



**Fraunhofer**  
FHR

Fraunhofer-Institut für Hochfrequenz-  
physik und Radartechnik FHR

Jahresbericht 2021

---

Für eine sichere Zukunft:  
Schlüsseltechnologie Radar



*Messkammer zur sphärischen  
Nahfeldabtastung von kom-  
plexen Antennensystemen.*

**Jahresbericht 2021**

---

Für eine sichere Zukunft:  
Schlüsseltechnologie Radar



## Liebe Freunde und Partner des Fraunhofer FHR, liebe Leserinnen und Leser,

dieser Jahresbericht erreicht Sie in einer Zeit, in der sich die Weltlage auf eine noch vor Kurzem unvorstellbare Weise geändert hat. Die von der Bundesregierung aus dieser Situation heraus in Aussicht gestellten großen Investitionen auch in die Verteidigungsforschung zeigen deren Bedeutung für Frieden und Sicherheit. Radar leistet hier einen wichtigen Beitrag in vielen Bereichen, wie Sie auch in diesem Bericht lesen können.

2021 haben die Auswirkungen der Corona-Pandemie unsere Forschungsarbeit weiterhin beeinflusst, sei es durch Home-Office, digitale Messen und Konferenzen, Präsenz-Quoten in den Laboren oder den weltweiten Rohstoffmangel, der die Umsetzung verschiedener Projekte herausfordernd macht. Dennoch haben wir unsere Projekte nahezu wie vor Corona vorangebracht. Die Themen sind zukunftsweisend: Im Leitprojekt Waste4Future der Fraunhofer-Gesellschaft befassen wir uns im Konsortium mit sieben Fraunhofer-Instituten mit innovativem Kunststoffrecycling und bringen unsere Expertise in der Sensorik der Abfallsortierung ein (Bericht S. 59). Vernetzte Fraunhofer-Kompetenz zeichnete auch das Projekt Rule aus: Unter der Projektleitung des Fraunhofer FHR forschten sieben Institute an mehr Resilienz urbaner Lebensräume gegen schädliche Einflüsse wie Klimawandel, Naturkatastrophen und Terrorangriffe (Berichte S. 28 und 29). Im Fokus blieb die Weltraumlage: Angesichts des ungebremst steigenden Verkehrs im All wird eine immer präzisere Weltraumüberwachung unabdingbar. Das Projekt GESTRA Tx2 trägt dem mit der Entwicklung einer noch leistungsstärkeren Sendeeinheit für den GESTRA Verbund Rechnung (Bericht S. 44 und 45).

Ein weiterer Meilenstein im vergangenen Jahr war die Finalisierung unserer Institutsstrategie, mit der wir uns für die Zukunft optimal aufgestellt haben. Alles dazu finden Sie auf S. 8 und 9.

Im Juli 2021 hat uns die Flutkatastrophe in der Region, die auch viele Mitarbeitende des Fraunhofer FHR, ihre Familien und Freunde betroffen hat, stark bewegt. Wir haben möglichst schnell Unterstützung angeboten, auch die Fraunhofer-Gesellschaft hat umfangreiche Hilfsangebote eingerichtet. Viele Mitarbeitende haben ihren Kolleginnen und Kollegen vor Ort geholfen. Der Zusammenhalt in der Gemeinschaft des Fraunhofer FHR hat uns tief beeindruckt.

Die große Bedeutung des persönlichen Austauschs mit Ihnen, unseren Partner und Kunden, ist uns in den vergangenen zwei Jahren nur noch bewusster geworden. Die wenigen möglichen Präsenzveranstaltungen wie die Space Tech Expo Europe 2021 in Bremen waren Höhepunkte in unserem Jahreskalender. Umso mehr freuen wir uns, Sie zu unserem Wachtberg-Forum 2022 am 23. Juni einzuladen. Alle Informationen dazu finden Sie hier: <https://www.fhr.fraunhofer.de/wachtberg-forum>

Wir wünschen eine interessante Lektüre!

Herzliche Grüße



Peter Knott

Dirk Heberling

### Geschäftsführender Institutsleiter

---

Prof. Dr.-Ing.  
Peter Knott  
Tel. +49 228 9435-227  
peter.knott@  
fhr.fraunhofer.de

### Institutsleiter

---

Prof. Dr.-Ing.  
Dirk Heberling  
Tel. +49 228 9435-176  
dirk.heberling@  
fhr.fraunhofer.de

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort .....	4
Inhaltsverzeichnis .....	6
<b>Aus dem Institut .....</b>	<b>8</b>
Für Sie feinjustiert: Unsere Institutsstrategie 2021-2026 .....	8
Besondere Ereignisse im Jahr 2021 .....	10
Radar in Aktion: Die Erfolgsgeschichte geht weiter .....	14
Promotion am Fraunhofer FHR .....	16
<b>Fraunhofer FHR im Profil .....</b>	<b>18</b>
Das Jahr 2021 in Zahlen .....	20
Organigramm .....	22
Das Kuratorium .....	24
Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland .....	26
Zukunftsthemen: Gute Startposition aus der Corona-Krise .....	28
<b>Geschäftsfeld Verteidigung .....</b>	<b>30</b>
Radar im Zeichen der Verteidigung .....	31
Radar plus elektronische Kampfführung .....	32
Passives Radar via Satellitensignal .....	34
»Adleraugen-Radar«: Schnellste Blickrichtungswechsel im Überflug .....	36
3D-gedruckte Antenne: Hohe Komplexität – einfach hergestellt .....	38
Gebündeltes Wissen: Materialien für Hochfrequenzanwendungen .....	39
Erweiterter Blickwinkelbereich für Gruppenantennen .....	40
Multistatisches Radar: Timing-Alternative bei gestörtem GPS-Empfang .....	41
<b>Geschäftsfeld Weltraum .....</b>	<b>42</b>
Weltraum: Lage von Objekten präzise erfassen .....	43
Weltraumschrott mit höherer Sendeleistung besser erkennen .....	44
Allen Erwartungen zum Trotz .....	46

<b>Geschäftsfeld Sicherheit</b> .....	<b>48</b>
Zivile Sicherheit: Vielfältige Unterstützung durch Radar .....	49
Hochwasser und anderen Katastrophen begegnen .....	50
<b>Geschäftsfeld Verkehr</b> .....	<b>52</b>
Radarsysteme für mehr Sicherheit im Auto, Flugzeug, Bahn und Schiff .....	53
LIDAR-System mit optimierter Umgebungserkennung .....	54
Radfahrer und Fußgänger – bestens geschützt .....	55
<b>Geschäftsfeld Produktion</b> .....	<b>56</b>
Produktionsprozesse stets im Blick .....	57
Faserverbundmaterialien vollautomatisch analysieren .....	58
Kunststoffe wertstofflich recyceln: Via MIMO-Sensorik .....	59
Geschäftsfeld Mensch und Umwelt .....	60
<b>Radar: Für Mensch und Umwelt</b> .....	<b>61</b>
Vitalparameter von Corona-Patienten jederzeit im Blick .....	62
<b>Anhang</b> .....	<b>64</b>
Veröffentlichungen .....	65
Ausbildung und Lehre .....	66
Gremientätigkeiten .....	70
Standorte .....	72
Impressum .....	74

# Für Sie feinjustiert: Unsere Institutsstrategie 2021-2026

**Wir sind das führende Radarforschungsinstitut Europas und setzen technologische Trends, mit denen wir einen nachhaltigen Beitrag für mehr Sicherheit und Effizienz in Gesellschaft und Wirtschaft in den letzten Jahren geleistet haben und auch zukünftig leisten werden.**

Auf diese – belegbare – Position sind wir stolz und wir wollen sie nicht nur halten, sondern zum Nutzen unserer Kunden und Partner aus Industrie, Forschung und öffentlichen Institutionen weiter ausbauen. Erreicht haben wir sie durch das konsequente Erweitern und Vertiefen unserer Kernkompetenzen seit der Institutsgründung und durch kontinuierlich an die Marktbedürfnisse angepasste Kurskorrekturen. Damit können wir Ihre Geschäftsbereiche mit unseren Cutting-Edge-Technologien bestmöglich unterstützen. Als Fraunhofer-Institut nutzen wir dafür alle fünf Jahre auch den wertvollen Blick hochkarätiger externer Gutachter auf unser Institut und evaluieren mit ihnen in einem Audit unsere strategische Ausrichtung. Im November 2021 war dies wieder der Fall. Die eingeladenen Experten aus Industrie und Forschung konnten wir mit unserem Strategieplan 2026+ voll und ganz überzeugen. So sind wir überzeugt, Ihnen mit unseren Arbeiten rund um die Radar- und Hochfrequenzsensorik weiterhin einen einzigartigen Mehrwert und Wettbewerbsvorteil für Ihr Arbeitsumfeld und Ihr Produktportfolio zu liefern. Dies ist unsere Mission.

Unsere Geschäftsfelder haben sich über die letzten Jahre hinweg fast durchgehend positiv entwickelt, was uns bestätigt, dass wir mit unseren Arbeiten den Puls der Zeit und Ihre Bedürfnisse treffen. Für die nächsten fünf Jahre streben wir daher ein budgetäres Gesamtwachstum von rund zehn Prozent pro

Jahr an, verbunden mit einem daran angepassten personellen Aufwuchs. Mit einer Steigerung unseres Wirtschaftsertragsanteils auf dauerhaft über 30 Prozent wollen wir dabei zudem unsere Forschung ganz im Sinne von Fraunhofer noch konsequenter in die Anwendung bringen.

Unsere Leitstrategie 2026 haben wir auf sieben Säulen gestellt, die den angestrebten Erfolg für Sie und uns sichern:



## **Verteidigung und Weltraumbeobachtung: Unsere Forschung für mehr Sicherheit in Deutschland und Europa**

Unsere Kerngeschäfte Verteidigung und Weltraum nehmen dabei natürlich nach wie vor einen hohen Stellenwert ein. Unsere über Jahrzehnte aufgebaute, einzigartig umfassende Expertise zur Erfassung, Verfolgung und Analyse von nahen und fernen Objekten macht unsere Sensorik und Algorithmen zu unerlässlichen Komponenten für Verteidigungs- und Sicherheitsaufgaben auf der Erde oder für unsere satellitengestützte



Infrastruktur im Weltraum. Eine Übersicht über die Angebote und Beispiele laufender Arbeiten in diesen Bereichen erhalten Sie in den Kapiteln auf S. 30 und 31 und S. 42 und 43. So modernisieren wir u. a. unser bewährtes Weltraum Tracking and Imaging Radar TIRA bis 2025 und machen es mit neuen Fähigkeiten noch leistungsstärker. In Kombination mit unserer erfolgreich in den Betrieb gegangenen Neuentwicklung GESTRA und ihren anvisierten, teils bereits gestarteten Folgeprojekten – lesen Sie mehr dazu auf Seite 44 und 45 – bieten wir Ihnen einzigartige Möglichkeiten zur Weltraumlageerfassung.

Nicht erst seit den bestürzenden Ereignissen in der Ukraine haben sich Deutschland und seine europäischen Partner um die Modernisierung ihrer Wehrsysteme zur Aufrechterhaltung der deutschen und europäischen Souveränität eingesetzt. Vier militärische Großprojekte – FCAS, MGCS, AFSC und ECRS – sind bereits gestartet oder befinden sich derzeit in der Entscheidungsphase. Wir haben den Schwerpunkt unserer Forschung im Verteidigungssektor auf die Unterstützung dieser vier Großprojekte gelegt. Die Radar- und Hochfrequenztechnologie ist essenziell für die Überwachungs- und Aufklärungsleistung dieser Systeme und so können und wollen wir mit unserem tiefgehenden Know-how einen entscheidenden Beitrag für die Sicherheit in Deutschland und Europa leisten!

### **Effektivität, Nachhaltigkeit und Sicherheit auch für Verkehr, Medizin und Produktion**

Auch unsere zivilen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte haben wir an den aktuell vielversprechendsten und drängendsten Trends ausgerichtet. Dazu gehört die Sensorik

für die neue, zunehmend autonome Mobilität wie im Projekt KonSens zur automatisierten Auswertung von Kreuzungen (siehe S. 55) ebenso wie für den Zukunftsmarkt der zivilen Drohnensysteme im Geschäftsfeld Verkehr. Wir entwickeln Lösungen für mehr Resilienz für unsere Städte (Projektbeispiel RuLE, S. 50 und 51) im Geschäftsfeld Sicherheit gleichermaßen wie für mehr Nachhaltigkeit in der Produktion, beispielsweise durch Technologien für Zerstörungsfreies Prüfen (siehe S. 58) oder effektive Wertstoffkreisläufe (Projektbeispiel Waste4Future, S. 59) im Geschäftsfeld Produktion. Auch an der Erschließung von Radaranwendungen näher am Menschen, beispielsweise für medizinische Zwecke, arbeiten wir u.a. durch die Miniaturisierung bei gleicher oder gesteigerter Leistungsfähigkeit sowie einfacherer Handhabung der Radarsysteme im Geschäftsfeld Mensch und Umwelt (Projektbeispiel M3Infekt, S. 62 und 63).

Durch gezielte Kooperationen, insbesondere innerhalb der Fraunhofer-Welt, können wir Ihnen das gesamte Portfolio von maßgeschneiderten Einzelkomponenten bis zu perfekt integrierten Gesamt-Sensorsystemen und von der Studie bis zum Prototypenbau und der Kleinserie bieten.

Natürlich haben wir dafür in diesem Strategieprozess auch unsere internen Prozesse unter die Lupe genommen. So wollen wir Ihnen beispielsweise mit thematisch geclusterten Think Tanks und neuen internen Kooperationsmöglichkeiten, auch durch die Einführung von SAP, unser gebündeltes Know-how künftig noch effizienter für Ihre Projekte verfügbar machen.

Lassen Sie uns gemeinsam die Zukunft gestalten und Lösungen für Ihre Geschäftsbereiche entwickeln. Wir sind bereit!

## Unser Vision-Mission-Statement

Mit unserer Radar- und Hochfrequenzsensorik machen wir die Produkte und Arbeit unserer Kunden und Partner und damit die Gesellschaft im 21. Jahrhundert sicherer, effizienter und komfortabler.

Dazu erforschen und entwickeln wir jeden Tag maßgeschneiderte Hochfrequenz- und Radarsysteme als essenzielle Bestandteile für die mobile und stationäre Umfeldrerfassung unserer Kunden und Partner in den Geschäftsfeldern Verteidigung, Weltraum, Sicherheit, Produktion, Verkehr, Mensch und Umwelt.

## Kontakt

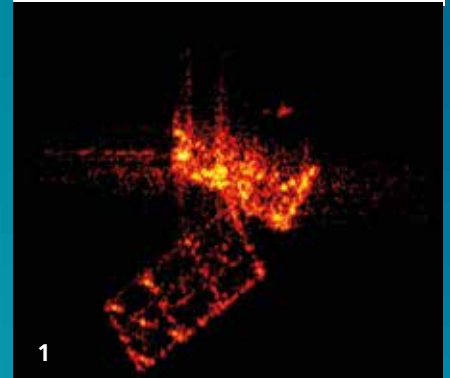
Marco Gallasch  
+49 151 646 337 12  
marco.gallasch@  
fhr.fraunhofer.de

# Besondere Ereignisse im Jahr 2021

Online, 1. April

## EuSAR Best Paper Award

Toller Erfolg: Ein Team des Fraunhofer FHR erhält den EuSAR Best Paper Award für seine Arbeit »ISAR imaging by integrated Compressed Sensing, range alignment and autofocus« .



1

Düsseldorf/Online,  
22. - 26 März

**EuCAP – The 15th European Conference on Antennas und Propagation**  
15 Technical Sessions, 4 Poster Sessions, 1 Invited Speaker Session des Fraunhofer FHR.

Leipzig/Online,

29. März - 1. April

**EUSAR 2021 - 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar**  
2 Tutorials, 5 Vorträge, 8 Chairs des Fraunhofer FHR

Januar

Februar

März

Utrecht/Online, 10. - 15. Januar

## EUROPEAN MICROWAVE WEEK 2020

Das Fraunhofer FHR beteiligte sich mit 15 Vorträgen, Prof. Peter Knott hielt die Key-Note. Am virtuellen Messestand wurden die Projekte ATRIUM, SAMMI und GESTRA präsentiert.



2

Online, 19. Februar

## SET Panel Excellence Award für Dr. Matthias Weiß

Mit dem Award würdigt die NATO den herausragenden Beitrag von Dr. Weiß in der SET-Task Group »Design and Analysis of Compressive Sensing Techniques for Radar and ESM Applications«

Darmstadt/Online,  
20. - 23. April

## 8th European Conference on Space Debris der ESA/ESOC

2 Vorträge, 3 Poster Sessions, 2 Chairs des Fraunhofer FHR

*Wachtberg, 1. Juni*  
**Dr. Stefan Brüggewirth zum NATO SET Panel Member at Large für Artificial Intelligence und Machine Learning ernannt**



*Online, 21. - 22. Juni*  
**21st International Radar Symposium (IRS 2021)**

Das Fraunhofer FHR hat die DGON aktiv bei der Realisierung der digitalen Veranstaltung unterstützt. Radarexperten aus Wissenschaft und Industrie sowie Forschende und Studierende nutzten die Gelegenheit, online teilzunehmen. Die über 140 internationalen Teilnehmer teilten und diskutierten aktuelle Forschungsergebnisse und Entwicklungen. Das Fraunhofer FHR beteiligte sich mit zwei Focus Sessions zu den Themen Automotive Radar for Automated Driving: Landmark-based RADAR SLAM for Autonomous Driving und Weather Radar: A new airborne network concept to improve air navigation safety sowie der Panel Discussion zum Thema AI and Radar.

*Online, 21. Juni*  
**Prof. Joachim Ender erhält Christian Hülsmeier Award**

Die Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) verleiht den Award auf der IRS für die herausragenden Beiträge von Prof. Ender in der Radarforschung und -ausbildung.



*Online, 23. April*  
**NATO SET Panel Early Career Award für Dr. Christoph Wasserzier**

April

Mai

Juni

*Villip/Online, 26. - 27. Mai*  
**Passive Radar & Multistatics Focus Days 2021**



*München/Online, 22. Juni*  
**Fraunhofer Solutions Days**  
Auf dem Thementag Sichere Gesellschaft und Industrie präsentierte Projektleiter Dr. Dirk Nübler das interdisziplinär angelegte Projekt RuLe zur Analyse und Verbesserung der Resilienz urbaner Lebensräume, in dem sieben Fraunhofer Institute ihre Kompetenzen bündeln.



*Online, 12. Juni*  
**Manjunath Thindlu Rudrappa erhält ARGUS Award auf dem Hensoldt Professorentag**



2. September  
VDI-Förderpreis des VDI Rheingau-Bezirksverein e.V. für Lukas Liebelt



9

Wachtberg/Online, 2. Juli  
Digitale Kuratoriumssitzung  
– live gestreamt

Aus ganz Deutschland schalteten sich die Kuratoren zu und besprachen die aktuellen Themen und Entwicklungen des Instituts mit der Institutsleitung. In diesem Jahr wurde das zweite Mal in Folge eine Übertragung für die Mitarbeitenden angeboten, über 70 Interessierte nutzten die Gelegenheit, die Veranstaltung live am Rechner zu verfolgen.

Ahrtal, 14. Juli  
Flutkatastrophe in der Region  
Aus dem Nichts trifft die verheerende Flutkatastrophe die Region. Auch viele Mitarbeitenden des Fraunhofer FHR, ihre Familien und Freunde sind betroffen.

Aachen, 15. September  
Bonding Automotive Day

Juli

August

September

Wachtberg, 15. August  
60. Geburtstag  
Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling



8

Linstow, 27. - 29. September  
23. DWT-Marineworkshop »Die Marine und ihre künftige Entwicklung als Beitrag für das Fähigkeitsprofil der Bundeswehr«

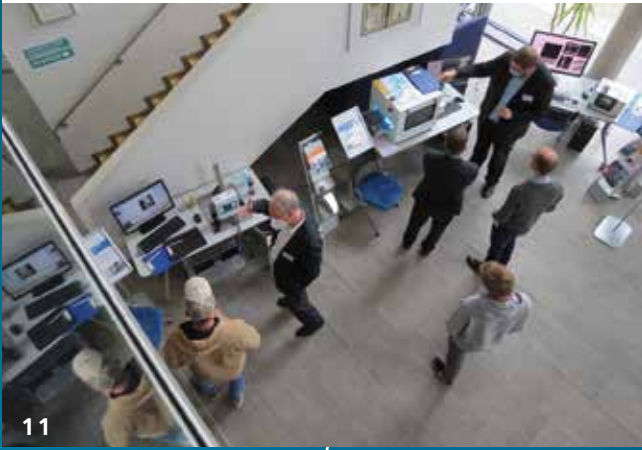
Eine rare Präsenzveranstaltung: Das Fraunhofer FHR zeigte unter anderem die Möglichkeiten Kognitiver Systeme bei der Luftraumüberwachung. In einer Live-Simulation am Stand wurden die Einsatzmöglichkeiten des Kognitiven Radarsimulator CoRaSi im Bereich der Luftverteidigung vorgeführt. Ebenso präsentierten die Kollegen die Fähigkeiten in der Mess- und Simulationstechnik durch Beispiele für die Anwendung der Metamaterialien-Technologie für militärische Antennenapplikationen.



10

5. - 8. Juli  
International Summer School on Radar/SAR 2021  
Digitale Premiere: Studenten, Doktoranden und junge Wissenschaftler aus aller Welt nutzten die Gelegenheit zu Fortbildung, Austausch und Vernetzung. 75 Teilnehmende aus 17 Ländern trafen sich online und absolvierten das mit internationalen Radarexperten exzellent besetzte Programm aus Vorträgen, Workshops und Social Events.

Fürth 27. - 28. Oktober  
Fraunhofer Vision Technologietag



Wachtberg/Online, 16. November  
RuLe Workshop

Hamburg, 11. November  
Innoday FüAK BW

Stuttgart, 8. - 10. November  
MST Kongress

Online, 23. - 24. November  
ISTAR-Workshop

Online, 9. November  
Jobarea20

Oktober

November

Dezember

Aachen, 2. November  
Bonding

Bremen, 16. - 18. November  
**Space Tech Expo Europe 2021**  
Auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Space stellte das Institut die Fähigkeiten von TIRA und GESTRA vor. Bei gut besuchten Hallen hatten die Kollegen viele interessante Gespräche und Kontakte am Stand.

Wachtberg/Online, 4. November  
Strategie-Audit 2021



# Radar in Aktion: Die Erfolgsgeschichte geht weiter

Auch im Jahr 2021 haben sich die Einschränkungen der Corona-Pandemie auf den Austausch und die Vernetzung mit Kunden und Partnern ausgewirkt. Messen, Konferenzen, unser jährliches Wachtberg-Forum – durch Corona waren viele Gelegenheiten zum persönlichen Kontakt weiterhin auf Eis gelegt. Schon kurz nach Beginn der Pandemie hat das Fraunhofer FHR mit tatkräftiger Unterstützung vieler Forscher die Online-Vortragsreihe »Radar in Aktion« entwickelt: ein innovatives, digitales Format, um unsere Forschungsarbeit unseren Zielgruppen anschaulich zu präsentieren. Am 23. Juni 2020 startete die erste Sendung. Die Reihe wurde ein voller Erfolg: An 20 Terminen in 2020 nahmen über 900 Personen teil. Damit war klar: Wir machen weiter! Und so hieß es auch im Jahr 2021 immer Dienstags um 14 Uhr: aus Wachtberg in die Welt!

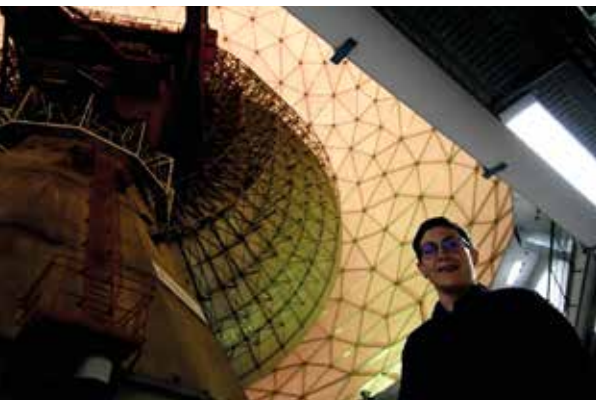
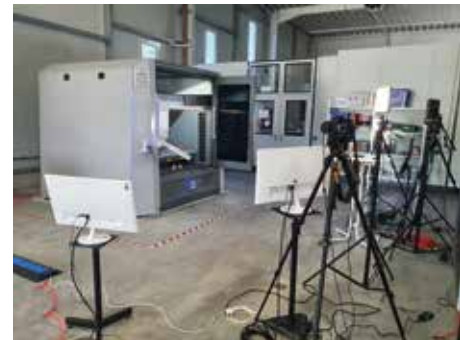
## Große Bandbreite an Themen

An 19 Terminen zeigten unsere Forscherinnen und Forscher im Jahr 2021 Fachleuten und interessierten Laien aus Industrie, Politik, Wissenschaft und Gesellschaft neuste Ergebnisse der Radarforschung. Praxisnah und kompakt wurden aus dem Sendestudio

am Standort Villip jeweils 30 Minuten lang aktuelle Projekte vorgestellt, oft mit Live-Präsentationen der Experimentalsysteme, immer mit Gelegenheit für Fragen und Diskussion. Die Top 3 der Vorträge im vergangenen Jahr bildet die große Bandbreite der Themen ab: Auf Platz 1 mit 198 Teilnehmern landete die Veranstaltung »Machine Learning for Radar applications – Classification of Targets using Neural Networks« von Dr.-Ing. Simon Wagner. Platz 2 belegte »High-resolution imaging with a 240-Ghz radar with SiGe chip“ von Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl und Dr.-Ing. Reinhold Herschel mit 153 Zuschauenden. Knapp dahinter folgt auf Platz 3 der Vortrag »Danger from drones: Monitoring airports with millimeter wave radar« von M. Sc. Winfried Johannes mit 148 Teilnehmenden.

## Internationalität wird großgeschrieben

Radar in Aktion wird auf Deutsch oder Englisch abgehalten. Die vielen englischsprachigen Termine ziehen Teilnehmende aus aller Welt an. Von Belgien bis Thailand: 2021 gab es Zuschauende aus 60 Ländern.





### Vortrag verpasst? Kein Problem! Jetzt auch bei YouTube!

Der Live-Charakter mit der Möglichkeit direkt Fragen zu stellen machen Radar in Aktion aus. Dennoch möchten viele Teilnehmende den Vortrag noch einmal angucken oder konnten einen Termin nicht wahrnehmen. Seit 2021 wird daher ein Großteil der Vorträge im Anschluss auf YouTube gestellt – immer 14 Tage nach der Veranstaltung.

Zu finden sind die Vorträge unter: <https://www.fhr.fraunhofer.de/de/veranstaltungen/online-vortragsreihe--radar-in-aktion.html>

### Bestnoten von zufriedenen Teilnehmenden

Die regelmäßig abgefragten Rückmeldungen der Teilnehmenden sprechen für sich: 2021 haben 93 % die Vorträge mit insgesamt sehr gut oder gut bewertet. Dieses tolle Ergebnis freut uns sehr und motiviert uns umso mehr, auch in Zukunft spannende Projekte vorzustellen. Seien Sie dabei: Alle Informationen zu Radar in Aktion mit Themen, Terminen und Anmelde-möglichkeit finden Sie unter [www.fhr.fraunhofer.de/RadarinAktion](http://www.fhr.fraunhofer.de/RadarinAktion). Die Teilnahme ist kostenlos.



**RADAR**  
IN  
**AKTION**

#### Kontakt

Dipl.-Volksw. Jens Fiege  
+49 151 613 653 67  
jens.fiege@  
fhr.fraunhofer.de



# Promotion am Fraunhofer FHR

---



Hilfsbereite Kollegen und Freiraum für eigenverantwortliches Arbeiten waren ideal für meine Promotion.«

## Kontakt

---

Dr.-Ing. Sven Thomas  
+49 234 32-27983  
sven.thomas@  
fhr.fraunhofer.de

## Dr.-Ing. Sven Thomas

---

Im Juli verteidigte Dr. Sven Thomas, Mitarbeiter der Forschungsgruppe Bochum und der Gruppe Chip Design der Abteilung Integrierte Schaltungen und Sensorsysteme seine Promotion »System- und Antennenkonzepte für ein FMCW-Radarsystem auf Basis eines 240-GHz-SiGe-Transceiver-MMIC«.

Nach seinem Master in Elektro- und Informationstechnik an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) holte ihn Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl 2013 ans Fraunhofer FHR, wo Dr. Thomas in der neu gegründeten Gruppe Chip Design an der Chip- und Systementwicklung mit höheren Frequenzen arbeitete (Stichwort 240-GHz-Radar). Hieraus ergab sich seine von Prof. Pohl betreute Dissertation, die sich mit der Entwicklung eines kompakten und präzisen FMCW-Radarsensors, der im Frequenzbereich um 240 GHz eine Modulationsbandbreite von 52 GHz erreicht, befasst. Basis dieses Systems ist ein in Kooperation zwischen der RUB und des Fraunhofer FHR entwickelter SiGe-Transceiver-MMIC, geftrigt in Infineons B11HFC SiGe-BiCMOS-Technologie.

Durch die Integration jeglicher Hochfrequenzkomponenten auf dem MMIC, inklusive on-Chip-Antennen, kann auf kostspielige Hochfrequenzleiterplatten verzichtet werden. Das Ergebnis: Ein kompakter, kostengünstiger und robuster Aufbau, der unter beengten Platzverhältnissen und rauen Industrieumgebungen eingesetzt werden kann. Die große FMCW-Modulationsbandbreite ermöglicht eine hohe Entfernungsauflösung, was auch in komplexen Messszenarien hohe Trennschärfe und Bildauflösung sicherstellt. »Der Kern meiner Arbeit bezieht sich auf einen unerwünschten Effekt des Sensors: Das Radar strahlt neben der gewünschten Frequenz bei 240 GHz auch bei der halben Frequenz ein 120 GHz Signal ab. Dies führt zu Falschzielen bei der halben Entfernung. Um dies zu verhindern, habe ich eine frequenzfilternde Platte auf Basis eines Interferenzfilters entwickelt, die diese halbe Frequenz unterdrückt. Anschließend wurde diese Filterstruktur in die bestehende tropfenförmige Linse integriert. Somit habe ich eine frequenzfilternde, dielektrische Linse entwickelt, die zum Patent angemeldet wurde«, erläutert Sven Thomas.



Die Förderung der Wissenschaftlichkeit ist dem Fraunhofer FHR ein wichtiges Anliegen. Das Institut unterstützt daher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aktiv auf ihrem Weg zu Promotion. Je nach persönlichen Forschungsschwerpunkten und Interessen gibt es individuell zugeschnittene Betreuungs – und Fördermöglichkeiten.

## Dr. Iole Pisciotano

Anfang 2021 hat Dr. Iole Pisciotano ihre Doktorarbeit mit dem Titel »Multidimensional Passive ISAR for Maritime Target Imaging« abgeschlossen. Die 37-Jährige arbeitet in der Abteilung Passive und störteste Radarverfahren in der Gruppe Passiver Sensorverbund von Dr. Diego Cristallini, der auch Betreuer ihrer Arbeit war. Promoviert hat sie an der Universität Sapienza in Rom bei Prof. Debora Pastina (Institut für Informationstechnik, Elektronik und Telekommunikation).

Die Promotion befasst sich mit neuartigen ISAR-Ansätzen (Inverse Synthetic Aperture Radar) für die passive maritime Zielbildgebung. Dabei konzentriert sie sich, unter den verfügbaren Fremdbeleuchtern, auf digitale Videoübertragungssignale wie DVB-T und DVB-S. Die kombinierte Nutzung von DVB-T und DVB-S ist für passive Bildgebungszwecke äußerst attraktiv, da sie komplementäre Eigenschaften hinsichtlich der Betriebsbandbreiten, Senderstandorte und in Polarisationen übertragenen Signale besitzen. Dr. Pisciotano entwickelte Ad-hoc-Verarbeitungstechniken, um die extrahierten Informationen aus den gewonnenen ISAR-Produkten zu maximieren. Insbesondere betrachtete sie kohärente und nicht-kohärente mehrdimensionale Methoden in Bezug auf Frequenz, Winkel und Polarisation und validierte diese mit experimentellen Daten aus Feldversuchen.

Dr. Pisciotano hat nach ihrem Studium der Telekommunikationstechnik an der Universität Federico II in Neapel drei Jahre als Hauptforscherin des BMBF-Projekts »Radarsignalverarbeitung zur Bestimmung der Biomasse von Gerstenähren im Bestand« am Institut gearbeitet. Nach einer Pause und der Geburt ihres Kindes kam sie 2017 zurück. Eine Promotion war dabei von Anfang an das Ziel. Durch die guten Kontakte der Abteilung und die thematischen Überschneidungen mit der Universität Sapienza fiel die Wahl auf Rom. »Die Betreuung von Seiten des Fraunhofer FHR und der Universität lief sehr gut und ich habe die Möglichkeit, regelmäßig in Rom vor Ort arbeiten zu können, sehr geschätzt. Leider konnte der Abschluss mit der Verteidigung coronabedingt nur online stattfinden - aber auch das hat gut geklappt«, so Dr. Pisciotano.



**Ich habe die Möglichkeit, regelmäßig vor Ort in Rom arbeiten zu können, sehr geschätzt.«**

### Kontakt

Dr. Iole Pisciotano  
+49 228 9435-784  
iole.pisciottano@  
fhr.fraunhofer.de

# Fraunhofer FHR im Profil

---



Das Fraunhofer FHR ist eines der führenden und größten europäischen Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Hochfrequenz- und Radartechnik. Für seine Partner entwickelt das Institut maßgeschneiderte Konzepte, Verfahren und Systeme für elektromagnetische Sensorik vom Mikrowellen- bis in den unteren Terahertz-Bereich.

Kernthema der Forschungsarbeiten am Fraunhofer FHR sind Sensoren für präziseste Abstands- oder Positionsbestimmung sowie bildgebende Systeme mit Auflösungen bis zu 3,75 mm. Das Anwendungsspektrum dieser Geräte reicht von Systemen für Aufklärung, Überwachung und Schutz bis hin zu echtzeitfähigen Sensoren für Verkehr und Navigation sowie Qualitätssicherung und zerstörungsfreies Prüfen. Dabei zeichnen sich die Systeme des Fraunhofer FHR durch Zuverlässigkeit und Robustheit aus: Radar- und Millimeterwellensensoren eignen sich auch unter rauen Umweltbedingungen für anspruchsvolle Aufgaben. Sie arbeiten bei hohen Temperaturen, Vibrationen oder Null-Sicht-Bedingungen aufgrund von Rauch, Dampf oder Nebel. Radar und artverwandte Hochfrequenzsysteme sind damit auch Schlüsseltechnologien für Verteidigung und Sicherheit. Hier unterstützt das Institut das Bundesministerium für Verteidigung (BMVg) seit der Institutsgründung 1957.

Die am Fraunhofer FHR entwickelten Verfahren und Systeme dienen einerseits der Erforschung neuer Technologien und Macharten. Andererseits entwickelt das Institut gemeinsam mit Unternehmen, Behörden und anderen öffentlichen Einrichtungen Prototypen zur Bewältigung bisher ungelöster Herausforderungen. Dabei liegt besonderes Augenmerk auf der Ausgereiftheit und Serientauglichkeit der Systeme, sodass diese gemeinsam mit einem Partner zeitnah in ein Produkt überführt werden können. Durch seine interdisziplinäre Aufstellung verfügt das Institut über das fachliche Know-how, um die gesamte Wertschöpfungskette von Beratung über Studien bis zur Entwicklung und Fertigung einer Nullserie abzudecken. Die verwendeten Technologien reichen von klassischer Hohlleiterbasis bis hin zu hochintegrierten Silizium-Germanium-Chips mit Frequenzen bis zu 300 GHz.

Die Fähigkeit der berührungslosen Messung und die Durchdringung von Materialien eröffnen viele Möglichkeiten zur Lokalisation von Objekten und Personen. In immer mehr Anwendungsbereichen sind Hochfrequenzsensoren des Fraunhofer FHR mit ihren besonderen Fähigkeiten durch den Fortschritt der Miniaturisierung und Digitalisierung eine bezahlbare und attraktive Option.

## Personal- und Budgetentwicklung

Das Budget des Instituts ergibt sich aus mehreren Finanzierungsquellen: Der Grundfinanzierung durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), der Projektfinanzierung aus Mitteln des Verteidigungshaushaltes und den Einkünften aus dem Vertragsforschungsbereich (VfA), der wiederum unterteilt werden kann in Wirtschaftserträge, öffentliche Erträge, EU-Erträge und Grundfinanzierung von Bund und Ländern. Im Jahr 2021 erwirtschaftete das Fraunhofer FHR im wehrtechnischen und im zivilen Institutsteil einen Gesamtertrag in Höhe von 42,1 Mio. €.

Zum Jahresende 2021 waren am Fraunhofer FHR insgesamt 390 Mitarbeitende beschäftigt. Davon sind 217 unbefristet und 126 Personen befristet beschäftigt. Hinzu kommen noch 47 Studierende und Auszubildende.

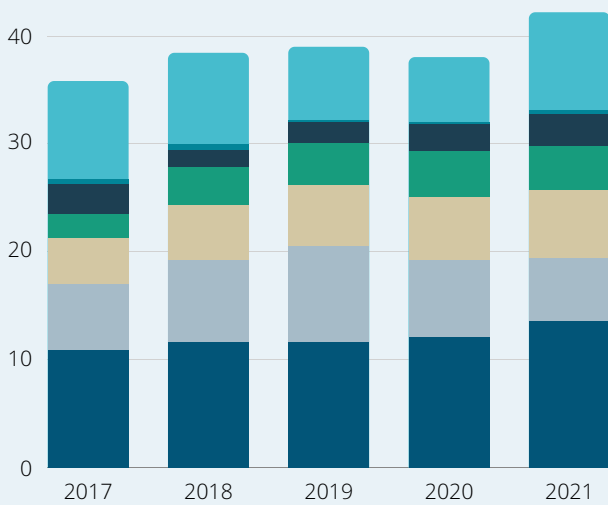
## Kontakt

Dipl.-Volksw. Jens Fiege  
+49 151 613 653 67  
jens.fiege@  
fhr.fraunhofer.de



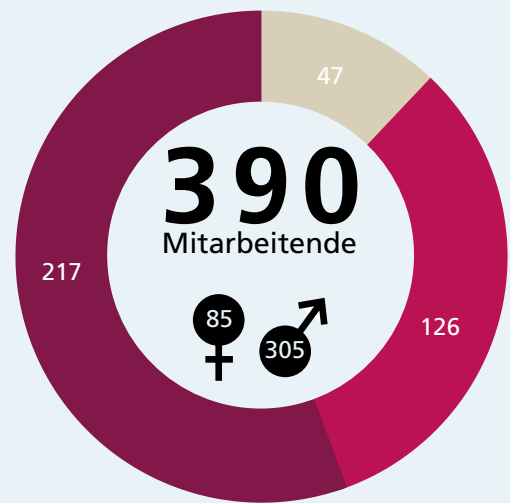
# Das Jahr 2021 in Zahlen

## Budgetentwicklung



- BMVG Grufi
- BMVG Projekte
- Bund/Länder Grufi
- Wirtschaft
- Öffentlich
- EU
- Sonstige

## Personal



- Hiwis, Praktikanten, Azubis
- unbefristet
- befristet

## Professuren



**3**

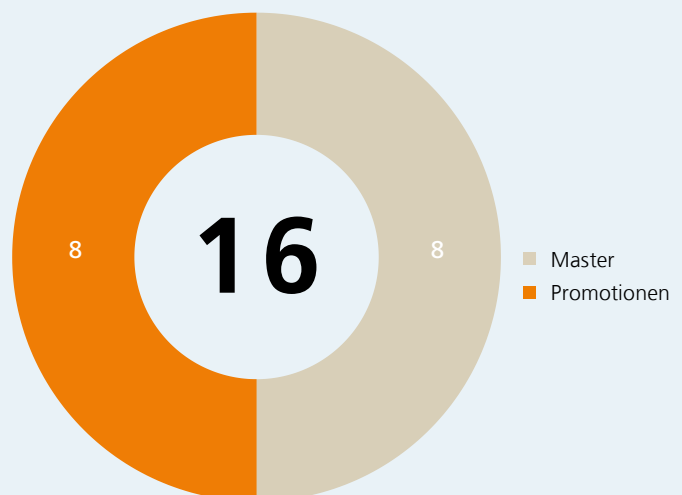
## Lehrveranstaltungen



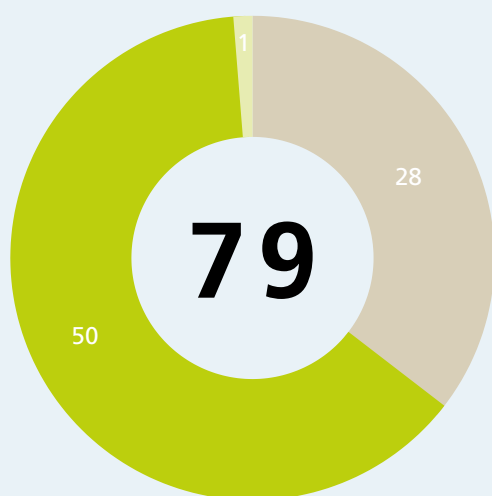
Wintersemester 20/21: **12**

Sommersemester 21: **5**

## Abschussarbeiten



## Publikationen



- Zeitschriften
- Konferenzbeiträge
- Reviews

## Online-Vortragsserie »Radar in Aktion«

**19** Online-Vorträge

**97** Teilnehmer pro Vortrag im Durchschnitt

Bewertung der Teilnehmer: **93%** sehr gut oder gut

Nationen der Teilnehmer: **60**

Mitschnitte auf YouTube: **60**



dt. **1697**  
engl. **1601**



**1127**



**1229**



**2056**



**497**

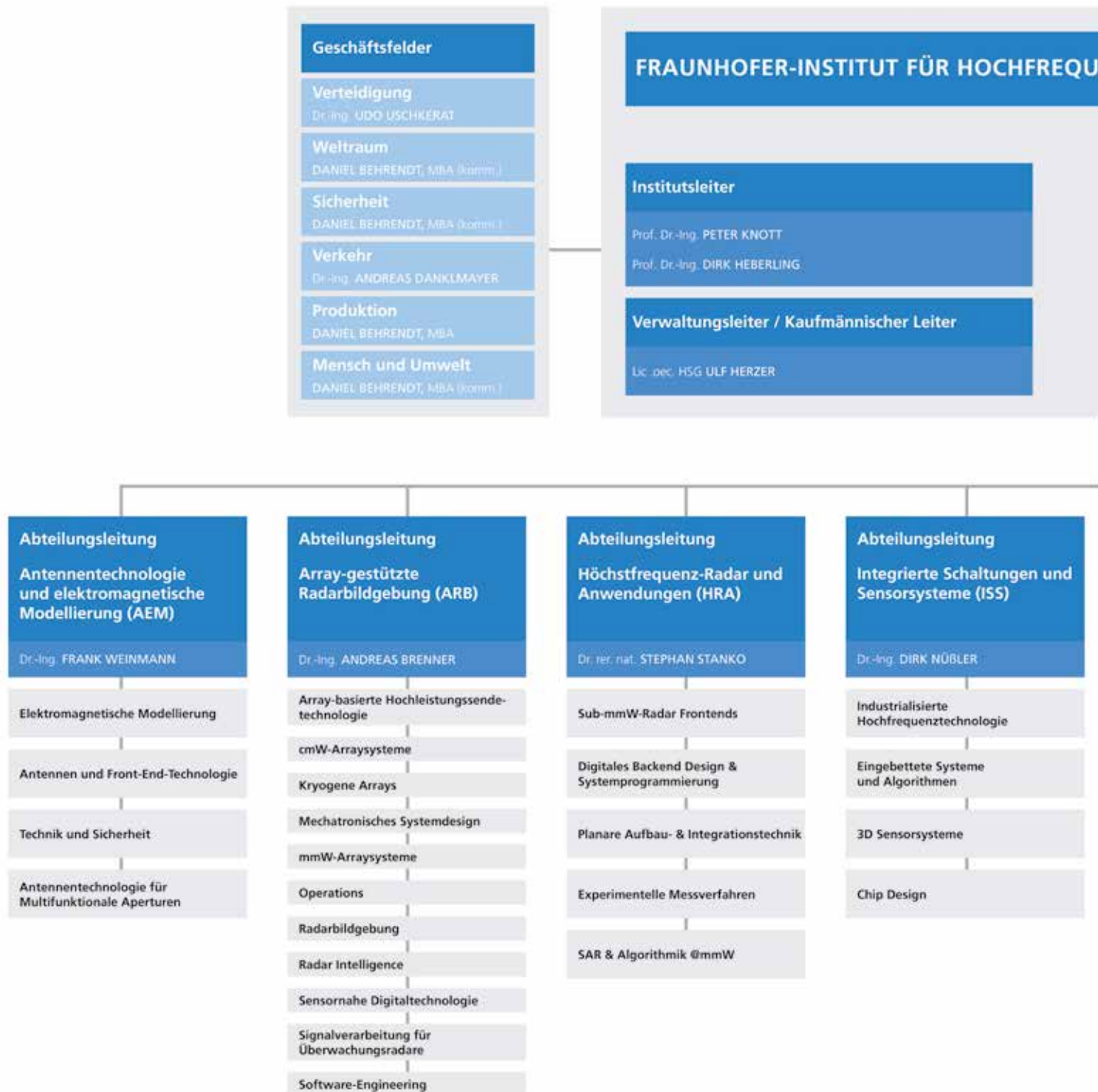
## Medienanalyse

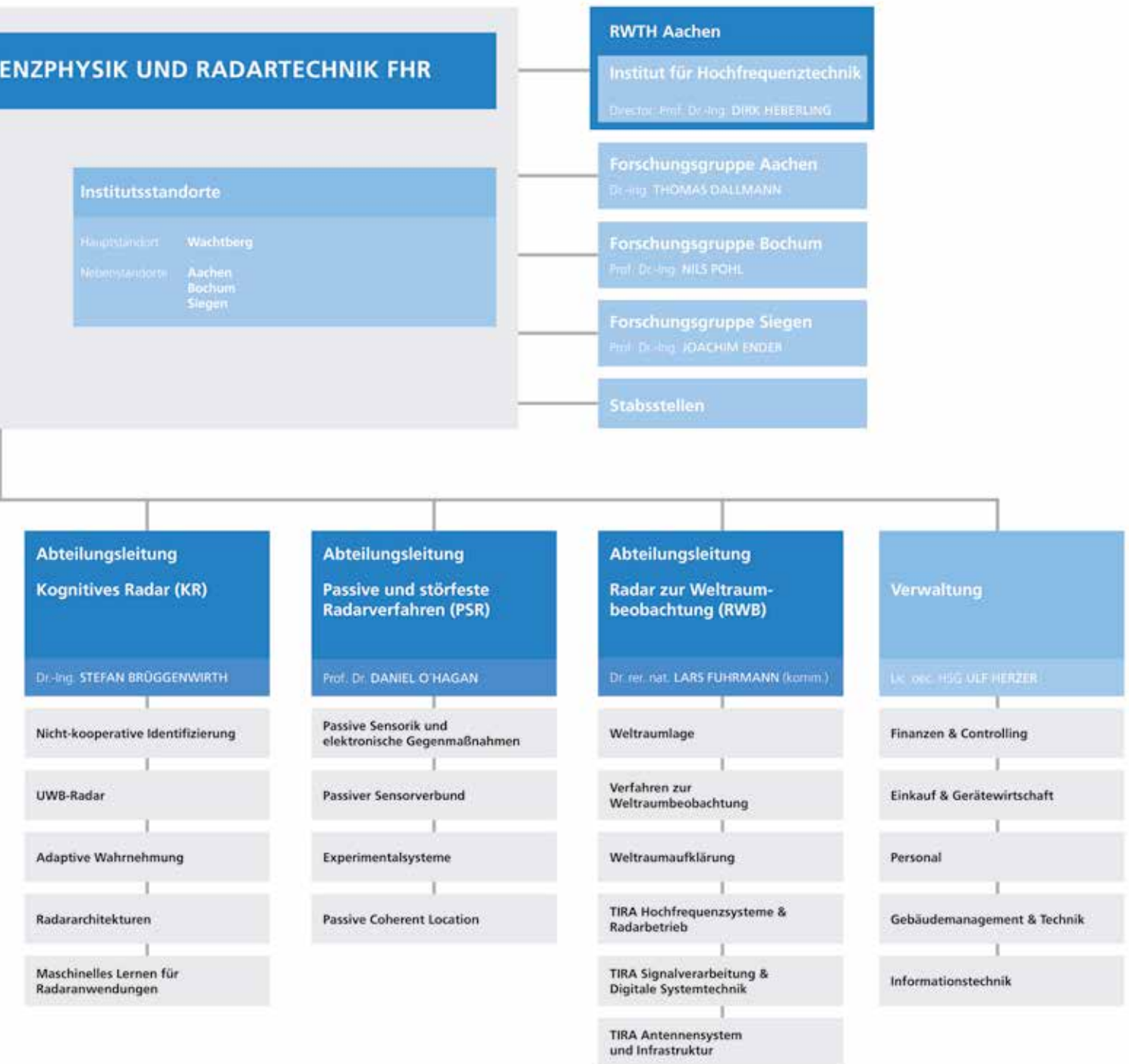


Beiträge in den Medien: **99**

erreichte Kontakte: **36 Mio**

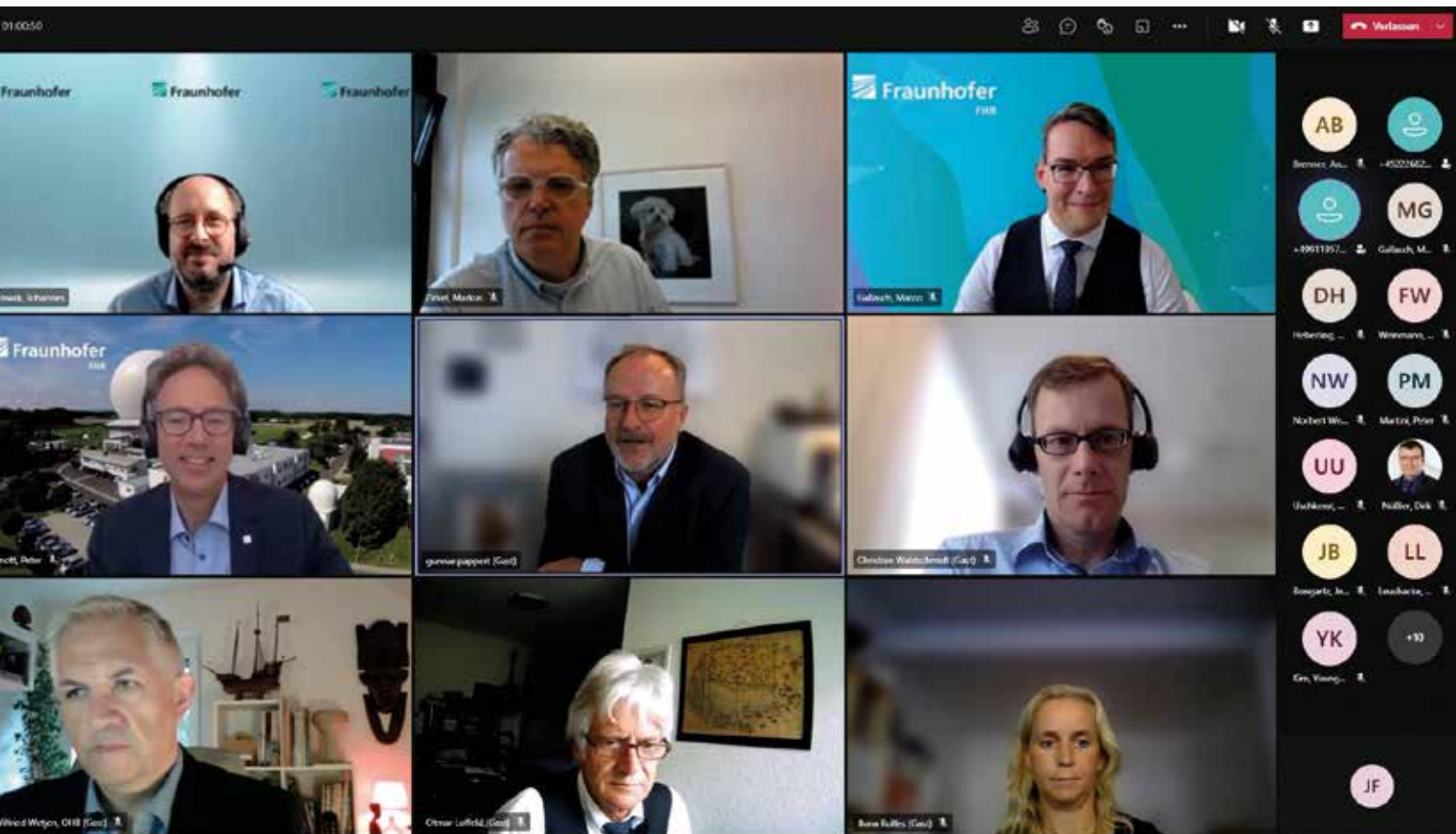
# Organigramm





# Das Kuratorium

Das Kuratorium begleitet unsere Forschungsarbeit und berät die Institutsleiter und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft. Die Mitglieder unseres Kuratoriums aus Industrie, Wissenschaft und Ministerien sind:



Aufgrund der Corona-Einschränkungen fand die Kuratoriumssitzung am 2.7.2021 wie im Vorjahr rein virtuell statt. Den Bericht des Vorstands übernahm Dr. Markus Zirkel, Hauptabteilungsleiter Recht der Fraunhofer-Gesellschaft.

Im Bild (von links oben): Dr. Johannes Nowak (Forschungskordinator, Fraunhofer-Zentrale), Dr. Markus Zirkel (Direktor Recht, Fraunhofer-Zentrale), Marco Gallasch (Leiter Strategie- und Organisationsentwicklung, Fraunhofer FHR), Prof. Dr. Peter Knott (Institutsleiter, Fraunhofer FHR), Gunnar Pappert, Prof. Dr. Christopher Waldschmidt, Winfried Wetjen, Prof. Dr. Otmar Löffeld und Prof. Dr. Ilona Rolfes.



Vorsitzender

**Dipl.-Ing. Gunnar W. R. Pappert**  
DIEHL DEFENCE GmbH & Co. KG  
Röthenbach a. d. Pegnitz

**Dr. Gerhard Elsbacher**  
MBDA Deutschland GmbH  
Schrobenhausen

**Caroline Gründler**  
Continental AG  
Hannover

**Hans Hommel**  
Hensoldt  
Ulm

**Dr. Holger Krag**  
ESA / ESOC  
Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld**  
Universität Siegen  
Siegen

**Prof. Dr.-Ing. Ilona Rolfes**  
Ruhr-Universität Bochum  
Bochum

**MinRat Dr. Dirk Tielbürger**  
Bundesministerium der Verteidigung (BMVg)  
Bonn

**Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek**  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Erlangen

**Prof. Dr.-Ing. Christian Waldschmidt**  
Universität Ulm  
Ulm

**Winfried Wetjen**  
OHB-System AG  
Bremen

# Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

## Der zentrale Partner für Wirtschaft und Wissenschaft, Politik und Gesellschaft

Das Fraunhofer FHR bildet seit 2017 zusammen mit weiteren zehn Instituten des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik sowie den beiden Instituten FBH und IHP der Leibniz-Gemeinschaft die standortübergreifende Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, kurz FMD. Erstmals bündeln hier 13 Institute der beiden Forschungseinrichtungen Fraunhofer und Leibniz unter einem virtuellen Dach ihre Expertise und bringen somit eine neue Qualität in die Erforschung 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 Infrastrukturviefalt an den Instituten dazu bei, dass Deutschland und Europa ihren Spitzenplatz in Forschung und Entwicklung weiter ausbauen.

## Übergang in den Regelbetrieb

Bis Ende 2020 befand sich die FMD in der Aufbauphase. Die umfangreichen Investitionen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in die Modernisierung der Institute konnten Ende 2020 / Anfang 2021 bis auf wenige, durch die Covid19-Pandemie bedingte, Verzögerungen abgeschlossen werden.

Anfang 2021 startete die FMD mit der Zusammenlegung der beiden Geschäftsstellen von Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik und Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland und dem neuen Leiter der gemeinsamen Geschäftsstelle Dr. Stephan Guttowski in den verstetigten Betrieb. Diesen Übergang

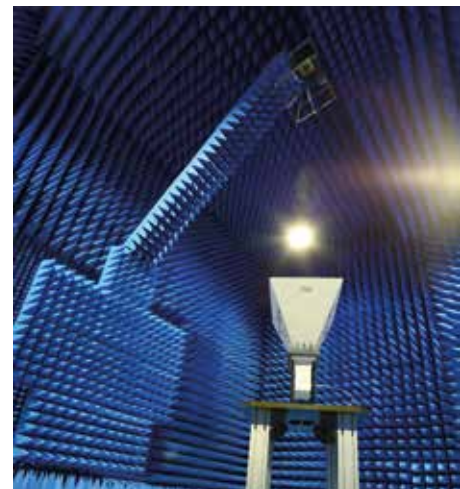
markierte die Digitalkonferenz »Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how« am 22. April 2021. Das Modell einer interdisziplinären und interorganisationalen Zusammenarbeit der deutschen Forschungslandschaft trägt bereits erste Früchte und soll zukünftig auch europäisch als Vorbild dienen.

## 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 sorgt die FMD für den Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die Geschäftsstelle in Berlin repräsentiert die FMD-Institute und agiert als zentraler Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die mikro- und nanoelektronische Forschung und Entwicklung in Deutschland und Europa.

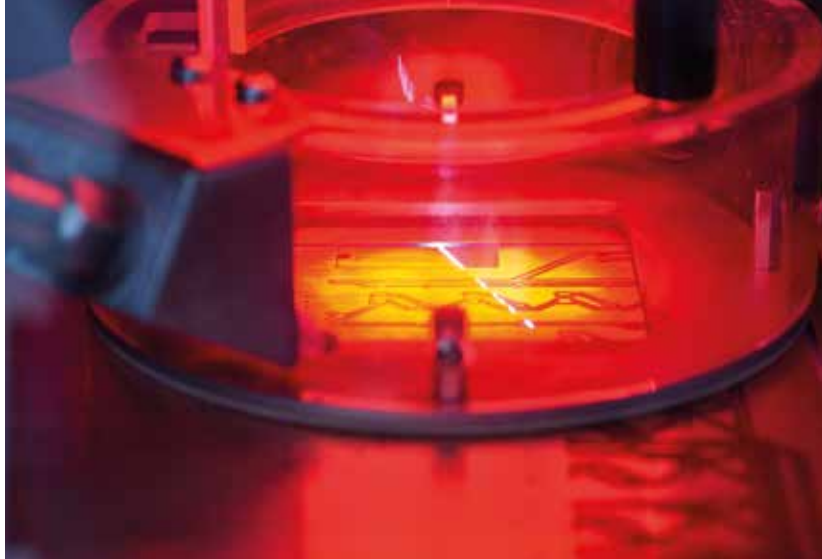
## Vielseitige Kooperationsmöglichkeiten

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. Eine wesentliche Möglichkeit der Kooperation besteht dabei in der Erprobung spezieller Konzepte



oben:  
Messkammer zur sphärischen Nahfeldabtastung von komplexen Antennensystemen.

unten:  
Drucker - basierend auf selektivem Lasersintern für Polymere mit einem Bauvolumen von 340mm x 340mm x 600mm.



*Die Laserfräse ist Teil der Rapid-Prototyping-Kette und fräst hochintegrierte Strukturen in eine Platine, die für die Entwicklung von mmW-Systemen kurzfristig und zügig gebraucht wird.*

und Lösungen aus der Grundlagenforschung auf den Anlagen der Institute der FMD, um so ein besseres Verständnis hinsichtlich ihrer Eignung in stärker anwendungsorientierten Umfeldern zu erlangen.

### Antennenmesskammer für komplexe Radarsysteme

Eine der Schlüsselkompetenzen, die das Fraunhofer FHR in die FMD einbringt, ist die Antennenmesstechnologie. Welche Eigenschaften haben Antennen für Radarsysteme – wie sieht etwa ihre Abstrahlcharakteristik aus? Eine Antennenmesskammer, die im Rahmen der FMD angeschafft wurde, ermöglicht künftig exakte Untersuchungen von Einzel- und Gruppenantennen im Frequenzbereich von 300 Megahertz bis 50 Gigahertz. Die Kammer selbst ist fertiggestellt und befindet sich bereits im Testbetrieb. Aktuell wird noch am »Range Assessment« gearbeitet – also an der Überprüfung des Testfelds. Dabei wird die Messkammer nach vorgegebenen Kriterien charakterisiert, um die Qualität der Messungen belegen zu können. Auch kleinste Antennen können am Fraunhofer FHR neuerdings mit FMD-Infrastruktur analysiert werden: Etwa On-Chip-Antennen, also ein bis zwei Millimeter kleine, auf einem Chip integrierte Antennen.

### Additive Fertigung von Hochfrequenzplatinen

Eine weitere Neuanschaffung adressiert die additive Fertigung von Hochfrequenzstrukturen: Es handelt sich um Metalldrucker und Kunststoffdrucker im industriellen Maßstab. Während 3D-Drucker, wie man sie von zuhause kennt, nur kleine Strukturen und geringe

Stückzahlen fertigen können, erlauben diese Drucker die Herstellung von bis zu einem Kubikmeter großen Volumen. Eine weitere Besonderheit: Mit dem Metalldrucker lassen sich auch Hohlleiterstrukturen drucken. Auch der Kunststoffdrucker eröffnet zahlreiche neue Möglichkeiten: Etwa das Drucken von Antennenstrukturen, Linsen und Gehäusen.

### Prototypen von Platinen kurzfristig herstellen & testen

Über die Investitionsmittel der FMD wurden unter anderem Laserfräsen, Placer und Bonder angeschafft, die eine schnelle Herstellung von Prototypen ermöglicht. Damit lassen sich sowohl Teilsysteme als auch komplette Radarsysteme aufbauen. Zur Testung der Teilsysteme werden die Platinen mit Hilfe eines On-Wafer-Messplatzes direkt innerhalb der Schaltungen im Hochfrequenzbereich bis 500 GHz vermessen. Durch den FMD-Gerätepark am Fraunhofer FHR können diese Teilsysteme in fortgeschrittenen Entwicklungsschritten für ihren Einsatzzweck bis einem Terahertz vermessen werden. Unter anderem wird hierzu eine echoarme Messkammer genutzt, die für Tests ab acht Gigahertz verwendet werden kann. Beispielsweise kann dadurch die Funktionsfähigkeit von aufgebauten Radar-Front-Ends anhand von Testobjekten überprüft werden.

Mit Hilfe unterschiedlicher Software lassen sich die Messgeräte gezielt mit den gewünschten Parametern ansteuern und auf der Empfangsseite auswerten. Dadurch kann das Fraunhofer FHR verschiedene Einsatzszenarien für die Teilsysteme simulieren und direkt auf bestimmte Eigenschaften wie der Signallinearität testen.



*E-Ebenen-Sektorhorn mit stufenförmiger Anpassung an die Freiraumwellenimpedanz für V- und D-Band.*

**Forschungsfabrik  
Mikroelektronik**  
Deutschland

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

### Kontakt

Daniel Behrendt, MBA  
+49 151 120 101 64  
daniel.behrendt@  
fhr.fraunhofer.de

# Zukunftsthemen: Gute Startposition aus der Corona-Krise

Die Corona-Pandemie hinterlässt Spuren in der Industrie und damit auch in der Fraunhofer-Gesellschaft. Um die Auswirkungen von Lockdown und Co. abzumildern, verfolgte die Fraunhofer-Gesellschaft eine mit dem BMBF abgestimmte Strategie des Kompetenz- und Kapazitätserhalts, in dessen Rahmen Programme zur Förderung von Zukunftsthemen aufgesetzt wurden.

Die Corona-Pandemie stellt nicht nur die Gesellschaft, sondern auch die Industrie vor große Herausforderungen. Die Prognosen für das Jahr 2021 zeigen über alle Fraunhofer-Institute hinweg ein ermutigendes Bild. Trotzdem rechnen etliche Institute mit erheblichen Wirtschaftsertragsrückgängen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF reagierte mit einem umfassenden Konjunkturprogramm, in dessen Rahmen auch eine Förderlinie »Unterstützung anwendungsorientierter Forschung für außeruniversitäre Forschungseinrichtungen« aufgelegt wurde. Die von Fraunhofer beantragten Zuwendungen wurden zukunftsorientiert investiert: Über das Innopush-Programm finanzierte Fraunhofer gezielt Zukunftsthemen, um einen kraftvollen

Start der Industrie aus der Krise zu unterstützen. 30 Projekte erhielten eine einjährige Förderung mit einem gesamten Volumen von rd. 73 Mio €, der Startschuss fiel am 1. Februar 2021 – so auch für drei Projekte, an denen sich das Fraunhofer FHR beteiligt.

## **Terahertz-Sprint: Terahertz-Technologien für Kommunikation und Sensorik**

Ein Erfolgsbeispiel der besonderen Art war das Projekt »Terahertz-Sprint – Terahertz-Technologien für Kommunikation und Sensorik«, dessen Federführung beim Fraunhofer FHR lag und an dem weiterhin die Fraunhofer-Institute ENAS, HHI, IAF, IMS, IAF, IPMS, ITWM und IZM beteiligt waren. Zwar war das Projekt eigentlich – wie alle Innopush-Projekte – auf ein Jahr ausgelegt. Doch schlug das Konzept so gut ein, dass das BMBF stattdessen nach bereits drei Monaten Laufzeit eine größere Förderung aufsetzte: Mit dem Verbundprojekt T-KOS, kurz für »Terahertz Technologien für Kommunikation und Sensorik«, und einem Fördervolumen von fast zehn Millionen Euro. T-KOS läuft bis Ende März 2022, mit Unterstützung der Geschäftsstelle der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD), neben den genannten Fraunhofer-Instituten beteiligen sich auch die Leibniz-Institute FBH und IHP an dem Projekt. Anders gesagt: Das Ziel des Projekts, Nachfolgeprojekte zu akquirieren, wurde im Rekordtempo erreicht.

Doch zurück zum Innopush-Projekt Terahertz-Sprint, hier verfolgte das Konsortium drei große Themen: die Terahertz-Kommunikation, das optische Terahertz-Imaging und der Aufbau eines industrietauglichen, multistatischen Terahertz-Bildgebungssystems. Das Fraunhofer FHR brachte seine Expertise vor allem im Bereich des Bildgebungssystems ein:

*links:*

*Im Projekt HALQ drehte sich alles um halbleiterbasiertes Quantencomputing.*





Mit der Entwicklung einer Zeilenkamera, mit der sich Produktionsprozesse bei 300 Gigahertz zerstörungsfrei und in Echtzeit überwachen lassen – samt entsprechender Signalverarbeitung auf Basis von Künstlicher Intelligenz. Trotz der kurzen Projektlaufzeit konnten erfolgreich Teilergebnisse erreicht werden, sie fließen in das Verbundprojekt T-KOS ein.

### **RuLe: Resilienz urbaner Lebensräume**

Die Resilienz urbaner Lebensräume gegen schädliche Einflüsse wie Klimawandel, Naturkatastrophen und Terrorangriffe durch Technologien, Konzepte und Strukturen zu steigern, hatte das Projekt RuLe zum Ziel. Ursprünglich sollte das Vorhaben über das interne Programm »Leitprojekte« gefördert werden, welches jedoch im Zuge der Pandemie gestoppt wurde. Erfreulicherweise konnte das Konsortium schließlich über das Innopush-Programm Mittel akquirieren. Auch hier lag die Federführung beim Fraunhofer FHR, zudem brachten die Fraunhofer-Institute IMS, LBF, IML, FKIE, INT und IAO ihre Expertise ein. Im Fokus standen vor allem die Katastrophen Tunnelbrand und Starkregenereignis.

Fragestellungen, wie sich die Versorgungspfade nach einem Tunnelbrand aufrechterhalten können, standen dabei im Fokus des Projekts. (siehe Kapitel Sicherheit)

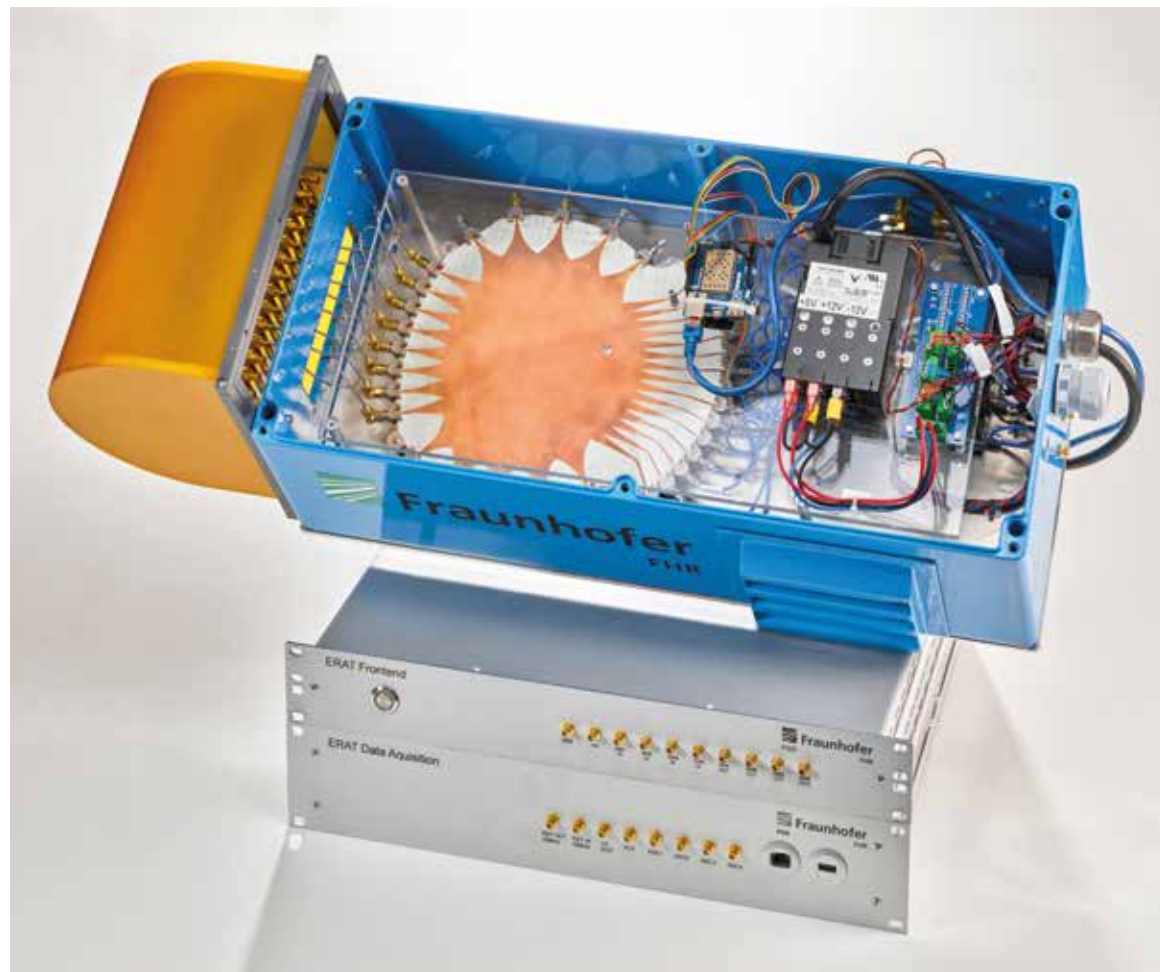
### **HALQ: Halbleiterbasiertes Quantencomputing**

Beim dritten Innopush-Projekt, das am Fraunhofer FHR lief, drehte sich unter dem Projektnamen HALQ alles um das halbleiterbasierte Quantencomputing. Die Federführung lag beim Fraunhofer IPMS. Zwar gibt es bereits verschiedene Ansätze für das Quantencomputing, derzeit existieren in Deutschland jedoch nur wenige Realisierungen, die über den Laboraufbau hinausgehen. Diese Lücke sollte das Projekt schließen: Ziel war es, eine übergreifende Plattform zu entwickeln, mit der sich Qubit-Konzepte bewerten und integrieren lassen. Eine der Fragestellungen war, wie sich die Modelle für die elektronischen Schaltungen ändern, wenn diese nicht bei Raumtemperatur oder moderaten Temperaturen betrieben werden, sondern bei vier Grad Kelvin – also knapp über dem absoluten Nullpunkt.

*Starkregenereignisse können die Infrastruktur von Städten bedrohen.*

#### **Kontakt**

Dr.-Ing. Dirk Nüßler  
+49 228 9435-550  
dirk.nuessler@  
fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Verteidigung

Das Geschäftsfeld Verteidigung des Fraunhofer FHR bietet große Kompetenzen rund um Radartechnologien, die von der Bundeswehr und der wehrtechnischen Industrie gerne genutzt werden.

- Bei Fragen der Verteidigung ist Radar eine Schlüsseltechnologie – klassische Einsatzgebiete sind Luftraumüberwachung und bildgebende Fernaufklärung. Hier unterstützt das Geschäftsfeld Verteidigung unter anderem die Bundeswehr mit seiner Kompetenz.
- Auch im Nahbereich können Radartechnologien sinnvoll sein, etwa zum aktiven Schutz von Militärfahrzeugen.
- Ist eine verdeckte Aufklärung vonnöten, bietet sich passives Radar an, bei dem man vorhandene Radiowellen detektiert. Im Geschäftsfeld Verteidigung wurde das erste passive System zur Luftüberwachung entwickelt und in Deutschland kommerzialisiert.
- Auch im Bereich des kognitiven Radars, das seine Parametrisierung selbst vornimmt, konnten erste Ergebnisse erzielt werden.

# Radar im Zeichen der Verteidigung

**Aufklärung in Krisengebieten, Überwachung des Luftraums, Schutz von militärischen Fahrzeugen: Geht es um Verteidigung, ist Radar eine Schlüsseltechnologie – schließlich ermöglicht sie es, Objekte radiobasiert zu detektieren und zu vermessen.**

## Luftraumüberwachung und bildgebende Fernaufklärung

Die im Geschäftsfeld Verteidigung entwickelten Radarsysteme überwachen den Luftraum zum einen von der Erde aus – die Radarsysteme schauen dabei vom Boden in die Luft. An Flugzeugen oder Satelliten befestigt überwachen Radarsysteme Luft-, See- und Landräume. Über bildgebende Fernaufklärung lassen sich Gebäude und andere statische Objekte ebenso vermessen wie bewegte Objekte, etwa Autos. Auch Zielklassen werden erfasst: In der Luft werden dabei etwa Hubschrauber, Raketen oder ähnliches unterschieden, am Boden lassen sich z.B. Fahrzeugklassen unterscheiden. Ein Trend, der sich im Radarbereich abzeichnet: Es werden zunehmend höhere Frequenzen verwendet. So lassen sich kleinere und leichtere Radarsysteme realisieren, ebenso wird es aufgrund des zunehmenden Mobilfunks und WLAN eng im gängigen Frequenzbereich. Das Geschäftsfeld Verteidigung spielt mit seinem 300-Gigahertz-Radar international in der ersten Liga.

## Weitere Radarentwicklungen für die Verteidigung

Auch im Nahbereich macht Radar Sinn: Wichtig kann das auf Drohnen oder anderen unbemannten Flugobjekten sein, ebenso auf Robotern oder auf Fahrzeugen. Auf Militärfahrzeugen kann per Radar ein möglicher Beschuss des Fahrzeugs detektiert werden: Ist z. B. eine Granate im Anflug, geht es um Hundertstel Sekunden, um einen aktiven Schutz einzuleiten.

Möchte ein anderes Land die Gegebenheiten hierzulande erkunden, ist das keineswegs gerne gesehen. Daher arbeitet das Geschäftsfeld Verteidigung daran, Radarsysteme mit entsprechenden Sendern zu täuschen und zu stören – und die Erkundung auf diese Weise zu erschweren bzw. zu verhindern. Um die eigene Beobachtung unauffällig zu gestalten und somit vor solchen Störungen zu schützen, bietet sich passives Radar an. Dabei sendet man die Signale nicht selbst aus, sondern nutzt die Radiowellen anderer, um den Luftraum zu überwachen – und zwar so, dass man sich selbst nicht bemerkbar macht. Es gelang die Markteinführung eines solchen Systems zur Luftraumüberwachung von Windkraftanlagen im Geschäftsfeld Mensch und Umwelt.

Ein noch recht neues Forschungsgebiet des Geschäftsfelds Verteidigung ist das kognitive Radar. Üblicherweise ist es komplex, Radarsysteme für den Einsatz optimal einzustellen. Künftig soll das Radar seine Parametrisierung über eine eigene Intelligenz selbst vornehmen und optimal an die Aufgabe anpassen. Denn es ist ein großer Unterschied, ob Radarabbildungen von Gegenden mit hohen Bergen oder über dem Meer mit starken Wellen gemacht werden sollen. Im Bereich eines solchen kognitiven Radars wurden bereits gute Ergebnisse erzielt, die auch schon in die Industrie transferiert werden konnten. Auch im noch recht frischen Forschungsgebiet des Designs von Metamaterialien wendet das Fraunhofer FHR bereits sein aufgebautes Know-how in ersten Projekten zur gezielten Radarrückstreureduktion an.

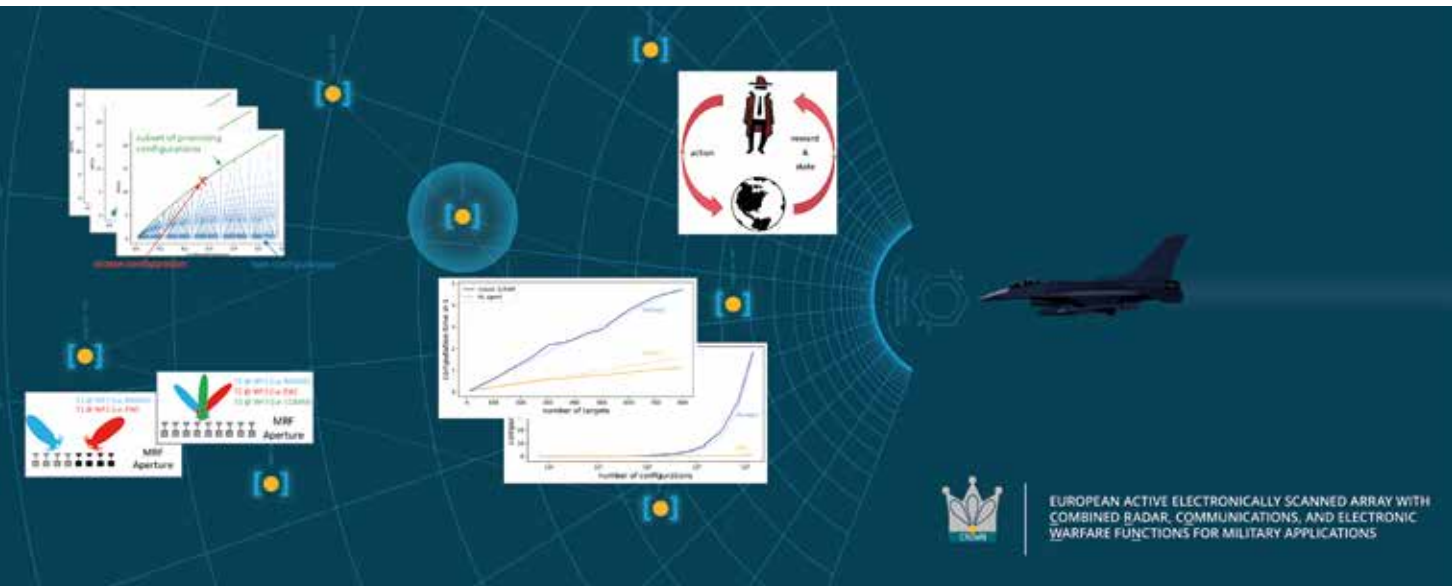
*Radarsystem zur Frequenzraumüberwachung und absichtlicher Störung fremder Systeme.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Verteidigung

Dr.-Ing. Udo Uschkerat  
+49 151 721 243 27  
udo.uschkerat@  
fhr.fraunhofer.de

# Radar plus elektronische Kampfführung



*CROWN verwendet maschinelle Lernverfahren, um verschiedene RF-Funktionen in zukünftigen Luftverteidigungssystemen zu vereinen.*

Gleichzeitig SAR-Bilder erstellen, mit der Bodenstation kommunizieren und den Feind stören – dies soll ein neuartiges Luftverteidigungssystem ermöglichen, das das Fraunhofer FHR derzeit gemeinsam mit verschiedenen europäischen Industrie- und Forschungspartnern entwickelt.

Eine eierlegende Wollmilchsau – anders gesagt, ein System, das gleich mehrere Funktionen übernehmen kann? An einem solchen arbeiten Forschende des Fraunhofer FHR im Auftrag der Europäischen Kommission im Rahmen der Preparatory Action on Defence Research (PADR) 2019, gemeinsam mit zehn europäischen Partnern aus Industrie und Forschungseinrichtungen. Im Projekt CROWN, kurz für »European active electronically scanned array with Combined Radar, cOmmunications, and electronic Warfare fuNctions for military applications«, entwickeln sie ein RF-System, das sowohl Radarfunktionen als auch Kommunikation und elektronische Kampfführung übernehmen kann. Bislang ist dies – zumindest in Europa – einmalig. Künftig könnte das System an einer Drohne befestigt oder in das Luftkampfsystem »Future Combat Air System FCAS« integriert werden und gleichzeitig mittels Radar ein Lagebild erstellen, mit befreundeten Plattformen kommunizieren und die Gegner stören. Um unabhängig von anderen Ländern zu sein, sollen alle dafür benötigten Teile aus Europa stammen – was derzeit noch eine Herausforderung darstellt.



Der erste große Meilenstein, den das internationale Forscherteam in diesem Jahr erreichen möchte, liegt darin aufzuzeigen, welche Ressourcen dafür nötig wären.

Die Forschenden am Fraunhofer FHR sind unter anderem für das Ressourcenmanagement zuständig. Denn moderne RF-Systeme sollen viele Aufgaben übernehmen, manche davon gleichzeitig. Das kann mit zeitlichen Problemen einhergehen, auch die Energieversorgung kann eine Herausforderung sein. So macht es beispielsweise wenig Sinn, neue Ziele im Luftraum zu suchen, wenn das System bereits bei den bekannten Zielen mit der Verfolgung nicht mehr hinterherkommt. Zunächst einmal arbeitet das Expertenteam daran, Verfahren zu entwickeln, die es ermöglichen, die Antenne in mehrere kleine Antennen, sogenannte Subaperturen, aufzuteilen, die parallel arbeiten. Dann jedoch reichen vorab aufgestellte Regeln nicht mehr aus, um das System sinnvolle Entscheidungen treffen zu lassen. Die Forschenden nutzen daher Methoden des Reinforcement Learnings, eine spezielle Form des Machine Learnings: Sie geben dem System Rückmeldungen zu getroffenen Entscheidungen und bringen ihm auf diese Weise bei, sich stetig zu verbessern. Eine weitere Herausforderung, der sich das Fraunhofer FHR widmet, liegt in der Realisation verschiedener Wellenformen der Signale. Dies soll verhindern, dass sich die von den Subaperturen ausgesendeten Signale gegenseitig stören.

Bis Ende 2023, so der Plan, möchte das europäische Team seine Entwicklung auf den Technology Readiness Level TRL 4 heben, also auf die Demonstratorebene. In einem Folgeprojekt soll dann ein TRL von 7 erreicht werden, was einem Prototyp entspricht.



This project has received funding from the European Union's Preparatory Action on Defence Research under grant agreement No 882407 [CROWN].

#### Projektkoordinator

- INDRA SISTEMAS S.A. (Spanien)

#### Industriepartner

- THALES (Frankreich)
- ONERA (Frankreich)
- HENSOLDT (Deutschland)
- SAAB AB (Schweden)
- LEONARDO S.P.A (Italien)
- ELETTRONICA S.P.A (Italien)

#### Universitäten und Forschungsorganisationen

- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZ-PHYSIK UND RADARTECHNIK FHR (Deutschland)
- TOTALFORSVARETS FORSKNING SINSTITUT, FOI (Schweden)
- TNO (Niederlande)
- BALTIC INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY (Litauen)

#### Kontakt

Dr. rer. nat. Pascal Marquardt  
+49 228 9435-79018  
pascal.marquardt@  
fhr.fraunhofer.de

## Passives Radar via Satellitensignal

Ein passives Radar der anderen Art entwickelt das Fraunhofer FHR derzeit mit dem System SABBIA 2.0: Statt terrestrische Sender für die Beleuchtung zu nutzen, blickt es auf die Signale, die von geostationären Satelliten abgegeben werden. Dabei kann es seine Arbeit auch von bewegten Plattformen wie Schiffen verrichten.

Üblicherweise nutzt man beim Radar Signale, die vom Radarsystem selbst abgegeben werden. Doch können diese Signale natürlich auch von feindlichen Systemen gesehen werden. Unauffälliger ist das passive Radar: Dabei nutzt man Fremdbeleuchter, etwa Radiosignale, die bereits in der Luft zur Verfügung stehen. Forschende des Fraunhofer FHR gehen dazu nun einen Schritt weiter: Statt auf terrestrische Beleuchter setzen sie mit dem System SABBIA 2.0 auf die Signale

geostationärer Satelliten, die für Fernsehsender ausgestrahlt werden. Die Vorteile: Zum einen sind diese Signale auch in Gebieten verfügbar, in denen es mit terrestrischen Signalen schlecht aussieht, beispielsweise Offshore. Zum anderen haben die Signale eine größere Bandbreite und damit eine höhere Entfernungsauflösung. Weltweit gibt es derzeit kein anderes System, dass so eine große Bandbreite an Signalen verarbeiten kann wie SABBIA 2.0.

### Passive Radare auf bewegten Plattformen

SABBIA 2.0 bietet eine weitere Besonderheit: Die Radare lassen sich auf einer bewegten Plattform anbringen, etwa auf einem Schiff – die eigene Bewegung wird kompensiert.





links:

Das SABBIA 2.0 System montiert auf eine Drehplattform.

rechts:

Das SABBIA 2.0 System bei der Aufnahme einer Drohnensignatur.

Die Basis dafür bildet ein Satellitenempfänger der deutschen Firma EPAK GmbH, der über zwei Antennen verfügt. Eine dieser Antennen schaut stets in Richtung Satellit, eine in Richtung Ziel. Denn, wie beim Passivradar üblich: Um ein Ziel entdecken zu können, ist eine Kreuzkorrelation zwischen dem Direktsignal und dem Echo des Ziels nötig.

Ein erster Schritt in Richtung Klassifizierung ist bereits gemacht: Über die Auflösung lassen sich die verschiedenen Rückstreu-Mechanismen entkoppeln und daraus weitere Informationen generieren. Derzeit erfolgt ein Testlauf auf dem Gelände des Fraunhofer FHR. Dabei befindet sich das Radarsystem auf einer Drehplattform mit einem Durchmesser von sechs Metern und behält ein festes Ziel im Visier, etwa einen LKW. Im Laufe des Jahres 2022 sollen dann auch Messungen auf einem Schiff folgen. Die Frequenzen, bei denen SABBIA arbeitet, sind deutlich höher als die von üblichem Passivradar – das System ist daher empfindlicher gegenüber dem Doppler- und dem Mikrodoppler-Effekt, bei dem sich Objekte wie Drohnen bzw. Teilobjekte wie die Rotorblätter bewegen. Drohnen aufzuspüren und zu klassifizieren, ist daher ebenfalls ein interessanter Anwendungsbereich für SABBIA 2.0. Künftig könnte das System auch die Signale der knapp 42.000 Starlink-Satelliten nutzen, die Elon Musk ins Weltall befördern möchte.

## Sabbia 2.0 in Kennzahlen

### Bandbreite:

- 600 MHz bei mehreren Polarisationen, 1,2 GHz bei einer einzelnen Polarisation

### Entfernungsauflösung (äquivalent monostatisch):

- 0,5 Meter bei mehreren Polarisationen, 0,25 Meter bei einer einzelnen Polarisation

### Frequenzen der verwendbaren Satellitensignale:

- 10,7-12,75 GHz

## Kontakt

Dr.-Ing. Diego Cristallini  
 +49 228 9435-585  
 diego.cristallini@  
 fhr.fraunhofer.de

## »Adleraugen-Radar«: Schnellste Blickrichtungswechsel im Überflug

**Hochauflösende Abbildungen, obwohl sich Radargerät sowie Ziel bewegen? Schnelle Wechsel der Blickrichtung? Möglich machen soll es ein neuartiges Radargerät.**

Ein Adler erreicht mit seinem Auge ein sehr hohes Auflösungsvermögen – selbst im Flug kann er die Bodengegebenheiten bestens im Blick behalten und äußerst schnell interpretieren. Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer FHR arbeiten derzeit daran, diese Leistung technisch nachzuempfinden: Mit einem Radargerät, das – an einem Flugzeug befestigt – den Boden nicht nur starr beobachten kann, sondern wie der Greifvogel über ein agiles Blickfeld mit hoher räumlicher Auflösung verfügt. So soll es seinen Blickwinkel schnell ändern können, um interessante Szenarien näher in Augenschein zu nehmen. Welche das sein können, soll zukünftig ein ebenfalls zu entwickelnder Algorithmus entscheiden.

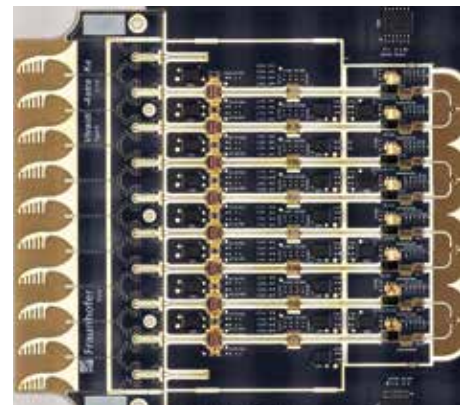
### **Hohe Auflösung und gleichzeitig Änderung der Blickrichtung**

Das Ziel: Ein multifunktionales Radar, das Bodenszenen mit hoher Auflösung scannen, sich darin bewegende Ziele entdecken, sie mit hoher Genauigkeit nachverfolgen und dazu die Sende- und Empfangskeule innerhalb von Mikrosekunden und äußerst präzise schwenken kann. Während klassische Radare zur Bodenbeobachtung hauptsächlich im X-Band arbeiten, setzen die Forscherinnen und Forscher bei dem neuen Radar auf das Ka-Band, dessen Frequenzen etwa um den Faktor vier höher liegen als im X-Band. Dazu kombinieren sie ein Synthetisches Apertur-Radar, kurz SAR, mit der Fähigkeit der Bewegzielentdeckung und -verfolgung (GMTI). Dazu sind hohe Systembandbreiten nötig: Denn

erst diese ermöglichen eine hohe Auflösung bei abbildenden Betriebsmoden – bereits jetzt liegen die erreichten Bodenauflösungen unter zwei Zentimetern mal zwei Zentimetern. Eine Herausforderung: Insbesondere bei Änderungen der Blickrichtung – die ja ein agiles Blickfeld ausmachen – treten bei hohen Signalbandbreiten Qualitätseinbußen auf, wobei der Radarstrahl von seiner eigentlichen Blickrichtung abweicht. Man spricht dabei auch von frequenzabhängigen Phasenverzerrungen oder Squint-Effekten. Neue Methoden in der Hardwareentwicklung können diese unerwünschten Effekte verhindern. Die entsprechenden Komponenten des Radarsystems, insbesondere im Antennen-Frontend, müssen so aufgebaut werden, dass eine trägheitslose, elektronische 2D-Strahlschwenkung möglich ist – der Strahl sich also mit höchster Genauigkeit sowohl horizontal als auch vertikal steuern lässt. Die Forscherinnen und Forscher wollen somit eine verzerrungsfreie Signalausbreitung in die verschiedenen Richtungen gewährleisten. Weitere Herausforderungen liegen in der Optimierung des Signal-Rausch-Abstandes und der zu erzielenden Reichweite – auch diese Punkte optimiert das Forscherteam im Rahmen des Projekts.

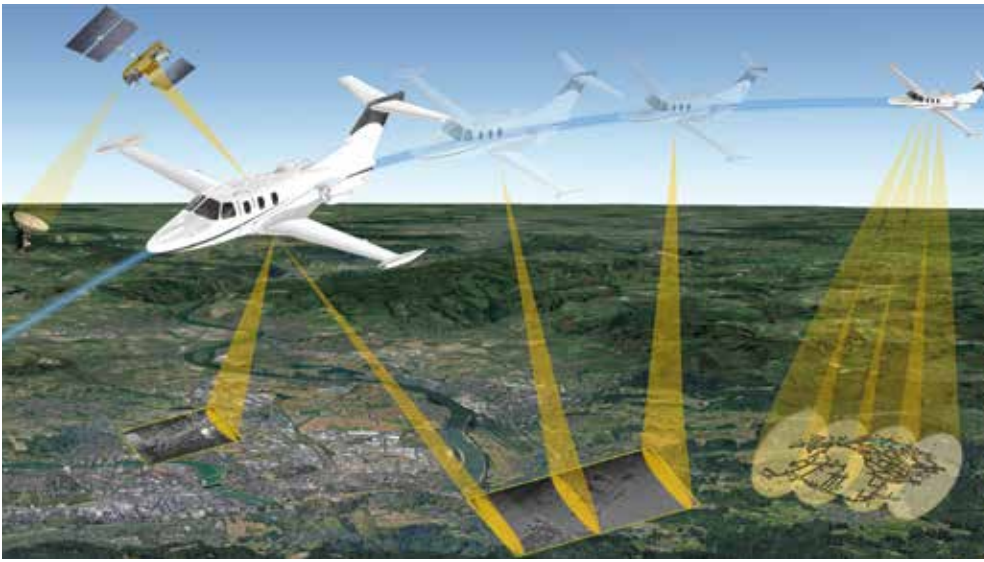
### **Klein und leicht**

Ein weiterer Aspekt – und die Intention, warum das Radargerät im Ka-Band arbeitet: Klassische X-Band-Radare sind vergleichsweise groß. Das Ka-Band ermöglicht verkleinerte und leichtere Antennen und Sensoren. Die Größe der Antennenapertur – also die Fläche, die Energie in den Raum abstrahlt – lässt sich durch den Übergang vom X-Band in das Ka-Band um 90 Prozent reduzieren. Wichtig ist das speziell beim Einsatz der multifunktionalen Radarsensoren auf kleinen bewegten



*oben:  
Antennenvermessung  
von Ka-Band Antennen  
mit hoher Bandbreite in  
Radarmesskammer.*

*unten:  
Multifunktionale Radarelektronik  
geeignet für kompakte  
Baugruppen.*



*Multifunktionales, luftgestütztes Radar mit agilem Wechsel der Blickrichtung für Bewegtzientdeckung-GMTI (rechts), hochauflösende SAR-Moden (Mitte r. und Mitte l.), Kommunikation mit hoher Datenrate (links). -Artist View.*

luftgestützten Plattformen wie Leichtflugzeugen und Drohnen, oder zukünftig auch in Verbänden von luftgestützten Plattformen, die in Schwarmanordnung Szenarien aus unterschiedlichen Richtungen beobachten. Zudem arbeitet das Forscherteam daran, die Abmessungen des restlichen Systems (Backend) an die verkleinerte Antennenapertur anzugleichen. Dies erfordert primär eine kompakte Gestaltung der Elektronik. Dabei stellen sich unter anderem auch Fragen der Wärmeentwicklung und des Thermalmanagements – schließlich wird Wärme aus kleinen Volumina schlechter abgeleitet. Entsprechende Konzepte dazu werden ebenfalls im Projekt untersucht.

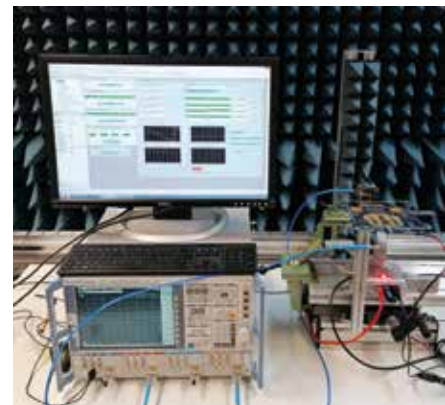
Grundlegend für eine solche Volumenreduktion sind integrierte Hochfrequenzchips für das Ka-Band und kompakte Aufbautechniken – bei gleichzeitiger Leistungssteigerung. Eine besondere Herausforderung liegt in der erhöhten Freiraumdämpfung für eine Signalausbreitung im Ka-Band gegenüber der im X-Band, welche die Reichweite des Radars bei gleicher Systemleistung reduziert. Wie lässt sich diese in ähnlichen Größenordnungen halten? Hier kommt wiederum die volumenreduzierte Sensorik ins Spiel: Da sich mehr Antennenelemente auf kleinerer Fläche unterbringen lassen, steigt die abgestrahlte Leistung pro Fläche – was dazu beiträgt, die Einbußen in puncto Reichweite zu kompensieren. Zusätzlich hilft auch das deutlich erhöhte Reflexionsvermögen von Bodenstrukturen während einer Beleuchtung mit Ka-Band Signalenergie, den Abstand zwischen Zielgebiet und Radar zu erhöhen. Auf der technischen Seite haben die Forscherinnen und Forscher bereits die Prototypen der Array-Module des Systems entwickelt, auch die Testumgebungen sind schon realisiert. Derzeit arbeiten sie am Aufbau eines Phased-Array Demonstrators,

und in einem nächsten Schritt soll die Serienfertigung der Frontendkomponenten folgen.

### Interessant auch für die Kommunikation

Was die Anwendungen angeht, so eignet sich das neue Radar vor allem für die Erkundung von Bodengegebenheiten aus der Luft – schließlich liegt eine abbildende Anwendung aufgrund der hohen Auflösungsfähigkeit im Fokus. Doch behalten die Forscherinnen und Forscher auch andere Anwendungen im Blick: So lässt sich die Art der elektronischen Strahlrichtungssteuerung beispielsweise auch für Kommunikationssysteme verwenden.

Interessant ist dies insbesondere für künftige elektronisch schwenkende Breitbandantennen, die die Breitbandkommunikation zwischen Boden und Satelliten sicherstellen. Oder auch für die Kommunikation eines Flugzeuges mit dem Boden, etwa über einen Satellitenlink: Über kompakte Elektronik, die beispielsweise im Rumpf untergebracht ist, hätte ein kombiniertes Kommunikations- und Radarsystem des Flugzeugs wechselweise verschiedene Satelliten im Blick, die über den Himmel verteilt sind – auch hier sind immer wieder sehr schnelle Änderungen des Blickwinkels vonnöten. Schnell schwenkbare agile Blickrichtungswechsel der Beobachtungsantennen sind ebenfalls gefragt, wenn der Luftraum vom Boden aus überwacht werden soll. Ein mögliches Szenario ist ein Drohnenradar zur Erhöhung der Sicherheit an einem Flughafen. Die Untersuchungen, die das Forscherteam im Projekt durchführt, liefern quasi die Vorarbeit zu neuartigen Anwendungen von Radaren für und mit Kommunikationsaufgaben.



*Kalibrierung von Sendemodulen für das Ka-Band Phased-Array.*

### Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Olaf Saalmann  
+49 228 9435-395  
olaf.saalmann@  
fhr.fraunhofer.de

## 3D-gedruckte Antenne: Hohe Komplexität – einfach hergestellt

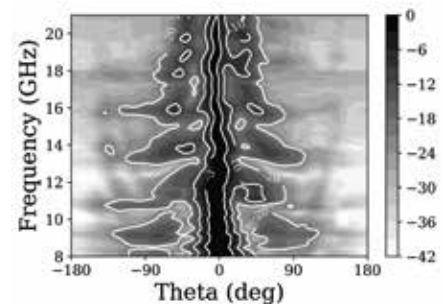
**Leistungsstarke Radarsysteme an Bord unbemannter Flugzeuge sowie in Fahrzeugen aller Art erfordern möglichst leichte und kompakte Systeme. In diesem Sinne entwickeln die Forschenden am Fraunhofer FHR radarkompatible 3D-gedruckte wellenleiterbasierte Antennen-Array-Systeme, die deutlich kompakter und einfacher herzustellen sind als ihre Pendants aus Metall.**

Sei es in der Verteidigung, sei es im Bereich von Satelliten, Medizin oder der Fahrzeugindustrie: Die nächste Generation von Radargeräten erfordert mehr Bandbreite, Reichweite und Leistung – was nur mit hochkomplexen Lösungen erreichbar ist – während sie gleichzeitig leicht, kompakt und kostengünstig sein sollen. Klingt kaum realisierbar? Bisher drängte sich dieser Eindruck auf: Bestehen derzeitige Ansätze schließlich größtenteils aus schwerem Metall, sind zudem kostenintensiv und erfüllen die Anforderungen oftmals nur mäßig. Auch ist der Herstellungsprozess extrem aufwändig, schließlich bestehen wellenleiterbasierte Antennenarrays in der Regel aus vielen kleinen Teilen.

Einen Ausweg bietet die 3D-Drucktechnologie. Auf diese setzen Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR bei der Entwicklung eines neuen Waveguide-Antennenarrays,

bestehend aus vier strahlenden Elementen mit einer hohen Bandbreite. Der Array stammt aus dem 3D-Drucker und besteht aus Kunststoff – die resultierenden Antennen-Arrays sind daher wesentlich leichter als ihre Pendants aus Metall. Ein weiterer Clou: Die Antenne lässt sich trotz des komplexen Aufbaus in nur einem Schritt fertigen, was die Herstellung deutlich kostengünstiger macht. Auch lassen sich kompaktere Bauweisen ohne Einbußen bei der Systemeffizienz realisieren.

Da der Kunststoff selbst nicht die elektromagnetischen Eigenschaften aufweist, die eine Antenne benötigt, galvanisieren die Forscherinnen und Forscher ihn mit einer Schicht aus Kupfer und Nickel. Die einzigartigen Eigenschaften des entwickelten Verfahrens ermöglichen es, die Metallisierungsschicht nur auf die äußere Oberfläche aufzubringen – dies vereinfacht den Herstellungsprozess um ein Weiteres und macht eine Innenbeschichtung von Teilen überflüssig. Das Kupfer sorgt für die elektromagnetischen Eigenschaften, das Nickel stabilisiert diese Schicht und schützt sie vor Oxidation und Korrosion. Das Ergebnis kann sich bereits jetzt sehen lassen: Die 3D-gedruckte Antenne, die in einem Frequenzbereich von 8 GHz bis 21 GHz arbeitet und eine Richtwirkung von 17 dBi aufweist, wurde bereits erfolgreich am Fraunhofer FHR getestet. In weiteren Entwicklungsschritten steht unter anderem die Verbesserung der Verluste auf der Agenda. Zu diesem Zweck suchen die Forscher aktiv nach neuartigen Herstellungsansätzen und neuen Materialien, die sie auf ihre Designs anwenden können.



*oben:*

*Prototyp, der mit 3D-Drucktechnologie hergestellt und durch Galvanisierung metallbeschichtet wurde (Gesamtvolumen 8x8x9 cm<sup>3</sup>).*

*unten:*

*Die Messergebnisse zeigen das ko-polare Strahlungsdiagramm in der Theta-Ebene im Vergleich zur Frequenz. Farbskala in dB.*

### Kontakt

Dr. Diego Betancourt  
+49 228 9435-370  
diego.betancourt@  
fhr.fraunhofer.de

# Gebündeltes Wissen: Materialien für Hochfrequenzanwendungen

**Auch im Informationszeitalter ist es mitunter nicht leicht, an benötigte Daten heranzukommen: So etwa an die elektromagnetischen Materialparameter, die für Antennen in der Hochfrequenztechnik benötigt werden. Ein webbasierter Katalog soll diese Parameter erstmals aus einer Hand bereitstellen.**

Die Palette der Materialien, die für Anwendungen in der Hochfrequenztechnik genutzt werden können, ist groß: Es kommen verschiedene magnetische, dielektrische, leitfähige und absorbierende Materialien in Betracht. Jedes einzelne hat dabei gänzlich eigene Materialparameter. Insbesondere bei Simulationen von Antennenstrukturen, Speisernetzwerken und Plattformen für Hochfrequenzanwendungen müssen diese Parameter exakt bekannt sein, ansonsten wären die Simulationsergebnisse nicht sonderlich akkurat. Eine weitere Schwierigkeit: Die Materialparameter ändern sich mit der Frequenz – je nach Material mal stärker, mal moderater. In Simulationswerkzeugen, Veröffentlichungen und Datenblättern lassen sich nur begrenzt Informationen über das elektromagnetische Verhalten der Materialien finden. Informationen zu neuen Materialien sind aktuell noch kaum verfügbar. Zudem sind pro Material meist nur wenige Eckwerte angegeben – für die Parameter bei anderen Frequenzen bleibt nur eine Extrapolation, die jedoch stark von der Realität abweichen kann. Ähnliches gilt bezüglich des Verhaltens der Materialien bei variierender Temperatur.

## Vermessung der Parameter am Fraunhofer FHR

Am Fraunhofer FHR gibt es die Möglichkeit, die Kennparameter der einzelnen Materialien

zu messen, mit verschiedenen Aufbauten und in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Doch sind solche Messungen ein aufwändiges und kostenintensives Unterfangen: Zunächst muss das Gerät kalibriert, dann der Aufbau mit weiterem Material validiert werden, bevor das Material mehrmals vermessen werden kann, um die Messunsicherheit abschätzen zu können.

## Webbasierter Katalog

In einem Web-basierten Katalog tragen die Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR all die ermittelten Parameter samt Messunsicherheit erstmalig zusammen – das Projekt läuft bis Mitte 2024. Das Grundgerüst der Datenbank steht bereits, ebenso der Prototyp eines Webinterfaces. Auch sind bereits die Parameter von 15 Materialien eingetragen, Tendenz stetig steigend. Derzeit läuft die Datenbank noch auf einem Testserver, in den kommenden Monaten soll sie für das gesamte Fraunhofer FHR zugänglich gemacht werden. Die Forschenden können dann unter anderem Materialien miteinander vergleichen oder gezielt nach Materialien mit bestimmten Kennwerten suchen. In einem weiteren Schritt sollen auch Metamaterialien mit in den Katalog aufgenommen werden: Materialienkompositionen, die durch ihre spezielle Zusammensetzung Welleneffekte verursachen. Weitere Kandidaten für die Datenbank sind 3D-gedruckte Materialien, hier sollen die Parameter sowohl für das Rohmaterial als auch für das verdruckte Material – in Abhängigkeit des Druckertyps sowie der Prozessparameter – angegeben werden. Langfristig ist denkbar, die Plattform dem europäischen Markt zur Verfügung zu stellen.



*Weboberfläche der Materialdatenbank. Hier können Materialeigenschaften angesehen oder heruntergeladen werden.*

## Kontakt

Andrej Konforta, M. Eng.  
+49 228 9435-79025  
andrej.konforta@  
fhr.fraunhofer.de

## Erweiterter Blickwinkelbereich für Gruppenantennen

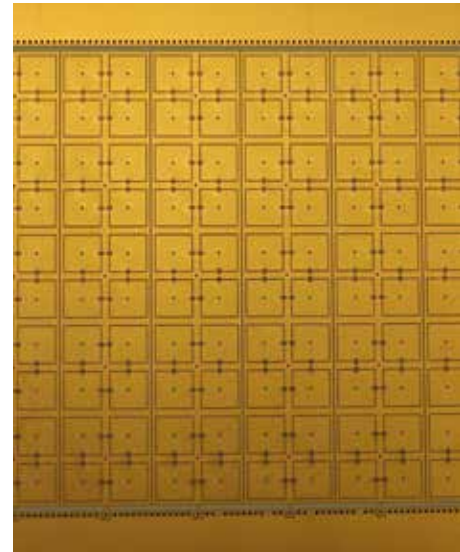
**Der Blickwinkelbereich von Gruppenantennen ist physikalisch bedingt eingeschränkt. Durch elektronisch abstimmbare Metamaterialien könnte er sich langfristig erweitern lassen.**

Produktentwickler wünschen sich möglichst viele Freiheitsgrade bei Entwicklung und Design. Metamaterialien könnten diese Freiheitsgrade künftig erweitern: Deren Eigenschaften und Frequenzcharakteristik lassen sich, anders als bei herkömmlichen Materialien, von den Entwicklern selbst einstellen – möglich sind dabei auch Werte, die in der Natur nicht vorkommen. Herstellbar sind beispielsweise Materialien, in denen sich Wellen in bestimmten Frequenzbereichen nicht ausbreiten können. Denn Metamaterialien bestehen aus Zellen, die z. B. mit Leiterplattentechnologie oder 3D-Druck hergestellt werden und die deutlich kleiner sind als die Wellenlänge.

Einen weiteren Freiheitsgrad schaffen Metamaterialien unter anderem bei der Entwicklung von Antennen: Über sie lassen sich zum Beispiel gezielt spezielle Abschirmeigenschaften oder Wellendämpfungseigenschaften realisieren. Doch wie lassen sich militärische Radarsysteme über Metamaterialien verbessern? Dies untersucht das Fraunhofer FHR gemeinsam mit der spanischen Firma Tafco Metawireless S.L. und der ebenfalls spanischen Universidad Pública de Navarra im

Projekt METALESA II für die European Defence Agency. Das Fraunhofer FHR widmet sich dabei Gruppenantennen, die sich aus zahlreichen kleineren Antennen zusammensetzen und deren strahlende Oberfläche gebogen ist. Üblicherweise wird der Blickwinkel solcher Antennen elektronisch angepasst, doch ist der elektronische Schwenkbereich sehr eingeschränkt. Über elektronisch abstimmbare Metamaterialien, so die Hoffnung, könnte sich dieser Schwenkbereich erweitern lassen. Die Eigenschaften dieser speziellen Metamaterialien lassen sich via Gleichspannung über die Kapazitäten der verwendeten Varactor-Dioden ändern. Während das Forscherteam im Vorgängerprojekt METAFÖRE bereits eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und Technologieprognosen erstellt sowie in METALESA I eindimensionale Leitungsmetamaterialien und Metamaterialien, die Wellen bestimmter Wellenlängen unterdrücken sollten, in Gruppenantennen eingebracht hat, arbeitet es nun mit elektronisch abstimmbaren Metamaterialien. Kleinere Leiterplatten aus dem Fraunhofer FHR haben die Forscherinnen und Forscher in einem Testaufbau bereits erfolgreich vermessen, jetzt sollen größere Flächen folgen.

In weiteren Schritten wird sich das Forscherteam des Fraunhofer FHR den Herausforderungen widmen, die bei der Kombination von Antennen und Metamaterialien derzeit noch bestehen. So soll die Bandbreite von Antennen möglichst groß sein – der Resonanzeffekt der Metamaterialien steht dem jedoch bislang im Wege. Zudem büßt die Antenne noch zu viel Leistung ein, wenn das Signal die Metamaterialien durchdringt.



*Die Metasurface ist elektronisch abstimmbar - sie soll den elektronischen Schwenkbereich konformer Gruppenantennen vergrößern.*

### Kontakt

Taher Badawy, M. Sc.  
+49 228 9435-334  
taher.badawy@  
fhr.fraunhofer.de



# Multistatisches Radar: Timing-Alternative bei gestörtem GPS-Empfang

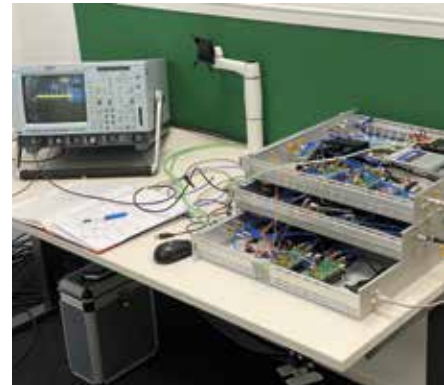
**Weltweit verlässt man sich auf GPS-Signale – doch sind diese anfällig für Manipulationen. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR entwickeln eine Timing-Alternative für den multistatischen Radarbetrieb.**

Ohne Navigationssoftware wären viele Menschen aufgeschmissen – insbesondere in fremden Städten verlässt man sich nur zu gern auf die freundliche Stimme, die einem den Weg weist. Auch abseits des privaten Weg-Findens ist die Welt abhängig von GPS-Signalen und Satellitennavigation, stellen diese doch sehr akkurate Daten zu Position und Zeit zur Verfügung. Doch gibt es auch ein »Aber«: GPS-Signale sind sehr leicht zu stören und auszuschalten – man spricht dabei von Jamming – oder aber zu manipulieren, so dass das System sich an einem anderen Ort wähnt. Vor allem für kritische Operationen gilt daher: GPS alleine ist nicht verlässlich. Allerdings hapert es derzeit noch an Alternativen.

An einer solchen arbeiten Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer FHR: Die Problematik zeigt sich bei multistatischem Radar. Dabei befinden sich Sende- und Empfangsstation an verschiedenen Stellen, etwa auf zwei Gebäuden oder auf bewegten Plattformen wie Schiffen, Flugzeugen oder Drohnen. Der Vorteil von multistatischem gegenüber herkömmlichem Radar: Durch die verschiedenen Standorte können Mehrinformationen gewonnen werden, beispielsweise lassen sich Stealth Flieger entdecken. Der Effekt ist vergleichbar mit den menschlichen Augen, die durch ihre verschiedene Position räumliches Sehen erlauben. Auch ist multistatisches Radar robuster gegen feindliche Störungen und Gegenmaßnahmen und empfindlicher gegenüber kleinen Zielen. Doch ist es auch wesentlich komplexer: Vor allem müssen Zeiten und Frequenzen synchronisiert werden – und zwar auf wenige Nanosekunden, mitunter sogar

auf Sub-Nanosekunden genau. Zudem muss die Entfernung zwischen den Plattformen exakt bekannt sein. Was statische Plattformen angeht, ist das kein großes Problem. Schwierig wird es allerdings bei bewegten Plattformen. Um die Distanz zwischen den beiden bewegten Radarsystemen zu bestimmen und deren Uhren miteinander zu synchronisieren, sendet eine Hauptuhr via Zwei-Wege-Zeitübertragungstechnik ihre Zeit an eine oder mehrere Nebenuhren. Entwickelt wird also eine Peer-to-Peer-Lösung, bei der sich die Plattformen in einem geschlossenen System synchronisieren. Ein Drittsystem wie eine Bodenbasisstation ist unnötig.

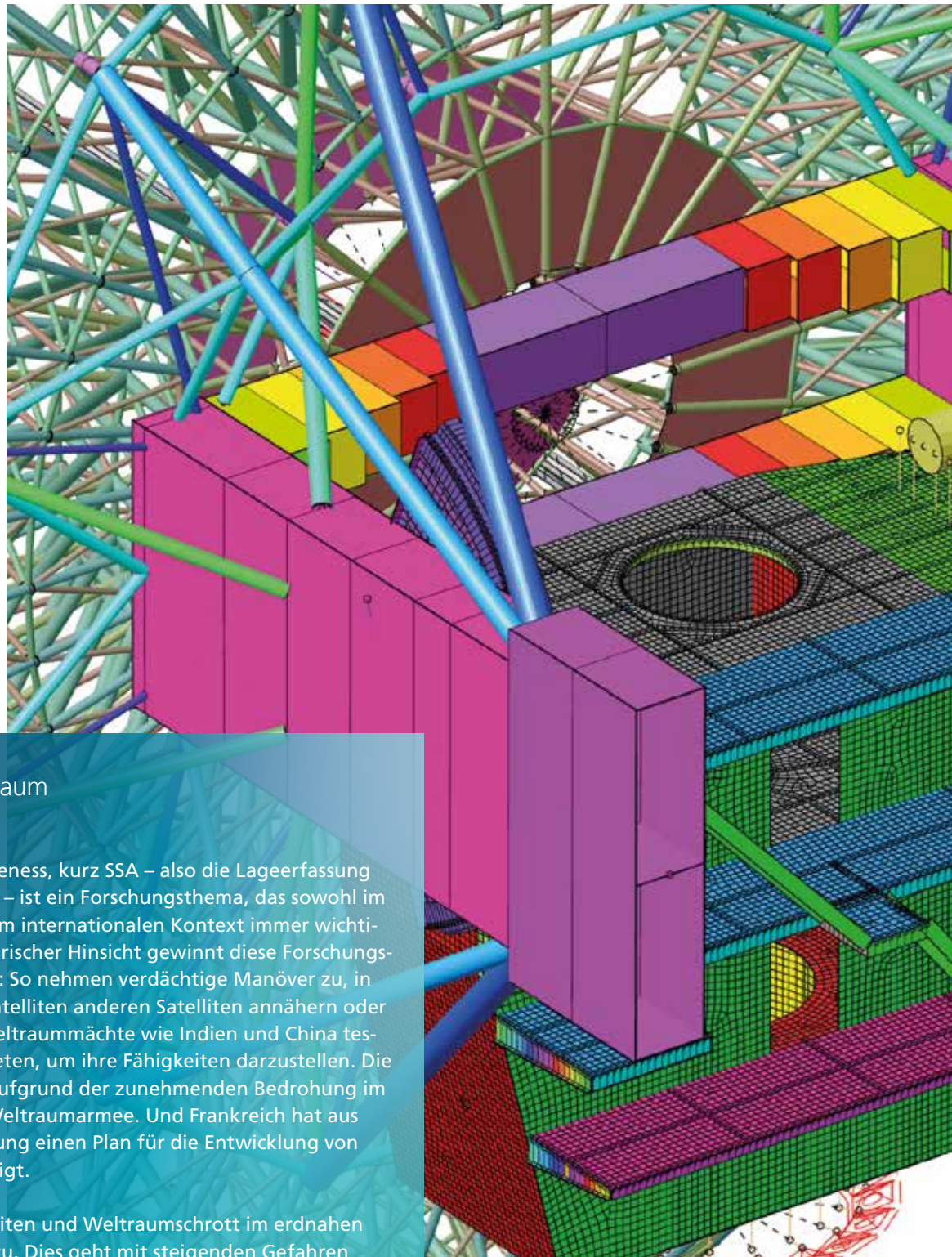
Nun braucht es eine Testumgebung, um diese Idee zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Die Systeme auf zwei Flugzeuge zu schnallen, übersteigt bei Weitem den Kostenrahmen, auch der Aufwand ist deutlich zu hoch. Die Forschenden haben daher eine Alternative geschaffen: Sie verbinden die beiden Uhren, die sich ja eigentlich auf zwei bewegten Plattformen befinden sollten, mit Kupferkabeln, während ein Algorithmus den Systemen vorgaukelt, dass sie sich bewegen. Auf diese Weise hat das Team die Möglichkeit, sich bewegende Plattformen zu untersuchen, während diese in Wirklichkeit still im Labor stehen. Langfristig plant das Team, auch relativistische Effekte auf dieser Plattform mit einzubeziehen. Auch arbeitet es daran, die Navigation via Broadcast-Signalen zu realisieren, also über einen passiven Ansatz.



*Adaptives Teaming-Clock-Netzwerk im Test - es werden beliebige Plattformtrajektorien simuliert.*

## Kontakt

Dr. Stephan Sandenbergh  
+49 228 9435-334  
stephan.sandenbergh@  
fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Weltraum

Space Situational Awareness, kurz SSA – also die Lageerfassung von Weltraumobjekten – ist ein Forschungsthema, das sowohl im europäischen als auch im internationalen Kontext immer wichtiger wird. Auch in militärischer Hinsicht gewinnt diese Forschungsrichtung an Bedeutung: So nehmen verdächtige Manöver zu, in denen sich Spionage-Satelliten anderen Satelliten annähern oder gar andocken. Neue Weltraummächte wie Indien und China testeten Antisatellitenraketen, um ihre Fähigkeiten darzustellen. Die USA etablierten 2020 aufgrund der zunehmenden Bedrohung im und aus dem All eine Weltraumarmee. Und Frankreich hat aus Gründen der Verteidigung einen Plan für die Entwicklung von Laserwaffen angekündigt.

- Die Dichte von Satelliten und Weltraumschrott im erdnahen Orbit nimmt rasant zu. Dies geht mit steigenden Gefahren einher.
- Mit den Radarsystemen TIRA und GESTRA des Geschäftsfelds Weltraum des Fraunhofer FHR lassen sich Objekte im erdnahen Weltraum überwachen, beobachten und identifizieren. Die beiden Systeme ergänzen sich dabei auf optimale Weise.
- Das Radarsystem GESTRA, das für die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR entwickelt wurde, kann die Bahndaten zahlreicher Objekte sehr schnell und in einem großen Raumausschnitt gleichzeitig erfassen.
- Soll ein Objekt präziser erfasst und abgebildet werden, bietet sich das Radarsystem TIRA an.

# Weltraum: Lage von Objekten präzise erfassen

**Nicht nur auf Straßen in Ballungsgebieten herrscht eine hohe Verkehrsdichte. Auch der erdnahe Weltraum ist sehr verkehrsreich und teilweise überfüllt: Er ist übersät mit aktiven Satelliten sowie Weltraumschrott – ihre Dichte nimmt rasant zu.**

Diese Rushhour im All geht mit steigenden Gefahren einher: Bei Zusammenstößen können Satelliten zerstört und die für die Gesellschaft wichtige Infrastruktur (z. B. Navigations- oder Kommunikationssatelliten) beeinträchtigt werden. Es ist daher unabdingbar, Weltraumobjekte zu erfassen, zu überwachen und zu verfolgen: Hat man diese stets im Blick, können bei drohender Gefahr rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, wie Ausweichmanöver von Satelliten.

## GESTRA und TIRA: Hand in Hand

Die Radaranlagen, die das Geschäftsfeld Weltraum des Fraunhofer FHR erforscht und entwickelt, sind für die Überwachung, die Beobachtung und die Identifikation von Objekten im erdnahen Weltraum bestens geeignet. Dabei ergänzen sich die beiden Radarsysteme TIRA und GESTRA optimal. Das Radarsystem GESTRA, das im Auftrag der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR entwickelt wurde, erlaubt eine kontinuierliche Überwachung im großen Raum – mit ihm lassen sich die Bahndaten von vielen Objekten gleichzeitig ermitteln. Zudem können über GESTRA die Höhe der Objekte sowie deren Inklination – den Grad zwischen Erdäquator und Umlaufbahn – bestimmt werden. Eine weitere Besonderheit: GESTRA vereint phasengesteuerte Array-Antennen, mechanische Beweglichkeit der Radareinheiten in drei Achsen sowie die Mobilität des gesamten Systems. GESTRA kann somit an jedem

beliebigen Standort eingesetzt werden und ermöglicht ein Netzwerk von Radarsystemen für die Weltraumüberwachung.

Möchte man dagegen einen bestimmten Satelliten oder ein anderes Weltraumobjekt genauer erfassen, ist TIRA das System der Wahl. Mit ihm lassen sich die Satelliten deutlich präziser erfassen und abbilden – und zudem Aussagen zum Satellit selbst treffen. Funktioniert ein Satellit nicht, kann über TIRA beispielsweise geklärt werden, ob es vielleicht am Solarpaneel liegt, das nicht richtig entfaltet ist. Die Möglichkeit, mit TIRA Weltraumobjekte in großer Schärfe abbilden zu können, ist europaweit einmalig – das System hat daher bereits zahlreiche Missionen unterstützt.

Bis dato lag der Schwerpunkt des Geschäftsfelds Weltraum auf der Lageerfassung von Weltraumobjekten. Geplant ist, erdgestützte SSA-Sensoren um ein weltraumgestütztes Radar zu erweitern. Das Radarsystem, das die Weltraumobjekte beobachtet, steht dann nicht auf der Erde, sondern befindet sich selbst auf einem Satelliten im Orbit. Ebenso soll das Portfolio um andere Forschungsthemen wie aktive Antennentechnologien für Kommunikationssatelliten, SAR (Synthetic Aperture Radar)-Technologie für Erdbeobachtungssatelliten und satellitengestütztes Mikrowellenradiometer zur Klima- und Umweltforschung erweitert werden. Das Geschäftsfeld Weltraum wird also noch breiter aufgestellt – die großen Kompetenzen kommen dann auch anderen Weltraum-Forschungsfeldern zugute.

*Mit Hilfe eines Stabwerksmodells wurde der bewegliche Teil des Weltraumbeobachtungsradars TIRA anhand von rund 400 Originalzeichnungen nachmodelliert. Mit den so erhaltenen rund 150000 Knotenpunkten, kann die Lastverteilung des neu zu entwickelnden Abbildungsradars exakt bestimmt werden. So wird sichergestellt, dass die Lasten des neuen Radarsystems so verteilt werden, dass es zu keinen statischen Beeinträchtigungen der Anlage kommt.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Weltraum

Daniel Behrendt, MBA (komm.)  
+49 151 120 101 64  
daniel.behrendt@  
fhr.fraunhofer.de

## Weltraumschrott mit höherer Sendeleistung besser erkennen

**Damit umherschwirrender Weltraumschrott die aktiven Satelliten nicht gefährdet, wird er beobachtet und katalogisiert. Unter anderem vom Weltraumüberwachungsradar GESTRA, das vom Fraunhofer FHR entwickelt wurde. Eine weitere Sendeeinheit soll die Detektionsleistung des GESTRA-Verbunds nun nochmal erhöhen: Auf diese Weise lassen sich auch kleinere Schrottteilchen entdecken.**

Denkt man an den Weltraum, so dürften die meisten Menschen einen leeren, unendlich weiten Raum vor dem inneren Auge haben. Was den erdnahen Orbit angeht, ist es mit der Leere jedoch nicht allzu weit her: Mittlerweile schwirren über eine Million inaktive Objekte durch den erdnahen Weltraum – Weltraumschrott also, der nicht mehr gesteuert werden kann. Aktive Satelliten, die dort ihre Kreise ziehen, müssen daher schon fast einen Hindernisparcours absolvieren.

Das Weltraumüberwachungsradar GESTRA hilft dabei, die verschiedenen Objekte in einem großen Raumausschnitt aufzuspüren und zu katalogisieren – und die Satelliten gegebenenfalls ein Ausweichmanöver fliegen zu lassen. Genauer gesagt handelt es sich dabei um ein quasi-monostatisches System, ein Phased Array-Radar mit hoher Reichweite und Strahlagilität, das aus separatem Sende- und Empfangssystem besteht. Im Jahr 2020 wurde mit dem Projekt GESTRA EUSST ein weiterer Empfänger beim Fraunhofer FHR beauftragt. Und seit dem 1. Dezember 2021 arbeiten die Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR im Projekt GESTRA Tx2 am Aufbau einer zusätzlichen GESTRA-kompatiblen Sendeeinheit. Diese soll eine andere Transistortechnologie haben und doppelt so leistungsfähig sein wie der derzeitige Sender. Schaltet man GESTRA mit dem neuen System zusammen, steigt die Sendeleistung auf das

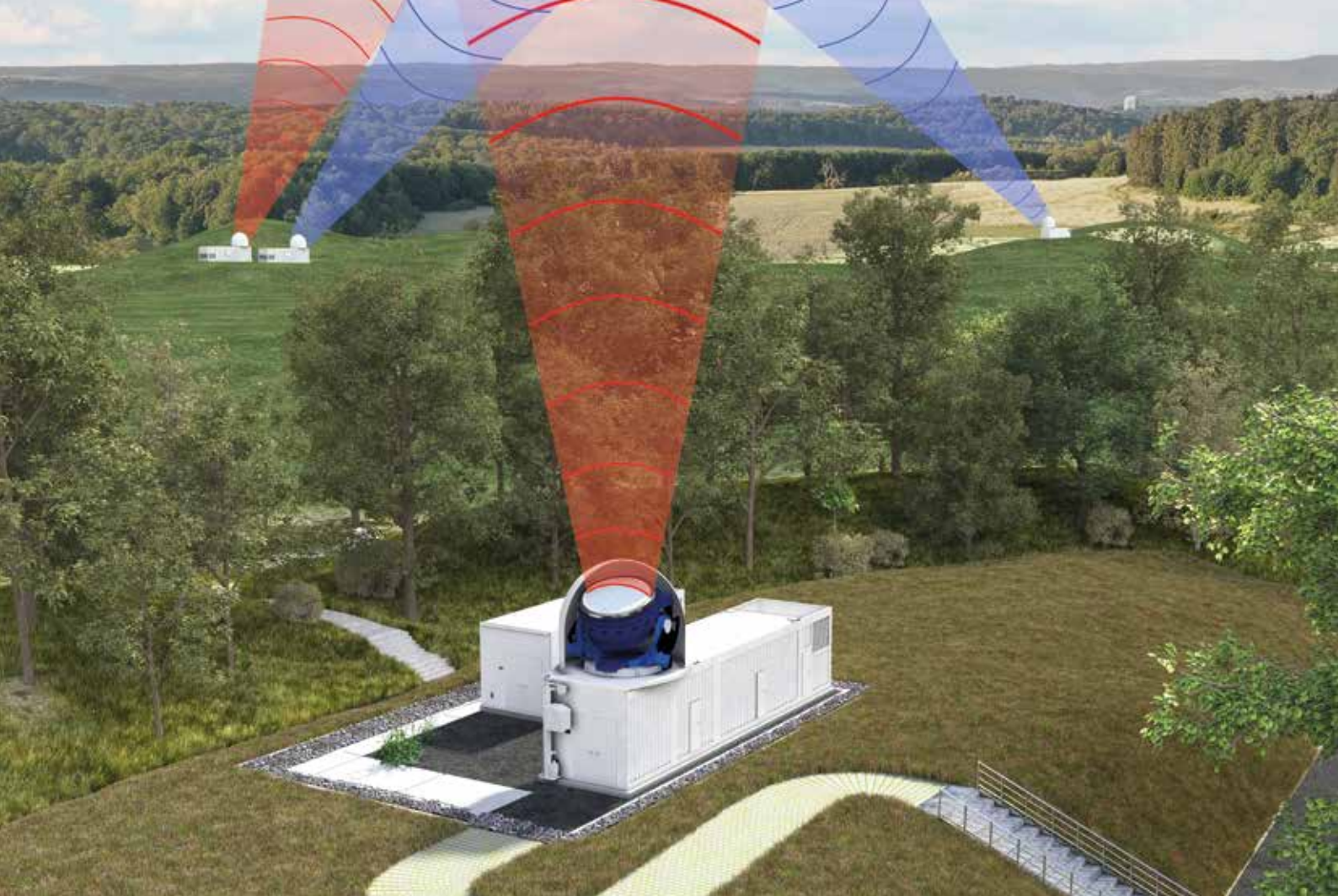
Dreifache. Auf diese Weise erhöht sich nicht nur die Reichweite – indem man weiter in den Orbit hineinschauen kann – sondern vor allem lassen sich deutlich kleinere umherschwirrende Teile entdecken. Das zusammengeschalte System könnte dann auch Schrottteile beobachten, die nur ein Drittel so groß sind wie die, die GESTRA allein erkennen kann. Eine Besonderheit: An der Entwicklung sind alle Abteilungen des Fraunhofer FHR beteiligt – sieben an der Zahl plus Forschungsgruppen. Zusätzliche Unterstützung leisten die Institute IWU und IPM bei der Entwicklung einer innovativen Kühlungstechnologie der Planks.

### Erstellung eines Antennenkonzepts

Das erste Ziel des Projekts liegt darin, ein Konzept für die Sendeantenne zu erstellen. Dieses Konzept umfasst zwei Platinen-Prototypen. Der erste besteht in dem Sende-Modul, das über eine gesteigerte Leistung verfügen soll: Realisiert werden soll diese über eine mehrstufige Verstärkerkette mit parallel geschalteten Hochleistungsverstärkern. Das Modul wird in Gänze neu entwickelt, samt aller benötigter Monitoring-Funktionen – also quasi der Vitalparameter des Systems. Auch gilt es, die GESTRA-Antenne zu optimieren: Lässt sich das GESTRA Konzept mit der doppelten Sendeleistung fahren? Ist dafür eine Neuentwicklung des Antennenelements und eventuell auch der Gruppenantenne nötig? Diese Fragen gilt es in der ersten Projektphase zu beantworten.

Der zweite Prototyp ist die Platine, die das Sendesignal dezentral erzeugt. Die Forscherinnen und Forscher designen das gesamte Konzept der Signalerzeugung neu. Während im GESTRA-System an einer Stelle ein Signal erzeugt und dieses an alle Antennen-Elemente verteilt wird, soll bei dem Tx2-System für jedes Sende-Modul ein individuelles Signal erzeugt

*rechts:  
Radarnetzwerk zur Weltraumüberwachung: Der neue GESTRA TX2 Sender (Vordergrund) im Verbund mit GESTRA EUSST Empfänger und GESTRA-System.*



werden. Wie lassen sich diese dezentralen Signale synchron halten? Dieser Ansatz ist Neuland – er wurde erst in wenigen Projekten überhaupt durchgeführt. Erste Ideen dazu sind bereits vorhanden.

### Vernetzter Betrieb

Elementar ist: Empfänger und Sender müssen vernetzt betrieben werden können – schließlich geht es ja darum, die Systeme GESTRA, GESTRA EUSST und GESTRA Tx2 zu einem Verbund zusammenzuschalten. Dabei müssen die Systeme nicht notwendigerweise räumlich nebeneinanderstehen, sondern können sich einige hundert Kilometer entfernt voneinander befinden. Das zweite Ziel der ersten Projektphase liegt daher in einer Machbarkeitsanalyse für den vernetzten Betrieb mit mehreren Sendesystemen.

Das Projekt hat zunächst eine Laufzeit von zwei Jahren: An seinem Ende soll ein Proof-of-Concept stehen. Sprich der Nachweis, dass der Ansatz generell funktioniert. Anhand dieses Konzepts hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR die Option, die Design- und die Bauphase für die Antenne zu beauftragen.

### Projektdaten

Projektstart: 1.12.2021

Projektende Phase 1: 30.11.2023

Projektdauer und –kosten:

- Phase 1 (Konzeptphase): 24 Monate mit 5,6 Mio. €
- OPTION
  - Phase 2 (Designphase): weitere 12 Monate mit ca. 12,5 Mio. €
  - Phase 3 (Bauphase): weitere 36 Monate mit ca. 30,88 Mio. €

Projektteam (Phase 1): ca. 45 Mitarbeiter

### Kontakt

Christoph Reising  
Tel. +49 228 60882-2256  
christoph.reising@  
fhr.fraunhofer.de

## Allen Erwartungen zum Trotz

**Der europäische Satellit ENVISAT verlor 2012 den Kontakt zur Erde. Seither dreht er sich auf einer beliebigen Umlaufbahn – mit abnehmender Drehgeschwindigkeit, wie die Wissenschaftsgemeinde annahm. Doch Messungen des Fraunhofer FHR zeigen: Seit 2018 dreht er sich wieder schneller und schneller.**

Wie verändern sich Klima, Ozeane und Landflächen, genauer gesagt das Ökosystem der Erde? Dies sollte der europäische Satellit ENVISAT überwachen, der 2002 von der ESA in den Weltraum befördert wurde. Mit Gesamtkosten von 2,3 Milliarden Euro war er der bisher teuerste Satellit der ESA und der größte Erdbeobachtungssatellit, der jemals in den Orbit verfrachtet wurde. Über zehn Jahre verrichtete er seinen Dienst wie gewünscht, doch 2012 brach der Kontakt ab. Seither schwirrt ENVISAT unkontrolliert als Müll durch den Weltraum. Was zum Verbindungsverlust führte, ist nach wie vor ungeklärt. Anschließende Untersuchungen ergaben jedoch einen interessanten Umstand: Der Satellit fing an sich zu drehen, und zwar immer schneller. 2013 nahm die Rotationsgeschwindigkeit jedoch wieder ab. Die Experten waren sich einig, dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen würde.

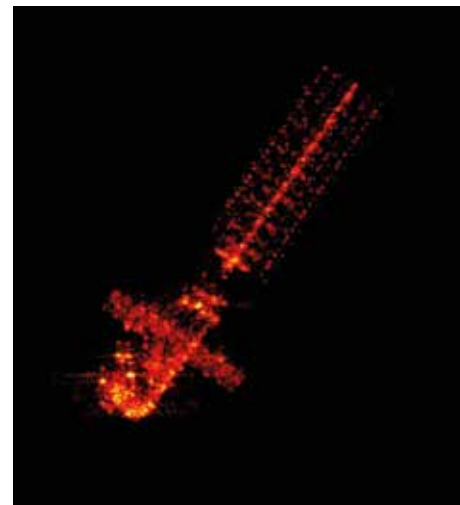
Mit ENVISAT hat die ESA nicht nur einen teuren Satelliten verloren, sondern auch eines der statistisch gefährlichsten Trümmerteile geschaffen: Während die ersten 20 Plätze der Rangliste von Raketen belegt werden, steht der etwa acht Tonnen schwere ENVISAT mit Platz 21 bei den Satelliten ganz oben. Umso schwieriger, da er seine Kreise aktuell in einer Höhe von 765 Kilometer Höhe zieht – in einem sonnensynchronen Orbit, in dem sich äußerst viele Satelliten tummeln. Um ENVISAT jedoch mit einem anderen Satelliten greifen und aus dem Weg räumen zu können, muss

seine Drehgeschwindigkeit genau bekannt sein.

### Die Vorhersagen treffen nicht zu!

Doch – das haben Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR 2019 bei sporadischen Messungen entdeckt: Die Vorhersagen zur stetig weiter abnehmenden Drehgeschwindigkeit treffen nicht zu. Messkampagnen in den Jahren 2020 und 2021 bestätigten das überraschende Ergebnis: Die Rotation wird tatsächlich wieder schneller. Anfang 2013 drehte sich der Satellit am schnellsten, mit ungefähr drei Grad pro Sekunde. Der Satellit brauchte also 120 Sekunden für eine Umdrehung. 2018 drehte er sich nur noch mit halber Geschwindigkeit, während einer Drehung verstrichen ganze 240 Sekunden. In der ersten Jahreshälfte 2021 schaffte er diese jedoch in nur 210 Sekunden – ein deutlicher Unterschied. Seitdem wird der Satellit stetig schneller.

Für die Untersuchungen nutzten die Forschenden das Radarsystem TIRA. Taucht der Satellit am Horizont auf und fliegt am Himmel über die Erde hinweg, verfolgt das L-Band Zielverfolgungsradar ihn, bis er nach zehn bis 15 Minuten wieder von der Bildfläche verschwindet. Während der Verfolgung werden mit dem Ku-Band Radar Daten für die Bildgebung gewonnen. Mit den erhobenen Daten erstellten die Forschenden ISAR-Bilder, kurz für »Inverse Synthetic Aperture Radar«. Dabei erzeugen zwei physikalische Größen eine Ebene: Zum einen die Laufzeit der ausgesendeten Radarpulse, zum anderen die Dopplerverschiebung, die das Objekt durch seine Eigendrehung auslöst. Um die Bilder korrekt zu skalieren – und die Rotationsgeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum berechnen zu können – machen sich die Forschenden zunutze, dass sie Geometrie und Größe des Satelliten kennen. Indem sie einzelne Punkte



oben:  
Künstlerische Darstellung  
des Umweltsatelliten  
ENVISAT.

unten:  
ISAR-Radarbild vom Satelliten  
Envisat.

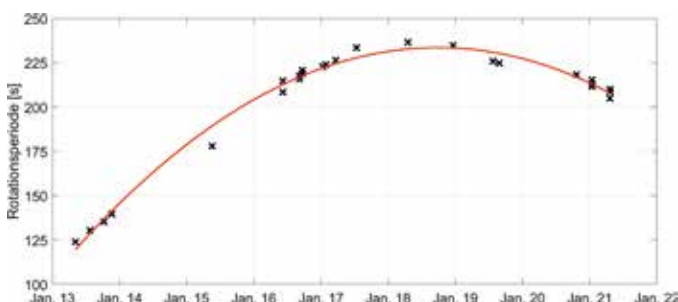
dieses 3D-Modells Punkten in den ISAR-Bildern zuordnen, können sie die Eigendrehung des Satelliten berechnen – und darüber wiederum die gemessenen Dopplerfrequenzen in eine Länge umrechnen. Anders gesagt: Sie projizieren das 3D-Modell auf die ISAR-Bilder und erhalten dadurch korrekt skalierte Bilder.

### Doch woran lag es, dass ENVISAT den Kontakt zur Erde verlor und anfang sich zu drehen?

Diese Frage lässt sich bislang (noch) nicht beantworten. Üblicherweise werden Satelliten mit Schwungrädern stabilisiert. Könnte die Energie dieser Schwungräder, so eine Überlegung, sich durch Reibungseffekte auf den Satelliten übertragen haben? Eher nein, denn dies würde die hohe Drehgeschwindigkeit nicht erklären. Ebenfalls ist unklar, warum sich die Drehung wieder verlangsamte. Vielleicht lässt sich dies auf Kriechströme zurückführen, die vom Erdmagnetfeld im Satelliten induziert wurden? Auch könnte die Gravitation der Erde die Drehachse des Satelliten beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit liegt im Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack-Effekt. Dieser bezieht sich ursprünglich auf Asteroiden – deren Dreheigenschaften werden durch die thermische Strahlung der Sonne geändert.

Die Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer FHR haben nun versucht, der Ursache für die erneute Zunahme der Drehgeschwindigkeit auf die Spur zu kommen: Sie untersuchten, ob sich ein Zusammenhang mit Sonnenaktivitäten seit 2018 finden lässt, etwa mit Eruptionen auf der Sonnenoberfläche. Doch auch hier konnte keine Ursache gefunden werden. Sicher ist jedoch: Der Satellit dreht sich wieder schneller – der Ursache ist man noch auf der Spur.

*Zeitlicher Verlauf der Rotationsperiode des Satelliten:  
Seit 2018 dreht er sich wieder schneller.*



## Tracking and Imaging Radar (TIRA)

- Experimentelles Radarsystem
- Typ: 34-m Parabolantenne in Cassegrain-Konfiguration
- Masse: 240 t
- Mechanische Positioniergenauigkeit: 0,6" (0,000172°)
- Wetterschutz: 47,5 m Radom
- derzeit 2 integrierte Radare (Tracking Radar, Imaging Radar)

### Tracking Radar

- Zielverfolgung von Weltraumobjekten
- L-Frequenzband: 1,33 GHz
- 3 dB Keulenbreite: 0.49°
- Keulenbreite in 1.000 km Entfernung: 8,6 km
- Detektionsempfindlichkeit in 1.000 km Entfernung: 2 cm

### Imaging Radar

- Zielabbildung von Weltraumobjekten
- Ku-Frequenzband: 16.7 GHz
- 3 dB Keulenbreite: 0.031°
- Keulenbreite in 1.000 km Entfernung: 0,54 km

### Einsatzgebiete von TIRA

- Hochpräzise Bahnbestimmung zur Unterstützung von Missionen und Vorhersagen kritischer Annäherungen
- Zeitliche und räumliche Vorhersagen von Wiedereintritten (Re-Entries)
- Schadens-, und Fragmentierungsanalysen von Satelliten / Raketenoberstufen
- Objektidentifizierung und -klassifizierung
- Beobachtung und (statistische) Analyse der Weltraummüllumgebung

## Kontakt

Dipl. Phys. Frank Schlichthaber  
+49 228 9435-588  
frank.schlichthaber@fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Sicherheit

---

Generell basiert die Sicherheitsforschung auf drei großen Säulen. Erstens: Der Schutz von Menschen – sei es bei Großveranstaltungen oder auf Bahn- und Flughäfen – sowie ihre Rettung, etwa bei Naturkatastrophen, Epidemien, Anschlägen oder ähnlichem. Zweitens: Der Schutz kritischer Infrastrukturen. Dazu gehören Flughäfen, Bahnhöfe, Wasserstraßen und Brücken ebenso wie die Energie- und Wasserversorgung oder die Kommunikation. Drittens: Der Schutz vor Kriminalität und Terrorismus. Wie etwa kann man der Tatsache begegnen, dass immer mehr Menschen auf der Straße Messer mit sich führen und bei banalen Streitigkeiten auch einsetzen? So finden allein in Berlin rund ein Dutzend Messerangriffe statt – pro Tag!

- Der Anschlag auf das World Trade Center am 11. September 2001 führte zu zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprogrammen, die die Zivilbevölkerung in Friedenszeiten schützen sollen.
- Radar bietet bei allen Säulen der Sicherheitsforschung zahlreiche Möglichkeiten, die Sicherheit im zivilen Bereich zu erhöhen.
- Beispielsweise können Drohnen kombiniert mit Radartechnologie in verqualmten Gebäuden oder unter Trümmern Lebenszeichen von Menschen orten.



# Zivile Sicherheit: Vielfältige Unterstützung durch Radar

**9/11 versetzte die Welt als erster terroristisch motivierter Anschlag dieser Dimension auf ein ziviles Ziel in Angst und Schrecken. Es folgten Anschläge in Madrid 2004 und in London 2005.**

Als Reaktion auf die Anschläge wurden Forschungsprogramme aufgelegt, die den Schutz der Zivilbevölkerung in Friedenszeiten adressieren. So etwa das Sicherheitsforschungsprogramm der Bundesregierung »Forschung für die zivile Sicherheit«. Radar bietet zahlreiche Möglichkeiten, die Sicherheit im zivilen Bereich zu erhöhen.

## Schutz und Rettung von Menschen: Unbemannte Systeme mit Radarsensoren

Im Katastrophenfall ist es für Einsatzkräfte oft schwierig, sich in kürzester Zeit ein genaues Lagebild zu machen. Es ist äußerst gefährlich, brennende Gebäude auf der Suche nach Menschen zu betreten. Drohnen kombiniert mit Radartechnologie können hier eine große Hilfe sein: Die Drohnen könnten prinzipiell in verqualmte Gebäude fliegen und über an ihnen angebrachte Radarsensoren Lebenszeichen orten. Gleichzeitig können Radarsensoren dafür sorgen, dass Drohnen sicher durch Gebäude navigieren. So ließen sich Rettungseinsätze deutlich schneller, effizienter und gefahrloser durchführen. Auch unter Trümmern können Radarsensoren Lebenszeichen orten. Zukünftig wäre es denkbar, Drohnen autonom arbeiten zu lassen – und damit die Einsatzkräfte weiter zu entlasteten. An entsprechenden Radartechnologien wird im Geschäftsfeld Sicherheit bereits geforscht.

Noch einen Schritt weiter geht das kognitive Radar, bei dem das Radarsystem die jeweils

optimalen Parameter für die aktuelle Situation eigenständig einstellt.

## Schutz von kritischer Infrastruktur: Inspektionsroboter mit Radarsensoren

Zur zivilen Sicherheit gehört es auch, kleinste Risse in Kühltürmen von Kraftwerken, Tunnelssystemen, Brücken oder ähnlichen Infrastrukturen zu entdecken. Drohnen und Roboter können auch diese zum Teil gefährlichen und zeitintensiven Aufgaben übernehmen. Für die Radartechnologie gibt es hier zwei Ansatzpunkte: Zum einen kann sie über Sense and Avoid Kollisionen verhindern. Registriert der Radarsensor eine Wand oder ein anderes Hindernis, können die Daten an die Steuerung der Drohne oder des Roboters gesendet werden, so dass sie dem Hindernis ausweichen. Erste Tests hierzu hat das Geschäftsfeld Sicherheit bereits erfolgreich durchgeführt. Zum anderen bieten Radarsensoren Vorteile bei der Analyse der Infrastrukturen – so können sie auch in dunkler, verqualmter und unzugänglicher Umgebung Strukturen millimetergenau abbilden und feinste Risse und Beschädigungen detektieren.

## Schutz vor Kriminalität

Auch beim Schutz vor Kriminalität können Radarsysteme gute Dienste leisten. So ermöglichen sie Sicherheitskräften berührungslos zu erkennen, ob Personen unter ihrer Kleidung Messer oder andere gefährliche Dinge versteckt bei sich tragen.

*Vernetzbare Radarmodule zur Menschlokalisation – Projekt Lupe+, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Sicherheit

Daniel Behrendt, MBA (komm.)  
+49 151 120 101 64  
daniel.behrendt@  
fhr.fraunhofer.de

## Hochwasser und anderen Katastrophen begegnen

Das Ahrtal-Hochwasser zeigte: Der Klimawandel macht sich deutlich schneller und stärker bemerkbar als gedacht. Daher müssen auch die Ansätze, die die Folgen des Klimawandels abmildern sollen, radikaler ausfallen als geplant. Das Team des Innopush-Projekts »RuLe – Resilienz urbaner Lebensräume« reagierte prompt und passte die Forschungen an die aktuellen Gegebenheiten an.

Ein Starkregen ließ im Sommer die Ahr und andere Bäche in Rekordtempo über die Ufer treten – sie rissen Brücken, Häuser, LKW und Autos mit sich und hinterließen ein Bild der Verwüstung. Ganze Dorfgemeinschaften verloren ihr Dach über dem Kopf und mussten in Turnhallen oder auf den Gästeliegen von Verwandten und Bekannten campieren, zahlreiche Menschen verloren gar ihr Leben. Hier setzt das Projekt Rule, kurz für »Resilienz urbaner Lebensräume« an. In dem interdisziplinär ausgerichteten Projekt untersuchen Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR und der Fraunhofer-Institute IMS, LBF, IML, FKIE, INT und IAO an eben solchen Katastrophen die Fragestellung, wie man gestärkt darauf hervorgehen kann. Im Fokus standen die Szenarien »Tunnelbrand« und »Starkregenereignis«. Wie lassen sich etwa via Sensoren hilfreiche Informationen – beispielsweise zur Anwesenheit und Bewegung von Personen oder zur aktuellen Leistungsfähigkeit des Entwässerungssystems – bereitstellen, die sich Stand heute noch nicht rein sensorisch erfassen lassen? Die Forschenden unterschieden dabei drei Phasen: Vor dem Ereignis, das Ereignis selbst und den anschließenden Wiederaufbau der Infrastruktur, die möglichst resilienter sein sollte als vorher.

### Die Hochwasserkatastrophe zeigte die Grenzen bisheriger Technologie auf

Aufgrund der aktuellen Situation leisteten die Fraunhofer-Institute auch Akuthilfe für die Einsatzkräfte: Das Fraunhofer FHR installierte Radarsensoren an der bruchgefährdeten Steinbachtalsperre, die die Stabilität des Dammes vermaßen, das Fraunhofer FKIE unterstützte bezüglich der Management-Infrastruktur, etwa bei der Lagebilddarstellung. Doch machte die Katastrophenlage auch sichtbar, wo zukünftig nachgebessert werden muss: So wurden zahlreiche technische Frühwarn- und Kontrollsysteme ausgehebelt. Ein Beispiel sind Radarfüllstandsensoren, die in den letzten Jahren an Brücken montiert wurden: Dabei befindet sich an einem Auslegearm eine kleine Antenne, die die Füllstände der Bäche misst und somit Prognosen zum Hochwasser erlaubt. Üblicherweise funktioniert das sehr gut – allerdings nur, solange das Wasser unter der Brücke hindurchfließt und die Brücke existiert. Beim Ahr-Hochwasser, das den bisherigen Höchststand mehr als verdoppelte, gingen jedoch viele ortsfeste Messstationen verloren. Die Katastrophenlage kann durchaus als Beispiel für künftige Hochwasser dienen – quasi als Blick in die Glaskugel, mit welchen Herausforderungen Städte und Gemeinden im Jahr 2050 oder 2060 rechnen müssen.

### RuLe passte die Forschung an die Gegebenheiten an

Was also kann man aus dieser Katastrophe für die Zukunft lernen? Diese Frage stellten sich auch die Forscherinnen und Forscher im Projekt RuLe und entwickelten entsprechende Lösungskonzepte. So rückt in der Forschung statt des Einsatzes ortsfester Plattformen



Tunnelbrand: Eine besondere Gefährdungslage.



für die Warnsysteme, zunehmend mobile Systeme in den Fokus – etwa drohnenbetriebene oder tragbare Sensoren, die die Stabilität von Gebäuden bei Schadensereignissen überwachen. Ebenso zeigte sich im Ahrtal, dass der Einsatz von Satellitenkommunikation sehr gut funktionierte. Diese wird in zukünftigen Rettungssystemen weltweit eine immer größere Rolle spielen. Diese und vergleichbare Katastrophen zeigen, dass die Expertenteams der Fraunhofer-Institute die Forschung an die sich stark verändernden Umweltbedingungen immer wieder anpassen müssen. Die Frage, wie man Rettungskräften Informationen über die Standorte immobiler Menschen zukommen lassen kann – ad hoc und datenschutzkonform – bekommt hierbei ebenfalls eine ganz neue Bedeutung.

Ein weiterer Fokus neben Starkregenereignissen war das Szenario »Tunnelbrand«. Auch hier zeigt das Projektteam neue

Systemansätze auf, die im urbanen Umfeld bislang noch nicht oder nur rudimentär umgesetzt wurden – z. B. im Bereich der Sensorik, die Detektion von Personen und deren Bewegung. Bei beiden Szenarien betrachteten die Forscherinnen und Forscher nicht nur einzelne Technologien oder ein konkretes Problem, sondern die komplette Kette – von der Planung über technische Lösungen bis hin zu einzelnen Abläufen. Rule konnte somit sehr flexibel auf die Herausforderungen Starkregenereignissen oder Tunnelbrände reagieren.

*Starkregenereignis: Dernau (Kreis Ahrweiler) wenige Tage nach der Hochwasserkatastrophe im Ahrtal.*

## Kontakt

Dr.-Ing. Dirk Nüßler  
+49 228 9435-550  
dirk.nuessler@  
fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Verkehr

---

Das Geschäftsfeld Verkehr verfügt über eine hochwertige technische Ausstattung am Puls der Zeit sowie über Mitarbeitende mit einem tiefgreifenden physikalischen Verständnis, die in der Mobilitätsbranche bestens bewandert und mit aktuellen Herausforderungen und Fragestellungen äußerst vertraut sind. Daher können auch anspruchsvolle Fragestellungen gewinnbringend gelöst und individuell auf den Kunden zugeschnitten werden.

- Autonomes Fahren ist ein großer Zukunftstrend, der ausgehend von der Straße zunehmend auf den Schienen- und Schiffsverkehr sowie die Luftfahrt übergreift.
- Radar ist der Schlüsselsensor für mehr Autonomie auf Straße und Schiene, zu Wasser und in der Luft. Denn die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmenden muss jederzeit gewährleistet sein.
- Das Geschäftsfeld Verkehr bietet rund um das Radar eine tiefe und breit aufgestellte wissenschaftliche Expertise, erweitert um die Kenntnisse der Branche.

# Radarsysteme für mehr Sicherheit im Auto, Flugzeug, Bahn und Schiff

Die Sicherheit ist beim autonomen Fahren elementar. Radarsensoren sind für diese Aufgabe wie geschaffen: Denn anders als optische Sensoren funktionieren sie Tag und Nacht und bei jeder Wetterlage – auch im dichten Nebel.

Das Geschäftsfeld Verkehr des Fraunhofer FHR bietet in puncto Radar eine tiefe und breit aufgestellte wissenschaftliche Expertise: von Hochfrequenzsystemen und Signalverarbeitung über Klassifizierung von Objekten bis hin zu elektromagnetischen Simulationen.

## Auf der Straße...

Schon heute werden Radarsensoren in Autos nahezu standardmäßig verbaut, um den Fahrer zu unterstützen. Auch hier hat das Geschäftsfeld Verkehr seine Expertise bereits eingebracht: So sind spezielle Radarantennen aus dem Fraunhofer FHR bereits 30 Millionen Mal in 100 verschiedenen Fahrzeugtypen verbaut. Im derzeitigen Fokus stehen vor allem die Miniaturisierung der Systeme sowie die Entwicklung konformer Antennen – also Antennen, die sich an die Geometrie des Autos anpassen und sich somit gut in den vorhandenen Bauraum einfügen lassen. Weitere aktuelle Forschungsansätze des Geschäftsfelds Verkehr befassen sich mit der Frage, wie Radarwellen mit verschiedenen Materialien interagieren. Wichtig ist das beispielsweise, wenn der Radarsensor unsichtbar für den Nutzer hinter dem Firmenlogo oder dem Stoßfänger verbaut werden soll. In einer Testumgebung werden neu entwickelte Sensoren per Simulation auf »Herz und Nieren« überprüft. Über unsere Simulationssoftware GOPOSim lassen sich verschiedene bewegte Objekte wie Autos, Fahrräder, Fußgänger in die verschiedenen Straßenszenen einbringen.

## ...zu Wasser, in der Luft und auf der Schiene

Momentan ist das Geschäftsfeld stark durch Anwendungen im Automotive-Bereich geprägt. Doch steigt der Autonomielevel zunehmend auch in den anderen Verkehrsbereichen – mit den entsprechenden Erfordernissen an die Sensortechnologien. Daher hat das Geschäftsfeld Verkehr auch für den Schiffs- und Flugverkehr bei der Entwicklung etlicher Radarsensoren schon wichtige Beiträge geleistet. Ein Beispiel aus dem Schiffsverkehr: Das innovative Seenotrettungssystem SEERAD ermöglicht es, Schiffbrüchige mit einer Radar-Sendeleistung von nur 100 Watt auf sechs Kilometern zu orten – das ist Weltrekord. Im Bereich der Luftfahrt hat das Fraunhofer FHR unter anderem eine Landeassistent für Hubschrauber entwickelt. Diese unterstützt den Piloten beim Landemanöver, wenn aufgewirbelter Staub die Sicht vernebelt.

Was die Aktivitäten im Schienenverkehr angeht, so sollen diese künftig weiter ausgebaut werden – denn hier sind auf dem Markt noch kaum Lösungen verfügbar. Diese Lücke möchte das Geschäftsfeld Verkehr schließen. Anwendungen für Radarsysteme im Schienenverkehr gibt es zahlreiche: So könnten die Sensoren etwa die Gleisbetten analysieren, Risse in Tunnelwänden detektieren, Spurweiten vermessen und ähnliche Fragestellungen adressieren.

*Am Fraunhofer FHR völlig neu entwickeltes Radarreflektorsystem, bei dem die Reflexion unter genau dem gleichen Winkel erfolgt, wie er in einer visuellen Eichmarke zu sehen ist. Herkömmliche Radarreflektoren, die aus drei orthogonalen Platten bestehen, so genannte Tripelspiegel, sind aufgrund ihrer Tiefe dafür ungeeignet. Die Kombination aus visueller Eichmarke und Reflektor muss auf relativ kurze Entfernungen funktionieren, wie z. B. in Laboren, an Fertigungsstraßen oder in Reparaturwerkstätten.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Verkehr

Dr.-Ing. Andreas Danklmayer  
+49 228 9435-350  
andreas.danklmayer@  
fhr.fraunhofer.de

# LIDAR-System mit optimierter Umgebungserkennung

Autonome Fahrzeuge brauchen verschiedene Sensoren, die ihnen quasi als »Augen« dienen. Unverzichtbar sind dabei LIDAR-Systeme, die auch in der Dunkelheit gute Abbildungen erzeugen. Ein neues frequenzmoduliertes LIDAR-System vereint eine lange Reichweite mit einer guten Auflösung und ist zudem kostengünstig, klein und energieeffizient.

Sollen Autos und andere Fahrzeuge künftig autonom durch Städte und Straßenzüge schnurren, brauchen sie dafür entsprechende Sensoren. Insbesondere LIDAR, kurz für »Light detection and ranging«, dürfte dabei aufgrund seiner hohen Auflösung unverzichtbar sein. Denn diese Methode erzeugt Abbildungen, die denen einer optischen Kamera gleichkommen und auf denen Fußgänger, Radfahrer und andere Verkehrsteilnehmer unterscheidbar sind. Im Gegensatz zu visuellen Systemen bewerkstelligen sie dies nicht nur am helllichten Tag, sondern auch in stockdunkler Nacht. Dazu kommt: LIDAR-Sensoren sind in der Lage, die Entfernung, Tiefe und Höhe von Objekten und sogar ihre Geschwindigkeit mit viel weniger Rechenleistung genau zu messen – somit können sie für mehr Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr sorgen. Typischerweise geht die Reichweite der LIDAR-Systeme jedoch zu Lasten der Auflösung: Während langreichweitige LIDAR-Systeme zwar weit schauen können, allerdings nur eine geringe Auflösung

haben, ist es bei kurzreichweitigen Systemen genau anders herum.

## Hohe Auflösung, langer Blick

Im kollaborativen Fraunhofer PREPARE-Projekt MELINDA entwickeln das Fraunhofer FHR, das Fraunhofer ISIT und das Fraunhofer HHI ein ganzheitliches LIDAR-System, das sowohl mit einer großen Reichweite von bis zu 250 Metern als auch mit einer hohen horizontalen und vertikalen Auflösung von 0,1 Grad punktet. Das System vereint somit die Vorteile von lang- und kurzreichweitigen Systemen. Zudem ist es kostengünstig, klein und energieeffizient. Eine weitere Besonderheit: Das entwickelte LIDAR-System nutzt eine kohärente Beleuchtung sowie einen speziellen kohärenten Detektor, der das vom Objekt zurückgeworfene Signal mit dem des kohärenten Lasers mischt. Auf diese Weise lassen sich sowohl Amplituden- als auch Phaseninformationen nutzen – als Ergebnis erhält man also nicht nur genauere Entfernungsinformationen, sondern auch die Daten zur Geschwindigkeit der gesehenen Objekte.

Das Fraunhofer FHR widmet sich dabei dem Sparse Sensing: Statt alle Punkte im Blickfeld zu beleuchten, lässt das LIDAR-System bewusst zahlreiche Lücken – so lässt sich die Scangeschwindigkeit deutlich vergrößern, was zur Erkennung dynamischer Straßenszenen äußerst wichtig ist. Naturgemäß sind die entstehenden Punktwolken ebenfalls lückenhaft: Die fehlenden Punkte werden mit entsprechender Datenprozessierung, genauer gesagt mit Compressed Sensing und Methoden des Deep Learning, bestmöglich rekonstruiert. Mit Erfolg: Fünf Prozent der Pixel sind ausreichend, um ein Bild zu rekonstruieren – statt 10.000 Pixeln reichen also 500! Derzeit arbeitet das Forscherteam an der Entwicklung eines Demonstrators des LIDAR-Systems.

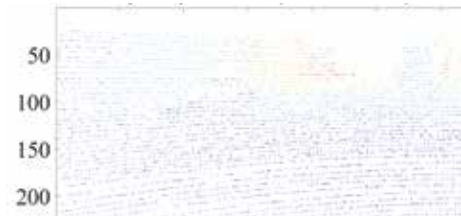
## Kontakt

Dr. rer. nat.  
María Antonia González Huici  
+49 228 9435-708  
maria.gonzalez@  
fhr.fraunhofer.de

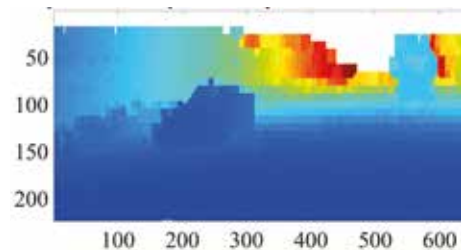
a)



b)



c)



d)

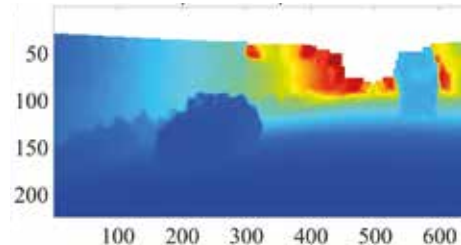


Abb. a) RGB-Referenzbild eines ausgewählten Snapshots aus dem KITTI-Datensatz, b) betrachtete Punktwolke nach 50%iger Datenreduktion, und erhaltene dichte Tiefenkarten c) mittels CS (BPDN) und d) Deep Learning (SICNN).

# Radfahrer und Fußgänger – bestens geschützt

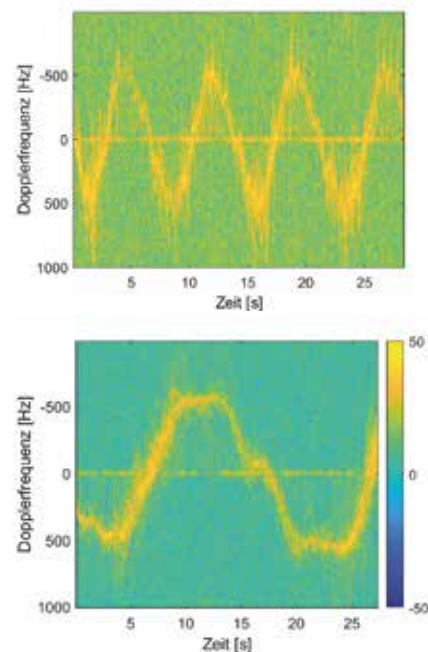
**Gefährliche Kreuzungen sicherer gestalten und Fußgänger wie Radfahrer bestmöglich schützen: Dieses Ziel verfolgten vier Fraunhofer-Institute im Projekt »Konsens«. Dafür fusionierten sie die Daten von fest installierten Radar- und Infrarotsensoren.**

Schon wieder eine brenzlige Situation an der Kreuzung, an der es immer wieder zu Unfällen kommt: Ein Fußgänger geht zwischen parkenden Autos hindurch und will die Straße überqueren – der Blick auf den rollenden Verkehr kommt zu spät. Künftig könnten an gefährlichen Kreuzungen Sensoren in Ampelmasten und Co. für mehr Sicherheit sorgen. Schlängelt sich beispielsweise ein Fußgänger zwischen den stehenden Autos hindurch, erkennen die Sensoren dies und geben Warnungen an die Fahrzeuge im Umkreis heraus. Auch das autonome Fahren könnten solche Infrastruktursensoren langfristig sinnvoll unterstützen. Denkbar sind zudem intelligente Kreuzungen: Ist beispielsweise die Straße frei und nähert sich ein Fußgänger der Kreuzung, könnte die Fußgängerampel direkt auf grün schalten.

An den entsprechenden Sensoren arbeiteten Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR und der Fraunhofer-Institute IAIS, IVI und IIS im Projekt »Konsens«, das als Nachfolgeprojekt von »HORIS« von Januar bis Juli 2021 lief. Der Clou liegt dabei vor allem in der

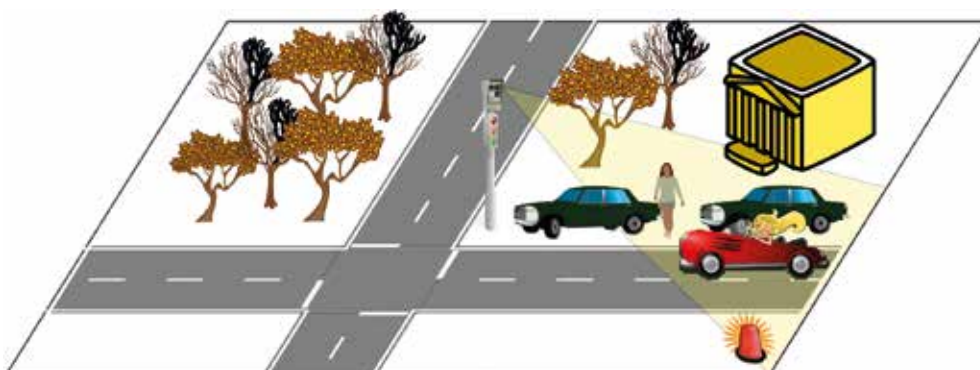
Kombination von Infrarot und Radar. Während Infrarot-Sensoren sehr gut erkennen, wie weit rechts oder links im Bild sich ein Fußgänger oder Radfahrer bewegt, tun sie sich mit der Messung der Entfernung schwer. Hier jedoch spielen die Radarsensoren ihre Stärken aus: Sie können die Entfernung präzise messen, weisen jedoch in der Rechts-Links-Bestimmung größere Unsicherheiten auf. Eine perfekte Kombination also. Die Klassifizierung – die Unterscheidung, ob es sich bei einem Objekt um einen Fußgänger oder einen Radfahrer handelt – übernehmen neuronale Netze, und zwar zunächst unabhängig für die Daten der Infrarot- und der Radarsensoren. Bei den Radardaten geschieht dies über die Bewegungen der Personen: Beim Fußgänger sieht man die periodische Pendelbewegung von Armen und Beinen, beim Radfahrer lassen sich dagegen die Signale der drehenden Speichen sowie der Tretbewegung erkennen. Sowohl die Ergebnisse aus den Infrarotdaten als auch die aus den Radardaten werden gewichtet, also etwa »Es handelt sich zu 98 Prozent um einen Fußgänger«. Das Ergebnis, das die höhere Sicherheit bietet, wird vom System verwendet.

Langfristig lässt sich die Anzahl der klassifizierbaren Objekte auf die typischen Verkehrsteilnehmer erweitern – so könnten neben Fußgängern und Radfahrern beispielsweise auch Elektro scooter berücksichtigt werden.



oben:  
Vergleich der Radardaten eines Fußgängers (oben) und eines Radfahrers (unten).

links:  
Eine Person läuft zwischen zwei Autos auf die Straße.



## Kontakt

Simon Wagner, M. Sc.  
+49 228 9435-365  
simon.wagner@  
fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Produktion

Läuft bei Produktionsprozessen in der Industrie etwas schief, zieht das schnell hohe Kosten nach sich. Während sich einige Fragestellungen in der Produktionsüberwachung bereits durch Kamera- oder Lasersysteme zufriedenstellend beantworten lassen, erfordern andere Produktionsverläufe Sensoren, deren Fähigkeiten über die der optischen Systeme hinausgehen: Das Geschäftsfeld Produktion des Fraunhofer FHR bietet bei allen Fragestellungen rund um Radar die nötigen Kompetenzen.

- Radarsensoren können Produktionsprozesse auch dort überwachen, wo optische Systeme an ihre Grenzen stoßen: Etwa in Walzwerken, wo sehr hohe Temperaturen herrschen und viel Dampf und Schlacke entsteht.
- Darüber hinaus bieten Radarsensoren die Möglichkeit, Produkte zerstörungsfrei zu untersuchen – sei es in der Lebensmittelkontrolle, bei Kunststoffbauteilen aller Art oder bei Verbundwerkstoffen.
- Das Geschäftsfeld Produktion bietet die nötige Kompetenz sowie die technische Ausstattung, um individuelle Fragestellungen von Industriepartnern zum Erfolg zu führen.



# Produktionsprozesse stets im Blick

Unternehmen haben ein großes Interesse, ihre Produktionsprozesse zu überwachen. Radarsensoren können nicht nur unter schwierigen Umweltbedingungen messen, in denen etwa die Sicht eingeschränkt ist, sondern auch durch dielektrische Materialien hindurchschauen und dort Fehler aufspüren.

## Zerstörungsfreie Prüfung für Lebensmittel, Kunst- und Verbundstoffe

Einen Blick in Objekte zu werfen, ohne diese zu zerstören: Dies ermöglicht Radar, zumindest bei dielektrischen Materialien. So können z. B. in der Lebensmittelprüfung Fremdstoffe im Produkt aufgespürt werden. Vielversprechend ist Radar zudem bei der zerstörungsfreien Prüfung von additiv gefertigten Komponenten, also Kunststoffteilen aus dem 3D-Drucker.

Auch während der Lebensspanne eines Produkts bieten Prüfungen mittels Radar Vorteile. Etwa bei Verbundwerkstoffen, wie die Blätter von Windanlagen. Dazu erarbeitet das FHR unter anderem im über die EFRE Leitmarkt-Agentur NRW geförderten Projekt FiberRadar Bildgebungsalgorithmen für hochauflösende Millimeterwellen-Radarscans bei 60 GHz zum Monitoring von Glasfaseranlagen bei der Faserverbundherstellung. Mit der Breitband-Radartechnologie des FHR bei 80 und 220 GHz wurden hier bereits vielversprechende Resultate erreicht. Die voll-integrierte SiGe-Chiplösung des FHR bei 220 GHz erzielt eine bislang unerreichte Bildauflösung, sodass Faserlagen und Materialdefekte klar sichtbar werden. Für größere Durchdringungstiefen sollen mehrere Frequenzbänder fusioniert werden.

## Produktionsprozesse bei Metallen prüfen

Ein interessanter Anwendungsbereich von Radarsystemen sind Walzwerke in der

Stahlindustrie. Generell gilt: Je früher Defekte erkannt werden, desto günstiger lassen sie sich beheben. Hat eine Autotür eine Delle, lässt sie sich anfangs leicht aussortieren. Jeder weitere Produktionsschritt kostet jedoch bares Geld. Oft werden Bleche für Autotüren noch über Sichtkontrolle auf Defekte überprüft. Mit einem Millimeterwellensensor lassen sich auch kleinste Kratzer zuverlässig detektieren. Langfristig ließe sich auf diese Weise sogar eine 100-Prozent-Kontrolle realisieren.

## Zukunftstrends Smart Factory und additive Fertigung

In der Smart Factory sollen sowohl die Zulieferung von Bauteilen als auch die Produktion intelligent und autonom verlaufen. Autonomie fängt aber mit den Sensoren an: Hier bietet das Geschäftsfeld Produktion die nötige Kompetenz. Auch bei sicherheitskritischen Aspekten wie der Maschinenabsicherung können individuelle Lösungen entwickelt werden.

Mit der Fertigung von Bauteilen im 3D-Drucker lassen sich z. B. Antennen drucken oder Bauteilkonzepte realisieren, die so vorher nicht herstellbar waren. Gemeinsam mit der Hochfrequenztechnik eröffnen sich neue Anwendungsfelder: So könnten die Antennen etwa direkt in funktionale Bauteile der Produktionsmaschine integriert werden, indem das Bauteil dort, wo es von der Radarwelle durchdrungen wird, wie eine Antenne funktioniert.

*3D-Metalldrucker mit einem Bauvolumen von 250mm x 250mm x 325mm für z. B. Aluminium, Edelstahl, Nickel Legierung und Kupfer.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Produktion

Daniel Behrendt, MBA  
+49 151 120 101 64  
daniel.behrendt@  
fhr.fraunhofer.de

## Faserverbundmaterialien vollautomatisch analysieren

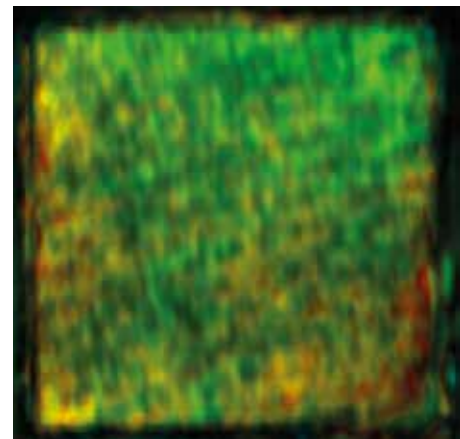
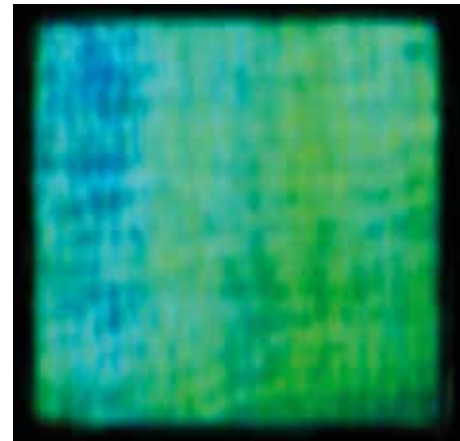
**Mit einem neuen Verfahren für vollpolarimetrisches Radar lassen sich Faserverbundmaterialien, etwa für Windkraftanlagen, untersuchen – automatisch, zerstörungsfrei und im gesamten Volumen.**

Rotorblätter von Windkraftanlagen bestehen größtenteils aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. Bei der Herstellung werden verschiedene Glasfaserplatten übereinandergelegt, unter Vakuum gesetzt und mit einem Matrixelement – meist einem Harz – verklebt. Bei der Auslage der Glasfaser darf kein Fehler passieren, ansonsten könnte die Qualität des späteren Bauteils leiden. Sind die einzelnen Glasfasern richtig ausgerichtet? Gibt es ungewünschte Ondulationen, also Wellen in den Glasfasern? Bisher wird dies manuell geprüft, wobei jedoch lediglich die oberste Schicht erkennbar ist. Fragen der Ausrichtung der Glasfasern lassen sich daher bisher, wenn überhaupt, nur bedingt beantworten.

Im NRW-Leitmarkt-Projekt Fiberradar entwickeln Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR gemeinsam mit der Aeroconcept GmbH, der Ruhr Universität Bochum und der FH Aachen nun ein Verfahren, mit dem sich erstmalig auch die Ausrichtung der unteren Schichten überprüfen lässt – zerstörungsfrei und automatisiert. Möglich macht es ein vollpolarimetrisches Radar. Das Besondere: Während übliche Radare nur über einen Kanal verfügen und somit eine Polarisation zum Senden

als auch zum Empfangen nutzen, schickt das neue Radar Signale in zwei Polarisationen aus, auch die Empfänger arbeiten mit zwei Polarisationen. Zusammengenommen können also vier mögliche Kombinationen genutzt werden, um Informationen zu erheben. Werden diese vier Abbildungen miteinander verknüpft, lassen sich daraus die Richtung der Faserlagen ermitteln und Fehler in der Ausrichtung erkennen. Im Gegensatz zu üblichen Radarbildern erhält das Forscherteam hier also keine Schwarz-Weiß-Abbildung, sondern eine farbige, bei denen die einzelnen Farben für verschiedene Reflexionsverhalten stehen. Die Brechungskompensation verbessert die Bildqualität um ein Weiteres: Sie rechnet Ungenauigkeiten, die durch Brechungseffekte vor allem in tieferen Schichten entstehen, heraus. Indem die Forscherinnen und Forscher mit dem Radar die einzelnen Schichten abbilden, können sie das gesamte Volumen des Materials zerstörungsfrei überprüfen.

Das Radargerät, entwickelt von der Ruhr Universität Bochum, wird derzeit auf der Testplattform des Fraunhofer FHR auf Herz und Nieren geprüft: Das Team untersucht Proben aus dem Hause Aeroconcept, bei denen sich die Ausrichtung der Glasfaserlagen mit der Tiefe ändert. Ziel des Projektes ist es, das System am Arm eines Roboters zu befestigen, der sich automatisiert durch die Produktionshalle bewegt und die produzierten Bauteile scannt.



*Dekompositionsverfahren angewandt auf eine Faserlage 3mm (oben) und 6mm (unten) unter der Oberfläche.*

### Kontakt

Dr. rer. nat. André Froehly  
+49 228 60882-2516  
andre.froehly@  
fhr.fraunhofer.de

# Kunststoffe wertstofflich recyceln: Via MIMO-Sensorik

**Kunststoffe enthalten viel Kohlenstoff, doch wird derzeit nur etwa ein Viertel des Kohlenstoffs im Kreislauf gehalten. Im Projekt Waste4Future arbeiten sieben Fraunhofer-Institute an Technologien, mit denen sich die stoffliche Verwertung von Kunststoff in die Höhe treiben lässt.**

Die Zahlen sind gigantisch: Jährlich werden in Deutschland 12 Millionen Tonnen Kunststoff verbraucht, hergestellt fast immer aus fossilen Rohstoffen. Bei ihrer Produktion werden etwa 49 Megatonnen Kohlenstoffdioxid in die Luft entlassen. Nur knapp die Hälfte des kunststoffhaltigen Abfalls – 6,3 Millionen Tonnen jährlich – wird stofflich recycelt, 53 Prozent werden verbrannt. Doch ist der im Kunststoff enthaltene Kohlenstoff eine wichtige Ressource für die chemische Industrie.

Im Fraunhofer Leitprojekt Waste4Future arbeiten Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer FHR gemeinsam mit sechs weiteren Fraunhofer-Instituten daran, die Kunst- und Kohlenstoffe weitestgehend im Kreislauf zu halten und die Versorgungssicherheit der Industrie mit nachhaltigen Plattformchemikalien zu erhöhen. Anders gesagt: Die wertstoffliche Verwertung langfristig in die Höhe schrauben zu können. Zugleich reduziert dies den Bedarf an fossilen Ressourcen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Umweltverschmutzung mit Plastikmüll. Das Prinzip: Eine neuartige geführte Sortierung erkennt, welche Materialien und insbesondere welche Kunststofffraktionen im Abfall enthalten sind. Welcher Weg

ist für welchen Abfall technologisch, ökologisch und ökonomisch am sinnvollsten?

Am Fraunhofer FHR wird dazu ein skalierbarer MIMO-Radarsensor entwickelt, der 32 Kanäle umfasst und im G-Band arbeitet. Er soll den Abfall charakterisieren, der auf einem Band unter ihm hindurchläuft. Da er in der finalen Ausbaustufe als Dualband-Sensor vorliegen soll, sendet er nicht nur Frequenzen von beispielsweise 120 bis 160 Gigahertz, sondern simultan auch Frequenzen von 220 bis 260 Gigahertz. Auf diese Weise generiert er einen Mehrwert über Struktur und Eigenschaft des Stoffstroms. So soll er nicht nur schwarze Kunststoffe analysieren können, sondern beispielsweise auch Aussagen über den Alterungszustand der Kunststoffe ermöglichen. Die erfassten Daten werden vom Fraunhofer IZFP mit entsprechender Signalverarbeitung und maschinellem Lernen ausgewertet. Auch der Silizium-Germanium-Chip für den MIMO-Sensor wird am Fraunhofer FHR entwickelt. Die Herausforderung dabei: Er muss nicht nur in einem, sondern in zwei Frequenzbändern funktionieren. Dazu müssen eine Onboard-Chip-Antenne für höhere Frequenzen sowie eine externe Antenne kombiniert werden – durch den räumlichen Abstand der beiden Antennen ist dies sowohl technologisch als auch algorithmisch eine komplexe Aufgabe.

Interessant sind die entwickelten Ansätze nicht nur für die chemische und die kunststoffverarbeitende Industrie, sondern auch für Unternehmen aus Abfallwirtschaft, Recycling-Anlagenbau und Recycling-Anlagenbetrieb.



*8-kanaliges Hochfrequenzmodul im W-Band des Fraunhofer FHR integriert im Schüttgutsortierer »Tablesort« des Fraunhofer IOSB*

## Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Christian Krebs  
+49 228 60882-2505  
christian.krebs@  
fhr.fraunhofer.de



## Geschäftsfeld Mensch und Umwelt

Wo macht der Einsatz von Radar rund um den Menschen Sinn? Generell überall dort, wo es um die Messung geometrischer und kinematischer Größen geht, sprich wo Form und die Bewegung eines Objekts analysiert werden sollen.

- Radarsysteme werden zunehmend kleiner und kostengünstiger und rücken somit deutlich näher an den Menschen heran.
- Eine der Möglichkeiten, die sich hier bieten: Radar kann, durch die Kleidung hindurch, Atmung und Pulsfrequenz von Personen bestimmen – sei es im medizinischen Bereich, bei der Fitness oder der Altenpflege.
- Radar ermöglicht zudem berührungslose Mensch-Maschine-Kommunikation in Umgebungen, in denen optische Systeme an ihre Grenzen kommen.
- Auch im Bereich der Umwelt bietet Radar viele Vorteile, etwa bei der Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft.
- Das Geschäftsfeld Mensch und Umwelt bietet in all diesen Bereichen die nötigen Kompetenzen.

# Radar: Für Mensch und Umwelt

Radartechnologie wird immer kleiner und preiswerter – und erreicht mittlerweile einen Miniaturisierungsgrad, der sie zunehmend an den Menschen heranrücken lässt.

## Radar für den Menschen

Ein Beispiel ist die Überprüfung von Vitalparametern wie Atmung und Pulsfrequenz: Radar misst die Bewegung des Brustkorbs, daraus schließt man auf die Atemfrequenz. Aus der Hautbewegung leitet man entsprechend die Pulsfrequenz ab – wie bei den Scannern am Flughafen durch die Kleidung. Sinnvoll ist das z. B. bei Neugeborenen in Kliniken oder in der Altenpflege, in Schlaflaboren oder im Fitnessbereich. Zur Signalverarbeitung ist in diesem attraktiven Feld noch viel Forschungsarbeit nötig: Das Fraunhofer FHR ist dafür bestens aufgestellt.

Auch für andere Fragestellungen zur Bewegungsanalyse ist Radar geeignet, sei es die Ganganalyse im Sport oder in einer Reha. So forscht das Fraunhofer FHR gemeinsam mit Partnern an der Frage, wie sich Schonhaltungen nach einem Unfall erkennen lassen.

## Radar für die Kommunikation

Im Bereich der Kommunikation besonders interessant sind Mensch-Maschine-Interaktionen. So haben z. B. Smartphones vielfach bereits einen Radarsensor integriert. Der Vorteil: Der Sensor erkennt Gesten auch durch Kleidung hindurch. Ein Nutzer kann etwa per Geste etwa einen Anruf annehmen, ohne das Telefon aus der Jackentasche zu nehmen. Dies hilft auch im Arbeitsschutz: Statt mit dicken Arbeitshandschuhen kleine Knöpfe drücken zu müssen, können Maschinen mit Gesten und Handzeichen gesteuert werden. Sinnvoll ist dies in Bereichen, wo textildurchdringende

Gesten nötig sind oder das Arbeitsumfeld z. B. von Dunst und Dampf geprägt ist.

## Radar für die Umwelt

Durch Precision Farming soll mit modernen Technologien die Effizienz der Landwirtschaft gesteigert werden. Radar ist für diese Aufgabe wie geschaffen: Es ist unschädlich für Mensch, Tier und Pflanze und ermöglicht nicht nur Abbildungen der Blätter und Stängel, sondern auch Untersuchungen der Wurzeln. Es erlaubt somit Pflanzen durchdringende Analysen. Auch die Detektion von Wildtieren und die Vitalparameterüberwachung von Stalltieren ist ein spannendes Feld, auf dem Radartechnik neue Möglichkeiten eröffnen kann.

Im Zuge des Klimawandels werden auch das Wetterradar samt darauf basierender Wetterprognosen zunehmend wichtiger. Zwar sind dies etablierte Techniken, jedoch besteht noch viel Verbesserungsbedarf. Hier verfolgt das Geschäftsfeld Mensch und Umwelt viele Ideen – denn die Techniksprünge, die im Bereich Radar erzielt werden konnten, lassen sich auch für das Wetterradar nutzen.

In den Bereich Umwelt fällt auch eine rot-blinkende Warnlampe an Windkraftanlagen, die Flugzeugpiloten warnt. In vielen Gegenden sind Flugzeuge jedoch die Ausnahme. Das im Geschäftsfeld Mensch und Umwelt entwickelte Radar ParaSol erkennt sich nähernde Flugzeuge und ermöglicht, das Blinklicht nur bei Bedarf einzuschalten. Das System ist von der Deutschen Flugsicherung bereits zugelassen.

*Radarsensoren können zur Überwachung der Vitalparameter von Patienten eingesetzt werden.*

## Kontakt

### Geschäftsfeldsprecher Mensch und Umwelt

Daniel Behrendt, MBA (komm.)  
+49 151 120 101 64  
daniel.behrendt@fhr.fraunhofer.de

## Vitalparameter von Corona-Patienten jederzeit im Blick

Verschlechtert sich der Zustand eines Corona-Infizierten, ist schnelles Handeln gefragt – etwa eine künstliche Beatmung. Ein neuer Sensorverbund könnte der Ärzteschaft künftig dabei helfen, den Zustand ihrer Patienten stets im Blick zu haben und bei Zustandsverschlechterungen umgehend zu reagieren.

Hat sich eine Person mit dem Corona-Virus infiziert, kann es schnell zu kritischen Situationen kommen. Medizinerinnen und Mediziner möchten daher stets wissen: Wie verändert sich der Zustand von infizierten Personen? Besteht Handlungsbedarf, weil etwa ein Lungenflügel nicht mehr richtig belüftet wird? Aufschluss über solche Fragen könnten künftig Sensoren geben, die zehn Fraunhofer-Institute und vier medizinische Partner unter Federführung des Fraunhofer IIS im Projekt M3Infekt entwickelt haben – auch das Fraunhofer FHR war beteiligt. Verschiedene Sensoren sollen die Vitalparameter der Erkrankten überwachen und miteinander kombiniert ein universales Monitoring gewährleisten: Auf diese Weise lassen sich Zustandsveränderungen frühzeitig entdecken und passende Gegenmaßnahmen schnell einleiten.

### Radarsensor misst berührungslos die Vitaldaten

Ein Armband misst Puls und Sauerstoff, eine Weste überprüft das Atemvolumen und stellt fest, ob die Lungenflügel ausreichend belüftet sind, ein Brustgurt erstellt ein fortlaufendes Mini-EKG und ein optisches Kamerasystem ermittelt die Vitalparameter. Dazu kommen Radarsensoren des Fraunhofer FHR: Das Flaggschiff ist ein mehrkanaliger MIMO-Sensor, kurz für »Multiple Input Multiple Output«. In einer Zimmerecke hängend, misst er die Vitalparameter der Personen, die sich im Raum aufhalten – vor allem ihre Atemfrequenz. Für die Zustandsüberwachung einzelner Patienten entwickelten die Forscherinnen und Forscher einen einkanaligen Sensor, der das Portfolio ergänzt. Über die Messungen der Vitalparameter hinaus ermöglichen die Radarsensoren auch ein Tracking der Person im Raum. Um die Ergebnisse noch robuster werden zu lassen und einen Mehrwert zu generieren, werden die Daten der Radarsensoren mit denen der optischen Kamera aus dem Fraunhofer IIS/EAS kombiniert. Wie steht die Person beispielsweise zum Sensor – hat sie den Rücken abgewandt?

### Prinzip des MIMO-Sensors

Der MIMO-Radarsensor verfügt insgesamt über acht Sende- und acht Empfangsmodule. Die Signale, die ein Sendemodul ausspricht, werden an den verschiedenen Objekten im Sichtbereich reflektiert – von Bett und Tisch ebenso wie von der erkrankten Person – und von den acht Empfangsmodulen empfangen. Da diese räumlich leicht voneinander getrennt sind, kommen die Signale zu geringfügig anderen Zeiten bei den verschiedenen

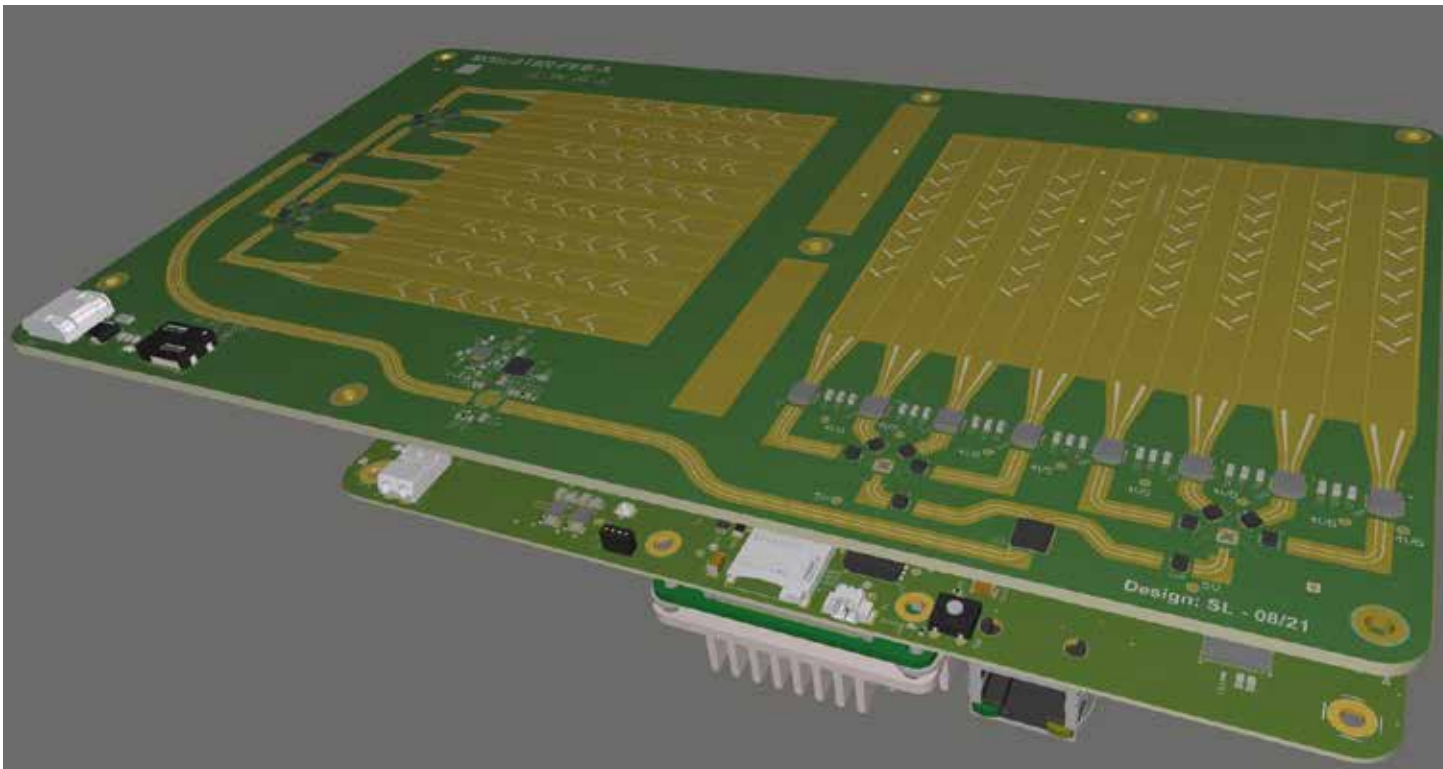


oben:  
Vitalparameter berührungslos erfassen.

unten:  
Gehäuse des 24G-MIMORAD Sensors.

### Kontakt

Sven Leuchs, M. Sc.  
+49 160 6840822  
sven.leuchs@  
fhr.fraunhofer.de



Modulen an. Durch die Laufzeitunterschiede lassen sich Aussagen darüber treffen, wo im Raum sich ein entsprechendes Objekt befindet. Die acht Sendemodule wiederum dienen dazu, die räumliche Auflösung zu vergrößern. Doch wie lassen sich nun die Vitalparameter der Patienten mit Radar messen? Die Antwort: Über die Bewegung des Brustkorbs beim Atmen. Atmet man ein, hebt sich der Brustkorb um ein bis zwei Zentimeter – ein Hub, der sich in den Messsignalen deutlich erkennen lässt. Selbst der Herzschlag, eine deutlich feinere Bewegung, kann mit den Radarsensoren detektiert werden. Da das Herz mit einer deutlich höheren Frequenz als unserer Atemfrequenz schlägt, lassen sich diese Signale gut voneinander trennen. Um die Vitalparameter verschiedener Personen trennen zu können, müssen diese einen Mindestabstand voneinander haben: Stehen sie mehr als 60 Zentimeter voneinander entfernt, kann das System ihre Vitalparameter voneinander getrennt auflösen – und zwar auch dann, wenn die Personen vom Sensor aus gesehen hintereinander stehen. Dieser Wert liegt in der Bandbreite des Messsignals begründet: Die Forscherinnen und Forscher setzten bei dem System auf ein freies ISM-Band mit einer Bandbreite von 250 MHz, das die Richtlinien der Bundesnetzagentur erfüllt.

### Klinische Studie in Planung

Der MIMO-Sensor besteht hauptsächlich aus zwei Platinen: Einem analogen Teil, dem Frontend, das via einer Hochfrequenzschaltung die Signale erzeugt. Und zweitens dem Backend, in dem das analoge Messsignal per Analog-Digital-Konverter digitalisiert wird, um dann in Form digitaler Messdaten im Auswerterechner vom Algorithmus verarbeitet und in Vitalparameter umgerechnet zu werden. Sowohl das Gehäuse des MIMO-Sensors als auch die Digitalbaugruppe existieren bereits, auch die Algorithmik steht. Das Frontend, also der analoge Teil, ist im Zulauf. In einem weiteren Schritt wollen die Forscherinnen und Forscher erste Testreihen im Fraunhofer FHR durchführen, bevor das System in einer klinischen Studie an externen Probanden evaluiert werden soll.

*Platinenstack bestehend aus analogem Frontend (oben) und digitalem Backend (unten).*





# Veröffentlichungen

---

**Für einen stets aktuellen Überblick über unsere zahlreichen Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzen finden Sie alle unsere Publikationen ab sofort auf unserer Internetseite.**

## Alle Publikationen 2021

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021)



## Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021-journals](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021-journals)



## Publikationen bei wissenschaftlichen Konferenzen

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021-konferenzen](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2021-konferenzen)



## Fraunhofer-Publikationsdatenbank

<https://publica.fraunhofer.de>



# Ausbildung und Lehre



# Vorlesungen

---

## WS 2020/2021

**Brüggenwirth, Stefan:**  
»Kognitive Sensorik«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Cerutti-Maori, Delphine:** »Signal Processing for Radar and Imaging Radar (VO)«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Cerutti-Maori, Delphine:** »Signal Processing for Radar and Imaging Radar (UE)«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Heberling, Dirk:** »High Frequency Technology - Passive RF Components«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Heberling, Dirk:** »Hochfrequenztechnisches Praktikum«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Heberling, Dirk:** »Moderne Kommunikationstechnik - EMV für Mensch und Gerät«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Knott, Peter:** »Antenna Design for Radar Systems (VO)«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

**Knott, Peter:** »Antenna Design for Radar Systems (UE)«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

**Pohl, Nils:** »Integrierte Hochfrequenzschaltungen für die Mess- und Kommunikationstechnik«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Pohl, Nils:** »Elektronik 1 - Bauelemente«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Pohl, Nils:** »Master-Praktikum Schaltungsdesign integrierter Hochfrequenzschaltungen mit CADENCE«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Pohl, Nils:** »Grundlagenpraktikum ETIT«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

## SS 2021

**Brüggenwirth, Stefan:**  
»Grundlagen der Radartechnik«, Universität der Bundeswehr München

**Heberling, Dirk:** »Elektromagnetische Felder in IK«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Heberling, Dirk:** »High Frequency Technology - Antennas and Wave Propagation«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Knott, Peter:** »Radar Systems Design and Applications«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Pohl, Nils:** »Integrierte Digitalschaltungen«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

## Betreute Promotionen

---

**Culotta-López, Cosimo:**

»Fast near-field antenna measurements by application of compressed sensing«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Schraml, Korbinian:**

»Break-down Analysis and Sidelobe Suppression in High Power Feed Antennas«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Gisdler, Thomas:**

»Methoden zur Integration eines automobilen Radars mit synthetischer Apertur«, Technische Universität München (TUM)

**Thomas, Sven:**

»Integrierte Schaltungen für die hochpräzise Abstandmessung«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Hamid, Sofian:**

»Lossy Dielectric Resonators for Microwave Absorber and Antenna Applications«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Kohler, Michael:**

»Country-specific ground based Bistatic Radar Clutter analysis of rural environments«, Eberhard Karls Universität Tübingen

**Palm, Stefan:**

»Mapping of urban scenes by single-channel mmW FMCW SAR on circular flight and curved car trajectories«, Technische Universität München (TUM)

**Pisciottano, Iole:**

»Multi-dimensional passive ISAR for Maritime Target Imaging«, Universität La Sapienza

## Abschlussarbeiten

---

**Arumugam, Ram Kishore:** Masterarbeit »Development of super-resolution detection algorithms for sparse scenes in presence of clutter«, Technische Hochschule Ingolstadt

**Golabian, Somayeh:** Masterarbeit »Schaltungsentwurf eines voll differenziellen Operationsverstärkers für integrierte Zwischenfrequenzfilter in einer modernen Sige-Technologie«, Ruhr-Universität Bochum

**Ludwig, Christopher:** Masterarbeit »Entwicklung eines 120 GHz MIMO Radarfrontends«, Hochschule Koblenz

**Pütz, Stephan:** Masterarbeit »Aktive Unterdrückung der reflektierten Leistung (RPC) für gepulste simultane Send- und Empfangs-Radarsysteme (STAR); Active Reflected Power Cancellation (RPC) for Pulsed Simultaneous Transmission and Receive (STAR) Radar Systems«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Singh, Prabhat:** Masterarbeit »An Investigation of Passive Radar using 5G illuminators of opportunity«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Thaker, Anshuman Paresh:** Masterarbeit »Adaptive algorithms for drone detection using MIMO radar«, TU Chemitz

**Toth, Peter:** Masterarbeit »Design and Implementation of an Ultra-Wideband Radar Receiver Operating up to 50 GHz and Frequency Band Characterization in a Cryogenic Environment«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Wegner, Benedikt:** Masterarbeit »Evaluierung der Xilinx-SoC Plattform zur Echtzeit-Signalverarbeitung in SAR-Anwendungen«, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

# Gremientätigkeiten

## Behrendt, D.

- Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP): Mitglied

## Bertuch, T.

- IEEE Antennas and Propagation Standards WG P145: Mitglied
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2021: Technical Review Committee
- European Defence Agency (EDA), CapTech Technologies for Components and Modules (TCM), Technology Building Block (TBB) 06 »Enabling Components for Advanced Antennas« Roadmap report editor team: Leiter

## Brüggenwirth, S.

- IEEE AESS Germany Chapter: Secretary
- EDA Radar Captech: German Governmental Expert
- European Microwave Week (EuMW) 2021: Technical Review Committee
- IEEE Radar Conference 2021, TPC member
- NATO Science and Technology Organization SET Panel Member at Large for Machine Learning and Artificial Intelligence
- VDE ITG Vorstandsmittglied

## Caris, M.

- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Committee

## Cerutti-Maori, D.

- Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC): Nationale Vertreterin in der Working Group 1 (Measurements)
- IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers): Senior Member

## Cristallini, D.

- NATO STO Group SET-242 »PCL on Mobile Platforms« : Co-Chair
- AGERS 2021: Technical Program Member
- EuRad 2021: Technical Program Member
- IEEE RadarConf 2021: Track Chair

## Danklmayer, A.

- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), Vorsitzender des Fachausschusses für RadartechnikVDE-ITG Fachausschuss HF 4 »Ortung«: Vorsitzender
- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Committee
- U.R.S.I. International Union of Radio Science, Commission-F Wave Propagation and Remote Sensing: Member
- NA 131 FK »Förderkreis des DIN-Normenausschusses Luft- und Raumfahrt (NL)«: Mitglied
- DIN Arbeitsausschuss NA 131-01-05 AA für Drohnen-Detektion: Mitarbeiter

## Fröhlich, A.

- European Defence Agency (EDA), CapTech »Ad Hoc Working Group Space Defence«: Non-governmental Expert

## Heberling, D.

- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2021, Düsseldorf: Mitorganisator, Mitglied des Steering Committee
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2022, Madrid: Mitorganisator, Exhibiton Chair
- Zentrum für Sensordysteme (ZESS) 2021, Siegen: Vorsitzender Wissenschaftlicher Beirat
- IMA (Institut für Mikrowellen- und Antennentechnik e. V.): Vorsitzender
- IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers): Senior Member

## Klare, J.

- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Committee
- European Microwave Week (EuMW) 2021: Technical Review Committee
- IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES) 2021: Technical Review Committee
- 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) 2021: Technical Program Committee
- International Conference and Workshop on Telecommunication, Computing, Electrical, Electronics and Control. (TELKOMNIKA) 2021: Review Committee

**Knott, P.**

- Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE, Fachausschuss HF 4 »Ortung«: Vorsitzender
- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON): Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat, Vorsitzender Fachausschuss Radartechnik
- NATO Science and Technology Organization SET Panel Member at Large for AESA Radar
- International Radar Symposium (IRS) 2021: Chair

**Markiton, P.**

- IEEE AESS YP representative 2020-2022
- IEEE AESS QEB Editor-in-Chief 2022-2023

**Matthes, D.**

- NATO STO Group SCI-332 »RF-based Electronic Attack to Modern Radar« : Chair

**Nüßler, D.**

- VDI/VDE-GMA FA 8.17 Terahertz-Systeme: Mitglied
- European Machine Vision Association (EMVA): Mitglied

**O'Hagan, D.**

- NATO STO Group SET-296 »Radar against Hypersonic Threats« : Chair
- NATO STO Group SET-268 »Bi-/Multi-static radar performance evaluation under synchronized conditions« : Chairman
- IEEE AES Magazine: Editor-in-Chief
- IEEE AES Magazine: Associate Editor for Radar
- IEEE Radar Conference: Technical Program Member
- European Defence Agency: CapTech Member
- International Radar Symposium (IRS): Technical Program Member

**Pohl, N.**

- International Microwave Symposium (IMS 2021), Atlanta (hybrid): Technical Program and Review Committee
- European Microwave Week (EuMW) 2021, London: Technical Program Committee
- IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2021), Monterey (online): Technical Program Committee, Co-Chair for MM-Wave & THz ICs
- VDI ITG Fachausschuss 7.3 Mikrowellentechnik: Mitglied
- IEEE MTT Technical Committee MTT-24 Microwave/mm-wave Radar, Sensing, and Array Systems: Vice-Chair
- IMA (Institut für Mikrowellen- und Antennentechnik e. V.): Mitglied
- IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers): Senior Member

**Uschkerat, U.**

- EDA CapTech Radar: German Governmental Expert
- BMVI Nationale Vorbereitungsgruppe zur WRC-23 (NVG23): Mitglied
- ETSI TGUWB: Mitglied
- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Committee

**Walterscheid, I.**

- IIGARSS 2021: Scientific Committee
- EUSAR 2021: Award Committee, Technical Program Committee
- IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers): Senior Member
- VDE-ITG: Member

**Wasserzier, C.**

- NATO STO Group SET-287 »Characterization of Noise Radar« : Chair
- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Member
- IEEE Sensor Signal Processing for Defense (SSPD) TP committee member

**Weinmann, F.**

- VDE-ITG Fachausschuss HF 1 »Antennen«: Mitglied
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2021: Technical Review Committee und Session Chair
- IEEE Antennas and Propagation Standards WG P2816: Mitglied
- EurAAP Working Group »Active Array Antennas« (WGA3): Mitglied
- EMWT'21 Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines: Technical Committee

**Weiß, M.**

- EUSAR 2021, Leipzig/online: Technical Chair, EUSAR Executive
- IGARSS 2021, Brussels/online: Technical Program Member
- European Radar Conference (EuRAD) 2021: Technical Program Member
- International Radar Symposium (IRS) 2021: Technical Program Member
- Signal Processing Symposium (SPSymo) 2021, Lodz/online: Technical Program Member
- ICARES 2021, BALI-Indonesia, 3-4 November 2021: Technical Program Member
- KIT 2021, Vysoke Tatry on October 13-15, 2021: Technical Program Member

# Standorte

---







## Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR hat insgesamt fünf Standorte in Nordrhein-Westfalen.

### Hauptsitz und Postanschrift

Fraunhofer FHR  
Fraunhoferstr. 20  
53343 Wachtberg  
+49 228 9435-0  
info@fhr.fraunhofer.de  
www.fhr.fraunhofer.de

### Institutsteil Wachtberg-Villip

Am Campus 2  
53343 Wachtberg-Villip  
+49 228 60882-1007

### Forschungsgruppe Aachen

Melatener Str. 25  
52074 Aachen  
+49 241 80-27932

### Forschungsgruppe Bochum

Universitätsstraße 150  
44801 Bochum  
+49 234 32-26495

### Forschungsgruppe Siegen

Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57076 Siegen  
+49 271 740-3400

*links:*

*Neues Institutsgebäude in  
Wachtberg-Villip*

*rechts:*

*Unsere Standorte in  
Nordrhein-Westfalen*



# Impressum

---

## Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik  
und Radartechnik FHR  
Fraunhoferstr. 20  
53343 Wachtberg  
+49 228 9435-0  
info@fhr.fraunhofer.de  
www.fhr.fraunhofer.de

## Chefredaktion

Dipl.-Volksw. Jens Fiege

## Redaktion

Dr. Janine van Ackeren  
Jennifer Hees, M. A.

## Layout und Satz

Jacqueline Reinders, B. A.

Alle Rechte vorbehalten.

Vervielfältigung und Verbreitung nur mit Genehmigung der Redaktion.

Wachtberg, April 2022

## Bilder

Titel: Fraunhofer FHR

S. 4: Fraunhofer FHR / Uwe Bellhäuser

S. 10: 1 Fraunhofer FHR / Rosebrock, 2 FHR

S. 11: 3 FHR / Bellhäuser, 4 Fraunhofer FHR / Welsch, 5 Fraunhofer FHR / Fiege, 6 Fraunhofer FHR / Gallasch, 7 Hensoldt

S. 12: 8 Fraunhofer FHR / Bellhäuser, 9 VDI Rheingau-Bezirksverein e.V., 10 Fraunhofer FHR / Welsch,

S. 13: 11 Fraunhofer Vision, 12 Fraunhofer FHR

S. 14 und S. 15: Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 16: Fraunhofer FHR / Alex Shoykhetbrod

S. 17: Fraunhofer FHR / Iole Piciottano

S. 18: Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 24: Fraunhofer FHR

S. 26: oben Fraunhofer FHR

S. 26: unten Fraunhofer FHR / Alex Shoykhetbrod

S. 27: Fraunhofer FHR / Alex Shoykhetbrod

S. 28: IBM

S. 29: Shutterstock / mkfilm

S. 30: Fraunhofer FHR / Uwe Bellhäuser

S. 32: Fraunhofer FHR / BPTI

S. 34 und S. 35: Fraunhofer FHR / Diego Cristallini

S. 36: Fraunhofer FHR

S. 37 oben: Fraunhofer FHR / Google Earth

S. 37 unten: Fraunhofer FHR

S. 38: Fraunhofer FHR / Diego Betancourt

S. 39: Fraunhofer FHR

S. 40: Fraunhofer FHR / Taher Badawy

S. 41: Fraunhofer FHR

S. 42: Fraunhofer FHR / Jens Klare

S. 45: Fraunhofer FHR / Andreas Schoeps

S. 46 oben: ESA, unten: Fraunhofer FHR

S. 47: Fraunhofer FHR

S. 48: Fraunhofer FHR

S. 50: Shutterstock / The Stock Studio

S. 51: Polizei Rheinland-Pfalz

S. 52: Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 54 a) und b) INPROCEEDINGS (Jonas Uhrig, Nick Schneider, Lukas Schneider, Uwe Franke, Thomas Brox, Andreas Geiger)

S. 54 c) und d) Fraunhofer FHR

S. 55: Fraunhofer FHR / Simon Wagner

S. 56: Fraunhofer FHR / Alex Shoykhetbrod

S. 58: Fraunhofer FHR

S. 59: oben Fraunhofer FHR, unten Fraunhofer IOSB

S. 60: iStockphoto / jittawit.21 / Fraunhofer FHR

S. 62 oben: Shutterstock / Fraunhofer FHR

S. 62 unten: Fraunhofer FHR / Ralf Brauns

S. 63: Fraunhofer FHR / Sven Leuchs

S. 64: iStockphoto / dtimiraos

S. 72: Fraunhofer FHR / Jens Fiege



