Real-Valued Spreading Sequences for High-Speed Wireless Communication Systems Based on PSSS**
L. Lopacinski, N. Maletic, A. Hasani, J. Gutierrez Teran, E. Grass
Proc. Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTW 2021), 280 (2021)
- (128) **A Study of Barker Spreading Codes for High-Speed PSSS Wireless Systems**
L. Lopacinski, N. Maletic, A. Hasani, K. Krishnegowda, J. Gutierrez Teran, R. Kraemer, E. Grass
Proc. 30th European Conference on Networks and Communications (EuCNC 2021), 122 (2021)
- (129) **A Study of Hardware Complexity for PSSS Systems Based on Real-Valued Spreading Sequences**
L. Lopacinski, N. Maletic, A. Hasani, J. Gutierrez Teran, E. Grass
Proc. 94th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2021), (2021)
- (130) **Investigation of Real-Valued Spreading Sequences for DSSS and PSSS**
L. Lopacinski, N. Maletic, A. Hasani, J. Gutierrez Teran, E. Grass
Proc. 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2021), (2021)
- (131) **Modulation and Coding Schemes for Variable-Rate Parallel Sequence Spread Spectrum**
L. Lopacinski, A. Hasani, N. Maletic, J. Gutierrez Teran, R. Kraemer, E. Grass
Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2021), 446 (2021)
- (132) **Machine Learning Approach for Accelerating Simulation-Based Fault Injection**
L. Lu, J.-C. Chen, A. Breitenreiter, O. Schrape, M. Ulbricht, M. Krstic
Proc. IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS 2021), (2021)
- (133) **Influence of Plasma Treatment on SiO₂/Si and Si₃N₄/Si Substrates for Large-Scale Transfer of Graphene**
R. Lukose, M. Lisker, F. Akhtar, M. Fraschke, T. Grabolla, A. Mai, M. Lukosius
Scientific Reports **11**, 13111 (2021)
- (134) **Low-Temperature Atomic Layer Deposition of Indium Oxide Thin Films using Trimethylindium and Oxygen Plasma**
A. Mahmoodinezhad, C. Morales, F. Naumann, P. Plate, R. Meyer, C. Janowitz, K. Henkel, M. Kot, M.H. Zoellner, Ch. Wenger, J.I. Flege
Journal of Vacuum Science and Technology A **36**(6), 062406 (2021)
- (135) **A Study of LOS MIMO for Short-Range Sub-THz Wireless Links**
N. Maletic, L. Lopacinski, M. Goodarzi, M.H. Eissa, J. Gutierrez Teran, E. Grass
Proc. 25. ITG Fachtagung Mobilkommunikation - Technologien und Anwendungen (2021), 10 (2021)
- (136) **Modelling Power Amplifier Impairments in mmWave Phased-Array Systems**
N. Maletic, E. Grass
Electronics Letters **57**(13), 532 (2021)
- (137) **OFDM Transmission over a Short-Range 240 GHz Wireless Link: Performance Analysis**
N. Maletic, M.H. Eissa, L. Lopacinski, V. Sark, J. Gutierrez Teran, E. Grass
Proc. 25th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2021), 71 (2021)

- (138) **Towards CMOS Compatible Materials for Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS)**
C.L. Manganelli, H. Matbaechi Ettehad, M. Masood, D. Spirito, Ch. Wenger
Proc. 3rd European BioSesnsor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)
- (139) **Tensile Strained Germanium Microstructures: A Comprehensive Analysis of Thermo-Opto-Mechanical Properties**
C.L. Manganelli, M. Virgilio, M. Montanari, I. Zaitsev, N. Anriolli, S. Faralli, S. Tirelli, F. Dagnano, W.M. Klesse, D. Spirito
Physica Status Solidi A **218**(21), 2100293 (2021)
- (140) **Real-Time Physical Layer Secure Key Generation in a mmWave Communication System**
N. Manjappa, L. Wimmer, N. Maletic, E. Grass
Proc. 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2021), (2021)
- (141) **Prediction of Pest Insect Appearance using Sensors and Machine Learning**
D. Markovic, D. Vujicic, S. Tanaskovic, B. Dordevic, S. Randic, Z. Stamenkovic
Sensors **21**(14), 4846 (2021)
- (142) **Measurements and Analysis of Different Front-End Configurations for Monolithic SiGe BiCMOS Pixel Detectors for HEP Applications**
F. Martinelli, C. Magliocca R. Cardella, E. Charbon, G. Iacobucci, M. Nessi, L. Paolozzi, H. Rücker, P. Valerio
Journal of Instrumentation **16**, 12038 (2021)
- (143) **Phase Transitions in Low-Dimensional Layered Double Perovskites: The Role of the Organic Moieties**
B. Martin-Garcia, D. Spirito, G. Biffi, S. Artyukhin, F. Bonaccorso, R. Krahne
The Journal of Physical Chemistry Letters **12**(1), 280 (2021)
- (144) **Characterization and Manipulation of Yeast Cells using Microfluidic-based Interdigitated Biosensor**
H. Matbaechi Ettehad, Ch. Wenger
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021), Germany
- (145) **Characterization and Separation of Live and Dead Yeast Cells using CMOS-Based DEP Microfluidics**
H. Matbaechi Ettehad, Ch. Wenger
Micromachines **12**(3), 270 (2021)
- (146) **5G-VICTORI: Future Railway Communications Requirements Driving 5G Deployments in Railways**
I. Mesogiti, E. Theodoropoulou, F. Setaki, G. Lyberopoulos, A. Tzanakaki, M. Anastassopoulos, C. Politi, P. Papaioannou, C. Tranoris, S. Denazis, P. Flegkas, N. Makris, N. Maletic, D. Cvetkovski, J. Gutierrez Teran, P.K. Chartsias, K. Stamatias, M. Xezonaki, D. Kritharidis, A. Dalkalitsis, M. Taferner, M. Piovarc
Proc. 6th Workshop on 5G – Putting Intelligence to the Network Edge (5G-PINE 2021), in: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, IFIP AICT **628**, 21 (2021)
- (147) **Flood Embankments Monitoring System in On-Line Mode**
E. Michta, P. Powrozniak, R. Rybski, R. Szulim, K. Piotrowski, U. Kolodziejczyk, J. Kostecki
Measurement Systems in Theory and Practice, 1st Edition, Editor: R. Rybski, Flood Embankments Monitoring System in On-Line Mode, Verlag der Universität Zielona Góra, 1 (2021)
- (148) **Accurate Program/Verify Schemes of Resistive Switching Memory (RRAM) for In-Memory Neural Network Circuits**
V. Milo, A. Glukhov, E. Perez, C. Zambelli, N. Lepri, M.K. Mahadevaiah, E. Perez-Bosch Quesada, P. Olivo, Ch. Wenger, D. Ielmini
IEEE Transactions on Electron Devices **68**(8), 3832 (2021)
- (149) **Optimized Programming Algorithms for Multilevel RRAM in Hardware Neural Networks**
V. Milo, F. Anzalone, C. Zambelli, E. Perez, M.K. Mahadevaiah, O.G. Ossorio, P. Olivo, Ch. Wenger, D. Ielmini
Proc. International Reliability Physics Symposium (IRPS 2021), (2021)
- (150) **A Compact Optical Sensor for Explosive Detection Based on NIR Luminescent Quantum Dots**
F. Mitri, A. De Iacovo, S. De Santis, C. Giansante, D. Spirito, G. Sotgiu, L. Colace
Applied Physics Letters **119**(4), 041106 (2021)
- (151) **THz Intersubband Absorption in N-Type Si_{1-x}Ge_x Parabolic Quantum Wells**
M. Montanari, C. Ciano, L. Persichetti, C. Corley, L. Baldassarre, M. Ortolani, L. Di Gaspare, G. Capellini, D. Stark, G. Scalari, M. Virgilio, M. De Seta
Applied Physics Letters **118**(16), 163106 (2021)
- (152) **High Efficiency, Good Phase Linearity 0.18 μm CMOS Power Amplifier for MBAN-UWB Applications**
H. Mosalam, A. Gadallah
International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems (IJECEs) **12**(3), 131 (2021)
- (153) **Simulation of Nitrogen Indiffusion and its Impact on Silicon Wafer Strength**
T. Müller, G. Kissinger, D. Kot, M. Gehmlich, M. Boy, A. Vollkopf, A. Sattler, A. Miller
Physica Status Solidi A **210**0210 (2021)
- (154) **High Frequency Magnetic Sheet Materials – Performance Factor Comparisons and Design of Toroidal Inductors Embedded in PCB**
R. Murphy, P. McCloskey, Z. Cao, C. Ó Mathúna, S. O’Driscoll
Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2021), 2897 (2021)
- (155) **Ensuring a Secure Communication between a GCS and a UAV via the MAVlink Protocol**
P. Mykytyn, I. Kabin, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 33rd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (156) **Jamming Detection for IR-UWB Ranging Technology in Autonomous UAV Swarms**
P. Mykytyn, M. Brzozowski, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 9th International Conference on Cyber-Physical Systems and Internet-of-Things (CPSIoT 2021), 81 (2021)

- (157) **Ge(001) Surface Reconstruction with Sn Impurities**
K. Noatschk, E.V.S. Hofmann, J. Dabrowski, N.J. Curson,
T. Schroeder, W.M. Klesse, G. Seibold
Surface Science **713**, 121912 (2021)
- (158) **AC Electric Field Mediated Preparation of Regular Enzyme Arrays and their Functional Characterization**
M. Noffke, Ch. Wenger, F.F. Bier, R. Hölzel
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)
- (159) **Leibniz Strategic Forum on Digital Change**
St. Ortmann, I. Peters, F. Macgilchrist
Leibniz Strategic Forum on Digital Change (2021)
- (160) **Performance Assessment of Amorphous HfO₂-based RRAM Devices for Neuromorphic Applications**
O.G. Ossorio, G. Vinuesa, H. Garcia, B. Sahelices, S. Dueñas,
H. Castan, E. Perez, M.K. Mahadevaiah, Ch. Wenger
Proc. 239th ECS Meeting (2021)
- (161) **Performance Assessment of Amorphous HfO₂-based RRAM Devices for Neuromorphic Applications**
O.G. Ossorio, G. Vinuesa, H. Garcia, B. Sahelices, S. Duenas,
H. Castan, E. Perez, M.K. Mahadevaiah, Ch. Wenger
ECS Transactions **102(2)**, 29 (2021)
- (162) **Performance Assessment of Amorphous HfO₂-Based RRAM Devices for Neuromorphic Applications**
O.G. Ossorio, G. Vinuesa, H. Garcia, B. Sahelices, S. Dueñas,
H. Castan, E. Pérez, M.K. Mahadevaiah, Ch. Wenger
ECS Journal of Solid State Science and Technology **10(8)**, 083002 (2021)
- (163) **A High-Gain SiGe BiCMOS LNA for 5G In-Band Full-Duplex Applications**
T.A. Ozkan, A. Burak, I. Kalyoncu, M. Kaynak, Y. Gurbuz
Proc. 15th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC 2020), 53 (2021)
- (164) **A D-Band Radio Module for Hybrid-Beamforming MIMO Communication and Localization**
G. Panic, N. Maletic, V. Sark, A. Karakuzulu
Proc. 29th Telecommunications Forum (TELFOR 2021), (2021)
- (165) **Design Considerations on the Realization of Signal Sources at mm-Waves**
L. Pantoli, H. Bello, G. Leuzzi, H.J. Ng, D. Kissinger
Proc. 15th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC 2020), 129 (2021)
- (166) **A Versatile, Voltage-Pulse Based Read and Programming Circuit for Multi-Level RRAM Cells**
S. Pechmann, T. Mai, M. Völkel, M.K. Mahadevaiah, E. Perez,
E. Perez-Bosch Quesada, M. Reichenbach, Ch. Wenger, A.
Hagelauer
Electronics (MDPI) **10(5)**, 530 (2021)
- (167) **Graphene-Silicon Device for Visible and Infrared Photodetection**
A. Pelella, A. Grillo, E. Faella, G. Luongo, M.B. Askari,
A. Di Bartolomeo
ACS Applied Materials & Interfaces **13**, 47895 (2021)
- (168) **Advanced Temperature Dependent Statistical Analysis of Forming Voltage Distributions for Three Different HfO₂-Based RRAM Technologies**
E. Perez, D. Maldonado, C. Acal, J.E. Ruiz-Castro, A.M. Aguilera,
F. Jimenez-Molinos, J.B. Roldan, Ch. Wenger
Solid State Electronics **176**, 107961 (2021)
- (169) **Optimization of Multi-Level Operation in RRAM Arrays for In-Memory Computing**
E. Perez, A.J. Perez-Avila, R. Romero-Zaliz, M.K. Mahadevaiah,
E. Perez-Bosch Quesada, J.B. Roldan, F. Jimenez-Molinos,
Ch. Wenger
Electronics (MDPI) **10(9)**, 1084 (2021)
- (170) **Multilevel Memristor based Matrix-Vector Multiplication: Influence of the Discretization Method**
A.J. Perez-Avila, E. Pérez, J.B. Roldan, Ch. Wenger, F. Jimenez-Molinos
Proc. 13th Spanish Conference on Electron Devices (CDE 2021), 66 (2021)
- (171) **Toward Reliable Compact Modeling of Multilevel 1T-1R RRAM Devices for Neuromorphic Systems**
E. Pérez-Bosch Quesada, R. Romero-Zaliz, E. Perez, M.K. Mahadevaiah, J. Reuben, M.A. Schubert, F. Jimenez-Molinos,
J.B. Roldan, Ch. Wenger
Electronics (MDPI) **10(6)**, 645 (2021)
- (172) **Memristive-Based In-Memory Computing: From Device to Large-Scale CMOS Integration**
E. Perez-Bosch Quesada, E. Perez, M.K. Mahadevaiah, Ch. Wenger
Neuromorphic Computing and Engineering **1(2)**, 024006 (2021)
- (173) **Variability and Energy Consumption Tradeoffs in Multilevel Programming of RRAM Arrays**
E. Perez, M.K. Mahadevaiah, E. Perez-Bosch Quesada, Ch. Wenger
IEEE Transactions on Electron Devices **68(6)**, 2693 (2021)
- (174) **Laser Fault Injection Attacks against IHP Chips**
D. Petryk, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 32nd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (175) **Optical Fault Injection Attacks: Single-Mode versus Multi-Mode Laser**
D. Petryk, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. 33rd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (176) **Optical Fault Injection Attacks against Radiation-Hard Registers**
D. Petryk, Z. Dyka, R. Sorge, J. Schäffner, P. Langendörfer
Proc. 24th EUROMICRO Conference on Digital System Design (DSD 2021), Special Session: Architectures and Hardware for Security Applications (AHSA), 371 (2021)
- (177) **Radiation Hardness Does Not Mean Tamper Resistance**
D. Petryk, Z. Dyka, P. Langendörfer
Proc. Design, Automation and Test in Europe Conference (DATE 2021), Workshop on Interdependent Challenges of Reliability, Security and Quality (RESCUE 2021), (2021)

- (178) **Sensitivity of HfO₂-based RRAM Cells to Laser Irradiation**
D. Petryk, Z. Dyka, E. Perez, I. Kabin, J. Katzer, J. Schöffner, P. Langendörfer
Microprocessors and Microsystems **87**, 104376 (2021)
- (179) **Household Energy Management**
P. Powroznik, R. Szulim, W. Miczulski, K. Piotrowski
Applied Sciences **11**(4), 1626 (2021)
- (180) **Experimental and Theoretical Investigation of the Surface Electronic Structure of ZnGa₂O₄(100) Single-Crystals**
F. Reichmann, J. Dabrowski, A.P. Becker, W.M. Klesse, K. Irmscher, R. Schewski, Z. Galazka, M. Mulazzi
Physica Status Solidi B **210**0452 (2021)
- (181) **Radiation and Spontaneous Annealing of Radiation-Sensitive Field-Effect Transistors with Gate Oxide Thicknesses of 400 and 1000 nm**
G. Ristic, M. Andjelkovic, R. Duanne, A. Palma, A. Jaksic
Sensors and Materials **33**(6), 2109 (2021)
- (182) **Radiation Sensitive MOSFETs Irradiated with Various Positive Gate Biases**
G. Ristic, S. Ilic, R. Duanne, M. Andjelkovic, A. Palma, A. Lallena, M. Krstic, S. Stankovic, A. Jaksic
Journal of Radiation Research and Applied Science **14**(1), 353 (2021)
- (183) **Sensitivity of Unbiased Commercial P-Channel Power VDMOSFETs to X-Ray Radiation**
G. Ristic, A. Jevtic, S. Ilic, S. Dimitijevic, S. Veljkovic, A. Palma, S. Stankovic, M. Andjelkovic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 341 (2021)
- (184) **Comparative Analysis and Optimization of the SystemC-AMS Analog Simulation Efficiency of Resistive Crossbar Arrays**
T. Rizzi, E. Pérez-Bosch Quesada, Ch. Wenger, C. Zambelli, D. Bertozzi
Proc. 36th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS 2021), 196 (2021)
- (185) **Study of Quantized Hardware Deep Neural Networks Based on Resistive Switching Devices, Conventional versus Convolutional Approaches**
R. Romero-Zaliz, E. Perez, F. Jimenez-Molinos, Ch. Wenger, J.B. Roldan
Electronics (MDPI) **10**(3), 346 (2021)
- (186) **An Analysis on the Architecture and the Size of Quantized Hardware Neural Networks based on Memristors**
R. Romero-Zaliz, A. Cantudo, E. Perez, F. Jimenez-Molinos, Ch. Wenger, J.B. Roldan
Electronics (MDPI) **10**, 03141 (2021)
- (187) **Influence of Variability on the Performance of HfO₂ Memristor-based Convolutional Neural Networks**
R. Romero-Zaliz, E. Perez, F. Jimenez-Molinos, Ch. Wenger, J.B. Roldan
Solid State Electronics **185**, 108064 (2021)
- (188) **Efficient Ultra-Broadband C-to-O Band Converter Based on Multi-Mode Silicon-on-Insulator Waveguides**
G. Ronniger, I. Sackey, T. Kernetzky, U. Höfler, Ch. Mai, C. Schubert, N. Hanik, L. Zimmermann, R. Freund, K. Petermann
Proc. 47th European Conference on Optical Communications (ECOC 2021), (2021)
- (189) **A Portable Terahertz/Millimeter-Wave Spectrometer based on SiGe BiCMOS Technology for Gas Sensing Applications**
N. Rothbart, K. Schmalz, H.-W. Hübers
Proc. 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020), (2021)
- (190) **Synthesis of a Tunable Ring Filter: Proof-of-Concept with Fixed Implementations at D-Band**
P. Rynkiewicz, A.-L. Franc, F. Coccetti, M. Wietstruck, M. Kaynak, G. Prigent
International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering **31**(9), e22761 (2021)
- (191) **Incremental Code Updates Exploitation as a Basis for Return Oriented Programming Attacks on Resource-Constrained Devices**
A. Saad, K. Lehniger, P. Langendörfer
Proc. 5th Cyber Security in Networking Conference (CSNet 2021), (2021)
- (192) **Reliable Technology Evaluation of SiGe HBTs and MOSFETs: f_{MAX} Estimation from Measured Data**
B. Saha, S. Fregonese, B. Heinemann, P. Scheer, P. Chevalier, K. Aufinger, A. Chakravorty, T. Zimmer
IEEE Electron Device Letters **42**(1), 14 (2021)
- (193) **Classification of Space Particle Events using Supervised Machine Learning Algorithms**
R. Saric, J.-C. Chen, M. Krstic, E. Custovic, G. Panic, J. Kevric, D. Jokic
Proc. 8th IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA 2021), (2021)
- (194) **Raman Shifts in MBE-Grown Si_xGe_{1-x-y}Sn_y Alloys with Large Si Content**
J. Schlipf, H. Tetzner, D. Spirito, C.L. Manganelli, G. Capellini, M.R.S. Huang, C.T. Koch, C.J. Clausen, A. Elsayed, M. Oehme, S. Chiussi, J. Schulze, I.A. Fischer
Journal of Raman Spectroscopy **52**(6), 1167 (2021)
- (195) **Dual-Band Transmitter and Receiver with Bowtie-Antenna in 0.13 μm SiGe BiCMOS for Gas Spectroscopy at 222-270 GHz**
K. Schmalz, N. Rothbart, A. Glück, M.H. Eissa, T. Mausolf, E. Turkmen, S.B. Yilmaz, H.-W. Hübers
IEEE Access **9**, 124805 (2021)
- (196) **Radiation-Hardness-by-Design Latch-based Triple Modular Redundancy Flip-Flops**
O. Schrape, A. Breitenreiter, C. Schulze, St. Zeidler, M. Krstic
Proc. 12th IEEE Latin America Symposium on Circuits and System (LASCAS 2021), (2021)

- (197) **Design and Evaluation of Radiation-Hardened Standard Cell Flip-Flops**
O. Schrape, M. Andjelkovic, A. Breitenreiter, St. Zeidler, A. Balashov, M. Krstic
IEEE Transactions on Circuits and Systems I
- (198) **Mit konventioneller Technologie zum strahlungsharten AMS-Design**
O. Schrape, A. Breitenreiter, L. Lu, E.P. Garcia, M. Krstic
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 47 (2021)
- (199) **Utilizing Beamsteering at Millimeter Waves for Indoor Object and Room Geometry Detection**
E. Sedunova, N. Maletic, L. Wimmer, D. Cvetkovski, E. Grass, B. Lankl
Proc. 4th IEEE 5G World Forum (5GWF 2021), 340 (2021)
- (200) **Power Efficiency Improvements in Coherent O-Band Data Center Interconnects**
P.M. Seiler, L. Zimmermann
Proc. Photonics in Switching and Computing (PSC 2021), Tu4C.3 (2021)
- (201) **Towards Coherent O-Band Data Center Interconnects**
P.M. Seiler, G. Georgieva, G. Winzer, A. Peczek, K. Voigt, St. Lischke, A. Fatemi, L. Zimmermann
Frontiers of Optoelectronics (2021)
- (202) **Ultra-Wideband Silicon Photonic BiCMOS Coherent Receiver for O- and C-Band**
P.M. Seiler, K. Voigt, St. Lischke, A. Malignaggi, L. Zimmermann
Proc. 47th European Conference on Optical Communications (ECOC 2021), (2021)
- (203) **Octopuses: Biological Facts and Technical Solutions**
O. Shamilyan, I. Kabin, Z. Dyka, M. Kuba, P. Langendörfer
Proc. 9th International Conference on Cyber-Physical Systems and Internet-of-Things (CPS&IoT 2021), 91 (2021)
- (204) **Single Event Transients Generation and Propagation Flow using Commercial EDA Tools**
S. Simoglou, C. Georgakidis, I. Lilitsis, C. Sotiriou, M. Andjelkovic, M. Krstic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 333 (2021)
- (205) **JICG CMOS Transistors for Reduction of Total Ionizing Dose and Single Event Effects in a 130 nm Bulk SiGe BiCMOS Technology**
R. Sorge, J. Schmidt, Ch. Wipf, F. Reimer, F. Teply, F. Korndörfer
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **987**, 164832 (2021)
- (206) **Cryptographic ICs: Simulation of Electromagnetic Radiation**
A. Sosa, Z. Dyka, I. Kabin, P. Langendörfer
Proc. 33rd Crypto-Day Matters 2021, (2021)
- (207) **Simulation of Electromagnetic Emanation of Cryptographic ICs: Tools, Methods, Problems**
A. Sosa, Z. Dyka, I. Kabin, P. Langendörfer
Proc. 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2021), 12 (2021)
- (208) **The H2020-SPACE-SIPHODIAS Project: Space-Grade Opto-Electronic Interfaces for Photonic Digital and Analogue Very-High-Throughput Satellite Payloads**
I. Sourikopoulos, L. Stampoulidis, S. Giannakopoulos, H. Zirath, P. Ostrovskyy, G. Fischer, M. Faugeron, A. Maho, L. Cyrille, G. Bouisset, N. Venet, M. Sotom, M. Irion, F. Schaub, J.Barbero, D. Lopez, R.G. Walker, Y. Zhou, I. Oxtoby, S. Duffy
Proc. SPIE International Conference on Space Optics (ICSO 2021), **11852**, 1185254 (2021)
- (209) **Application of Transimpedance Amplifiers in PIN Photodiode Dosimetry**
L. Spahic, S. Ilic, M. Andjelkovic, A. Palma, G. Ristic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 317 (2021)
- (210) **Modelling Photodetection at the Graphene/Ag₂S Interface**
D. Spirito, B. Martín-García, V. Miseikis, C. Coletti, F. Bonaccorso, R. Krahne
Physica Status Solidi - Rapid Research Letters **15**(6), 2100120 (2021)
- (211) **Thermoelectric Efficiency of Epitaxial GeSn Alloys for Integrated Si-based Applications: Assessing the Lattice Thermal Conductivity by Raman Thermometry**
D. Spirito, N. von den Driesch, C.L. Manganelli, M.H. Zöllner, A.A. Corley-Wiciak, Z. Ikonik, T. Stoica, D. Grützmacher, D. Buca, G. Capellini
ACS Applied Energy Materials **4**(7), 7385 (2021)
- (212) **Silicon Systems for Wireless LAN**
Z. Stamenkovic, H. Aziza, E. Sanchez, A. Bosio
Proc. 24th IEEE International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2021), 157 (2021)
- (213) **The H2020-SPACE-ORIONAS Project: "Lasercom-on-Chip" for High-Speed Satellite Constellation Interconnectivity**
L. Stampoulidis, A. Osman, I. Sourikopoulos, G. Winzer, L. Zimmermann, A. Maho, M. Faugeron, M. Sotom, F. Caccavale, A. Serrano Rodrigo, M. Chiesa, D. Rotta, G.B. Preve, J. Edmunds, M. Welch, E. Kehayas, W. Dorward, F. Duport, R. Costa, D. Mesquita, L. Stampoulidis
Proc. SPIE International Conference on Space Optics (ICSO 2021), **11852**, 118521L (2021)
- (214) **AC Field Assisted Deposition of Influenza Viruses on Nanoelectrodes**
S. Stanke, Ch. Wenger, F.F. Bier, R. Hölzel
Proc. 3rd European BioSensor Symposium (EBS 2021), abstr. (2021)

- (215) **THz Intersubband Electroluminescence from N-Type Ge/SiGe Quantum Cascade Structures**
D. Stark, M. Mirza, L. Persichetti, M. Montanari, S. Markmann, M. Beck, T. Grange, S. Birner, M. Virgilio, C. Ciano, M. Ortolani, C. Corley, G. Capellini, L. Di Gaspare, M. De Seta, D.J. Paul, J. Faist, G. Scalari
Applied Physics Letters **118**(10), 101101 (2021)
- (216) **Terahertz Intersubband Electroluminescence from N-Type Germanium Quantum Wells**
D. Stark, M. Mirza, L. Persichetti, M. Montanari, S. Markmann, M. Beck, T. Grange, S. Birner, M. Virgilio, C. Ciano, M. Ortolani, C. Corley-Wiciak, G. Capellini, L. Di Gaspare, M. De Seta, D.J. Paul, J. Faist, G. Scalari
Proc. Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and the European Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-EQEC 2021), (2021)
- (217) **Silicon-Organic Hybrid Photonics: An Overview of Recent Advances, Electro-Optical Effects and CMOS-Integration Concepts**
P. Steglich, Ch. Mai, C. Villringer, B. Dietzel, S. Bondarenko, V. Ksianzou, F. Villasmunta, C. Zesch, S. Pulwer, M. Burger, J. Bauer, F. Heinrich, S. Schrader, F. Vitale, F. De Matteis, P. Proposito, M. Casalboni, A. Mai
Journal of Physics: Photonics **3**(2), 022009 (2021)
- (218) **Defining Sensitivity of Integrated Optical Biosensors: A Multidisciplinary Lesson Approach**
P. Steglich
Proc. Education and Training in Optics and Photonics Conference (ETOP 2021), Th3A.7 (2021)
- (219) **Optische Biosensoren: Neues Analyseverfahren ermöglicht schnellere Therapieentscheidungen**
P. Steglich
kma : Klinikmanagement Aktuell **26**(11), 60 (2021)
- (220) **A Monolithically Integrated Microfluidic Channel in a Silicon-based Photonic-Integrated-Circuit Technology for Biochemical Sensing**
P. Steglich, M. Paul, Ch. Mai, A. Böhme, S. Bondarenko, M.G. Weller, A. Mai
Proc. SPIE Optical Sensors (2021), **11772**, 1177206 (2021)
- (221) **Analysis of BTO-on-Si-Waveguides for Energy-Efficient Electro-Optical Modulators**
P. Steglich, A. Mai
Proc. SPIE Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI (2021), **11775**, 117750L (2021)
- (222) **Silicon Photonic Micro-Ring Resonators for Chemical and Biological Sensing: A Tutorial**
P. Steglich, D.G. Rabus, C. Sada, M. Paul, M.G. Weller, Ch. Mai, A. Mai
IEEE Sensors Journal (2021)
- (223) **A V-Band Low-Power Compact LNA in 130-nm SiGe BiCMOS Technology**
B. Sütbas, H.J. Ng, J. Wessel, A. Koelpin, G. Kahmen
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **31**(5), 497 (2021)
- (224) **Accurate Isolation Networks in Quadrature Couplers and Power Dividers**
B. Sütbas, E. Ozbay, A. Atalar
IEEE Transactions on Circuits and Systems II **68**(4), 1148 (2021)
- (225) **Fault Analysis of Homogeneously and Heterogeneously Quantized Deep Neural Networks**
R.T. Syed, M. Ulbricht, M. Krstic
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 55 (2021)
- (226) **Fault Resilience Analysis of Quantized Deep Neural Networks**
R.T. Syed, M. Ulbricht, K. Piotrowski, M. Krstic
Proc. 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), 275 (2021)
- (227) **Immunität eingebetteter verteilter Systeme gegen ROP-Angriffe durch Mutationen**
P. Tabatt, M. Schölzel, K. Lehniger
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 45 (2021)
- (228) **CMOS-Compatible Bias-Tunable Dual-Band Detector based on GeSn/Ge/Si Coupled Photodiodes**
E. Talamas Simola, V. Kiyek, A. Ballabio, V. Schlykow, J. Frigerio, C. Zucchetti, A. De Iacovo, L. Colace, Y. Yamamoto, G. Capellini, D. Grützmacher, D. Buca, G. Isella
ACS Photonics **8**(7), 2166 (2021)
- (229) **Analog 2:1 Multiplexer with over 110 GHz Bandwidth in SiGe BiCMOS Technology**
T. Tannert, M. Grözing, M. Berroth, C. Schmidt, J. H. Choi, C. Caspar, J. Schostak, V. Jungnickel, R. Freund, H. Rücker
Proc. IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2021), (2021)
- (230) **Current Leakage Mechanisms Related to Threading Dislocations in Ge-Rich SiGe Heterostructures Grown on Si(001)**
H. Tetzner, I.A. Fischer, O. Skibitzki, M.M. Mirza, C.L. Manganelli, G. Luongo, D. Spirito, D.J. Paul, M. De Seta, G. Capellini
Applied Physics Letters **119**(15), 153504 (2021)
- (231) **A Time-of-Flight based Localization Option for 5 GHz Wireless LAN**
K. Tittelbach-Helmrich, St. Zeidler
Proc. 25. ITG Fachtagung Mobilkommunikation - Technologien und Anwendungen, 69 (2021)
- (232) **Digital DC Blocker Filters**
K. Tittelbach-Helmrich
Frequenz: Journal of RF-Engineering and Telecommunications **75**(9-10), 331 (2021)
- (233) **MAC Layer Beamforming: Rate Loss Due to Beam Cusping**
K. Tiwari, D. Laurenson, E. Grass, J. Thompson, I. Ndip, M. Kaiser
Proc. 94th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2021), (2021)

- (234) **Designs Break Bandwidth Record**
U. Troppenz, J. Kreißl
Nature Photonics **15**, 4 (2021)
- (235) **A Framework to Support Creation of AI Applications for Low-Power WSN Nodes**
K. Turchan, K. Piotrowski
Proc. 8th Machine Intelligence and Digital Interaction (MIDI 2020), in: Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, AISC **1376**, 73 (2021)
- (236) **Design and Implementation Strategy of Adaptive Processor-Based Systems for Error Resilient and Power-Efficient Operation**
M. Veleski, M. Hübner, M. Krstic, R. Kraemer
Proc. 24th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2021), 57 (2021)
- (237) **Towards Error Resilient and Power-Efficient Adaptive Multiprocessor System using Highly Configurable and Flexible Cross-Layer Framework**
M. Veleski, M. Hübner, M. Krstic, R. Kraemer
Proc. 27th IEEE International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS 2021), (2021)
- (238) **Assessing the Configuration Space of the Open Source NVDLA Deep Learning Accelerator on a Mainstream MPSoC Platform**
A. Veronesi, D. Bertozzi, M. Krstic
Proc. 28th IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC 2020), in: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, IFIP AICT **621**, 87 (2021)
- (239) **Numerical Simulation of Optical Through-Silicon Waveguide for 3D Photonic Interconnections**
F. Villasmunta, P. Steglich, S. Schrader, H. Schenk, A. Mai
Proc. International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD 2021), 115 (2021)
- (240) **Electro-Optical Properties of Doped Polymers with High Transparency in the Visible Wavelength Range**
C. Villringer, P. Steglich, S. Pulwer, S. Schrader, J. Laufer
Optical Materials Express **11**(11), 3801 (2021)
- (241) **Resilience in the Cyberworld: Definitions, Features and Models**
E. Vogel, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
Future Internet **13**(11)
- (242) **Resilience in the Cyber World: Definitions, Features and Models**
E. Vogel, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
zu finden unter: <https://arxiv.org/abs/2105.10235>
- (243) **Quantitative Scanning Microwave Microscopy of Few-Layer Platinum Diselenide**
X. Wang, K. Xiong, L. Li, J.C.M. Hwang, X. Jin, G. Fabi, M. Farina, O. Hartwig, M. Prechtel, G.S. Düsberg, A. Göritz, M. Wietstruck, M. Kaynak
Proc. 50th European Microwave Conference (EuMC 2020), 987 (2021)
- (244) **240-GHz Reflectometer-Based Dielectric Sensor with Integrated Transducers in a 130-nm SiGe BiCMOS Technology**
D. Wang, M.H. Eissa, K. Schmalz, T. Kämpfe, D. Kissinger
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **69**(1), 1027 (2021)
- (245) **An Experimental Load-Pull Based Large-Signal RF Reliability Study of SiGe HBTs**
C. Weimer, P. Sakalas, M. Müller, G.G. Fischer, M. Schröter
Proc. IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2021)
- (246) **Behavioral Model of Dot-Product Engine Implemented with 1T1R Memristor Crossbar Including Assessment**
J. Wen, M. Ulbricht, E. Perez, X. Fan, M. Krstic
Proc. 24th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2021), 29 (2021)
- (247) **Behavioral Simulation of Dot-Product Engine Implemented with 1T1R Memristor Crossbar Including Assessment**
J. Wen, M. Ulbricht, X. Fan, M. Krstic
Proc. 33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), 59 (2021)
- (248) **BiCMOS Through-Silicon Via (TSV) Signal Transition at 240/300 GHz for MM-Wave & Sub-THz Packaging and Heterogeneous Integration**
M. Wietstruck, St. Marschmeyer, Ch. Wipf, M. Stocchi, M. Kaynak
Proc. 50th European Microwave Conference (EuMC 2020), 244 (2021)
- (249) **High-Frequency Tellurene MOSFETs with Biased Contacts**
K. Xiong, G. Qiu, Y. Wang, L. Li, A. Göritz, M. Lisker, M. Wietstruck, M. Kaynak, W. Wu, P.D. Ye, A. Madjar, J.C.M. Hwang
Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2021), 319 (2021)
- (250) **Threading Dislocation Reduction of Ge by Introducing a SiGe/Ge Superlattice**
Y. Yamamoto, C. Corley, M.A. Schubert, M.H. Zoellner, B. Tillack
ECS Journal of Solid State Science and Technology **10**(3), 034005 (2021)
- (251) **Emerging Terahertz Integrated Systems in Silicon**
X. Yi, C. Wang, Z. Hu, J. Holloway, M.I.W. Khan, M.I. Ibrahim, M. Kim, G.C. Dogiamis, B. Perkins, M. Kaynak, R.T. Yazicigil, A.P. Chandrakassan, R. Han
IEEE Transactions on Circuits and Systems I **68**(9), 3537 (2021)
- (252) **A Nonlinear Resistive Switching Behaviors of Ni/HfO₂/TiN Memory Structures for Self-rectifying Resistive Switching Memory**
M.J. Yun, D. Lee, S. Kim, Ch. Wenger, H.-D. Kim
Materials Characterization **182**, 111578 (2021)
- (253) **Vibration Analysis of a Wind Turbine Gearbox for Off-Cloud Health Monitoring through Neuromorphic-Computing**
P.S. Zarrin, C. Martin, P. Langendörfer, Ch. Wenger, M. Diaz
Proc. 42th International Conference on Information Systems (ICIS 2021), (2021)

- (254) **Vibration Analysis of a Wind Turbine Gearbox for Off-Cloud Health Monitoring through Neuromorphic-Computing**
P.S. Zarrin, C. Martin, P. Langendörfer, Ch. Wenger, M. Diaz
Proc. 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2021), (2021)
- (255) **Multi-Target Vital Signs Remote Monitoring using mmWave FMCW Radar**
Y. Zhao, V. Sark, M. Krstic, E. Grass
Proc. Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW 2021), 290 (2021)
- (256) **SiGe HBTs and BiCMOS Technology for Present and Future Millimeter-Wave Systems**
T. Zimmer, J. Böck, F. Buchali, P. Chevalier, M. Collisi, B. Debaillie, M. Deng, P. Ferrari, S. Fregonese, C. Gaquiere, H. Ghanem, H. Hettrich, A. Karakuzulu, T. Maiwald, M. Margalef-Rovira, C. Maye, M. Möller, A. Mukherjee, H. Rücker, P. Sakalas, R. Schmid, K. Schneider, K. Schuh, W. Templ, A. Visweswaran, T. Zwick
IEEE Journal of Microwaves **1**(1), 288 (2021)

Eingeladene Vorträge

Invited Presentations

- (1) **Physical Attacks through Chip Backside: Threats, Challenges and Opportunities**
E. Amini, C. Boit, E. Amini, K. Bartelsy, M. Eggert, N. Herfurth, T. Kiyan, T. Krachenfels, J.-P. Seifert, S. Tajik
39th Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Symposia 2021), San Diego, April 25 - 28, 2021, USA
- (2) **Characterization of SET Effects in Electronic Integrated Circuits and Systems**
M. Andjelkovic, Z. Stamenkovic
3rd ELICSIR Workshop - Fault-tolerant Electronics for Radiation Environments (2021), online, November 17 - 18, 2021, Germany
- (3) **5G Research and Development at IHP**
E. Grass, N. Maletic, J. Gutierrez Teran, V. Sark, M. Ehrig
5G Campusnetze in Brandenburg/Sachsen (2021), online, February 25, 2021, Germany
- (4) **Multiphysics Simulations in Semiconductor Materials Research at IHP**
G. Kissinger, C.L. Manganelli
COMSOL Day: Semiconductor (2021), online, May 27, 2021, The Netherlands
- (5) **Precipitation of Suboxides in Silicon**
G. Kissinger, D. Kot, A. Huber, R. Kretschmer, T. Müller, A. Sattler
239th ECS Spring Meeting: High Purity and High Mobility Semiconductors (ECS Meeting 2021), Pennington, May 30 - June 03, 2021, USA
- (6) **Cross-Layer Digital Design Flow for Space Applications**
M. Krstic, M. Andjelkovic, O. Schrape, A. Breitenreiter, J.-C. Chen, A. Balashov, A. Simevski
32nd International Conference on Microelectronics (MIEL 2021), Nis, September 12 - 14, 2021, Serbia
- (7) **MORAL -Export-Free Rad-Hard Microcontroller for Space Applications**
F.A. Kuentzer
3rd ELICSIR Workshop - Fault-tolerant Electronics for Radiation Environments (2021), online, November 17 - 18, 2021, Germany
- (8) **SmartRiver: Intelligentes Odergebiet**
P. Langendörfer, K. Piotrowski
4. Etappe der Tour de Brandenburg – Digitalisierung in Frankfurt (Oder) erleben! (2020), Frankfurt (Oder), January 20, 2021, Germany
- (9) **Waveguide-Coupled Ge Photodiodes with 3-dB Bandwidth ≥ 110 GHz**
St. Lischke, A. Peczek, D. Steckler, F. Korndörfer, Ch. Mai, L. Zimmermann
IEEE Photonics Conference (IPC 2021), Vancouver, October 18 - 21, 2021, Canada
- (10) **Towards Integration of Graphene in 200 mm Pilot Line**
M. Lukosius
BTU Summer School "Characterization of Micro- and Nano-Materials" (2021), Cottbus-Senftenberg, September 13 - 17, 2021, Germany
- (11) **Graphene in 200 mm Pilot Line**
M. Lukosius, M. Lisker, R. Lukose, M. Elviretti, G. Luongo, A. Mai, Ch. Wenger
6th Edition of the European Graphene Forum (2021), Milan, October 20 - 22, 2021, Italy
- (12) **Research of Graphene in 200 mm Pilot Line: From Theory to Devices**
M. Lukosius, M. Lisker, R. Lukose, J. Dabrowski, M. Elviretti, F. Akhtar, G. Luongo, G. Dziallas, C.A. Chavarin, G. Lippert, A. Mai, Ch. Wenger
Graphene Korea (2021), online, May 26 - 28, 2021, South Korea
- (13) **High Performance SiGe-Technologies for mm-Wave and Photonic Applications**
A. Mai, H. Rücker, B. Heinemann, L. Zimmermann, St. Lischke, P. Steglich, Ch. Mai
Photonic Days Berlin/Brandenburg (OptecBB 2021), Berlin, October 04 - 07, 2021, Germany

- (14) **Si-Photonic Biosensors for Rapid Point-of-Care Diagnostic**
A. Mai, P. Steglich
Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. Workshop (EFDS 2021 – VAKUUM & PLASMA), Dresden, October 12 - 14, 2021, Germany
- (15) **5G-Enabled Real-Time Communications for Tactile Internet**
N.A. Odhah
Global 5G Evolution (2021), online, February 09, 2021, Germany
- (16) **Introduction to IHP Semiconductor Technology and Digital Design Flow**
G. Panic
IEEE Lecture 2021 (2021), online, May 27, 2021, North Macedonia
- (17) **Towards Neuromorphic Networks with Synaptic-Like Memristive Devices**
E. Perez, M.K. Mahadevaiah, E. Pérez-Bosch Quesada, P.S. Zarrin, Ch. Wenger
E-MRS Spring Meeting (2021), Strasbourg, May 31 - June 04, 2021, France
- (18) **Flash Lamp Annealing: History, Evolution and Applications Especially for Worldwide Fastest SiGe HBT**
A. Scheit
23rd International Conference on Ion Implantation Technology (IIT 2020), San Diego, September 12 - 16, 2021, USA
- (19) **Cost-Effective Fabrication and Packaging of Disposable Photonic Biosensors**
P. Steglich, A. Mai
Photonic Days Berlin 2021, Berlin, October 04 - 07, 2021, Germany
- (20) **Vor-Ort-Analysen mittels photonisch integrierten Schaltkreisen**
P. Steglich, IHP—Leibniz-Institut für Innovative Mikroelektronik, Im Technologiepark, Frankfurt (Oder), Germany Technische Hochschule Wildau, Germany
Leibniz HealthTech-Lecture, September 27, 2021, Germany
- (21) **Fault Analysis of Homogeneously and Heterogeneously Quantized Deep Neural Networks**
R.T. Syed, M. Ulbricht, M. Krstic
33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021), Erfurt, February 21 - 23, 2021, Germany
- (22) **Brain-based Inspiration: Towards Neuromorphic Computing with Memristive Devices**
Ch. Wenger, M.K. Mahadevaiah, T. Rizzi, E. Perez-Bosch Quesada, E. Perez
10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER 2021), online, May 04 - 06, 2021, Germany
- (23) **Brain-based Inspiration: Towards Neuromorphic Computing with Memristive Devices**
Ch. Wenger
8th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG 2021), online, July 14 - 16, 2021, Turkey
- (24) **CMOS Integrated Memristive Synapses for Neural Networks**
Ch. Wenger
E-MRS Spring Meeting (2021), Strasbourg, May 31 - June 04, 2021, France
- (25) **Medizintechnische Aktivitäten am IHP**
Ch. Wenger
Medizinisch Psychologische Gesellschaft der Medizinischen Hochschule Brandenburg, Brandenburg an der Havel, August 10, 2021, Germany
- (26) **Engineering of Lanthanum Perovskite Thin Films for Magnetic Sensors Applications**
N. Zorauskiene, V. Stankevic, S. Kersulis, V. Plausinaitiene, R. Lukose, S. Balevicius, S. Tamulevicius
IWAMO - 2nd International Workshop on advanced Magnetic Oxides 2021
- (27) **Magneto-resistive Properties of Advanced Nanostructures based on Graphene and Lanthanum Perovskite Films for High magnetic Field Sensors Applications**
N. Zorauskiene, R. Lukose, S. Kersulis, V. Stankevic, M. Vagner, V. Plausinaitiene, S. Balevicius
2nd International Conference on Nanomaterials, Nanofabrication and Nanocharacterisation (NANOMACH 2021)

Berichte

Reports

- (1) **Auf die Mitarbeitenden kommt es an: Die drei Bs der Informationssicherheit – Bewusstsein, Befähigung, Befolgung**
E. Hermann
Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Cottbus
- (2) **Vibration Analysis of a Wind Turbine Gearbox for Off-cloud Health Monitoring through Neuromorphic-computing**
P.S. Zarrin
Young Researcher Exchange Program between IHP and Embedded Real-Time Systems (ERTIS), Group of the Department of Languages and Computer Science of the University of Malaga (2021)
- (3) **GaN on Si Metrology & Research Activity by IHP**
M.H. Zoellner
Interim Report
- (4) **GaN on Si Metrology & Research Activity by IHP**
M.H. Zoellner
Final Report

Monographien

Monographs

- (1) **Proceedings of 27th IEEE International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems (ASYNC 2021)**
G. Dimou, M. Krstic
IEEE, (2021)
- (2) **Proceedings of 24th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2021)**
L. Sekanina, M. Krstic, M. Shafique, A. Steininger, G. Stojanovic
Proceedings of 24th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2021)
- (3) **Photonics Explained Simply: How Light Revolutionizes the Industry**
P. Steglich, K. Heise
Springer, (2021)

Habilitationen/Dissertationen

Habilitations/Dissertations

- (1) **Graphene Synthesis under Si-CMOS Compatible Conditions**
F. Akhtar
Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (2) **A Methodology for Characterization, Modeling and Mitigation of Single Event Transient Effects in CMOS Standard Combinational Cells**
M. Andjelkovic
Dissertation, Universität Potsdam, Germany (2021)
- (3) **High-Throughput QC-LDPC Codes for Next-Generation Wireless Communication Systems**
A. Hasani
Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (4) **Chemistry and Structural Properties of Adsorbates on Germanium for Optoelectronics and Quantum computing**
E.V.S. Hofmann
Dissertation, University College, London, UK, (2021)
- (5) **Functional Diversification of SiGe-BiCMOS Technologies by High Frequency and Photonic Module Integration**
A. Mai
Habilitation, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (6) **Dielectrophoretic Manipulation of Yeast Cells using CMOS Integrated Microfluidic**
H. Matbaechi Ettehad
Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (7) **Untersuchung der Auswirkung von Layout Varianten von Beschleunigern für kryptographische Operationen auf Seitenkanäle**
Ch. Wittke
Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (8) **Permittivity Biosensor for the Recognition of Saliva Samples of COPD Patients using Neuromorphic-based Machine Learning**
P.S. Zarrin
Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)

Diplomarbeiten/Masterarbeiten/Bachelorarbeiten

Diploma Theses/Master Theses/Bachelor Theses

- (1) **Lab-on-a-Chip System for the Separation of Blood Cells Using the Dielectrophoresis Effect**
M. Emmerich
Master Thesis, TU Berlin, Germany, (2021)
- (2) **Determining Distributions of Security Solutions for Wireless Sensor Networks based on the Model of a Neighbourhood Watch**
B. Förster
Master Thesis, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)

- (3) **Power Detectors for Sub-THz Front-Ends**
C. Herold
Master Thesis, Technische Universität Berlin, Germany, (2021)
- (4) **Echtzeitfähige Erkennung von Freezing of Gait bei Parkinson Patienten mithilfe FPGA basierter Inferenz von neuronalen Netzen**
P. Langer
Master Thesis, Technische Universität Ilmenau, Germany, (2021)
- (5) **Computergestützte Molekularstrahlepitaxie eines spannungsangepassten Mehrschichtsystems**
J. Rauscher
Bachelor Thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany, (2021)
- (6) **Work-Life Balance Initiatives and their Influence on the Career Development of Women**
M. Rohner
Master Thesis, University of Vaasa, Finland, (2021)
- (7) **Incremental Code Updates as a Basis for Return Oriented Programming Attacks on Resource-Constrained Devices**
A. Saad
Master Thesis, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany, (2021)
- (8) **Project and Design of a Q-Flop Cell Targeting IHP's 130 nm Technology**
M.Z. Syed
Bachelor Thesis, TU Berlin, (2021)
- (9) **Implementation of the Intelligent Object Recognition System**
K. Woloszyn
Master Thesis, University of Zielona Góra, Poland, (2021)

Patente

Patents

- (1) **Clock and Data Recovery Circuit from an N-Pulse Amplitude Modulation Signal**
A. Fatemi, A. Malignaggi
IHP.518, EP-Patentanmeldung am 13.12.2021, AZ: EP 21 214 163.4
- (2) **Switchable Combiner and/or Splitter Circuit Comprising Wilkinson Elements**
A. Franzese, A. Malignaggi
IHP.517, EP-Patentanmeldung am 19.08.2021, AZ: EP 21 192 211.7
- (3) **Verfahren zur Herstellung von Bipolartransistoren mit nichtselektiver Basisepitaxie**
B. Heinemann, H. Rücker
IHP.524, EP-Patentanmeldung am 16.12.2021, AZ: EP 21215189.8
- (4) **Semiconductor Device with Back Side Protection Mechanism**
N. Herfurth, M. Lisker, E. Amini, Ch. Boit, J.-P. Seifert
IHP.511, EP-Patentanmeldung am 06.05.2021, AZ: EP 21 172 601.3
- (5) **Dummy Partial Multiplication of Zerooperands as a Low-Cost Means for reducing the Success of SCA Attacks Against ECC**
I. Kabin, Z. Dyka, D. Klann, P. Langendörfer
IHP.520, EP-Patentanmeldung am 28.12.2021, AZ: EP21217968.3
- (6) **Method for Annealing Bonded Wafers**
P. Krüger, T. Voß, M. Wietstruck
IHP.522, EP-Patentanmeldung am 27.07.2021, AZ: EP 21 187 959.8
- (7) **Method for Producing an Electrooptical Phase Shifter based on Ferroelectric Materials**
A. Mai, P. Steglich, Ch. Mai
IHP.497, EP-Patentanmeldung am 02.02.2021, AZ: EP 21 154 808.6
- (8) **Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium und Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium**
T. Müller, M. Gehmlich, M. Boy, G. Kissinger, D. Kot
IHP.514, EP-Patentanmeldung am 16.09.2021, AZ: EP 21 197 148.6
- (9) **Refractive Index Sensor Device**
D. Spirito, Ch. Mai, I.A. Fischer, S. Reiter
IHP.523, EP-Patentanmeldung am 11.11.2021, AZ: EP 21 207 842.2
- (10) **Integrated Optical Waveguide**
P. Steglich, Ch. Mai, A. Mai, F. Villasmunta, C. Villringer, S. Schrader
IHP.510, EP-Patentanmeldung am 27.04.2021, AZ: EP 21 170 747.6
- (11) **Integrated Optoelectronic Device with Optical Interconnect Structure for Improved BEOL Device Integration**
K. Voigt, L. Zimmermann, A. Mai, Ch. Mai
IHP.513, EP-Patentanmeldung am 08.06.2021, AZ: EP 21 178 302.2
- (12) **Fan-Out Wafer-Level Package**
M. Wietstruck, G. Kahmen, T. Voß, P. Krüger, M. Stocchi
IHP.515, EP-Patentanmeldung am 15.12.2021, AZ: EP 21 214 621.1

Wegbeschreibung zum IHP

Directions to IHP

Per Flugzeug

Vom Flughafen Berlin-Brandenburg (BER) mit dem Regional-Express RE7 (aus Dessau in Richtung Berlin Hauptbahnhof) bis Haltestelle Berlin Ostkreuz. Weiter mit Regional-Express RE1 Richtung: Frankfurt (Oder) bis Haltestelle Frankfurt (Oder) Bahnhof. Weiter mit der Straßenbahn STR 3 oder 4 (je nach Zeitplan) Richtung Markendorf bis Haltestelle Technologiepark, Fußweg 7 min bis IHP (Gesamtdauer: 1h 43 min).

Per Bahn

Von den Berliner Bahnhöfen Zoologischer Garten, Hauptbahnhof, Friedrichstraße, Alexanderplatz, Ostkreuz oder Ostbahnhof mit dem Regional Express RE 1 bis Frankfurt (Oder).

Per Auto

Über den Berliner Ring auf die Autobahn A 12 in Richtung Frankfurt (Oder)/Warschau; Abfahrt Frankfurt (Oder)-West, an der Ampel links in Richtung Beeskow und dem Wegweiser „Technologiepark“ folgen.

Per Straßenbahn in Frankfurt (Oder)

Ab Frankfurt (Oder) Bahnhof mit der Linie 4 in Richtung Markendorf Ort bis Haltestelle Technologiepark (13 Minuten).

By plane

From the airport Berlin-Brandenburg (BER) with the regional express RE7 direction: Dessau HbF to stop Berlin Ostkreuz. Continue with Regional-Express RE1 direction: Frankfurt (Oder) to stop Frankfurt (Oder) Bahnhof. Continue with Tram STR 3 or 4 (depending on schedule) direction: Markendorf to stop: Technologiepark, walk 7 min to IHP (total time: 1h 43 min).

By train

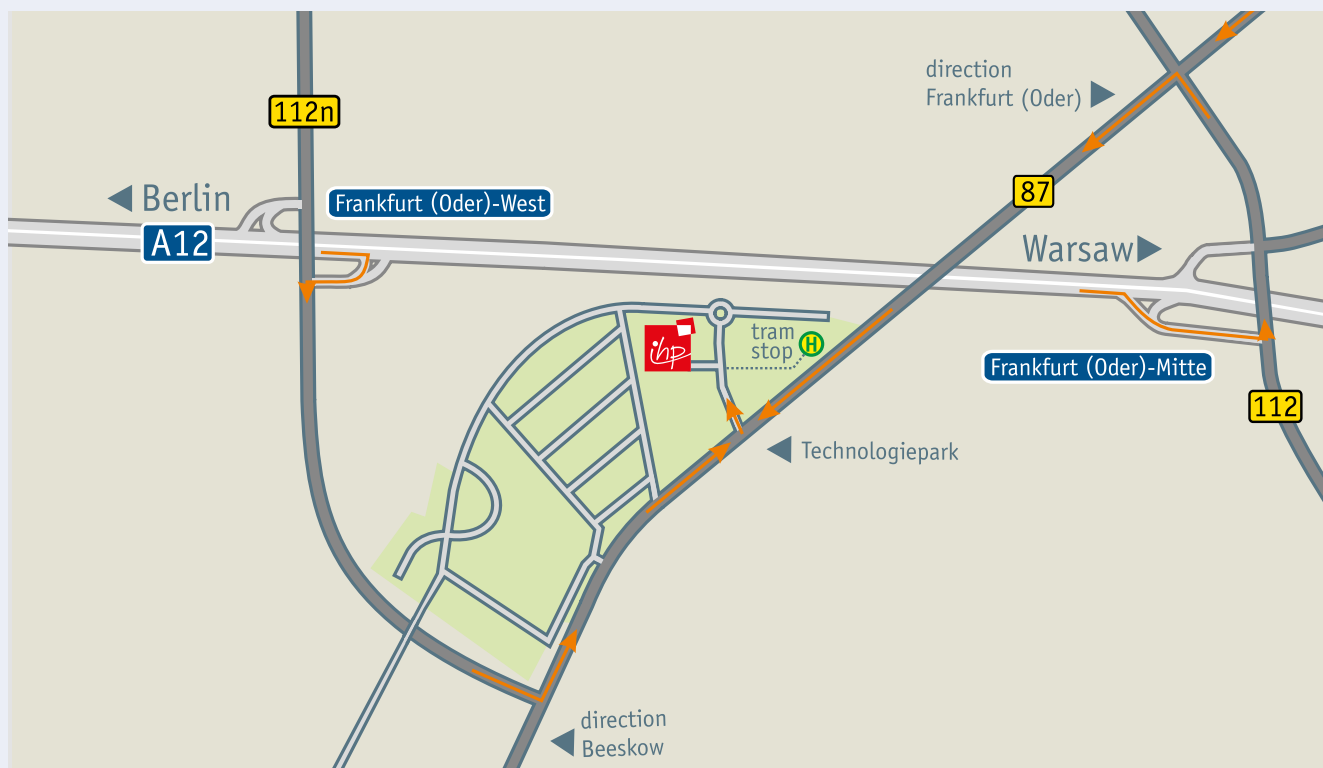
Take the train RegionalExpress RE 1 from the Berlin railway stations Zoologischer Garten, Hauptbahnhof, Friedrichstraße, Alexanderplatz, Ostkreuz or Ostbahnhof to Frankfurt (Oder).

By car

Take the highway A 12 from Berlin in the direction Frankfurt (Oder)/Warschau (Warsaw); take exit Frankfurt (Oder)-West, at the traffic lights turn left in the direction Beeskow and follow the signs to "Technologiepark".

By tram in Frankfurt (Oder)

Take the Tram 4 from railway station Frankfurt (Oder) Bahnhof in the direction Markendorf Ort to Technologiepark (13 minutes).



Impressum

Imprint

Herausgeber Publisher

IHP GmbH – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik |
Innovations for High Performance Microelectronics

Postadresse Postbox

Postfach 1466 | Postbox 1466, 15204 Frankfurt (Oder),
Deutschland | Germany

Besucheradresse Address for Visitors

Im Technologiepark 25, 15236 Frankfurt (Oder),
Deutschland | Germany
Telefon | Fon: +49 335 56250, Telefax | Fax: +49 335 5625300
E-Mail: ihp@ihp-microelectronics.com,
Internet: www.ihp-microelectronics.com

Redaktion Editors

Dr. Anna Sojka-Piotrowska

Gestaltung und Satz Design and layout

Pitch Black Graphic Design, The Hague/Berlin
E-Mail: info@pitchblackgraphicdesign.com
Internet: www.pitchblackgraphicdesign.com

Druck Printing

Chromik Offsetdruck, Marie-Curie-Straße 8, 15236 Frankfurt (Oder)
Telefon | Fon: +49 335 5212773, Telefax | Fax: +49 335 5212776
E-Mail: kai.chromik@online.de
Internet: www.chromikoffsetdruck.de

Bildnachweise Photo credits

IHP, Patrick Pleul, Winfried Mausolf, Frederic Schweizer, Uwe
Steinert, Fraunhofer Mikroelektronik, BTU Cottbus-Senftenberg,
Tobias Tanzyna Fotografie, Thomas Ritter Fotografie, Ken
Schluchtmann

Bilderklärungen Photodescriptions

Umschlag Cover: Testplatine für einen 60-GHz-Ultra-Low-Power-
Radar-Transceiver-Chip zur Erkennung von Vitaldaten Test board
for a 60 GHz ultra-low-power radar transceiver chip for vital sign
detection

Umschlaginnenseite Inside Cover: IHP-Gebäude IHP building

S. 2: Vorwort Foreword: Prof. Dr. Gerhard Kahmen (l.), Nicolas
Hübener (r.)

S. 19: Forschung des IHP IHP's Research: Reinraum-Erweiterung
IHP Extension

S. 49: Ausgewählte Projekte Selected Projects: Testboard
Multimode-Radarsensor 80 GHz Testboard multimode radar sensor
80 GHz

S. 103: Angebote und Leistungen Offers and Services:
Optoelektrische Messung auf Chipebene
Opto-electrical measurement on-chip level

Leibniz
Leibniz
Gemeinschaft



Leibniz Institute
for high
performance
microelectronics

ihp@ihp-microelectronics.com
www.ihp-microelectronics.com

Im Technologiepark 25
15236 Frankfurt (Oder)
Germany
Telefon +49 335 5625 0
Fax +49 335 5625 300