





**JAHRESBERICHT**  
**2015**

# VORWORT

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

die Bundesregierung hat im Jahr 2010 mit der Verabschiedung ihrer Weltraumstrategie die Bedeutung unserer raumgestützten Infrastruktur unterstrichen. Bereits 2008 hatte sie die Gründung des nationalen Weltraumlagezentrums beschlossen, das sich seitdem im Aufbau befindet. Sein Betrieb ist auf Seiten der Bundeswehr der Luftwaffe unterstellt. Aber Kenntnis der Weltraumlage ist nicht nur im Interesse des Verteidigers, sondern betrifft die Zivilgesellschaft gleichermaßen. Darum wird das Weltraumlagezentrum gemeinsam von der Bundeswehr und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben.

Und die Lage im Weltraum verschärft sich: Unzählige Objekte umkreisen unseren Planeten auf verschiedensten Bahnen – und es ist niemand dort oben, um den Verkehr zu regeln. Es werden daher neue Systeme und Verfahren benötigt, um ein möglichst genaues Lagebild zu erhalten. Daher hat das DLR uns mit dem Bau eines neuartigen Überwachungsradars beauftragt: GESTRA (German experimental space surveillance and tracking radar). Im Rahmen dieses Projekts werden wir das deutsche Experimentalsystem zur Überwachung des Weltraums konzipieren und aufbauen.

Wir sind stolz ob dieser Auszeichnung unserer langjährigen Expertise, die wir stets durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und Arbeitsergebnisse in Form modernster und innovativer Systeme belegen konnten. Aber natürlich fühlen wir uns auch in der Pflicht, die an uns gerichteten Erwartungen zur vollsten Zufriedenheit unserer Auftraggeber zu erfüllen. Ich bin zuversichtlich, dass es uns gelingen wird. Denn unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bringen all ihr umfassendes Fachwissen und ihre enorme Begeisterung für ihre Tätigkeit in dieses und natürlich auch all unsere anderen Projekte ein.

Die Leistungen unserer Wissenschaftler wurden auch von dritter Seite anerkannt und gewürdigt: Prof. Dr. Nils Pohl, Abteilungsleiter MHS, erhielt einen Ruf an die Ruhr-Universität-Bochum und bekleidet nun neben seiner Tätigkeit am Fraunhofer FHR den Lehrstuhl für Integrierte Hochfrequenzschaltungen an der Ruhr-Universität Bochum. Dr. Stefan Brüggewirth, Abteilungsleiter KR, wurde von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR) für seine Promotion »Entwicklung einer kognitiven Systemarchitektur mit zentraler Ontologie und spezifischen Algorithmen« mit dem Claudius Dornier jr. Dissertationspreis ausgezeichnet, der zum ersten Mal vergeben wurde. Beim Innovationswettbewerb der Fraunhofer-Gesellschaft erhielt das Team um Prof. Dr. Jens Bongartz, Abteilungsleiter AMLS, einen mit 25.000 Euro dotierten Förderpreis zur Erforschung der Landminendetektion mittels luftgetragener Hyperspektralsensoren. Um nur einige Preisträger zu nennen.



Ein weiteres erfreuliches Ereignis, wenn auch ganz anderer Art, war die Einweihung der neuen Büros auf unserem Gelände. Zusätzlich zu den angemieteten Räumen in Wachtberg-Villip haben wir eines unserer Gebäude um ein Stockwerk erweitert. Am meisten freut mich daran, dass dies zeigt: Wir wachsen weiter! Wir sind mit unseren Ideen und Leistungen auf dem richtigen Weg. Für uns sind das motivierende Signale. Es ist ein ja wesentliches Element der angewandten Forschung, wie Fraunhofer sie betreibt, dass Lösungen für die speziellen Anforderungen der Kunden angepasst und entwickelt werden müssen. Ein neues Projekt ist stets auch eine Fahrt ins Unbekannte. An dieser Stelle möchte ich daher allen Kooperationspartnern des Fraunhofer FHR für ihr Vertrauen danken – allen voran den Institutionen, die unsere Forschungsarbeiten gefördert haben, und unseren Partnern aus der Wirtschaft.

Das »Wachtberg-Forum«, unsere alljährlich stattfindende Hausmesse, verzeichnete in diesem Jahr steigende Besucherzahlen. Wie auch in den vergangenen Jahren konnten sich Kunden und Partner ein Bild über die laufenden Forschungsarbeiten des Instituts machen. Ein besonderes Highlight in diesem Jahr war eine Satelliten-Messung samt Live-Schalte mit TIRA, das nach erfolgreicher Radom-Erneuerung zum Jahresbeginn seinen Betrieb wieder aufgenommen hat. Außerdem präsentierten wir die Detektion von Kleindrohnen mit Radar – ebenfalls bei einer Live-Vorführung. Die inzwischen weltweit bekannte »Summer School on Radar and SAR« wurde zum siebten Mal abgehalten und erfreute sich einer großen Zahl junger Wissenschaftler aus aller Welt. Erstmals nahmen wir am »Wissenschaftscampus« teil. Dabei waren rund vierzig Nachwuchswissenschaftlerinnen aus ganz Deutschland bei uns zu Gast und informierten sich über Forschungs- und Führungskarrieren bei Fraunhofer, insbesondere am Fraunhofer FHR.

Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben im Jahr 2015 an zahlreichen Projekten und Themen gearbeitet. Mit diesem Jahresbericht möchten wir Ihnen einen Einblick in unsere spannenden Projekte geben. Ich lade Sie daher ein, liebe Leserinnen und Leser, sich einen Überblick über die vielfältigen Aktivitäten des Fraunhofer FHR zu verschaffen und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Joachim Ender, März 2016

*Institutsleiter:*  
*Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender*  
*Tel. +49 228 9435-227*  
*joachim.ender@*  
*fhr.fraunhofer.de*

# INHALTSVERZEICHNIS

## 2 ÜBERBLICK

- 2 Vorwort
- 4 Inhaltsverzeichnis
- 6 Fraunhofer FHR im Profil
- 10 Ihre Ansprechpartner
- 12 Das Kuratorium

## 14 KEYNOTE

- 14 Weltraumüberwachung mit GESTRA

## 18 INTERVIEW

- 18 Interview Dr. Stefan Brüggewirth:  
»Keine festen Bahnen für einen  
ausgezeichneten Werdegang«

## 20 GESCHÄFTSFELDER IM ÜBERBLICK

- 20 Geschäftsfelder im Überblick

## 22 VERTEIDIGUNG

- 26 Deep-Learning zur Identifizierung von  
Luft- und Bodenzielen
- 28 Passivradar auf mobilen Plattformen
- 30 Zirkulares SAR
- 32 Dreidimensionale Abbildung von Schiffen
- 34 Modellierung des Wasserechos zur  
mehrkanaligen Signalverarbeitung bei  
maritimen Radarsystemen
- 36 Adaptive Wahrnehmung: Wegbereiter für  
kognitives Radar



## 38 WELTRAUM

- 42 Neue Ansätze zur Erfassung der Weltraummüllumhebung
- 44 Ressourceneffiziente Weltraumüberwachung
- 46 Interview Dr. Robert Kohleppel: »Unglaublich spannend«

## 48 VERKEHR

- 52 Sense and Avoid-Radarsysteme für die Sicherheit im Luftraum
- 54 Autonomes Fahren durch Radar

## 56 UMWELT

- 60 Landminen-Detektion in Kambodscha

## 62 SICHERHEIT

- 66 Assistenzsensoren für die Robotik
- 68 Kleindrohrendetektion mit Millimeterwellen-Radar
- 70 MIMO-Radarsysteme

## 72 PRODUKTION

- 76 Schwarzsehen erwünscht
- 78 Zerstörungsfreie Prüfung des TIRA-Radomaterials

## 80 EMERGING TECHNOLOGIES

- 82 300-GHz-SAR-Messungen von Straßen und Fassaden
- 84 Modellierung komplexer elektromagnetischer Szenarien

- 86 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre
- 88 Hochauflösendes 240-GHz-Radar mit SiGe-Chip

## 90 AUS DEM INSTITUT

- 90 Besondere Ereignisse 2015
- 94 Fraunhofer-Wissenschaftscampus
- 96 KORSIKA: Konfigurierbares KA-Band Radarsystem

## 98 FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## 99 FRAUNHOFER-ALLIANZ

- 99 Allianz Space
- 99 Allianz Vision

## 100 FRAUNHOFER-VERBÜNDE

- 100 Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung
- 101 Verbund Mikroelektronik

## 102 ANHANG

- 102 Ausbildung und Lehre
- 106 Veröffentlichungen
- 116 Gremientätigkeiten
- 120 Auszeichnungen
- 121 Veranstaltungen
- 122 Pressespiegel

## 124 ANFAHRT

## 126 IMPRESSUM

## ÜBERBLICK



*Institutsgelände des Fraunhofer  
FHR mit Weltraumbeobach-  
tungsradar TIRA in Wachtberg.*



# FRAUNHOFER FHR IM PROFIL

Als eines der größten Radarforschungsinstitute in Europa besitzt das Fraunhofer FHR eine fundierte Expertise in nahezu allen Bereichen der Radartechnik und Höchstfrequenzsensorik.



Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR entwickelt Konzepte, Verfahren und Systeme für elektromagnetische Sensorik, insbesondere im Bereich Radar, verbunden mit neuartigen Methoden der Signalverarbeitung und innovativen Technologien vom Mikrowellen- bis zum unteren Terahertzbereich. Seine international anerkannte und geschätzte Kompetenz erstreckt sich über nahezu alle Teilgebiete moderner Radarverfahren.

Radar und artverwandte Hochfrequenzsysteme sind eine Schlüsseltechnologie für Verteidigung und Sicherheit, insbesondere in den Bereichen Überwachung und Aufklärung. Das Fraunhofer FHR unterstützt das Bundesministerium der Verteidigung hierbei seit der Institutsgründung 1957. In Deutschland nimmt das Fraunhofer FHR eine führende Rolle bei der Entwicklung neuer Technologien für vielzählige Anwendungen ein, zum Beispiel Erfassung der Weltraumlage mit Radar, multifunktionale Radarsysteme mit phasen-gesteuerten Gruppenantennen, adaptive Störunterdrückung, Millimeterwellen-Technologien, höchstauflösende Bildgebung mittels SAR- und ISAR-Verfahren, Bewegtziel-Erkennung mit räumlich-zeitlicher Clutterunterdrückung, Passivradar sowie Zielklassifizierung und kognitives Radar.

Mit mehreren echoarmen Messkammern, Technologiezentren für Chip-Design und analoge und digitale Leiterplattenfertigung sowie Hochfrequenztechnik bis in den unteren Terahertz-Bereich bietet das Institut eine hervorragende Ausstattung zur Entwicklung moderner Sensorsysteme. Durch interdisziplinäre Forschungsarbeiten in den Bereichen der Berechnung elektromagnetischer Felder, der Entwicklung innovativer Hochfrequenzsysteme und fortgeschrittener Verfahren und Algorithmen der Signal- und Informationsverarbeitung sowie seine Kompetenzen in der Erfassung und Beurteilung von Informationen zur Weltraumlage kann das FHR komplexe Verfahren, Systeme, Subsysteme und Komponenten entwer-

fen, aufbauen, erproben und nutzen. Neben Geräten auf Hohlleiterbasis entwickelt es auch hochintegrierte Radar-on-Chip-Systeme bei Frequenzen bis zu 240 GHz.

### **Kernkompetenzen**

In fünf Bereichen kann das Fraunhofer FHR seinen Partnern mit Fähigkeiten in herausragender Breite und Tiefe zur Seite stehen. Mit diesen Kernkompetenzen deckt das Institut die gesamte Entwicklungskette von Radar- und HF-Systemen ab. Beginnend bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen über die elektronischen Komponenten, den Aufbau und die Erprobung von Demonstratoren bis hin zu den Methoden der Signalverarbeitung und deren Umsetzung. All diese Fähigkeiten unter einem Dach zu vereinen, ist ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal des Instituts.

### **Kernkompetenzen des Fraunhofer FHR:**

- Elektromagnetische Felder
- Hochfrequenzsysteme
- Signalverarbeitung und Bildgebung
- Kognitives Radar
- Weltraumradar

### **Geschäftsfelder**

Seine Fähigkeiten stellt das Fraunhofer FHR seinen Kunden und Partnern zur Entwicklung neuartiger Produkte in seinen sechs Geschäftsfeldern zur Verfügung. Neben den langjährig etablierten Feldern wie Verteidigung und Weltraum bietet es auch für die Märkte im Bereich Verkehr, Umwelt, Sicherheit und Produktion innovative Lösungen an.

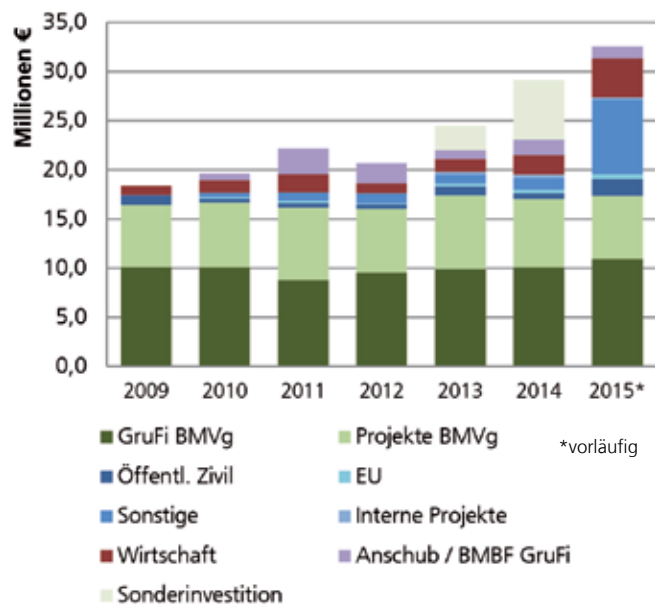
## Personal- und Budgetentwicklung

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 zivile Erträge, EU-Erträge, interne Projekte, Sonstige und institutionelle Förderung durch das BMBF.

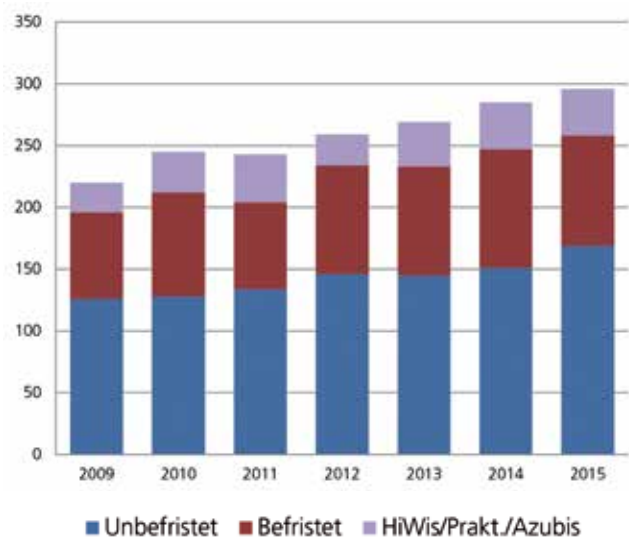
Nach vorläufigem Ergebnis erwirtschaftete das Fraunhofer FHR im Jahr 2015 im wehrtechnischen und im zivilen Institutsteil einen Gesamtertrag in Höhe von 32,5 Mio € (Grundfinanzierung: 10,9 Mio €; Projektfinanzierung: 6,4 Mio €; VfA: 15,2 Mio €). Bemerkenswert ist der stark gestiegene Vertragsforschungsanteil: Im Jahr 2015 um 149% auf 15,2 Mio € mit einer Steigerung der Wirtschaftserträge um 104% auf 3,9 Mio € im Vergleich zum Vorjahr.

Zum Jahresende 2015 waren am Fraunhofer FHR insgesamt 296 Mitarbeiter beschäftigt, ein Wachstum von 3,9% im Vergleich zum Vorjahr. Davon sind 169 unbefristet und 89 Personen befristet beschäftigt. Hinzu kommen noch 38 Studierende und Auszubildende.

## Budgetentwicklung 2009 - 2015



## Mitarbeiterentwicklung 2009 - 2015



# IHRE ANSPRECHPARTNER

<b>Kuratorium</b>  <b>Vorsitzender</b> Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. HERMANN ROHLING  TU Hamburg-Harburg							
<b>Business Development</b>  Dr. rer. nat. FRANK LORENZ   Tel. +49 228 9435-399 frank.lorenz@fhr.fraunhofer.de		<b>Interne und externe Kommunikation</b>  Dipl.-Volksw. JENS FIEGE   Tel. +49 228 9435-323 jens.fiege@fhr.fraunhofer.de		<b>Informationstechnik</b>  MICHAEL BUSSMANN   Tel. +49 228 9435-211 michael.bussmann@fhr.fraunhofer.de			
<b>Geschäftsfeldsprecher</b>		<b>Antennentechnologie und elektromagnetische Modellierung (AEM)</b>   Dr.-Ing. PETER KNOTT Tel. +49 228 9435-560 peter.knott@fhr.fraunhofer.de		<b>Array-gestützte Radarbildgebung (ARB)</b>   Dr.-Ing. ANDREAS BRENNER Tel. +49 228 9435-318 andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de		<b>Millimeterwellenradar und Höchstfrequenzsensoren (MHS)</b>   Prof. Dr.-Ing. NILS POHL Tel. +49 228 9435-157 nils.pohl@fhr.fraunhofer.de	
<b>Verteidigung</b>  Dr.-Ing. ANDREAS BRENNER   Tel. +49 228 9435-318 andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de		<b>Elektromagnetische Modellierung</b>  Dr.-Ing. FRANK WEINMANN   Tel. +49 228 9435-223 frank.weinmann@fhr.fraunhofer.de		<b>Multifunktionale Hochfrequenzsensorik</b>  Dipl.-Ing. HELMUT WILDEN   Tel. +49 228 9435-316 helmut.wilden@fhr.fraunhofer.de		<b>Millimeterwellen-Radar</b>  Dr. rer. nat. MICHAEL CARIS   Tel. +49 228 9435-353 michael.caris@fhr.fraunhofer.de	
<b>Weltraum</b>  Dr.-Ing. DELPHINE CERUTTI-MAORI   Tel. +49 228 9435-290 delphine.cerutti-maori@fhr.fraunhofer.de		<b>Antennen und Front-End-Technologie</b>  Dr.-Ing. THOMAS BERTUCH   Tel. +49 228 9435-561 thomas.bertuch@fhr.fraunhofer.de		<b>Sensornah Digitaltechnologie</b>  Dipl.-Ing. (FH) CLAUS KIRCHNER   Tel. +49 228 9435-203 claus.kirchner@fhr.fraunhofer.de		<b>Algorithmik</b>  Dr. rer. nat. ANIKA MARESCH   Tel. +49 228 9435-760 anika.maresch@fhr.fraunhofer.de	
<b>Verkehr</b>  Dr.-Ing. ANDREAS DANKLMAYER   Tel. +49 228 9435-350 andreas.danklmayer@fhr.fraunhofer.de		<b>Technik und Sicherheit</b>  Dipl.-Ing. (FH) STEFAN VORST   Tel. +49 228 9435-444 stefan.vorst@fhr.fraunhofer.de		<b>Signalverarbeitung für Weltraumüberwachung</b>  Dr.-Ing. ROBERT KOHLEPPEL   Tel. +49 228 9435-392 robert.kohleppel@fhr.fraunhofer.de		<b>Signaturen</b>  Dipl.-Ing. GREGOR BIEGEL   Tel. +49 228 9435-581 gregor.biegel@fhr.fraunhofer.de	
<b>Umwelt</b>  Dipl.-Ing. HEINER KUSCHEL   Tel. +49 228 9435-389 heiner.kuschel@fhr.fraunhofer.de		<b>Adaptive Array-Signalverarbeitung</b>  Dr. rer. nat. WOLFRAM BÜRGER   Tel. +49 228 9435-220 wolfram.buerger@fhr.fraunhofer.de		<b>Industrielle Messtechnik</b>  Dipl.-Ing. DIRK NÜSSLER   Tel. +49 228 9435-550 dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de			
<b>Sicherheit</b>  M. Sc. STEFAN A. LANG   Tel. +49 228 9435-782 stefan.lang@fhr.fraunhofer.de		<b>MIMO-Radar und Multistatik</b>  Dr. rer. nat. JENS KLARE   Tel. +49 228 9435-311 jens.klare@fhr.fraunhofer.de		<b>3D Sensorsysteme</b>  M. Sc. STEFAN A. LANG   Tel. +49 228 9435-782 stefan.lang@fhr.fraunhofer.de			
<b>Produktion</b>  Dipl.-Ing. DIRK NÜBLER   Tel. +49 228 9435-550 dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de		<b>Bildgebende Radar-Verfahren</b>  Dr.-Ing. PATRICK BERENS   Tel. +49 228 9435-641 patrick.berens@fhr.fraunhofer.de		<b>Radiometrie</b>  Dipl.-Ing. DENIS NÖTEL   Tel. +49 228 9435-578 denis.noetel@fhr.fraunhofer.de			
				<b>Chip-Design</b>  Prof. Dr.-Ing. NILS POHL   Tel. +49 228 9435-157 nils.pohl@fhr.fraunhofer.de			



## Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik

**Institutsleiter**  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. JOACHIM H. G. ENDER  
Tel. +49 228 9435-227  
joachim.ender@fhr.fraunhofer.de

## Universität Siegen

**Lehrstuhl**  
Hochfrequenzsensoren  
und Radarverfahren

### Sicherheit

Ass. jur. GLORIA POST



Tel. +49 228 9435-201  
gloria.post@fhr.fraunhofer.de

### Patente / Schutzrechte

Dipl.-Ing. (FH) ALEXANDER STUCKERT



Tel. +49 228 9435-278  
alexander.stuckert@fhr.fraunhofer.de

### Werkstatt

CHRISTOPH PESCHEL



Tel. +49 228 9435-231  
christoph.peschel@fhr.fraunhofer.de

### Anwendungszentrum für multimodale und luftgestützte Sensorik (AMLS)

Prof. Dr. rer. nat. JENS BONGARTZ



Tel. +49 2642 932-427  
jens.bongartz@fhr.fraunhofer.de

### Passives und störfestes Radar (PSR)



Dipl.-Ing.  
HEINER KUSCHEL  
Tel. +49 228 9435-389  
heiner.kuschel@fhr.fraunhofer.de

### Kognitives Radar (KR)



Dr.-Ing.  
STEFAN BRÜGGEWIRTH  
Tel. +49 228 9435-105  
stefan.brueggewirth@fhr.fraunhofer.de

### Radar zur Weltraumbeobachtung (RWB)



Dr.-Ing.  
LUDGER LEUSHACKE  
Tel. +49 228 9435-256  
ludger.leushacke@fhr.fraunhofer.de

### Verwaltung



JÜRGEN NEITZEL  
Tel. +49 228 9435-240  
juergen.neitzel@fhr.fraunhofer.de

### Passive Sensorik und elektronische Gegenmaßnahmen

Dipl.-Math. JOSEF WORMS



Tel. +49 228 9435-216  
josef.worms@fhr.fraunhofer.de

### Nicht-kooperative Identifizierung

Dr. rer. nat. TANJA BIEKER



Tel. +49 228 9435-634  
tanja.bieker@fhr.fraunhofer.de

### Verfahren zur Weltraumbeobachtung

Dr.-Ing. LUDGER LEUSHACKE



Tel. +49 228 9435-256  
ludger.leushacke@fhr.fraunhofer.de

### Finanzen

Dipl.-Kff. (FH) MONIKA FLOR



Tel. +49 228 9435-565  
monika.flor@fhr.fraunhofer.de

### Passiver Sensorverbund

Dr.-Ing. DIEGO CRISTALLINI



Tel. +49 228 9435-585  
diego.cristallini@fhr.fraunhofer.de

### UWB-Radar

Dr.-Ing. UDO USCHKERAT



Tel. +49 228 9435-517  
udo.uschkerat@fhr.fraunhofer.de

### TIRA - Radartechnik, Weiterentwicklung und Betrieb

Dr.-Ing. KLEMENS LETSCH



Tel. +49 228 9435-343  
klemens.letsch@fhr.fraunhofer.de

### Einkauf

HARTMUT SCHMIDT

Tel. +49 228 9435-331  
hartmut.schmidt@fhr.fraunhofer.de

### Experimentalsysteme

Dipl.-Ing. (FH) JOCHEN SCHELL



Tel. +49 228 9435-396  
jochen.schell@fhr.fraunhofer.de

### Adaptive Wahrnehmung

Dr. rer. nat. MARÍA GONZÁLEZ-HUICI



Tel. +49 228 9435-708  
maria.gonzalez@fhr.fraunhofer.de

### TIRA - Antennensystem und Infrastruktur

Dipl.-Ing. JÜRGEN MARNITZ



Tel. +49 228 9435-248  
juergen.marnitz@fhr.fraunhofer.de

### Personal

JOHANNES NELLES

Tel. +49 228 9435-526  
johannes.nelles@fhr.fraunhofer.de

### Weltraumaufklärung

Dr.-Ing. DELPHINE CERUTTI-MAORI



Tel. +49 228 9435-290  
delphine.cerutti-maori@fhr.fraunhofer.de

### Bautechnik

N. N.



ÜBERBLICK



# DAS KURATORIUM

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

Vorsitzender

**Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Hermann Rohling**

TU Hamburg-Harburg

Hamburg

Stellv. Vorsitzender

**Dipl.-Ing. Gunnar W. R. Pappert**

Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG

Überlingen

**Prof. Dr. Kristian Bosselmann-Cyran**

Hochschule Koblenz

Koblenz

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

Universität Siegen

Siegen

**Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling**

RWTH Aachen

Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Ilona Rolfes**

Ruhr-Universität Bochum

Bochum

**Hans Hommel**

Airbus Defence & Space

Ulm

**Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt**

Universität Erlangen-Nürnberg

Erlangen

**Dr. Gerhard Kahl**

Airbus Defence & Space

Unterschleißheim

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach**

Universität Duisburg-Essen

Duisburg

**Dr. Holger Krag**

ESA / ESOC

Darmstadt

**MinRat Norbert Michael Weber**

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg)

Bonn

**Prof. Dr.-Ing. Stefan Lindenmeier**

Universität der Bundeswehr München

München

**Winfried Wetjen**

OHB-System AG

Bremen

*Die Teilnehmer der Kuratoriumssitzung am 28.5.2015 auf dem Institutsgelände in Wachtberg:*

*Prof. Solbach, Herr Weber, Prof. Rohling, Herr Wetjen, Prof. Ender, Prof. Heberling, Dr. Kahl, Herr Neppig (WTD81), Prof. Lindenmeier, Prof. Loffeld, Prof. Schmidt, Dr. Leiner (Fraunhofer Zentrale), Prof. Klinkrad, Herr Meuer (Fraunhofer Zentrale), Dr. Stammler, Herr Hommel, Dr. Krag, Prof. Bosselmann-Cyran.*

KEYNOTE





# WELTRAUMÜBERWACHUNG MIT GESTRA

Radargestützte Weltraumüberwachung ist aufgrund der zunehmenden Nutzung des erdnahen Weltraums ein Thema hoher Aktualität und Wichtigkeit – das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hat das Fraunhofer FHR beauftragt, einen leistungsfähigen Sensor bereitzustellen.

## Aktuelle Bedrohungssituation

Unsere Gesellschaft stützt sich zunehmend auf die Nutzung des erdnahen Weltraums – so befindet sich dort inzwischen eine Vielzahl von Satelliten mit Nutzlasten unter anderem für die Telekommunikation, Navigation und wissenschaftliche Erdbeobachtung. Inhärent verbunden mit dem stetigen Ausbau dieser Infrastruktur ist zurzeit aber auch ein dramatischer Zuwachs an funktionslosen Objekten, wie z. B. ausgedienten Satelliten, ausgebrannten Raketenstufen und Trümmerteilen festzustellen. Die Gefährdungslage der Infrastruktur im erdnahen Weltraum ist in eine kritische Phase eingetreten, da die Wahrscheinlichkeit der Zerstörung operationeller Systeme aufgrund von Kollisionen mit diesen Weltraumtrümmern einen kritischen Wert erreicht hat.

Schätzungen gehen von inzwischen über 20.000 Objekten mit einer Größe von mehr als zehn Zentimetern und von über 700.000 Objekten mit einer Größe von mehr als einem Zentimeter aus. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten im Orbit von durchschnittlich 25.000 km/h sind dies allesamt äußerst gefährliche Geschosse, die aktive Satelliten bei Kollisionen erheblich beschädigen oder gar zerstören. Darüber hinaus kann sich die Population der Weltraumtrümmer durch Eigenkollisionen wie bei einem Schneeballeffekt rapide vergrößern und die Nutzung des erdnahen Weltraums damit auf sehr lange Zeit hin unmöglich machen.

Da einer aktiven Reduktion der Weltraumtrümmerpopulation aktuell noch erhebliche technologische und wirtschaftliche Herausforderungen entgegenstehen, verbleibt als außerordentlich wichtige Maßnahme zum Erhalt der Betriebsfähigkeit der Infrastruktur im erdnahen Weltraum der Aufbau eines Bahndatenkatalogs möglichst aller gefährdenden Objekte dort. Auf Basis einer hinreichend präzisen Kenntnis dieser Bahndaten können Satellitenbetreiber dann einzelfallweise mit Hilfe von Ausweichmanövern ihre Infrastruktur vor Kollisionen schützen.

*Quasi-monostatische Anordnung  
von GESTRA.*

## Internationale Anstrengungen

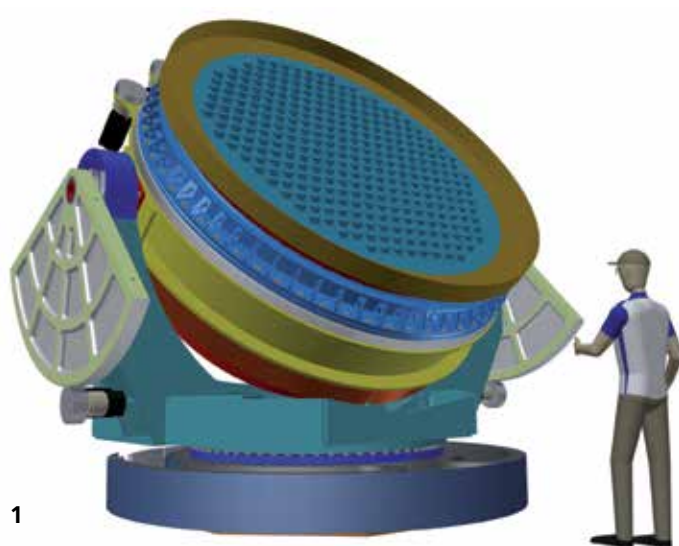
Der Aufbau und die Pflege eines solchen Katalogs erfordert eine über den Globus verteilte und zeit-kontinuierliche Überwachung einer sich stetig verändernden Trümmerpopulation. Neben einer optischen Beobachtung insbesondere von Objekten im geostationären Orbit ist eine radarbasierte Sensorik die Methode der Wahl zur Überwachung von Objekten und Trümmerteilen in niedrigeren Orbits, wie z. B. dem LEO-Bereich (*low earth orbit*).

Weltweit haben sich Staaten, Staatenverbände und Organisationen in verschiedener Intensität bereits dieser Aufgabe angenommen. Beispielhaft erwähnt seien hier das französische bistatische System GRAVES, das noch einen relativ kleinen Katalog führt, das englische Phased-Array-System Fylingdales, das im *Allied Space Surveillance Network* eingebunden ist, und vor allem das US-amerikanische *Space Surveillance Network*. Dieses aus mehreren Sensoren bestehende und sehr leistungsfähige Netzwerk umfasst unter anderem das AN/FPS-85 Phased-Array-Radar in Florida mit einer Antennenapertur von mehreren hundert Quadratmetern. Hinzukommen wird der so genannte *Space Fence* auf den Marshall-Inseln, der einmal deutlich über hunderttausend Objekte im Katalog führen soll.

Um in dieser weltumspannenden Aufgabe ebenfalls einen Beitrag zu leisten, hat im Jahr 2009 die europäische Weltraumagentur ESA im Rahmen eines Vorbereitungsprogramms den Bau eines Phased-Array-basierten Demonstrators zur Weltraumüberwachung in Auftrag gegeben. Dieser wurde durch die spanische Firma INDRA und das Fraunhofer FHR erfolgreich aufgebaut und 2012 der ESA übergeben. Der Auftragsanteil des FHR betrug 1,4 Mio Euro.

## Nationaler Beitrag

Auch in Deutschland ist die Wichtigkeit des Themas erkannt: Gemäß der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung ist der Aufbau einer nationalen Kompetenz zur Erfassung und Bewertung der Weltraumlage von großer Bedeutung. Dies findet unter anderem Ausdruck darin, dass seit einigen Jahren



intensiv am Auf- und Ausbau des Weltraumlagezentrums in Uedem gearbeitet wird.

Das Weltraumlagezentrum wird gemeinsam durch die Luftwaffe und das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-RFM) betrieben und hat in der bodengestützten Überwachung des erdnahen Weltraums mittels Radarsensorik noch keinen proprietären Sensor im Zugriff. Der Aufbau und die Weiterentwicklung eigener operationeller Fähigkeiten auf zur Verfügung gestellten Beobachtungsdaten von Dritten macht indes wenig Sinn, so dass die Entwicklung und Realisierung eines nationalen Radar-Sensor-Assets nur folgerichtig scheint.

Aufgrund der hervorragenden Expertise des Fraunhofer FHR in den Bereichen Phased-Array-Radare und bodengestützter Luft- bzw. Weltraumüberwachungssensorik hat das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Ende 2014 das Institut beauftragt, einen leistungsfähigen experimentellen Sensor zur Überwachung des erdnahen Weltraums aufzubauen.

Der Sensor GESTRA (*German Experimental Surveillance and Tracking Radar*) soll bis Mitte 2018 fertiggestellt werden und dann durch das Weltraumlagezentrum im Remote-Betrieb auf einem Bundeswehr-Standort eingesetzt werden. Das Projektvolumen für das Fraunhofer FHR umfasst einen Betrag von 24,9 Mio Euro.

#### **Realisierung von GESTRA am Fraunhofer FHR**

Der Experimentalsensor GESTRA wird quasi-monostatisch aufgebaut, also eine Sendeeinheit und eine örtlich gering davon abgesetzte Empfangseinheit aufweisen. Diese Einheiten werden in zwei je 18 x 4 x 4 Kubikmeter großen Containern teilortsfest integriert, so dass GESTRA bei sich verändernden

operationellen Randbedingungen einen relativ einfachen Standortwechsel zulässt.

Der Sensor arbeitet im sogenannten gepulsten Betrieb im L-Band und wird Weltraumobjekte in Bahnhöhen zwischen 300 km und 3000 km überwachen. Hierbei können verschiedene flexible und innovative Überwachungs- und Bahnverfolgungsmodi verwendet werden.

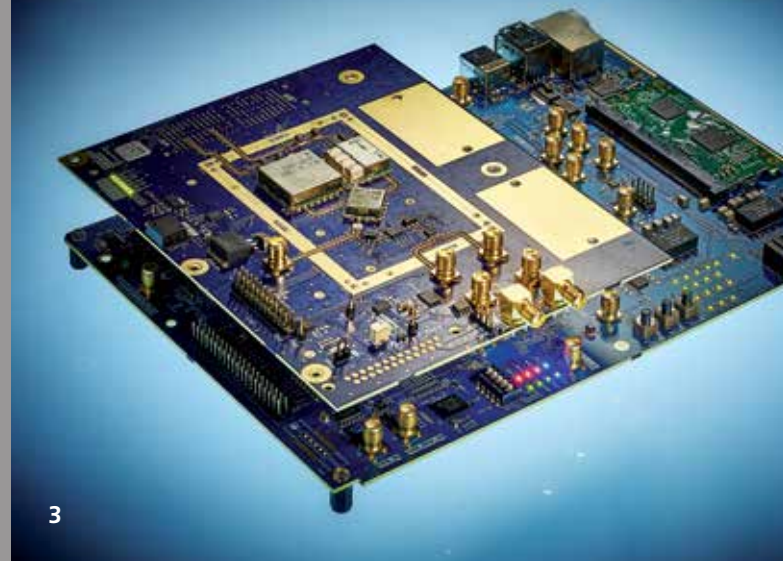
Diese Modi können sich in einzigartiger Weise auf einer sowohl mechanischen als auch elektronischen Strahlschwenkung abstützen. Daher werden in der Sende- und in der Empfangseinheit Phased-Array-Antennen eingesetzt, die auf 3D-Positionierern montiert sind. Mit Hilfe der 3D-Positionierer kann z. B. das aktuell zu untersuchende Himmelsareal ausgewählt werden. Mit Hilfe der Phased-Array-Antennen lassen sich dann die Antennenkeulen elektronisch und damit trägheitslos im Millisekundenbereich in beliebige Richtungen im vorgewählten Areal schwenken. Simultane Mischungen beider Aspekte, beispielsweise bei so genannten *Track-while-Scan-Modi*, sind ebenfalls denkbar.

Die Realisierung von GESTRA beruht in großen Teilen auf der Methodik des *software defined radar*. So lassen sich wesentliche Eigenschaften des Radars auf Software-Ebene an geänderte Betriebsbedingungen anpassen und damit die Flexibilität nachhaltig erhöhen. In diesem Zusammenhang besonders erwähnenswert ist die Tatsache, dass die 256 Antennenelemente in der Empfangsapertur je eigenständig direkt am Einzelelement abgetastet werden. Aus diesem hochrätigen digitalen Datenstrom können dann mit Hilfe ausgeklügelter Algorithmen und leistungsstarker Prozessoreinheiten in Echtzeit mehrere Antennenkeulen gleichzeitig synthetisiert werden, so dass das Radar sogar simultan in verschiedene Himmelsrichtungen blicken kann – man nennt diese Methode auch Digitale Mehrfachkeulenbildung.





2



3

Dass GESTRA als Experimentalsensor bezeichnet wird, deutet auf seinen späteren Einsatz in einem Umfeld mit noch anzuwachsender Expertise in operationeller Sicht hin.

Der Sensor selbst wird die hohen Anforderungen hinsichtlich Qualitätsmanagement, Qualitäts- und Produktsicherung und Systemverifikation erfüllen, die das DLR-RFM als Auftraggeber zahlreicher professioneller Raumfahrt-bezogener Programme und Missionen auch für dieses Projekt stellt. Dazu berücksichtigt das Fraunhofer FHR bei der Projektbearbeitung eine Vielzahl normativer Randbedingungen, die sich aus DLR-internen Regularien und den ECSS-Standards der europäischen Raumfahrtagenturen ableiten.

### Ausblick

Nach der erfolgreichen Abnahme des *Preliminary Design Review* (PDR) Mitte 2015 fokussieren sich die Arbeiten nun auf das *Critical Design Review* (CDR). Das Projekt ist aktuell zeitlich und budgetär im Plan, so dass mit der vorgesehenen Übergabe des Sensors in 2018 nicht nur das Weltraumlagezentrum einen leistungsstarken Radarsensor zur Weltraumüberwachung im Zugriff hat, sondern auch weitere Forschungseinrichtungen in Deutschland Daten zur wissenschaftlichen Bearbeitung zur Verfügung gestellt bekommen werden. Für die wissenschaftliche Community ergibt sich hierdurch ein großes Potential intensiver Kooperation und Vernetzung.

Im Blick auf die weitere Entwicklung der nationalen und internationalen Weltraumüberwachung lässt sich abschließend feststellen, dass das Konzept von GESTRA, die Überwachungsleistung betreffend, inhärent skalierbar ist und sich in weitere Ausbaustufen eines Radarsensor-Netzwerks hervorragend integrieren lässt.

- 1 *Mechanisches Modell der in den 3D-Positionierer integrierten Phased-Array-Antenne*
- 2 *Flüssigkeitsgekühltes Hochleistungs-Sendemodul zur Integration in ein N2-Raster*
- 3 *Kohärente Signalgenerierungseinheit zur globalen Systemsignal-Verteilung.*



Abteilungsleiter:  
 Array-gestützte Radarbildgebung  
**Dr.-Ing. ANDREAS BRENNER**  
 Tel. +49 228 9435-531  
 andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de

## INTERVIEW

# »KEINE FESTEN BAHNEN FÜR EINEN AUSGEZEICHNETEN WERDEGANG«

Seit Anfang 2014 leitet Dr. Stefan Brüggewirth die Abteilung »Kognitives Radar« am FHR. Für seine kurz zuvor mit *summa cum laude* abgeschlossene Promotion erhielt er nun den Claudius Dornier jr. Dissertationspreis.



**Herr Dr. Brüggewirth, der Claudius Dornier Jr. Dissertationspreis ehrt ausgezeichnete Beiträge für die Luftfahrt. Worin liegt dieser in Ihrer Doktorarbeit?**

Ich habe eine kognitive Systemarchitektur zur automatisierten Steuerung unbemannter Flugzeuge – UAVs – entwickelt.

Dafür habe ich Methoden aus der künstlichen Intelligenz angewendet, verschiedene Sensoren eingebunden und gleichzeitig Flugmechanik und *Human Factors* berücksichtigt und das Ganze im Flugversuch getestet.

**Sie sind Ingenieur der Luft- und Raumfahrttechnik, haben aber einen sehr hohen Informatikanteil in Ihrer Doktorarbeit. War das eine große Herausforderung für Sie?**

Auf meinem ersten Computer, einem 286er, war die Programmiersprache GW-Basic vorinstalliert. Seitdem hatte mich die Leidenschaft für Softwareentwicklung und Informatik gepackt. Die Verbindung mit dem Studium der Luft- und Raumfahrttechnik hat sich als Glücksfall erwiesen.

**Künstliche Intelligenz klingt sehr visionär. Wann hat sie die Begeisterung dafür ergriffen?**

Die Algorithmen, die beispielsweise in Schachcomputern eingesetzt werden, haben mich schon als Jugendlicher interessiert. Es ist faszinierend, dem Computer das »Nach vorne schauen« beizubringen und die zig Möglichkeiten, die sich nach wenigen Spielzügen auftun, einzubeziehen. Im Studium hatte ich bei einem 2.5-jährigen Aufenthalt am NASA Ames Research Center die Gelegenheit die Entwicklung tatsächlicher Anwendungen, etwa den Mars-Rovern, mitzerleben.

**Inwiefern können Sie Ihre Expertise bei der Entwicklung kognitiver Architekturen nun auf Radarsysteme übertragen?**

Wir wollen Verfahren aus der Robotik, die heute schon realzeitlich mit verrauschten Sensordaten umgehen können müssen, auf Radarsysteme übertragen. Auch hier gibt es die vielen verschiedenen Situationen, die das System erkennen und auf die es reagieren muss. Dafür muss auch das Radar »Nach vorne schauen« können, um Handlung zu planen und die Ziele des menschlichen Operateurs zu kennen.

**Was bringt der kognitive Ansatz für Radaranwendungen?**

Radarsysteme werden in Zukunft in hochautomatisierten Anwendungen wie dem unbemannten Fliegen eine entscheidende Rolle spielen. Das kognitive Radar optimiert sich dabei je nach Aufgabe selbst und entlastet den Operateur, damit der sich besser auf die Einschätzung der Lage und die Entscheidungsfindung konzentrieren kann.

**Welche Aspekte des kognitiven Radars bearbeiten Sie derzeit?**

Wir arbeiten vor allem an der automatischen Erkennung bewegter Objekte durch luftgestützte Radarsysteme, die

ihre Parameter selbst an die Bedingungen anpassen, um das Ziel besser zu erkennen. Dafür entsteht demnächst auch ein Demonstrator, mit dem wir unsere Entwicklung im realen System testen und verfeinern können

**Was ist dabei das größte zu lösende Problem?**

Die kognitiven Fähigkeiten des menschlichen Operateurs auf das Radar abzubilden. Das Ziel ist ein Radar-System, das wissensbasiert arbeitet, lernt, vorausschauend und Problemlösungen findet – und das in Echtzeit. Dafür ist noch viel Forschung nötig. Wir wenden das 3-Ebenen-Modell menschlicher Kognition an. Die unterste, fertigkeitbasierte Ebene – das, was bei uns unbewusst abläuft – ist beim Radar im Bereich der Signalgenerierung und Verarbeitung schon heute im Einsatz. Was wir derzeit umsetzen, ist die regelbasierte Ebene. Hier erkennt das Radar z. B. durch den Abgleich mit Trainingsdaten eine gewisse Szene und führt entsprechende vordefinierte Kommandos aus, etwa um die Detektionsleistung zu erhöhen oder Ziele zu klassifizieren. Die dritte Ebene ist die wissensbasierte Ebene, bei der das Radarsystem die Szene versteht, ad hoc lernt und zum Beispiel auch erkennt »mein Operateur ist nicht zufrieden, also muss ich die Einstellungen und Abläufe ändern«. Das ist allerdings noch Zukunftsmusik.

**Als im wahrsten Sinne des Wortes »ausgezeichneter« Wissenschaftler: Welchen Tipp können Sie Nachwuchswissenschaftlern auf ihren Weg geben?**

Nicht in festen Bahnen denken! Ich denke, dass Schnittstellenthemen viel Zukunft haben werden, weil sich die Disziplinen gegenseitig befruchten.



Abteilungsleiter Kognitives Radar:

**Dr.-Ing.**

**STEFAN BRÜGGEWIRTH**

Tel. +49 228 9435-105

stefan.brueggewirth@fhr.fraunhofer.de





**VERTEIDIGUNG**



**WELTRAUM**



**VERKEHR**



**UMWELT**



**SICHERHEIT**



**PRODUKTION**

# GESCHÄFTSFELDER IM ÜBERBLICK

Seine Fähigkeiten stellt das Fraunhofer FHR seinen Kunden und Partnern zur Entwicklung neuartiger Produkte in sechs Geschäftsfeldern zur Verfügung. Die Geschäftsfelder werden kontinuierlich an die jeweiligen Marktgegebenheiten angepasst.

## **Geschäftsfeld Verteidigung**

Im Bereich Verteidigung entwickelt das Fraunhofer FHR Anwendungen für Aufklärung, Überwachung und Schutz von Land, Wasser und Luft mit Radar. Zum Einsatz kommen Systeme aller Größenordnungen auf verschiedenen Plattformen. Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften können mit Radar zeitnah und bei nahezu jedem Wetter Lageinformationen und hochaufgelöste Bilder einer Bodenszene gewonnen werden. Die Technologie ermöglicht zudem die Entdeckung und Ortung bewegter Fahrzeuge (GMTI) sowie die Extraktion relevanter Parameter wie Richtung und Geschwindigkeit. Durch sein umfangreiches, transdisziplinäres Know-how in Hard- und Software kann das Fraunhofer FHR flexibel auf Fähigkeitslücken der Bundeswehr reagieren und mit Beratungs- und Urteilsfähigkeit zur Verfügung stehen. Für die wehrtechnische Industrie bietet das Institut zudem Hilfestellungen für die Entwicklung marktfähiger Produkte.

## **Geschäftsfeld Weltraum**

Radar ist der wichtigste Sensor zur Überwachung und Aufklärung des erdnahen Weltraums. Das Fraunhofer FHR entwickelt für seine Kunden maßgeschneiderte Systeme und Verfahren zur Entdeckung, Verfolgung, Abbildung und Analyse von Objekten im Orbit. Hauptziel ist, die Kenntnis über einzelne Satelliten und die Situation im Weltraum zu vertiefen, Risiken zu analysieren, Missionen zu begleiten oder Radarsignaturen zu gewinnen. Raumfahrtagenturen weltweit verlassen sich bei der Missionsdurchführung auf die Unterstützung des Instituts, sein Wissen und sein einzigartiges Weltraumbeobachtungsradar TIRA.

## **Geschäftsfeld Verkehr**

Im Verkehrsgeschehen zählt Radar zu den wichtigsten Sensoren für die frühzeitige Erkennung und Vermeidung von gefährlichen Situationen. Im Geschäftsfeld Verkehr verfügt das Fraunhofer FHR über ein breites Spektrum an Lösungen, die nahezu für alle Teilbereiche der Verkehrsinfrastruktur von Interesse sind (Luft-, Wasser- und Landverkehr).

## **Geschäftsfeld Umwelt**

In den Bereichen Erneuerbare Energien, Waldschadensanalyse, Umweltverschmutzungs-Monitoring, Recycling und ökologische Begleitforschung können Hochfrequenzsensoren wichtige Beiträge liefern. Hochfrequenzsysteme ermöglichen die Erschließung zusätzlicher Anwendungsmöglichkeiten. Sie können vorhandene Sensoren ergänzen oder ersetzen und helfen, zusätzliche Informationen zu gewinnen. Dazu gehören neuartige Radarverfahren zur bedarfsgerechten Steuerung und Kennzeichnung von Windenergieanlagen, die Detektion von Lebenszeichen zum Tierschutz, aber auch der Einsatz umweltfreundlicher, emissionsfreier Passiv-Radar-Technologie.

## **Geschäftsfeld Sicherheit**

Technologisch verschwimmt die Grenze zwischen innerer und äußerer Sicherheit mehr und mehr. Das Fraunhofer FHR bietet in diesem Geschäftsfeld Personenscanner, Brief-, Taschen- und Kofferscanner, Sensoren zur Erkennung von Brandherden, Minen- und Hohlraumdetektoren sowie MIMO-Systeme zur Überwachung kritischer Infrastruktur und zum Schutz von Rettungskräften im Katastrophenfall an. Gemeinsames Ziel ist in allen Anwendungsfeldern die Entwicklung kompakter, aktiver und passiver Sicherheitssensoren mit höherer Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig reduzierten Kosten.

## **Geschäftsfeld Produktion**

Radarsysteme eignen sich insbesondere, wenn die Umweltbedingungen den Einsatz optischer Sensoren nicht zulassen. Mittels Hochfrequenztechnik kann eine Vielzahl von Stoffen durchleuchtet werden, die im optischen Bereich nicht transparent sind. Selbst kleinste Materialunterschiede werden sichtbar, die im Röntgenbereich verborgen bleiben. Die Fähigkeit, Abstände bis in den Mikrometerbereich präzise zu vermessen, ist der Schlüssel für eine gleichbleibend hohe Qualität bei gleichzeitiger Null-Fehler-Produktion. Zur Erreichung dieses Ziels bietet Ihnen das Fraunhofer FHR ganzheitliche und individuelle Lösungen sowie einen umfangreichen Gerätepark mit Testanlagen und Experimentalsystemen.



# VERTEIDIGUNG



*Präzise Informationsgewinnung  
auch bei Nacht und Nebel: Sys-  
teme und Verfahren des Fraun-  
hofer FHR für Überwachung und  
Aufklärung generieren Radar-  
abbildungen in fotoähnlicher  
Qualität.*



The background of the entire page is a grayscale aerial radar image of a city. The image shows a dense urban layout with streets, buildings, and green spaces. A semi-transparent rectangular box is overlaid on the upper portion of the image, containing the title and a short paragraph of text. The top of the page is a solid dark blue color.

# AUFKLÄRUNG UND SCHUTZ IM EINSATZ

Seit seiner Gründung vor fast 60 Jahren befasst sich das Institut mit allen Aspekten der Hochfrequenzphysik und Radartechnik. Öffentlichen Auftraggebern und industriellen Kunden steht es als verlässlicher Partner zur Seite.

Im Bereich Verteidigung ist Radar seit jeher ein unverzichtbarer Sensor. Bei nahezu jedem Wetter liefert er eine Vielzahl an Informationen und ermöglicht die Aufklärung unbekannter Gebiete oder erkennt und ortet unbekannte Ziele – zu Wasser, Land und in der Luft. Mit seinem umfassenden Know-how deckt das Fraunhofer FHR die gesamte Bandbreite des Themenbereichs Hochfrequenz- und Radartechnik ab. Es verfügt über jahrzehntelange Erfahrung im Bereich der Hardware-Entwicklung, beginnend beim Antennendesign bis zum Prototypenbau, sowie über fundiertes theoretisches Wissen über Algorithmen, Signalverarbeitung und Radarbetriebssteuerung.

Neben Techniken zur Überwachung und Aufklärung untersuchen die Wissenschaftler auch neuartige Konzepte zum Tarnen des eigenen Radars sowie zur Täuschung und Störung gegnerischer Systeme. In regelmäßigen Messkampagnen für Partner des Instituts evaluiert das Fraunhofer FHR neue Tarnmaterialien und -methoden. Dabei legen die Wissenschaftler Wert auf größtmögliche Realitätsnähe der ausgewählten Testszenarien, denn eine optimale Tarnung ist stets an die geografischen und klimatischen Bedingungen des Einsatzortes angepasst. Bundeswehr und Industrie profitieren so von einer objektiven und unabhängigen Prüfung ihres Materials. Zudem bietet das Institut Hilfestellung bei der Entwicklung moderner Verfahren für das Stören von Fremdradaren auf allen Plattformen.

Im Bereich der Bildgebung liefert das Fraunhofer FHR immer wieder weltweit beachtete Ergebnisse. Auf dem Gebiet der Bewegtzientdeckung (Moving Target Indication, MTI) hat es Pionierarbeit geleistet und nimmt auch hier international eine Spitzenposition ein. Dabei beschäftigen sich die Wissenschaftler intensiv sowohl mit Detektion, Tracking und Klassifizierung von Boden- (GMTI), See- (MMTI) wie auch Luftzielen. Insbesondere die Detektion von kompakten Luftfahrzeugen ist ein aufstrebendes Thema. Hierzu untersuchen die Wissenschaftler

gleich mehrere Ansätze, um diese Fähigkeitslücke bei den Bedarfsträgern schnellstmöglich schließen zu können.

### Die Zukunft: Smart, modular, multi-modal

Kleiner, leichter, flexibler – große Spezialsysteme werden zukünftig weniger gefragt sein. Immer wichtiger wird die Anpassungsfähigkeit des Systems an unterschiedliche Einsatzszenarien. Auch unter Investitionsgesichtspunkten fragen die Kunden zunehmend modulare Systeme nach. »Software-defined radar« ist hier ein vielversprechender Lösungsansatz. Intelligente Software ermöglicht dem Radar mehr Freiheitsgrade sowie ein vielfältiges Einsatzspektrum. Die Anwendung maschineller Lernverfahren und anderer Methoden aus dem Bereich der Informatik macht den Weg frei zum Kognitiven Radar. Ziel der Forschungsarbeiten ist es z. B., ein Radar zu entwickeln, das automatisch eine bestmögliche Anpassung der Wellenform und anderer Parameter an die Umgebung vornimmt. Das reduziert den Personalbedarf und entlastet Bediener bei der Lagebeurteilung.

Diese Fähigkeiten kombiniert das Fraunhofer FHR mit miniaturisierten Systemen, einem weiteren Forschungsfeld. Durch die Entwicklung eigener Chips auf Basis von Silizium-Germanium (SiGe) können vollständige Systeme auf wenigen Quadratzentimetern gebaut werden, sogenanntes Radar-on-Chip. Die Miniaturisierung reduziert das zum Einbau benötigte Volumen, senkt die Kosten und Leistungsaufnahme des Systems. Zudem bedienen sie einen neuen Bedarf: Besonders in urbanen Kontexten werden zunehmend indoor-Anwendungen von Überwachung und Aufklärung nachgefragt. Hier sind Agilität und Größe der eingesetzten Trägerplattform von besonderer Bedeutung. Dank der SiGe-Technologie stehen so auch leistungsfähige Millimeterwellen-Radare für den Einsatz auf kleinen und mittleren UAVs zur Verfügung.

Setzt man kognitive Systeme auf autonomen Plattformen ein, können Anwender künftig schnell einsatzbereite und einfach zu bedienende Schwärme von Sensoren betreiben. Denn operieren Radare als verteilte Systeme im Verbund, so schafft diese multistatische Konstellation durch die Ergänzung der Systeme eine signifikante Leistungssteigerung: Die Detektionsempfindlichkeit steigt, es wird eine höhere Auflösung und Messgenauigkeit erzielt und die Abschattung durch die Umwelt reduziert. Das Fraunhofer FHR hat dies bereits in einem bistatischen Experiment nachgewiesen. Der ebenfalls zunehmenden Nachfrage nach Multi-Sensor-Konzepten begegnet das Institut durch eigene Forschungsprojekte wie durch Kooperationen mit spezialisierten Partnern.

## Die Experten für Radar

Um gemäß seinem Auftrag dem Bundesverteidigungsministerium mit umfassender Beratungs- und Urteilsfähigkeit zur Verfügung zu stehen, benötigt das Fraunhofer FHR Fachkompetenz in Breite und Tiefe. Für die Wissenschaftler bedeutet dies, dass sie nicht nur exakte Kenntnis davon haben müssen, welche Technologien und Verfahren es gibt – sondern auch, wie diese bis ins kleinste Detail funktionieren. Intensiv genutzt und geschätzt wird die Expertise vom Wachtberg beispielsweise bei der fachlichen Begleitung der Entwicklung des Aufklärungssensors SARah, dem Nachfolgesystem für SAR-Lupe.

Seine wissenschaftliche Kompetenz bringt das Fraunhofer FHR auch in unterschiedliche NATO Task Groups und weitere Gremien ein. In nationalen wie internationalen Kooperationen werden so Synergieeffekte bei der Wissensgenerierung geschaffen. Durch gemeinsame Projekte mit der Industrie transferiert das Institut seine Forschungsergebnisse kontinuierlich in konkrete Anwendungen und Produkte.



Geschäftsfeldsprecher Verteidigung:

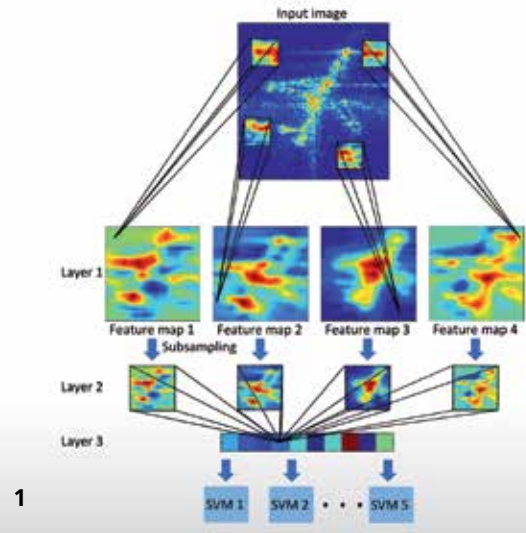
**Dr.-Ing.**

**ANDREAS BRENNER**

Tel. +49 228 9435-531

andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de





## DEEP-LEARNING ZUR IDENTIFIZIERUNG VON LUFT- UND BODENZIELEN

In den letzten Jahren haben sich *Deep-Learning*-Verfahren in sehr vielen Bereichen der Mustererkennung etabliert. Am Fraunhofer FHR wird die Anwendung solcher Verfahren zur Erkennung von Radarzielen untersucht.

Als Teil der internationalen Flugsicherung werden *Identification Friend or Foe*, kurz IFF-Systeme, eingesetzt. Zur Nutzung dieses Systems tragen Flugzeuge einen Transponder mit einer eindeutigen Kennung. Wird dieser Transponder allerdings manipuliert oder abgeschaltet, ist eine korrekte Identifizierung des Ziels nicht mehr möglich, weshalb Methoden der nichtkooperativen Zielidentifizierung (NCI) notwendig sind. Die Entwicklung solcher Identifizierungsverfahren, sowohl für Luft- als auch für Bodenziele, wird seit vielen Jahren am Fraunhofer FHR betrieben. Zuletzt haben sich dabei sogenannte *Deep-Learning*-Verfahren, insbesondere *Convolutional Neural Networks*, als sehr effektiv herausgestellt. Dabei handelt es sich um künstliche neuronale Netze, durch deren Aufbau besonders gut Merkmale gefunden und Muster erkannt werden können. Künstliche neuronale Netze, wie sie in der Signalverarbeitung eingesetzt werden, imitieren die Vernetzung der Nervenzellen im Gehirn. Dabei ist dieses spezielle Netzwerk dem Aufbau des visuellen Teils des Gehirns nachempfunden und lässt sich in zwei Teile aufspalten: Der erste Teil des Netzwerks ist zur Merkmalsuche bestimmt, während der zweite Teil zur Klassifizierung genutzt wird. Als Eingangsdaten für diese Netzwerke eignen sich 2-D-Zielabbildungen wie SAR- oder ISAR-Bilder. Die Verwendung von neuronalen Netzen ist immer in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase – der Trainingsphase – werden die freien Parameter des Netzwerks bestimmt. Die eigentliche Anwendung des Netzwerks erfolgt in der zweiten Phase, in der das Netzwerk zur Klassifizierung eingesetzt wird.

Die Suche nach Merkmalen zur Klassifizierung erfolgt bei diesem speziellen Netzwerk durch die alternierende Anordnung von *Convolutional und Subsampling Layern*. Die erste Lage des Netzwerks ist ein *Convolutional Layer*, in dem das Eingangsbild mit Filtermasken, die während der Trainingsphase gelernt werden, korreliert wird. Das Ergebnis dieser Korrelation wird in sogenannten *Feature Maps* gespeichert. Je höher der Wert der *Feature Map* an einem bestimmten Punkt, desto höher ist die Ähnlichkeit des Bildes mit dem zugehörigen Merkmal. In Abbildung 1 sind vier *Feature Maps* zu sehen, d. h. in der ersten Lage des Netzwerks wird



		TARGET CLASS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
OUTPUT CLASS	1	587	0	1	2	1	0	1	0	0	0	99.25% 0.67%
	2	0	190	0	0	0	0	0	0	0	0	100% 0%
	3	0	0	581	0	0	0	0	1	0	0	99.85% 0.2%
	4	0	0	0	192	0	0	0	1	0	0	99.35% 0.53%
	5	0	0	0	0	209	0	0	0	0	0	100% 0%
	6	0	0	0	1	2	274	0	0	0	0	99.95% 1.1%
	7	0	0	0	0	0	0	272	0	0	0	100% 0%
	8	0	0	0	0	2	0	0	268	0	0	99.35% 0.2%
	9	0	0	0	0	0	0	1	3	274	0	99.85% 1.4%
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274	100% 0%
		100% 0%	100% 0%	99.85% 0.2%	99.35% 0.53%	99.25% 0.67%	100% 0%	99.15% 0.7%	98.25% 1.4%	100% 0%	100% 0%	99.55% 0.53%

2

nach vier verschiedenen Merkmalen im Bild gesucht. Aus den Ergebnissen in den jeweiligen Feature Maps lässt sich ableiten, dass dies links- und rechtseitige Kanten in Verbindung mit horizontalen Strukturen (Feature Map 1 und 4), horizontale Strukturen alleine (Feature Map 2) und die Fläche des Ziels (Feature Map 3) sind.

In der zweiten Lage des Netzwerks wird die Auflösung der Feature Map reduziert. Durch diesen Schritt wird die exakte Position einzelner Merkmale weniger bedeutend, wodurch die Robustheit des Systems gegenüber einer fehlerhaften Zentrierung der Daten erhöht wird. In der dritten Schicht des Netzwerks ist die relative Position der im Bild gefundenen Merkmale ausschlaggebend, denn dort wird nach Mustern in diesen Merkmalen gesucht. Das Wissen, welche Muster sich zur Klassifizierung eignen, ist ebenfalls ein Resultat der Trainingsphase des Netzwerks. Als Ergebnis dieser Merkmalsuche steht nun am Ausgang der dritten Lage ein Vektor zur Verfügung, der als Grundlage zur eigentlichen Klassifizierung dient. Die Elemente dieses Vektors – in diesem Fall zehn – geben Auskunft darüber, welche Merkmale in welchen Mustern im Eingangsbild auftreten.

Durch die bereits erwähnte Aufteilung des Netzwerks in Merkmalsuche und Klassifizierung kann das Netzwerk an dieser Stelle aufgetrennt und jede beliebige Klassifizierungsmethode verwendet werden. Im Normalfall wird die Klassifizierung durch ein zweilagiges neuronales Netz, das zusammen mit den ersten Lagen trainiert wird, realisiert. Da aber Support Vector Machines (SVMs) gegenüber diesen zweilagigen neuronalen Netzen gewisse Vorteile bieten, werden diese zur Klassifizierung genutzt. Mit diesem Klassifizierungssystem wird für den SAR-Referenzdatensatz MSTAR eine korrekte Klassifizierung von 99,5% erreicht, was auch für diesen qualitativ hochwertigen Datensatz ein ausgesprochen gutes Ergebnis ist. Für die Klassifizierung der MSTAR-Daten ist aufgrund des komplexen Szenarios mit zehn verschiedenen Klassen ein größeres Netzwerk, als in Abbildung 1 gezeigt, notwendig. In der ersten Lage des Netzwerks werden 20 Merkmale verwendet und es wird nach insgesamt 120 verschiedenen Mustern gesucht. Die Anzahl der benötigten SVMs ist so hoch wie die Anzahl der verschiedenen Klassen, die erkannt werden sollen.

Um in Zukunft die Trainingszeit des Netzwerks zu verkürzen, soll das Training der ersten Schicht durch eine bewusst gewählte Initialisierung ersetzt werden. Dazu werden die Trainingsbilder analysiert und häufig auftretende Elemente als Merkmale genutzt. Während des anschließenden Trainings der weiteren Lagen bleiben diese Merkmale unverändert, wodurch sich der Lernprozess beschleunigen sollte.

1 Kombination aus Convolutional Neural Network und Support Vector Machines zur Erkennung von Flugzeugen in ISAR Bildern.

2 Konfusionsmatrix der Klassifizierung der MSTAR Daten mit der Kombination aus Convolutional Neural Network und Support Vector Machines.

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



## PASSIVRADAR AUF MOBILEN PLATTFORMEN

Passivradar spielt gerade im Bereich der verdeckten Aufklärung eine zunehmend stärkere Rolle. Am Fraunhofer FHR untersucht eine Forschergruppe, wie diese Technologie auf mobilen Plattformen angewendet werden kann.

Stationäre passive Radarsensoren und Radarnetze haben in verschiedenen Feldversuchen ihre Leistungsfähigkeit gegenüber Luft- und Bodenzielen nachgewiesen. Schlauchboote sowie Kleinflugzeuge konnten zuverlässig detektiert werden. Beim Passivradar emittiert das System keine eigenen Signale, sondern nutzt bereits vorhandene Signale wie die von DVB-T oder Mobilfunk. Damit kann eine Ortung des Radars nahezu ausgeschlossen werden. Ein wesentliches Interesse an passiver Ortung liegt also in der verdeckten Aufklärung begründet. Diese Anwendung soll künftig auch für mobile Plattformen zur Verfügung stehen.

Passivradar kann durch zunehmende Miniaturisierung verkleinert werden und wird somit auch für mobile Plattformen interessant. Der von den Sendernetzen genutzte Frequenzbereich (VHF/UHF) erweist sich als besonders günstig im Hinblick auf die Wellenausbreitungscharakteristik und das Rückstreuverhalten der zu erfassenden Objekte. So können unter bestimmten Voraussetzungen sogar Objekte entdeckt werden, zu denen vom Empfänger aus keine direkte Sichtverbindung (*line-of-sight*) besteht. Es wurden daher verstärkt Anstrengungen unternommen, die Operationsbedingungen für den erfolgreichen Betrieb von Passivradar-Sensoren, z. B. auf Schiffen in Küstennähe, zu erforschen.

Im Unterschied zum stationären Betrieb muss beim mobilen Einsatz die Eigenbewegung der Trägerplattform kompensiert werden. Denn durch die Eigenbewegung erzeugt die Plattform einen Doppler, der zur Signalverzerrung führt und damit die Performance des Systems beeinträchtigt. Um nun aus den »belauschten« Echos auf ein Ziel im Überwachungsgebiet des Radars schließen zu können, muss das vom Sender direkt empfangene Referenzsignal bewegungsunabhängig rekonstruiert werden. Das Fraunhofer FHR hat dieses Problem gelöst, indem der Bewegungsdoppler der Plattform durch die Analyse der Pilotträger des DVB-T-Direktsignals bestimmt wird, was die erforderliche Kompensation der Signalverzerrung ermöglicht.

Die DVB-T-Netze im Bereich der Bundesrepublik Deutschland werden als sogenannte Gleichwellennetze betrieben, das heißt alle Sender des Netzes strahlen zur selben Zeit kohärent dasselbe



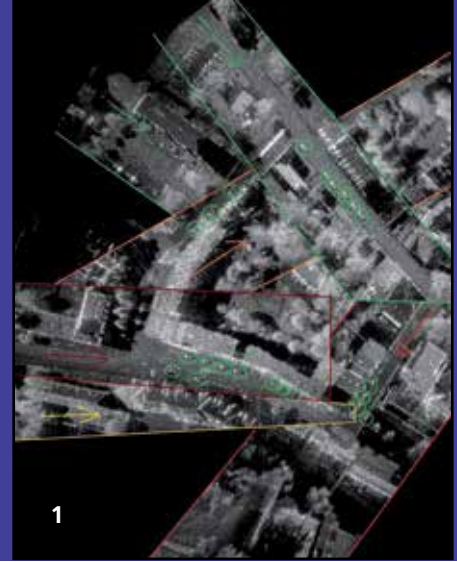
Signal ab. Darum sind besondere Anstrengungen erforderlich, denn ein einzelnes Ziel kann aufgrund der Beleuchtung durch die unterschiedlichen Sender mehrere Echos zum Passivradar reflektieren. Um das Zielecho eindeutig einem Sender zuordnen zu können, ist eine genaue Zielrichtungsortung und Zielverfolgung erforderlich. Die Lösung dieses Mehrdeutigkeitsproblems ist Voraussetzung, um es dem Passivradar zu ermöglichen anschließend Entfernung und Geschwindigkeit des Ziels zu bestimmen.

Geeignete phasengesteuerte Gruppenantennen sind in der Lage die Blickrichtung des Passivradars durch Keulenschwenkung zu steuern, wodurch die Messung der Zielrichtung ermöglicht wird. Durch digitales *Beamforming* kann die Strahlungscharakteristik und damit die Ausformung der Keulen einer solchen Gruppenantenne digital verändert werden. Jedes Antennenelement verfügt hierfür über einen eigenen digitalen Empfänger, wodurch die erforderlichen Phasenverschiebungen und die Amplitudenskalierung softwarebasiert erfolgen können. Ein weiterer Vorteil von Gruppenantennen mit digitalem *Beamforming* ist ihre große Flexibilität, da schnelle Änderungen des Empfangsdiagramms mittels Software möglich sind. Bei der digitalen Signalverarbeitung der Daten kann die Strahlungscharakteristik daher auch gleichzeitig für mehrere unabhängige Hauptkeulen berechnet werden, um die Abdeckung in verschiedene Richtungen gleichzeitig zu realisieren.

In Experimenten an der deutschen Ostseeküste wurden erste Referenzmessungen durchgeführt. Im Rahmen der deutsch-australischen Kooperation führten die Wissenschaftler weiterhin Versuche mit mehreren Passivradar-Sensoren auf einem Boot durch. Dazu unternahmen sie Testfahrten mit einem gecharterten Boot vor australischer Küste bei Adelaide. Die Besonderheit hierbei war, dass Australien ein *Multi Frequency Network* ohne GPS-stabilisierte Oszillatoren zur DVB-T-Übertragung verwendet. Das bedeutet, dass jeder Sender in einem Sendegebiet auf seiner eigenen Frequenz ausstrahlt. Durch diese Versuchsreihe wurden nun die benötigten Daten gewonnen, um zu untersuchen, wie sich das breite Frequenzspektrum auf die Technologie auswirkt. Es wurden mehrere Sender aufgezeichnet. Die Daten werden derzeit noch analysiert. Mit dem australischen Partner DSTO (*Defence Science and Technology Group*) findet ein regelmäßiger Austausch statt.

- 1 *Passivradar-Sensoren installiert auf einem Boot.*
- 2 *Zieldarstellung durch Schnellboote an der deutschen Ostseeküste.*
- 3 *Experimental-Passivradar des FHR mit linearer Gruppenantenne zur Küstenüberwachung.*

*Dipl.-Ing. Heiner Kuschel*  
*Tel. +49 228 9435-389*  
*heiner.kuschel@*  
*fhr.fraunhofer.de*



## ZIRKULARES SAR

Klassische SAR-Verfahren basieren auf einer exakten linearen Bewegung des Sensors. Um Schattenbildungen zu vermeiden oder Gebiete aus vielen Blickwinkeln zu betrachten, ist es wünschenswert, sich auf einer kreisförmigen Flugbahn um ein Objekt oder Beobachtungsgebiet herum zu bewegen. Dieses zirkulare SAR erfordert neue Methoden für die Prozessierung der Daten.

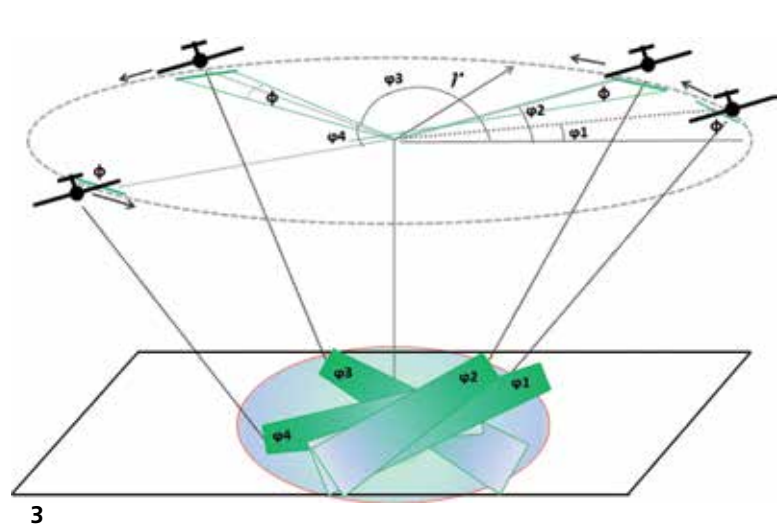
Die klassischen SAR-Verfahren basieren darauf, dass ein Radarsensor in einer möglichst linearen Bewegung an einer abzubildenden Szene vorbeigeführt wird. Durch diese Art der Bewegung ist die Prozessierung der gemessenen Daten vereinfacht oder in vielen Fällen überhaupt erst möglich. Die dadurch entstehenden Nachteile wurden bisher in Kauf genommen und umfassen unter anderem eine Schattenbildung hinter großen Gebäuden, insbesondere in Straßenschluchten, sowie die Erfassung von Signaturen einzelner Objekte von nur einem ausgezeichneten Aspektwinkel aus.

Eine Lösung dieses Problems besteht darin, dasselbe Gebiet von verschiedenen Ansichten zu befliegen und zu prozessieren. Da im Allgemeinen nicht im Vorhinein bekannt ist, welche Aspektwinkelbereiche besonders interessant sind oder an welchen Positionen sich potentiell interessante Objekte befinden, ist es nahezu unmöglich, geeignete Aspektwinkel der Befliegung im Vorfeld festzulegen. Dagegen bildet eine Befliegung mit einer zirkularen Trajektorie den vollen Aspektwinkelbereich ab. So kann im Nachhinein bestimmt werden, welche Ansicht des Zielgebiets benötigt wird und dementsprechend welcher Winkelbereich prozessiert wird. Dieser Bereich ist dabei beliebig wählbar, da Daten von einem 360° Kreisflug vorliegen. Somit sind idealerweise selbst Einsichten in ansonsten verdeckte Gebiete möglich, und die Schattengebiete werden auf ein Minimum reduziert.

Ein praktisches Beispiel ist die Rekonstruktion kompletter Straßenzüge im Innenstadtbereich. Diese verlaufen in der Regel nicht parallel zur Radarsichtlinie, so dass oftmals durch hohe Gebäude am Straßenrand Objekte abgeschattet werden. Hier lässt sich durch die Wahl des passenden Aspektwinkels eine möglichst parallele Einsicht der Straße gewährleisten.

Beim Fraunhofer FHR fanden dazu Experimente im Millimeterwellenbereich mit Hilfe des Ultraleichtflugzeugs Delphin statt. Diese zeigten, dass das Fliegen von relativ engen Kreisen in moderaten Höhen von 300 m bis 600 m über dem Zielgebiet prinzipiell möglich ist, aber hohe Anforderungen an die verwendete *Inertial Measurement Unit* (IMU) stellt, die für die





Vermessung der genauen Bewegung des Flugzeugs zuständig ist. Kleinflugzeuge sind bereits im linearen Flugmodus sehr empfindlich gegenüber Turbulenzen und zeigen daher häufig eine hohe Abweichung der Blickrichtung von der Flugrichtung. Diese wird als Squint- oder Schielwinkel ausgedrückt. Zusätzlich wird idealerweise eine stabilisierte Plattform benötigt, um das Radar im Kreisflug auf ein bestimmtes Zielgebiet auszurichten, so dass Abweichungen auf Grund von Turbulenzen oder ungünstigen Windverhältnissen ausgeglichen werden können. Es wurden bereits Messungen durchgeführt, um geeignete Fokussierungsroutinen unter diesen hoch nichtlinearen Flugbedingungen zu finden.

Luftgetragene SAR-Daten zirkularer Aperturen sind aus mehreren Gründen von besonderem Interesse: Zunächst kann die Beleuchtung unterschiedlicher Aspektwinkel desselben Zielgebiets zusammen mit der Benutzung radargrammetrischer Verfahren verwendet werden, um 3D-Informationen eines Zielobjekts zu gewinnen. Zudem ist durch die vollkohärente Prozessierung des Signals eine theoretische Auflösung bis zu einem Viertel der benutzten Radarwellenlänge möglich, so dass auch hier die Millimeterwellenradare mit ihren kurzen Wellenlängen von 9 mm bis 1 mm ihre Vorteile ausspielen können. Besonderen Fokus legten die Wissenschaftler auf den letzten Aspekt, die nicht-kohärente Rekonstruktion durch Überlagerung verschiedener Ansichten. Dies ist insbesondere für Aufnahmen von urbanen Gebieten sinnvoll, in welchen die benötigte *Line of Sight*, die Blickrichtung, welche den besten Einblick bietet, nicht im Voraus bestimmt werden kann.

Die Abbildung der Geometrie des Kreisflugs zeigt beispielhaft eine solche Fluggeometrie. So wird ein 3D-Bildstapel für jeden aufgenommenen Aspektwinkel konstruiert.

Über dem Innenstadtbereich von Münchenberg wurden Messungen durchgeführt. Das Foto zeigt ein optisches Bild des Messbereichs. Nachdem die Szene Stück für Stück rekonstruiert wurde, indem ausgesuchte Ansichten überlagert wurden, ergibt sich ein überlagertes Bild als Ergebnis. Obwohl zurzeit noch keine Stabilisierung der Radarantennen benutzt wurde, sind die Bilder bereits scharf fokussiert und zeigen feine Strukturen. Die Sicht des Radars ist in der finalen Rekonstruktion farblich markiert durch einen Pfeil, die einzelnen Streifen sind farblich umrandet. Parkende Fahrzeuge sind grün markiert und können entlang der Straße identifiziert werden. Auch wenn die Perspektive verglichen mit linearen Flügen an einigen Stellen ungewohnt ist, kann eine schattenfreie Einsicht des Innenstadtbereichs (in diesem Fall also der Straßen) in dem Bild gewährleistet werden. Werden die einzelnen SAR-Bilder als Video überlagert, kann man auch bewegliche Ziele, wie fahrende Fahrzeuge auf der Straße, anhand ihres mitlaufenden Schattens erkennen.

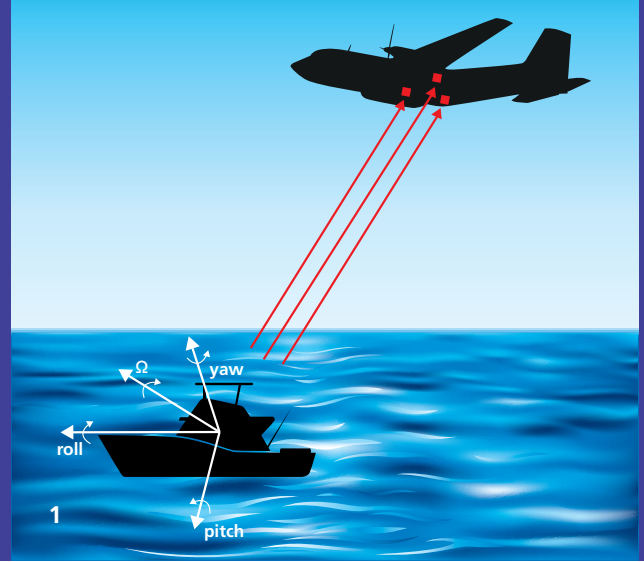
1 *Finale Rekonstruktion des Innenstadtbereichs von Münchenberg aus 8 verschiedenen, überlagerten SAR-Einzelansichten. Jede Ansicht benötigt ca. 1 Grad Winkelintervall zur Fokussierung der Daten.*

2 *Optisches Bild des Innenstadtbereichs von Münchenberg.*

3 *Geometrie beim zirkularen SAR. Konstruktion eines 3D Bildstapels für jeden aufgenommenen Aspektwinkel phi.*

Dipl.-Ing., MBA  
Stephan Palm  
Tel. +49 228 9435-357  
stephan.palm@  
fhr.fraunhofer.de

Dr. rer. nat. Anika Maresch  
Tel. +49 228 9435-760  
anika.maresch@  
fhr.fraunhofer.de



## DREIDIMENSIONALE ABBILDUNG VON SCHIFFEN

Die mehrkanalige Akquisition von Radarechos bietet die Möglichkeit unbekannte Schiffsbewegungen besser zu schätzen. Ist die Bewegung hinreichend gut bestimmt, können Streuzentren des Schiffs in drei Dimensionen repositioniert und so eine nachfolgende Objekterkennung unterstützt werden.

Radar eignet sich aufgrund günstiger Ausbreitungsbedingungen besser für die Überwachung auf offener See als optische Sensoren, die bei Dunst oder Dunkelheit kaum nutzbar sind.

Kommen Verfahren zum Einsatz, die auf der Apertursynthese beruhen, stellt die Bewegung der beleuchteten Szene (Wasser sowie das aufzuklärende Schiff) eine Herausforderung für die Signalverarbeitung dar. Bei der Apertursynthese werden die Echos über die Zeit akquiriert und räumlich abgetastet.

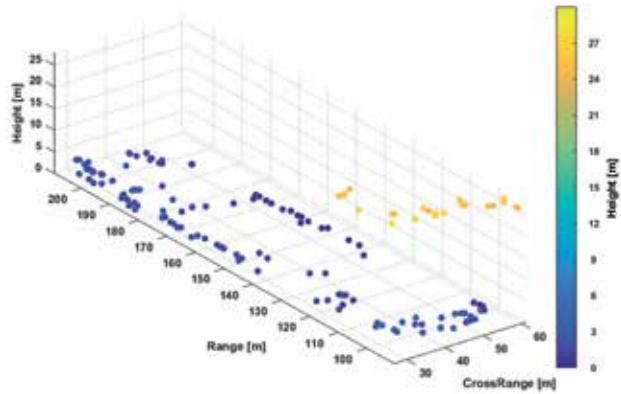
Um eine Abbildung des Schiffs zu erzielen, müssen die Reflektionen einzelner Streuzentren in einem Bildbereich an geeigneten Koordinaten repositioniert werden. Der klassische Ansatz, der auf einkanalig empfangenen Echos basiert, extrahiert dazu Entfernungs- und Dopplereinformationen aus den Echos. Während die Entfernungsinformation für einen Auswerter direkt interpretierbar ist, lässt sich die Dopplereinformation nur bei zusätzlicher Kenntnis der Drehgeschwindigkeit des Schiffs als quantitative Ablage eines Streuzentrums orthogonal zur Entfernungsrichtung deuten. Zudem entscheidet die Orientierung der Drehachse, in welcher Richtung diese Ablage aufzutragen ist. Zusätzliches Potential für die Bewegungsschätzung ergibt sich, wenn die Echos mit drei Antennen empfangen werden, die in L-Form angeordnet sind, so dass ein Antennenpaar eine horizontale und ein zweites Antennenpaar eine vertikale Basislinie aufspannen.

### Grundlagen des Verfahrens

Moderne Radarsensoren nutzen breitbandige Sendesignale, mit denen in Entfernungsrichtung eine Auflösung im Subdezimeterbereich erzielt werden kann. Werden die Reflexionen des Schiffs aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen, so können Streuzentren mit Hilfe der Apertursynthese in einer zweiten Dimension aufgelöst werden. Dies lässt sich bei Schiffen durch die systemimmanente Überlagerung von Eigenbewegung und Sensorbewegung umsetzen. Für



2



3

ein hinreichend kurzes Zeitintervall wird die gesamte Relativbewegung näherungsweise als eine einheitliche Abstandsänderung und eine Schiffsrotation mit konstanter Drehgeschwindigkeit betrachtet. Abstandsänderungen werden im Rahmen der Vorverarbeitung kompensiert.

Die Richtung, in der die durch Apertursynthese erzielbare Auflösung verläuft, kann mit Hilfe der Dreifingerregel ermittelt werden: Richtet man den Daumen in Radarblickrichtung und den Zeigefinger in Richtung der Rotationsachse, so zeigt der Mittelfinger in die gesuchte Richtung. Typischerweise wird die gemessene Dopplerfrequenz eines Echos als Maß für die Ablage eines Streuzentrums in dieser Richtung genutzt. Bei der Auswertung einkanalig aufgenommener Echos treten dabei jedoch zwei Probleme auf: Da die Richtung der Rotationsachse und die Drehgeschwindigkeit unbekannt sind, kann weder die Richtung der aus der Dopplermessung resultierenden Auflösung noch der Umrechnungsfaktor von der Dopplerfrequenz zum *Cross-Range* ermittelt werden. Hier setzt das vom Fraunhofer FHR adaptierte mehrkanalige Verfahren an. Werden die Echos mit einer zusätzlichen Antenne empfangen, so bietet die interferometrische Phase der beiden Empfangskanäle redundante Information über die Ablage in *Cross-Range*. Bei bekannter Lage der Rotationsachse kann damit die Drehgeschwindigkeit ermittelt werden. Wird eine dritte Empfangsantenne genutzt, so lassen sich darüber hinaus auch Rückschlüsse auf die Ausrichtung der Rotationsachse ziehen. Dabei sind die Antennen so anzuordnen, dass ein Antennenpaar eine horizontale und ein Paar eine vertikale interferometrische Basis bilden (L-Konfiguration).

### 3D-Repositionierung der Streuzentren

Bei großer Bandbreite variiert die Dopplerfrequenz innerhalb des genutzten Frequenzbereichs deutlich, was zu Nachteilen bei der Verarbeitung führt. Um diese auszuschließen, basiert das am Fraunhofer FHR implementierte Verfahren auf einer effizienten Transformation der Daten in den Entfernungs-Geschwindigkeits-Bereich. Hier werden nach der Kompensation von Abstandsänderungen punktförmige Streuzentren gesucht und extrahiert. Dabei wird neben den Parametern Entfernung und Geschwindigkeit für jedes Streuzentrum auch die komplexe Amplitude gespeichert. Anschließend erfolgt die Schätzung der effektiven Lage der Rotationsachse und der effektiven Drehgeschwindigkeit aus den gespeicherten Parametern. Drehrichtung und -geschwindigkeit definieren wie geschildert die *Cross-Range*-Richtung und -Skalierung. Da die Richtung der Drehachse in der Regel mit keiner der beiden Basislinien übereinstimmt, gehen in diesem Schritt bereits die Differenzphasen beider Interferometriepaare ein. Dabei verbleibt jedoch ein Freiheitsgrad, aus dem sich schließlich die Ablagen der extrahierten Streuzentren in der dritten Richtung ergeben.

1 Mit drei Antennen in L-Konfiguration empfangene Echos ermöglichen die Schätzung der Schiffsbewegung und eine dreidimensionale Abbildung des Schiffs.

2 Mit PAMIR-Frontend-Kamera gemachte optische Aufnahme eines Schiffs.

3 3D-Rekonstruktion des Schiffs bestehend aus repositionierten Streuzentren, die im Rahmen der Signalauswertung aus den Echos extrahiert wurden.

Dr.-Ing. Patrick Berens  
Tel. +49 228 9435-641  
patrick.berens@fhr.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Anna Fontana  
Tel. +49 228 9435-324  
anna.fontana@fhr.fraunhofer.de



## MODELLIERUNG DES WASSERECHOS ZUR MEHRKANALIGEN SIGNALVERARBEITUNG BEI MARITIMEN RADARSYSTEMEN

Zur Bewegtzientdeckung mit maritimen Radarsystemen wird eine fortgeschrittene mehrkanalige Signalverarbeitung benötigt. Die Detektionsleistung solch einer Verarbeitung kann nur berechnet werden, wenn die mehrkanaligen Eigenschaften des Wasserechos bekannt sind. Am Fraunhofer FHR wurde solch ein Modell entwickelt und mit realen Daten validiert.

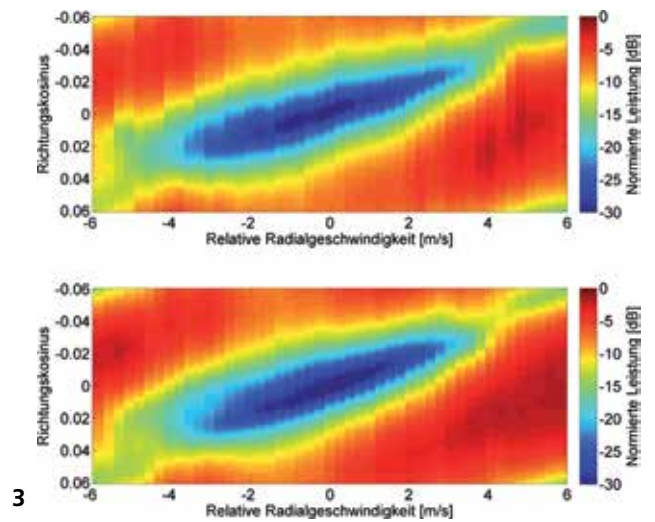
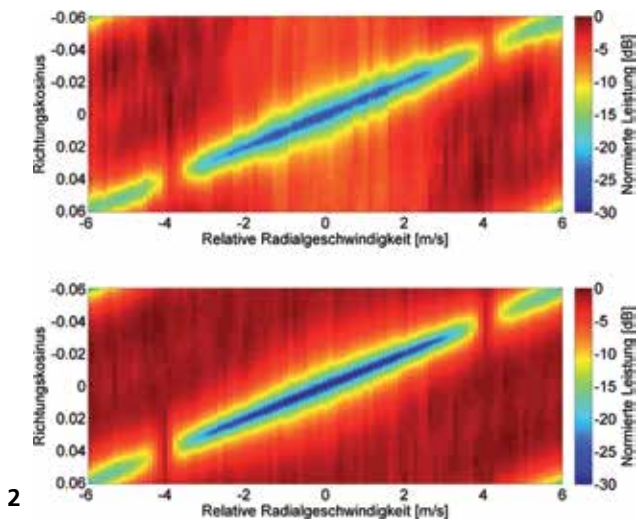
### Maritime Radarsysteme – früher und heute

Das erste Radar, das 1904 von Christian Hülsmeier auf der Hohenzollernbrücke in Köln demonstriert wurde, sollte Schiffe auf dem Rhein entdecken. Heute sind maritime Radarsysteme auf stationären oder schiffsgetragenen Plattformen immer noch von Bedeutung und die Detektion von großen Schiffen kann ohne komplizierte Signalverarbeitung erfolgen. Zusätzlich interessiert man sich aber auch für die Entdeckung von kleinen und agilen Booten von luftgetragenen Plattformen aus. Somit können Bedrohungen, die zum Beispiel durch Piraterie oder illegale Fischerei entstehen, auf weiträumigen Gebieten überwacht werden. Da jedoch von kleinen Booten nur ein niedriges Signal empfangen wird, welches durch die gewünschte Geometrie aus einem starken Wasserecho heraus detektiert werden muss, ist eine fortgeschrittene Signalverarbeitung nötig.

### Lieber vorher berechnen als später bereuen

Am Fraunhofer FHR wurde gezeigt, dass für eine zuverlässige Entdeckung von kleinen Booten das sogenannte *Space-Time Adaptive Processing* (STAP) gebraucht wird. Bei STAP wird ausgenutzt, dass störende Echos eine bestimmte Beziehung zwischen der Einfallsrichtung und der Radialgeschwindigkeit aufweisen, um einen verbesserten Filter zur Unterdrückung dieser Rückstreuung zu schätzen. Es ist wichtig, für ein bestimmtes Radarsystem die theoretische Detektionsleistung zu kennen, damit zum Beispiel die optimalen Radarparameter berechnet werden können oder damit eine Ermittlung möglich ist, ob die zusätzlichen Kosten eines mehrkanaligen Systems im Vergleich zu einem einkanaligen sinnvoll sind.





Um die Leistungsfähigkeit von STAP modellieren zu können, müssen die mehrkanaligen Eigenschaften der störenden Echos, des sogenannten Clutters, bekannt sein. Die mehrkanaligen Eigenschaften von Landclutter sind zwar erfasst, aber weitestgehend statisch und somit für maritime Radarsysteme nicht verwendbar. Der Seeclutter wird von einer bewegten Szene erzeugt und auch Streuer von brechenden Wellen müssen berücksichtigt werden.

Am Fraunhofer FHR wurde ein Modell zum Simulieren und Berechnen des mehrkanaligen Wasserechos und der damit verbundenen wichtigen Kenngrößen für STAP entwickelt. Zur Validierung des Modells wurden mehrere Messkampagnen mit dem Multifunktionsradarsystem PAMIR durchgeführt. Dabei flog die Trägerplattform Transall C-160 über der Nordsee in der Nähe von Helgoland, wie in Abbildung 1 dargestellt.

### Modell des Landechos hilft bei Wasser nicht weiter

Zur Bestimmung der Detektionsleistung ist es entscheidend den STAP-Filter zu kennen, da dieser zwar den Clutter beseitigt, aber auch das Signal des Ziels dämpfen oder sogar unterdrücken kann. Dieser Filter wird adaptiv aus den Daten geschätzt und kennzeichnet, um wie viel Leistung ein Ziel in Abhängigkeit des Richtungskosinus und der Radialgeschwindigkeit gedämpft wird. In Abbildung 2 ist der normierte Gewinn solch eines Filters von einem realen und simulierten Landdatensatz dargestellt. Man kann erkennen, dass dieser Filter einer Diagonalen entspricht, das Ziel also bei jeder Blickrichtung nur für eine bestimmte Radialgeschwindigkeit dämpft.

Abbildung 3 zeigt den normierten Filtergewinn eines realen und simulierten Seedatensatzes. Dieser Filter unterscheidet sich deutlich von dem Filter aus Abbildung 2 durch die breitere und asymmetrische Kerbe. Die Verbreiterung des Filters findet aufgrund der Bewegung des Wassers statt, und die Asymmetrie wird durch Streuer von brechenden Wellen verursacht. Mit diesem Filter ist es schwieriger, ein Ziel mit einem niedrigen Signal zu entdecken, vor allem für negative Radialgeschwindigkeiten. Der reale Filter des Seedatensatzes zeigt, dass das Modell des Landclutters nicht verwendet werden kann, um die Detektionsleistung über Wasser zu bestimmen, denn das würde zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Der Filtergewinn der simulierten Daten lässt erkennen, dass das entwickelte Modell die realen mehrkanaligen Eigenschaften gut wiedergibt und daher zur Bestimmung der Detektionsfähigkeit von potenziellen maritimen Zielen angewandt werden kann.

- 1 Experiment über der Nordsee.
- 2 Normierter STAP-Filtergewinn von realen (oben) und simulierten (unten) mehrkanaligen Landdaten.
- 3 Normierter STAP-Filtergewinn von realen (oben) und simulierten (unten) mehrkanaligen Seedaten.

*Dr.-Ing. Valeria Gracheva*

*Ansprechpartner:  
Dr. rer. nat. Wolfram Bürger  
Tel. +49 228 9435-220  
wolfram.buerger@  
fhr.fraunhofer.de*



## ADAPTIVE WAHRNEHMUNG: WEGBEREITER FÜR KOGNITIVES RADAR

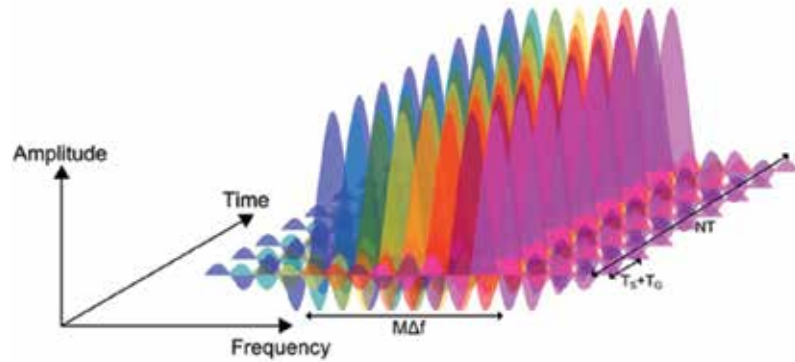
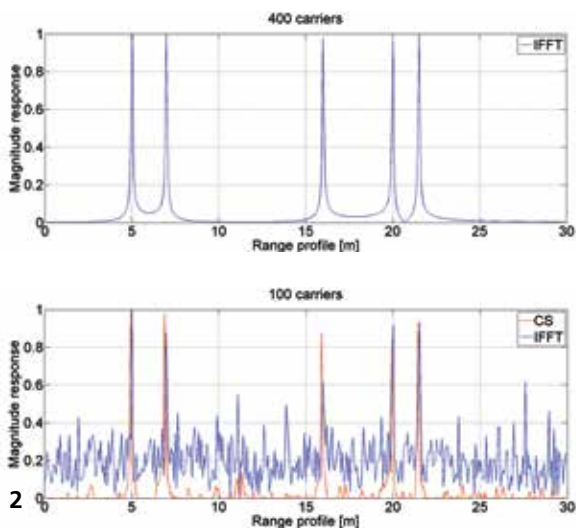
Optimierter Ressourceneinsatz, gesteigerte Leistungsfähigkeit und hohe Anpassungsfähigkeit – kognitive Radare entlasten den Operateur und erschließen ganz neue Einsatzgebiete. Voraussetzung: Das Radarsystem muss seine Umgebung richtig wahrnehmen können.

Kognitive Radare passen ihre operationellen Parameter und Steuerung intelligent an die Situation und Aufgabe an. Grundlage dafür ist die Fähigkeit zur adaptiven Wahrnehmung: Sie sorgt für ein optimales Bild der Radarszene, indem sie die Radar-Signale situationsabhängig generiert, verarbeitet und in einem fortlaufenden Prozess anpasst. Die Mittel dazu sind vielfältig und ermöglichen jedes für sich schon aktuellen Radarsystemen gewisse Freiheitsgrade. Doch erst die Zusammenführung dieser unterschiedlichen Technologien – von Wellenform-selektion und -design, über MIMO-Radar bis Compressive Sensing – werden Radarsysteme zusammen mit Neuerungen in der Hardware einen Schritt weiter in Richtung hochautonomer, kognitiver Radare bringen. Das ist das Arbeitsfeld der Anfang 2015 gegründeten Gruppe »Adaptive Wahrnehmung« am Fraunhofer FHR.

### Schlüsseltechnologie MIMO

Die vom Radar ausgesendete Wellenform ist verantwortlich für die Auflösung, Genauigkeit und Auswertbarkeit bei der Messung der Zielentfernung und -Geschwindigkeit. Für eine optimale adaptive Wahrnehmung muss das Radarsystem in der Lage sein, verschiedene Wellenformen auszusenden und diese dynamisch an die Radarszene anzupassen. Das kann mit unterschiedlichen Stellschrauben wie der Auswahl des Wellenform-Typs, der Veränderung der Wellenformparameter oder der fortlaufenden Anpassung des Strahlmusters geschehen. Art und Umfang sind abhängig von der aktuellen Aufgabe wie Entdecken, Orten oder Klassifizieren und davon, welche Bildkriterien optimiert werden müssen, wie ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis oder die Umgehung eines potentiellen elektronischen Störers.

Die derzeit beste Möglichkeit eine große Wellenformdiversität zu erzeugen bieten MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*)-Radare. Im Gegensatz zu Standard *Phased Array* Radaren verfügt hier jede Einzelantenne über einen Wellenformgenerator, so dass bei jedem Puls jedes Element



3

auf einer anderen Frequenz senden und/oder unterschiedliche Wellenformen erzeugen kann. Die Arbeitsgruppe untersucht deshalb verschiedene MIMO-Topologien und orthogonale Übertragungskonzepte. Ein Fokus lag bisher auf den in aktuellen Radarsystemen häufig genutzten und relativ einfach zu implementierenden Zeit-Multiplexverfahren. Da diese alleine das Potential der simultanen Übertragung des MIMO-Konzepts nicht voll ausschöpfen, konzentriert sich das Team derzeit auch auf die Untersuchung kodierter Wellenformen mit guten Korrelations-Eigenschaften. Dabei ermöglicht die Modulation der Amplitude durch einen digitalen Code eine klare Trennung der virtuellen MIMO-Kanäle und erzeugt eine gute Ambiguitätsfunktion. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erarbeitung von Kriterien zur Schätzgenauigkeit für die adaptive Auswahl der optimalen Wellenformparameter und Antennentopologien.

### Effiziente Signalverarbeitung durch Compressive Sensing

Der Datenumfang, der bei voller Ausnutzung der MIMO-Kapazitäten für die adaptive Wahrnehmung entsteht, ist enorm und die Signalverarbeitung aufwendig. Für den Einsatz muss das kognitive Radar aber in Echtzeit gute Ergebnisse liefern. Vielversprechend ist hier die *Compressive Sensing* (CS) Theorie: Sie nutzt die rein mathematisch »dünne Besetzung« der meisten Signale und damit ihre Kompressibilität in bestimmten Domänen für die anschließende Signalverarbeitung. So kann sie aus vergleichsweise wenigen Messungen das ursprüngliche Signal gut oder sogar besser rekonstruieren.

Die FHR-Ingenieure entwickeln mit dem CS-Ansatz Algorithmen für die adaptive Wahrnehmung. Mit der Anwendung auf das Design der Antennenarray-Topologie sowie auf die Signalverarbeitung und Strahlformung konnten sie die Auflösung (Superauflösung), Ortungsgenauigkeit und Zieldetektion bereits signifikant verbessern. Auch die dynamische Adaption und ggf. Kompression des Übertragungs- und des Empfangssignals ist mit dem CS-Framework deutlich leichter realisierbar. Das bringt zusätzlich Vorteile für die Ressourcen-Optimierung, insbesondere beim Einsatz in aktuellen Multifunktionsradaren. Denn mit ihren arbiträren Strahlsteuerungen und programmierbaren Funktionalitäten stellen sie ideale Plattformen für die Anwendung und Demonstration dieser Konzepte und Algorithmen dar.

Auf Basis des FHR-eigenen PAMIR Phased-Array-Systems, einem multifunktionellen SAR/MTI Radar, wollen die Forscher in einem nächsten Schritt ein Experimentalsystem erstellen. Damit wollen sie ihre bisher entwickelten Algorithmen in einem realen System testen und optimieren und den Grundstein für verschiedenste adaptive und intelligente Radarsysteme legen.

1 *Im Regelkreis eines kognitiven Radars ermöglicht die Wahrnehmung Folgeaktionen wie die Selbstanpassung der Parameter, die Aufgabenzuordnung oder das Erwerben und Nutzen von »Wissen«.*

2 *Statt mit 400 Trägerfrequenzen bei der konventionellen Methode der Inversen Fast Fourier Transformation (IFFT, oben) lassen sich mit Compressive Sensing (CS; unten rot) schon mit 25 Prozent der Messungen gleich gute oder bessere Entfernungsprofile erstellen.*

3 *MIMO-Radare können die Wellenformdiversität ausnutzen, indem sie z. B. zu jedem Zeitpunkt mehrere Pulse gleichzeitig auf unterschiedlichen Frequenzen aussenden.*

Dr. rer. nat.

María A. González-Huici

Tel. +49 228 9435-708

maria.gonzalez@

fhr.fraunhofer.de

# WELTRAUM



Contact: Dr. G. Bartsch <Guido.Bartsch@fhr.fraunhofer.de>, Phone: +49 (228) 9435-258  
I. Maouloud <fawel\_Oumrou.Maouloud@fhr.fraunhofer.de>, Phone: +49 (228) 9435-244

Fraunhofer  
Space  
View

*Am Fraunhofer FHR arbeiten  
Forscher an einer Simulations-  
umgebung zur Untersuchung  
und Visualisierung der komple-  
xen Prozesse der Weltraumüber-  
wachung.*



# SICHERHEIT IM WELTRAUM

Auf dem Gebiet der Weltraumbeobachtung mit Radar ist das Fraunhofer FHR eines der führenden Forschungsinstitute. Raumfahrtorganisationen weltweit verlassen sich auf seine Kompetenzen.



Moderne Gesellschaften sind zunehmend abhängig von raumgestützter Infrastruktur, also Diensten, die mittels Satelliten übertragen werden. Dazu gehören Fernsehen, Kommunikation und Navigation. Um diese Dienste mit geeigneten Maßnahmen zu schützen, benötigen Satellitenbetreiber genaue Kenntnis über die sogenannte Weltraumlage, also z. B. über Art und Anzahl von Objekten und deren Bahnen um die Erde. Seit über dreißig Jahren erforschen die Wissenschaftler des Fraunhofer FHR den erdnahen Weltraum. Bei ihren Arbeiten fokussieren sie sich auf die Entwicklung von Technologien, Verfahren und Algorithmen, um mit Radar möglichst viele Daten über alle Weltraumobjekte – von aktiven Satelliten bis »Weltraummüll« (*Space Debris*) – zu sammeln. Radar ist für diese Aufgabe der am besten geeignete Sensor, da die Beobachtungsbedingungen überaus widrig sind: Radar kann bei Tag und Nacht eingesetzt werden, liefert entfernungsunabhängig hochaufgelöste Bilder und kann Objekte auch bei hohen Geschwindigkeiten detektieren.

Dennoch ist die wissenschaftliche Erfassung der Weltraumlage herausfordernd. Da Objekte im Orbit mit über 28.500 km/h um unseren Planeten fliegen, können selbst nur einen Zentimeter große Teilchen für einen Satelliten tödlich sein. Neben den etwa 20.000 derzeit bekannten und katalogisierten Objekten, gibt es noch unzählige unentdeckte. Vor allem für die Verteilung von Partikeln im Zentimeterbereich und kleiner sind nur statistische Werte vorhanden. Damit sind nur globale Gefahreinschätzungen, aber keine individuellen Kollisionsprognosen machbar. Satellitenbetreiber, Raumfahrtagenturen und Wissenschaftler suchen aber nach Lösungen, die das ermöglichen sollen. Die zentrale Fragestellung lautet hier: Wie können auch für die kleinen, aber dennoch gefährlichen Partikel gute Sensordaten gewonnen werden?

## Zensus für Space Debris

Solche Daten generieren die Wissenschaftler im Rahmen regelmäßig stattfindender sogenannter Beampark-Kampagnen. Diese Kampagnen finden mit nationalen wie internationalen Partnern statt. Bei dieser Art von Experiment werden zwei Systeme miteinander verbunden: eines dient als Sender (»Beleuchter«), das andere als Empfänger. Für die Dauer von 24 Stunden beobachtet der Sensorverbund dann einen Himmelsabschnitt. So spüren die Forscher selbst noch Objekte von einem Zentimeter auf. Ein Rekord, mindestens in Europa.

Zeitlich begrenzte Überwachungskampagnen werden aber in absehbarer Zukunft nicht mehr ausreichen, um die Verkehrssicherheit im erdnahen Orbit zu gewährleisten. Denn vor allem Kommunikationsdienstleister setzen auf Schwärme von Klein- und Kleinstsatelliten, die im LEO (*Low Earth Orbit*, bis 2.000 km Höhe) ausgesetzt Mobilfunk und Internet auch in die entlegensten Ecken der Welt bringen sollen. Die ersten solcher Satellitenschwärme sind bereits geplant.

Für eine lückenlose, kontinuierliche Überwachung des Weltraums ist ein neuer Typ von Radar notwendig: Sogenannte Phased Arrays, elektronisch gesteuerte Gruppenantennen, sind in der Lage den Himmel rund um die Uhr großräumig zu überwachen. Mittels elektronischer Strahlschwenkung können sie ihre Blickrichtung im Bruchteil einer Sekunde verändern. Im Auftrag des Raumfahrtmanagements des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt das Fraunhofer FHR derzeit ein solches System: Das »German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar« (GESTRA).

## Höchstaufgelöst auch in 10.000 km

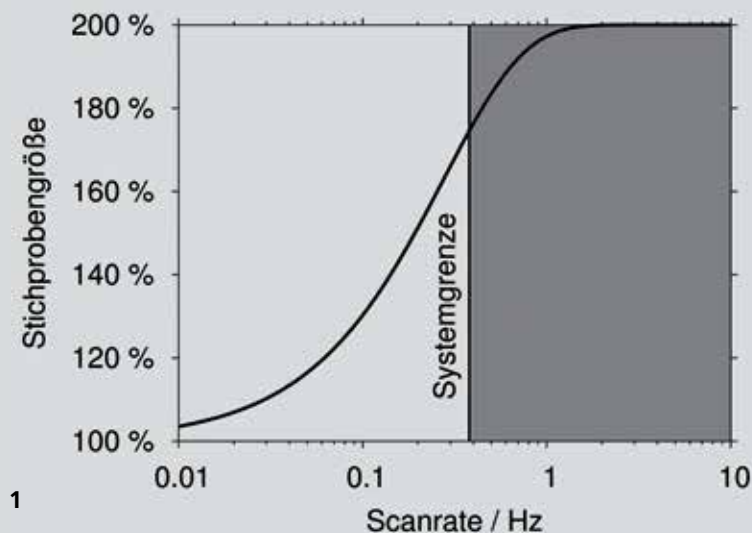
Seine Kompetenz, ein solches System zu bauen, bewies das Fraunhofer FHR bereits 2012 mit dem Bau eines Empfangspro-

totyps für die ESA. In bisherigen Tests performt das System besser als erwartet. Hier zählt sich die jahrzehntelange Expertise des Fraunhofer FHR aus: Neben dem Know-how, die Hardware für ein solches System zu konzipieren, verfügt das Institut auch über das Fachwissen für die Programmierung von Software zur Radarbetriebssteuerung. Eine weitere Kernkompetenz ist die Entwicklung komplexer Algorithmen für eine bestmögliche Signalverarbeitung der empfangenen Radardaten.

Seit nun mehr als 40 Jahren verfügt das Institut mit TIRA auch über ein System zur Weltraumaufklärung, dessen Leistungsfähigkeit in Europa einmalig ist. Die mit dem Weltraumbeobachtungsradar gewonnenen Radarabbildungen sind wegen ihres Detailreichtums bei Satellitenbetreibern und Raumfahrtagenturen weltweit begehrt. Typische Aufgaben für die Wissenschaftler sind neben Bahndatenaufklärung zwecks Kollisionsvermeidung und Wiedereintrittsprognosen die Identifizierung und Analyse von Satelliten: Welche Einrichtungen hat ein Satellit an Bord? Welche Aufgaben kann er durchführen? Ist er aktiv oder passiv? Fliegt er stabil oder ist er möglicherweise außer Kontrolle? Ist er beschädigt? Falls ja, was ist beschädigt und wodurch? TIRA ist weiterhin eine wertvolle Informationsquelle beim Start von Satelliten. Hier möchten die Partner wissen, ob der Satellit auf der richtigen Umlaufbahn ist und korrekt in Betrieb gesetzt wurde. Nur wenn alle Solarpaneele und Kommunikationsantennen vollständig ausgefahren wurden, ist ein sicherer Betrieb möglich. Diese Informationen können die Forscher des Fraunhofer FHR den generierten Radarabbildungen entnehmen. Kurzfristig stehen den Partnern so wertvolle Informationen für den weiteren Missionsverlauf zur Verfügung.



Geschäftsfeldsprecherin Weltraum:  
**Dr.-Ing.**  
**DELPHINE CERUTTI-MAORI**  
Tel. +49 228 9435-290  
[delphine.cerutti-maori@fhr.fraunhofer.de](mailto:delphine.cerutti-maori@fhr.fraunhofer.de)



## NEUE ANSÄTZE ZUR ERFASSUNG DER WELTRAUMMÜLLUMGEBUNG

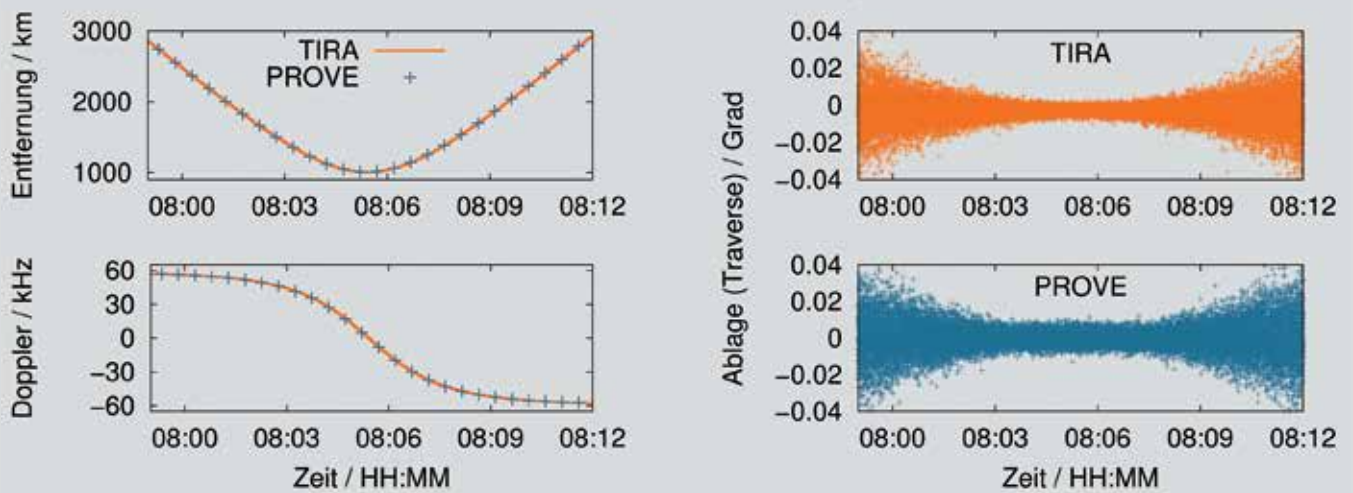
Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass mehr als 200.000 Objekte größer 2 cm die Erde umkreisen. Bei einer typischen Messkampagne zur Erfassung und Charakterisierung von kleinteiligen Weltraumtrümmern, wie sie regelmäßig mit TIRA des Fraunhofer FHR durchgeführt wird, können etwa 2% dieser Objekte detektiert werden. Das Fraunhofer FHR untersucht neue Ansätze, um den Informationsgehalt und die Effizienz solcher Messungen zu erhöhen.

Radare werden seit Anbeginn der Raumfahrt eingesetzt, um die Umlaufbahnen von Objekten um die Erde zu bestimmen. Doch sensorielle Messwerte weichen aufgrund statistischer und systematischer Fehler stets von der Realität ab. Dies führt zu einer Begrenzung der erzielbaren Genauigkeit bei der Bahnbestimmung. Am Fraunhofer FHR wurde im vergangenen Jahr das Software-Tool PROVE (*Program for Radar Observation Vector Estimation*) zum Simulieren von Beobachtungsvektoren für monostatische Pulsradare mit Parabol- oder Gruppenantenne entwickelt. PROVE soll hauptsächlich bei der Entwicklung neuer Radarsysteme zum Einsatz kommen. Daher wurden zunächst nur die wesentlichen Fehlergrößen modelliert, welche bei vorgegebenen Systemparametern die Beobachtungsvektoren beeinflussen. Zur Verifikation des gewählten Ansatzes wurden in einem ersten Schritt Messungen mit dem TIRA-Zielverfolgungsradar mittels PROVE nachsimuliert. Um objektabhängige Fluktuationen der Messwerte auszuschließen, wurde der Radarkalibrationssatellit LCS-4 mit TIRA vermessen. LCS-4 weist aufgrund seiner Kugelform und Beschaffenheit einen vom Apsektwinkel nahezu unabhängigen Radarrückstreuquerschnitt auf. Abbildung 2 zeigt dabei sowohl für Entfernung und Dopplerfrequenz als auch für die Ablage der Beobachtungsvektoren von der Antennenachse bereits eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, was die prinzipielle Korrektheit des gewählten Modellierungsansatzes bestätigt. PROVE kann unter anderem auch dazu verwendet werden, um die Effektivität neuer Betriebsmodi zur Detektion von Weltraummüll mittels TIRA zu untersuchen.

### Lücken schließen

Zur Charakterisierung der Weltraummüllsituation in Bahnhöhen zwischen 200 km und 2000 km sind leistungsstarke Radare erforderlich. Seit 1993 werden daher solche Messungen





2

mit TIRA als Beampark-Experimente (BPE) im Auftrag der ESA durchgeführt. Regelmäßige Messungen dieser Art (i. d. R. jährlich) sind ferner für die Überprüfung und Kalibrierung der statistischen Verteilungsmodelle notwendig.

Die Antenne wird für die BPE nach Osten und mit hoher Elevation ausgerichtet. Dann werden 24 Stunden lang alle Objekte ab einer bestimmten Größe erfasst, welche in einem vorab festgelegten Entfernungsbereich durch die Antennenkeule fliegen. Da bei der Ausrichtung der Antenne in östlicher Richtung nur Bahnen mit einer Inklination (Neigung der Bahn- gegenüber der Äquatorebene) von über  $50^\circ$  beobachtet werden können, wurde im Dezember 2015 erstmalig ein BPE mit nach Süden ausgerichteter Antenne bei niedriger Elevation durchgeführt, was dann die Beobachtung von Objekten auf Bahnen mit einer Inklination unter  $50^\circ$  ermöglichte. Die hierbei aufgenommenen Daten werden derzeit ausgewertet.

### Effizienz steigern

Weitere Modifikationen für BPEs werden derzeit untersucht, um bei unveränderter Beobachtungsdauer eine Vergrößerung der erzielbaren Stichprobe oder eine Verbesserung der aus den Beobachtungen ableitbaren Bahnparameter zu erreichen. Zum Vergrößern der Stichprobe wurde eine Betriebsart analysiert, bei der die Antennenachse nicht statisch auf eine vorgegebene Blickrichtung ausgerichtet ist, sondern um diese mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert. Die bereits erwähnte PROVE-Software wurde erstmalig eingesetzt, um die Abhängigkeit zwischen der Rotationsgeschwindigkeit der Antenne und der Stichprobengröße (Anzahl der erfassbaren Objekte) zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zum statischen BPE bei einer Scan-/Rotationsrate der Antenne von mehr als 2 Hz die Stichprobengröße nahezu verdoppelt werden kann (siehe Abbildung 1). Berücksichtigt man zusätzlich die mechanischen Belastungsgrenzen des TIRA-Antennensystems, welche die Scanrate auf unter 0,4 Hz beschränken, so ist eine Stichprobenerhöhung um den Faktor 1,7 erreichbar (Abbildung 1, Mitte). Im Vergleich zu einem statischen BPE mit nach Süden ausgerichteter Antenne sogar um den Faktor 1,8.

### Ausblick

Durch die stetig wachsende Population an Weltraummüll steigen auch die Anforderungen an die Qualität der Messungen. Die aktuellen Arbeiten tragen dazu bei, dass sich das Fraunhofer FHR auch in Zukunft weiterhin zu den weltweit führenden Einrichtungen im Bereich Charakterisierung der Weltraummüllumgebung zählen kann.

1 Stichprobengröße relativ zum BPE mit fest stehender, nach Osten ausgerichteter Antenne.

2 Vergleich zwischen gemessenen (TIRA) und simulierten (PROVE) Beobachtungsdaten.

Dr.-Ing. Sven K. Flegel

Ansprechpartner:

Klemens Letsch

Tel. +49 228 9435-343

klemens.letsch@

fhr.fraunhofer.de



## RESSOURCENEFFIZIENTE WELTRAUMÜBERWACHUNG

Der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen verlangt ein Umdenken bei der Konzeption zukünftiger Systeme für die Weltraumüberwachung. Mit der Simulationsumgebung »SpaceView & Analyst« können neue Konzepte erstmals systematisch untersucht werden.

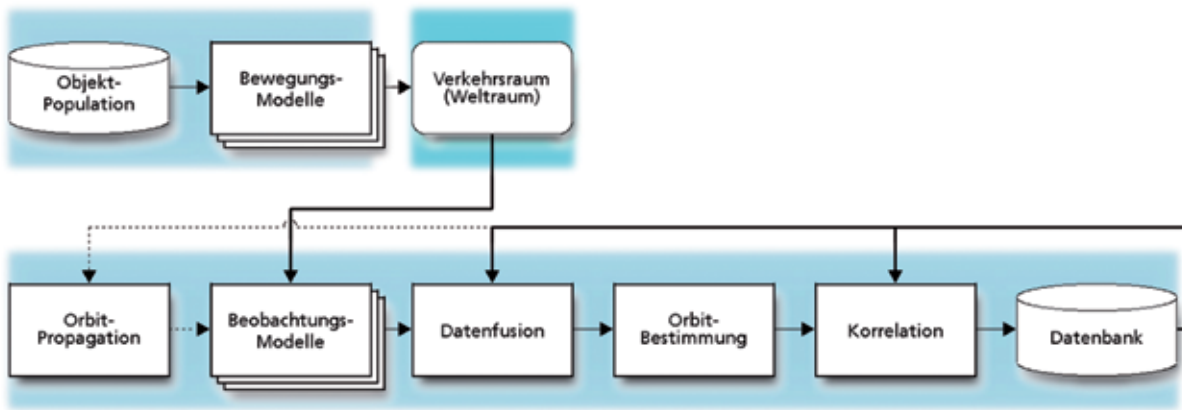
### Effiziente Sensor- und Verarbeitungsnetzwerke

Kernaufgabe der Weltraumüberwachung ist es, die Orbits von Objekten auf Erdumlaufbahnen so zu vermessen, dass die Position jedes Objekts zu jeder Zeit hinreichend gut geschätzt werden kann. Abhängig vom zu überwachenden Verkehrsraum dienen Radare oder optische Sensoren zur Erfassung des gegenwärtigen Zustands, repräsentiert durch eine Datenbank mit den Bahndaten der Objekte. Aufgrund verschiedenster Einflüsse, kann ein Datensatz stets nur für einen beschränkten Zeitraum zur qualitativ hochwertigen Prognose einer Objektposition herangezogen werden. Die Orbits müssen daher regelmäßig neu vermessen werden. Die Erforschung der hierfür erforderlichen Sensor- und Verarbeitungsnetzwerke sowie entsprechender Unterstützungssysteme für die Weltraumüberwachung ist Gegenstand der Arbeiten am Fraunhofer FHR.

Gelang es in der Vergangenheit zwar, die Weltraumüberwachung durch den Einsatz immer leistungsstärkerer Sensoren punktuell zu verbessern, so blieben Möglichkeiten der Optimierung und Effizienzsteigerung auf globaler Ebene bislang weitgehend unerforscht. Insbesondere fehlte es bis dato an einer ganzheitlichen Betrachtung des Prozesses »Weltraumüberwachung«. Hierzu ist eine Modellierung und Simulation des komplexen Zusammenspiels aller Systemkomponenten unerlässlich.

### Modellierung komplexer Systeme

Zur systematischen Untersuchung von Systemen zur Weltraumüberwachung wurde am Fraunhofer FHR die Visualisierungs- und Simulationsumgebung »SpaceView & Analyst« entwickelt. Kernelement ist ein hochleistungsfähiges Modul zur Repräsentation des zu untersuchenden Verkehrsraums, der in ihm enthaltenen Objekte sowie der eingebrachten Sensoren in Ort und Zeit. Mit diesem Ansatz lassen sich praktisch alle Sensorsystemgattungen, von boden- bis



2

raumgestützt, geeignet modellieren. Für jeden Sensor kann dessen statische oder dynamische Ausrichtung individuell definiert werden. Verarbeitungsnetzwerke und Datenbanksysteme lassen sich analog einbinden. Auf diese Weise können z. B. Strategien zur Durchmusterung des im jeweiligen Gesichtsfeld eines Sensors liegenden Beobachtungsvolumens, aber auch andere Beobachtungsmodi, wie Beampark oder Tracking untersucht und bewertet werden.

Die softwaretechnische Abbildung aller Komponenten eines zu untersuchenden Überwachungssystems erfolgt auf Basis paralleler Prozesse sowie bereitgestellter Methoden zur Interprozesskommunikation. Die Simulationsleistung skaliert mit der Anzahl von Prozessorkernen und erlaubt, selbst komplexe Weltraumüberwachungssysteme mit vielen Sensoren und nachgelagerten Verarbeitungseinheiten in Echtzeit untersuchen zu können.

### Verifikation mittels End-to-End-Simulation

Die Simulation selber erfolgt im Zeitbereich: Wie in der Realität liefern auch die in der Simulation involvierten Systeme Messdaten mit einer vom jeweiligen Betriebsmodus und Sensor abhängigen zeitlichen Auflösung und müssen ggf. auch selber mit Daten versorgt werden. Im Fall eines klassischen Überwachungsradars ist die Ausrichtung der Antenne beispielsweise eine sich nicht verändernde periodische Zeitfunktion. In einem vorgegebenen Zeitraster erfasst der Sensor die Objekte, die sich in der aktuellen Antennenkeule befinden. Nach einer typischerweise noch am Sensor vorgenommenen Filterung der Eingangsdaten führt dieser die gewonnenen Beobachtungsvektoren (Positionsdaten) einem weiterverarbeitenden System zu. Dieses gruppiert die übermittelten Daten so, dass Gruppen mit Datensätzen entstehen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit demselben Objekt zuzuordnen sind. Auf Basis dieser Information kann eine weitere Instanz schließlich die Bahn des jeweiligen Objekts numerisch bestimmen. Sodann kann die Bahninformation in eine Bahndatenbank eingepflegt werden.

Ziel einer ressourceneffizienten Weltraumüberwachung ist es, die Bahnen der Objekte im Weltraum so ressourcenschonend wie möglich, aber auch so genau wie nötig zu vermessen. Dabei ist es keineswegs trivial, die vorgenannte minimal erforderliche Genauigkeit zu quantifizieren. Insbesondere wird ein Stabilitätskriterium zu erfüllen sein, welches fordert, dass sich die Anzahl der jeweils gültigen Bahndatensätze nach einer gewissen Kaltstart-Phase nicht mehr verändern darf. Dies natürlich unter der Voraussetzung einer konstanten Anzahl beobachtbarer Objekte, deren Bahn nicht aktiv durch ein Manöver oder durch Kollision mit einem anderen Objekt verändert wird. Der Nachweis, dass das Stabilitätskriterium bei einer vorgegebenen Systemkonfiguration erfüllt wird, lässt sich nur durch eine entsprechende End-to-End-Simulationen erbringen.

1 Die am Fraunhofer FHR entwickelte Simulationsumgebung »SpaceView & Analyst« ist ein Werkzeug, mit dessen Hilfe die hochkomplexen Prozesse der Weltraumüberwachung untersucht, optimiert und anschaulich visualisiert werden können.

2 Grobstruktur der End-to-End-Simulation.

Dr.-Ing. Dipl.-Inform.  
 Guido Bartsch  
 Tel. +49 228 9435-268  
 guido.bartsch@  
 fhr.fraunhofer.de

## INTERVIEW

# »UNGLAUBLICH SPANNEND«

Robert Kohlleppel kam 2007 als Diplomand ans Fraunhofer FHR. Nach seinem Abschluss wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut und promovierte Anfang 2015 mit Auszeichnung. Im Herbst folgte die Ernennung zum Teamleiter.



**Herr Dr. Kohlleppel, Sie sind seit acht Jahren am Institut. Wie sind Sie ans Fraunhofer FHR gekommen?**

Ich habe in Bochum an der Ruhr-Universität Elektrotechnik und Informationstechnik studiert. Es gibt ja schon seit langem eine traditionelle Verbindung zwischen der RUB und dem

Fraunhofer FHR. Darüber habe ich dann Professor Ender und auch den Forschungsbereich Radar bzw. das Fraunhofer FHR kennengelernt. Gleichzeitig habe ich schon während meines Studiums gemerkt, dass mir Signalverarbeitung nicht nur gut liegt, sondern auch viel Spaß macht. Das war ein Thema, das ich unbedingt vertiefen wollte. Und so hat es sich angeboten,



für meine Diplomarbeit ans Fraunhofer FHR zu kommen, weil es hier viele spannende Aufgaben im Bereich der Radarsignalverarbeitung gab.

**Anfang des Jahres haben Sie in diesem Bereich auch promoviert. Was war das Thema Ihrer Promotion?**

Der Titel lautete »Ground moving target tracking with space-time adaptive radar«. Es geht hierbei sowohl um die Zielverfolgung wie auch um die Zielentdeckung mittels eines Radarsystems. Bisher wurden diese beiden Themen als verschiedene Welten gesehen. Es bietet sich einfach an, hier nach der Radarsignalverarbeitung einen Schnitt zu machen. Vielfach werden diese beiden Aufgaben daher auch von unterschiedlichen Abteilungen gehandhabt, so auch hier am Standort. Meine Arbeit führt diese Welten nun zusammen und stellt sie als Einheit dar. Ich habe im Zuge der Arbeit auch einen neuen Algorithmus für die Bodenzielverfolgung entwickelt, der die Radarsignalverarbeitung eng in die Zielverfolgung integriert. Der Vorteil ist, dass man durch eine bessere Modellierung der Radarmessungen auch bessere Zielverfolgungsergebnisse erreichen kann. Besonders ist auch, dass in meiner Arbeit die Verfahren mit Experimentaldaten – die wir mit dem Experimentalsystem PAMIR des Fraunhofer FHR aufgezeichnet haben – validiert werden.

**Während Ihrer Promotion sind Sie Vater geworden. War es schwierig, Familie, Beruf und Promotion unter einen Hut zu bekommen?**

Die Familie ist in der letzten Phase der Promotion entstanden. Als ich mich dann kurz nach der Geburt noch mal ans Schreiben setzen musste, das war schon nicht ganz so einfach. Aber nachdem ich dann soweit fertig war, dass ich die Arbeit zum Kommentieren an die Gutachter gegeben hatte, konnte ich eine längere Elternzeit nehmen. Da hat das Fraunhofer FHR mich gut unterstützt.

**Im September sind Sie zum Teamleiter ernannt worden. Wie gefällt Ihnen Ihre neue Aufgabe?**

Ja, das ist wirklich erst vor ein paar Wochen passiert. Dieser Arbeitsschwerpunkt wurde am FHR auch neu begründet. Vor vier Wochen, Anfang Oktober, kam auch erst mein erster Mitarbeiter, meine zweite Mitarbeiterin sogar erst letzte Woche! Es gefällt mir auf jeden Fall sehr gut. Ich freue mich darauf, gemeinsam an einem Thema zu forschen, Mitarbeiter anzuleiten, das eigene Wissen weiterzugeben und gemeinsam aus den Ideen und Forschungsergebnissen mehrerer ein großes Gesamtbild zu formen.

**Womit befasst sich Ihr Team?**

Wir arbeiten an der Radarsignalverarbeitung für die Weltraumüberwachung. Eine Aufgabe wird beispielsweise sein, die Signalverarbeitung für das Großprojekt GESTRA zu konzipieren und umzusetzen. Ich finde es unglaublich spannend, dass auf der einen Seite die Forschung steht und andererseits Verfahren, die wir entwickeln, schon bald bei GESTRA genutzt werden. Bei meiner Doktorarbeit war es ja so, dass es eine Forschungsarbeit war. Das heißt, es gab – noch – keinen Kunden dafür. Das ist hier ganz anders: Das, was wir machen, wird wirklich benötigt und trotzdem ist es keine Routinearbeit. Wir müssen völlig neue Konzepte entwerfen. Das ist toll! Natürlich haben wir Fristen und Abgabetermine einzuhalten, aber ich sehe das positiv. So weiß ich, dass ich in ein paar Jahren das Ergebnis der Arbeiten sehen werde.

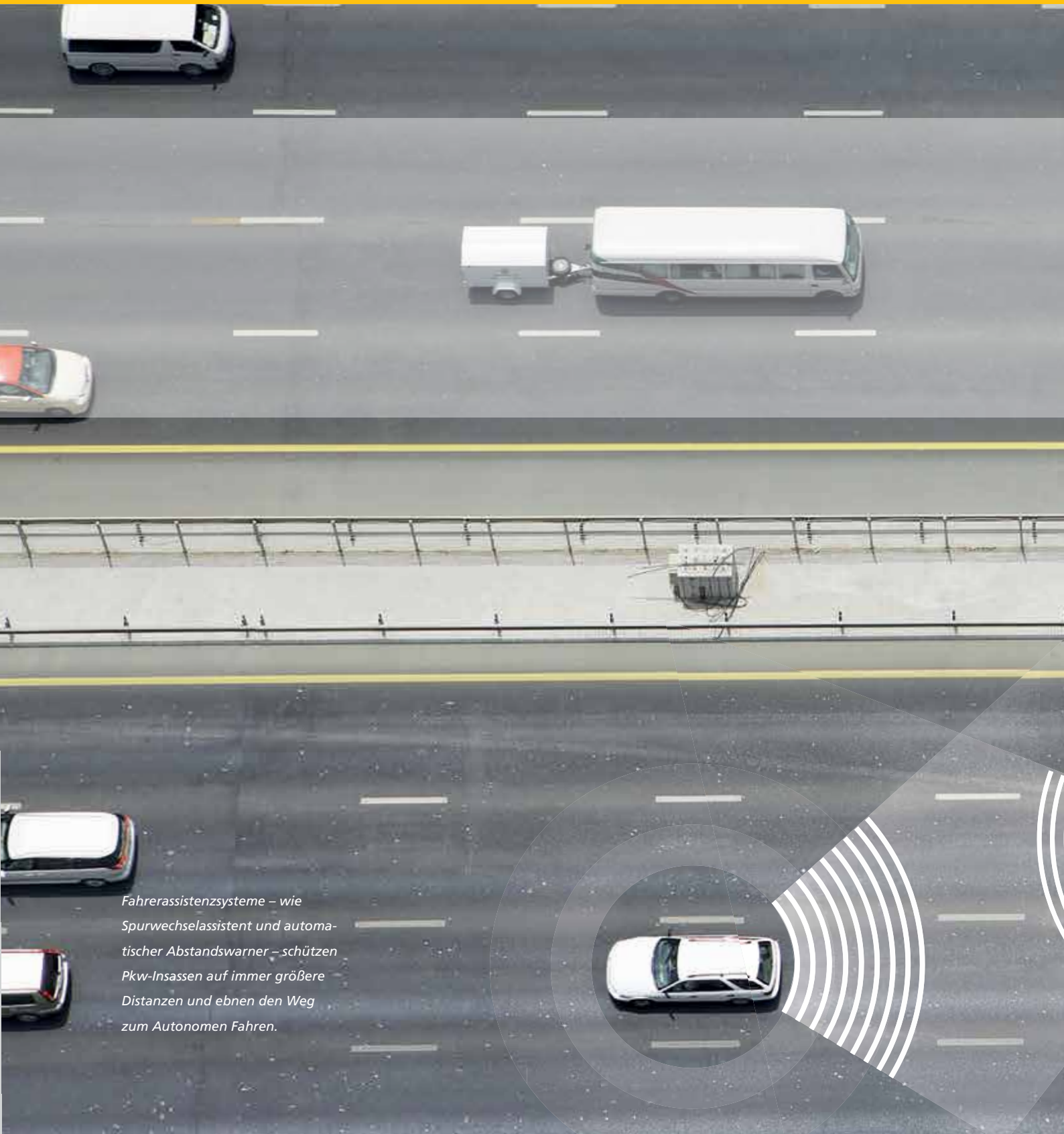
**In dem Großprojekt GESTRA geht es darum, ein neuartiges Radar zur Erfassung der Weltraumlage zu konzipieren. Warum ist Weltraumlage ein so wichtiges Thema?**

Weltraumlage ist so wichtig, weil wir den erdnahen Weltraum ja sehr intensiv nutzen; durch Kommunikation, Navigation und weitere Satelliten-basierte Dienste. Diese sind derzeit bedroht durch mögliche Kollisionen mit anderen Satelliten oder Trümmerteilen, die sich im Orbit befinden. Um in Zukunft zum Beispiel Ausweichmanöver planen zu können, braucht man sehr gute Kenntnis der Bahnen all dieser Objekte. Die Überwachung des erdnahen Weltraums ist für die Gesellschaft eine sehr wichtige Aufgabe. Und Radar ist ein sehr guter Sensor, um eben diese Informationen zu gewinnen.



Teamleiter Signalverarbeitung für  
Weltraumüberwachung:  
**Dr.-Ing. ROBERT KOHLEPPEL**  
Tel. +49 228 9435-392  
robert.kohleppel@fhr.fraunhofer.de

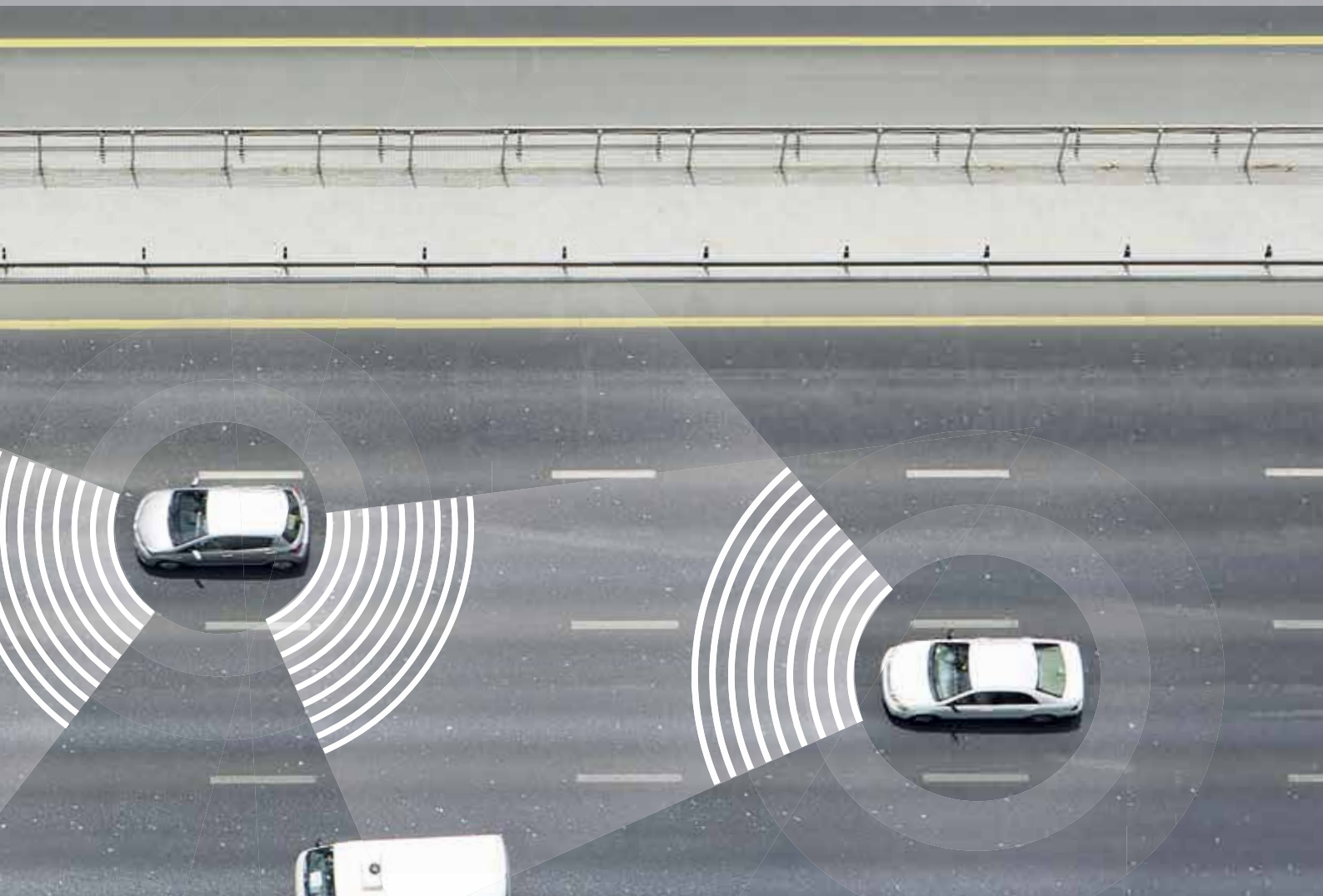
# VERKEHR



*Fahrerassistenzsysteme – wie Spurwechselassistent und automatischer Abstandswarner – schützen Pkw-Insassen auf immer größere Distanzen und ebnen den Weg zum Autonomen Fahren.*

# RADAR AUF DER ÜBERHOLSPUR

Radar kommt inzwischen auf allen Verkehrsträgern zum Einsatz: Auf Autos, Schiffen sowie Flugzeugen. Das Fraunhofer FHR entwickelt intelligente Sensoren für mehr Sicherheit im Verkehr.



Waren Radargeräte früher kostspielig und unhandlich, so können sie heute durch zunehmende Miniaturisierung preiswert und kompakt gefertigt werden. Moderne Hochfrequenzsensoren finden in verschiedensten Fahrzeugtypen Einsatz. Gerade für Anwendungen im Luft-, See- und Straßenverkehr bietet Radar vielfältige Möglichkeiten. Das Fraunhofer FHR untersucht in unterschiedlichsten Forschungsprojekten, wie sich dieses Potenzial heben lässt.

Das Institut verfügt aufgrund seiner umfassenden Forschungstätigkeit der letzten Jahrzehnte über tiefgreifende fundierte, physikalische, ingenieurwissenschaftliche und mathematische Fachkenntnisse. Die technische Ausstattung ist auf dem neuesten Stand. Seine Arbeiten sind darauf ausgerichtet, Probleme bei der Entwicklung eines neuen Produkts relativ zügig und zeitnah zu lösen. Das Entwicklungsrisiko für den Kunden ist dabei gering, da sich die Wissenschaftler kontinuierlich mit nahezu allen Aspekten der Thematik befassen. Das Angebot an die Partner reicht von Machbarkeitsstudien über die Systemkonzeption bis hin zum Bau von Prototypen. Dabei haben die Wissenschaftler sich vor allem auf das Lösen von Problemstellungen mit besonders anspruchsvollen Herausforderungen spezialisiert.

### Unsichtbare Hochleistungsantennen

Im Auftrag seiner Partner entwickelt das Fraunhofer FHR in gemeinsamen Forschungsprojekten neue Hardware-Konzepte beginnend beim Chip- und Antennendesign. Ihre Lösung passen sie exakt an die Aufgabenstellung an. In Kombination mit ausgereifter Signalverarbeitung, einer weiteren Kernkompetenz des Institutes, entsteht so ein maßgeschneidertes System – immer mit Blick auf Funktionalität und Preis. Dies verdeutlichen die aktuellen Aktivitäten des Fraunhofer FHR in Kooperation mit einem langjährigen Kunden aus dem Automotive-Bereich: Hier entwickelten die Wissenschaftler

Antennen und Hochfrequenzschaltungen für ein 24 Gigahertz-Radar, welches kontinuierlich verbessert wird. Das Fahrerassistenzsystem wurde in über vierzig Fahrzeugtypen bereits millionenfach verbaut.

Eine weitere Expertise neben dem Schaltungsdesign ist mittels elektromagnetischer Modellierung den optimalen Einbauort einer Antenne am Fahrzeug zu identifizieren, denn die Bauform sowie die verwendeten Materialien beeinflussen die Performanz einer Antenne. Für Fahrzeuge, bei denen der Luftwiderstand (Aerodynamik) eine Rolle spielt, entwickelt das Institut leistungsfähige und störteste strukturintegrierte Antennen, die in die Oberfläche eingelassen sind. Das Anwendungsspektrum dieser Technologie reicht von bemannten und unbemannten Flugfahrzeugen in unterschiedlichen Größen über Landfahrzeuge bis zu größeren Schiffen. Eingesetzt werden diese Antennen zur Navigation wie zur Kommunikation.

### Smarte Sensoren zum kleinen Preis

Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld von Radar ist der Schiffsverkehr. Insbesondere bei eingeschränkter Sicht, z. B. durch Nebel, Regen oder Rauch, zeigen sich die Stärken der Radartechnologie und hochentwickelter Signalverarbeitung gegenüber optischen Systemen: Radar wird von diesen Umweltbedingungen nicht beeinträchtigt. So verwundert es nicht, dass die Wissenschaftler auch für die Schiffsnavigation eine neuartige Lösung parat haben: Eine Gruppenantenne mit elektronischer Strahlschwenkung, welche die mechanisch rotierende Balkenantenne ersetzt. Dem Fraunhofer-Grundsatz – innovative und wirtschaftliche Produkte für die Praxis – folgend, haben die FHR-Forscher diese Technologie für den Massenmarkt erschwinglich gemacht. Für ihr neuartiges Konzept eines Hochfrequenzverteils- und Zusammenfassungsnetzwerks wurde den FHR-Wissenschaftlern ein Patent erteilt. Das Schiffsradar soll in 2016 noch einige Tests absolvieren, um



dann schließlich der Kommerzialisierung zugeführt zu werden. Seine Vorteile: Es ist wartungsarm, flexibel auf einem Schiff installierbar, kann mehr und kleinere Ziele erkennen und verfolgen als konventionelle Radarsysteme, arbeitet mit geringer Sendeleistung und ist zu vergleichbaren Kosten herstellbar wie bisherige Systeme.

Der Trend zum Software-definierten Radar eröffnet eine Vielzahl von Adaptionmöglichkeiten, etwa im Automobilbereich. So werden zukünftige kognitive Radarsysteme in der Lage sein Betriebsparameter und Wellenform an die Umgebung anzupassen: Multifunktionale Sensoren, die Nah- und Fernbereich abdecken, zur Fußgängererkennung eingesetzt werden und neben der Radarfunktion auch *Car-to-Car* Kommunikationsaufgaben übernehmen, sind in greifbare Nähe gerückt. Innovative Anwendungen, etwa im Bereich des Autonomen Fahrens, werden zunehmend auf intelligente Sensorik zugreifen und von adaptiver Signalverarbeitung profitieren.

Beim Aufbau von kostengünstigen, kundenspezifischen Systemen hat das Fraunhofer FHR neue Akzente gesetzt: Dank seiner Kompetenz im Bereich der Silizium-Germanium-Halbleitertechnologie (SiGe) kann es kostengünstig hochintegrierte Komponenten entwerfen. In Kombination mit den am Fraunhofer FHR entwickelten Technologien, Verfahren und Systemen können so neue, innovative Anwendungsmöglichkeiten in vielen Bereichen erschlossen werden. Ziel des Institutes ist es, das Verbesserungspotenzial von Produkten zu heben und Mehrwert zu schaffen.



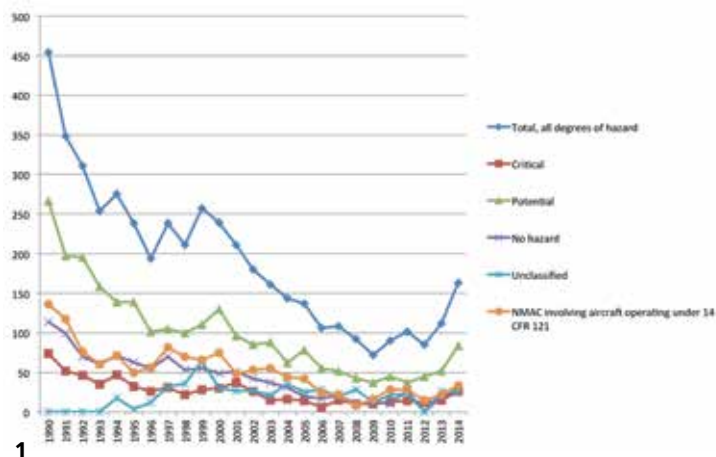
Geschäftsfeldsprecher Verkehr:

**Dr.-Ing.**

**ANDREAS DANKLMAYER**

Tel. +49 228 9435-350

[andreas.danklmayer@fhr.fraunhofer.de](mailto:andreas.danklmayer@fhr.fraunhofer.de)



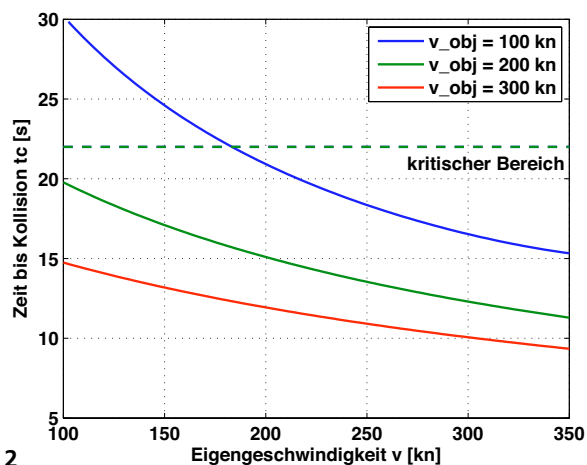
## SENSE AND AVOID-RADARSYSTEME FÜR DIE SICHERHEIT IM LUFTRAUM

Radarsensoren können die Sicherheit von Luftfahrzeugen, auch unter schwierigen Sichtverhältnissen, erhöhen. Vor allem unbemannte Flugsysteme benötigen sogenannte *Sense and Avoid*-Systeme, die mögliche Kollisionen erkennen und vermeiden sollen.

Das Flugzeug ist statistisch gesehen eines der sichersten Verkehrsmittel. Die deutsche Luftfahrt erweitert ihre Sicherheitsmaßnahmen ständig, um die hohen Sicherheitsstandards auch in Zukunft zu halten. Angesichts einer stetig steigenden Anzahl von Passagieren (2001: 140 Mio, 2013: 202 Mio) und Flugbewegungen ist dies eine komplexe Aufgabe.

Mit zunehmender Verkehrsdichte und Geschwindigkeit der Flugzeuge steigt auch das Risiko von Kollisionen. Eine aktuelle Untersuchung des US Department of Transportation im amerikanischen Luftraum zeigt, dass die Anzahl registrierter Beinahe-Unfälle (engl. *Near Mid-Air Collision NMAC*) in den letzten Jahren wieder zunimmt (Abb. 1). Seit mehreren Jahrzehnten sinkend, lag die Gesamtzahl gemeldeter Vorfälle noch in 2009 mit weniger als 100 auf historischem Rekordtief. 2014 stieg sie wieder auf mehr als 150 an. Diese Begegnungen sind nicht nur auf schlechte Witterungsverhältnisse zurückzuführen. Die *Aircraft Owners and Pilots Association AOPA* schätzt, dass sich mehr als 80% der Zusammenstöße im kontrollierten Luftraum unter günstigen Sichtverhältnissen (VFR) in der Nähe von Flughäfen ereignen. Viele Unfälle könnten durch zusätzliche Sensoren vermieden werden, die eine drohende Kollision rechtzeitig erkennen und Piloten entweder warnen oder selbständig Ausweichmanöver einleiten können. Für solche Frühwarnsysteme, die mit dem Begriff *Sense and Avoid* bezeichnet werden, sind Radarsensoren hervorragend geeignet. Sie erfüllen die speziellen Anforderungen bezüglich Reichweite, Blickwinkelbereich, Auflösung und Genauigkeit zu vergleichsweise geringen Kosten. Gleichzeitig arbeiten Radarsysteme im Gegensatz zu optischen Sensoren auch bei Dunkelheit und unter ungünstigen Witterungsbedingungen.

Bei unbemannten Luftsyste men, z. B. ferngesteuerten (engl. *Remotely Piloted Air Systems RPAS*) oder autonom fliegenden (engl. *Unmanned Aerial System UAS*) Systemen, ist der Einsatz solcher *Sense and Avoid*-Radare noch wichtiger: Nach einer Studie des *Air Force Research Laboratory (AFRL)* aus dem Jahr 2002 kann ein Pilot (im Flugzeug oder – bei Fernsteuerung – am



2



3

Boden) unter ungünstigen Bedingungen ein entgegenkommendes Flugzeug auf Kollisionskurs erst in einer Entfernung von rund 3 km entdecken, benötigt dann aber noch mindestens 20 bis 22 Sekunden, um angemessen zu reagieren und eine wirksame Kursänderung zu veranlassen. Bild 2 zeigt am Beispiel für ein unter einem Blickwinkel von 10° entgegenkommendes Objekt, dass – in Abhängigkeit von der eigenen Geschwindigkeit und der des Unfallgegners – diese Reaktionszeit in vielen Fällen nicht zur Verfügung steht. Wenn das entgegenkommende Objekt eine Geschwindigkeit von 100 kn (ca. 200 km/h) besitzt, bleibt bei einer Eigengeschwindigkeit unter 200 kn noch eine angemessene Zeit bis zur Kollision. Bei einer Geschwindigkeit des Gegners von 200 kn oder mehr besteht in diesem Szenario keine Möglichkeit mehr für eine angemessene Ausweichreaktion.

Die Forderung, die Nutzung von UAS mindestens genauso sicher zu machen, wie den Betrieb bemannter Luftfahrzeuge, ist offensichtlich. In Ihrer Roadmap zur Integration unbemannter Systeme in den zivilen Luftraum aus dem Jahr 2013 erklärt die Federal Aviation Administration (FAA) des U.S. Department of Transportation, dass unbemannte Fahrzeuge mit zusätzlichen Sicherheitssystemen ausgerüstet sein müssen, die einen dem »See and Avoid«-Betrieb bemannter Systeme entsprechenden Sicherheitsstandard gewährleisten und stellt gleichzeitig fest, dass heutige Sense and Avoid-Systeme in dieser Hinsicht technisch unzureichend sind.

Der Einsatz von Radarsensoren aus Fahrerassistenzsystemen der Automobilindustrie als *Sense and Avoid*-Sensoren ist naheliegend und wird vielfach diskutiert, scheitert aber in der Praxis an den unterschiedlichen Spezifikationen und geringeren Reichweiten der Kfz-Radare. Hier liegt eine Chance für das Fraunhofer FHR, denn einige der hier entwickelten Radarsysteme sind bereits für den Einsatz in Luftsystemen geeignet. Mit Hilfe der Millimeterwellenkomponenten der SUMATRA-Baureihe können leistungsfähige Sensoren mit der erforderlichen Reichweite aufgebaut werden. Die ursprünglich für SAR-Systeme entwickelten und auf dem FMCW-Prinzip basierenden Geräte arbeiten bei 35 oder 94 GHz, erfüllen viele der Anforderungen schon heute und zeichnen sich durch niedrige Kosten, geringes Gewicht und kompakte Abmessungen aus. In Kombination mit speziell angepassten Antennen in mechanisch gesteuerter oder mehrkanaliger Anordnung können sie ein neues Anwendungsfeld erschließen. Bild 3 zeigt den SUMATRA-Sensor für 94 GHz, der mechanisch sehr kompakt und leicht ist.

Vor dem Hintergrund der Entwicklung autonomer bzw. teilautonomer Fahrzeuge werden *Sense and Avoid*-Systeme zukünftig auch in anderen Verkehrsbereichen benötigt, z. B. im Straßen-, Schienen- oder Schiffsverkehr. Die Technologie des Fraunhofer FHR kann dazu beitragen, diese Systeme ein Stück sicherer zu machen.

1 Anzahl registrierter Beinahe-Kollisionen (NMAC) im Luftraum der USA von 1990-2014, Quelle: United States Department of Transportation.

2 Erwartete Zeit bis zur Kollision bei einer Näherung mit unterschiedlichen Objektgeschwindigkeiten als Funktion der Eigengeschwindigkeit (unter Blickwinkel 15°).

3 SUMATRA 94 GHz Radar in zweikanaliger Ausführung mit SAR-Antennen.

Dr.-Ing. Peter Knott  
Tel. +49 228 9435-235  
peter.knott@fhr.fraunhofer.de



## AUTONOMES FAHREN DURCH RADAR

Autonomes Fahren verspricht in naher Zukunft unsere Art der Mobilität zu verändern. Eine Vision, die erst durch eine neue Generation von Radar-Sensorik richtig ermöglicht wird.

### Filme prägten die Vision der intelligenten Autos

Als 1968 der erste Herbie-Film »Ein toller Käfer« in die Kinos kam machte die Unterhaltungsindustrie vor wie intelligente Automobile zukünftig aussehen können. Spätestens in den 1980er Jahren zeigte dann K.I.T.T in »Knight Rider«, wie überaus praktisch ein Gefährt sein kann, das uns nicht nur von A nach B bewegt, sondern uns auch in allen Lebenslagen unterstützt. So schön solche Visionen damals waren, so weit waren sie damals auch der Wirklichkeit voraus.

### Zahlreiche Assistenzsysteme automatisieren schrittweise das Fahren

In den letzten Jahrzehnten wurden schrittweise immer mehr der Aufgaben des Fahrers durch moderne Technik übernommen. So übernehmen Automatik-Getriebe das Schalten, Tempomaten können teilweise das Gas-Pedal übernehmen, Spurhalte-Assistenten können uns bereits das Lenken abnehmen. Außerdem ermöglichen Ultraschall-Sensoren bereits heute das vollautomatische Einparken und Radarsensoren unterstützen uns nicht nur dabei, auf der eigenen Spur den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu regeln oder mit einer Notbremsung kurz vor einem Aufprall, sondern sie können uns auch beim Spurwechsel helfen, automatisch andere Fahrzeuge im toten Winkel zu entdecken. Dazu weiß das Auto dank der *onboard*-Navigationssysteme wohin wir möchten, auf welche Spur wir fahren sollen und wann wir abbiegen müssen. Die Kombination aus all diesen Sensoriken und Assistenten unterstützt uns schon heute so gut beim Fahren, dass es scheinbar nur noch ein kleiner Schritt bis zum Autonomen Fahren ist.

### Eine Revolution aus dem Silicon Valley?

Die etablierten Automobilkonzerne mussten sich bereits im Jahr 2012 vormachen lassen, dass die nächste Revolution der Mobilität aus dem Silicon Valley kommen könnte. Damals war Google der erste Konzern, der öffentlichkeitswirksam Autonome Fahrzeuge auf die Straßen brachte. Schnell schlossen sich weitere IT-Konzerne wie Apple und Tesla an. Natürlich konnten diese Konzerne weg mit ihrer erprobten Kompetenz von Software und Methoden der





künstlichen Intelligenz punkten. Vielleicht noch entscheidender war, dass man in der Branche gewohnt ist, Produkte bereits in einer frühen Phase an den Kunden zu bringen und die Software dann stetig mit Rückmeldungen der Kunden weiterzuentwickeln. Tesla war sogar jüngst so mutig, per Software-Update bei bereits verkaufte Autos das Autonome Fahren nachzurüsten, doch hier mussten die Elektroauto-Pioniere bald einen Rückschlag einstecken: Die Angst vor unkontrollierten Fahrzeugen wurde durch Online-Videos angefeuert und schlussendlich mussten die Kalifornier die Software-Option wieder deaktivieren.

### **100-prozentige Verlässlichkeit notwendig**

Da im Straßenverkehr jeder kleinste Fehler direkt Menschenleben kosten kann, müssen Autonome Fahrzeuge ein Maß an Verlässlichkeit mitbringen, das weit über gewöhnliche Unterhaltungselektronik und auch etablierte Fahr-Assistenzsysteme hinausgeht. Für Software und Elektronik hat die Automobilindustrie schon seit Jahren vorgemacht, wie ausfallsicher auch komplexeste Systeme sein können, aber die heutige Sensorik ist nur ausgelegt, um in wenigen überschaubaren Situationen einzugreifen. Für das vollautonome Fahren ist ein deutlich gesteigertes Maß an Verlässlichkeit gefordert. So setzt beispielsweise Google in seinen selbstfahrenden Wagen einen Laser-Scanner ein, der das komplette Umfeld des Fahrzeugs in 360° überwacht. Diese Art der Sensorik liefert zwar unter guten Bedingungen ausreichend Informationen zur Umfeld-Erfassung, kostet aber alleine bereits mehr als ein gut ausgestatteter Sportwagen und ist auch noch extrem witterungsabhängig. Im sonnenverwöhnten Silicon Valley kann ein Laser-Scanner zwar fast dauerhaft eingesetzt werden, aber bei starkem Regen, Spritzwasser, Schneefall oder Nebel ist der Sensor blind und die Gefahr vor Fehlentscheidungen steigt enorm.

### **Radar ist unerlässliche Sensorik**

Die Radartechnologie spielt seit jeher ihre Vorteile da aus, wo optische Sensoren an ihre Grenzen kommen. Für das Autonome Fahren ist die witterungsunabhängige, verlässliche Detektion von Fahrzeugen und Objekten durch Radarsensoren ein unerlässlicher Beitrag zur Erfassung des Umfelds. Etablierte Radar-Sensoren für Assistenzsysteme leuchten mit einer begrenzten Anzahl von Antennen-Beams nach vorne und in den toten Winkel, aber zur verbesserten Erfassung muss der Sichtbereich zukünftig deutlich steigen. So bringt das Autonome Fahren viele spannende Fragestellungen mit sich, die vielleicht schon sehr bald durch die nächste Generation der Radarsensoren gelöst werden können.

**1** *Ein Fahrzeug aus der Flotte von Googles selbstfahrenden Autos. Seit Einführung dieses Modells in 2014 fahren nun 20 dieser Fahrzeuge wöchentlich circa 16.000 Kilometer autonom im öffentlichen Straßenverkehr.*

**2** *Auch bei schwierigen Wetterbedingungen helfen Radarsensoren beim sicheren Fahren und ermöglichen zukünftig das vollautonome Fahren.*

*Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl  
Tel. +49 228 9435-249  
nils.pohl@  
fhr.fraunhofer.de*

# UMWELT



*Die landwirtschaftliche Nutzung von Ackerflächen in Kambodscha birgt ein großes Risiko, wenn nicht sicher ist, ob dort noch Landminen vergraben sind.*



An aerial photograph of a rural landscape. The top portion of the image shows a bright green header. Below it, the landscape is a patchwork of agricultural fields. Some fields are harvested, showing distinct brown and tan patterns of furrows and crop residue. Other fields are lush green, likely pastures or active crops. Scattered throughout the landscape are clusters of trees and small groves. The overall scene is a typical agricultural region.

## NATÜRLICH MIT HERTZ

Im Geschäftsfeld Umwelt untersuchen die Forscher des Fraunhofer FHR die Einsatzmöglichkeiten von Radar rund um den Themenkomplex Erneuerbare Energien und Umweltmonitoring.

Die Energiewende in Deutschland nimmt langsam, aber kontinuierlich Fahrt auf. Überall entstehen neue Windparks, denn Wind soll der neue Energieversorger werden. Doch an Land (*on-shore*) wie auf dem Meer (*off-shore*) gibt es nicht nur Befürworter dieser Art grünen Strom zu erzeugen. Die Planer und Betreiber von Windparks müssen bereits in der Antragsphase nachweisen, dass der geplante Park umweltverträglich ist. Hierbei kann Radar helfen.

Der Sensor Radar ist licht- und wetterunabhängig; er funktioniert bei Tag und Nacht, Regen und Nebel. Mit Radar können Objekte auch über große Entfernungen mit großer Genauigkeit detektiert und aufgelöst, das heißt von anderen Objekten unterschieden werden. Der Sensor kann auf Flugzeuge wie auch auf Vögel angewendet werden. Somit lassen sich nicht nur die rot blinkenden Warnleuchten auf den Windrädern bedarfsgerecht ein- und ausschalten, sondern auch die Rotoren bei Annäherung eines Vogelschwarms anhalten. Mit Radar lässt sich also erfassen, was außerhalb und innerhalb eines Windparks vor sich geht – auch der Zustand der Anlagen kann ergänzend zu bereits bestehenden Sensoren überwacht werden.

Die Herausforderung für die Wissenschaftler hierbei ist, mit möglichst geringer Leistung kleine Objekte in möglichst großer Entfernung aufzuspüren – manchmal auch ohne eigene Sendeleistung. Dann setzen die Forscher auf Passivradar. Hierbei nutzen sie die Signale von Fernsehstationen oder Mobilfunkmasten als Sender und werten nur die Echos aus.

### Kein Kunde ist wie der andere

Das Fraunhofer FHR untersucht für seine Kunden in Machbarkeitsstudien die Durchführbarkeit eines Projektes. Das Institut begleitet seine Partner von der Entwicklung eines Systemkonzepts bis zum fertigen Prototypen. Es verfügt dabei

nicht nur über das nötige theoretische Know-how sondern auch über die Expertise, solche Systeme in entsprechende Hardware umzusetzen. In aufwändigen Modellen und Simulationen optimieren die Forscher ihr Konzept, ehe sie sich an den Bau des Systems begeben. Die Besonderheit ist, dass die Wissenschaftler die Systeme einzig für ihre Aufgabe entwerfen und nicht bloß Geräte von der Stange an eine Applikation anpassen. Gleichzeitig integrieren die Wissenschaftler möglichst viele Massenmarkt-Komponenten, um die Kosten so niedrig wie möglich zu halten. Außerdem entwickeln sie für jedes System einen speziell angepassten Algorithmus zur Signalverarbeitung – das Herzstück eines jeden Radarsystems.

Für die Erprobung neuer Algorithmen, Verfahren und Komponenten verfügt das Fraunhofer FHR über einen umfassenden Gerätepark an aktiven wie passiven Experimentalsystemen und Prototypen. Zu seinem Netzwerk gehören Partner innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft sowie natürlich Industrieunternehmen. So können die Wissenschaftler Untersuchungen auch außerhalb des Labors unter Realbedingungen durchführen. Durch diese einzigartige Kombination von Fachwissen und Systemkompetenz erhält der Kunde stets die für ihn beste, weil maßgeschneiderte, Lösung.

### Spektrales Sehen

Zwar lässt sich mit Radar auch der Reifegrad von Feldfrüchten feststellen, doch für eine ganzheitliche Erfassung der Umweltparameter sind mehr Daten notwendig als sich mit Hochfrequenztechnik allein gewinnen lassen. Am Anwendungszentrum für multimodale und luftgestützte Sensorik (AMLS), eine Kooperation des Fraunhofer FHR und der Hochschule Koblenz, erforscht eine Gruppe die Fusion von Radar und bildgebenden Sensoren für umfassende Untersuchungen von Vegetation und Erdoberfläche aus der Luft. Die Anwendungsmöglichkeiten hierfür sind ebenfalls vielfältig: von der Erfassung des Zustands



von Agrar- und Waldflächen über die Messung der Gewässerqualität bis hin zur Überwachung und Dokumentation von Naturschutzmaßnahmen.

Dazu nutzt das AMLS einen speziell angepassten hyperspektralen Snapshot Imager. Der hyperspektrale Ansatz, der ein kontinuierliches Wellenlängen-Spektrum im Sichtbaren und nahen Infrarot liefert, wird zu Forschungszwecken eingesetzt. Dabei werden Vegetationsindices (z. B. der NDVI) aus den Spektraldaten – und nicht nur aus Radar – abgeleitet, um so Rückschlüsse auf den Zustand der Pflanzen ziehen zu können. In Kooperation mit einem Partner wird die Technik auf sehr großen Agrarflächen in Südafrika erprobt und weiterentwickelt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse soll ein anwendungsspezifisches multispektrales System entstehen, das räumlich hochaufgelöst diskrete Wellenlängen spezifisch erfasst und auswertet.

Ein weiteres luftgestütztes Zwei-Kamerasystem zur thermalen Bildgebung großer Gebiete wurde in diesem Jahr ebenfalls aufgebaut und erfolgreich getestet. Das System besteht aus einer Kamera im langwelligen Infrarot (LWIR) zur Detektion der abgestrahlten Wärme. Diese Daten werden mit räumlichen Informationen der zweiten hochauflösenden panchromatischen Kamera ergänzt. Durch diese zweite Kamera werden eine präzise Georeferenzierung sowie eine Mosaikierung der Bilder ermöglicht. Das System kommt bei einer umfangreichen Befliegung an der Elbe zu Einsatz. Weitere Anwendungen in den Bereichen Landwirtschaft, Industrieanlagen sowie Versorgungstrassen werden zurzeit vorbereitet.



Geschäftsfeldsprecher Umwelt:  
**Dipl.-Ing.**  
**HEINER KUSCHEL**  
Tel. +49 228 9435-389  
heiner.kuschel@fhr.fraunhofer.de



## LANDMINEN-DETEKTION IN KAMBODSCHA

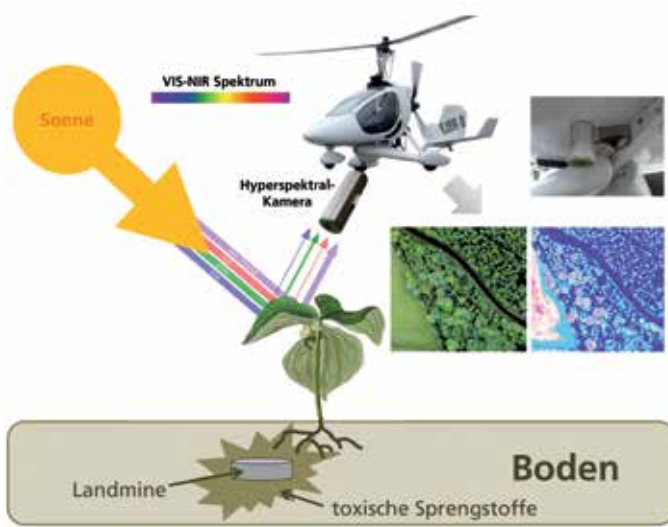
Die Wissenschaftler des Fraunhofer AMLS untersuchen luftgestützte Sensorik. Es entstand die Idee, den von ihnen entwickelten Hyperspektral-Sensor zur Detektion vergrabener Landminen einzusetzen. Im November 2015 flog das Team nach Kambodscha, um die dortigen Hilfsorganisationen zu unterstützen und erste Erprobungen durchzuführen.

Alles begann mit dem Fraunhofer-Ideenwettbewerb »Projekte für Menschen« im Rahmen des Netzwerk-Symposiums 2015. Ziel des Wettbewerbs war es, »Fraunhofer-Kompetenzen und -Technologien zu nutzen, um soziale Problemstellungen zu lösen«. Aufgrund persönlicher Kontakte zur Hilfsorganisation Kleine Hilfsaktion e.V. kam Kambodscha in den Fokus der AMLS-Gruppe: Das Land leidet auch fast 20 Jahre nach Kriegsende noch immer unter den Folgen des etwa 30-jährigen Bürgerkriegs (1970-1998). Es ist eines der ärmsten Länder der Welt und die Räumung der im Krieg vergrabenen Minen dauert noch immer an. Doch typischerweise sind über die Hälfte der als minengefährdet gesperrten Bereiche gar nicht mit Minen belastet. Mit Messflügen soll die neue Technik helfen, Areale zu klassifizieren, so dass Räumungsteams zielgerichteter eingesetzt werden können. Zudem könnten komplett unauffällige Flächen früher wieder freigegeben werden.

Die vom AMLS entwickelte Projektidee beruht darauf, die vorhandene luftgestützte, multi- und hyperspektrale Bildgebung zur Detektion bzw. Klassifizierung von Minenfeldern zu nutzen. Ursprünglich wurde die Technologie für die Pflanzenbeobachtung im Agrarbereich entwickelt. Das Messprinzip nutzt hierbei Pflanzen als Bioindikatoren für im Boden befindliche Schadstoffe. Die in der Regel mehr als 30 Jahre alten Landminen geben ihre Sprengstoffe im Laufe der Zeit in den umliegenden Boden ab. Diese werden von Pflanzen aufgenommen. Dadurch wird deren Stoffwechsel gestört, was wiederum zu einem veränderten Reflexionsverhalten des Sonnenlichtes führt. Dies kann die spektrale Sensorik des AMLS detektieren. Prinzipiell konnte das Messprinzip in den USA im Labor bestätigt werden. Eine Feldmessung unter Realbedingungen hatte bis dahin aber noch nicht stattgefunden.

Das beim Wettbewerb eingereichte Projektpapier überzeugte die Juroren und das AMLS wurde ins Finale der letzten acht Kandidaten im Januar 2015 nach München eingeladen. Dort präsentierte das Team das Projekt im Rahmen eines Elevator-Pitches dem Fachpublikum des Netzwerk-Symposiums. Erfreulicherweise erreichte die Forschergruppe dabei den 2. Platz - nur 1,6 Prozentpunkte hinter dem Erstplatzierten, was mit einer Fördersumme in Höhe von 25.000

2



Euro verbunden war. Ein zusätzliches persönliches Preisgeld von 3.000 Euro wurde dem Kleinen Hilfsaktion e.V. gespendet.

Nach dem Erfolg beim Wettbewerb war das Team entschlossen, eine Messflugkampagne in Kambodscha durchzuführen. Da bereits der Transport des Tragschraubers nach Kambodscha das Budget erschöpfen würde, galt es, ein geeignetes Ultraleicht-Fluggerät vor Ort zu finden. Fündig wurden die Forscher dank Internet-Recherche: Sie stießen auf einen Piloten, der mit einem Trike – einer Art motorisiertem Hängegleiter – Touristen über die Tempelanlagen in Kambodscha fliegt. Eine gemeinsame Kampagne wurde für November 2015 vereinbart. Im November hat die Vegetation nach der Regenzeit ihre physiologisch aktivste Phase, was zu besseren Messungen führt. Für die Anpassung der AMLS-Technik an das Trike arbeiteten die Forscher mit einem baugleichen Modell aus den Niederlanden. Die Besitzer des Trikes, das Microlight Aero Team am Flugplatz in Budel, unterstützen die Mission der AMLS-Gruppe: Sie ließen die Forscher nicht nur das Fluggerät detailliert anschauen und zerlegen, sie ermöglichten auch kostenfreie Testflüge.

Bei verschiedenen Gesprächen während der Projektvorbereitung wurde das Team auch immer wieder an Oberst a.D. Peter Willers verwiesen, der sechs Jahre lang für das Auswärtige Amt einen Minenräumzug in Kambodscha geleitet hat. Glücklicher Zufall: Der Experte lebt gerade einmal 20 km vom RheinAhrCampus entfernt und war umgehend für das Projekt zu begeistern. Dank seiner guten Kontakte konnte Peter Willers in Kambodscha nicht nur viele wichtige Behörden-Türen öffnen, er hat sich auch bereit erklärt, neben Roland Debschütz vom Kleinen Hilfsaktion e.V. als Berater mit nach Kambodscha zu reisen, was sich als extrem wichtig erweisen sollte.

Während der Messkampagne konnten die Forscher erfolgreich über 40 GB Messdaten sammeln, welche sie nun auswerten müssen. Die Flüge in Kambodscha haben in einer Region stattgefunden, in der aktuell Minen-Räumungen durchgeführt werden. Diese Räumungen sind in einigen Monaten abgeschlossen. Relevant hierbei ist, dass das Team anschließend die endgültigen Räumkarten erhalten wird, die zeigen, wo tatsächlich Minen gefunden wurden. Durch Vergleich mit den Ergebnissen der Befliegungen wollen die Wissenschaftler die wichtigen spektralen Indikatoren für den Landminen-induzierten Pflanzenstress identifizieren. Details der Reise im November 2015 sind als Blog ([amls-cambodia.blogspot.de](http://amls-cambodia.blogspot.de)) im Internet nachzulesen.

1 Anstelle des Tragschraubers setzte das AMLS in Kambodscha ein Trike ein.

2 Das Messprinzip: Das von den Pflanzen reflektierte Sonnenlicht wird aus der Luft spektral aufgelöst aufgezeichnet.

Prof. Dr. rer. nat.  
Jens Bongartz  
Tel. +49 2642 932-427  
[jens.bongartz@fhr.fraunhofer.de](mailto:jens.bongartz@fhr.fraunhofer.de)

# SICHERHEIT



*Das Fraunhofer FHR untersucht mehrere Ansätze zur Detektion von kompakten unbemannten Fluggeräten (UAV).*



# SENSOREN FÜR SICHERHEIT UND SCHUTZ

Moderne Städte fordern neuartige Infrastruktur- und Sicherheitskonzepte. Ein Schwerpunkt des Fraunhofer FHR liegt daher auf der Erforschung von kompakten und autonomen Sensoranwendungen zur Unterstützung von Polizei und Rettungskräften.



Großveranstaltungen, Verkehrsknotenpunkte, öffentliche Plätze – Orte, an denen Sicherheit ein essenzielles Element ist. Bei der Erforschung dieser Thematik setzt das Fraunhofer FHR auf seine umfassende Expertise in der Hochfrequenz- und Radartechnik. Denn mittels Radar können Objekte berührungslos erkannt und durchleuchtet werden.

Die so erzeugten Bilder helfen Einsatzkräften, sich ein umfassendes Lagebild zu machen. Insbesondere beim Schutz großer und unübersichtlicher Areale (z. B. bei Großdemonstrationen oder Volksfesten) setzt die Polizei daher zunehmend auf mobile Sensorsysteme. Insbesondere ferngesteuerte Fluggeräte, sogenannte UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), spielen eine immer größere Rolle.

Derzeit untersuchen die Wissenschaftler am Fraunhofer FHR abbildende Radar-Konzepte für solche luftgetragenen Systeme. Leicht, energieeffizient und günstig müssen sie sein. Erste Radare für UAVs, die mehr als fünf Kilogramm Zuladung tragen können, haben die Forscher bereits entwickelt. Damit lassen sich schnell und einfach Aufnahmen von urbanem Gelände oder Katastrophenlagen machen, beispielsweise unter Nutzung des SAR-Prinzips. Neben dem Einsatz bereits erforschter Abbildungsverfahren vollzieht das FHR zudem einen technologischen Wandel, hin zu kompakten MIMO-Radaren für die 3D-Abbildung mit kleineren UAVs.

### Sensoranwendungen für anspruchsvolle Umgebungsbedingungen

Die Forscher beleuchten aber auch die Kehrseite der agilen Fluggeräte: UAVs sind verhältnismäßig preiswert und einfach zu beschaffen. Gerade auf Großveranstaltungen können selbst die kleinsten von ihnen schnell zur Gefahr werden. Wie ein Trojanisches Pferd können sie recht unbemerkt gefährliche Güter in Menschenmengen oder zu ausgesuchten Einzelpersonen

transportieren, um dann dort Schaden anzurichten. Dieses Potenzial wurde beispielsweise deutlich, als Kleindrohnen strategisch sensible Bereiche in Paris überflogen oder der Einsatz einer Drohne zum Abbruch eines EM-Qualifikationsspiels führte. Aber auch die Prävention von Wirtschaftsspionage sowie Kollisionsvermeidung sind aktuelle Fragestellungen für die Forscher.

Die Wissenschaftler untersuchen verschiedene Ansätze – vom Real Apertur Radar über Phased Arrays bis hin zu MIMO-Arrays – um unautorisierte Fluggeräte in einem Luftraum frühzeitig zu entdecken. Das Herzstück eines jeden Systems ist die geschickte Kombination physikalischer Prinzipien mit ausgereifter Signalverarbeitung. So können mittels Radar nicht nur Bilder einer Szene gemacht und Objekte detektiert werden, es lassen sich auch zeitliche Veränderungen, wie beispielsweise Bewegungen von Trümmerteilen, erfassen und analysieren. Darüber hinaus durchdringen Millimeterwellen Trübungen der Luft, beispielsweise durch Rauch oder Staub. Sie eignen sich somit auch für den Einsatz an nur schwer zugänglichen Unglücksorten mit widrigen Bedingungen, wie sie nach einem Hangrutsch oder einem Unfall in einem Verkehrstunnel herrschen. Mit Radar können Karten und Lagebilder erstellt werden, die von einem mobilen Roboter an die Einsatzkräfte übermittelt werden. So stehen diese wertvollen Informationen für die Einsatzplanung zur Verfügung.

Die Wissenschaftler verfügen über mehr als 55 Jahre Erfahrung im Bereich der Hochfrequenz-Technologie, was das Fraunhofer FHR zu einem der führenden Radarforschungsinstitute in ganz Europa macht. Doch wissen die Forscher: In Zukunft sind Multisensor-Konzepte gefragt. Elektronische Spürnasen und künstliche Augen können unzählige Parameter erfassen: Gibt es Verletzte? Sind bei einem Brand giftige Dämpfe entstanden? Besteht Einsturzgefahr?

## Lösungen: Funktional und wirtschaftlich

Die Informationen, die mit Radar gewonnen werden, lassen sich mit Hilfe weiterer Sensordaten zu umfassenden Lagebildern fusionieren. Darum kennen die Forscher am Fraunhofer FHR auch die Stärken anderer Sensorsysteme und entwickeln insbesondere für autonom agierende Roboter mit ihren Partnern Systeme, die nahezu das gesamte Spektrum an Sensorik abdecken. Ihr besonderes Augenmerk liegt neben der Performance auch auf der Wirtschaftlichkeit eines Systems.

Auf Basis von Silizium-Germanium (kurz SiGe) lassen sich kostengünstig hochintegrierte Chips in der Massenproduktion herstellen. In Kombination mit dem MIMO-Prinzip sind so preiswerte, aber effiziente Systeme realisierbar, die exakt auf ihren Einsatzzweck abgestimmt sind. Das Fraunhofer FHR verfügt neben dem nötigen Verständnis der technischen Grundlagen auch über das Wissen und die Ressourcen, solche Systeme zu entwerfen und zu bauen. Dabei kommen je nach Aufgabenstellung passive Verfahren wie die Radiometrie oder aktive Hochfrequenzsensoren zum Einsatz. Darum deckt das Institut das gesamte Spektrum des erforderlichen Know-hows ab. Seinen Kunden steht das Fraunhofer FHR aber nicht nur als Forschungsdienstleister, sondern auch als kompetenter Berater zur Seite. Durch den Aufbau einer SiGe-Kompetenz am Institut kann die Entwicklung neuer Systeme in Zukunft bereits beim Chipdesign beginnen und das Fraunhofer FHR so seinen Partnern alles aus einer Hand anbieten.

Ziel der Forschungsarbeiten am Fraunhofer FHR ist, auf Basis der Radar- und Hochfrequenztechnologie Unterstützungssysteme zu entwickeln, um Einsatz- und Rettungskräften bei ihrer riskanten Arbeit mehr Schutz bieten zu können und das Alltagsrisiko von Menschen zu reduzieren. Diese Systeme kommen in unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz und machen das Verborgene sichtbar.



Geschäftsfeldsprecher Sicherheit:

**M. Sc.**

**STEFAN A. LANG**

Tel. +49 228 9435-782

[stefan.lang@fhr.fraunhofer.de](mailto:stefan.lang@fhr.fraunhofer.de)



## ASSISTENZSENSOREN FÜR DIE ROBOTIK

Oftmals treffen Einsatzkräfte auf unbekannte Unglücksorte und haben keine Informationen über die aktuelle Lage. Abhilfe schaffen hier radarbasierte Assistenzsensoren für Roboter. Sie versorgen die Einsatzkräfte mit vielfältigen Informationen und erzeugen so ein komplexes Lagebild des Unglücks.

### Welche Anwendungsfelder gibt es für Radar in der Robotik?

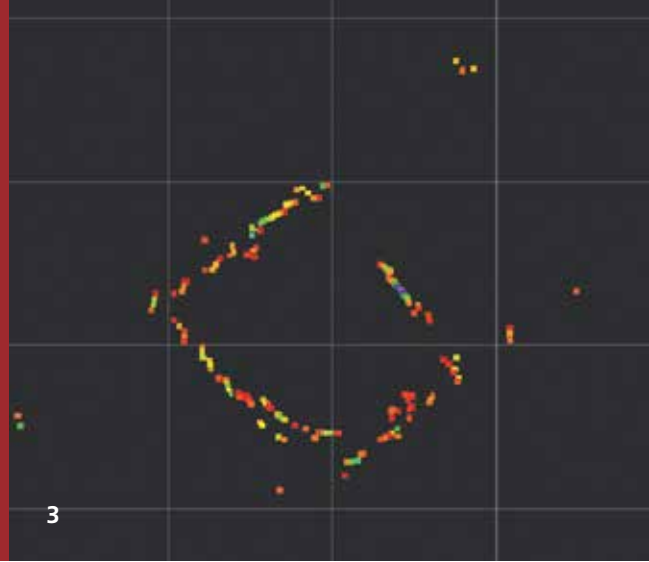
Wenn Einsatz- und Rettungskräfte am Unglücksort eintreffen, müssen sie so schnell wie möglich eine Vielzahl an Informationen gewinnen, um sich ein vollständiges Lagebild der Situation zu erarbeiten. Doch jeder Schadensfall erfordert unterschiedliche Sensoren zur Einschätzung der Lage. Es gibt einen eigenen Forschungsbereich für Roboter, der sich mit solchen Fragestellungen auseinandersetzt. Das Fraunhofer FHR steuert hierzu radarbasierte Assistenzsensoren mit einem breiten Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten bei.

Nimmt man beispielsweise ein brennendes Labor an, so ist dieser Ort schnell durch die Verbrennungsvorgänge mit Rauch gefüllt und die Situation lässt sich auf Distanz nicht mehr erfassen. Die Einschätzung mit Hilfe von Robotern ist hier ein adäquates Mittel der Wahl. Die robotischen Helfer sollen neben der manuellen Fahrt auf Sicht in Zukunft auch autonom unterwegs sein und sich selbst mit den dazu notwendigen Informationen versorgen. Dabei stößt ein Roboter bei Wahrnehmung seiner Umgebung mit herkömmlicher optischer Technik an seine Grenzen, da veruübte Rauchschwaden die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im optischen Spektrum stark beeinträchtigen. Die radarbasierten Sensoren können hierbei unterschiedlichste Informationen generieren wie beispielsweise eine 360°-Rundumsicht oder eine 3D-Abbildung der Szene vor dem Roboter. Diese beiden Themen adressieren wir aktuell in dem EU-geförderten Projekt *SmokeBot* (Horizont 2020, Fördernr. 645101).

### Warum kompliziert, wenn es auch einfach geht?

Wenn ein Kunde sich mit einer spezifischen Problemstellung an uns wendet, stellen wir uns am Fraunhofer FHR im Analyseprozess immer zuerst die Frage, wie die einfachste Lösung für diese Problemstellung aussieht. Dabei vernachlässigen wir jedoch nie den Fokus auf hervorragende Ergebnisqualität in Hardware und Bildqualität und finden immer die optimale und ökonomische Technologielösung. Dadurch erzeugen wir einen hohen Mehrwert für unsere Kunden, die





sich dadurch mit ihren durch uns erarbeiteten Lösungen neu im Markt positionieren können. Dieses Vorgehen gilt für alle unsere Geschäftsfelder und Kernkompetenzen und dazu gehören auch die Assistenzsensoren für Roboter.

Ein schönes Beispiel hierfür ist die 360°-Rundumsicht der robotischen Helfer, die in einer unbekanntem Umgebung navigieren sollen. Kommt es zu der oben beschriebenen Nullsicht mit Optik, dann kann eine einfache, radarbasierte Sensorlösung die Navigation wieder möglich machen. Im konkreten Fall handelt es sich um ein Realapertur-basiertes FMCW-Radar bei 80 GHz, welches kontinuierlich mit 2.5 Umdrehungen pro Sekunde rotiert: Dabei wird ein 360°-Schnittbild um den Roboter erzeugt, welches die ihn umgebenden Objekte wie Möbel und Wände auch bei optisch eingeschränkter Sicht erfasst. Die enorme Bandbreite des FMCW-Radars von 25 GHz hilft hier ebenfalls dabei, die Konturen von Objekten hochgenau im Schnittbild zu vermessen. Durch dieses relativ einfache Konzept wird der Roboter in die Lage versetzt, selbstständig und mit einer hohen Updaterate Informationen über seine direkte Umgebung zu generieren – und das bei nahezu jeglichen Umgebungsbedingungen wie Rauch, Nebel oder Regen und tageslichtunabhängig. Die einfache Lösung steht hier im Vordergrund und ermöglicht so den Aufbau von kostengünstigen 360°-Rundumsichtsensoren.

### 3D-MIMO mit kompaktem Sensor!

Denken wir nun über eine dreidimensionale Abbildung nach, um neben der Navigation auch eine Aufklärung der Objekte am Unglücksort und eine Inspektion des Unglücksortes selbst zu ermöglichen, so ist eine komplexere Lösung gefordert. Hier steht eine schnelle Gewinnung des Bildes im Vordergrund, so dass auf mechanischen Konzepten beruhende Abbildungsverfahren wie Realapertur Radar (RAR) und Synthetisches Apertur Radar (SAR) nicht mehr angewendet werden können. In der logischen Schlussfolgerung bedeutet dies die Generierung einer neuen Technologie, die genau dieses Anwendungsfeld erschließt.

Derzeit erforscht das Fraunhofer FHR einen FMCW-MIMO-Array basierten Sensor bei 120 GHz, der die schnelle und dreidimensionale Einschätzung der Situation möglich macht. Aktuell befinden wir uns hier in der Evaluierungsphase der Array-Topologie. Dieser Art von Assistenzsensoren gehört eindeutig die Zukunft auf Grund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. Neben dem Einsatz auf bodengebundenen Robotern können diese auch mit unbemannten Flugrobotern genutzt werden und so Unglücksorte erkunden, die vorher nur äußerst beschwerlich oder gar nicht zugänglich waren.

- 1 *Roboter der Firma Tau-rob erkundet brennende Werkstatt.*
- 2 *360° abbildender Rundumsichtsensor.*
- 3 *Erkundung eines mit Möbeln gefüllten Raumes.*

*M. Sc. Stefan A. Lang  
Tel. +49 228 9435-782  
stefan.lang@  
fhr.fraunhofer.de*





kamen Mini- und Micro-UAS (Quadro- und Hexacopter) zum Einsatz. Beide Sensoren arbeiten nach dem FMCW-Prinzip (*Frequency Modulated Continuous Wave*) bei einer Mittenfrequenz von 94 GHz und mit einer Ausgangsleistung von 100 mW. Eine Radarbandbreite von bis zu 1 GHz ermöglicht eine Entfernungsauflösung von 15 cm. Die Bauform der Systeme wurde in Bezug auf größtmögliche Mobilität und Flexibilität optimiert. Das gilt im Besonderen für die geringe Leistungsaufnahme; zum Betrieb der Systeme reicht ein 12 V Autoanschluss aus. Die Abb. 2 zeigt das mechanisch starre vierkanalige MuRPS System, bei dem die Winkelablage in Azimut und Elevation nach dem Monopulsverfahren ermittelt wird. Das Frontend hat eine Größe von 200 x 180 x 230 mm<sup>3</sup> und eine Masse von ca. 3 kg. Beim SSRS handelt es sich um einen rotierenden Sensor, der mit einem kleinen Öffnungswinkel von 1,8° in Azimut-Richtung scannt. Eine Ablage in Elevation ist derzeit nicht möglich. Das Radarfrontend inklusive einer optischen Kamera ist in Abb. 3 dargestellt. Die Abmessungen betragen 265 x 265 x 100 mm<sup>3</sup> bei einer Masse von ca. 4,5 kg.

Die ursprünglich für den abstandsaktiven Schutz bzw. den Feldlagerschutz konzipierten Sensoren wurden für die neue Messaufgabe nur geringfügig modifiziert. Die Auswertung der Daten ergab, dass die Systeme bestens geeignet sind, mehrere Drohnen beider Typenklassen (Micro-, Mini-UAS) im Nahbereich bis etwa 150 m gleichzeitig zu detektieren und mit guter Präzision zu lokalisieren. Darüber hinaus bietet das SSRS-System die Möglichkeit des Live-Trackings für bis zu vier UAS, da hier die entsprechenden Software-Algorithmen und nötigen Schnittstellen bereits existieren. Die Abb. 1 zeigt eine SSRS-Messung: Dargestellt ist das gleichzeitige Live-Tracking von drei Multicoptern im Messbereich von 50 m bis 150 m samt gemessener Zielparameter.

Die guten Ergebnisse zeigen, dass eine Weiterentwicklung der Sensoren mit dem Ziel Kleindrohrendetektion lohnenswert ist. Insbesondere im Bereich der Signalverarbeitung, z. B. Lokalisation und Klassifikation der Objekte, ist Verbesserungspotenzial vorhanden. Durch eine Steigerung der Ausgangsleistung (auf derzeit realistische 1 W) kann außerdem der Abdeckungsbereich der Radare deutlich erhöht werden. Schließlich ist auch beim SSRS eine Elevationsauflösung unabdingbar.

**1** *Live-Tracking von drei Multicoptern mit dem SSRS im Messbereich von 50 m bis 150 m und die gemessenen Zielparameter.*

**2** *Vierkanaliges MuRPS (Multi Channel Radar for Perimeter Surveillance) mit Quadcopter im Hintergrund. Die Winkelablage erfolgt nach dem Monopulsverfahren.*

**3** *Mechanisch scannendes SSRS (Scanning Surveillance Radar System) mit optischer Kamera. Der rotierende Sensor scannt mit einem Öffnungswinkel von 1,8° in Azimut-Richtung.*

*Dr. rer. nat. Michael Caris  
Tel. +49 228 9435-353  
michael.caris@  
fhr.fraunhofer.de*



## MIMO-RADARSYSTEME

MIMO-Radarsysteme eignen sich durch ihre Flexibilität, Multimode-Fähigkeit, Robustheit und Möglichkeiten der Kostenreduktion vorzüglich für die verschiedensten Sicherheitsanwendungen. Am Fraunhofer FHR werden hierzu neueste Methoden im Bereich der Signalprozessierung erforscht und anwendungsnahe MIMO-Radardemonstratoren entwickelt und aufgebaut.

### **ARTINO (Airborne Radar for Three-dimensional Imaging and Nadir Observation)**

Das sich in der Entwicklung befindliche luftgetragene Experimentalsystem ARTINO kombiniert die Vorzüge eines MIMO-Radarsystems mit den Vorzügen eines SAR-Systems. ARTINO ist ein sowohl fernsteuerbar als auch autonom fliegendes UAV. Die in die Flügelstruktur integrierte MIMO-Antenne erzeugt über 1.400 virtuelle Antennen für eine hohe räumliche Auflösung quer zur Flugrichtung. Durch die Bewegung dieser MIMO-Antenne in Flugrichtung wird eine synthetische Apertur aufgespannt, so dass eine Abbildung in allen drei Raumdimensionen möglich wird. Zudem ist mit dieser Technologie – im Gegensatz zum gewöhnlichen SAR – die Abbildung des direkt überflogenen Gebietes möglich, um beispielsweise in urbanen Gebieten auch in tiefe Häuserschluchten schauen zu können.

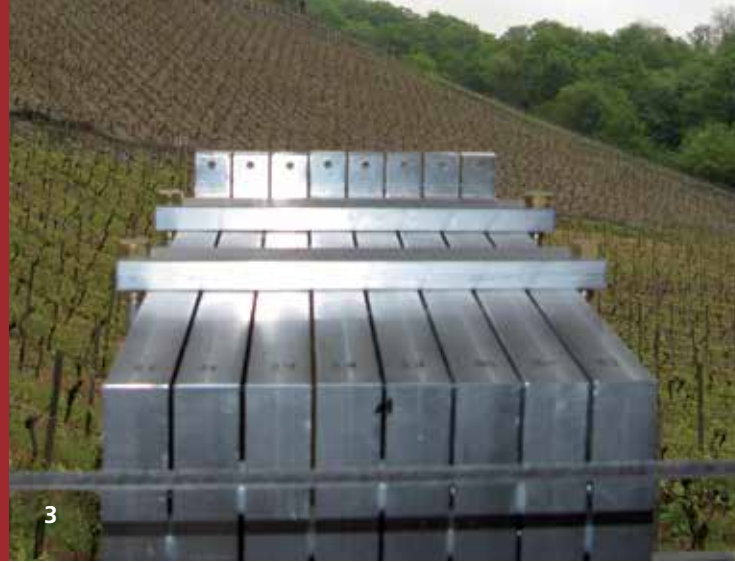
### **Die MIRA-CLE-Familie**

Mit MIRA-CLE X wurde am Fraunhofer FHR ein MIMO-Radarsystem entwickelt, mit welchem zweidimensionale Abbildungen über Distanzen von mehreren Kilometern generiert werden können. Die 16 Send- und 14 Empfangsantennen erzeugen bei diesem System 224 virtuelle Antennenelemente. Die derzeitig verwendete Sendeleistung liegt bei 2 W und kann zur Vergrößerung der Reichweite durch entsprechende Anpassungen deutlich erhöht werden. Zur Erprobung neuer Methoden, Technologien und Anwendungen wurde MIRA-CLE Ka entwickelt. Dieses voll-konfigurierbare und erweiterbare System besitzt 16 Send- und 16-Empfangsantennen zur Erzeugung 256 virtueller Antennen. Durch die hohe Flexibilität ist das System beispielsweise zur Abbildung, zur Detektion langsamster Bewegungen im Sub-Millimeterbereich und zur Detektion von schnell fliegenden Drohnen geeignet. Durch geeignete Anpassungen kann das System, neben dem Zeitmultiplexing-Betrieb, auch im parallelen Sendebetrieb arbeiten. Hierbei können sowohl neue Methoden im Bereich der Frequenzdiversität als auch der Wellenformdiversität evaluiert werden.





2



3

### 3D-MIMO-Radarsystem im Projekt RAWIS

Im BMBF-Projekt RAWIS (Radar Warn- und Informationssystem für Anwendungen im Katastrophenschutz) wird ein zweidimensionales MIMO-System aufgebaut, welches aus 24 Sendern und 32 Empfängern 768 virtuelle Antennenelemente in einer hexagonalen Anordnung generiert. Hierdurch ist eine dreidimensionale Abbildung und Überwachung eingestürzter Gebäude in Katastrophengebieten möglich. Bewegungen und Veränderungen werden sich mit diesem System im Sub-Millimeterbereich detektieren lassen. Durch den modularen Aufbau aus Empfangs- und Sendemodulen mit jeweils acht einzelnen Antennenelementen ist das Radarsystem nahezu beliebig skalier- und anpassbar.

### TeraSCREEN

Im EU-Projekt TeraSCREEN erforscht und entwickelt das Fraunhofer FHR einen MIMO-Ansatz zur Personenkontrolle an Flughäfen. Die erfassten Passagiere sollen hierbei während ihrer Bewegung abgetastet werden, um auf diese Weise versteckte Gegenstände zu entdecken. Das System arbeitet im FMCW-MIMO-Verfahren bei einer Mittenfrequenz von 360 GHz mit einer Bandbreite von 30 GHz, was eine enorm hohe Tiefenauflösung ermöglicht. Die Arrayanordnung besteht dabei aus 16 Sendern und 16 Empfängern und ermöglicht hochauflösende Abbildungen der versteckten Gegenstände. In 2016 wird es eine ausführliche Test- und Erprobungsphase am Flughafen Bristol geben.

### SmokeBot

MIMO-Arrays sind natürlich auch für den Einsatz an mobilen Plattformen geeignet und ermöglichen diesen eine Umgebungswahrnehmung, wenn optische Sensoren an ihre Grenzen stoßen. In konkreten Einsatzszenarien ist nämlich aufgewirbelter Staub oder Rauch für optische Sensoren kaum zu durchdringen. Hier setzt das Fraunhofer FHR auf ein FMCW-MIMO-Array bei 120 GHz, welches eine dreidimensionale Umgebungswahrnehmung auch bei optisch schlechten Sichtverhältnissen ermöglicht. Der Roboter wird hiermit in die Lage versetzt in jeder Situation autonom agieren zu können. Gerade für Search & Rescue Operationen oder der Aufklärung von Katastrophenlagen ist dies eine enorm wichtige Fähigkeit für den Roboter.

1 MIMO-Radardemonstrator MIRA-CLE Ka.


2 Einblick in das Radarfrontend von MIRA-CLE Ka.

3 Blick über die Sendantennen von MIRA-CLE X.

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

M. Sc. Stefan A. Lang  
Tel. +49 228 9435-782  
stefan.lang@  
fhr.fraunhofer.de

# PRODUKTION

A photograph showing two workers in red protective suits working on a large, white, conical radome segment. One worker is kneeling on the ground, while the other stands and holds the top edge of the segment. The scene is outdoors in a snowy or frosty environment under a cloudy sky. The radome segment is the central focus, and its shadow is cast on the ground to the right.

*Dank ihrer Eigenschaften, auch optisch intransparente Materialien durchdringen zu können, eignen sich Millimeterwellen zur zerstörungsfreien Prüfung und Material-Charakterisierung - wie hier zur Vermessung der Radomsegmente.*



# SENSOR IM MASSANZUG

Das Fraunhofer FHR forscht an innovativen Sensoren, mit denen sich das Ziel »Null-Fehler-Produktion« realisieren lässt. Neben in-line-Fähigkeit und Zuverlässigkeit ist der Preis ein wesentlicher Faktor bei der Entwicklung.



Ist in jedem Stück Schokolade wenigstens eine Mandel? Hat das Material die erforderliche Stärke? Ist das Produkt eventuell verunreinigt? Alle diese Fragen können mit einem Sensor beantwortet werden: Radar.

Seit 1957 beschäftigt sich das Fraunhofer FHR mit allen Aspekten der Radartechnologie und ist eines der führenden Forschungsinstitute auf diesem Gebiet europaweit. Sensorik für Produktion und Industrieanwendungen sind bereits seit vielen Jahren ein Schwerpunktthema seiner wissenschaftlichen Arbeiten. Meist sind die Fragestellungen so spezifisch, dass verfügbare kommerzielle Lösungen an ihre Grenzen stoßen, oder die Umweltbedingungen in der Produktionsstätte sind zu harsch für andere Sensoren. Doch Hitze, Rauch und Dampf beeinflussen Radar nicht. Radar ist außerdem unabhängig von Licht und Dunkelheit. Das Anwendungsspektrum reicht von der Abstandsmessung im Stahlwerk bis zur Detektion von Verunreinigungen Lebensmitteln. Auch die Bestimmung des Reifegrades von Früchten oder die sortenreine Sortierung von Recycling-Abfällen ist möglich.

### Im Grenzbereich der Sensortechnik

Bei der Entwicklung einer kundenspezifischen Lösung stehen neben Preis und möglichst kurzer Entwicklungsdauer auch Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Anlage im Fokus. Doch bevor die Wissenschaftler mit der Konzeption eines neuen Systems beginnen, erfassen sie die Rahmenbedingungen: Wie sieht die Anlage genau aus? Was ist die Aufgabe des Sensors? Wie schnell muss er messen? Welche Auflösung wird verlangt? Wo kann er am besten verbaut werden? Wie sind die Umweltbedingungen? Welche Schnittstellen müssen integriert werden? Was darf das System maximal kosten? Denn der Kerngedanke von Fraunhofer ist kostenbewusstes Forschen für praktische Anwendungen mit Vorteilsnutzen für die Partner. Dabei zählt nicht, was die eleganteste und

aufwändigste Lösung ist, sondern die beste für den Kunden und seinen Bedarf.

Bereits binnen zwei bis vier Wochen können die Wissenschaftler in einer ersten Kurzanalyse sagen, ob etwas prinzipiell funktioniert. Eine konkrete Machbarkeitsstudie dauert je nach Ausführlichkeit drei bis sechs Monate. Auch die Konzeptionierung des Systems sowie den Bau eines Prototyps übernehmen die Wissenschaftler auf Wunsch. Dafür brauchen sie durchschnittlich sechs bis 24 Monate. Natürlich begleiten sie den Kunden auch bei der Integration einer Testanlage in seinen Produktionsbetrieb. Von der Idee bis zur Nullserie bekommt er alles aus einer Hand. Durch kurze Innovationszyklen sorgen die Wissenschaftler dafür, dass die Technologie stets auf dem neusten Stand ist. Das hilft den Unternehmen, ihre Marktposition zu festigen.

Das hauseigene Testlabor des Institutes verfügt über umfangreiche Ausstattung. Experimentalaufbauten unterschiedlicher Scan-Konzepte können Materialproben von 100 Megahertz bis 300 Gigahertz durchleuchten, prüfen und charakterisieren. Das Ganze bei Bedarf auch auf einer Bandstraße bei bis zu einem Meter pro Sekunde Bandgeschwindigkeit. Ergänzend stehen auch ein Terahertzspektrometer bis 2 Terahertz sowie weitere Radarsensoren zur Verfügung. In aufwändigen Simulationen verifizieren sie das Schaltungsdesign sowie die elektromagnetische Verträglichkeit der Komponenten.

### Ein Chip, ein Radar

Zur Ergänzung seines Portfolios hat das Fraunhofer FHR eine Kompetenz im Chip-Design am Institut aufgebaut. Die Arbeitsgruppe entwirft kostengünstige und massenmarktaugliche Hochfrequenz-Schaltungen auf Basis von Silizium-Germanium. Ein solches Radar-on-a-Chip ist in großen Stückzahlen sehr günstig. Aber auch für kleine Stückzahlen werden Systeme



entwickelt. Das Besondere dabei: Die Schaltungen werden bis 100 Gigahertz und mehr in der PCB-Technologie (Planar Circuit Board) umgesetzt. Das spart Kosten, erlaubt eine kompakte Bauformen und ermöglicht es gleichzeitig, die Systeme kundenspezifisch aufzubauen.

Als Mitglied verschiedener Verbände und Allianzen hat das Fraunhofer FHR Zugang zu breitgefächertem Know-how insbesondere im Bereich des maschinellen Sehens. Dank seiner guten Vernetzung innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft findet das Fraunhofer FHR stets das optimale Konsortium. So erarbeiten die Forscher auch bei komplexen Projekten eine auf den Kunden zugeschnittene Lösung. Dabei setzen sie auf modulare Komponenten, die im Forschungsprojekt an die jeweilige Aufgabe angepasst werden, beispielsweise durch ein neues Systemkonzept, Antennendesign oder spezielle Algorithmen. Ein Sensor im Maßanzug sozusagen. Aktuell verfügt das Fraunhofer FHR über »Basissysteme« in unterschiedlichen Frequenzbereichen (30, 60 und 90 Gigahertz). Eine derzeit im Aufbau befindliche 120 Gigahertz-Zeilenkamera bringt die Wissenschaftler näher an ihr Ziel: Die Entwicklung eines abbildenden, echtzeitfähigen und in-line-fähigen Sensors.

Damit folgt das Fraunhofer FHR ganz der Tradition des Namensgebers der Fraunhofer-Gesellschaft: Als Wissenschaftler und Unternehmer hatte Joseph von Fraunhofer nicht nur im Blick, wie es noch besser geht, sondern eben auch preiswerter.



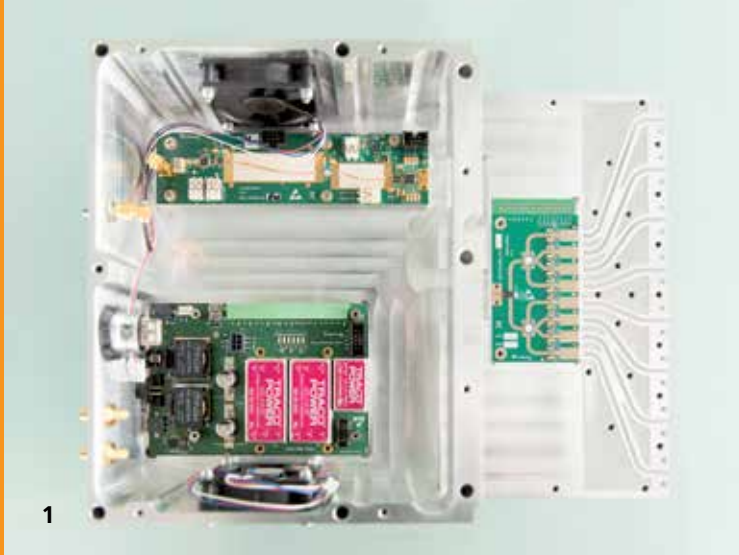
Geschäftsfeldsprecher Produktion:

**Dipl.-Ing**

**DIRK NÜBLER**

Tel. +49 228 9435-550

[dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de](mailto:dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de)



## SCHWARZSEHEN ERWÜNSCHT

Die Mittelkonsole im Auto. Die Ablagekörbe im Büro. Das Laptop-Gehäuse. Das Telefon, der Monitor, die Tastatur. All diese Gegenstände bestehen aus schwarzem Kunststoff. Irgendwann sind auch ihre Tage gezählt. Was wird dann aus ihnen?

Aktuell werden ca. 50 % der Kunststoffabfälle in Europa verwertet. Die häufigste Verwertungsmethode ist dabei die thermische Verwertung bei der die Abfälle verbrannt werden, um Energie zu gewinnen. Bei der werkstofflichen Verwertung, wird aus dem sogenannten Recykat wieder ein neues Produkt hergestellt. Doch die Vielzahl an Kunststoffen sowie die unterschiedlichen Additive wie Farbstoffe, Weichmacher, Flammenschutzmittel oder UV-Blocker erschweren dabei die Verwertung: Aus nicht sortenreinem Recykat hergestellte Produkte weisen schlechtere Materialeigenschaften auf als Produkte aus neuen Kunststoffen. Ein geschlossener Recyclingkreislauf erfordert aber ein gleichwertiges Endprodukt. Materialerkennende Sortiersysteme für das Kunststoffrecycling müssen also in der Lage sein, Stoffsorten korrekt zu klassifizieren.

Die aktuell leistungsfähigsten Verfahren bei der Kunststoffsortierung basieren auf Hyperspektralkameras. Bei der Sortierung schwarzer oder sehr dunkler Kunststoffe ist der reflektierte Anteil im sichtbaren als auch im infraroten Wellenlängenbereich jedoch zu gering, da Schwarz das Spektrum nahezu vollständig absorbiert. Auch der stärkere Einsatz von Verbundstoffen stellt die Qualitätskontrolle vor bisher ungelöste Probleme, da die Materialbestimmung nur auf der Oberfläche erfolgt.

### Rohstoff aus dem Schrott

Der Tonnagepreis für möglichst reine Kunststoffabfälle liegt deutlich höher als für solche mit geringerer Reinheit. Verwerter versuchen daher mit technisch aufwändigen Methoden Kunststoffabfälle sortenrein zu sortieren, denn in schwarzen Kunststoffen steckt ein wirtschaftliches Potenzial von etwa einer Milliarde Euro. Um dieses Potenzial zu nutzen, hat die Fraunhofer-Gesellschaft eine strategische Allianz gebildet. Diese besteht aus den Fraunhofer-Instituten FHR, IAIS und IOSB. Die Forschungsaktivitäten der drei beteiligten Institute werden im Projekt blackValue® unter der Leitung des Fraunhofer FHR zusammengefasst. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines echtzeitfähigen Sensor- und Auswertesystems zur Materialbestimmung von Kunststoffen, insbesondere zur Wiederverwertung schwarzer Kunststoffe. Derzeit arbeitet



das System bei bis zu 94 GHz. Im aktuellen Entwicklungsschritt wird die Frequenz auf 120 GHz erhöht, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen. Dabei setzen die Forscher auf die Kombination einer neuartigen Radarkamera im Terahertz-Bereich mit herkömmlicher Sensorik. Basierend auf den Forschungsarbeiten des Fraunhofer FHR im Bereich der Radartechnik wie auch auf dem Gebiet des Chip-Designs entstanden kostengünstige, hochintegrierte Radare auf Silizium-Germanium-Basis.

### **Erfolgsgeheimnis: Teamwork**

Eine vollspektrale Analyse über einen großen Terahertz-Bereich wäre sehr hardwarehungrig und ist somit wirtschaftlich nicht realisierbar. Daher greifen die Fraunhofer-Forscher auf einen Trick zurück: Sie werten einen Frequenzbereich mit sehr geringer Bandbreite im unteren Terahertz-Bereich aus und achten dabei auf die Verfügbarkeit von kommerziellen Systemkomponenten. Diese Optimierung stellt aber gleichzeitig besondere Anforderungen an die verwendeten Auswertalgorithmen.

Um diesen Bedingungen gerecht zu werden und eine sichere Zuordnung zu erreichen, setzt das Fraunhofer IAIS Algorithmen aus dem Bereich des Maschinellen Lernens ein. Bei diesem Teilgebiet der Informatik wird ein Algorithmus in einer ersten Phase trainiert. In der anschließenden Erkennungsphase zeigen die Entwickler dem System weitere Proben und das System muss diese entsprechend seines Trainings selbstständig den unterschiedlichen Sorten zuordnen. Derzeit erreicht der Algorithmus eine Genauigkeit von 94-99 %.

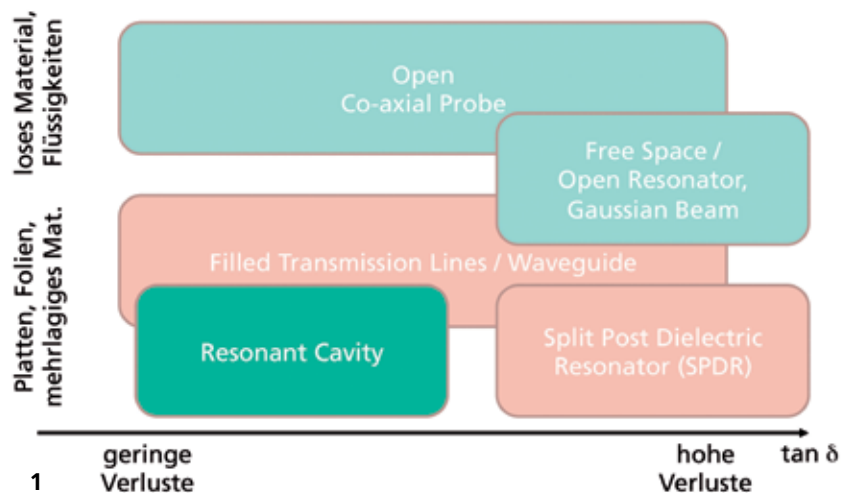
Ein entsprechender Prototyp zur Sortierung der Kunststoffabfälle entsteht am Fraunhofer IOSB. Die Kunststoffabfälle laufen auf einem Fließband mit zwei bis drei Metern pro Sekunde an der FHR-Kamera vorbei und binnen 35 Millisekunden entscheidet das System, ob das Teil ausgeblasen wird oder weiter laufen darf. Die Anlage kann mit zwei Personen be- und entladen werden. Sie erreicht einen Durchsatz von rund 30 Tonnen pro Stunde.

Die mit blackValue® erzielte sortenreine und bei Bedarf auch farbreine Trennung bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit erlaubt somit das Recycling schwarzer Kunststoffe im industriellen Maßstab.

**1** *blackValue ist in kompakter SMD-Technologie realisiert.*

**2** *Mit der am Fraunhofer FHR entwickelten Terahertz-Zeilenkamera können Kunststoffe nicht nur farblich, sondern auch schwarze Kunststoffe sortenrein sortiert werden.*

*Dipl.-Ing. Andries Küter  
Tel. +49 228 9435-134  
andries.kueter@  
fhr.fraunhofer.de*



## ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG DES TIRA-RADOMMATERIALS

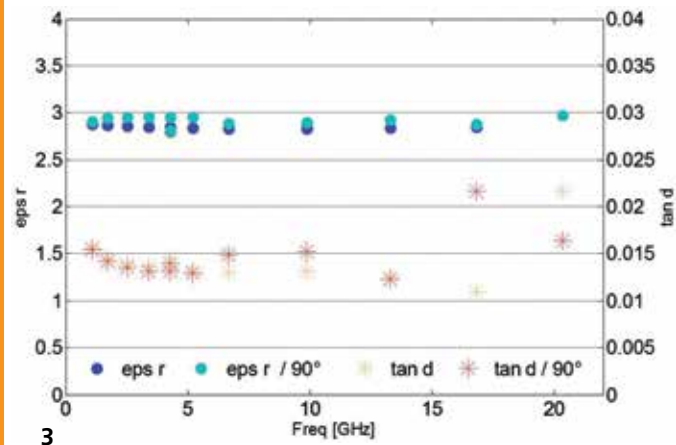
Im Jahr 2014 wurde der Umbau des Weltraumbeobachtungsradars TIRA mit der Erneuerung der Hülle abgeschlossen. Um sicherzustellen, dass die Radarwellen durch das Radom nicht behindert werden, wurde ein spezieller mobiler Messstand für ein zerstörungsfreies Prüfverfahren entwickelt und eingesetzt.

Fast 50 Jahre nach seiner Errichtung wurde das Radom des Weltraumbeobachtungsradars TIRA vollständig erneuert. Nach langer Planung konnten die Monteure ab April 2014 schließlich die 1.330 neuen Paneele einbauen und anschließend das alte Radom abtragen, an dem Regen und Wind über die Jahrzehnte ihre Spuren hinterlassen hatten. Diese Umbaumaßnahmen wurden im Jahresbericht 2014 ausführlich beschrieben.

Um zu prüfen, ob die von einem US-amerikanischen Lieferanten hergestellten Paneele auch die geforderten Spezifikationen erfüllen und um zu gewährleisten, dass die Folien aus einem Teflon-basierten Glasfaser-Verbundwerkstoff keine wesentliche Reflexion oder Dämpfung der vom Radar gesendeten und empfangenen Signale verursachen, sollten vor dem Einbau die Materialeigenschaften einer größeren Anzahl von Stichproben charakterisiert und erfasst werden. Zu diesem Zweck haben Mitarbeiter des Fraunhofer FHR bereits im Vorfeld der Baumaßnahmen ein spezielles Messsystem zur zerstörungsfreien Prüfung entwickelt.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Verfahren zur Charakterisierung der elektromagnetischen Eigenschaften und ihre Eignung für Materialien mit unterschiedlicher Form und elektrischen Verlusten. Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens für die Radomprüfung schiedene einige Verfahren bereits von vornherein aus, da sie einen speziellen Zuschnitt der Probe voraussetzen, z. B. gefüllte Hohlleiter. Für das hier benötigte Messsystem fiel die Wahl schließlich auf einen offenen Resonator (*engl. Split Cavity Resonator*), der aus einem Hohlleiter-Resonator mit rechteckigem Querschnitt besteht. Der Resonator hat in der Mitte einen variablen Spalt, in den das Radommateriale eingeschoben werden kann. Damit lassen sich die Paneele prüfen, ohne sie dabei zu beschädigen. Die dielektrische Permittivität und der Verlustwinkel des Materials werden mit großer Genauigkeit aus der Verschiebung von Resonanzfrequenzen im Vergleich zwischen offenem und mit Material gefüllten Resonator bestimmt.





Für die Aufgabe der Radom-Materialprüfung wurde ein auf diesem Verfahren basierendes, flexibles Messsystem entwickelt. Die beiden Hälften des Resonators wurden auf einem speziell konstruierten mechanischen Träger befestigt, der die Verschiebung der Kavitäten über einen Fahrweg von mehreren Zentimeter erlaubt und sich digital gesteuert mit einer Wiederholgenauigkeit von weniger als 15 µm positionieren lässt. So kann der Resonator einfach geöffnet werden, um ein neues Paneel mit seinem ca. 4 cm starken Alu-Rahmen und seiner Kantenlänge von 1 bis 2 m einzulegen, und anschließend passgenau wieder verschlossen werden. Für die Messung der Streuparameter im relevanten Frequenzbereich wird zusätzlich ein Hochfrequenz-Netzwerk-Analysator benötigt. Die Hohlleiter-Resonatoren für die beiden vom TIRA-System verwendeten Frequenzbereiche und eine Software zur automatischen Bestimmung der modalen Resonanzfrequenzen bzw. der daraus resultierenden Materialparameter wurden von der Firma Damaskos Inc. geliefert. Um einen reibungslosen und möglichst automatisierten Ablauf der Messungen zu gewährleisten, wurde das gesamte Messsystem in einem mobilen Rack aufgebaut, das die Resonatoren mit motorischer Verstellung, die gesamte HF-Elektronik und einen Rechner zur Steuerung enthält.

Bild 2 zeigt das Messsystem als mobile Einheit. Von den 1.330 gelieferten Paneelen wurden aus unterschiedlichen Chargen insgesamt mehr als 30 Muster ausgewählt und vermessen. Die Auswahl berücksichtigte unter anderem auch unterschiedliche Abmessungen, Gewicht, Form und Winkel der Dreiecke, sowie unterschiedliche Zustände (z. B. Staub oder Schmutz auf der Oberfläche, Nässe, etc.) Während für das Einsetzen eines Paneels in das System die Zusammenarbeit von zwei bis drei Personen notwendig ist, kann die fast automatisch ablaufende Messung von einer einzelnen Person durchgeführt werden. Da pro Paneel mehrere Stellen untersucht wurden, nahm die Messung jeweils etwa einen halben Tag in Anspruch.


Einige Ergebnisse der Messung eines einzelnen Radompaneels sind als Beispiel in Bild 3 gezeigt. Dargestellt sind die relative dielektrische Permittivität  $\epsilon_r$  und der Verlustwinkel  $\tan \delta$  als Funktion der Frequenz. Da an verschiedenen Stellen der dreieckigen Fläche gemessen wurde, sind jeweils zwei Messpunkte eingetragen. Insgesamt ergab die Messkampagne, dass die Materialien im Mittel ihre Spezifikationen innerhalb der Messgenauigkeit erfüllten. In Zukunft sind noch weitere Messungen vorgesehen, die den Einfluss von Alterung und Ermüdung auf das Verhalten des Materials untersuchen sollen.

Mit der vorgestellten Entwicklung steht dem Fraunhofer FHR nun ein flexibles und präzises Messsystem zur Verfügung, das auch für andere Anwendungen genutzt werden kann und bereits zur zerstörungsfreien Prüfung verschiedener anderer Materialien eingesetzt wurde.

- 1 Übersicht verschiedener Verfahren zur Materialcharakterisierung.
- 2 Der Messstand für zerstörungsfreie Prüfung des Radommaterials im Betrieb (Abmessungen ca. 1,5 m x 0,7 m x 1,6 m)
- 3 Relative dielektrische Permittivität ( $\epsilon_r$ ) und Verlustwinkel ( $\tan \delta$ ) eines einzelnen Radompaneels, gemessen an zwei verschiedenen Positionen.

Dr.-Ing. Peter Knott  
 Tel. +49 228 9435-235  
 peter.knott@  
 fhr.fraunhofer.de

# EMERGING TECHNOLOGIES – ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN



*Durch sein umfangreiches Know-How bei Technologien und Methoden kann das Fraunhofer FHR stets modernste Systeme und Komponenten entwickeln - so auch so auch für das einzigartige GESTRA.*





## TECHNOLOGIEN UND VERFAHREN FÜR ALLE GESCHÄFTSFELDER

Am Fraunhofer FHR werden auch geschäftsfeldübergreifend Zukunftstechnologien und Verfahren entwickelt, die für zahlreiche Anwendungen nützlich sind.



## 300-GHZ-SAR-MESSUNGEN VON STRASSEN UND FASSADEN

Das Fraunhofer FHR hat mit dem 300-GHz-MIRANDA ein Radar mit der weltweit höchsten Auflösung von 3,5 mm entwickelt. Mit diesem gelingen Abbildungen von Straßen und auch Fassaden in nahezu optischer Qualität.

Das MIRANDA-300-System wurde entwickelt, um die Leistungsfähigkeit moderner abbildender Radar-Systeme nachzuweisen. Die große erreichbare Auflösung resultiert aus der hohen Bandbreite des Systems. Diese lässt sich erreichen, da bei den extrem hohen Arbeitsfrequenzen des Systems eine geringe relative Bandbreite zu einer hohen absoluten Bandbreite führt. So können Entfernungsauflösungen bis zu 3 mm erreicht werden. Für ein abbildendes System, bei dem das Radar quer zur Radar-Blickrichtung bewegt werden muss, ist zudem die Größe der Antennenöffnung ein entscheidendes Kriterium für die Auflösung. Da auf Grund der hohen Sendefrequenz von 300 GHz und der damit geringen Wellenlänge von etwa 1 mm auch eine sehr kleine Antennengröße gewählt werden kann, können auch in dieser Bildrichtung hohe Auflösungen erreicht werden. Zudem hat dies den Vorteil, dass die so entwickelten Gesamtsysteme extrem klein und handlich werden.

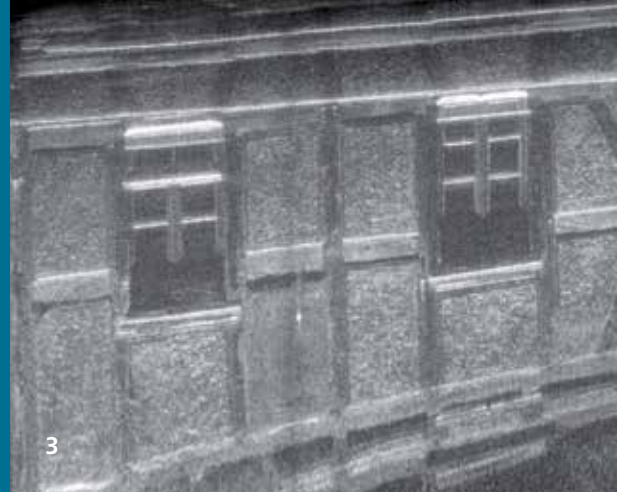
Für SAR-Messungen wird das System in einem Fahrzeug installiert, welches in einigen Metern Entfernung an der Messszene vorbeifährt. Verglichen mit einem Flugzeug hat diese Konfiguration den Vorteil, dass die Abweichungen von einer exakten linearen Bewegung kontrollierter stattfinden und das Fahrzeug langsamer bewegt werden kann. Trotzdem besteht ein wesentlicher Teil dieses Messsystems in einem hochpräzisen, GPS-gestützten Inertialsystem, welches die Eigenbewegung des Sensors aufzeichnet. In einer anschließenden Signalprozessierung werden diese Daten dann verwendet, um die Radardaten so zu korrigieren, als wäre die Trägerplattform vollkommen linear gefahren. So können auch mit der geringen verfügbaren Sendeleistung von etwa 3 mW kontrastreiche und höchstauflösende Aufnahmen erstellt werden.

Die Messungen können genutzt werden, um hochauflösende Aufnahmen der Straße sowie der darauf befindlichen Objekten anzufertigen. Selbst dünne Schichten wie die Markierungen auf Straßen lassen sich deutlich erkennen. In der Abbildung ist ein solches SAR-Bild gezeigt. Zu sehen ist ein Straßenbereich, auf dem mit Farbe dünne Markierungen angebracht wurden. Da diese





2



3

schon sehr alt sind, können deutlich Risse in den Markierungen erkannt werden. Ebenfalls können unterschiedliche Teile der Straße und des Belags untersucht werden, so dass Risse und fehlerhafte Ausbesserungen hervortreten.

In der oben beschriebenen Messanordnung wurden ebenfalls Personen abgebildet. Diese lagen dafür auf einem Streifen neben dem Messfahrzeug. Die Abbildung entstand mit einer Messzeit von nur wenigen Sekunden. Auf 300-GHz-SAR-Bildern mit dieser Auflösung kann man nicht nur deutlich einzelne Personen erkennen, sondern auch zum Beispiel Gürtelschnallen.

Durch Umkehrung der Messgeometrie, so dass der Sensor nach oben statt nach unten blickt, können auch Objekte abgebildet werden, an denen das Messfahrzeug vorbeifährt. So können Häuserfassaden mit hoher Auflösung bildlich dargestellt und anschließend untersucht werden. Dabei helfen auch die speziellen Eigenschaften der Millimeterwelle, die zum einen äußerst empfindlich auf kleinste Strukturänderungen reagiert, zum anderen dünne nichtmetallische Schichten durchdringen kann. Damit lassen sich unter bestimmten Umständen auch Aussagen über die darunter liegenden Strukturen treffen. So erkennt man beispielsweise auf Bild 3 deutlich die Strukturen der Wände und kann unterschiedliche Materialien unterscheiden.

**1** *Strassenbereich mit Kennzeichnung eines Fahrradwegs. Risse im Asphalt wie auch bei der Markierung sind deutlich erkennbar.*

**2** *Liegende Personen am Straßenrand in einem 300-GHz-SAR-Bild.*

**3** *Aufnahme der oberen Etage eines Fachwerkhauses mit einer Auflösung von 5 mm.*

*Dr. rer. nat.  
Stephan Stanko  
Tel. +49 228 9435-705  
stephan.stanko@  
fhr.fraunhofer.de*

*Dipl.-Ing., MBA  
Stephan Palm  
Tel. +49 228 9435-357  
stephan.palm@  
fhr.fraunhofer.de*



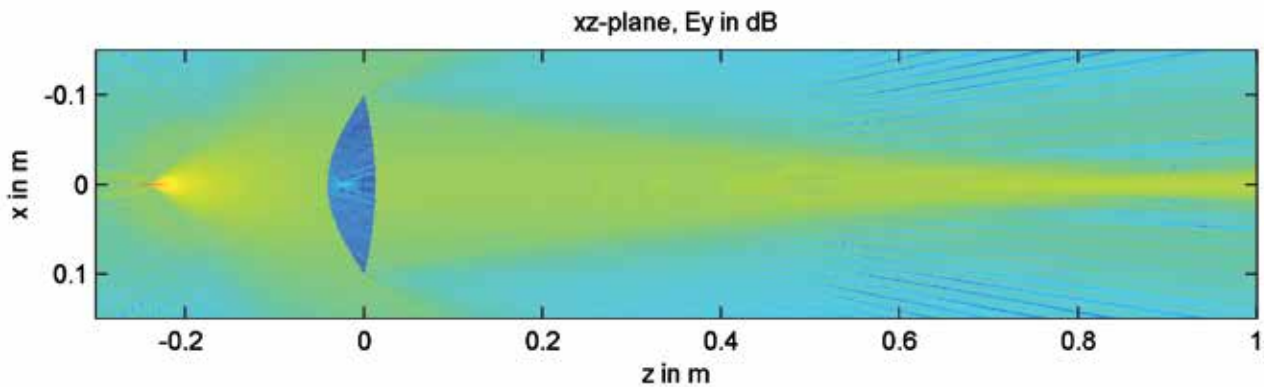
## MODELLIERUNG KOMPLEXER ELEKTROMAGNETISCHER SZENARIEN

Von miniaturisierten Antennen bis hin zu großen Windparks - mit seinen speziellen Simulationsverfahren kann das Fraunhofer FHR die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in nahezu beliebigen Szenarien vorhersagen. Damit spielen computergestützte Simulationen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von Antennen und Radarsystemen.

Die Anforderungen an Software zur elektromagnetischen (EM) Modellierung werden immer größer, da bei vielen Anwendungen, z. B. bei Radar und in der Kommunikation, ein Trend zu höheren Frequenzen mit kleineren Wellenlängen erkennbar ist. Während früher überhaupt nur sehr vereinfachte und räumlich beschränkte Problemstellungen untersucht werden konnten, sind heute viele Verfahren in der aktuellen Entwicklungsstufe in der Lage, komplexe, annähernd realistische Szenarien zu modellieren. »Komplex« bezieht sich dabei z. B. auf die Geometrie, den Detaillierungsgrad oder die Größe des Modells oder auch den Umfang der durchzuführenden Simulationen.

Die am Fraunhofer FHR entwickelten Verfahren zur Modellierung elektromagnetischer Streufelder ermöglichen die effiziente und genaue Berechnung der Eigenschaften auch großer und komplexer Radarziele. Dabei kommen, je nach Aufgabenstellung, sowohl numerisch exakte als auch asymptotische Verfahren zum Einsatz. Die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren orientiert sich am aktuellen Stand der Wissenschaft, so dass teilweise Fähigkeiten zur Verfügung stehen, die in kommerzieller EM-Software noch nicht implementiert ist. Diese Fähigkeiten der Simulationssoftware sind wiederum die Voraussetzung für die Modellierung der zu untersuchenden Szenarien.

So sind im Bereich der EM-Modellierung mit Ray Tracing viele effiziente Strahlsuch- und Optimierungsalgorithmen aus der Computergrafik implementiert, die wiederum mit Verfahren zur Berechnung elektromagnetischer Felder, beispielsweise der Physikalischen Optik (PO), kombiniert werden. Im Bereich der numerisch exakten Verfahren stehen Algorithmen zur optimierten Modellierung dielektrischer Materialien zur Verfügung, so dass auch Objekte aus beliebigen Materialkombinationen genau modelliert werden können.



2

Die Simulationstools sind anhand vieler Testrechnungen validiert und international anerkannt. Beispielsweise ist das Institut seit 2006 beim Workshop »Radar signatures« vertreten, der alle zwei Jahre in Toulouse stattfindet und wo mit einer Reihe von Benchmark-Simulationen die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit von Simulationstools aus unterschiedlichen Ländern verglichen wird. Weiter liefert das Fraunhofer FHR wichtige Beiträge zur NATO-Arbeitsgruppe SET-200 »Electromagnetic scattering prediction of small complex aerial platforms for NCTI purposes« (Laufzeit: 2013-2016).

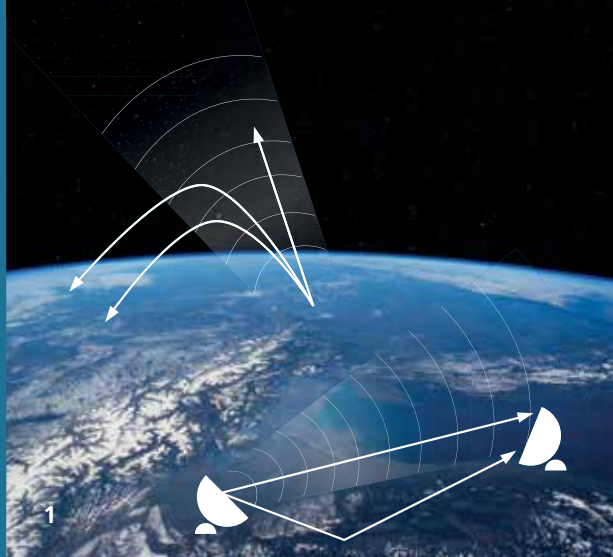
Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften werden die Simulationsprogramme des Fraunhofer FHR oft an der Grenze des technisch Machbaren eingesetzt. Beispielsweise erfordern die Modellierung dynamischer Komponenten (z. B. Triebwerkskomponenten) und der daraus resultierenden Effekte oder die Modellierung extrem großer Szenarien (z. B. Geländemodelle in der Größenordnung von mehreren Tausend Wellenlängen) einen enormen Rechenaufwand, der nur mit besonderen Optimierungsverfahren, z. B. Parallelisierung oder Nutzung von Grafikprozessoren (GPU), bewerkstelligt werden kann.

Ein ganz aktuelles Beispiel ist die Modellierung des Einflusses von Windenergieanlagen auf Radarsysteme, wo das Fraunhofer FHR seit einigen Jahren sowohl mit Simulationen als auch messtechnisch sehr aktiv ist. Bei der elektromagnetischen Simulation ist dabei sowohl ein Geländemodell als auch die Drehung der Rotorblätter zu berücksichtigen (Bild 1). Dass diese Thematik weltweit von großem Interesse ist, zeigt die seit Jahren wachsende Anzahl von Veröffentlichungen auf diesem Gebiet. Außerdem wird im Jahr 2016 bei der *European Conference on Antennas and Propagation* (EuCAP) zum ersten Mal eine Session zum Thema »Electromagnetic Scattering of Wind Turbines and Effects on Radar Systems« angeboten, die vom Institut mitorganisiert wird.

Bild 2 zeigt ein Beispiel für ein weiteres komplexes Simulationsszenario berechnet mit einer Vollwellen-Simulation: Für einen vom Fraunhofer FHR entwickelten Millimeterwellensensor wird eine spezielle Linse aus Kunststoff benötigt, die das von einer Horn-Antenne abgestrahlte Feld in Form eines Gaußstrahl (engl. *Gaussian Beam*) auf einen Punkt fokussiert. Die Abbildung zeigt einen Querschnitt durch das elektrische Nahfeld, in dem links das von der Antenne gesendete und rechts das fokussierte Wellenfeld mit dem sog. »Waist« zu sehen ist. Man erkennt ebenfalls den Durchgang der Welle durch die Linse (in Form eines bikonvexen Rotationshyperboloids), in der die Wellenlänge aufgrund der dielektrischen Permittivität des Materials deutlich kleiner ist. Dies stellt bei der Größe der Linse mit einem Durchmesser von ca. 20 cm und einer Betriebsfrequenz von über 80 GHz eine große Herausforderung für elektromagnetische Lösungsverfahren dar.

- 1 Geländemodell mit Windenergieanlagen (schematische Darstellung, Windenergieanlagen sind überhöht dargestellt).
- 2 Durchgang einer von einem Pyramidenhorn gesendeten Welle durch eine bikonvexe, dielektrische hyperbolische Linse bei 80 GHz (Betrag der elektrischen Feldstärke in dBV/m).

Dr.-Ing. Frank Weinmann  
 Tel. +49 228 9435-223  
 frank.weinmann@  
 fhr.fraunhofer.de



## AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN IN DER ATMOSPHÄRE

Das Radar macht sich die Eigenschaften elektromagnetischer Wellen zu Nutze, um Informationen von der Umgebung zu gewinnen. Dabei tritt die Atmosphäre als Ausbreitungsmedium mit auf den Plan.

Bereits im 19. Jahrhundert wurden die Theorien zu elektromagnetischen Wellen von James Clerk Maxwell aufgestellt, die später von Heinrich Hertz experimentell nachgewiesen wurden. Mit seinem Patent von 1904 hat Christian Hülsmeier eine Anwendung für diese Erkenntnisse gezeigt. Heute ist die Radartechnik aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken.

Im Themengebiet Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wird der Frage nachgegangen, welche Rolle das Ausbreitungsmedium spielt, das zwischen Sender, Detektionsziel und Empfänger liegt. Das Ausbreitungsmedium beeinflusst dabei wesentlich die Leistungsfähigkeit einer Vielzahl von Radartypen. Jedoch treten in der Atmosphäre viele komplexe Effekte auf. Dazu gehören Dämpfung durch Niederschlagspartikel (Regen) oder Atmosphärogase sowie Reflexion an der Erdoberfläche oder an Objekten inklusive Mehrwegeausbreitung. Außerdem tritt auch bei Radarwellen, ähnlich wie bei Licht, eine Refraktion (Brechung) auf, im Wesentlichen durch die Abnahme der Atmosphärendichte über der Höhe. Abschließend sollten die Effekte der Beugung an Objekten und die Phasenverzögerungen durch die Atmosphäre nicht ungenannt bleiben. Stellvertretend für eine Vielzahl von Anwendungen, bei der die Ausbreitungsthematik eine wichtige Rolle spielt, seien im Folgenden zwei wichtige Bereiche herausgegriffen: Die Ausbreitungspfade auf Satelliten-Erde Pfaden für abbildende Radare sowie die Ausbreitung über See und flachen Einfallswinkeln zur Detektion kleiner Ziele mit Störschall-Hintergrund.

### Auf die Zusammensetzung kommt es an

Um die Ausbreitungsbedingungen ausreichend genau zu beschreiben, sind eine Vielzahl von Messgrößen zur Charakterisierung des Mediums erforderlich, beispielsweise Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlagsintensität, Gesamtelektronenzahlen und weitere. Allen voran spielt das Profil des Brechungsindex über der Höhe eine entscheidende Rolle. Dieses beeinflusst, ob Standard-Ausbreitungsbedingungen vorherrschen oder Über- bzw. Unterreichweiten für die Detektion erzielt werden. Für zeitkritische Anwendungen ist eine Erfassung der realzeitlichen Informationen zu den





Umgebungsbedingungen schwierig, aber auch daran arbeiten Forscher des Fraunhofer FHR mit Hochdruck und entwickeln Verfahren, die den operationellen Anforderungen gerecht werden.

### **Fundiertes Know-how**

Viele Fragestellungen wurden in NATO-Gruppen, in technischen Abkommen und in Form zahlreicher Experimente über Jahrzehnte hinweg eingehend untersucht. Darüber hinaus verfügt das Institut über geeignete Software-Werkzeuge, um unterschiedliche Ausbreitungsszenarien zu modellieren. Letztendlich führt die Fähigkeit, die Modelle durch geeignete Messungen zu verifizieren zum Ziel, eine belastbare Aussage über die Detektionseigenschaften zu treffen.

Die umfassenden Kenntnisse des Instituts auf dem Gebiet der Ausbreitungsphysik und dem Verständnis aller Effekte in Bezug auf die Systemparameter erlaubt es Radarsysteme so auszulegen, dass diese in Hinblick auf die Anwendung die bestmögliche Leistungsfähigkeit erzielen. Darüber hinaus verfügen die Forscher des Fraunhofer FHR über umfassende und fundierte Kenntnisse, um störende Einflüsse der Atmosphäre durch geeignete signalverarbeitungstechnische Maßnahmen und Korrekturalgorithmen zu eliminieren beziehungsweise entscheidend zu reduzieren. In Hinblick auf zukünftige Herausforderungen, bei denen die Systemparameter aufgrund geänderter Anforderungen bislang nicht eingesetzte Wertebereiche einnehmen, ist das Know-how des Instituts besonders relevant.

### **Kein Nachteil ohne Vorteil**

Spinnt man den Gedanken hinsichtlich der Ausbreitungsphysik weiter, so ist ein Radar auch in der Lage wertvolle Informationen über die Ausbreitungsstrecke selbst zu gewinnen, d. h. anstatt die Beeinflussung als Störung zu interpretieren, können wertvolle Aussagen über die Zusammensetzung des Mediums getroffen werden. Dies kann auf der einen Seite z. B. Information über die Gesamtelektronenzahl in der Ionosphäre sein, andererseits auch Information zu der Zusammensetzung der Troposphäre. Hierbei sei eine prominente Anwendung zu erwähnen, die in unserem alltäglichen Leben immer häufiger als Informationsquelle herangezogen wird, nämlich das Niederschlagsradar.

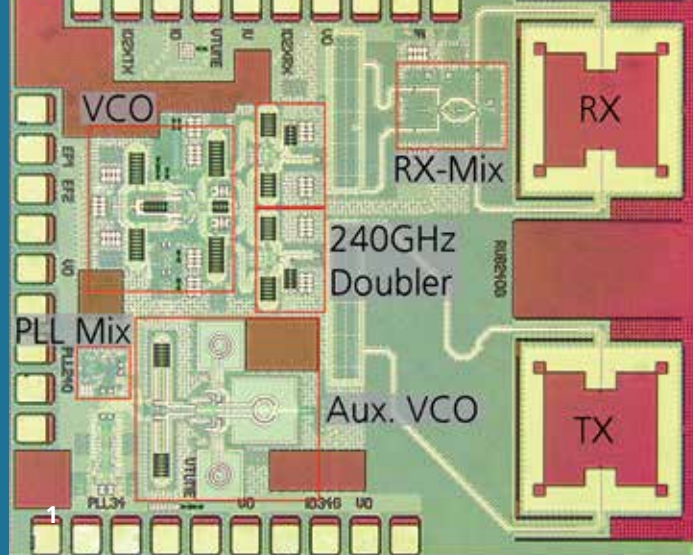
Für Sicherheitsanwendungen bei schlechter Sicht weist die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Radarfrequenzbereich wesentliche Vorteile auf: So können Radarstrahlen auch Nebel und Wolken durchdringen und einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit in der Luftfahrt aber auch in der Schifffahrt und bei vielen weiteren Anwendungen leisten.

**1** *Der Grund warum der Wellenausbreitung gegenwärtig eine so hohe Bedeutung zukommt, liegt darin, dass viele Anwendungen des täglichen Lebens darauf basieren und heutzutage unverzichtbar sind.*

**2** *Obwohl Radarfrequenzen Wolken durchdringen können, sind Starkregenereignisse, wie hier im Bild dargestellt, in der Lage Signale abzuschwächen. Hierbei spielt das Verhältnis zwischen der Wellenlänge und der Größe der Niederschlagspartikel eine wesentliche Rolle. Je größer dieses ausfällt, desto geringer ist die Beeinflussung.*

*Dr.-Ing.*

*Andreas Danklmayer  
Tel. +49 228 9435-350  
andreas.danklmayer@  
fhr.fraunhofer.de*



## HOCHAUFLÖSENDES 240-GHZ-RADAR MIT SiGe-CHIP

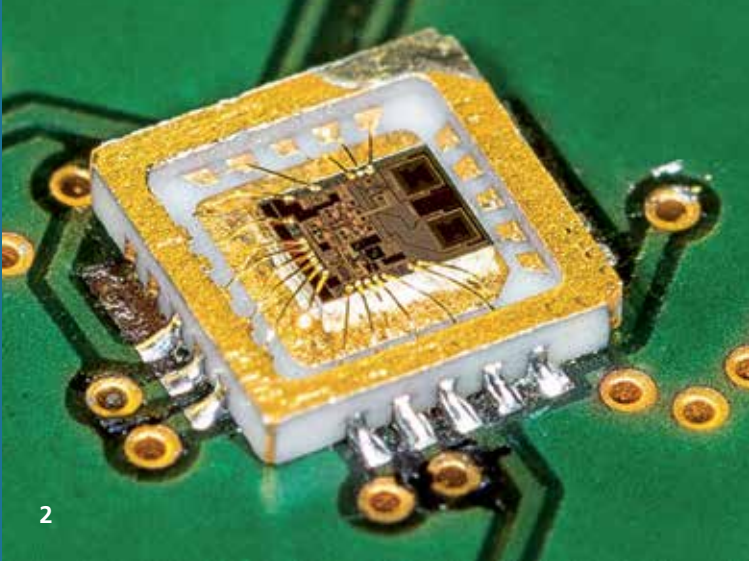
Zwar ermöglichen hohe Frequenzen oberhalb von 200 GHz feinste Radar-Auflösungen, doch sie waren bisher sehr teuer und aufwendig. Durch SiGe-Chip-Technologie wird dieser Zusammenhang jetzt aufgebrochen.

### Höchste Frequenzen für feinste Auflösung

Radar-Sensoren oberhalb von 200 GHz versprechen durch ihre kleine Wellenlänge Auflösungen, die bisher nur Laser-Messsystemen vorbehalten waren. Insbesondere das 240-GHz-Frequenzband ist mit einer Freiraum-Wellenlänge von 1,25 mm durch den zulassungsfreien ISM-Betrieb (2 GHz Bandbreite) besonders attraktiv. Es verspricht nicht nur Entfernungsmessung mit Mikrometer-Genauigkeit und gut fokussiertem Strahl, sondern auch bildgebende Radar-Scanner, die durch SAR-Prozessierung oder Realapertur-Abtastung (in Reflexion oder Transmission) Abbildungen mit Millimeter-Auflösung erreichen. Damit können für die Millimeterwellentechnologie ganz neue Applikationen erschlossen werden. Bei all den überzeugenden Eigenschaften und Potentialen dieser Frequenzbänder stehen dem allerdings klassischerweise eine technologisch sehr aufwendige Hochfrequenztechnik und damit sehr teure Sensoren gegenüber.

### 240 GHz Radar durch moderne SiGe-Technologie

Durch die Fortschritte moderner Siliziumtechnologien erreichen diese heutzutage Grenzfrequenzen oberhalb von 300 GHz und ermöglichen somit als kostengünstige technologische Basis die Erschließung des oberen Millimeterwellenbereichs. Zur Realisierung eines 240-GHz-Radarsystems fiel die Wahl auf Infineons B11HFC-Technologie. Diese verspricht einerseits durch ihren schnellen SiGe-Bipolar-Transistor ausreichend Hochfrequenz-Performance und verfügt andererseits über zusätzliche Bauelemente, wie eine spezielle pn-Varaktordiode zur breitbandigen Signalerzeugung sowie eine vollständige CMOS-Digitaltechnik für Logikblöcke und Mixed-Signal-Schaltungen. In der etablierten Kooperation zwischen Ruhr-Universität Bochum, dem Fraunhofer FHR und Infineon Technologies konnte so ein 240-GHz-Radarchip entworfen werden, der nicht nur alle hochfrequenten Schaltungsteile zur Erzeugung des Sendesignals enthält, sondern auch den Empfänger und somit das Herzstück eines Radarsystems bildet. Das Radar-Frontend ist auf einen



breitbandigen Betrieb optimiert und ermöglicht bis zu 61 GHz breite FMCW-Frequenzrampen und geht damit deutlich über die Auflösung bestehender Radarsysteme hinaus.

### Lösung: On-Chip-Antennen

Zwar werden die modernen Transistoren immer schneller und ermöglichen damit immer höhere Frequenzen, doch die Umgebung skaliert leider nicht mit. Während die Signalerzeugung, Leitungen, Koppler und Empfänger bei 240 GHz durch mikroelektronische Integration gut auf einen Chip gebracht werden können, stellt sich die Kontaktierung der Antenne als echte Hürde. Selbst der kürzest mögliche Bonddraht erweist sich bei 240 GHz als so große Induktivität, dass dieser beinahe das komplette Signal reflektiert. Glücklicherweise skaliert die Dimensionierung einer Antenne mit der Frequenz, so dass diese bei 240 GHz kompakt auf einen Chip integriert werden kann. Durch diesen hohen Grad der Integration wird die gesamte Aufbau- und Verbindungstechnik erheblich vereinfacht. Das Bonden der Antenne entfällt daher. Da der Radarchip nur noch mit elektronischen Signalen (<5 GHz) kontaktiert werden muss, können einfache elektronische Gehäuse und Platinen-Materialien verwendet werden. Schlussendlich führt dies also dazu, dass ein 240-GHz-Radar sogar einfacher und kostengünstiger werden kann, als bisherige Millimeterwellen-Sensoren. Der Trend zur Kostensteigerung mit der Frequenz wurde so nicht nur gebremst, sondern sogar umgedreht.

### Kompakter Radar-Sensor

Aufbauend auf dem Radar-Chip mit seinen integrierten Antennen für Sender und Empfänger, konnte dieser in einem QFN-Package auf eine gewöhnliche FR4-Platine gebracht werden. Außerdem wurde er um weitere Elektronik-Komponenten zu einem kompakten Radar-Sensor ergänzt.

Neben dem Radar-Chip sind kommerzielle Elektronik-Komponenten zur Spannungsversorgung, Signal-Stabilisierung im Phasenregelkreis, Digitalisierung des Empfangs-Signals und zur Adaptierung von Schnittstellen (hier USB-Anschluss zum Computer) nötig. Für gerichtete Radar-Messungen wurde eine Plastiklinse über den Radar-Chip platziert, welche gleichzeitig als Radom für den Radarchip fungiert. Mit dem so realisierten Radar-Sensor konnten durch seine Bandbreite von 40 GHz Radarmessungen mit einer Auflösung besser als 4 mm und Entfernungsmessungen mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich demonstriert werden. Die Messdaten werden direkt durch ein USB-Interface an einen Computer geleitet und dort ausgewertet, was einen flexiblen Einsatz ermöglicht.

**1** Foto des Radar-Chips. Die FMCW-Signalerzeugung wird durch einen PLL-stabilisierten Oszillator bei 120 GHz mit nachfolgenden Frequenzverdoppeln realisiert. Im rechten Bereich des Chips sind die beiden on-chip-Antennen erkennbar.

**2** Der Radar-Chip im offenen QFN-Package, welches auf einer FR4-Platine befestigt ist.

**3** Foto des gesamten Radar-Sensors. Der Radar-Chip befindet sich unter der dielektrischen Linse. Der Sensor wird über einen USB-Anschluss angesteuert und mit Spannung versorgt.

Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl  
Tel. +49 228 9435-249  
nils.pohl@  
fhr.fraunhofer.de

AUS DEM INSTITUT





# BESONDERE EREIGNISSE 2015

25.-28. Januar 2015

## **Forscherteam vom Fraunhofer FHR und der Ruhr-Universität Bochum gewinnen Best Demonstration Award 2015 bei der IEEE Radio Wireless Week in San Diego**

Prof. Dr. Nils Pohl und sein Team Sven Thomas und Simon Kueppers vom Fraunhofer FHR sowie Timo Jaeschke von der RUB gewannen für die Demonstration des neuen Radars vor Ort und den Vortrag zu »Compact High Resolution Radar at 80 GHz and 140 GHz« den Best Demonstration Award 2015.

13. Februar 2015

## **2. Preis für Forschungsidee des Fraunhofer-Anwendungszentrums AMLS**

Prof. Dr. Jens Bongartz, Leiter des Fraunhofer-Anwendungszentrums für multimodale und luftgestützte Sensorik (AMLS), belegte beim Ideenwettbewerb »Projekte für Menschen« den zweiten Platz. Mit der Auszeichnung sind 25.000 Euro Fördergeld für das Projekt, sowie 3.000 Euro Preisgeld verbunden. In seinem Projekt entwickelt er ein kostengünstiges und schnelles Verfahren zur Detektion von Landminen in Kambodscha.

24.-27. März 2015

## **Anuga Foodtec, Köln**

Zum ersten Mal beteiligte sich das Fraunhofer FHR am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft auf der globalen Leitmesse zur Lebensmittelproduktion mit dem SAMMI-System zur Prüfung von verpackten Lebensmitteln auf Verunreinigungen, Materialfehler und Fertigungsschwankungen.

1. April 2015

## **Großauftrag vom DLR Raumfahrtmanagement zum Aufbau eines Weltraumüberwachungsradars**

Das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat das Fraunhofer FHR mit der Entwicklung und dem Bau eines leistungsfähigen Radars zur Überwachung und Verfolgung von Objekten im

erdnahen Weltraum beauftragt. Das Projekt GESTRA (German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar) hat ein Gesamtvolumen von 25 Millionen Euro und eine Laufzeit von 4 Jahren.

28.-29. April 2015

## **5th PCL Focus Days, Wachtberg**

Rund 80 internationale Experten auf dem Arbeitsgebiet Passiv-Radar trafen sich zum fünften Mal in Wachtberg bei den PCL Focus Days, um sich über die aktuellen Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet auszutauschen.

23. April 2015

## **Girls' Day**

Zum 12. Mal empfing das Fraunhofer FHR interessierte Mädchen, um sie für Hochfrequenztechnik zu begeistern. Sie erhielten einen kleinen Einblick in die technischen Tätigkeiten im Institut und besuchten natürlich die »Kugel«.

5.-6. Mai 2015

## **Workshop Millimeterradar, Wachtberg**

Im Rahmen des Workshops wurden neueste Entwicklungen des Millimeterwellenradars für die zivile Sicherheit, das Umwelt-Monitoring und die Produktion vorgestellt. Zahlreiche Gäste kamen, um sich die Forschungsergebnisse des Instituts und seiner direkten Kooperationspartner anzuhören.

28. Mai 2015

## **7. Kuratoriumssitzung des Fraunhofer FHR**

Andreas Meuer (Direktor Finanzen, Rechnungswesen und Wirtschaftsplan) verabschiedete als Vertreter des Fraunhofer-Vorstands Prof. Dr. Heiner Klinkrad (ESA/ESOC), Martin Pirkl (Airbus Defence and Space) und Dr. Walter Stammeler (MBDA) aus dem Kuratorium und ernannte Hans Hommel (Airbus Defence and Space) und Prof. Dr. Stefan Lindenmeier (UniBw München) zu neuen Kuratoriumsmitgliedern.

11. Juni 2015

## **5. Wachtberg-Forum**

Zum fünften Mal veranstaltete das Fraunhofer FHR für seine Partner und Kunden das Wachtberg-Forum. Wie in den letzten

*Fraunhofer-Präsident Prof. Reimund Neugebauer (rechts) überreicht Prof. Jens Bongartz vom AMLS die Auszeichnung.*



Jahren, gab es ein ausgewogenes Programm mit Fachvorträgen und Ausstellung. Rund 100 Gäste folgten der Einladung und informierten sich über die neuen Technologien bei bestem Sommerwetter. Highlights waren die Live-Schaltung in den Kontrollraum von TIRA zur Satellitenvermessung und die Demonstration unseres Radarsystems SSRS zur Entdeckung und Verfolgung von Kleinfluggeräten wie Multicopter.

10.-17. Juli 2015

**7th International Summer School on Radar / SAR**

Zum sechsten Mal veranstaltete das Fraunhofer FHR diese in Remagen-Rolandseck. 45 junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt trafen sich für eine Woche am Rhein, um von international anerkannten Radarexperten zu lernen und nebenher die Kultur des Rheinlands zu erleben. In diesem Jahr kamen die Teilnehmer aus den Ländern Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Lettland, Norwegen, Polen, Rumänien, Saudi Arabien, Singapur, Slowakei, Südafrika, Südkorea, Schweden, Schweiz, Türkei und USA.

1. September 2015

**Prof. Pohl erhält Lehrstuhl für Integrierte Hochfrequenzschaltungen an der Ruhr-Universität Bochum**

Dass mittlerweile ganze Radarsysteme auf einen einzigen Chip passen, eröffnet völlig neue Geschäftsfelder. Hier setzt Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl mit seiner Forschung an. Die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RUB hat gemeinsam mit dem Fraunhofer FHR zum 1. September 2015 die neue Professur für Integrierte Hochfrequenzschaltungen ins Leben gerufen.

3. September 2015

**AFCEA-Studienpreise für Abschlussarbeiten von Caspar Kneer und Kai Westhöfer**

Die FHR-Mitarbeiter Caspar Kneer und Kai Westhöfer wurden am 3.9.2015 mit je einem Studienpreis der AFCEA Bonn e.V.

für ihre Abschlussarbeiten ausgezeichnet. Beide erhielten einen dritten Preis, der mit 1000 Euro dotiert ist. Caspar Kneer beschäftigte sich in seiner Masterarbeit mit der »Integration eines hyperspektralen Imaging Systems in eine luftgestützte Sensorplattform zur Analyse vegetativer Daten«, Kai Westhöfer schrieb seine Bachelorarbeit über die »Entwicklung und Optimierung einer doppelt polarisierten CBSP Antenne (Cavity-Backed-Stacked-Patch-Antenne) und Charakterisierung im Phased-Array Demonstrator«.

8.-10. September 2015

**European Microwave Week, Paris, Frankreich**

Gemeinsam mit dem Fraunhofer IAF stellte das Fraunhofer FHR auf Europas größter Messe und Konferenz zum Thema Hochfrequenztechnik und Radar in Paris aus. Das Institut präsentierte Radar-on-chips und den bildgebenden Materialscanner SAMMI.

23. September 2015

**Claudius Dornier jr. Dissertationspreis für Dr. Stefan Brüggewirth**

Im Rahmen des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses erhielt Dr. Stefan Brüggewirth den ersten Claudius Dornier jr. Dissertationspreis. Mit seiner Arbeit über die »Entwicklung einer kognitiven Systemarchitektur mit zentraler Ontologie und spezifischen Algorithmen« konnte er die Jury überzeugen.

5.-8. Oktober 2015

**Wissenschaftscampus, Bonn, Sankt Augustin, Wachtberg**  
[siehe Artikel auf Seite 94]

17.-18. November 2015

**Berliner Sicherheitskonferenz, Berlin**

Bei der Konferenz gestaltete und organisierte das Fraunhofer FHR ein eigenes Panel »Protection of Space Infrastructure« mit Prof. Ender als Chairman. Weitere Teilnehmer im Panel



2



3

waren Dr. Reinhold Ewald (ESA), Dr. Holger Krag (ESA/ESOC), Generalleutnant Joachim Wundrak (Kommandeur Zentrum Luftoperationen), Dr. Stefano Zatti (ESA/ESRIN), Eckard Sattelmeyer (Airbus Defence and Space) und Dr. Ludger Leushacke (Fraunhofer FHR). Außerdem präsentierte sich das Institut mit einem Messestand.

17.-19. November 2015

#### **Space Tech Expo, Bremen**

Bei der Raumfahrttechnikmesse präsentierte das Fraunhofer FHR auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand der Allianz Space internationalen Interessenten das Projekt German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar (GESTRA).

23.-24. November 2015

#### **Auszeichnung für Thomas Rösgen als jahrgangsbester Feinwerkmechaniker**

Thomas Rösgen wurde als Jahrgangsbester bei der Abschlussprüfung zur Ausbildung als Feinwerkmechaniker durch die Kreishandwerkerschaft und bei der Ehrung der Besten der Fraunhofer-Gesellschaft ausgezeichnet.

26.-27. November 2015

#### **Absolventenkongress Deutschland, Köln**

Auf Deutschlands größter Karrieremesse auf dem Messegelände Köln beteiligte sich das FHR mit vier anderen Instituten am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand. Zahlreiche qualifizierte Bewerberinnen und Bewerber aus ganz Deutschland stellten sich vor.

15. Dezember 2015

#### **Neuer Internetauftritt des Fraunhofer FHR**

Als erstes Fraunhofer-Institut stellte das FHR seine Internetseiten auf das neue »Responsive Design« um. Seitdem sind die Internetseiten auf allen Geräten und mit allen Bildschirmgrößen optimal zu lesen.

- 1 Prof. Dr. Alexander Verl (Fraunhofer-Vorstand), Prof. Dr. Joachim Ender, Dr. Gerd Gruppe (DLR-Vorstand Raumfahrtmanagement) und Generalleutnant Joachim Wundrak (Kommandeur Zentrum Luftoperationen) bei der GESTRA-Kick-off-Veranstaltung.
- 2 Vorführung der Drohnerdetektion mit Radar beim Wachtberg-Forum.
- 3 Alle Preisträger des AFCEA Studienpreises 2015 bei der Verleihung in Koblenz (Caspar Kneer: 1. v. r., Kai Westhöfer: 6. v. r.).



Leiter

Interne und externe Kommunikation:

**Dipl.-Volksw. JENS FIEGE**

Tel. +49 228 9435-323

jens.fiege@fhr.fraunhofer.de



AUS DEM INSTITUT





# FRAUNHOFER- WISSENSCHAFTSCAMPUS

Wissenschaftsalltag aus erster Hand: Sechs Fraunhofer-Institute öffneten ihre Tore zum Wissenschaftscampus 2015. Die interessierten Studentinnen erlebten an den Forschungseinrichtungen, wie und woran die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dort arbeiten.

Der Wissenschaftscampus 2015 der Fraunhofer-Gesellschaft fand vom 5. bis 8. Oktober in der Region Köln/Bonn statt. Dieses Format - entwickelt von Fraunhofer - gewährt jungen Frauen Blicke hinter die Kulissen von Forschungseinrichtungen: Studentinnen der Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT) ab dem vierten Fachsemester konnten sich in Workshops und Vorträgen informieren, weiterbilden und beraten lassen. In den Seminaren knüpften sie zudem wertvolle Kontakte für Ihre berufliche Entwicklung, besichtigten Labore und diskutierten mit Expertinnen und Experten.

Eröffnet wurde der Wissenschaftscampus am Fraunhofer FHR. Prof. Dr. Joachim Ender begrüßte die Besucherinnen, ehe sie in unterschiedlichen Workshops die vielseitigen Eigenschaften der Radartechnologie kennenlernten. Ein Blick ins weltweit größte Radom durfte natürlich nicht fehlen. Dabei wurde den Studentinnen nicht nur gezeigt, wie agil die 240 Tonnen schwere Parabolantenne ist, denn gleich im Anschluss an die Demonstration wurde in der »Kugel« das Mittagsbuffet gereicht.

Am Nachmittag gewährten die Institute den Teilnehmerinnen intensive Einblicke in ihre Forschungsarbeiten: Im ersten Workshop verlieh Dr. Andreas Danklmayer der Redewendung »Ein Bild sagt mehr als tausend Worte« Nachdruck, indem er den interessierten Kandidatinnen zeigte, wie Dank intelligenter Signalverarbeitung mit bildgebendem Radar unabhängig von Tageszeit und Wetter hochaufgelöste, fotoähnliche Bilder von jedem Punkt der Erde generiert werden können. Anspruchsvoll ging es auch im Workshop »Radar verstehen mit System KRASS« von Dr. Valeria Gracheva zu: Von der Einführung in die der Signalerzeugung und -verarbeitung mit Radar zugrunde liegenden Mathematik führte sie ihre Gruppe auf das Institutsgelände, wo sie reale Radarmessungen zur Detektion zweier Quadrocopter durchführten. Im FHR-Institutsteil in Villip

erklärte Christian Krebs der dritten Gruppe die Grundlagen der Abstandsmessung mit Radar auf eine sehr anschauliche Weise: Indem sie die detektierten Positionen ihrer Hände in Töne umsetzten, machten die Nachwuchs-Wissenschaftlerinnen mit Radar Musik. Weitere Workshops fanden am nächsten Tag in den Instituten in Sankt Augustin statt. Die praxisnahen Workshops kamen sehr gut bei den Teilnehmerinnen an, was auch die abschließende Befragung zeigte.

Nachdem in den Fachtagen die Hardskills der Teilnehmerinnen gefragt waren, folgten in den folgenden zwei Tagen Workshops zur Erweiterung und Schärfung der Softskills. Das Programm umfasste unter anderem Angebote zu den Themen Führungskompetenz, wissenschaftliches Schreiben und Selbstbehauptung im Beruf. Die Teilnehmerinnen erfuhren mehr über ihre eigene Kreativität, ihre Stärken und wie sie diese in der Forschung, aber auch für ihre persönliche Entwicklung nutzen können – und natürlich, welche konkreten Karrieremöglichkeiten ihnen bei den Fraunhofer-Instituten offen stehen.

Mehr Frauen in die angewandte Forschung zu bringen ist ein wichtiges Ziel der Fraunhofer-Gesellschaft. Daher wurden unter anderem Programme wie der Wissenschaftscampus entwickelt, bei denen die unterschiedlichen Lebenssituationen und Interessen von Frauen und Männern berücksichtigt werden. Dass diese Chancen vom wissenschaftlichen Nachwuchs gut angenommen werden, belegen auch Arbeitgeber-Rankings: Die Fraunhofer-Gesellschaft zählt seit Jahren unter Absolventinnen und Absolventen der Ingenieurs- und Naturwissenschaften zu den beliebtesten Arbeitgebern in Deutschland.

*Beim Wissenschaftscampus gab es viel zu erleben: Vorführungen und Präsentationen, Workshops und Schulungen.*

*Dipl.-Volksw. Jens Fiege  
Tel. +49 228 9435-323  
jens.fiege@  
fhr.fraunhofer.de*

AUS DEM INSTITUT



# KORSIKA: KONFIGURIERBARES KA-BAND RADARSYSTEM

Die Förderung wissenschaftlichen Nachwuchses findet am Fraunhofer FHR besondere Beachtung. Denn gerade im Hinblick auf die speziellen Anforderungen der Thematik an Entwickler und Forscher ist eine umfassende Basisausbildung unerlässlich. Gemeinsam mit der RWTH Aachen haben Wissenschaftler des Instituts ein entsprechendes Tutorial samt Ausbildungssystem erstellt.

Im Rahmen einer Radarpraktikumsreihe an der RWTH in Aachen sollte ein praxisnaher Teil zum Thema »gepulstes Radar« entstehen, damit die Studierenden das in der Theorie erlernte Wissen an einem echten Radarsystem anwenden können. Hierzu wurde in der Abteilung Array-gestützte Radarbildgebung das System KORSIKA (konfigurierbares Radar für Schulungszwecke im Ka-Band) entwickelt. Ziel war es, ein kompaktes und mobiles System aufzubauen, mit dem sich, im Rahmen eines zweistündigen Praktikumstermins, schnell »echte« Radardaten aufnehmen und auf unterschiedliche Weise verarbeiten lassen. Im Vorfeld dieses Termins vermittelten Kollegen aus der Abteilung ARB entsprechende Grundlagen zu gepulsten Radarsystemen, welche anschließend auf Radardaten von KORSIKA angewendet wurden.

Die Betriebsfrequenz von KORSIKA wurde ins Ka-Band gelegt. Durch notwendige Zwischenfrequenzen hatten die Studierenden somit umfangreiche Einblicke in verschiedene Technologien eines breiten Frequenzspektrums. So reichen die verwendeten Technologien von SMT- bis zu Bare-Die-Bauteilen und HF-Strukturen mit einer Genauigkeit von wenigen  $\mu$ -Meter. Zudem bekamen sie ein Gefühl für die technischen Herausforderungen, wie die Kohärenz zwischen einem Basisband- und einem Ka-Band-Signal, vermittelt. Die im Institut entwickelten Komponenten gaben den Studierenden zusätzlich einen Einblick, welche Entwicklungsaufgaben, neben der Signalprozessierung, im Rahmen der Projekte im Institut bearbeitet werden. Ein besonderes Augenmerk wurde bei dem Systemaufbau darauf gelegt, dass möglichst keine »Blackboxes« entstehen, sondern alle Komponenten von der Signalerzeugung bis hin zu den Antennen im Detail einsehbar sind.

Die Experimente mit KORSIKA können individuell gestaltet und aus unterschiedlichen Lernmodulen zusammengestellt werden. So lassen sich einfache Experimente zu den Themen Entfernung- und Auflösungsbestimmung sowie Pulskompression oder Pulsintegration durchführen. Es sind aber auch komplexere Doppler-Versuche möglich: So konnte eine Studierendengruppe beispielsweise anhand der zuvor erlernten Dopplerverarbeitungsgrundlagen die Geschwindigkeit eines Quadrocopters bestimmen, der durch die Radarszene flog. Dadurch wurden wichtige Begriffe der Radartechnik wie Clutter, SNR oder auch Fehlalarmrate erklärt. Zusätzlich wurde den Studierenden ein begleitendes Skript ausgehändigt, in dem die Grundlagen erläutert werden.

Ein weiterer Vorteil im Rahmen der Ausbildung ist die schnelle Rekonfigurierbarkeit des Systems. Durch die einfache Softwaresteuerung können Parameter wie Bandbreite, Pulslänge und Pulswiederholfrequenz sowie Betriebsart (gepulst, FMCW) per Knopfdruck verändert und entsprechende Effekte auf die Radarperformance in Echtzeit beobachtet werden.

Als weitere Lernmodule werden künftig FMCW-Betrieb sowie weitere Radarverfahren wie SAR, Tracking, etc. untersucht und wenn möglich implementiert. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Systems wird zusätzlich die Mobilität und Flexibilität weiter verbessert.

Das System KORSIKA erlaubt eine individuelle Zusammenstellung von Theorie und Praxis, angefangen bei Einzelversuchen bis hin zu einer kompletten Radarpraktikumsreihe mit einem kompakten System.

*Flexibel und multifunktional:  
Das Radarsystem KORSIKA bietet  
umfangreiche Möglichkeiten zur  
Ausbildung der Studierenden.*

*Dipl.-Ing. (FH)  
Michael Krist  
Tel. +49 228 9435-758  
michael.krist@  
fhr.fraunhofer.de*

*Dipl.-Ing. (FH)  
Andreas Fröhlich  
Tel. +49 228 9435-931  
andreas.froehlich@  
fhr.fraunhofer.de*

# FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## ÜBERBLICK

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen über 1,8 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas

bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

*Präsident*  
*Prof. Dr.-Ing. habil.*  
*Reimund Neugebauer*  
*Telefon: +49 89 1205-0*  
*info@zv.fraunhofer.de*  
*www.fraunhofer.de*



# FRAUNHOFER-ALLIANZEN

## ALLIANZ SPACE

Die Fraunhofer-Allianz Space ist ein Zusammenschluss von 15 Instituten, die im Bereich Raumfahrt-technologie angewandte Forschung für den Welt- raum betreiben.

Die Raumfahrt stellt eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien einer modernen Industriegesellschaft dar. Ob Wettervorher- sage, Navigation, Direktübertragungen im Satellitenfernsehen oder globale Internetverfügbarkeit; aus dem täglichen Leben eines Jeden sind Raumfahrt, ihre Anwendungen oder Dienste nicht mehr weg zu denken.

In der Allianz Space bündeln die Institute ihre technologischen Kompetenzen, um der Raumfahrt-Industrie und Zuwendungs- gebern wie der ESA oder der Europäischen Kommission einen zentralen Ansprechpartner zu bieten. Fraunhofer tritt dadurch vor Kunden als Systemanbieter auf, der verschiedenartige Komponenten auf höchster Qualitätsstufe entwickelt und zu einem Gesamtsystem integriert an den Kunden übergibt. Durch das vielfältige technologische Know-How der beteiligten Institute bietet die Fraunhofer-Allianz Space ihren Kunden ein einzigartiges Spektrum an.

*Thomas Loosen*  
*Tel.: +49 2251 18-308*  
*thomas.loosen@*  
*int.fraunhofer.de*  
*www.space.fraunhofer.de*

## ALLIANZ VISION

Die Fraunhofer-Allianz Vision bündelt das Know- how der Fraunhofer-Institute im Bereich des ma- schinellen Sehens, der Bildverarbeitung und der optischen Mess- und Prüftechnik.

Mit der klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung wird die gemeinsame Zielsetzung verfolgt, neue Entwicklun- gen unter industriellen Bedingungen einsetzbar zu machen. Als bildgebende Sensoren kommen sowohl Standardkameras oder Speziallösungen als auch Infrarotkameras oder Röntgen- sensoren zum Einsatz. Auf Wunsch werden Komplettlösungen einschließlich aller Handhabungskomponenten bereit gestellt. Ein enges Beziehungsnetz zu Vision Partnern aus Industrie und Wissenschaft ergänzt die Möglichkeiten.

Daneben konzipiert und organisiert Fraunhofer Vision regel- mäßig Technologiekongresse und Praxis-Seminare zu aktuellen Themenschwerpunkten sowie verbindende Marketing- und PR-Maßnahmen wie gemeinsame Messeauftritte oder Fachver- öffentlichungen.

Die zentrale Geschäftsstelle der Fraunhofer-Allianz Vision in Erlangen ist die sichtbare Vertretung im Außenraum und dient potenziellen Interessenten und Kunden in allen Fragen als erste Anlaufstelle.

*Dipl.-Ing.*  
*Michael Sackewitz*  
*Tel.: +49 9131 776-5800*  
*vision@fraunhofer.de*  
*www.vision.fraunhofer.de*

# FRAUNHOFER-VERBÜNDE

## VERBUND VERTEIDIGUNGS- UND SICHERHEITSFORSCHUNG

Der Fraunhofer-Verbund Verteidigung und Sicherheitsforschung wurde 2002 unter dem Vorsitz von Prof. Dr. Klaus Thoma gegründet. Das Gesamtbudget der Institute des Verbundes beträgt jährlich ca. 250 Mio. Euro. Insgesamt über 2500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind in den zehn Verbundinstituten tätig.

Der Verbund hat sich die folgenden zwei Punkte zum Ziel gesetzt:

- Die Erforschung und Entwicklung technischer Lösungen und Systeme zum Schutz des Lebens und zur Sicherung von Infrastrukturen
- Forschung für staatliche Sicherheitsvorsorge im Verteidigungsbereich

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) verpflichtet, hat sich der Verbund inzwischen als treibende Kraft im ganzen Verteidigungs- und Sicherheitsbereich durchgesetzt. Auch auf europäischer Ebene verkörpert der Verbund einen der Hauptakteure und ermöglicht eine intensive Vernetzung mit vielversprechenden gemeinschaftlichen Forschungsaktivitäten. Mit Pioniergeist und durch herausragende Leistungen trägt die Fraunhofer-Gesellschaft wesentlich zur künftigen strategischen Ausrichtung des europäischen Sicherheits- und Verteidigungsforschungsprogramms bei.

Die zehn Mitgliedsinstitute des Verbunds schaffen intelligente und umfassende Lösungen zum besseren Schutz der Gesellschaft gegen Bedrohungen - seien sie von Mensch oder Natur verursacht. Als Exzellenzzentrum für die Sicherheit von Infrastrukturen, für den Schutz der Menschen, für Krisenmanagement und Überwachung entwickelt der Verbund Spit-

zentechnologie und anspruchsvolle Konzepte, die gleichzeitig sowohl auf zivile Sicherheit als auch auf Verteidigung abzielen.

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute für

- Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI
- Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
- Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
- Angewandte Festkörperphysik IAF
- Chemische Technologie ICT
- Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT
- Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
- Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI (Gast)
- Integrierte Schaltungen IIS (Gast)
- System- und Innovationsforschung ISI (Gast)

*Dipl.-Ing. (FH)*

*Caroline Schweitzer*

*Tel.: +49 7243 992-361*

*caroline.schweitzer@*

*iosb.fraunhofer.de*

*www.vvs.fraunhofer.de*

# VERBUND MIKROELEKTRONIK

Der Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik ist ein international führender Forschungs- und Entwicklungsdienstleister für Mikroelektronik und Smart Systems Integration. Als Teil der Fraunhofer-Gesellschaft bündelt er langjährige Erfahrung und die Expertise von mehr als 3.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern seiner Mitgliedsinstitute. Seit 1996 agiert er weltweit zwischen Forschung, Entwicklung, Produktion und Anwendung von Mikro-/ Nano- und Leistungselektronik sowie Mikrosystemtechnik.

Mit seinen Kompetenzen auf den Gebieten Mikroelektronik und Smart Systems Integration schlägt er eine Brücke zwischen anwendungsorientierter Grundlagenforschung und Produktentwicklung entlang der gesamten Wertschöpfungskette in den Geschäftsfeldern:

- Ambient Assisted Living, Health and Well-being – elektronische Assistenz für individuelle Bedürfnisse
- Energy Efficient Systems – auf dem Weg zur »All Electric Society«
- Mobility and Urbanization – Lebensqualität in urbanen Räumen
- Smart Living – Leben und Arbeiten in der »Wissensgesellschaft«

Seine Strategie baut seit Anfang 2014 auf institutsübergreifende Kernkompetenzen, die die Technologien für die Verwirklichung der Leitproduktideen in seinen anwendungsorientierten Geschäftsfeldern liefern:

- Design von Smart Systems
- Halbleiterbasierte Technologien
- Leistungselektronik und Systemtechnik für die Energieversorgung
- Sensorik und Sensorsysteme
- Systemintegrationstechnologien
- Qualität und Zuverlässigkeit
- Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik

## Mitglieder

Fraunhofer-Institut bzw. -Einrichtung für

- Modulare Festkörper-Technologien EMFT
- Elektronische Nanosysteme ENAS
- Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
- Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut HHI
- Angewandte Festkörperphysik IAF
- Integrierte Schaltungen IIS
- Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
- Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS
- Photonische Mikrosysteme IPMS
- Siliziumtechnologie ISIT
- Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
- Systeme der Kommunikationstechnik ESK (Gast)
- Offene Kommunikationssysteme FOKUS (Gast)
- Digitale Medientechnologie IDMT (Gast)
- Keramische Technologien und Systeme IKTS (Gast)
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (Gast)

*Dr.-Ing. Joachim Pelka*

*Tel.: +49 30 688 3759-6100*

*joachim.pelka@mikroelektronik.fraunhofer.de*

*www.vue.fraunhofer.de*

# AUSBILDUNG UND LEHRE

## Vorlesungen

**Bertuch, T.:** »Antennen und Wellenausbreitung«, Hochschule Aachen

**Bongartz, J.:** »Signalverarbeitung«, Hochschule Koblenz

**Bongartz, J.:** »Funktionsdiagnostik und Monitoring«, Hochschule Koblenz

**Bongartz, J.:** »Medizinische Gerätetechnik«, Hochschule Koblenz

**Bongartz, J.:** »Laser Medicine and Biomedical Optics«, Hochschule Koblenz

**Cerutti-Maori, D.:** »Signal processing for radar and imaging radar«, RWTH Aachen

**Danklmayer, A.:** »Aerospace Remote Sensing«, TU Chemnitz

**Ender, J.:** »Radar-Verfahren und -Signalverarbeitung«, Universität Siegen

**Knott, P.:** »Antenna Engineering«, RWTH Aachen

**Lorenz, F. P.:** »Physik«, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach

**Pohl, N.:** »Integrierte Hochfrequenzschaltungen für die Mess- und Kommunikationstechnik«, Ruhr-Universität Bochum

**Pohl, N.:** »Integrierte Digitalschaltungen«, Ruhr-Universität Bochum



## Promotionen

### Balasubramanian, M.:

»UTD diffraction by smooth convex NURBS surfaces and its application to efficient hybrid UTD/FEBI-MLFMM methods«, Doctoral School in Information Engineering, University of Siena, Italien

**Baruzzi, A.:** »Implementation of tracking algorithms for multistatic systems«, University Pisa

**Kohlleppel, R.:** »Ground moving target tracking with space-time adaptive radar«, Universität Siegen

## Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

**Bieske, L.:** »Frequenzselektive Oberflächenstrukturierung elektrisch leitfähiger Dünnschichten zur verbesserten Funkversorgung in Gebäuden«, RWTH Aachen, Bachelor of Engineering

**Bischoff, M.:** »Entwicklung Einer kohärenten Signal-erzeugungs- und Akquisitionseinheit auf Basis der Open-Source Plattform »Red Pitaya«, Hochschule Koblenz, Master of Engineering

**Konforta, A.:** »Adaptive transmitter for a novel digital radar prototype«, FH Aachen, Master of Engineering

**Kubach, A.:** »Entwicklung eines rauscharmen kohärenten GPS-referenzierten Frequenzgenerators zur Erzeugung multipler Festfrequenzen«, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Bachelor of Engineering

**Leininger, T.:** »Konzept und Realisierung eines integrierten Leistungsdetektors zur adaptiven Regelung der Ausgangsleistung in einem Radarsystem in SiGe BiCMOS«, Ruhr-Universität Bochum, Master of Science

**Minning, R.:** »Charakterisierung von Pflanzeninhaltsstoffen mittels zeitaufgelöster Terahertzspektroskopie«, Hochschule Bingen, Bachelor of Science

**Münch, S.:** »Entwicklung eines Softwaregesteuerten, modular konfigurierbaren Messplatzes zur Charakterisierung der Hochfrequenzeigenschaften von Baugruppen bei frei parametrierbaren Temperaturverläufen«, Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Remagen, Bachelor of Science

**Nolden, V.:** »Entwicklung eines Hochfrequenzmessplatzes zur Verifikation von Umwelteinflüssen auf die

elektrischen Parameter von Baugruppen und Bauelementen«, Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Remagen, Bachelor of Science

**Reible, S.:** »Entwicklung, Feldsimulation und Realisierung eines HF-Frontends in Hohlleitertechnik im W-Band«, FH Aachen, Master of Engineering

**Sieger, M.:** »Hochratige Aufzeichnung von Betriebsdaten beim L-Band Radarsender«, Hochschule Koblenz, Bachelor of Engineering

**Steinbrecher, J.:** »Konzeptionierung, Realisierung und Evaluation eines Messaufbaus mit hochgenauen Algorithmen zur Signalauswertung für industrielle Radarsensoren bei 80GHz«, Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Remagen, Bachelor of Science

**Schmieder, E.:** »Konzepterstellung, Realisierung und Verifizierung eines Messplatzes zur Untersuchung von Umwelteinflüssen auf Hochfrequenzkomponenten«, Hochschule Magdeburg-Stendal, Bachelor of Engineering

**Thiele, S.:** »Konzeptentwicklung und Umsetzung einer Sensordatenfusion aus Radarsensorik und optischer 3D-Umgebungserfassung«, Hochschule Koblenz, Master of Engineering

**Thielen, J.:** »Synchronisation zweier voneinander entfernter Antennensysteme ohne direkte Kabelverbindung«, Hochschule Koblenz, Master of Engineering

**Vogelsang, F.:** »Konzeptentwicklung und Realisierung eines 240GHz-Radarsystems auf Basis eines SiGe-Transceiver-Chips«, Ruhr-Universität Bochum, Bachelor of Science

**Westhöfer, K.:** »Entwicklung, Optimierung und Charakterisierung eines hochintegrierten 1400W Hochleistungs-Halbleiterverstärkers für Phased-Array Sendeapplikationen im L-Band«, Hochschule Koblenz, Master of Engineering

## Dozententätigkeiten bei Fachseminaren und Beratungsveranstaltungen

**Bartsch, G.:** »Weltraumüberwachung und -Aufklärung unter dem Gesichtspunkt der Sicherheitsvorsorge«, Gemeinsames Seminar der Bundesakademie für Sicherheitspolitik (BAKS) und des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) zu »Gesamtstaatliche Sicherheitsvorsorge im Luft- und Weltraum«, Bad Neuenahr-Ahrweiler, 2.-3.2.2015

**Caris, M.:** »Millimeterwellen- und THz-Warnsensorik«, CCG-Seminar SE 3.11 »Warnsensorik (UV, IR, mmW, THz) und Gegenmaßnahmen«, Oberpfaffenhofen, 17.11.-19.11.2015

**Danklmayer, A.:** »Sicherheitsvorsorge im Verkehr«, Seminar der AKNZ zum Thema »Allgemeine Fragen des Bevölkerungsschutzes«, Ahrweiler, 8. September 2015

**Danklmayer, A.:** »Radarstreuung und Wellenausbreitung«, CCG Seminar SE 2.01 »Grundlagen der Radartechnik«, Oberpfaffenhofen, 15.-17.9.2015

**Knott, P.:** »Seminarleitung«, CCG Seminar SE 2.01 »Grundlagen der Radartechnik«, Oberpfaffenhofen, 15.-17.9.2015

**Knott, P.:** »Einführung in die Radartechnik und Tutorial«, CCG Seminar SE 2.01 »Grundlagen der Radartechnik«, Oberpfaffenhofen, 15.-17.9.2015

**Knott, P.:** »Konforme und strukturintegrierte Antennen«, CCG Seminar SE 2.04 »Intelligente Antennensysteme«, Oberpfaffenhofen, 9.-13.11.2015

**Kuschel, H.:** »Meterwellenradar und Passiv Radar«, CCG-Seminar SE 2.14 »Radar- und Infrarottarnung: Technik und Anwendung«, Oberpfaffenhofen, 24.-26.11.2015

**Nüßler, D.; Pohl, N.:** »Einführung in die Radartechnik«, (Hübner GmbH & Co. KG): Einführung in die Radartechnik, Kassel, 8.04.2015

**Pohl, N.:** »Radar- und Infrarottarnung: Technik und Anwendung«, CCG-Seminar SE 2.14 »Radar- und Infrarottarnung: Technik und Anwendung«, Oberpfaffenhofen, 24.-26.11.2015

**Schumacher, R.:** »NCI und ATR mittels Radar – Grundlagen und Anwendungen«, CCG-Seminar SE 2.14 »Radar-, VIS- und IR-Signaturen: Technik und Anwendung«, 23.-27.11.15, Wessling

**Weinmann, F.:** »Elektromagnetische Modellierung von Windenergieanlagen und deren Einfluss auf Radar«, Workshop »Vereinbarkeit von Wetterradar und Windenergieanlagen«, Fachagentur Windenergie an Land e. V. und Deutscher Wetterdienst, Offenbach/Main, 6.10. 2015

# VERÖFFENTLICHUNGEN

## Veröffentlichungen in referierten wissenschaftlichen Zeitschriften und Büchern

- Alshra, W.; Engel, U.; Bertuch, T.:** »Compact controlled reception pattern antenna for interference mitigation tasks of global navigation satellite system receivers«, *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, vol. 9, no. 6, pp. 593-601, 2015.
- Baruzzi, A.; Martorella, M.:** »Multi Sensor Multi Target Tracking based on Range Doppler Measurements«, *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, <http://journals.cambridge.org/rep/A96WEfuzSJKZis> doi:10.1017/S175907871500046X, April 2015
- Baer, C.; Jaeschke, T.; Pohl, N.; Musch, T.:** »Contactless Detection of State Parameter Fluctuations of Gaseous Media based on a mm-Wave FMCW Radar«, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 4, pp. 865, 872, April 2015
- Bertuch, T.; Joseph, R.; Herberich, K.:** »Size-Limited Q-Band Circular Switched Parasitic Array Antenna With Small Elevation Beamwidth«, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, p. 4749-4758, Nov. 2015
- Bournaka, G.; Rahulathavan, Y.; Cumanan, K.; Lambbotharan, S.; Lazarakis, F.:** »Base station beamforming technique using multiple signal-to-interference plus noise ratio balancing criteria«, *Signal Processing, IET*, vol. 9, no. 3, pp. 248-259, 2015
- Caris, M.; Stanko, S.; Malanowski, M.; Samczynski, P.; Kulpa, K.; Leuther, A.; Tessmann, A.:** »mm-Wave SAR Demonstrator as a Test Bed for Advanced Solutions in Microwave Imaging«, *IEEE Aerospace and Electronics Systems (Special Issue on: Sense and avoid for unmanned aircraft systems)*, Vol. 29, Issue 7, pp. 8-15
- Cristallini, D.; Walterscheid, I.:** »Joint Monostatic and Bistatic STAP for Improves SAR-GMTI Capabilities«, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 54, Issue 4
- Flegel, S.; Letsch, K.; Krag, H.:** »Theoretical analysis of south-staring Beampark configurations for the TIRA system«, *CEAS Space Journal*, DOI 10.1007/s12567-015-0085-1, Vol. 7, No. 3, p. 375-387, 14. April 2015
- Fromentin-Denozire, B.; Simon, J.; Tzoulis, A.; Weinmann, F.; Anastassiou, H. T.; Bocanegra, D. E.; Martnez, D. P.; Recio, R. F.; Zdunek, A.:** »Comparative study of miscellaneous methods applied to a benchmark, inlet scattering problem«, *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 9, pp. 342-354(12), March 2015, [Online: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rsn.2014.0200>]
- Krisko, P.H.; Flegel, S.; Matney, M.J.; Jarkey, D.R.; Braun, V.:** »ORDEM 3.0 and MASTER-2009 modeled debris population comparison«, *Acta Astronautica*, Vol. 113, 2015, pp. 204-211 DOI 10.1016/j.actaastro.2015.03.024
- Lorenz, F.:** »Forschungsdienstleister in Open-Innovation Projekten: Projektcontrolling zur langfristigen Erfolgssicherung«, *Diplomica Verlag*, ISBN: 3958506399, 11.2014
- Radtko, J.; Domínguez-González, R.; Flegel, S.; Sánchez-Ortiz, N.; Merz, K.:** »Impact of eccentricity build-up and graveyard disposal



Strategies on MEO navigation constellations», in Advances in Space Research, Vol. 56, 2015, pp. 2626-2644, DOI 10.1016/j.asr.2015.10.015

**Pamies Porras, M.; Bertuch T.; Loecker, C.; Adams, R.; Wunderlich, R.; Heinen, S.:** »An AESA Antenna Comprising an RF Feeding Network With Strongly Coupled Antenna Ports«, , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 1, pp. 182-194, Jan 2015

**Weiß, M.:** »Passive wireless local area network radar network using compressive sensing technique«, Radar, Sonar Navigation, IET, vol. 9, no. 1, pp. 84-91

**Konferenzbeiträge**

**Balasubramanian, M.;**

**Toccafondi, A.; Maci, S.:**

»Radiation of a source on a convex nurbs surface«, 9th European Conference Antennas and Propagation (EuCAP), Lissabon, Portugal, April 2015

**Baruzzi, A.; Bournaka, G.;**

**Heckenbach, J.; Kuschel,**

**H.:** »Experimental validation of kalman filter based tracking in passive radar systems«, Radar Conference (RadarCon), 2015 IEEE, Arlington, USA, May 2015

**Barowski, J.; Pohle, D.;**

**Jaeschke, T.; Pohl, N.;**

**Rolfes, I.:** »Characterizing Surface Profiles Utilizing mm-Wave FMCW SAR Imaging in Proc.«, 45th European Microwave Conference (EuMC), Sept. 5-11, 2015, Paris, France

**Bournaka, G.; Baruzzi, A.;**

**Heckenbach, J.; Kuschel,**

**H.:** »Experimental validation of beamforming techniques for localization of moving target in passive radar«, Ra-

dar Conference (RadarCon) 2015 IEEE, Arlington, USA, May 2015

**Brisken, S.:** »How can multistatic ISAR benefit Non-cooperative Target Identification«, NATO SET RSM 228 Specialist Meeting, Pisa, Italy, 19.-23.10.2015

**Brisken S.; Ender, J.:**

»Block-sparse 3-D ISAR image reconstruction in a non-coherent multistatic scenario«, Radar Conference (RadarCon), 2015 IEEE, Arlington, USA, May 2015

**Brüggenwirth, S.:** »Development of a cognitive system architecture with centralized ontology and specific algorithms«, Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2015, Rostock

**Caris, M. et al.:** »300GHz Radar for High Resolution SAR and ISAR Applica-

tions«, International Radar Symposium (IRS), Juni 2015, Dresden

**Caris, M.:** »Detection and Tracking of Micro Aerial Vehicles (MAVs) with Radar«, Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe - Workshop on Unmanned Aircraft Systems (EMC and Applications), Dresden, August 2015

**Caris, M.; Johannes,**

**W.; Stanko, S.; Pohl, N.:**

»Millimeter wave radar for perimeter surveillance and detection of mavs (micro aerial vehicles)«, 16th International Radar Symposium (IRS), 2015, June 2015

**Caris, M.; Stanko, S.;**

**Palm, S.; Sommer, R.;**

**Pohl, N.:** »Synthetic aperture radar at millimeter wavelength for uav surveillance applications«, IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), 2015, Sept 2015

**Cristallini, D.; Wojaczek,**

**P.; Ummenhofer, M.:**

»Range resolution improvement for multiple PCL radar

systems on moving platforms«, IEEE Intern. Radar Conference, Johannesburg/SA, October 2015

**Cristallini, D.; Kuschel, H.,**

**Palmer, J.:** »Opportunity and current drivers for passive radar research«, IEEE Radar Conference, Johannesburg/SA, Oct. 2015

**Danklmayer, A.; Brehm,**

**T.; Biegel, G.; Förster,**

**J.:** »Multi-frequency propagation measurements over a horizontal path above the sea surface in the Baltic Sea«, Proceedings of the International Radar Symposium, IRS, Dresden, June, 2015

**Danklmayer, A.:** »On

the Influence of the Atmosphere on Wideband Space-borne SAR Signal Propagation and Imaging«, Proceedings of Asia Pacific SAR conference, Singapur, September, 2015

**Danklmayer, A.; Sieger, S.:**

»Propagation Experiment in the littoral at 94 GHz«, 2015 IEEE AP-S Symposium

on Antennas and Propagation and URSI CNC/USNC Joint Meeting, Vancouver, Canada, July 2015

**Danklmayer, A.; Biegel, G.; Förster, J.; Brehm, T.; Fabbro, V.; Castanet, L.; Hurtaud, Y.:** »Determination of Maritime Propagation Conditions in the Northern and Mediterranean Sea for Operational Needs«, WFMN 2015, Chemnitz

**Ender, J.; Bruggenwirth, S.:** »Cognitive radar - enabling techniques for next generation radar systems«, 16th International Radar Symposium (IRS), June 2015

**Ender, J.; Kohlleppel, R.:** »Knowledge based ground moving target detection and tracking using sparse representation techniques«, 16th International Radar Symposium (IRS), June 2015

**Fabbro, V.; Förster, J.; Biegel, G.; Böhler C. O.; Gallus, M.; Ulland, A.; Brehm, T.; Marcellin, J.-P.; Boulanger, X.; Castanet, L.; Danklmayer, A.;**

**Hurtaud, Y.:** »MARLENE: Mediterranean An RFC and sea Clutter ENvironmental Experiment«, Proceedings of EuCAP Lisboa, Portugal, April 2015

**Fabbro, V.; Castanet, L.; Marcellin, J.-P.; Boulanger, X.; Danklmayer, A.; Brehm, T.; Biegel, G.; Förster, J.; Böhler C. O.; Gallus, M.; Ulland, A.; Hurtaud, Y.:** »Analyse de la campagne expérimentale en environnement maritime MARLENE«, ENVIREM, Paris, France, 9.-10.6.2015

**Flegel, S.; Bartsch, G.; Letsch, K.; Leushacke, L.; Patzelt, T.; Kebschull, C.; Gelhaus, J.:** »Simulating Noisy Observation Vectors for Objects on Earth Orbits«, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2015, Rostock

**Flegel, S.; Letsch, K.; Rosebrock, J.; Krag, H.:** »Analysis of Mechanical Antenna Scanning for Debris Measurement Campaigns with the TIRA Radar System«, Deutscher

Luft- und Raumfahrtkongress, 2015, Rostock

**Fontana, A.; Stagliano, D.; Martorella, M.; Berens, P.:** »3D-InSAR maritime target Imaging using multichannel airborne PAMIR data«, SET-228 Specialist Meeting, Pisa, Italien, October 2015

**Giovanneschi, F.; Gonzalez-Huici, M.:** »A Preliminary analysis of a Sparse Reconstruction Based Classification method applied to GPR data«, IWAGPR2015, Florenz, Italien, Juli 2015

**Gracheva, V.; Ender, J.:** »Multichannel Analysis of Sea Clutter«, 2nd International Meeting on Ocean Surface Currents, Brest, Frankreich, November 2015

**Gracheva, V.; Ender, J.:** »Channel correlation of sea data for microwave radar systems«, in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015, July 2015

**Hasenaecker, G.; Rein, H.-M.; Aufinger, K.; Pohl, N.; Musch T.:** »A SiGe Differential 50 ps Gaussian Pulse Generator for Sub-Sampling TDR Measurements in Proc.«, 15th IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SIRF), San Diageo, USA, Jan. 26-28, 2015

**Haumtratz, T.; Bieker, T.; Lindenmeier, S.:** »Compensation of the range resolution degradation in a bistatic scenario and its influence on classification«, Signal Processing Symposium (SPSymo), June 2015

**Herschel, R.; Nowok, S.; Warok, P.; Lang, S. A.; Pohl, N.:** »MIMO System for Fast Imaging at 90 GHz in Proc.« 45th European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, Sept. 5-11, 2015.

**Hough, L.; Stanko, S.; Maresch, A.; Wellig, P.:** »Validation of EOSAR Algorithms for Blending of Objects in SAR-Scenes«, International Symposium

on Indirect Protection (ISIP), Okt.2015, Bad Reichenhall

**Jenal, A.; Weber, I.; Kneer, C.; Bongartz, J.:** »Der Tragschrauber als Sensorplattform für die Fernerkundung«, DGPF Jahrestagung 2015, Köln, Volume: 24 (p. 226-23

**Johannes, W.; Stanko, S.; Sommer, R.; Wilcke, J.:** »ScÜRad- A Sensor System for Perimeter Protection of Critical Infrastructure«, International Symposium on Indirect Protection (ISIP), Okt.2015, Bad Reichenhall

**Kebschull, C.; Flegel, S.; Scheidemann, P.; Wiedemann, C.; Gelhaus, J.; Eversberg, T.; Stoll, E.:** »Entwicklung eines Messwertgenerators zur Simulation von Sensornetzwerken«, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2015, Rostock

**Knott, P.; Perkuhn, R.:** »Non-Destructive Permittivity Measurement of Thin Dielectric Sheets«, 2015 German Microwave Conference

(GeMiC), Nürnberg, March 2015

**Kohleppel, R.; Cristallini, D.:** »Association of detections using simultaneous monostatic and bistatic gmti«, 2015 IEEE Radar Conference (Radar-Con), May 2015, Arlington, USA

**Kuschel, H.; Heckenbach, J.; Schell, J.; Ummenhofer, M.:** »Passive Radar based Control of Wind Turbine Collision Warning for Air Traffic«, IRS 2015, Juni 2015, Dresden/GE

**Kuschel, H.; Heckenbach, J. Ummenhofer, M.:** »Mitigation of Rotor Blade-Flash Masking in Passive Radar Collision Warning System PARASOL«, 2015 IEEE Radar Conference, Okt. 2015, Johannesburg/SF

**Lang, S.; Herschel, R.; Nowok, S.; Zimmermann, R.; Pohl, N.:** »3D MIMO Imaging at 360 GHz for Security Screening«, Future Security, Sept. 2015, Berlin

**Lang, S.; Demming, M.;**

**Jaeschke, T.; Noujeim, K.; Konynenberg, A.; Pohl, N.:** »3d SAR imaging for dry wall inspection using an 80 ghz fmcw radar with 25 ghz bandwidth«, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), May 2015

**Loecker, C.; Landsberg, A.; Bertuch, T.:** »Solid state vs. micro relay switches employed in a circular switched parasitic array antenna«, 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April 2015

**Martorella, M.; Stagliano, D.; Lischi, S.; Giusti, E.; Salvetti, F.; Bacci, A.; Gelli, S.; Cataldo, D.; Massini, R.; Lupidi, A.; Brisken, S.; Fontana, A.; Berens, P.; Krysik, P.; Baczyk, M.K.; Gashinova, M.; Cherniakov, M.; Tran, H-T.; Greig, D.; Meta, A.; Corucci, L.; Kalender, E.; Nel, W.:** »Multistatic/Multichannel Radar Imaging in Practice: The NATO SET-196 Trials«, NATO SET RSM 228 Specialist Meeting, Pisa/IT, 19.-23.10.2015

Camouflage Assessment from Airborne Platforms«, International Symposium on Indirect Protection (ISIP), Okt.2015, Bad Reichenhall

**Nübler, D.:** »Design of a 32 element rotman lens at 220 GHz with 20 GHz bandwidth«, German Microwave Conference (GeMiC), März 2015, Nürnberg

**Nübler, D.; Brauns, R.; Heinen, S.; Kose, S.; Pohl, N.:** »A fast rotating scanning approach for millimeter wave imaging«, European Microwave Week (EUMW), Sept. 2015, Paris

**Nübler, D.; Warok, P.; Pohl, N.:** »High frequency line cameras for sorting applications«, International Conference on Optical Characterization of Materials (OCM), März 2015, Karlsruhe

**Nübler, D.:** »Design of a 32 element rotman lens at 220 ghz with 20 ghz bandwidth«, Microwave Conference (GeMiC), March 2015, Nürnberg



- Palm, S.; Pohl, N.; Stilla, U.:** »Challenges and Potentials Using Multi Aspect Coverage of Urban Scenes by Airborne SAR on Circular Trajectories«, ISPRS, High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information
- Pohl, N.; Stanko, S.; Caris, M.; Tessmann, A.; Schlechtweg, M.:** »An ultra-high resolution radar-system operating at 300 ghz«, IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), Jan 2015
- Prunte, L.:** »Gmti on short sequences of pulses with compressed sensing«, 3rd International Workshop on Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing (CoSeRa), June 2015
- Thomas, S.; Bredendiek, C.; Pohl, N.:** »Comparison of inductor types for phase noise optimized oscillators in sige at 34 ghz«, Microwave Conference (GeMiC), 2015 German, March 2015
- Turso, S.; Bertuch, T.:** »Zero-IF Radar Signal Processing«, 45th European Microwave Conference (EuRAD), Paris, 7-10 Sept 2015
- Ummenhofer, M.; Bournaka, G.; Cristallini, D.; Kuschel, H.:** »Receiver plattform motion estimation using terrestrial broadcast transmitters for passive radar«, IEEE Radar Conference, Johannesburg/SA, Oct. 2015
- Ummenhofer, M.; Schell, J.; Heckenbach, J.; Kuschel, H.; O'Hagan, D.:** »Doppler estimation for dvb-t based passive radar systems on moving maritime platforms«, IEEE Radar Conference (RadarCon), May 2015
- Valavan, S.; Knott, P.:** »Improving bandwidth of planar microstrip patch array antennas«, 2015 German Microwave Conference (GeMiC), Nürnberg, March 2015
- Van Delden, M.; Hasenaecker, G.; Pohl, N.; Aufinger, K.; Musch, T.:** »An 80 GHz Programmable Frequency Divider for Wideband mm-Wave Frequency Ramp Synthesis in Proc.«, 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), Sendai, Japan, Aug. 26-28, 2015
- Vaupel, T.:** »An improved 3-D near-field ISAR imaging technique with extended far-field RCS extraction«, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vancouver, 19-24 July 2015
- Wagner, S.:** »Increasing the Performance of ATR Systems using artificial training data«, NATO Specialists Meeting SET 228 on Radar Imaging for Target Identification, Pisa, 19./20. Oktober 2015
- Wagner, S.:** »Morphological component analysis in sar images to improve the generalization of atr systems«, 3rd International Workshop on Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing (CoSeRa), June 2015
- Wang, S.; Pohl, A.; Jaeschke, T.; Czaplik, M.; Köny, M.; Leonhardt, S.; Pohl, N.:** »A Novel Ultra-Wideband 80 GHz FMCW Radar System for Contactless Monitoring of Vital Signs in Proceedings«, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, Italy, August 25-29, 2015
- Weber, I.; Jenal, A.; Kneer, C.; Bongartz, J.:** »Einsatz einer bildgebenden Hyperspektralkamera in einem Tragschrauber«, DGPF Jahrestagung 2015, Köln, Volume: 24 (p. 392-397)
- Weber, I.; Jenal, A.; Kneer, C.; Bongartz, J.:** »PANTIR - A dual camera setup for precise georeferencing and mosaicing of thermal aerial images«, PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS conference 2015,

Munich, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-269-2015

**Weber, I.; Jenal, A.; Kneer, C.; Bongartz, J.:** »Gyrocopter-based Remote Sensing Platform«, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Berlin, Volume: XL-7/W3 DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1333-2015

**Weinmann, F.:** »Simulation of Radar Signatures of Arbitrary Airborne Targets«, ISIP 2015 International Symposium on Indirect Protection, Bad Reichenhall, Oktober 2015

**Weinmann F.; Worms, J.:** »Time-variant scattering properties of wind turbines«, 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lissabon, Portugal, April 2015

**Weiss, M.; Fornaro, G.; Reale, D.:** »Multi scatterer detection within tomographic sar using a compressive

sensing approach«, 3rd International Workshop on Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing (CoSeRa), Pisa, Italien, June 2015

**Welp, B.; Noujeim, K.; Pohl, N.:** »A 24 GHz Signal Generator with 30.8 dBm Output Power Based on a Power Amplifier with 24.7 dBm Output Power and 31% PAE in SiGe«, Proc. 2015 IEEE Bipolar / BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Boston, USA, Okt. 2015

**Wiedemann, C.; Horstmann, A.; Keschull, C.; Flegel, S.; Stoll, E.:** »Die Auswirkung vorsätzlich herbeigeführter Fragmentationereignisse auf die Weltraummüllumgebung«, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2015, Rostock

**Wojaczek, P.:** »Hybrid Person Detectin and Tracking in H 264/AVC Video Streams«, VISAPP 2015, 10th international

Conference on Computer Vision Theory and Applications, 11.-14.März 2015, Berlin/GE

## Sonstige Vorträge auf wissenschaftlichen Veranstaltungen

- Cristallini, D.:** »Range resolution improvement for multi-PCL SAR«, Passive Radar Workshop, University of Adelaide, November 2015
- Ender, J.:** »Kognitives Radar«, F&T Symposium Mannheim 28. Januar 2015
- Ender, J.:** »Neue Entwicklungen bei bildgebendem Radar«, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Köln, 17. März 2015
- Ender, J.:** »Kognitives Radar«, 60 Jahre Radar-Technologie, Ulm, 30. Juni 2015
- Pohl, N.:** »Advanced SiGe-Circuits for mm-Wave Radar Applications«, 45th European Microwave Conference (EuMC), Workshop on RF-Technologies on the move: the races of integrated mm-wave automotive radar and sensing technologies, Paris, France, Sept. 5-11, 2015,
- Pohl, N.:** »High Resolution mmWave Radar for Industrial and Medical Applications«, 2015 IEEE International Microwave Symposium (IMS), Workshop on Modern radar systems for high resolution ranging, indoor localization, and vital signs detection, Phoenix, USA, May 17-22, 2015.
- Pohl, N.:** »Millimeter Wave Radar Imaging for Security and Industrial Applications«, 2015 IEEE International Microwave Symposium (IMS), Workshop on Emerging Systems, Methods, and Applications for Microwave and THz Imaging, Phoenix, USA, May 17-22, 2015.
- Pohl, N.:** »Ultra High Resolution Millimeter Wave Radar based on SiGe Integrated Circuits«, 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, Heidelberg, April 27-29, 2015.
- Pohl, N.:** »New Radar Applications in the THz Frequency Range«, THz Security Workshop at Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, 29. Mai 2015
- Wagner, S.:** »Identification of Radar Targets using a Deep Learning Approach«, EDA workshop on the Application of Deep Learning in Radar, Electronic Warfare and Multisensor Fusion, Brüssel, 02.11.2015
- Weiß, M.:** »From SAR Interferometry to 3D/4D Tomography: basics and application«, Tutorial IGARSS 2015, Mailand, Italien, Juli 2015
- Wiedemann, C.; Horstmann, A.; Kebschull, C.; Flegel, S.; Stoll, E.:** »Die Auswirkung vorsätzlich herbeigeführter Fragmentationsereignisse auf die Weltraummüllumgebung«, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2015, Rostock
- Ummenhofer, M.:** »Beat Frequency Detection of Wind Turbine Rotor Echoes for Passive Radar Systems«, PCL Focus Day, Wachtberg, April 2014
- Wasserzier, C.:** »OASE - Off-shore Avifauna Surveillance Evaluation«, Messe »Husum Wind«, 15.09.2015, Husum

**Sonstige Veröffentlichungen**

**Bertuch, T.:** »Results and Conclusions of the METALESA and MATAFORE Studies on Meta-Material Applications for Defence«, EDA Seminar on Meta-materials for defence applications, 29. September 2015, Brüssel, Belgien

**Krebs, C.; Gütgemann, S.; Pohl, N.; Nüßler, N.; Fischer, B.; Krauthäuser, H.:** »Signale trotz Staub und Wasserdampf«, QZ Qualität und Zuverlässigkeit 9/2015, 1.9.2015

**Bendel, H.:** »Kunststoffabfälle sortieren: Höhere Reinheit bei niedrigeren Kosten«, [www.plastverarbeiter.de](http://www.plastverarbeiter.de), 25.9.2015

**Danklmayer, A.:** »SAR Signal Processing: a Hands-on Approach«, Radar training Workshop on »Polarization and Waveform Diversity Radar Methods and their Application in Disaster Management« at URSI AT-RASC 2015, 18. Mai 2015, Las Palmas, Spain

**Danklmayer, A.:** »SAR Signal Processing: a Hands-on Approach«, Radar training Workshop WFMN 2015, 10. Februar 2015, Chemnitz, Deutschland



# GREMIENTÄTIGKEITEN

## **Bartsch, G.**

- EDA's CapTech Networks of experts: CapTech-Member
- DGLR-Fachausschuss 2.5 »Sicherheit und Verteidigung«: Gründungsmitglied
- DGLR-Fachausschuss 2.6 »Umweltaspekte der Raumfahrt«: Mitglied

## **Berens, P.**

- EUSAR 2016: Program Committee

## **Brisken, S.**

- IEEE Radar Conference, Jo'burg, RSA: Technical Committee

## **Brüggenwirth, S.**

- EDA RFST: National Expert

## **Brenner, A.**

- EUSAR 2016: Program Committee

## **Cerutti-Maori, D.**

- EUSAR 2016: Program Committee

## **Cristallini, D.**

- EUSAR 2016: Program Committee

## **Danklmayer, A.**

- EUSAR 2016: Program Committee
- IGARSS 2015: Program Committee
- GeMiC 2015: Program Committee
- VDE ITG Fachauschuß 7.5 Wellenausbreitung, Appointed Member
- WFMN 2015: Program Committee

- EuCAP 2015: Program Committee

## **Flegel, S.**

- Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC): Nationaler Vertreter in der Working Group 1 (Measurements); Vertreter im Auftrag der ESA für den Bereich "Radar measurements"

## **Letsch, K.**

- Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC): Nationaler Vertreter in der Working Group 1 (Measurements)

## **Leushacke, L.**

- Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC): Nationaler Vertreter in der Working Group 1 (Measurements)

## **Ender, J.**

- Fellow des IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers)
- VDE-ITG Fachbereich 7: Fachbereichsleiter Hochfrequenztechnik
- NATO Science & Technology Organisation (STO) Sensors & Technology (SET) Panel: Member at large
- Institut für Sicherheitsforschung der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg: Kuratoriumsmitglied
- EUSAR 2016: Program Board
- EuRAD 2016: Technical Program Committee
- Future Security 2015: Programm Komitee Mitglied
- IRS 2015: Technical Program Committee
- Mitglied im Rat der DGON (Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation)

- Mitglied des IMA (Institut für Mikrowellen- und Antennentechnik e. V.)
- CoSeRa: Co-Chairman
- ZESS: Vorstandsmitglied

**Klare, J.**

- EuRAD 2015 / 2016: Program Committee
- ICARES (IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology) 2015: Program Committee
- ICSPDM (International Conference on Single Processing & Data Mining) 2015: Program Committee
- IRS 2015: Program Committee
- EUSAR 2016: Program Committee

**Klemm, R.**

- EUSAR 2016: Honorary Member; Program Committee

**Knott, P.**

- 7.1 Antennen der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG): Stellv. Vorsitzender
- Capability Technology Area (CapTech) IAP2 - RF Sensor Systems & Signal Processing Panel, European Defence Agency (EDA): CapTech Governmental Expert (CGE)
- Executive Committee (Vorstand) des IEEE Microwave Theory and Techniques (MTT) / Antennas and Propagation (AP) Joint
- Chapter: Vice-Chair
- ICT COST Action IC1102 Versatile, Integrated, and Signalaware Technologies for Antennas (VISTA): Member
- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) e.V.: Mitglied im Wiss. Beirat

**Kuschel, H.**

- NATO SET 195 DMPAR verification of Short term solution: Chairman
- IEEE-AES Radar Board: Member

**Matthes, D.**

- NATO SCI 252 Coherent Electronic Attack to Advanced Radar Systems: Chairman
- NATO SCI 282 Solution Advancing next Generation Radar Electronic Attack: Chairman

**Nübler, D.**

- DGZfP: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
- OCM 2015: Programkomitee

**Pohl, N.**

- VDE ITG Fachausschuss 7.3 Mikrowellentechnik, Member
- IEEE MTT Technical Committee MTT-16, Microwave Systems, Member
- URSI, Kommission A, Elektromagnetische Metrologie: Mitglied
- IEEE BCTM, Technical Program Committee, Member of the Wireless Subcommittee
- EuRAD 2017: TPC Chair
- IMS Student Design Contest
- Executive Committee of the IEEE Topical Meetings on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF (SIRF)
- EUSAR 2016: Program Committee

**Prünke, L.**

- EUSAR 2016: Program Committee

**Ribalta, A.**

- EUSAR 2016: Program Committee

**Rosebrock, J.**

- EUSAR 2016: Program Committee

**Schumacher, R.**

- EDA-SPERI: Projektmitglied

**Uschkerat, U.**

- EDA-RFST: National Expert
- NATO SET 208 Signal processing for implementation in hand-held multi sensor ground penetrating system: Co-Chairman
- CEPT-SE24: Mandat zum WI37

**Walterscheid, I.**

- EUSAR 2016: Program Committee

**Weiß, M.**

- EUSAR2016: EUSAR-Executive, Program Committee;

**Wilden, H.**

- EDA CapTech IAP2: Member

# AUSZEICHNUNGEN

**Bongartz, J.:** 2. Platz beim »Fraunhofer-Ideenwettbewerb«  
im Rahmen des Fraunhofer-Symposiums »Netzwerk«, 27.-28.  
Januar 2015, München

**Brüggenwirth, S.:** »Dornier-Preis« der Deutschen Gesellschaft  
für Luft- und Raumfahrt (DGLR)

**Kneer, C.:** »AFCEA Studienpreis« des AFCEA Bonn e.V.

**Pohl, N.; Thomas, S.; Küppers, S.; Jaeschke, T.:** »Best De-  
monstration Award 2015 IEEE Radio Wireless Week« des IEEE

**Rösgen, T.:** Ehrung als Jahrgangsbester bei der Abschluss-  
prüfung zur Ausbildung als Feinwerkmechaniker durch die  
Kreishandwerkerschaft und die Fraunhofer-Gesellschaft

**Westhöfer, K.:** »AFCEA Studienpreis« des AFCEA Bonn e.V.



# VERANSTALTUNGEN

## Tagungsorganisation

»NATO SET 212-Meeting«,  
20.-21. Januar 2015,  
Wachtberg

»TA 1 Dt.-No Kooperation«,  
28.-29. Januar 2015,  
Wachtberg

»Workshop WTD81«, 31.  
März 2015, Greding

»Klassifizierungs-Workshop«,  
21. April 2015, Koblenz

»Girls Day«, 23. April 2015,  
Wachtberg

»PCL Focus Days«, 28.-29.  
April 2015, Wachtberg

»FHR Workshop Millimeter-  
wellenradar«, 05.-06. Mai  
2015, Wachtberg

»Next Stop Job«, 19. Mai  
2015, Wachtberg

»5th Progress Meeting DEU/  
FRA TA Nr. 119«, 27.-29. Mai  
2015, Wachtberg

»Wachtberg-Forum«, 11. Juni  
2015, Wachtberg

»7th Int. Summer School  
on Radar/SAR«, Juli 2015,  
Remagen

»Wissenschaftscampus«,  
05.10 – 08. Oktober 2015,  
Bonn, Wachtberg, Sankt  
Augustin

»NATO SCI 281«, 20.-22.  
Oktober 2015, Wachtberg

»IEA Wind Task 11 TEM 83«,  
Datum, Wachtberg

Organisation und Durchfüh-  
rung des Panels "Protection  
of Space infrastructure" bei  
der Berliner Sicherheitskon-  
ferenz, 17.-18. November  
2015, Berlin

## Beteiligung an Messen und Fachausstellungen

Messestand bei der »German  
Microwave Conference (Ge-  
MiC)«, 15.-18. März 2015,  
Universität Erlangen  
Messestand bei der »OCM  
2015« am Fraunhofer IOSB,  
18.-19. März 2015, Karlsruhe

MitAussteller beim  
Gemeinschaftsstand der  
Fraunhofer-Gesellschaft bei  
der »AnugaFoodtec«, 23.-27.  
März 2015, Köln

Messestand bei der »Women  
& Work«, 25. April 2015,  
Bonn

MitAussteller beim Gemein-  
schaftsstand der Fraunhofer-  
Gesellschaft bei der »Control  
2015«, 4.-7. Mai 2015,  
Stuttgart

Messestand beim »DGON  
Navigationskonvent«, 18.-19.  
Juni 2015, Berlin

Gemeinsamer Messestand bei  
der »European Microwave  
Week (EUMW)«, 06.-11.  
September 2015, Paris,  
Frankreich

Messestand auf der »ISIO  
2015« bei der WTD52,  
19.-23. Oktober 2015, Bad  
Reichenhall

Messestand beim »Fraunho-  
fer-Vision Technologietag«,  
13. -15. Oktober 2015,  
Fraunhofer IPA Stuttgart

Messestand bei der »Berliner  
Sicherheitskonferenz«, 17.-  
18. November 2015, Berlin

MitAussteller beim  
Gemeinschaftsstand der  
Fraunhofer-Gesellschaft bei  
der »Space Tech Expo«, 17.-  
19. November 2015, Bremen

MitAussteller beim  
Gemeinschaftsstand der  
Fraunhofer-Gesellschaft  
beim »Absolventenkongress  
Deutschland«, 26.-27.  
November 2015, Köln

# PRESSESPIEGEL

Datum	Titel	Medium
19.02.15	Preis für sicheres Aufspüren von Landminen	Rhein-Zeitung
02.03.15	High-precision radar for the steel industry	phys.org
04.03.15	High precision radar for the steel industry	STEELGURU
12.03.15	Tragschrauber kann auch Winzer entlasten	Rhein-Zeitung
18.03.15	Radar für die Stahlverarbeitung	ProPhysik
27.03.15	High-precision radar for the steel industry	Sciencedaily.com
08.04.15	Gestra sucht nach Weltraummüll	Bonner Rundschau
10.04.15	Hochschule Koblenz präsentiert sich bei der Hannover Messe	Rhein-Zeitung
15.04.15	Millionen-Auftrag kommt nach Berkum	General-Anzeiger
15.04.15	Ende 2017 soll es erste Messungen geben	Blick aktuell
15.04.15	Hochpräzises Radar für Stahlwalzen	Produktion
17.04.15	Roboter und Schwimmfarn	General-Anzeiger
22.05.15	Schlösser Memory	Bonner Rundschau
01.07.15	Neues Überwachungssystem für Weltraumschrott	Bild der Wissenschaft
01.07.15	Wirtschaft will Museum retten	Bonner-Rundschau
01.07.15	Junge Arbeitskräfte ziehen weg	Generalanzeiger
01.07.15	Radar schützt vor Weltraummüll	Jura Forum
01.07.15	Radar guards against space debris	phys.org
02.07.15	Débris spatiaux - Un radar de surveillance pour 2018	Environnement Magazine
02.07.15	Radar Gestra identifiziert 720000 gefährliche Trümmer	ingenieur.de
02.07.15	Fraunhofer researchers in Germany developing space debris surveillance system	Aerospace Technology Market
02.07.15	Fraunhofer researchers in Germany developing space debris surveillance system	aerospace-technologie
03.07.15	Das rote Blinken: Grüne wollen Windparks dunkel machen	Ostsee-Zeitung
06.07.15	Germany to tackle space junk with GESTRA project	gizmag.de
08.07.15	Radar soll die Erde vor Gefahren aus dem All schützen	Frankfurter Rundschau
09.07.15	Engineering Update Episode #118: Storing solar energy for later	ECN
10.07.15	Wie viel Müll umkreist die Erde?	Weser Kurier
14.07.15	Storing Solar Energy for Later	WirelessDesignMag.com

<b>Datum</b>	<b>Titel</b>	<b>Medium</b>
28.07.15	TeraSense Develops Promising Terahertz and sub THz Frequency Range Innovative Imaging Equipment	technology.org
28.07.15	Reportage zur Radartechnik	WDR
07.08.15	July's top stories: Lockheed buys Sikorsky for \$9bn, Solar Impulse 2 halted	aerospace-technology.com
19.08.15	Neues Radarsystem sucht Weltraummüll	Saarbrückener Zeitung
21.08.15	Der Region fehlt ein Profil	General-Anzeiger
27.08.15	Sonne Wind & Wärme	HUSUM Wind
01.09.15	Signale trotzen Staub und Wasserdampf	QZ
06.09.15	Besuch des Radoms	General-Anzeiger
25.09.15	Kunststoffabfälle sortieren: Höhere Reinheit bei niedrigeren Kosten	Plastverarbeiter.de
01.10.15	Höhere Reinheit bei niedrigeren Kosten	Plastverarbeiter Magazin
08.10.15	Mit Lichtsensoren in neue Dimensionen vorstoßen	Chemie.de
16.10.15	Kunststofftrennung nach dem Aschenputtelprinzip	VDI Nachrichten
17.10.15	Uedem, wir haben ein Problem	Rheinische Post
04.11.15	Von Müll umhüllt	Süddeutsche Zeitung
01.12.15	Erdorbit: Ab 2026 nicht mehr nutzbar	Behörden Spiegel
11.12.15	Bonner Rundschau	"Projekt Wachtberg"

ANFAHRT





# STANDORTE

Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR hat insgesamt drei Standorte in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz.

## Hauptsitz und Postanschrift:

Fraunhofer FHR  
Fraunhoferstr. 20  
53343 Wachtberg

Tel.: +49 228 9435-227  
Fax: +49 228 9435-627

info@fhr.fraunhofer.de  
www.fhr.fraunhofer.de

## Institutsteil Wachtberg-Villip

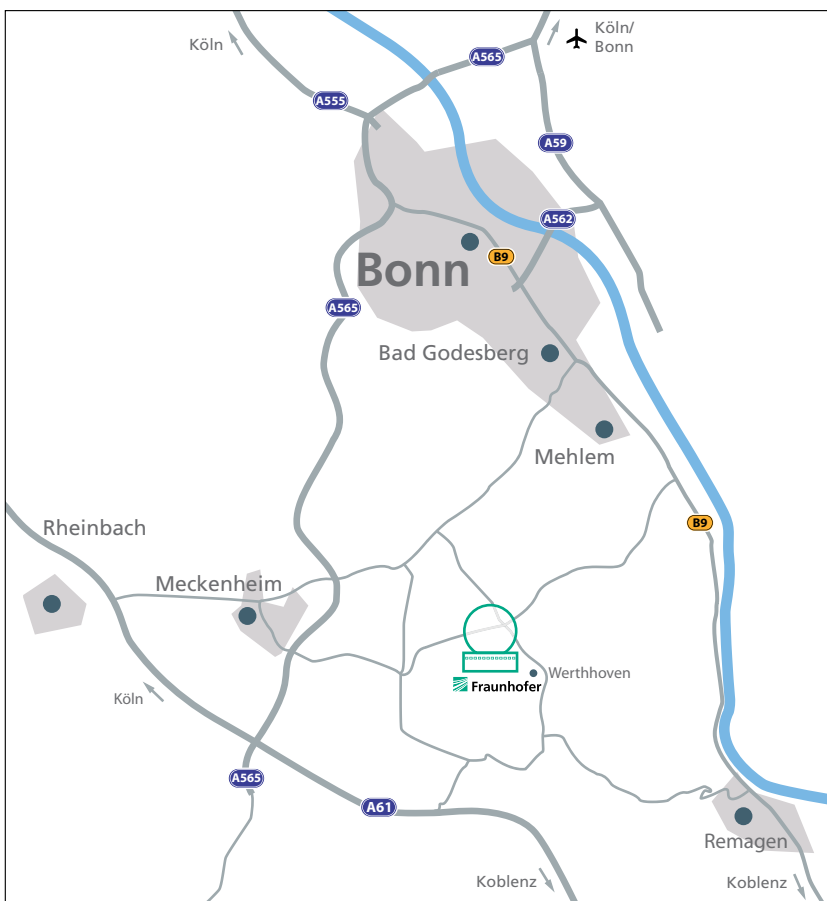
Fraunhofer FHR  
Siebengebirgsblick 22  
53343 Wachtberg-Villip

Tel.: +49 228 9435-159  
Fax: +49 228 9435-192

## Anwendungszentrum Remagen

Fraunhofer-Anwendungszentrum für multimodale und luftgestützte Sensorik AMLS  
Joseph-Rovan-Allee 2  
53424 Remagen

Tel.: +49 2642 932-427  
Fax: +49 2642 905440-427



# IMPRESSUM

## Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik  
und Radartechnik FHR  
Fraunhoferstr. 20  
53343 Wachtberg

Tel.: +49 (0)228 9435-227  
Fax: +49 (0)228 9435-627  
info@fhr.fraunhofer.de  
www.fhr.fraunhofer.de

## Bilder

© Fraunhofer FHR, außer:  
S. 3, S. 11, S. 17, S. 19, S. 20, S. 25, S. 38, S. 39, S. 41, S. 44,  
S. 51, S. 59, S. 62, S. 63, S. 65, S. 67 Abb. 1, S. 70, S. 71 Abb.  
1, S. 72, S. 73, S. 75, S. 77, S. 79, S. 80, S. 81, S. 93: © Uwe  
Bellhäuser, Saarbrücken  
S. 18: © DGLR  
S. 20, S. 48, S. 49, S. 55, S.86: © Shutterstock/Farunhofer FHR  
S. 54: © Wikipedia/Michael Schick  
S. 66: © Taurob GmbH  
S. 87: © Shutterstock  
S. 90: © Fraunhofer-Gesellschaft  
S. 92: © DLR (CC-BY 30)  
S. 93 Abb. 1: © Hans-Jürgen Vollrath  
S. 93 Abb. 2: © AFCEA Bonn e.V.

## Redaktion

Dipl.-Volksw. Jens Fiege (Leitung)  
M.Sc. Hanne Bendel  
Dipl.-Biol. Christiane Weber  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender

## Layout und Satz

B.A. Jacqueline Reinders  
Dipl.-Volksw. Jens Fiege

## Social Media



Facebook

<http://www.facebook.com/Fraunhofer.FHR>



Twitter

[http://www.twitter.com/Fraunhofer\\_FHR](http://www.twitter.com/Fraunhofer_FHR)

Alle Rechte vorbehalten.  
Vervielfältigung und Verbreitung nur mit Genehmigung der  
Redaktion.

Wachtberg, März 2016



