

Jahresbericht 2022

---

Vernetzung. Austausch.  
Kooperation.



Jahresbericht 2022



Vernetzung. Austausch.  
Kooperation.

# Vorwort

---



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

die Auswirkungen der Pandemie und die weltpolitischen Entwicklungen haben auch das Fraunhofer FHR im Jahr 2022 stark geprägt. Preissteigerungen, Rohstoffknappheit und der Fachkräftemangel stellen auch uns vor ungeahnte Herausforderungen. Dennoch können wir auf viel Gelungenes blicken, das wir Ihnen in diesem Jahresbericht vorstellen möchten. Ebenso konnten Aspekte weiter verstärken, die in Zukunft für innovative Forschung und Entwicklung noch mehr benötigt werden: Vernetzung, Austausch, Kooperation.

So sind wir stolz, seit 2022 als Koordinator des Forschungsnetzwerks terahertz.NRW in einem Konsortium mit der Ruhr-Universität Bochum, der Universität Duisburg-Essen, der Bergischen Universität Wuppertal und dem Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen IMS daran mitzuwirken, das technologische Potenzial der THz-Technologie weiterzuentwickeln und mit exzellenter Forschung die absehbare internationale Innovationswelle anzuführen. Mehr dazu lesen Sie auf S. 12. Als Teil der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland FMD als zentraler Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die Mikro- und Nanoelektronik in Deutschland und Europa und Vorreiter für standort- und technologieübergreifende Zusammenarbeit arbeiten wir daran mit, aktuelle und künftige Herausforderungen der Elektronikforschung zu lösen (Bericht S. 26).

Einen Meilenstein in Bereich der Weltraumüberwachung mit Radar haben wir mit der Kooperationsvereinbarung zur Kommerzialisierung des GESTRA Systems erreicht. Der Sensorspezialist HENSOLDT hat eine Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer FHR vereinbart, mit dem Ziel, den Technologiedemonstrator in ein serienreifes System mit dem Namen Custodian zu überführen. Dazu hat HENSOLDT die notwendigen Lizenzen von der Fraunhofer-Gesellschaft erworben und eine Kooperationsvereinbarung geschlossen (Bericht S. 37).

Auch intern haben wir viel auf den Weg gebracht: So haben wir mit der Besetzung der zwei neuen Stabsstellen Prozess- und Qualitätsmanagement sowie Qualitätssicherung die Weichen für die künftigen Anforderungen der Zusammenarbeit in Großprojekten gestellt. Mehr dazu finden Sie auf S. 8.

Vernetzung, Austausch und Kooperation standen auch im Mittelpunkt unseres 10. Wachtberg-Forums, das wir im vergangenen Sommer erstmals am Standort Villip durchgeführt haben (Bericht S. 14). Es war ein Highlight des Jahres, nach zwei Jahren Corona-Pause unsere Forschungsarbeit endlich wieder »live und vor Ort« präsentieren zu können. Wieder einmal hat sich die große Bedeutung des persönlichen Kontakts gezeigt und wir freuen uns schon auf das Wachtberg-Forum 2023 – in diesem Jahr erstmals zweitägig vom 21. bis 22. Juni. Merken Sie sich den Termin schon einmal vor!

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre!

Herzliche Grüße aus Wachtberg



Peter Knott



Dirk Heberling

### Geschäftsführender Institutsleiter

---

Prof. Dr.-Ing.  
Peter Knott  
+49 228 60882-1001  
peter.knott@  
fhr.fraunhofer.de

### Institutsleiter

---

Prof. Dr.-Ing.  
Dirk Heberling  
+49 228 60882-1002  
dirk.heberling@  
fhr.fraunhofer.de

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort .....	4
Inhaltsverzeichnis .....	6
<b>Aus dem Institut .....</b>	<b>8</b>
Qualitätsthemen mit Rückenwind .....	8
Besondere Ereignisse im Jahr 2022 .....	10
Vernetzung pur! .....	12
10. Wachtberg-Forum: Gelungenes Jubiläum .....	14
Promotion am Fraunhofer FHR .....	16
<b>Fraunhofer FHR im Profil .....</b>	<b>20</b>
Das Jahr 2022 in Zahlen .....	22
Das Kuratorium .....	24
Know-How aus einer Hand .....	26
<b>Geschäftsfeld Verteidigung .....</b>	<b>28</b>
Radar im Zeichen der Verteidigung .....	29
Abbildendes Radar: Von einer Drohne getragen .....	30
Kleinere Antennen ohne Bandbreitenverlust .....	31
Abstimmbare Metamaterialien verbessern Antennenarrays .....	32
Fernerkundung und Zielerfassung mit Starlink-Satelliten .....	33
<b>Geschäftsfeld Weltraum .....</b>	<b>34</b>
Weltraum: Lage von Objekten präzise erfassen .....	35
»Feuertaufe« des Weltraumüberwachungsradars GESTRA .....	36
Mein Haus, mein Auto, mein Weltraumbeobachtungsradar? .....	37
Müllabfuhr für den Orbit .....	38
Hochauflösendes Abbildungsradar für die Weltraumbeobachtung .....	40
Die Suche der Nadel im Heuhaufen .....	41

<b>Geschäftsfeld Sicherheit</b> .....	<b>42</b>
Zivile Sicherheit: Vielfältige Unterstützung durch Radar .....	43
Verschüttete via Radar schnell und präzise lokalisieren .....	44
Vertiports sicher gestalten .....	45
<b>Geschäftsfeld Verkehr</b> .....	<b>46</b>
Radarsysteme für mehr Sicherheit im Auto, Flugzeug, Bahn und Schiff .....	47
Metallbeschichtete Radarantenne aus dem 3D-Drucker .....	48
Kollisionsfrei trotz vollem Luftraum .....	49
<b>Geschäftsfeld Produktion</b> .....	<b>50</b>
Produktionsprozesse stets im Blick .....	51
Defekte in glasfaserverstärktem Kunststoff in-line aufspüren .....	52
<b>Anhang</b> .....	<b>54</b>
Veröffentlichungen .....	55
Ausbildung und Lehre .....	56
Gremientätigkeiten .....	60
Standorte .....	64
Impressum .....	66

# Qualitätsthemen mit Rückenwind

**Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung: Mitarbeiterinnen auf zwei neuen Stabsstellen unterstützen die Mitarbeitenden des Instituts dabei, die Effizienz und Qualität zu erhöhen.**

Es hat sich einiges getan im Bereich Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung: So wurden 2022 zwei neue Stabsstellen besetzt. Danijela Bagaric widmet sich seit März 2022 dem Prozess- und Qualitätsmanagement, Denise Potinius füllt das Thema Qualitätssicherung seit September 2022 mit Leben.

## **Qualitätssicherung: Fäden zusammen halten**

Doch was hat man sich unter Qualitätssicherung vorzustellen? »Wir arbeiten in mehreren Großprojekten mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR zusammen«, erläutert Potinius. »Diesen zentralen Kunden wollen wir natürlich zufriedenstellen, indem wir die dessen Anforderungen erfüllen.« Die Bezeichnung Qualitätssicherung sei da etwas knapp gefasst, es sind auch viele Themen betroffen, die man klassisch nicht darunter verstehen würde. »Die Aufgaben überschneiden sich oft mit denen anderer Stellen. Präziser ist daher die englische Bezeichnung Product Assurance. Themenfelder wie Lieferanten- und Risikomanagement spielen beispielweise auch eine Rolle. Sie müssen mitgedacht und mit den anderen Beteiligten abgestimmt werden«, erläutert Potinius weiter.

»Über die reine Anforderungserfüllung hinaus schauen wir auch, was die Qualitätssicherung dem Institut bringt und was wir aus den einzelnen Projekten für unsere Prozesse mitnehmen können. Mir ist zudem besonders wichtig, dass die Prozesse durch die

Mitarbeiter gelebt und unterstützt werden«, schildert sie. In diesem Sinne hält Potinius die Fäden zusammen und erfüllt durchaus auch eine gewisse Übersetzerfunktion zwischen Kundenanforderungen und Mitarbeitenden.

## **Prozess- und Qualitätsmanagement: Prozesse im Fokus**

Während Potinius aktuell projektbezogen arbeitet, ist Bagarics Blickwinkel strategisch, abteilungs- und prozessübergreifend. »Der externe Bedarf besteht vor allem darin, die Kundenzufriedenheit zu erhöhen. Die innere Motivation ist es, durch das Prozess- und Qualitätsmanagement die Transparenz und Struktur der Prozesse zu vergrößern, um zielorientierter arbeiten zu können sowie die Grundlage für mehr Digitalisierung zu schaffen«, beschreibt Bagaric. Dabei geht es ihr keineswegs darum, alles bis ins Detail zu dokumentieren, vielmehr steht der Ausgleich zwischen notwendigen Vorgaben und erforderlichen Freiräumen im Fokus. Hierbei bezieht sie die Qualitätsbeauftragten der Abteilungen in ihrer Arbeit ein – gemeinsam entwickeln sie Prozesse zur vollen Reife weiter. Zudem möchte sie die Arbeitsprozesse strukturiert verbessern und hat, trotz der kurzen Zeit, bereits Feedback-Strukturen eingeführt: Auf diese Weise können alle Mitarbeitenden Verbesserungspotenziale in Prozessen identifizieren und mitteilen. So lassen sich die Prozesse – auch im Sinne der Kunden und Mitarbeitenden – kontinuierlich verbessern. Weitere Schritte sind ebenfalls bereits getan. So hat Bagaric eine Prozesslandschaft aufgebaut und an der Einführung mittels der cloudbasierten Lösung Microsoft SharePoint einen wesentlichen Beitrag geleistet. Dieses bildet das Fundament, um bevorstehende Aufgaben zu lösen.





# Besondere Ereignisse im Jahr 2022

Bonn, 8.-10. März  
**Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland**

Wachtberg, 8. März  
**Dreifacher Erfolg bei der Abschlussprüfung zum Feinwerkmechaniker:** Anton Schröder ist Jahrgangsbester der Innung Bonn-Rhein-Sieg, Kammersieger der Handwerkskammer zu Köln und Dritter im Leistungswettbewerb des deutschen Handwerks Nordrhein-Westfalen.



1

Bonn, 12. Mai  
**AFCEA Bonn e.V. Studienpreis für Peter Toth**  
 Der ehemalige Elektrotechnik-Masterstudent erhält nach dem ICT Young Researcher Award der RWTH Aachen einen weiteren Preis für seine in der Gruppe Kryogene Arrays verfasste Masterarbeit.

Bonn, 12.-13. Mai  
**13. Bonner Wissenschaftsnacht**  
 Das Fraunhofer FHR präsentiert zusammen mit den Forschungseinrichtungen und Hochschulen der #wissenschaftsregionbonn aktuelle Forschungsprojekte.



2

Januar

Februar

März

April

Mai

Juni

London, 2.-4. April  
**European Microwave Week**  
 Das Fraunhofer FHR zeigte auf dem Gemeinschaftsstand mit der niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung TNO, dem Technischen Forschungszentrum VTT und dem Fraunhofer IAF ein breites Spektrum seiner Forschungstätigkeit und Radaranwendungen.

Wachtberg-Villip, 23. Mai  
**Dr. Dirk Nübler ist Fraunhofer-Forschungsmanager**



4

Wesel, 10. Juni  
**Abschlussdemonstration von Lupe+**  
 Mit der Lokalisation einer verschütteten Person und der Extraktion ihrer Atmungsparameter lieferte die Abschlusspräsentation des BMBF-Förderprojekts Lupe+ auf dem Übungsgelände des THW Wesel vielversprechende Ergebnisse für die Verbesserung der Verschüttetendetektion nach Erdbeben, Lawinen, etc.



5

Wachtberg, 12. April  
**Konferenz der Bürgermeisterinnen und Bürgermeister des Rhein-Sieg-Kreises am Fraunhofer FHR**



3

Wachtberg-Villip, 24. Juni  
**Kuratoriumssitzung**

10

Dresden, 27. September  
**Dr. Stephan Palm erhält DLR-Dissertationspreis auf dem Deutschen Kongress für Luft- und Raumfahrt**  
 Mit seiner Dissertation »Mapping of urban scenes by single-channel mmW FMCW SAR on circular flight and curved car trajectories« gewann Dr. Stephan Palm den DLR-Dissertationspreis 2022 der »Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V.«



6

Bonn, 18. August  
**Firmenlauf Bonn**



7

Bremen, 15.-17. November  
**Space Tech Expo**  
 Auf einem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Allianz AVIATION & SPACE stellte das Fraunhofer FHR seine Kompetenz in der Weltraumüberwachung vor. Im Mittelpunkt standen die GESTRA-Netzwerke unter dem Motto: »Modernste Technologie trifft Sensorfusion«.



8

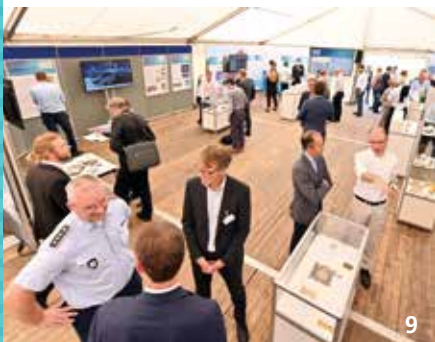
Wachtberg, 17. Oktober  
**NATO STO Excellence Award 2022 für Dr. Matthias Weiß**  
 Für seine hervorragende Arbeit in der Gruppe SET-232/SET-236 »Design and Analysis of Compressive Sensing Techniques for Radar, ESM and Electro-Optical Systems« wurde Dr. Matthias Weiß ausgezeichnet.

Online, 4.-7. Juli  
**13th International Summer School on Radar/SAR.**  
 53 Teilnehmende aus 12 Ländern absolvierten ein hochkarätiges Programm mit 9 Vorträgen internationaler Experten, 6 Workshops, Social Events und virtueller Institutsbesichtigung.

Juli      August      September      Oktober      November      Dezember

Mailand, 25.-30. September  
**25. European Microwave Week**

Wachtberg-Villip, 23. Juni  
**10. Wachtberg-Forum**  
 Gelungenes Jubiläum: Viele Gründe zu feiern gab es auf dem diesjährigen Wachtberg-Forum: Die erste Veranstaltung nach zwei Jahren Corona-Pause, die 10. seit Gründung in 2009, das erste Mal am Standort Villip und die Premiere als hybride Veranstaltung mit Teilnehmern vor Ort und virtuell.



9

Wachtberg, 28. Oktober  
**Großübung der Feuerwehr Wachtberg rund um TIRA**



10

Aachen, 10. November  
**Bonding**



11

Bochum, 27. Oktober  
**terahertz.NRW Kick-off im Technologiezentrum Ruhr**

Sankt Augustin, 10. November  
**Unternehmenstag Hochschule Bonn-Rhein-Sieg**

# Vernetzung pur!

**Terahertz-Strahlung bietet interessante Eigenschaften, die sich in zahlreichen Fachbereichen nutzen lassen. Das Netzwerk *terahertz.NRW* bringt Expertinnen und Experten aus dem Terahertz-Bereich mit solchen aus anderen Fachbereichen zusammen.**

Wie laufen Nährstofftransporte in Blättern ab? Wie verändern sich Pflanzen in ihrer Struktur, ihrem Wachstum und ihrem Aufbau, wenn sie zum Beispiel unter Klimastress sind oder nicht mehr ausreichend Nährstoffe zur Verfügung stehen? Biologen, die sich mit solchen Fragestellungen beschäftigen, sind in der Terahertz-Technologie üblicherweise nicht sonderlich bewandert. Andersherum müssen Terahertz-Expertinnen und -Experten bei Fragen aus den Tiefen der Biologie meist passen. Das Netzwerk *terahertz.NRW* soll die Terahertz-Forschung daher nun mit anderen Fachbereichen verknüpfen: Somit können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen von der Terahertz-Technologie profitieren. Und, um beim Beispiel der Biologie zu bleiben, gemeinsam via Terahertz-Strahlen in die Pflanzen hineinschauen.

## ***terahertz.NRW*: Gefördert mit 17,7 Millionen Euro**

Gestartet ist das Projekt *terahertz.NRW* im August 2022, gefördert vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft NRW im Förderprogramm »Netzwerke 2021«. Ziel des Förderprogramms ist es, bereits bestehende Forschungsnetzwerke von Universitäten, Hochschulen für Angewandte Wissenschaften und außeruniversitären Forschungseinrichtungen nachhaltig zu stärken, auszubauen, sie sichtbarer und international wettbewerbsfähiger werden zu

lassen. Die Unterstützung ist ab August 2022 auf vier Jahre ausgelegt. Von den 19 Netzwerken, die sich beworben haben, erhielten fünf eine Förderung: *terahertz.NRW* ist mit 17,7 Millionen Euro das größte Netzwerk, das in diesem Kontext gefördert wird. Beteiligt sind die drei Universitäten Ruhr-Universität Bochum, Universität Duisburg-Essen und Bergische Universität Wuppertal mit insgesamt 25 Instituten sowie von Fraunhofer-Seite das Fraunhofer FHR und Fraunhofer IMS mit insgesamt sechs Abteilungen. Die Federführung liegt beim Fraunhofer FHR.

Im Gegensatz zur üblichen Forschungsförderung steht in *terahertz.NRW* nicht nur die Forschung an sich im Fokus, sondern das Netzwerk. Bemerkbar macht sich das unter anderem in der Wichtigkeit von Förderprogrammen, für diese werden etwa 25 Prozent der Gesamtsumme eingesetzt. Die Förderung findet unter anderem im Genderbereich statt: Wie bekommt man mehr Frauen in MINT-Bereiche, insbesondere in die Elektrotechnik, wo die Frauenquote derzeit bei 20 Prozent liegt? Auch soll es Stipendiaten geben.

## **Terahertz-Strahlung: Was steckt dahinter?**

Das Ziel des Netzwerkes liegt darin, andere Fachbereiche von der Terahertz-Technologie profitieren zu lassen. Doch was ist eigentlich Terahertz-Strahlung, und wo liegen ihre Vorteile? Von Terahertz-Strahlung spricht man bei einem Frequenzbereich von 100 Gigahertz bis zehn Terahertz, sie liegt also zwischen Infrarotstrahlung und Mikrowellen. Zwar werden entsprechende Strahlen durch die Atmosphäre stark gedämpft, sie haben also keine hohe Reichweite, weshalb sich mit ihnen nicht weit



*oben und Mitte:*  
Prof. Peter Knott und Dr. Dirk Nübler sprachen in Bochum beim *terahertz.NRW* Kick-off.

*unten:*  
Vereinte Kompetenz: Die Teilnehmer der *terahertz.NRW* Auftaktveranstaltung.



schauen lässt. Jedoch ist die Terahertzstrahlung einer der wenigen Frequenzbereiche, in denen noch große Frequenzbandbreiten zur Verfügung stehen, auch ist die Strahlung physikalisch recht interessant. So findet man mit Terahertzstrahlung Absorptionslinien von Gasen und Feststoffen. Radioastronomen interessieren sich seit eh und je für diesen Frequenzbereich, da die kosmische Hintergrundstrahlung zu großen Teilen hier liegt. Auf der Erde sind Anwendungen im Terahertzbereich äußerst interessant, bei denen es nicht um große Reichweiten, sondern um Bandbreite oder Materialcharakterisierung geht. Ein Beispiel ist die Übertragung von Daten aus dem Rechner an einen Monitor, die heute via Kabel geschieht. Bei steigender Auflösung kommt das Kabel jedoch an seine Grenzen, dann könnten Terahertzwellen zum Einsatz kommen – die hohe Dämpfung durch die Atmosphäre ist aufgrund der kurzen Distanzen irrelevant, wogegen die große Bandbreite durchaus attraktiv ist.

### In welchen Bereichen bietet die Terahertz-Strahlung einen Mehrwert?

Auch alle weiteren Anwendungen der Terahertzstrahlung beziehen sich auf den Nahbereich: Sei es bei der Medizintechnik, dem Umweltmonitoring, der Materialcharakterisierung, der Kommunikation oder der Lokalisierung. Was die Medizin angeht, so könnten nicht-invasive Terahertz-Sensortechnologien dabei helfen, Gewebe zu klassifizieren, etwa bei Operationen, und mit Endoskopen in den Körper zu schauen, um Krebs zu analysieren und zu entfernen. Im Bereich der Materialcharakterisierung liegt der Fokus auf hochpräzisen Terahertz-Bildgebungssystemen und Material- und Strukturbildgebung in drei Dimensionen. Der Fachbereich Biologie kann durch die Echtzeit-Beobachtung der Transportraten von Nährstoffen unter verschiedenen Umweltbedingungen profitieren – etwa Unterschiede zwischen Tag und Nacht sowie Reaktionen der Pflanzen auf Bodenzusätze oder auf Stress.

### Kontakt

Dr.-Ing. Dirk Nüßler  
 +49 228 60882-2501  
 dirk.nuessler@  
 fhr.fraunhofer.de

# 10. Wachtberg-Forum: Gelungenes Jubiläum

Viele Gründe zu feiern gab es auf dem Wachtberg-Forum 2022: die erste Veranstaltung nach zwei Jahren Corona-Pause, die 10. seit Gründung in 2009, das erste Mal am Standort Villip und die Premiere als hybride Veranstaltung mit Teilnehmern vor Ort und virtuell.

Unter dem Motto »Mit Radar in die Zukunft« zeigte die Ausstellung mit vielen Exponaten und Live-Demonstrationen praxisnah aktuelle Projekte, ergänzt von 11 Fachvorträgen auf der Bühne. Die Themen verdeutlichten eindrucksvoll die große Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten von Radar: von der Weltraumlageerfassung über KI-gestützte Radarsysteme und additive Verfahren in der Entwicklung von Hochfrequenzkomponenten bis hin zur Materialanalyse zur Qualitätskontrolle und vieles mehr.

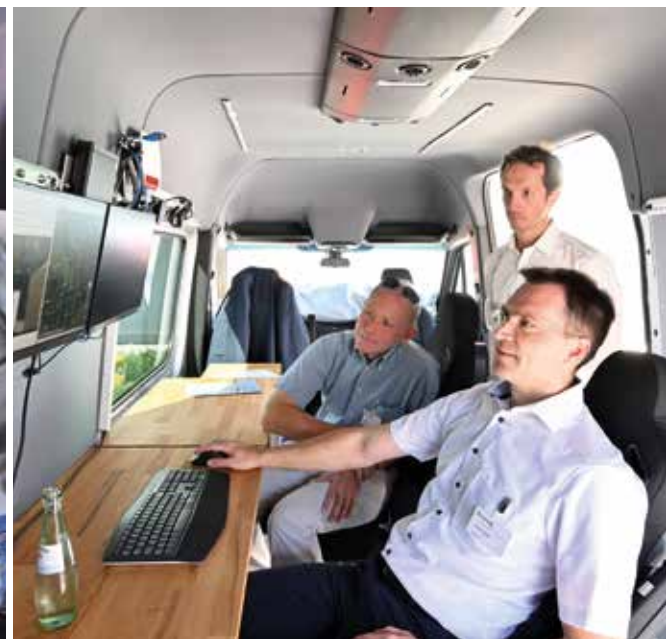
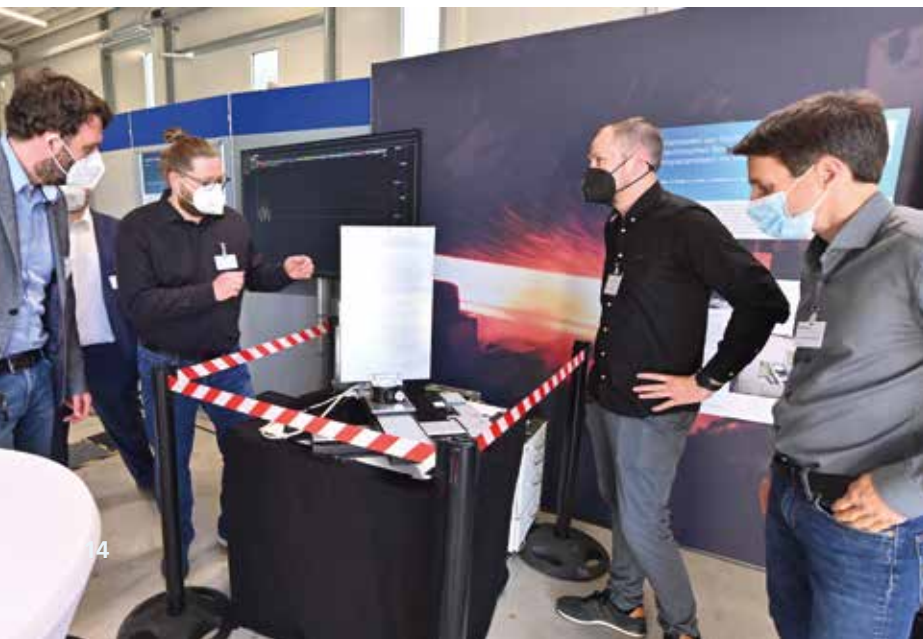
Ob Kunden, Partner oder Auftraggeber: Gäste aus Industrie, Verteidigung, Wissenschaft und Politik nutzen bei strahlendem Sommerwetter die Gelegenheit, sich einen aktuellen Überblick über die Arbeit des Fraunhofer FHR zu

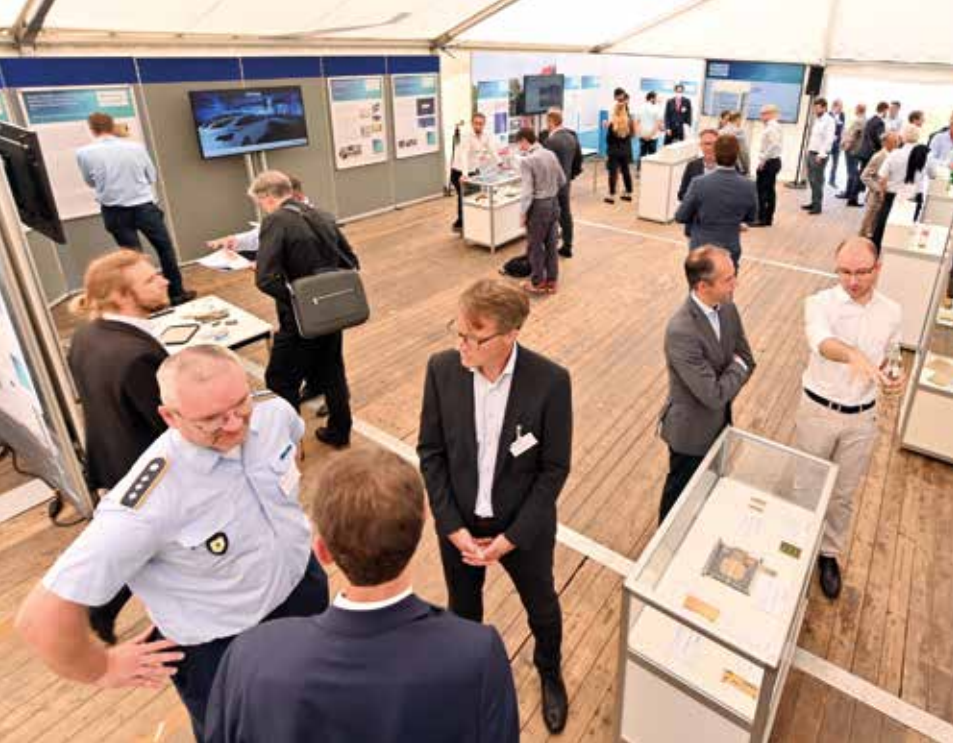
verschaffen und Projektansprechpartner zu treffen. Ebenso konnte das neue Büro- und Laborgebäude Villip II besichtigt werden. Neben einem Besuch des Wachtberg-Forums vor Ort gab es erstmals die Möglichkeit online dabei zu sein. Über 50 Teilnehmende schalteten sich digital dazu.

Der Wettergott war dem Wachtberg-Forum auch in diesem Jahr hold und meinte es fast zu gut: Mit Sonnenschirmen, kalten Getränken und nicht zuletzt einem Eiswagen trotzten die Gäste und Mitarbeitenden der Sommerhitze. Auch die Location in Villip II bestand die Premiere erfolgreich. »Wir freuen uns über eine rundum gelungene Jubiläumsveranstaltung. Die große Resonanz der Besucher zeigt uns, dass das Wachtberg-Forum ein Fixpunkt im Jahreskalender unserer Kunden und Partner ist.«, so das Fazit von Prof. Peter Knott.

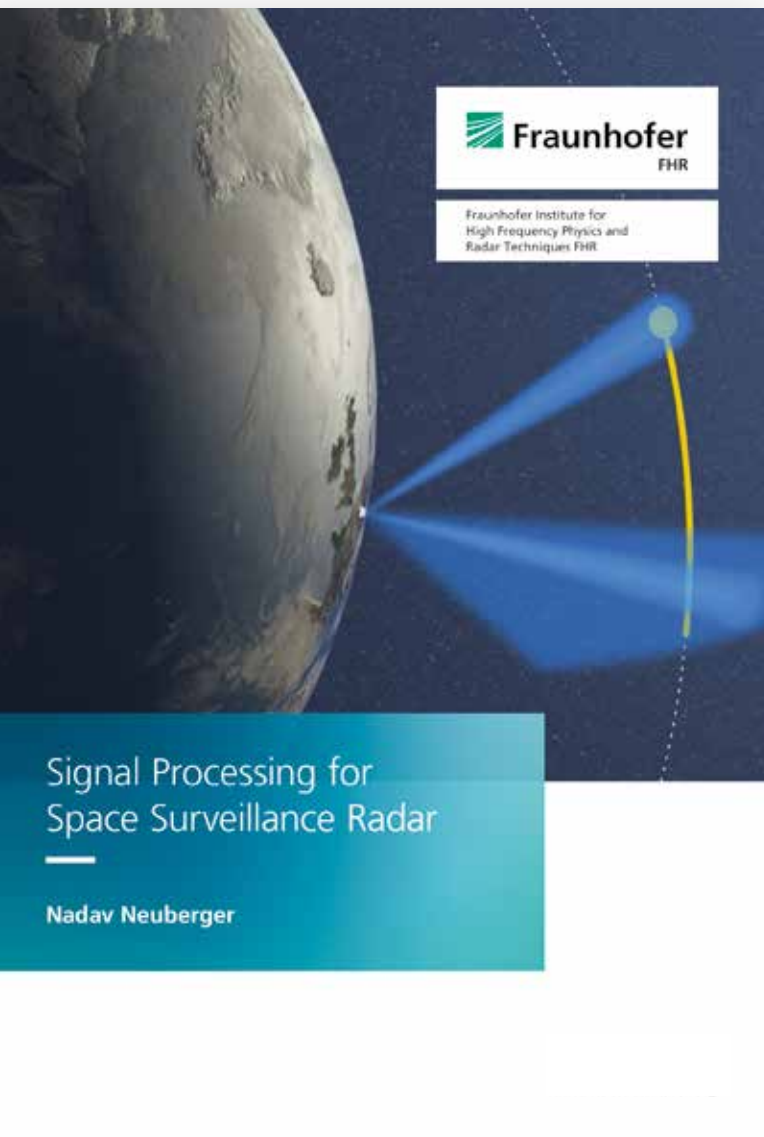
Das 11. Wachtberg-Forum findet von 21. bis 22. Juni 2023 statt. Dann wieder am Standort Werthhoven rund um das Weltraumbeobachtungsradar TIRA.

*Impressionen vom Wachtberg-Forum in Wachtberg-Villip am 23. Juni 2022.*





# Promotion am Fraunhofer FHR



## Dr. Nadav Neuberger

Dr. Nadav Neuberger aus der Gruppe Signalverarbeitung für Überwachungsradare in der Abteilung Array-gestützte Radarbildgebung hat im Februar 2022 seine Dissertation mit dem Titel »Signal Processing for Space Surveillance Radar« erfolgreich verteidigt. Dr. Neuberger hat in Israel seinen Bachelor und Master in Elektrotechnik absolviert und als Elektroingenieur in der Privatwirtschaft in großen Unternehmen und kleinen Start-ups gearbeitet. Im Jahr 2018 brachte ihn eine spannende Forschungsstelle ans Institut und er begann seine Promotion in Elektrotechnik und Informatik an der Universität Siegen bei Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender.

Mit seiner Doktorarbeit folgte er seinem Interesse, tiefer in die Theorie der Radarsignalverarbeitung einzusteigen. »Radarsignalverarbeitung an sich gibt es schon seit Jahrzehnten. Es besteht jedoch ein großes Potenzial für neue Methoden, die sich besser für das Weltraumüberwachungsszenario eignen – insbesondere für die Erkennung von Weltraummüll in der erdnahen Umlaufbahn. In meiner Arbeit habe ich mich auf neue Signalverarbeitungsmethoden konzentriert, die auf die Erkennung von Trümmern und die Schätzung von Parametern zugeschnitten sind«, erzählt Dr. Neuberger. Das Thema ergab sich aus seiner Aufgabe, die Signalverarbeitung für GESTRA zu entwickeln. Einige der neuen Methoden umfassen einen neuen Rx-Beamformer für eine genaue Direction-of-Arrival (DOA)-Schätzung und eine empfindliche Erkennung. Ebenso werden zwei neue FM-kodierte Wellenformen vorgestellt, die verschiedene Herausforderungen im Bereich der Nebenkeulen innerhalb der Bereichs-Doppler-Verarbeitung lösen.

»Das Institut und meine Kollegen haben meine Promotion in jeder Hinsicht perfekt unterstützt. Ebenso bin ich sehr dankbar für die hervorragende Betreuung durch Prof. Ender – als Leitfigur der weltweiten Radargemeinschaft leistet er einen unschätzbaren Beitrag für Studenten und wissenschaftliche Kollegen«, so das Resümee von Dr. Neuberger.

### Kontakt

Dr. Nadav Neuberger  
+49 228 60882-2253  
nadav.neuberger@  
fhr.fraunhofer.de



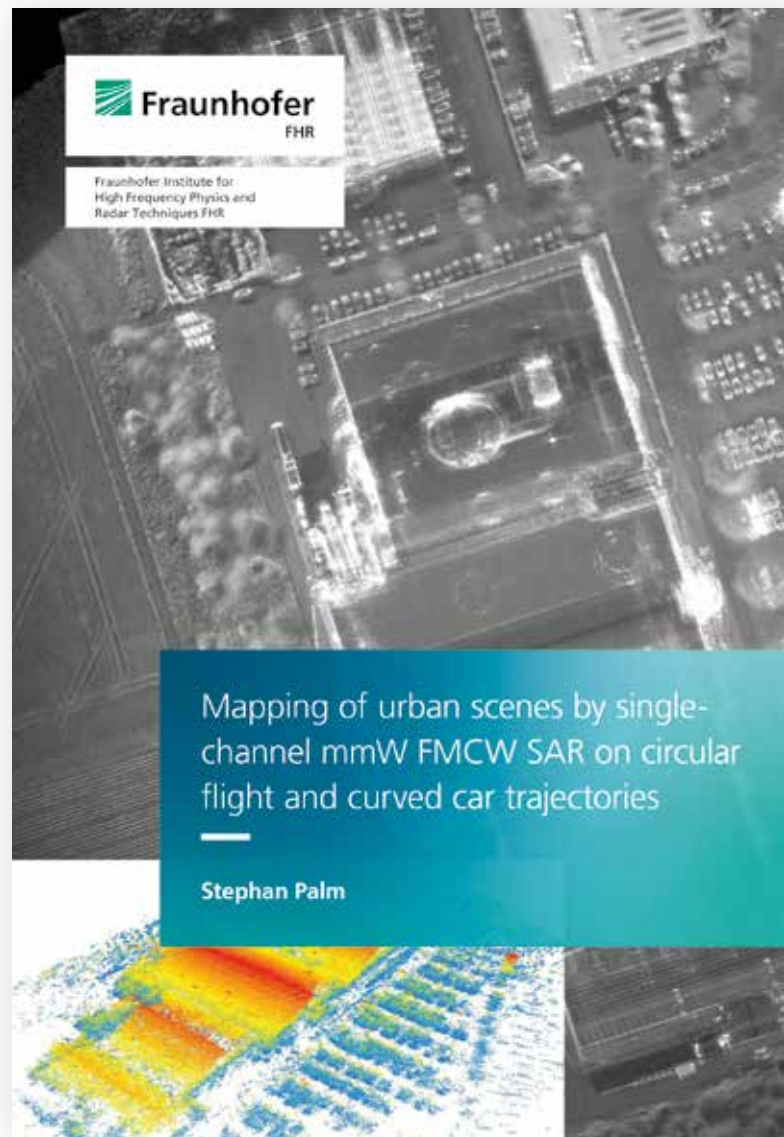
Die Förderung der Wissenschaftlichkeit ist dem Fraunhofer FHR ein wichtiges Anliegen. Das Institut unterstützt daher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aktiv auf ihrem Weg zu Promotion. Je nach persönlichen Forschungsschwerpunkten und Interessen gibt es individuell zugeschnittene Betreuungs – und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

## Dr. Stephan Palm

Ende Dezember 2021 verteidigte Dr. Stephan Palm, Mitarbeiter der Gruppe SAR und Algorithmik @mmW in der Abteilung Höchstfrequenz-Radar und Anwendungen, erfolgreich seine Doktorarbeit »Mapping of urban scenes by single-channel mmW FMCW SAR on circular flight and curved car trajectories« an der TU München. Sein Doktorvater war Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla.

Die Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines flugzeuggetragenen, zirkularen SAR Systems inklusive neuer Datenprozessierungsverfahren, verbunden mit hochaufgelöster Bildgebung von Straßen und Fassaden (Radar-Mobile-Mapping) und einer 3D Punktwolke-Extraktion. Die Ergebnisse publizierte Dr. Palm in drei Journal Papers und auf diversen Konferenzen. »Ich konnte zeigen, was mit einem einkanaligen SAR-System durch die Kreisgeometrie im W-band möglich ist: eine Azimut Auflösung bis auf 1 cm, eine Höhenauflösung bis 10 cm und die Erkennung und Visualisierung von Bewegtzielen wie Personen und Fahrzeuge. Die größten Herausforderungen waren überhaupt erst einmal ein System zu entwickeln, das experimentelle 360° Daten im W-band erfassen kann. Hierzu mussten unter anderem Firmen gefunden werden, die Teilkomponenten der speziellen Hardware herstellen. Ebenso war die Prozessierung der Datenmenge der 3D Punktwolke sehr anspruchsvoll, also die Prozessierungskette aufzubauen und effizient zu gestalten«, so Dr. Palm.

Dr. Palm kam 2011 nach Abschluss seines Studiums der Technischen Informatik an der RWTH ans Fraunhofer FHR, 2013 startete die Promotion. »Über meine Promotionsbedingungen am Institut kann ich nur Gutes berichten: Ich hatte ein hohes Maß an Gestaltungsfreiraum für meine Arbeit, da diese inhaltlich sehr gut zu unseren Projekten passte. Abteilungsleiter und Kolleginnen und Kollegen haben mich immer unterstützt und waren stets mit Rat und Tat zu Stelle. Ideal war auch die Möglichkeit zum Besuch von Konferenzen und der Austausch mit anderen Universitäten. So hatte ich z. B. zu Beginn meiner Promotion einen 10-tägigen Aufenthalt an der Uni Zürich als Start in die SAR-Prozessierung«, so Dr. Palm rückblickend.



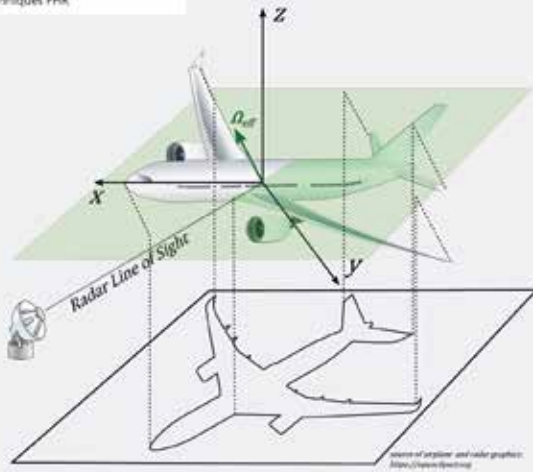
### Kontakt

Dr. Stephan Palm  
+49 228 9435-357  
stephan.palm@  
fhr.fraunhofer.de

# Promotion am Fraunhofer FHR



Fraunhofer Institute for  
High Frequency Physics and  
Radar Techniques FHR



## Radar Target Classification via Sparse Decomposition

Simon Wagner

## Dr. Simon Wagner

Dr. Simon Wagner, Gruppenleiter Maschinelles Lernen für Radaranwendungen in der Abteilung Kognitives Radar (KR), hat im April 2022 seine Promotion zum Thema »Radar Target Classification via Sparse Decomposition« am Lehrstuhl Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik der Universität Siegen bei Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar erfolgreich verteidigt. Doktorvater und Betreuer am Fraunhofer FHR war Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender.

2012 besuchte Dr. Wagner als Student der Elektrotechnik in Trier das Fraunhofer FHR und lernte dabei Prof. Ender kennen, der mit ihm zusammen die grobe Richtung der Forschungsansätze entwickelte. So verfasste Dr. Wagner seine Masterarbeit am Institut und ist seitdem als Wissenschaftler in der Abteilung KR (bis 2014 PSK) tätig. Aus der Weiterentwicklung des Masterthemas ergab sich das Thema der Doktorarbeit. Darin untersuchte er, wie verschiedene Arten von Reflektoren in ISAR Bildern zu erkennen sind. In einer Anwendung wurde ein vom TIRA vermessenes Flugzeug in die Reflektoren Triebwerke und Punktstreuer eingeteilt. Dabei wurde der hinter Triebwerken entstehende Schweif ausgenutzt. Dr. Wagner hat ein physikalisches Modell gefunden und erstmals in einer Klassifizierungsmethode angewendet, die dieses Phänomen beschreibt. Durch die damit mögliche Bestimmung der Lage und Anzahl der Triebwerke erhält der Klassifizierer eine wertvolle zusätzliche Information für die Einteilung und Vorklassifizierung des Objekts.

Seine Doktorarbeit verfasste er losgelöst von seiner täglichen Arbeit und so gab es immer wieder projektbedingte Pausen in der Doktorarbeit. »Einerseits ist es eine Herausforderung über einen längeren Zeitraum durchzuhalten, andererseits hatte ich nach den Pausen wieder neue Ideen«, so Dr. Wagner. Das Institut hat ihm bei seinem Vorhaben immer gut unterstützt. »Die Mathematiker-Kollegen in meiner Abteilung haben mir bei den Beweisen in meiner Arbeit sehr geholfen. Toll waren auch die Besuche der Radarkonferenzen in London, Pisa und New York - auf der EURAD 2016 habe ich mit meinem Thema den Best Paper Award gewonnen«, resümiert Dr. Wagner.

### Kontakt

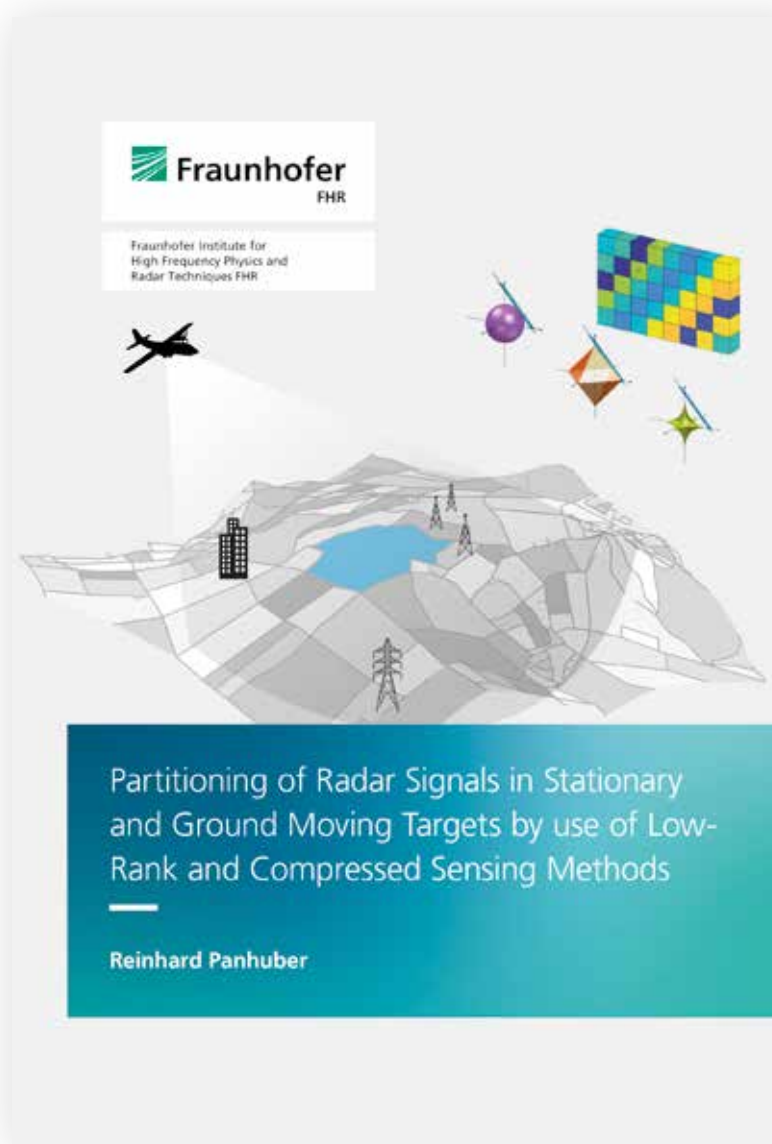
Dr. Simon Wagner  
+49 228 9435-365  
simon.wagner@  
fhr.fraunhofer.de

## Dr. Reinhard Panhuber

Im November 2022 hat Dr. Reinhard Panhuber seine Dissertation »Partitioning of Radar Signals in Stationary and Ground Moving Targets by use of Low-Rank and Compressed Sensing Methods« an der Universität Siegen erfolgreich verteidigt. Doktorvater war Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender, Betreuer am Institut sein Gruppenleiter Dr. Ludger Prünke.

Dr. Panhuber hat Informationselektronik an der Johannes Kepler Universität Linz/Österreich studiert und kam 2015 ans Fraunhofer FHR - in die Gruppe MIMO-Radare und Multistatik der Abteilung Array-gestützte Radarbildgebung. 2018 startete er mit der Promotion im Rahmen eines Industrieprojekts. Er befasste sich mit der Behandlung von Bodenclutter bei der Detektion von Bewegtzielen, wie Autos oder Schiffe, von Flugzeugen aus (Airborne - Ground Moving Target Indication/GMTI). Klassischerweise wird für GMTI ein Algorithmus namens Space Time Adaptive Processing (STAP) genutzt. Dieser ermöglicht die Unterdrückung von Bodenclutter, also Echos der Erdoberfläche welche die Reflektionen von Bewegtzielen überlagern. Bei STAP wird hierfür ein adaptives Filter mittels realer Messdaten trainiert. Dabei benötigt STAP gewisse Voraussetzungen wie homogen verteilte Landschaften. Seine Idee war, mittels moderner mathematischer Verfahren wie Compressed Sensing (CS), Affine Rank Minimization (ARM) und deren Kombination Robust Principle Component Analysis (RPCA) das Problem des residualen Bodenclutters zu lösen. Aus diesem Szenario entwickelte er eine zweistufige Lösung: Den Auto-Clutter-Fokus (ACF) Algorithmus, ein robustes, bereits zum Patent angemeldetes Schätzverfahren, das mittels der Clutter-signale die Geschwindigkeit sowie den Nick- und Gierwinkel des Flugzeugs schätzen kann und den Projection Matched Filter (PMF), ein leistungsfähiger Filter welches auf die mittels des ACF Algorithmus geschätzten Parameter zurückgreift.

»Die Promotionsbedingungen waren für mich sehr gut. Ich konnte mich voll auf das Thema konzentrieren. Bei der Einarbeitung hat mich insbesondere Dr. Prünke sehr unterstützt und ich habe extrem viel Neues gelernt. Im weiteren Verlauf der Arbeit war ich dann naturgemäß mehr auf mich gestellt. Da braucht man viel Eigeninitiative und Engagement«, so sein Fazit.



### Kontakt

Dr. Reinhard Panhuber  
+49 228 60882-2252  
reinhard.panhuber@  
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 2022 erwirtschaftete das Fraunhofer FHR im wehrtechnischen und im zivilen Institutsteil einen Gesamtertrag in Höhe von 44,6 Mio. €.

Zum Jahresende 2022 waren am Fraunhofer FHR insgesamt 386 Mitarbeitende beschäftigt. Davon sind 223 unbefristet und 117 Personen befristet beschäftigt. Hinzu kommen noch 46 Studierende und Auszubildende.

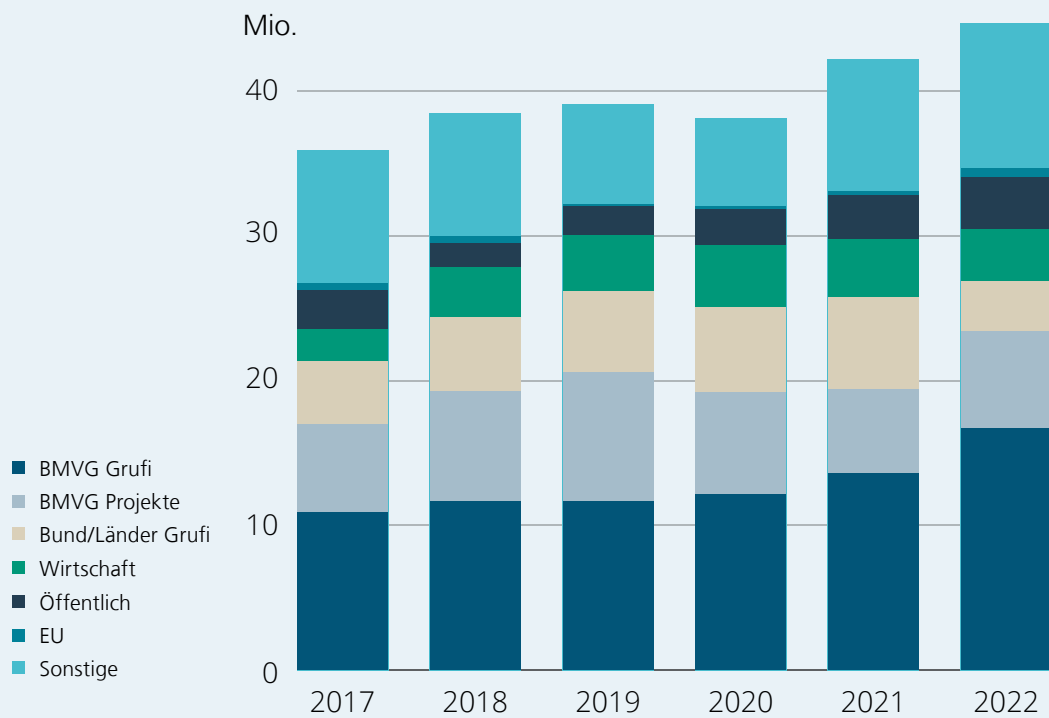
## Kontakt

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



# Das Jahr 2022 in Zahlen

## Budgetentwicklung

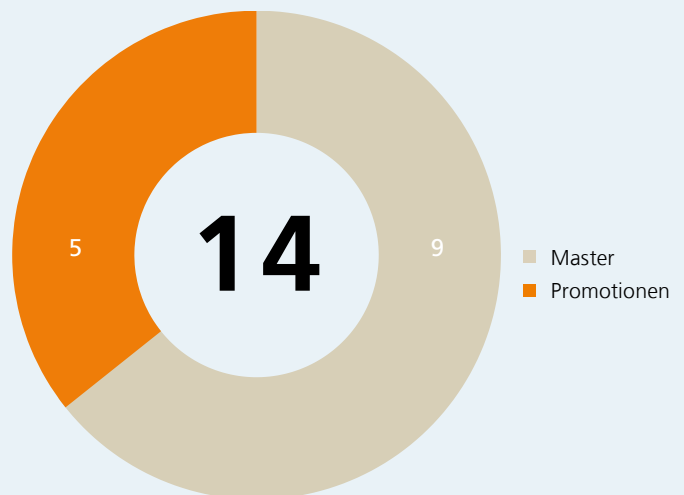


## Professuren



3

## Abschlussarbeiten



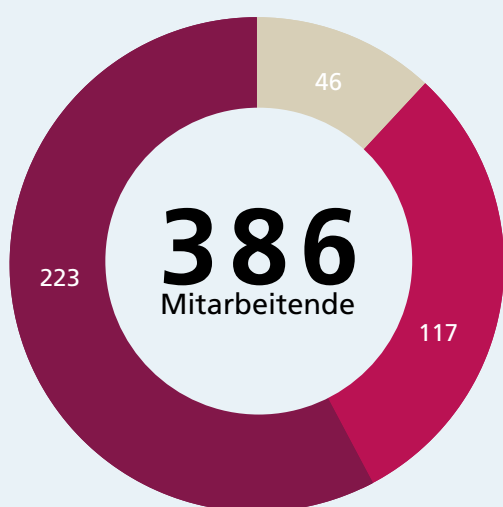
## Lehrveranstaltungen



Wintersemester 21/22: **13**

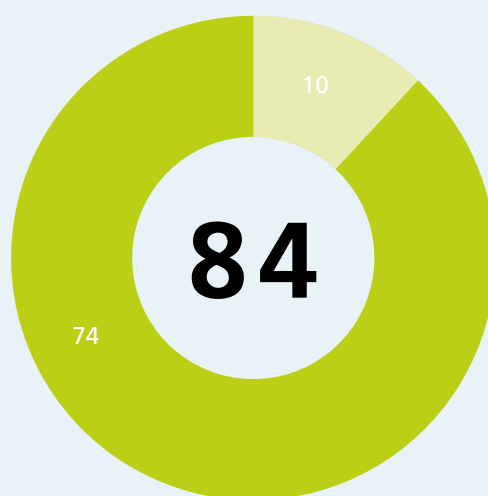
Sommersemester 22: **10**

### Personal



- Hiwis, Praktikanten, Azubis
- unbefristet
- befristet

### Publikationen



- Zeitschriften
- Konferenzbeiträge



dt. 1707  
engl. 1597



1159



1438



2602



731

### Medienanalyse



Beiträge in den Medien: **48**

erreichte Kontakte: **19,8 Mio**

# 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:



*Die Kuratoriumssitzung 2022 fand am 24. Juni als hybride Veranstaltung statt. Vor Ort in Wachtberg-Villip waren: Prof. Dr. Dirk Heberling, Prof. Dr. Peter Knott, Prof. Dr. Ilona Rolfes, Dr. Johannes Landes (Direktor FuE-Verträge, Lizenzen und IPR, Fraunhofer-Zentrale), Hans Hommel, Roland Neppig (WTD81, Bundeswehr), Dr. Johannes Nowak (Forschungskordinator Fraunhofer-Zentrale), Dr. Dirk Tielbürger und Wilfried Wetjen.*



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

Dr. Gerhard Elsbacher  
MBDA Deutschland GmbH  
Schrobenhausen

Carolin Gründler  
Continental AG  
Hannover

Hans Hommel  
Hensoldt  
Ulm

Dr. Holger Krag  
ESA / ESOC  
Darmstadt

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

Wilfried Wetjen  
OHB-System AG  
Bremen

# Know-how aus einer Hand

**Gemeinsam ist man stärker, das gilt auch für die Fraunhofer-Verbünde. Im Verbund Mikroelektronik bündeln 16 Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen – auch das Fraunhofer FHR bringt sein Know-how ein.**

Der Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik (V $\mu$ E) ist einer der neun Forschungsverbünde der Fraunhofer-Gesellschaft und besteht derzeit aus elf Vollmitgliedern sowie fünf Gastinstituten aus anderen Fraunhofer-Verbänden. Der Verbundsprecher ist Prof. Albert Heuberger, Institutsleiter des Fraunhofer IIS. Prof. Heberling ist der Vertreter des Fraunhofer FHR im V $\mu$ E.

Seit April 2017 arbeiten elf Fraunhofer-Institute des Verbunds Mikroelektronik in Kooperation mit den zwei Leibniz-Instituten FBH und IHP auch als »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland«, kurz FMD, zusammen.

## **Drei Dimensionen: Vertretung nach innen, nach außen und gegenseitige Unterstützung**

Der Verbund ist ein Netzwerk innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft, das drei Dimensionen bedient: die politische Vertretung nach innen, die Vertretung nach außen sowie das Unterstützen der gegenseitigen Arbeiten. Was die Vertretung nach innen angeht, so repräsentiert der V $\mu$ E die Mikroelektronik-Institute und ihre Bedarfe gegenüber der Fraunhofer-Gesellschaft, etwa die Reinraumtechnologie, den Investitions- oder Energiebedarf. Weiterhin tritt der Verbund auch im Außenraum gegenüber Politik und Wirtschaft auf. Hier steht vor allem die Unabhängigkeit der Lieferketten im Fokus, schließlich handelt es sich bei der Mikroelektronik um eine Schlüsseltechnologie.

Der V $\mu$ E hat also auch im Außenraum eine große Bedeutung, indem er die thematischen Schwerpunkte des Verbundes nach außen trägt.

Die dritte Säule ist die gegenseitige Unterstützung der Fraunhofer-Institute im Verbund: Schließlich bündelt er die Kompetenzen aller Fraunhofer-Institute, die sich mit Mikroelektronik beschäftigen. So hat das Fraunhofer FHR über den Verbund sehr engen Kontakt zu den Halbleiterinstituten und ihren Technologielinien – was insbesondere im Kontext der Forschungsförderung wichtig ist. Denn das Ziel des Verbundes liegt darin, gemeinsame Forschungs- und Fördervorhaben für die Industrie anzubieten, aber auch größere Forschungsprogramme zu ermöglichen. Diese liegen größtenteils nicht im Bereich des Radars, einer der Kernkompetenzen des Fraunhofer FHR, sondern vor allem in der Hochfrequenztechnik, etwa der Kommunikation oder der Quantenelektronik. Alleine würde sich das Fraunhofer FHR deutlich schwerer tun, in solche Programme einzusteigen. Der Verbund Mikroelektronik als großer Partner erhöht die Schlagkraft deutlich – schließlich ist es ein Unterschied, ob ein einzelnes Institut mit 250 Forschenden auftritt oder ein Verbund, der etwa 3000 Mitarbeitende umfasst.

## **Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland: One-Stop-Shop für externe Partner**

Die FMD ist der zentrale Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die Mikro- und Nanoelektronik in Deutschland und Europa. Als Vorreiter für standort- und technologieübergreifende Zusammenarbeit geht die FMD aktuelle und künftige Herausforderungen der Elektronikforschung an und gibt wichtige



*Die HAGE3D ermöglicht einen Druck sowohl mit Filament als auch mit Granulat. Der maximale Druckraum beträgt 1200mm x 1200mm x 1000mm im 3-Achs-Betrieb, während der 5-Achs-Betrieb erlaubt komplexe Bauteile ohne Stützmaterial zu drucken, was Zeit und Material spart.*



*Mit der standort-, technologie und kompetenzübergreifenden Zusammenarbeit sorgt die FMD für den Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität entlang der gesamten Wertschöpfungskette.*

Impulse zur Entwicklung von elementaren Innovationen für die Welt von morgen. Mit mittlerweile mehr als 4500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist die FMD einer der größten Zusammenschlüsse für Forschung und Entwicklung dieser Art.

Als One-Stop-Shop verbindet die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland die wissenschaftlich exzellenten Technologien, Anwendungen und Systemlösungen der kooperierenden Institute zu einem kombinierten Gesamtangebot im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik. So sind sich viele Unternehmen beispielsweise unsicher, welches die richtige Halbleitertechnologie für ihre

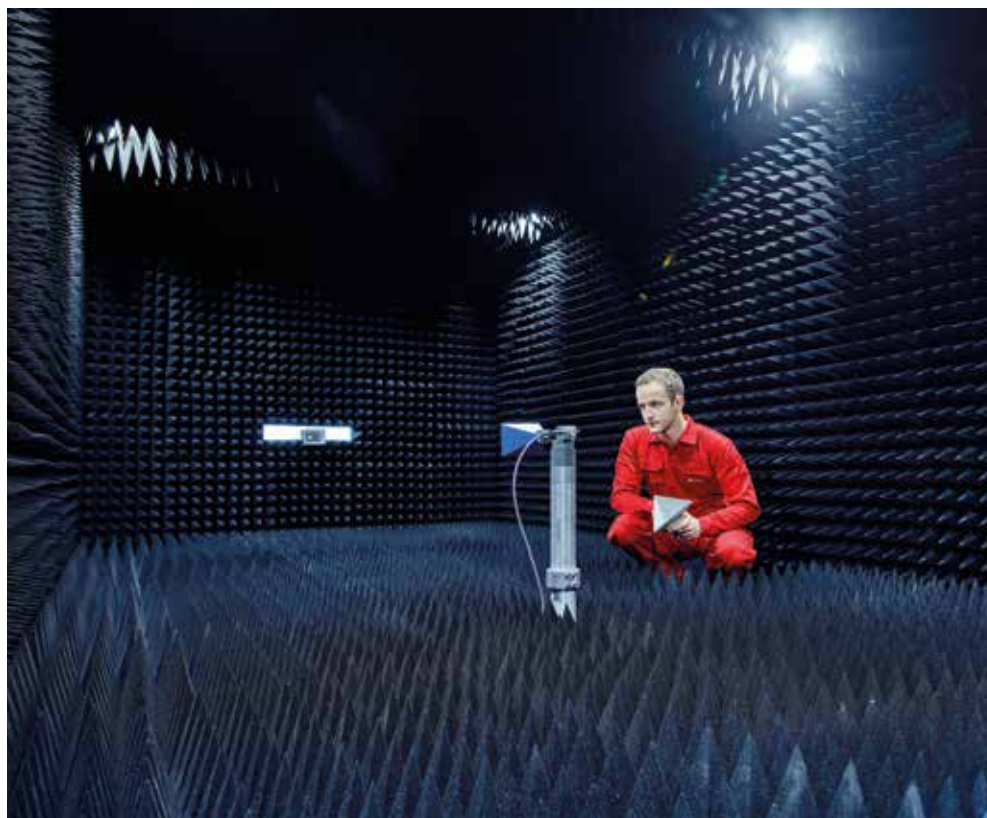
Anwendung ist: Die Siliziumtechnologie, die in Computern und Smartphones eingesetzt wird, die Silizium-Germanium-Technologie, die im Automobilbereich genutzt wird, oder die III-V-Halbleiter, die unter anderem für die Leistungsverstärkung elementar sind? Hier bietet die FMD externen Partnern die nötige Hilfestellung und führt die exzellenten Einzelkompetenzen ihrer Mitgliedsinstitute zu einem ganzheitlichen Angebot zusammen. Mit dieser institutsübergreifenden Bündelung von Know-how kann die gesamte Wertschöpfungskette bedient werden. Als One-Stop-Shop ist die FMD somit zentrale Anlaufstelle für Kooperations- und Industrieanfragen. Forschung aus einer Hand also.



GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**



*Im Rahmen von FMD wurde in ein Messlabor im Millimeterwellenbereich investiert. Die Innenansicht der echofreien Messkammer zeigt eine Messvorrichtung zur Antennencharakterisierung, aber auch Teilsysteme und vollständige Prototypen können beurteilt werden.*

### Kontakt

Dr.-Ing. Dirk Nüßler  
+49 228 60882-2501  
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.

*Entwickelter Passivradar-Demonstrator mit kommerziellen Antennen.*

## Abbildendes Radar: Von einer Drohne getragen

**Ein Radar mit synthetischer Apertur (SAR) von einer Drohne getragen und an deren Flugbewegungen angepasst, nahm erste hochaufgelöste Abbildungen auf.**

Bei Katastrophen kann es für die Rettungskräfte wichtig sein, sich einen »schnellen« Überblick über die Lage zu verschaffen – am besten aus der Vogelperspektive. Ähnlichen Fragestellungen sehen sich Grenzschutz und Militär gegenüber. Drohnen bieten sich für eine solche Aufklärung an. Tragen sie allerdings optische Kameras, ist man auf gutes Wetter angewiesen: In Nebel, dichtem Regen, Rauch oder Dunkelheit sind diese kaum ein Gewinn. Radargeräte dagegen schauen ungehindert durch Nebel und Co. hindurch. Das Manko: Hochfrequente, leistungsstarke Radargeräte, die mit ihrer Auflösung nah an optische Geräte herankommen, waren bisher deutlich zu groß und zu schwer für Drohnen. Für sie braucht es größere Träger, etwa Ultraleichtflugzeuge.

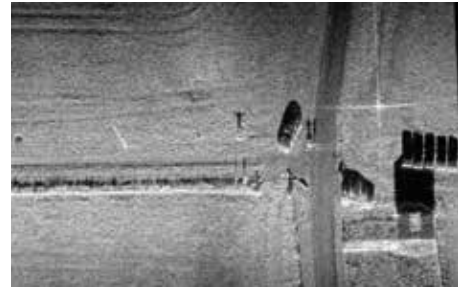
### 94-Gigahertz-Radar, neun Kilogramm leicht

Forschende des Fraunhofer FHR haben solche hochfrequenten SAR-Radargeräte nun miniaturisiert: Lediglich neun Kilogramm bringt das entwickelte 94-Gigahertz-Gerät auf die Waage, leicht genug also für eine Drohne. Anpassen musste das Forscherteam dazu nicht

nur die Hardware, sondern auch die dahinter liegenden Algorithmen. Denn eine Drohne bewegt sich gänzlich anders als ein Flugzeug: Sie fliegt enge, schnelle Kurven und Kreise, wird deutlich stärker vom Wind beeinflusst – es wackelt und vibriert also stärker – und bleibt auch schon mal gänzlich stehen oder fliegt gar rückwärts. Soll das miniaturisierte Radar brauchbare Abbildungen erzeugen, muss die Flugbahn auf den Millimeter genau bekannt sein. Entsprechende hochgenaue Messsensorik zur Lagebestimmung ist jedoch schwer und mit über 100.000 Euro auch extrem teuer. Die Forschenden erprobten daher kostengünstigere MEMS Sensorik, kurz für Micro-Electro-Mechanical-System, die bereits unter 20.000 Euro erhältlich ist. Wie verändert sich die Bildgebung? Welche Komponenten stellen trotz hoher und breitbandiger Sendefrequenz genügend Ausgangsleistung zur Verfügung? Die Frage der Sendeleistung ließ sich insbesondere durch Komponenten des Fraunhofer IAF in Freiburg lösen.

### Fahrzeugspuren im Gras visualisierbar

Anfangs war fraglich, ob ein solches drohnen-taugliches System überhaupt eine fokussierte Abbildung würde generieren können. Das Ergebnis überrascht: Die Auflösung der Abbildungen ist mit etwa fünf Zentimetern nur wenig schlechter als die aus dem Flugzeug aufgenommene, die auf bis zu zwei Zentimeter kommt. Bei Flughöhen von 30 bis 70 Metern konnte das System nicht nur parkende Fahrzeuge und Personen detektieren, sondern selbst Fahrzeugspuren im Gras visualisieren. In einem Folgeprojekt soll zum einen das Gewicht des Radargeräts auf unter sieben Kilogramm sinken, zum anderen soll es seine Daten in Echtzeit prozessieren und zum Boden senden, wo die Bilder per Videostream live verfolgt werden können.



*oben:*  
Hochaufgelöstes SAR Bild bei 94 GHz aufgenommen mit dem Drohnen-SAR Phoenix-94 bei einer Flughöhe von ca. 50 m AGL. Das Bild hat eine Auflösung von ca. 5 cm und zeigt mehrere Testobjekte wie parkende Fahrzeuge und Personen auf einer freien Wiese neben einem Feldweg.

*unten:*  
Multicopter mit integriertem SAR Sensor Phoenix-94. Mit einem Gewicht von ca. 9 kg und einer Trägerfrequenz von 94 GHz dient der Experimentalsensor Phoenix-94 als Proof of Concept zur Evaluierung drohnen-gestützter SAR-Daten und bildgebender Algorithmen.

### Kontakt

Dr.-Ing. Stephan Palm  
+49 228 9435-357  
stephan.palm@  
fhr.fraunhofer.de

## Kleinere Antennen ohne Bandbreitenverlust

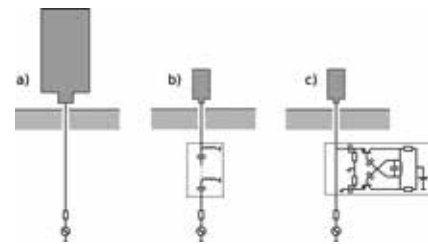
**Reiht sich auf Plattformen eine Antenne an die andere, erhöht dies deren Sichtbarkeit via Radar. Über vorgeschaltete aktive Netzwerke lassen sich die Antennen verkleinern, bei gleichbleibender Bandbreite.**

Es ist eng auf Plattformen wie Flugzeugen oder Schiffen: Zahlreiche Elektronikkomponenten quetschen sich neben eine Vielzahl von Antennen. Was die Antennen angeht, so sollen diese möglichst breitbandig funktionieren – also möglichst viele Frequenzen abdecken. Dies jedoch lässt sie recht groß werden, was einerseits ein Platzproblem nach sich zieht, zum anderen dafür sorgt, dass die Plattformen vom gegnerischen Radar leichter entdeckt werden können. Denn je größer die Antennenoberfläche, desto intensiver werden Radarstrahlen daran reflektiert, der Radar-Rückstreu-Querschnitt steigt.

### Versuche mit Non-Foster-Netzwerken

Lassen sich die Antennen kleiner auslegen, ohne an Bandbreite zu verlieren? Dieser Frage widmen sich Forschende des Fraunhofer FHR im Auftrag der MBDA Deutschland GmbH. In einem ersten Schritt untersuchten sie die maximal mögliche Bandbreite bei einer fest vorgegebenen Antennenform. Durch eine vorgeschaltete Schaltung, ein Anpassnetzwerk, lässt sich die Bandbreite vergrößern – bis zu einer gewissen Schranke, die sich nicht überschreiten lässt. Zumindest dann nicht, wenn das Anpassnetzwerk ausschließlich aus passiven Elementen ohne Energiezufuhr besteht, etwa aus Kondensatoren und Spulen. Integriert man allerdings aktive Bauelemente wie Transistoren, fällt diese Schranke – man spricht dann von Non-Foster-Netzwerken. Bei diesen kann die Antenne, zumindest theoretisch, beliebig breitbandig werden.

Was die Praxis angeht, so lässt sich dieser Effekt bei Frequenzen im zwei- bis dreistelligen Megahertzbereich vergleichsweise leicht demonstrieren. Im einstelligen Gigahertzbereich jedoch – dem gewünschten Frequenzbereich für die Antennen – weichen u.a. die Transistoren stark von ihren idealen Eigenschaften ab. Die Frage, die sich den Forschenden daher stellte: Ist es überhaupt möglich, für diesen Frequenzbereich stabile und reproduzierbare Non-Foster-Netzwerke aufzubauen? Das Team untersuchte zunächst die einzelnen passiven und aktiven Komponenten und entwickelte Schaltungssimulationen, die nicht nur das ideale Verhalten berücksichtigen, sondern auch das gemessene Verhalten der Halbleiterbausteine. Bei solchen Schaltungssimulationen nimmt man an, dass die Bauteile über ideale Drähte verbunden sind. In der Realität entwickeln die Leitungswege mit steigender Frequenz allerdings unerwünschte Eigenschaften. Die Forschenden ergänzten die Schaltungssimulationen daher um Feldsimulationen, die die Streifenleitungen zwischen den Komponenten berücksichtigen. Was sich bereits sagen lässt: Die Bandbreite der Antennen lässt sich durch Non-Foster-Netzwerke auch im Gigahertzbereich im einstelligen Prozentbereich vergrößern. Ist dieser Mehrwert auch in der Praxis zu beobachten? Dies werden die Forschenden in einem weiteren Schritt untersuchen.



*Untersuchung der erzielbaren Bandbreite von Antennenformen mit reduziertem RCS: a) Antenne mit großer Fläche (hoher Bandbreite, kein Anpassnetzwerk notwendig) und großem RCS b) miniaturisierte Antennenform (reduzierter RCS) mit passivem Anpassnetzwerk zwecks Erhalt der Bandbreite c) miniaturisierte Antennenform (reduzierter RCS) mit Non-Foster Anpassung.*

### Kontakt

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

# Abstimmbare Metamaterialien verbessern Antennenarrays

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

Chamäleons haben nahezu einen Rundumblick: Denn sie können beide Augen unabhängig voneinander bewegen. Anders sieht es bei Antennenarrays aus, die elektronisch gesteuert werden und z. B. in militärischen Radargeräten oder agilen Richtfunkanwendungen zum Einsatz kommen: Ihr Scanbereich wird durch die Physik eingeschränkt, sodass ihr Sichtbereich recht klein ist.

Forschende des Fraunhofer FHR nutzen im Projekt METALESA II daher abstimmbare Metamaterialien: Mit diesen wollen sie die Leistung von gekrümmten Antennen verbessern, die Phasen der abgestrahlten Wellenfronten weiter verändern und den Schwenkbereich erweitern.

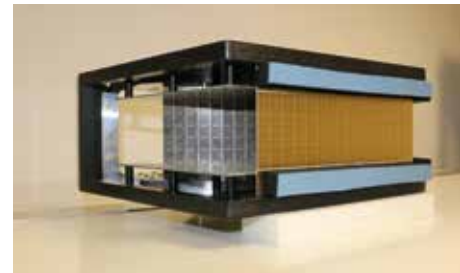
## Prototypen liefern vielversprechende Ergebnisse

Doch in welchem Ausmaß sind solche abstimmbaren Metamaterialien in der Lage, die Phase der Radarstrahlung zu beeinflussen? Und wie hoch sind die Verluste, die dadurch auftreten? Dies haben die Forschenden in Testaufbauten und Prototypen untersucht.

Dazu haben sie zwei große Metamaterialleiterplatten – 24 Zentimeter mal 16 Zentimeter – hergestellt und vermessen. In einem ersten Versuch montierten sie die Platten vor eine Sendeantenne und untersuchten das Abstrahlverhalten mit einer Empfangsantenne. Bereits diese Ergebnisse waren sehr vielversprechend: Sowohl für die horizontale als auch für die vertikale Polarisation sind Phasenänderungen von bis zu 170 Grad möglich. Auch die Verluste waren gering, sie lagen im Bereich von ein bis zwei Dezibel.

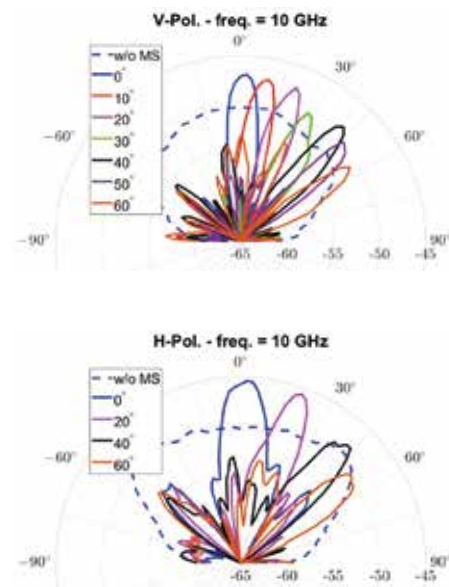
In einem nächsten Schritt entwarfen und bauten die Forschenden zwei Prototypen. Während der erste Prototyp aus nur einer abstimmbaren Metamaterialplatte besteht, die von einem Antennenelement bestrahlt wird, sind im zweiten Prototyp mehrere Platten facettenförmig vor einem gekrümmten Antennenarray angeordnet. Beim ersten Prototyp konnten die Forschenden eine Phasenkompensation nachweisen, mit der sich der Strahl fokussieren und ähnlich wie mit einer Linse bündeln lässt, ebenso eine Phasenkompensation im Hinblick auf die Strahlschwenkung. Sowohl für die vertikale als auch die horizontale Polarisation der abgestrahlten Welle wurde ein Scanbereich von  $\pm 60$  Grad erreicht, wobei gleichzeitig der Antennengewinn um drei Dezibel gesteigert werden konnte. Wichtig sind diese Ergebnisse unter anderem für Drohnen: Sie sind zu klein, um große Gruppenantennen zu tragen. Die neue Technologie ermöglicht es künftig, statt einer Gruppenantenne ein leichtes, kostengünstiges System aus nur einer einzelnen Antenne zu nutzen und dennoch die gleichen Abstrahleigenschaften zu erlangen.

Der zweite Prototyp überzeugte ebenfalls: Im azimutalen Scanbereich von 70 bis 90 Grad konnte der Antennengewinn um ein bis zwei Dezibel verbessert werden – bei Verwendung der abstimmbaren Metamaterialplatten für die horizontale Polarisation.



oben:  
Abstimmbare Metamaterialschicht für Gruppenantenne.

unten:  
Gruppenantenne mit abstimmbarer Metamaterialschicht.



oben:  
Gemessenes Elementdiagramm ohne und mit abstimmbarer Metamaterialschicht (Linsenbetrieb, Strahlschwenkung von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$ , vertikal polarisiert).

unten:  
Gemessenes Elementdiagramm ohne und mit abstimmbarer Metamaterialschicht (Linsenbetrieb, Strahlschwenkung von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$ , horizontal polarisiert).

## Kontakt

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



# Fernerkundung und Zielerfassung mit Starlink-Satelliten

**Passive Radarsysteme bieten zahlreiche Vorteile. Ein neues passives Bodenradar aus dem Fraunhofer FHR nutzt eine Kombination aus Satellitenfernsehsignalen und Signalen von Starlink-Satelliten – und ermöglicht so eine spektrum- und energiesparsame Fernerkundung.**

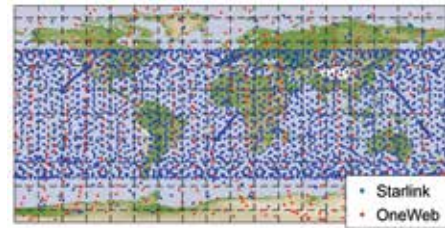
Fernerkundung – global und dauerhaft, ohne ein Signal zu übertragen? Möglich ist dies mit einem passiven Radarsystem, das Forschende am Fraunhofer FHR entwickelt haben. Anders als aktive Radare sendet es keine Radarstrahlen aus, die an einem Objekt reflektiert und wieder zum Empfänger zurückgelenkt werden, sondern nutzt Strahlen, die bereits vorhanden sind. Der Vorteil: Das System arbeitet energiesparsam und benötigt weniger Komponenten. Auch eine Lizenz wie für das aktive Radar ist unnötig – das System darf einfach aufgestellt werden und bietet somit eine große Flexibilität. Abseits der zivilen Anwendung bietet es einen weiteren Vorteil: Da das System selbst keine Radarstrahlen aussendet, ist es schwer aufzuspüren und kann daher nicht so leicht durch Interferenzstrahlung gestört werden.

## Radarbilder für die Fernerkundung

Während das Vorläufer-Modell SABBIA 2.0 aus dem Fraunhofer FHR die Strahlung von geostationären Fernsehsatelliten nutzte, weiten die Forschenden die Möglichkeiten mit dem aktuellen Prototyp noch weiter aus. Sie

kombinieren die Fernseh-Signale mit denen, die die Starlink-Satelliten gen Erde schicken. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Objekte wie Flugzeuge und Co. detektieren, sondern auch Radarbilder für die Fernerkundung aufnehmen. Aufgrund der Vielzahl der Starlink-Satelliten – Ende 2022 waren es bereits 3376, Tendenz stark steigend – sind dabei kontinuierliche Abbildungen möglich. Denn: Sobald ein Satellit am Horizont verschwindet, taucht bereits ein neuer auf. Wichtig ist das nicht nur dann, wenn es um die Fernerkundung geht. Die Kombination beider Satellitenwellen verbessert auch die Lokalisierungsfähigkeit sowie die Klassifikation. Schließlich lässt sich das Objekt aus verschiedenen Richtungen »beleuchten«, es werden somit auch Bereiche sichtbar, die bei nur einem Sender verschattet wären. Aufgrund der Vielzahl der Starlink-Satelliten lassen sich das Radar auch in Bereichen der Erde betreiben, die von den Fernsehsignalen nicht erreicht werden, etwa die Antarktis.

Derzeit umfasst der Prototyp lediglich einen Empfänger – das System kann daher entweder die Wellen des geostationären Fernsehsatelliten oder die der Starlink-Satelliten aufnehmen. In einem weiteren Schritt wollen die Forschenden jedoch mehrere Empfänger zusammenschalten. Die Hardware an sich ist fertiggestellt, derzeit arbeitet das Team an der Signalprozessierung und an der Optimierung der Informationen, die sie über die beiden Satelliten empfangen.



*Aktuelle Satellitenkonstellationen für Breitbandkommunikation mit globaler Abdeckung.*

*links:*

*Entwickelter Passivradar-Demonstrator mit kommerziellen Antennen.*



## Kontakt

Rodrigo Blázquez García, M. Sc.  
+49 228 9435-418  
rodrigo.blazquez@  
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.

*Der Parabolspiegel des Weltraumbeobachtungsradsars TIRA hat einen Durchmesser von 34 m und kann damit kleinste Weltraumobjekte verfolgen und abbilden.*

# »Feuertaufe« des Weltraumüberwachungsradars GESTRA

**Die Aufgabe des Weltraumüberwachungsradars GESTRA aus dem Fraunhofer FHR: Weltraumschrott beobachten und die Daten für dessen Katalogisierung liefern. Erste Messreihen verliefen vielversprechend.**

Auf den ersten Blick ist nicht viel Spektakuläres zu entdecken: Zwei Container, 18 Meter lang, vier Meter breit. Doch diese haben es in sich: Stecken darin doch 256 Sendemodule sowie 256 Empfangsmodule, die im Verbund als Phased-Array-Antenne bei einer Frequenz von 1,3 GHz Weltraumschrott in 300 bis 3000 Kilometern Höhe detektieren. Entwickelt wurde das Radar namens GESTRA – kurz für »German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar« – vom Fraunhofer FHR im Auftrag der deutschen Raumfahrtagentur im DLR für das Weltraumlagezentrum der Bundeswehr, das dieses zukünftig am Standort Koblenz Schmidtenhöhe betreibt. Sinn und Zweck der Messungen liegt in der Katalogisierung der Schrottteile, die für Satelliten und Co. zu Geschossen mit zerstörerischer Kraft werden können.

## Erste Messungen liefen erfolgreich

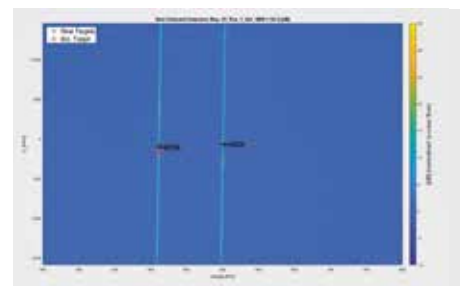
In ersten Testläufe zeigte GESTRA bereits, was es kann: Das Radar detektierte sowohl Kalibrationssphären – also runde Sphären, die auf der Umlaufbahn ihre Kreise ziehen – als

auch ausgediente Satelliten, Raketenendstufen und anderen Weltraumschrott. Durch den Vergleich von Dopplergeschwindigkeit und Range konnten all diese Objekte verifiziert werden, die Ergebnisse lagen in der mathematisch erwarteten Größenordnung. Neben den vorgegebenen Objekten machte GESTRA auch einige »Zufallsfunde«: Objekte, die durch den beobachteten Weltraumbereich schwebten und mithilfe des Weltraumlagezentrums identifiziert werden konnten. Nun stehen weitere Messungen an, in denen noch mehr Systemfeatures des GESTRA Radars mit einbezogen werden sollen.

Neben der eigentlichen GESTRA-Entwicklung arbeiten die Forschenden des Fraunhofer FHR seit 2020 im Projekt GESTRA EUSST daran, einen weiteren Empfänger für das Weltraumüberwachungsradar zu bauen, der Bau einer zusätzlichen GESTRA-kompatiblen Sendeeinheit steht im Projekt GESTRA TX2 auf der Agenda. Im Projekt GESTRA Vernetzung wiederum soll der zweite Empfänger mit GESTRA vernetzt werden: Auf diese Weise dürfte die Größe der detektierbaren Objekte sowie die Prognose ihrer Laufbahn um Faktoren besser werden.

## Ausblick auf die experimentell-operative Phase

GESTRA wurde am Standort Koblenz installiert und wird aktuell gemeinsam mit dem deutschen Weltraumlagezentrum erprobt. Damit das Experimentalsystem in seine »operative Phase« eintreten kann, planen die Forschenden des Fraunhofer FHR entsprechende Abnahmetests für den weiteren Verlauf des Jahres 2023.



oben:  
Die Sende- und Empfangseinheit des Weltraumüberwachungsradars GESTRA in Koblenz.

unten:  
Gleichzeitige Detektion von zwei Zielen mit dem GESTRA-Weltraumüberwachungsradar. Dargestellt sind gemessener Abstand und Zielgeschwindigkeit.

## Kontakt

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

# Mein Haus, mein Auto, mein Weltraumbeobachtungsradar?

**Mit dem Weltraumüberwachungsradar GESTRA lassen sich Satelliten, aber auch Weltraumschrott-Teile beobachten. Wen wundert es also, dass zahlreiche Staaten Interesse an dem System bekunden? Die Hensoldt Sensors GmbH als Partner des Fraunhofer FHR soll daher nun die Kommerzialisierung vorantreiben.**

Rund sieben Millionen Teilchen schweben durch den Weltraum – von ausgedienten Satelliten über abgeworfene Schutzhüllen bis hin zu Schrauben und Fragmenten. Und täglich werden es mehr. Denn zunehmend schicken auch kleine private Unternehmen Satelliten in den Orbit, das Interesse nach Weltraumaufklärung steigt nicht nur im Bereich der Forschung, sondern auch im operativen Betrieb. Auch immer mehr Nationen wollen ihre Kompetenz im Bereich Weltraumlage ausweiten, sprich die Laufbahn eigener Satelliten besser und genauer nachvollziehen, um sie besser vor Kollisionen schützen zu können.

## GESTRA macht's möglich

Möglich ist dies mit dem teilmobilen Weltraumüberwachungsradar GESTRA, das Forschende des Fraunhofer FHR im Auftrag der deutschen Raumfahrtagentur im DLR für das Weltraumlagezentrum entwickelt haben. Es verwundert daher nicht, dass das Fraunhofer FHR zunehmend mehr Anfragen in Richtung einer Kommerzialisierung von GESTRA bekommt, vor allem von Staaten. Und tatsächlich war das Projekt von Anfang an so angeordnet, dass neben dem Experimentalsystem ein Partner ins Boot geholt werden soll, der das System als Produkt auf den Markt bringt. Dann könnten auch wohlbetuchte Privatpersonen sich ein eigenes Weltraumüberwachungsradar in ihren Garten stellen, um beispielsweise ihre Megakonstellationen kleiner Satelliten

im Blick zu behalten. Die ersten Kunden dürften jedoch vor allem staatliche sein. Denkbar ist auch, mehrere GESTRAs zusammenzuschalten und auf diese Weise den abgedeckten Suchbereich zu erweitern.

## Auf dem Weg zur Kommerzialisierung

Die Forschenden des Fraunhofer FHR haben das Weltraumüberwachungsradar mittlerweile auf ein Technology-Readiness-Level von sechs gehoben. Diese Daten werden nun an die Hensoldt Sensors GmbH als Partner für die Kommerzialisierung übergeben, der Transfer von Know-how wird initiiert. In die kommerzialisierte Version von GESTRA fließen also sehr viele »Lessons-Learned« ein, und damit sehr viel Erfahrungswissen, das die Fraunhofer-Forschenden während der Entwicklung von GESTRA aufgebaut haben – etwa im Bereich der Integration in den Container sowie der Systemauslegung. Wissen, von dem das System profitiert. Hensoldt wird den Technologiereifegrad noch weiter nach oben treiben und aus dem experimentellen GESTRA-System eine kommerzielle Lösung entwickeln.



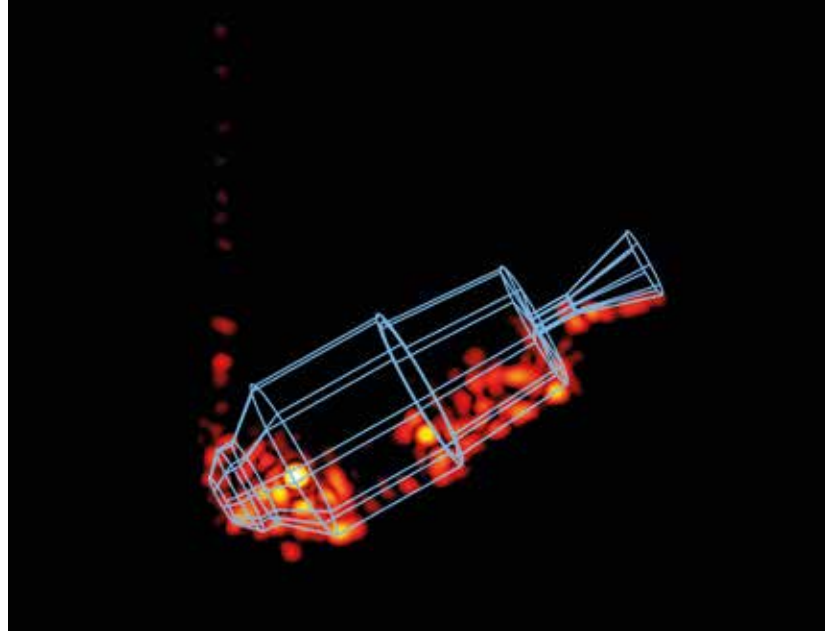
*oben:  
Das Weltraumüberwachungsradar GESTRA in Koblenz weckt das Interesse von zahlreichen Staaten.*

*unten:  
Die Antenne auf der Positioniereinheit des Empfängers.*

## Kontakt

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

## Müllabfuhr für den Orbit



Der Weltraumschrott nimmt stetig größere Ausmaße an. Die Japan Aerospace Exploration Agency JAXA möchte den Weltraummüll daher aktiv reduzieren und einige ihrer Raketenoberstufen aus dem Orbit entfernen. Das Fraunhofer FHR unterstützte mit dem Zielverfolgungs- und Abbildungsradar TIRA bei der Auswahl der möglichen Objekte.

Raketenoberstufen, die herrenlos durch den Orbit schwirren, haben ein großes Gefährdungspotenzial: Schließlich können sie explodieren, sei es durch enthaltenen Resttreibstoff, sei es durch Batterien. Nun könnte man meinen, eine Explosion im Orbit sei nicht weiter schlimm – schließlich ist niemand da, der sich daran stören könnte. Weit gefehlt: Eine Explosion lässt aus einem großen Trümmerteil zehntausende kleiner Trümmerteile entstehen. Trümmerteile, die zu gefährlichen Geschossen werden und Satelliten und Co. bei einer Kollision schlimmstenfalls zerstören können.

### Raketenoberstufen aus dem Orbit entfernen

Die Japan Aerospace Exploration Agency JAXA möchte ihre Raketenoberstufen daher

aus dem Orbit beseitigen. Dass die hierfür notwendigen Rendezvous-Manöver machbar sind, soll die Demonstrationsmission ADRAS-J im Rahmen des CRD2 Projektes zeigen, die von Astroscale bis 2024 durchgeführt werden soll. Eine Vorauswahl potenzieller Kandidaten hat die JAXA bereits getroffen. Noch stand die Entscheidung aus, welche Oberstufe genau bei der Mission angesteuert werden soll. Simulationen der japanischen Agentur zeigten zudem, dass sich Raketenoberstufen, die sich längere Zeit im Einflussbereich des Erdgravitationsfeldes befinden, mit ihrer Längsachse entlang dieses Feldes ausrichten, sie zeigen also mit der »Nasenspitze« stets zur Erdoberfläche.

### Abbildungsradar TIRA bestätigte die Simulationsergebnisse der JAXA

Kann das Fraunhofer FHR diese Simulationsergebnisse bestätigen oder aber widerlegen – und somit dabei helfen, einen geeigneten Kandidaten für die »Müllabfuhr« zu ermitteln? Mit dieser Frage kamen Mitarbeitende der JAXA auf das Institut zu. In einer Machbarkeitsstudie Ende 2021 bildete das Fraunhofer-Team eine ausgewählte Oberstufe mit TIRA ab und bestimmte anhand der Bildanalysen deren Rotation. Wie schnell dreht sich die Oberstufe? Um welche Achse? Und wie ist diese Achse im Raum ausgerichtet? Die Simulationsergebnisse wurden bestätigt: Die Nasenspitze der Oberstufe zeigte zur Erde. Ebenso wie fast alle anderen Raketenoberstufen, die in einer Nachfolgeuntersuchung im Frühjahr 2022 analysiert wurden. Lediglich eine einzige fiel aus dem Rahmen. Diese zeigte eine langsame Taumelbewegung mit 0,1 Grad pro Sekunde. Die Forschenden sowie die JAXA vermuteten, dass sich diese Oberstufe noch in einer



oben:  
*Radarbild einer Oberstufe mit eingeblendetem vereinfachten Modell.*

unten:  
*Generisches Bild einer H-2A Raketenoberstufe. Eine ähnliche Oberstufe soll im Zuge einer ADR Mission (Active Debris Removal) aus der Erdumlaufbahn entfernt werden.*

### Kontakt

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

Übergangsphase befand. Denn nachdem eine Oberstufe ihre Nutzlast ausgesetzt und ihren Kurs leicht geändert hat, fliegt sie zunächst unkontrolliert durch den Weltraum, wobei sie sich beliebig drehen kann. Erst langfristig führen verschiedene Kräfte dazu, dass sich die Raketenoberstufe entlang des Erdgravitationsfeldes ausrichtet. Während das Objekt vom Erdgravitationsfeld »eingefangen« wird, kommt es zur beobachteten Taumelbewegung. Laut der JAXA spricht vieles dafür, dass sich die Raketenoberstufe in diesem Prozess befand – denn auch die Drehachse, die die Forschenden des Fraunhofer FHR ermittelten, änderte sich im Laufe der Zeit. Dies fanden die Forschenden heraus, da sie pro Oberstufe sechs Messungen durchführten, jeweils im Abstand von etwa einer Woche.

### **Rotationssymmetrie der Objekte barg Herausforderungen**

Die Untersuchungen mit dem TIRA-Abbildungsradar warteten durchaus mit Herausforderungen auf. Eine davon lag in der Rotationssymmetrie der Oberstufen – was bei den angewandten Verfahren, insbesondere der Drehachsenbestimmung, problematisch ist. Denn es gilt, einzelne Objektpunkte anhand einer Bildserie im Laufe der Zeit immer wiederzufinden und diese eindeutig zuordnen zu können, was sich bei einer runden Geometrie wie einem Zylinder sehr schwierig gestaltet. Mit verschiedenen Methoden und der Unterstützung der JAXA, die zu jeder Oberstufe detaillierte Informationen lieferte, konnte das Team diese Herausforderung meistern. Kurzum: Die Untersuchungen mit dem Abbildungsradar TIRA dienen der JAXA dazu, gezielt Kandidaten auszusuchen, bei denen eine Müllbeseitigung erfolgreich sein dürfte.

## Tracking and Imaging Radar (TIRA)

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

### 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

# Hochauflösendes Abbildungsradar für die Weltraumbeobachtung

**Satelliten und deren Anbauten werden zunehmend kleiner: Der Blick in den Weltraum muss daher besser werden, um mehr Details erkennen zu können. Ein neues, hochauflösendes, polarimetrisches Abbildungsradar für das Weltraumbeobachtungsradar TIRA soll dies ermöglichen.**

Aus welchem Grund funktioniert der Satellit nicht mehr – wurde er von Weltraumschrott getroffen? Solche Fragen lassen sich mit dem TIRA-Abbildungsradar des Fraunhofer FHR beantworten: Via Zielverfolgungsradar werden die Flugbahnen der Satelliten verfolgt, das Abbildungsradar erhebt zusätzliche Daten, aus denen Radarbilder berechnet werden. So konnte das Fraunhofer FHR beispielsweise in der Vergangenheit erkennen, dass das folienartige Solarpanel des japanischen Forschungssatelliten ADEOS-1 abgerissen war und sich um den Haltemast gewickelt hatte. Doch entwickelt sich die Technologie weiter – Satelliten und deren Anbauten werden immer kleiner. Das TIRA-Abbildungsradar stößt daher zunehmend an seine Grenzen, was die Auflösung angeht.

## Hochauflösendes Weltraumabbildungsradar

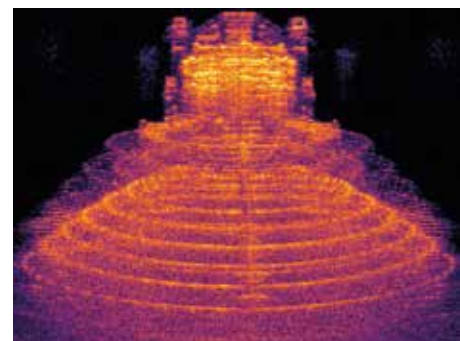
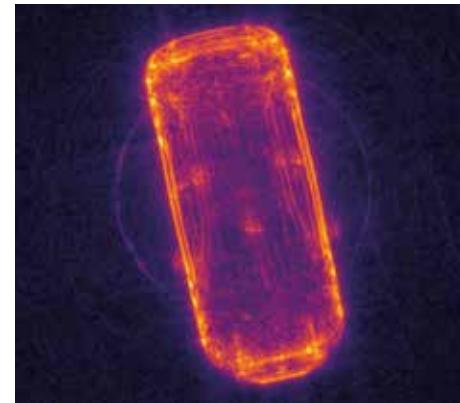
Das Projekt TIRA-HD soll diese Lücke schließen. Das Ziel: Die Entwicklung eines hochauflösenden Abbildungsradars, das zusätzlich

die Polarisation von Radarwellen nutzt. Dabei sendet die Antenne unterschiedlich polarisierte Radarwellen aus, die am Weltraumobjekt reflektiert und wieder empfangen werden. Auf diese Weise lassen sich Strukturen wie komplexe Anbauten deutlich besser erkennen und analysieren. Denn während bestimmte Strukturen in der einen Polarisationsrichtung nur schwach zu sehen sind, treten sie in der anderen klar in Erscheinung. Zudem lassen sich unterschiedliche Objektteile, die im gleichen Bildpixel abgebildet werden, voneinander trennen, was bislang nicht möglich ist. TIRA erhält dadurch vollkommen neue Fähigkeiten.

## Aufzeichnung extremer Datenmengen

Eine Herausforderung liegt in der großen Bandbreite, die für die hohe Auflösung nötig ist. Schließlich müssen die Daten in Echtzeit aufgezeichnet werden – und das für die verschiedenen Polarisationsrichtungen über einen Beobachtungszeitraum von etwa zehn Minuten. Dabei kommen pro Sekunde etliche Gigabyte zusammen. Auch gilt es, die Aufzeichnungseinheit in die sehr begrenzten, noch dazu beweglichen Räumlichkeiten von TIRA zu integrieren und sie vor Überhitzung zu schützen. Das Projektteam untersuchte verschiedene Kühlkonzepte via Simulation und testete diese in ersten Iterationen. Weiterhin untersuchte es schwingungsarme Integrationsmöglichkeiten, um die empfindliche Elektronik während der Bewegungen des Radars zu schützen.

Bei einer Radarzwischenfrequenz wurde die Aufzeichnungseinheit bereits erfolgreich getestet. Dazu bildete das Projektteam unter anderem ein Fahrzeug auf einer Drehplattform ab sowie das sich bewegende TIRA selbst. Die ersten Radarbilder sehen bereits sehr beeindruckend aus, insbesondere vor dem Hintergrund, dass es sich erst um einen Zwischenschritt hin zu dem endgültigen Radarsystem handelt.



*oben:*  
Erste Tests der neuen Aufzeichnungseinheit: Abgebildet wurde die sich bewegende TIRA-Antenne.

*Mitte:*  
Radarbild eines sich drehenden Autos, das mit einer Radarzwischenfrequenz aufgenommen wurde.

*unten:*  
Radarbild der sich bewegenden TIRA-Antenne, aufgezeichnet mit der neuen Aufzeichnungseinheit.

## Kontakt

Dr. rer. nat. Jens Klare  
+49 228 9435-311  
jens.klare@  
fhr.fraunhofer.de



## Die Suche der Nadel im Heuhaufen

**Was geschah, als eine Zylinderhälfte im Orbit fragmentierte – ist das Objekt komplett zerstört worden? Eine ungewöhnliche Aufgabenstellung, die das Zielverfolgungs- und Abbildungsradar TIRA gut meistern konnte.**

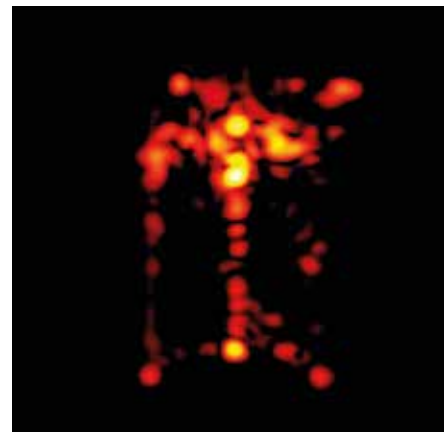
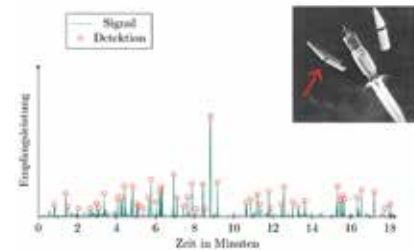
Der Mensch hat seine Spuren hinterlassen im Orbit: Das Ausmaß des Weltraumschrotts nimmt stetig zu. Explosionen von Raketenoberstufen, Satellitenabschüsse und unkontrollierte Zusammenstöße von Weltraumschrott erhöhen die Anzahl der umherschwebenden Teilchen um ein Weiteres. So auch am 3. Juli 2022: Um kurz vor sechs Uhr MEZ fragmentierte die Zylinderhälfte einer Hülle, die die Nutzlast beim Raketenstart vor äußeren Einflüssen schützt und die vor dem Aussetzen des Satelliten abgesprengt wird – die H-2A Payload Fairing (43674). Im Anschluss ihrer Fragmentierung stellten sich zahlreiche Fragen: Gibt es weitere Trümmerteile, die im Umfeld des ursprünglichen Objekts durch den Orbit driften? Ist noch etwas vom Ursprungsobjekt übrig oder ist es komplett zerstört worden?

### Mit zwei verschiedenen Radar-Einstellungen zum Ziel

Das Weltraumkommando der Bundeswehr mit dem ressortgemeinsamen Weltraumlagezentrum beauftragte das Fraunhofer FHR diese Fragen zu beantworten, und zwar mit TIRA. Eine eher ungewöhnliche Aufgabenstellung für TIRA und das betreuende Team, weil das System nicht dafür ausgelegt ist, große Teile des Himmels abzusuchen. Der Ausgang war ungewiss. Um ihr zu begegnen, kamen zwei verschiedene Einstellungen des Radars zum Einsatz. Zunächst einmal der »Staring Mode«: Dabei wird die Antenne auf einen bestimmten Teil des Himmels ausgerichtet und nur bewegt, um die Erdrotation auszugleichen.

Frühere Daten lieferten Hinweise darauf, welcher Ausschnitt anvisiert und wann die Trümmerteile diesen beobachteten Ausschnitt passieren müssten. Um sicherzugehen, das Vorbeiziehen der Teile nicht zu verpassen, starteten die Mitarbeitenden die Beobachtung mit dem Zielverfolgungsradar bereits einige Minuten vor dem erwarteten Zeitpunkt und beendeten sie erst weitere 18 Minuten später. Insgesamt erhielten sie dabei 50 Detektionen – ein besonders starkes Echo trat vier Minuten nach dem erwarteten Kontakt auf.

Um diese starke Detektion genauer einzuordnen, nahm das Team in einer zweiten Messung mit TIRA die »Verfolgung« auf: Statt wie zuvor auf einen konstanten Himmelsausschnitt zu schauen, trackten sie das Objekt und bildeten es zudem mit dem Zielabbildungsradar ab. Doch wie findet man das Objekt wieder? Da das Echo vier Minuten nach dem erwarteten Kontakt auftrat, errechnete das Team: Das Objekt verzögert sich pro Tag um 25 Sekunden. Auf diese Weise extrapolierten die Forschenden sein erneutes Auftauchen und konnten es wiederfinden. Das Ergebnis: Das Objekt rotiert sehr schnell, mit etwa 20 Grad pro Sekunde. Auch wies es eine ähnliche Geometrie auf wie die Zylinderhälfte des Payload Fairings. Die Forschenden konnten das Objekt in der Trümmerwolke erfolgreich identifizieren – also die Nadel im Heuhaufen finden.



*oben:*  
Zeitlicher Verlauf der ersten Messung, die Detektionen sind markiert: Der höchste Peak ist vier Minuten nach dem erwarteten Kontakt zu sehen. Rechts oben: Eine Raketenoberstufe wirft die Schutzhüllen – die Payload Fairing – ab.

*unten:*  
ISAR-Radarbild der zweiten Messung: Das Objekt war mehrere Meter groß, die runde Form eines Halbzylinders ist gut erkennbar.

### Kontakt

Jeremias Schroer, M. Sc.  
+49 228 9435-343  
jeremias.schroer@  
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.

*Der Flughafen - Ein zukünftiger Hotspot der 3D-Mobilität.*

# Verschüttete via Radar schnell und präzise lokalisieren

**Sind Menschen von Trümmern verschüttet, zählt jede Sekunde. Mit dem Radarsystem LUPE+ lassen sich erstmals die Atembewegungen überlebender detektieren und ihre genaue Position lokalisieren.**

Stehen Hilfskräfte vor den Trümmern eines Hauses oder gar mehrerer Gebäude, die aufgrund von Erbeben, Gasexplosionen oder Wegspülen des Bodens durch Starkregen in sich zusammengestürzt sind, ist es schwer zu erahnen, wo Verschüttete überlebt haben und auf Befreiung warten. Doch ist schnelle und vor allem zielgerichtete Hilfe gefragt. Das Fraunhofer FHR hat im Verbundprojekt LUPE+ daher gemeinsam mit dem Technischen Hilfswerk und der indurad GmbH einen Sensorverbund entwickelt: Mit diesem lassen sich Lebenszeichen verschütteter Personen detektieren und die Personen lokalisieren. Das Besondere: Anders als bisherige Systeme, die aufwändig einzurichten sind, lange Messzeiten benötigen – und bei denen eine Lokalisierung der Verschütteten nicht möglich ist – lässt sich das neuartige System in kürzester Zeit aufbauen, die Messungen selbst nehmen weniger als eine Minute in Anspruch.

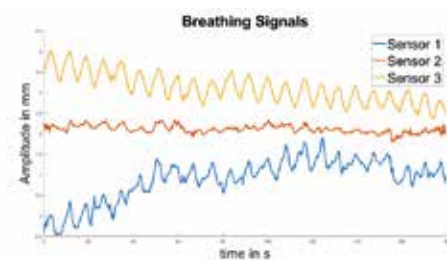
## Hohe Sendeleistung nötig

Der Sensorverbund basiert auf mehreren MIMO-Radarsensoren, die im Frequenzbereich von 1,1 GHz bis 1,4 GHz arbeiten und

zu einem kohärenten – also einem frequenz- und phasengleichen – Netzwerk verbunden werden. MIMO steht für »Multiple Input, multiple Output« und besagt nichts anderes, als dass mehrere Sende- und Empfangsantennen zum Einsatz kommen. Um die drahtlose kohärente Synchronisation der einzelnen Module kümmerte sich die indurad GmbH. Die Forschenden vom Fraunhofer FHR entwickelten zum einen die Hardware: Etwa eine Antenne, die beide Polarisationsrichtungen nutzt und somit auch Signale erkennt, deren Polarisation aufgrund von Trümmerteilen gedreht wurde. Knifflig war vor allem, eine ausreichende Sendeleistung zur Verfügung zu stellen, schließlich sollen die reflektierten Signale trotz hoher Verluste durch den Trümmerhaufen noch detektierbar sein. Dies erreichten die Forschenden durch eine Ausgangsleistung von 28 Dezibel Milliwatt – was zwar oberhalb der zulässigen Grenzwerte liegt, im Katastrophenfall jedoch kein Problem darstellt. Auch die Signalverarbeitung lag beim Fraunhofer FHR. Hier standen neue Ansätze zur Detektion der minimalen Bewegungen im Vordergrund, die durch die Atmung im Brustkorb erzeugt werden, sowie die Lokalisierung der Verletzten.

## Erste Testmessungen erfolgreich

Auf dem Testgelände des THW durften die Sensoren bereits zeigen, was sie leisten können: Eine »verschüttete« Person lag in einem Betonbunker – drei um den Bunker platzierte, kabellos synchronisierte Sensoren konnten die Atemfrequenz messen und die Person lokalisieren. Ein Ergebnis, das nicht nur das Fraunhofer FHR, sondern auch die Mitarbeitenden des Hilfswerks als sehr vielversprechend einstufen. In weiteren Schritten wollen die Forschenden die Auswertung durch KI gestützte Verfahren noch weiter optimieren und das System bis hin zu einem operativen System weiterentwickeln.



oben:  
LUPE+ Sensor mit additiv gefertigtem Gehäuse.

mitte:  
Gemessene Atmungskurven der drei synchronisierten Radarsensoren.

unten:  
Messaufbau Bunkerszenario auf THW Testgelände.

## Kontakt

Sven Leuchs, M. Sc.  
+49 228 60882-2506  
sven.leuchs@fhr.fraunhofer.de

# Vertiports sicher gestalten



**Menschen via Flugtaxi transportieren? Bei den Olympischen Spielen 2024 in Paris soll es bereits Realität werden. Das Fraunhofer FHR entwickelt neuartige Konzepte, um die zukünftige 3D-Mobilität intelligent und resilient zu überwachen.**

Multikopter sind keineswegs nur Spielerei: Bei Feuerwehr und Katastrophenschutz kommen sie bereits zum Einsatz. Künftig sollen sie noch weit vielfältige Aufgaben übernehmen, etwa in der Logistik und im Pakettransport. Und: In Form von »Electrical Vertical takeoff and landing«-Systemen, kurz eVTOL, sollen sie sogar Personen befördern. Was klingt wie in einem Science-Fiction-Film, sollte bereits bei den Olympischen Spielen 2024 in Paris Realität werden. Verschiedene Luftfahrtunternehmen planen, die Spiele mit entsprechenden eVTOLs auszustatten, um Personen vom Flughafen zu den Spielen zu bringen. Noch werden die Systeme von einem menschlichen Piloten gesteuert, je ein Passagier findet in einem Flugtaxi Platz. Diese Drohnensysteme, so die Hoffnung, könnten die gesellschaftliche Akzeptanz dergestalt erhöhen, dass in fünf bis zehn Jahren autonom fliegende Gefährte möglich sind. Denn schreitet die Urbanisierung weiter voran, ist es unausweichlich, die Transportsysteme auf die dritte Dimension zu erweitern.

## Sensornetzwerk überwacht Vertiport hochgenau

Kritisch im Bereich der 3D-Mobilität sind insbesondere die Start- und Landeplattformen: Schließlich herrscht dort viel »Gedränge«. In der interdisziplinären Kompetenzgruppe »Civil Drone Systems« entwickeln Forschende des

Fraunhofer FHR daher – abteilungsübergreifend, um die Kompetenzen zu bündeln – ein Sensornetzwerk samt Radarsensor, das den Flugverkehr am Vertiport hochgenau überwacht. Im Gegensatz zu Test-Überwachungssystemen, die auf Mobilfunk basieren, kann das System auch solche eVTOLs erkennen, die kein entsprechendes Kommunikationsgerät an Bord haben, ebenso wie Baukräne, Vogelschwärme oder Bäume, die die Ein- und Ausflugschneise blockieren. Über die Detektion hinaus soll das System Hindernisse auch klassifizieren, sprich Drohne, Vogel und Baum voneinander unterscheiden können.

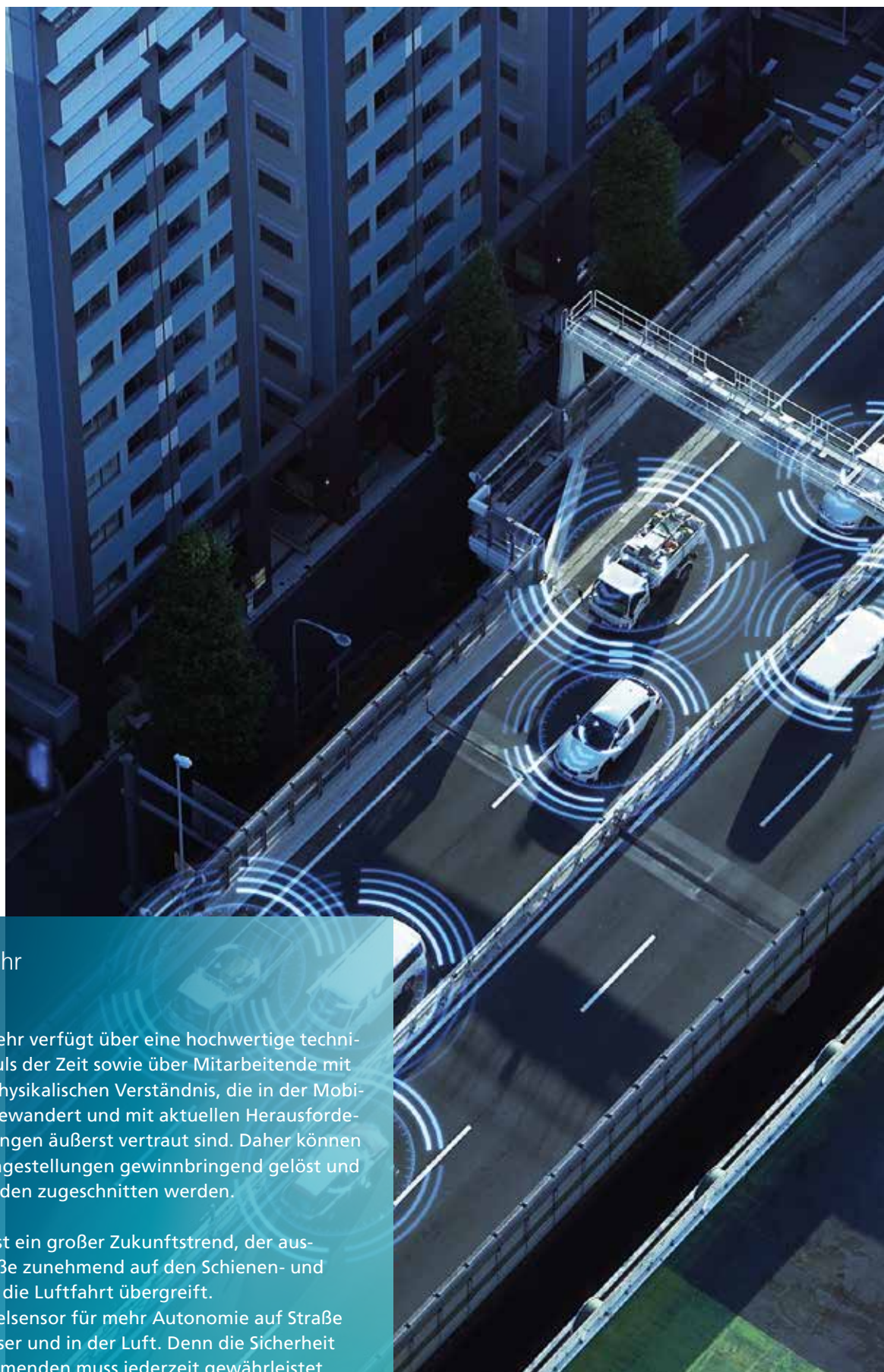
## Netzwerk aus zahlreichen kleinen Sensoren

Um mobile Drohnenports realisieren zu können, wie sie etwa für die Olympischen Spiele nötig sein werden, und keinen zentralen Schwachpunkt zu bieten, setzen die Forschenden auf ein Netzwerk aus zahlreichen dezentralen aktiven und passiven Sensoren, die gemeinsam den gesamten Bereich abtasten. Die Größe des abgetasteten Bereichs lässt sich ebenfalls leicht anpassen. Auch die Signalverarbeitung setzt nicht an einem zentralen Punkt an, sondern erfolgt dezentral über Edge Computing. Die Zielvision umfasst beliebig viele Sensoren, die sich, im Raum verteilt, automatisch vernetzen. Sind die Sensoren dabei so ausgerichtet, dass sie das Flugfeld redundant erfassen, sind auch Abschattungen und Ausfälle abgedeckt – das System wird robust und resilient. Nicht nur für Vertiports ist das System interessant, auch könnte es künftig Korridore überwachen, auf denen sich Transportdrohnen durch die Städte bewegen.

*An Start- und Landeplattformen von Multikoptern und Flugtaxis herrscht viel Verkehr. Künftig könnte ein Netzwerk aus Radarsensoren den dortigen Flugverkehr hochgenau überwachen.*

## Kontakt

Winfried Johannes, M. Sc.  
+49 228 9435-355  
winfried.johannes@  
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 Landeassistentz 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.

*Radarsensoren sind wichtige Komponenten von Fahrerassistenzsystemen.*

# Metallbeschichtete Radarantenne aus dem 3D-Drucker

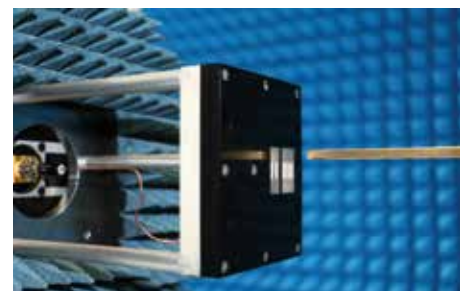
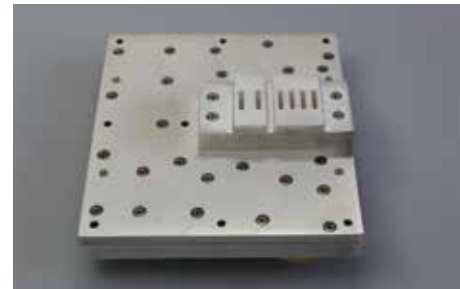
**Über Radarantennen können Fahrzeuge das Straßengeschehen erfassen. Nun lassen sich diese Antennen kostengünstig herstellen: per 3D-Druck und Metallbeschichtung.**

Während Menschen Augen und Ohren haben, um beim Autofahren auf die Umgebung zu achten und Fußgänger, Radfahrer und Co. zuverlässig zu erkennen, sind autonome fahrende Fahrzeuge sowie Fahrerassistenzsysteme auf Sensoren angewiesen. Etwa auf Radarsensoren, die bereits heute in zahlreichen Autos verbaut sind. Mindestens vier Antennen sind üblicherweise dafür nötig, eine Sende- sowie drei Empfangsantennen. Die Sendeantenne schickt Radarstrahlen in ihre Umgebung, die von den verschiedenen Objekten wie Fußgängern, Fahrradfahrern, Autos oder Laternenmasten reflektiert und zu den Empfangsantennen zurückgelenkt werden. Schon mit einer Empfangsantenne ist es möglich, Abstand und Geschwindigkeit des Objekts zu berechnen. Mit der zweiten erhält man einen groben Winkelbereich, in dem sich das Objekt befindet – beispielsweise in einem Winkel von ungefähr 30 Grad zum Sensor. Und mit der dritten Antenne lässt sich dieser Winkelbereich noch weiter einschränken. Generell gilt: Je mehr Empfangsantennen, desto höher die Auflösung und desto mehr Objekte sind gleichzeitig detektierbar. Bei gedruckten Mikrostreifen-Antennen steigen die Verluste beim Einsatz mehrerer Antennen jedoch, auch ist ihre

Bandbreite stark begrenzt. Anders bei Hohlleiterantennen: Sie eignen sich hervorragend für einen Multi-Antennen-Einsatz. Jedoch besteht hier ein anderes Problem. Denn die Hohlantennen bestehen üblicherweise vollständig aus Metall, vielfach werden sie aus einem massiven Metallblock gefertigt – ein kompliziertes, langwieriges und teures Unterfangen.

## Kunststoffdruck statt Metallverarbeitung

Forschende des Fraunhofer FHR haben nun eine deutlich kostengünstigere Alternative untersucht. Anstatt die Antenne aus einem Metallblock zu fräsen, drucken die Forschenden sie aus Kunststoff mit einem 3D-Drucker und beschichten sie anschließend mit Metall. Um die innen liegenden Hohlräume zu beschichten, greifen sie zu einem Trick: Sie stellen die Antenne nicht in einem Rutsch her, sondern teilen sie in zwei Hälften – in denen jeweils auch nur die Hälfte des Hohlleiters liegt. Diese Hälften werden mit Metall beschichtet und anschließend zu einem Ganzen zusammengefügt. Die so gefertigte Antenne, nach Fraunhofer-Vorgaben ausgedruckt und beschichtet vom Kooperationspartner Biconex GmbH, verglichen die Forschenden mit baugleichen Metallantennen. Das Ergebnis kann sich sehen lassen. Die 3D-gedruckten und beschichteten Antennen funktionieren zwar ein klein wenig anders, jedoch ähnlich gut wie die Metallantennen – und zwar im gesamten Frequenzbereich von 67 bis 81 Gigahertz. Sie arbeiten also sowohl im Long-Range- als auch im Short-Range-Bereich. Nun bietet der 3D-Druck zwar große Flexibilität, ist jedoch nicht sonderlich tauglich für die Massenfertigung. Doch auch hier haben die Forschenden eine Lösung: Die beiden Antennenhälften lassen sich ebenso gut über das Massenproduktionsverfahren Spitzguss herstellen.



*oben: Metallbeschichtete 3D-gedruckte Antenne.*

*Mitte: Metallbeschichtete 3D-gedruckte Antenne mit RF-Absorberabdeckung zur Reduzierung stehender Wellen.*

*unten: Charakterisierung metallbeschichteter 3D-gedruckter Antenne mit Nahfeld-Messsystem des Fraunhofer FHR.*

## Kontakt

Carlos Galvis Salzburg, M. Sc.  
+49 228 9435-773  
carlos.salzburg@  
fhr.fraunhofer.de



# Kollisionsfrei trotz vollem Luftraum

Der Luftraum füllt sich: Drohnen sollen Paketboten unterstützen, Lufttaxis die Straßen entlasten. Damit es nicht zu Kollisionen kommt, braucht es geeignete Systeme zur Luftraumüberwachung. Ein wird im »MIMO-Air Projekt« entwickelt, an dem sich auch das Fraunhofer FHR beteiligt.

Auf den Straßen herrscht stets ein reges Verkehrstreiben – hierauf sind Städte und Gemeinden eingestellt. Künftig dürfte sich jedoch ein Teil des Verkehrsgeschehens in den Luftraum verlagern: Drohnen liefern Pakete aus, Lufttaxis befördern menschliche Fahrgäste. Während am Boden feste Straßenverläufe, Vorfahrtsregelungen und Ampeln Zusammenstöße vermeiden, ist dies in der Luft schwieriger zu realisieren.

## MIMO-Radar trackt und identifiziert Drohnen und Co.

Wie eine Luftüberwachung aussehen kann, untersucht ein Forscherteam aus zahlreichen Partnern – unter anderem das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, die HENSOLDT Sensors GmbH und das Fraunhofer FHR – im »MIMO-Air Projekt«. Das Ziel liegt in der Entwicklung eines MIMO-Radars für fliegende Plattformen, mit dem sich Hindernisse umfliegen und Kollisionen vermeiden lassen. Zur Evaluation wird das System vorerst unter einen Hubschrauber montiert. Die Daten, die das Radar-Gerät erfasst, werden via 4G-Datenlink zur Bodenstation gesendet – dort kann der Plattformbetreiber nicht nur die Flugbahnen per Radar im Blick behalten, sondern auch die verschiedenen Drohnenarten unterscheiden. Hierfür werden die Daten intuitiv in Form einer Virtual Reality Anwendung aufbereitet.

## Tracking, kognitive Datenverarbeitung und Klassifikation

Die Forschenden des Fraunhofer FHR aus der Abteilung Kognitives Radar kümmern sich dabei um drei Dinge: Zunächst einmal um das Tracking, sie nutzen also die Radardaten, um die Flugbahnen der Drohnen zu bestimmen. Der Schwerpunkt liegt im zweiten Bereich, der kognitiven Datenverarbeitung. Über diese sollen die Parameter des MIMO-Radars während des Flugs optimal angepasst und die Fehlerquote beim Tracken der Flugobjekte möglichst weit gesenkt werden – mittels einer dafür entwickelten Software. Der dritte Part des Fraunhofer FHR liegt in der Klassifikation: Über Mikro-Doppler analysiert das Team, um welche Art von Drohne es sich handelt.

Die Teilsysteme, die die unterschiedlichen Projektpartner entwickeln – die HENSOLDT Sensors GmbH erstellt das Radarsystem, die DFS Deutsche Flugsicherung GmbH betreut das Projekt mit ihrer Expertise, das DLR-SE ist für die Entwicklung der Bodenstation verantwortlich, das DLR-FL kümmert sich um den 4G-DATALINK, die Flugrouten von Drohnen und die Flughafenlogistik, Humatecs bereitet die Virtual-Reality-Anwendung vor – werden zunächst per Simulation zusammengeführt.

Anschließend wird das Gesamtsystem zusammen mit dem Institut für Flugführung des DLRs anwendungsnah erprobt. Zunächst sind im Oktober 2023 Bodentests auf dem nationalen Erprobungszentrum für unbemannte Luftfahrtsysteme in Cochstedt geplant. Im April 2024 wird das System in einem finalen Schritt ebenfalls in Cochstedt in Flugversuchen erprobt. Dazu wird der Hubschrauber Typ Bo 105 des DLRs eingesetzt.



*oben: Verschiedene Drohnensysteme lassen sich über das System identifizieren und voneinander unterscheiden.*

*Mitte: Das Radarsystem, das den Luftraum überwachen soll, befindet sich unter einem Helikopter.*

*unten: Das Radarsystem, das die HENSOLDT Sensors GmbH erstellt.*

## Kontakt

Jorge Centenera Zafra, M. Sc.  
+49 228 60882-2619  
jorge.centenera@  
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. Vieler-sprechend 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.

*Radاربreitenmessung am Vorgerüst der Salzgitter Flachstahl GmbH.*

# Defekte in glasfaserverstärktem Kunststoff in-line aufspüren

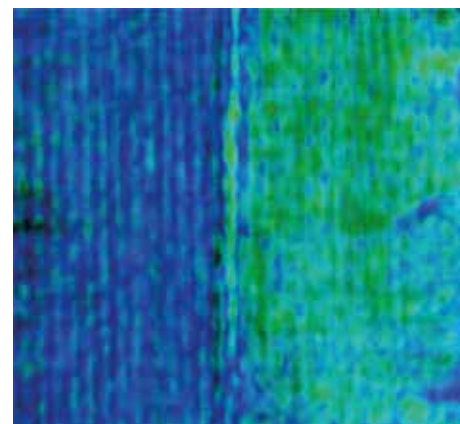
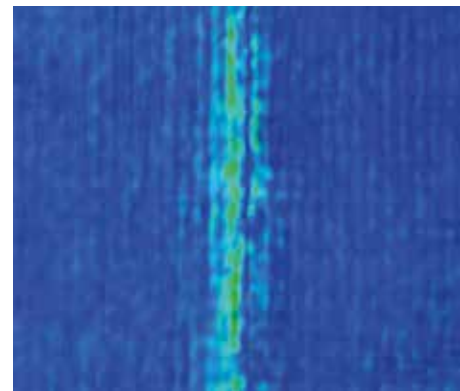
**Bei der Rotorblatt-Herstellung ist Präzision gefragt: Die einzelnen Glasfaser-matten müssen exakt ausgerichtet sein. Mit einem voll-polarimetrischen Radar lassen sich Defekte erstmals automatisch, zerstörungsfrei und im gesamten Volumen entdecken – automatisiert während der Fertigung.**

Der Mensch hat keinen Röntgenblick. Doch wäre es mitunter praktisch, in Dinge hineinschauen zu können: Etwa im Bereich der Fertigung von Rotorblättern, die aus glasfaserverstärkten Kunststoffen bestehen und in Windkraftanlagen eingesetzt werden. Dabei werden verschiedene Glasfasermatten übereinandergelegt, unter Vakuum gesetzt und mit Harz verklebt. Unterlaufen beim Positionieren der Glasfasermatten jedoch Fehler, sind etwa Wellen in einer Matte oder die Fasern falsch ausgerichtet, kann dies die mechanischen Eigenschaften des gefertigten Bauteils negativ beeinflussen. Nun lassen sich solche Defekte mit dem bloßen Auge jedoch nicht sehen, insbesondere dann nicht, wenn sich weitere Glasfasermatten darüber stapeln und das Ganze vakuumiert und auf engstem Raum zusammengepresst wird. Einzige Prüfmöglichkeit ist derzeit die manuelle Prüfung, wobei Defekte, wenn überhaupt stets nur in der oberen Schicht erkannt werden.

Was dem menschlichen Sehvermögen verschlossen bleibt, kann jedoch ein voll-polarimetrisches Radar erkennen: Es spürt Defekte bereits während der Fertigung auf, zerstörungsfrei und automatisiert, über alle Schichten hinweg. Entwickelt wurde es von Forschenden des Fraunhofer FHR im NRW-Leitmarkt-Projekt Fiberradar, gemeinsam mit der Aeroconcept GmbH, der Ruhr Universität Bochum und der Fachhochschule Aachen. Das Radar verfügt insgesamt über vier Kanäle, zwei zum Senden und zwei zum Empfangen – statt wie üblich nur über einen. Es stehen also vier mögliche Kombinationen zur Verfügung, um dem Rotorblatt Informationen zu entlocken.

## Erste erfolgreiche Messungen

Ein Demonstrator konnte bereits zeigen, was das System leisten kann – und zwar auch in einer Produktionsumgebung. Dazu montierten die Forschenden auf einer mobilen Plattform einen Roboterarm, der wiederum das Radargerät hält. Dieser Aufbau scannte die gesamte Blattspitze, ein Achtel eines Rotorblatts, und ließ auf diese Weise die Faserstruktur des Glasfaserverbundstoffes sichtbar werden. Während die Hardware-Komponenten von den Partnern entwickelt wurden, steuerte das Fraunhofer FHR seine Kompetenzen im Bereich der Algorithmen bei, die für die Auswertung benötigt werden. So gelang es den Forschenden etwa die Bildqualität signifikant zu erhöhen, indem sie einerseits bestehende Algorithmen aus der polarimetrischen Bildgebung auf Faserverbundstoffe anpassten und andererseits neue Algorithmen zur Behandlung hoch brechender Materialien speziell für diese Anwendung entwickelten.



*Ausgabe nach Dekompositionsverfahren (oben: Faserlage mit Ondulation, unten: mit unvollständiger Faserlage links).*

## Kontakt

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



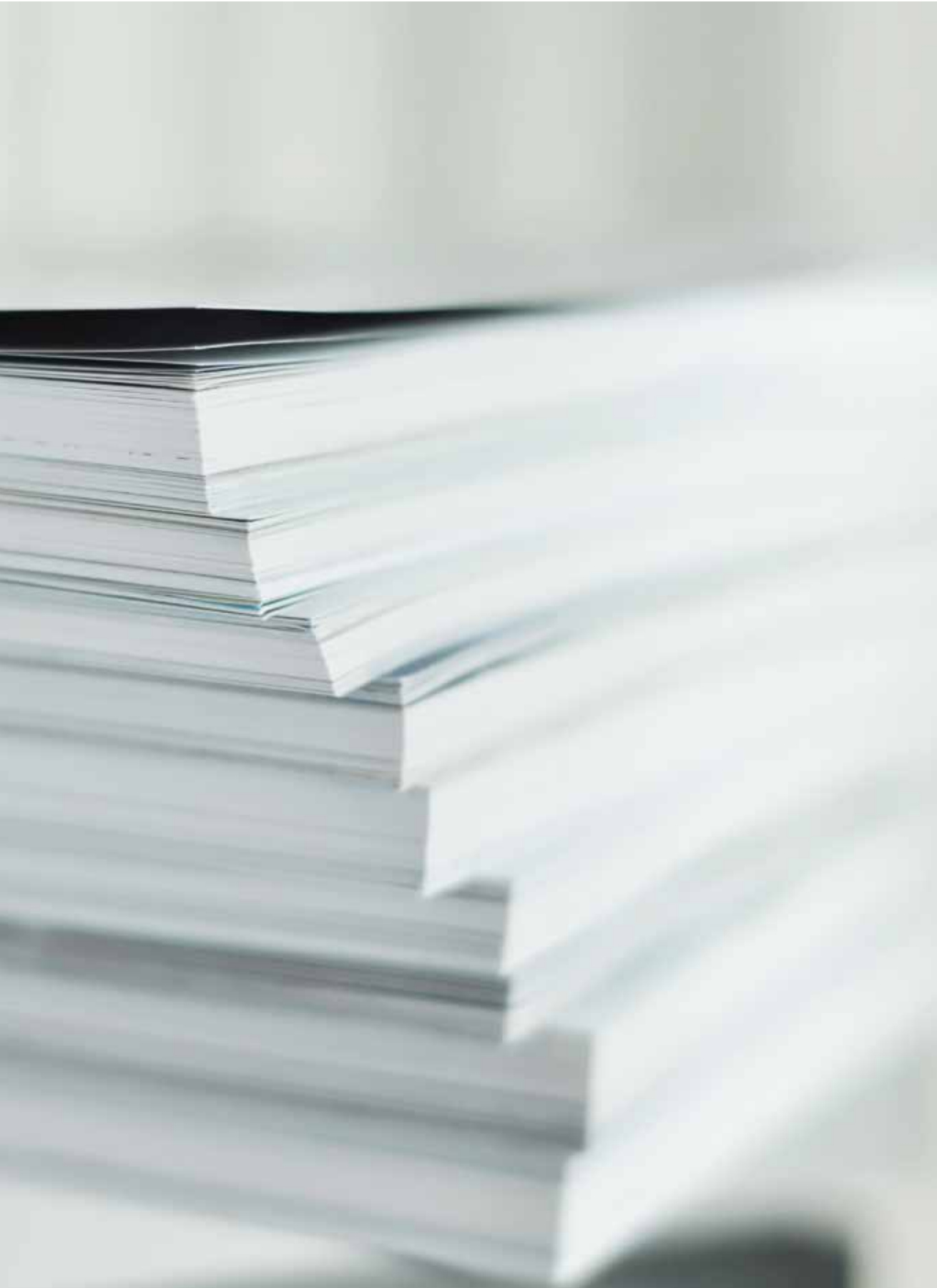
Für die Testmessungen brachte die Aeroconcept GmbH gezielt Defekte in die Flügelspitze ein, die bei der Produktion verstärkt auftreten: Winkelfehler, bei denen die Fasern in einer Schicht falsch orientiert sind. Ondulationen, bei denen nicht sichtbare Wellen in den Lagen auftreten. Halbe Längen, bei denen die Faserlage mitten in einer Schicht aufhört. All diese Fehler konnte das System zuverlässig abbilden. Zwei der insgesamt vier Kanäle, die Kreuzpolarisationen, punkteten bei der Detektion von Ondulationen und halben Längen. Indem die Forschenden die Kanäle kombinieren, können sie dem Nutzer die Ergebnisse in einer einheitlichen Übersicht ausgeben. Die halben Längen konnten insbesondere dann sehr gut erkannt werden, wenn sich die Faserrichtung änderte, aber bei gleicher Richtung lieferte die Methode sehr gute Ergebnisse. Auch die Winkelfehler spürte das System bestens auf: Fehler von 10 und 20 Grad konnten auch in tiefen Schichten deutlich erkannt werden – obwohl

die Defekte von mehreren Lagen verdeckt wurden. Über Radar konnten somit erstmalig Defekte während des Herstellungsprozesses detektiert werden.

*Produktionsumgebung bei Aeroconcept GmbH mit Rotorblattspitze (ca. 1/8 des fertigen Blatts).*



*Defekte Faserlage mit Ondulation.*



# 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 2022

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022)



## Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022-journals](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022-journals)



## Publikationen bei wissenschaftlichen Konferenzen

[www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022-konferenzen](http://www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2022-konferenzen)



## Fraunhofer-Publikationsdatenbank

<https://publica.fraunhofer.de>



# Ausbildung und Lehre

---



# Vorlesungen

---

## WS 2021/2022

**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)

**Fröhlich, Andreas; Krist, Michael; Slavov, Angel:**  
»Radarpraktikum«, 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:** »Master-Praktikum Schaltungsdesign integrierter Hochfrequenzschaltungen mit CADENCE«, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

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

**Slavov, Angel:** »Antennendesign für Radarsysteme«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Krebs, Christian:** Lehrbeauftragte/r Leiterplattendesign, HS Koblenz

## SS 2022

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

**Fröhlich, Andreas; Krist, Michael; Slavov, Angel:**  
»Radarpraktikum«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**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)

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

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

**Krebs, Christian:** Lehrbeauftragte/r Leiterplattendesign, HS Koblenz

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

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

**Slavov, Angel:** »Radar System Design und Anwendungen«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

## Betreute Promotionen

---

**Alshrafi, Wasim:** »Grating Lobe Suppression in Microstrip Patch Uniform Linear Array Antennas Using Passive Structures«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Gemmer, Thomas:** »Generalised Test-Zone Field Compensation«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Neuberger, Nadav:** »Signal Processing for Space Surveillance Radar«, Universität Siegen

**Panhuber, Reinhard:** »AT: Partitioning of Radar Signals in Stationary and Moving Targets by use of Low-Rank and Compressed Sensing Methods«, Universität Siegen

**Wagner, Simon:** »Radar Target Classification via Sparse Decomposition«, Universität Siegen

## Abschlussarbeiten (Master)

**Gräf, Michael:** »Entwicklung eines Hochfrequenzsystems für intralogistische und luftgetragene Anwendungen«, Rheinische Fachhochschule Köln

**Gütgemann, Sabine:**

»Modernes Leadership: Was kann es leisten, ist es operationalisierbar, und wie können Investition in die Entwicklung der Leadership-Kompetenz der Gruppenleitung gemessen werden?«, HS Koblenz

**La Spada, Pietro:** »Space debris detection and parameter estimation performance for BPEs with the TIRA system«, Università di Pisa

**Leinz, Daniel:** »Optimierung des Positionsmesssystems der Großantenne eines Welt-raumbeobachtungsrads«, Technischen Hochschule Köln

**Schepers, Maurice:** »Entwicklung eines Transmitarrays zur frequenzselektiven Polarisationsdrehung«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Ta, Thanh Tam Julian:**

»Evaluierung des Einflusses der messenden Person auf die Erfassung von Mobilfunk-Immissionen mit einer isotropen Messsonde«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Uzair, Muhammad:** »Design and Characterization of All-dielectric Metasurface for mm-wave Antenna«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Umashankar, Varsha:** »Analysis of Phase Retrieval Algorithms on Planar Sampling Grids with a Spherical to Planar Wave Expansion Approach«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

**Weyland, Thomas:** »Performance Analysis of 5G Mobile Networks as Illuminator of Opportunity for Passive Radar«, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen)

# Gremientätigkeiten

---

**Bertuch, T.**

- IEEE Antennas and Propagation Standards WG P145: Mitglied
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2022: 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) 2022: Technical Review Committee
- IEEE Radar Conference 2022, TPC member
- NATO Science and Technology Organization SET Panel Member at Large for Machine Learning and Artificial Intelligence
- VDE ITG Vorstandsmitglied

**Caris, M.**

- International Radar Symposium (IRS) 2022: 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 2022: Technical Program Member
- EuRad 2022: Technical Program Member
- EuRad 2022: Organisator und Vortragende des Workshops »Applications for advanced passive radar systems«
- IEEE RadarConf 2022: Track Chair
- IEEE RadarConf 2022: Vortragende des Tutorials »Passive radar on mobile platforms – from target detection to SAR/ISAR imaging«
- IET Radar 2022: Technical Review Committee
- International Radar Symposium (IRS) 2022: Technical Program Committee
- EUSAR 2022: Technical Program Member & Award Committee Member
- ARSI + KEO 2022 (ESA 7th edition of the Advanced RF

Sensors and Remote Sensing Instruments workshop + 5th Ka-band for Earth Observation workshop): Technical Program Committee

**Danklmayer, A.**

- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), Vorsitzender des Fachausschusses für Radartechnik
- VDE-ITG Fachausschuss HF 4 »Ortung«: Vorsitzender
- International Radar Symposium (IRS) 2022: Technical Program Committee Member
- IGARSS 2022, Kuala Lumpur, Malaysia: Scientific Committee Member
- EUSAR 2022, Leipzig Technical Program Committee Member
- 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) Madrid: Mitorganisator, Exhibitor Chair
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2023, FlorenzMadrid: Mitorganisator, TPC chair
- Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) 2022, 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) 2022: Technical Program Committee
- European Microwave Week (EuMW) 2022: Technical Review Committee
- IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES) 2022: Technical Program Committee
- IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT) 2022: Technical Review Committee
- 9th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) 2022: Technical Program Committee

#### **Knott, P.**

- 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
- Deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik e.V.: Mitglied im Beirat Brüssel - neu
- International Radar Symposium (IRS) 2022: Chair

#### **Markiton, P.**

- IEEE AESS YP Representative 2020-2023
- IEEE AESS QEB Editor-in-Chief 2022-2023
- NATO STO SET-ET-128 »Open Data RFT/OT Initiative«: Chair

#### **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.**

- VDI ITG Fachbereich Hochfrequenztechnik: Sprecher
- VDI ITG Fachausschuss HF3 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
- International Microwave Symposium (IMS 2022), Denver: Technical Program and Review Committee
- European Microwave Week (EuMW) 2022, Mailand: Technical Program Committee
- IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated

Circuits and Technology Symposium (BCICTS 2022), Phoenix:  
Technical Program Committee, Co-Chair for MM-Wave &  
THz ICs

#### **Uschkerat, U.**

- EDA CapTech Radar: German Governmental Expert
- BMVI Nationale Vorbereitungsgruppe zur WRC-23 (NVG23): Mitglied
- ETSI TGUWB: Mitglied

#### **Walterscheid, I.**

- IEEE IGARSS 2022: Scientific Committee
- EUSAR 2022: 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) 2022: 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) 2022: Technical Review Committee und Session Chair
- IEEE Antennas and Propagation Standards WG P2816: Mitglied
- EurAAP Working Group »Active Array Antennas« (WGA3): Mitglied
- EMWT'22 Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines: Technical Committee

#### **Weiß, M.**

- EUSAR 2022, Leipzig: Technical Chair, EUSAR Executive
- IGARSS 2022, Kuala Lumpur, Malaysia: Technical Program Member
- European Radar Conference (EuRAD) 2022: Technical Program Member
- International Radar Symposium (IRS) 2022: Technical Program Member
- Signal Processing Symposium (SPSympo) 2022, Lodz/online: Technical Program Member
- ICARES 2022, Yogyakarta, Indonesia, 24-25 November 2022: Technical Program Member
- NTSP 2022, Demanovsk Dolina, Slovakia, 12-14 October 2022: Technical Program Member

# Standorte

---







## Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR hat insgesamt vier 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

### Standort Aachen

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

### Standort Bochum

Universitätsstraße 150  
44801 Bochum  
+49 234 32-26495

*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 2023

## Bilder

Titel: NicoElNino / Shutterstock.

S. 4 Fraunhofer FHR / Uwe Bellhäuser

S. 9 Fraunhofer FHR / Reinders

S.10 Bild 1: Fraunhofer FHR / Carola Welsch, Bild 2: Fraunhofer FHR, Bild 3: Fraunhofer FHR / Carola Welsch, Bild 4: Fraunhofer FHR / Hans-Jürgen Vollrath, Bild 5: THW, Bild 6: Oliver Killing, Bild 7: Fraunhofer, Bild 8: Fraunhofer FHR / Michelle Brandenburg, Bild 9: Fraunhofer FHR / Hans-Jürgen Vollrath, Bild 10: Feuerwehr Wachtberg, Bild 11: Fraunhofer FHR

S. 12 Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 13 Fraunhofer FHR

S. 14/15: Fraunhofer FHR / Hans-Jürgen Vollrath

S. 16 Fraunhofer FHR / Nadav Neuberger

S. 17 Fraunhofer FHR / Stephan Palm

S. 18 Fraunhofer FHR / Simon Wagner

S. 19 Fraunhofer FHR / Reinhard Panhuber

S. 20 Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 24 Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 26 Fraunhofer FHR / Hans-Jürgen Vollrath

S. 27 Fraunhofer FHR / Uwe Bellhäuser

S. 28 Fraunhofer FHR / Rodrigo Blásquez Garcia

S. 30 Fraunhofer FHR / Stephan Palm

S. 31 Fraunhofer FHR / Andrej Konforta

S. 22 Fraunhofer FHR / Taher Badawy

S. 33 Fraunhofer FHR / Rodrigo Blásquez Garcia

S. 34 Fraunhofer FHR / Uwe Bellhäuser

S. 36 Fraunhofer FHR / Jeremias Schroer

S. 37 Fraunhofer FHR / Jens Fiege

S. 38 Bild 1: Fraunhofer FHR / Frank Schlichthaber, Bild 2: JAXA

S. 40 Fraunhofer FHR / Jens Klare

S. 41 Bild 1: Fraunhofer FHR / Jens Fiege, Bild 2: Fraunhofer FHR / Christoph Reising

S. 42 Fraunhofer FHR / Andreas Schoeps

S. 44 Fraunhofer FHR / Sven Leuchs

S. 45 Fraunhofer FHR / Andreas Schoeps

S. 46 metamorworks / Shutterstock.

S. 48 Fraunhofer FHR / Carlos Galvis Salzburg

S. 49 Bild 1, 2, 3: DLR-FL, Bild 4: HENSOLDT

S. 50 Fraunhofer FHR / Sabine Gütgemann

S. 52/53 Fraunhofer FHR / André Froehly

S. 54 itockphoto / dtimiraos

S. 64 Fraunhofer FHR / Jens Fiege



