



JAHRESBERICHT
2017

VORWORT

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

ein ereignisreiches Jahr 2017 mit vielen Aktivitäten und Ereignissen liegt hinter uns. Besonders in unserem Geschäftsfeld Weltraum hat das Fraunhofer FHR einige wichtige Meilensteine erreicht. So wurden Anfang 2017 mit dem Weltraumbeobachtungsradar TIRA erste Beobachtungs- und Analyseaufträge im Rahmen des neuen Projektes WRIS («Weltraumidentifizierungssensor») durchgeführt. Partner ist das Nationale Weltraumlagezentrum, welches im Zentrum Luftoperationen der Luftwaffe gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kalkar am Niederrhein betrieben wird. Auch die Arbeiten an GESTRA (*German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar*) schreiten zielstrebig voran: Das System, beauftragt vom DLR-Raumfahrtmanagement, befindet sich derzeit in der Integrationsphase. Nach seiner Fertigstellung und Übergabe an das Weltraumlagezentrum wird es ein weiterer Baustein für die lückenlose, radargestützte Weltraumlageerfassung sein. Beim 1. Nationalen Symposium Weltraumsicherheit, das im Januar 2018 stattfand, wurde die Bedeutung beider Weltraumbeobachtungsradare für den Schutz der raumgestützten Infrastruktur besonders hervorgehoben.

Seine Fähigkeiten und sein Know-how bringt das Fraunhofer FHR auch in die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« (FMD) ein. Im Rahmen von FMD fördert das Bundesforschungsministerium mit FMD 13 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen mit rund 350 Millionen Euro. Mit seinem Anteil aus dem Investitionsprogramm baut das Institut unter anderem modernste OnWafer- und Antennenmesstechnik sowie eine additive 3D-Fertigung für Rapid Prototyping auf. Zur Vermessung und Qualifizierung fertiger Systeme und Antennen entstehen am Institut außerdem zwei moderne Messkammern nach IEEE-Norm, welche den Frequenzbereich von 100 MHz bis 1,1 THz abdecken werden. Im Juni gab der Parlamentarische Staatssekretär Thomas Rachel MdB im Rahmen eines Festakts den Startschuss für FMD in Wachtberg. Zukünftig bietet FMD durch die enge Verzahnung und das kohärente Auftreten der beteiligten Institute gerade kleinen und mittelständischen Unternehmen einen umfassenderen und einfacheren Zugang zur nächsten Technologie-Generation.

Weitere wichtige Ereignisse gab es zudem auch im personellen Bereich: Institutsleiter Peter Knott wurde zum Professor an der RWTH Aachen berufen und vertritt dort das Fach »Radar-Systemtechnik« am Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Zum Start überreichte ihm der Rektor Prof. Dr. Ernst Schmachtenberg die Ernennungsurkunde. Dr. Frank Weinmann übernahm zum 1. März 2017 die Leitung der Abteilung »Antennentechnologie und elektromagnetische Modellierung« (AEM), darüber hinaus gibt es am Fraunhofer FHR nun zwei neue Abteilungen: Die Abteilung MHS ist zum 1. Januar in die



Abteilungen »Integrierte Schaltungen und Sensorsysteme« (ISS) und »Höchstfrequenz-Radar und Anwendungen« (HRA) aufgeteilt worden, die von Dirk Nübler (ISS) und Dr. Stephan Stanko (HRA) geleitet werden. Heiner Kuschel übergab zum Jahresende 2017 die Leitung der Abteilung »Passive und störteste Radarverfahren« (PSR) an seinen Nachfolger, Prof. Dr. Daniel O'Hagan. Prof. Dr. Jens Bongartz übernahm die Leitung des thematisch erweiterten Geschäftsfelds »Mensch und Umwelt«. In dem neu hinzugekommenen Bereich »Mensch« werden Anwendungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder im medizinischen und persönlichen Umfeld untersucht. Die Fähigkeit der berührungslosen Messung und die Durchdringung von Material eröffnen hier viele Möglichkeiten.

Neben unserer jährlichen, gut besuchten Hausmesse »Wachtberg-Forum« veranstalteten wir in diesem Jahr anlässlich des 60-jährigen Institutsbestehens auch einen Tag der Offenen Tür. Das Interesse bei den Anwohnern in der Region war enorm! Rund 2.500 Besucher kamen am 28. Juni nach Wachtberg und informierten sich über unsere Forschung in den Bereichen Verteidigung, Weltraum, Verkehr, Umwelt, Sicherheit und Produktion. Highlight für viele war ein Blick ins Innere des Radoms, aber auch die Ausstellung sowie die Vorträge wurden rege besucht. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beantworteten viele Fragen zu ihren Exponaten und Projekten von kleinen wie großen Besuchern. Wir danken allen Beteiligten herzlich für ihr großes Engagement bei der Vorbereitung und Durchführung dieses Tages!

Wir bedanken uns an dieser Stelle auch bei den Kooperationspartnern des Fraunhofer FHR – allen voran den Institutionen, die unsere Forschungsarbeiten gefördert haben – und unseren Partnern aus der Wirtschaft für ihr Vertrauen.

Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben an zahlreichen Projekten und Themen gearbeitet. Eine Auswahl stellen wir Ihnen mit dem vorliegenden Jahresbericht 2017 vor und laden Sie, liebe Leser, dazu ein, sich einen Einblick in unsere vielfältigen Aktivitäten zu verschaffen.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre!



Geschäftsführender Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Peter Knott

Tel. +49 228 9435-227

peter.knott@

fhr.fraunhofer.de



Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling

Tel. +49 228 9435-176

dirk.heberling@

fhr.fraunhofer.de

Peter Knott, März 2018

Dirk Heberling, März 2018

INHALTSVERZEICHNIS

- 2 Vorwort
- 4 Inhaltsverzeichnis

6 AUS DEM INSTITUT

- 6 Besondere Ereignisse 2017
- 10 Startschuss für Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) am Fraunhofer FHR
- 12 Wachtberg-Forum und Tag der offenen Tür
- 14 EDA-Workshop »Radar Signatures & EM Benchmarks«

16 ÜBERBLICK

- 16 Fraunhofer FHR im Profil
- 20 Ihre Ansprechpartner
- 22 Das Kuratorium
- 24 Forschungsgruppen an Universitäten
- 26 Interview Dr. Udo Uschkerat:
»Der Fraunhofer-Idee gerecht werden«
- 28 Geschäftsfeldübersicht

30 FACHBEITRÄGE

- 30 Das luftgestützte Multifunktionsradar der nächsten Generation
- 32 SAR-Bildgebung aus unterbrochenen Messungen
- 34 Deutsch-Schweizer Kooperation zwischen Fraunhofer FHR und armasuisse W+T
- 36 Abstandsaktiver Schutz mit Millimeterwellenradar
- 38 Abwehr hypersonischer Flugkörper
- 40 DVB-S2 basierte Passiv-Radar-Abbildung
- 42 Kryogene Phased-Array Radare zur Weltraumüberwachung

- 44 Vermessung der kleinteiligen Weltraumtrümmerpopulation mit TIRA
- 46 Überwachung des erdnahen Weltraums durch ein Radarnetzwerk
- 48 Demonstration eines halbleiterbasierten Navigationsradars
- 50 Antennenentwicklung für ein neuartiges Seenotrettungssystem
- 52 UWB-Radar zur Erkennung von Pilzbefall bei Weinreben
- 54 COLORS: Auf dem Weg zum Vogelschutz in Windparks
- 56 RAWIS schützt Rettungskräfte bei Katastrophen
- 58 Drohnerdetektion mit Mikrodoppler-Analyse
- 60 Breitenbestimmung von Stahlbändern im Walzprozess – Radarsysteme im industriellen Einsatz
- 62 3D-Radarbilder zur durchleuchtenden Inspektion von Objekten
- 64 Identifizierung mit Millimeterwellen-Tags
- 66 Zuverlässige Qualifizierung von Automobilradaren mit ATRIUM
- 68 Charakterisierung und Design von SIW-Komponenten und Antennen

70 ANHANG

- 70 Veröffentlichungen
- 72 Ausbildung und Lehre
- 78 Gremientätigkeiten
- 82 Auszeichnungen
- 83 Veranstaltungen
- 84 Pressespiegel
- 86 Standorte

88 IMPRESSUM



BESONDERE EREIGNISSE 2017

Wachtberg, 1.1.2017

Neue Abteilungen ISS und HRA

Die ehemalige Abteilung MHS wurde aufgrund des starken Wachstums und der strategischen Ausrichtung der beiden Teile in zwei neue Abteilungen aufgeteilt: Die neue Abteilung »Integrierte Schaltungen und Sensorsysteme (ISS)« wird jetzt von Dirk Nüßler und die neue Abteilung »Höchstfrequenz-Radar und Anwendungen (HRA)« von Dr. Stephan Stanko geleitet.

Wachtberg / Uedem, 7.3.2017

Fraunhofer FHR und Weltraumlagezentrum vertiefen Zusammenarbeit

Das Fraunhofer FHR führte mit dem Weltraumbeobachtungsradar TIRA den ersten Beobachtungs- und Analyseauftrag im Rahmen des neuen Projektes WRIS (»Weltraumidentifizierungssensor«) durch. Partner ist das Weltraumlagezentrum.

Wachtberg, 14.3.2017

Workshop: Radartechnologie zur UAV-Detektion

Im ausgebuchten Workshop präsentierten Forscher und Industrie ihre Lösungen rund um die UAV-Detektion. Highlight war die Live-Vorführung der Detektionssysteme vom Fraunhofer FHR. Die rund 100 Teilnehmer diskutierten über Einsatzszenarien und die Möglichkeiten von Radar zur UAV-Detektion.

Wachtberg, 22.3.2017

Auszeichnung: Bastian Rahlf ist bester Feinmechaniker-Azubi in der Region

Bastian Rahlf hat seine Ausbildung zum Feinwerkmechaniker als Jahrgangsbester der Innung Bonn-Rhein-Sieg beendet. Er wurde zudem zur jährlichen Ehrung der besten Auszubildenden in der Fraunhofer-Gesellschaft eingeladen.

*Prof. Dr. Ernst Schmachtenberg
(Rektor der RWTH Aachen) überreichte Prof. Dr. Peter Knott die Ernennungsurkunde.*

Wachtberg, 1.4.2017

Dr. Udo Uschkerat wird hauptamtlicher Geschäftsfeldsprecher Verteidigung

Der erfahrene Wissenschaftler Dr. Udo Uschkerat vertritt die Interessen des Instituts bei entsprechenden Gremien und Veranstaltungen, berät die Institutsleitung hinsichtlich der Entwicklung des Geschäftsfelds Verteidigung und fördert die Kooperation der aktiven Mitarbeitenden im Geschäftsfeld (siehe auch Interview auf Seite 26).

Darmstadt, 18.-21.4.2017

7th European Conference on Space Debris

Das Fraunhofer FHR war bei der wichtigsten Konferenz zum Weltraummüll in Europa mit rund 350 internationalen Teilnehmern umfangreich vertreten. In der Ausstellung präsentierte es seine beiden Systeme TIRA sowie GESTRA. Außerdem hielten Dr. Delphine Cerutti-Maori, Svenja Sommer sowie Helmut Wilden Fachvorträge. Dr. Ludger Leushacke leitete die Session »Radar, Optical, and in-situ Measurements – ground based«. GESTRA fand im Rahmen der Konferenz große Beachtung. Bundeswirtschaftsministerin Brigitte Zypries würdigte das System in der abschließenden Pressekonferenz.

Wachtberg / 27.4.2017

Girls'Day

Zum 17. Mal besuchten Mädchen verschiedener Altersgruppen das Fraunhofer FHR. In unterschiedlichen Workshops bauten sie Radios oder eine elektronische Baugruppe, schauten sich in einem Elektroniklabor um, programmierten Lego-Roboter oder erfuhren, was ein/e Feinwerkmechaniker macht.

Stuttgart / 9.5.-12.5.2017

Messe Control

Das Fraunhofer FHR präsentierte am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft die neue Generation von Hochfrequenzsensoren. Sie ermöglichen berührungsloses, zerstörungsfreies Prüfen unterschiedlichster Güter.



Wachtberg / 23.5.-24.5.2017

6th PCL Focus Days

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

Wachtberg / 6.6.2017

Startschuss für Forschungsfabrik Mikroelektronik (FMD)

Deutschland am Fraunhofer FHR

(Siehe ausführlicher Beitrag auf Seite 10)

Wachtberg / 22.6. & 25.6.2017

Wachtberg-Forum & Tag der offenen Tür

(Siehe ausführlicher Beitrag auf Seite 12)

Berlin / 5.7.2017

Projekt RAWIS in Berlin Bundesforschungsministerin

Wanka und Bundesinnenminister de Maizière vorgestellt

Auf einer gemeinsamen Pressekonferenz von BMBF und BMI zum Forschungsrahmenprogramm »Zivile Sicherheit« wurde das Projekt Radar Warn- und Informationssystem für Anwendungen im Katastrophenschutz (RAWIS) gleichzeitig den Bundesministern Johanna Wanka und Thomas de Maizière vorgestellt.

Remagen / 14.7. - 21.7.2017

9th International Summer School on Radar/SAR

45 Teilnehmende aus aller Welt kamen zur 9. International Summer School on Radar/SAR. Diese veranstaltet das Fraunhofer FHR jährlich. Neben intensiven Workshops rund um Radar und insbesondere SAR gibt es für die Teilnehmenden ein ansprechendes Begleitprogramm.

Aachen / 1.9.2017

Institutsleiter Dr. Peter Knott zum Professor an der RWTH Aachen berufen

Prof. Dr. Peter Knott vertritt das Fach »Radar-Systemtechnik« am Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen.

Bonn / 12.09.2017

Auszeichnung: AFCEA Studienpreis für Olaf Lambert

Olaf Lambert wurde für seine Abschlussarbeit mit dem zweiten Platz des AFCEA Bonn e.V. Studienpreis 2017 ausgezeichnet. Die Master-Arbeit trägt den Titel »Adaption und Implementierung von systeminhärenten HF-Charakterisierungsmethoden für ein nach dem SDR-Prinzip arbeitendes Empfangsmodul für ein Phased-Array-Radar«.

Bonn / 14.9.2017

Firmenlauf Bonn

Auch in diesem Jahr sind Fraunhofer FHR und FKIE wieder als gemeinsames Team beim Firmenlauf Bonn an den Start gegangen. Im Vergleich zu letztem Jahr hat sich die Teilnehmerzahl verdreifacht: 72 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gingen trotz Regen an den Start.

Frankfurt/Oder / 6.9.2017

Auszeichnung: International IHP »Wolfgang Mehr«

Fellowship Award 2017 für Prof. Dr. Nils Pohl

Prof. Dr. Nils Pohl hat den International IHP »Wolfgang Mehr« Fellowship Award 2017 erhalten. Er wurde ausgezeichnet für seine Forschung im Bereich der Hochfrequenzelektronik auf Basis von Silizium-Germanium (SiGe).

Nürnberg / 8.10.-13.10.2017

European Microwave Week (EUMW)

Die Kooperation mit TNO wurde fortgeführt. Gemeinsam stellten Fraunhofer FHR und IAF mit TNO ihre neuen Technologien aus dem Bereich Millimeterwellen- und Terahertzsysteme aus.



Bremen / 24.-26.10.2017

Space Tech Expo Europe

Auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Space präsentierte das Fraunhofer FHR sein Projekt GESTRA.

Wachtberg / 1.11.2017

Neues Geschäftsfeld »Mensch und Umwelt«

Medizintechnik – das ist der neue Schwerpunkt der Kooperation des Fraunhofer FHR mit der Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus Remagen. Zum 1. November 2017 wird Prof. Dr. Jens Bongartz neuer Geschäftsfeldsprecher »Mensch und Umwelt«.

Brüssel / 7.11.2017

EDA-Workshop »Radar Signatures & EM Benchmarks«

(Siehe ausführlicher Beitrag auf Seite 14)

München / 14.-17.11.2017

Messe Productronica

Das Fraunhofer FHR nahm im Rahmen von FMD am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft teil. Die kompakten und vielseitigen SiGe-Radare sowie jüngste Entwicklungen im Bereich der Spezialantennen auf konformen Oberflächen wurden präsentiert.

Jakarta, Indonesien / 21.-23.11.2017

Auszeichnung: Best Paper Award für Thomas Vaupel

Thomas Vaupel hat bei der International Conference on Broadband Communication, Wireless Sensors and Powering (BCWSP 2017) an der Universität Mercu Buana in Jakarta den Best Paper Award erhalten. Den Preis gewann er für seine gemeinsame Arbeit mit Prof. Dr. Volkert Hansen von der Bergischen Universität Wuppertal zu »Application of a TSMFM Planar-3D Fast Integral Equation Solver for Surface Wave Characterization of Antenna Arrays«.

1 *Dr. Jens Klare erläuterte Bundesforschungsministerin Johanna Wanka und Bundesinnenminister Thomas de Maizière Ziele des Projekts RAWIS sowie des MIMO-Radars.*

2 *Prof. Dr. Dietmar Kissinger, Prof. Dr. Nils Pohl und Prof. Dr. Rolf Kraemer (v.l.) bei der Verleihung des International IHP »Wolfgang Mehr« Fellowship Award.*

3 *Dr. Thomas Vaupel erhielt den Best Paper Award bei der International Conference on Broadband Communication, Wireless Sensors and Powering.*



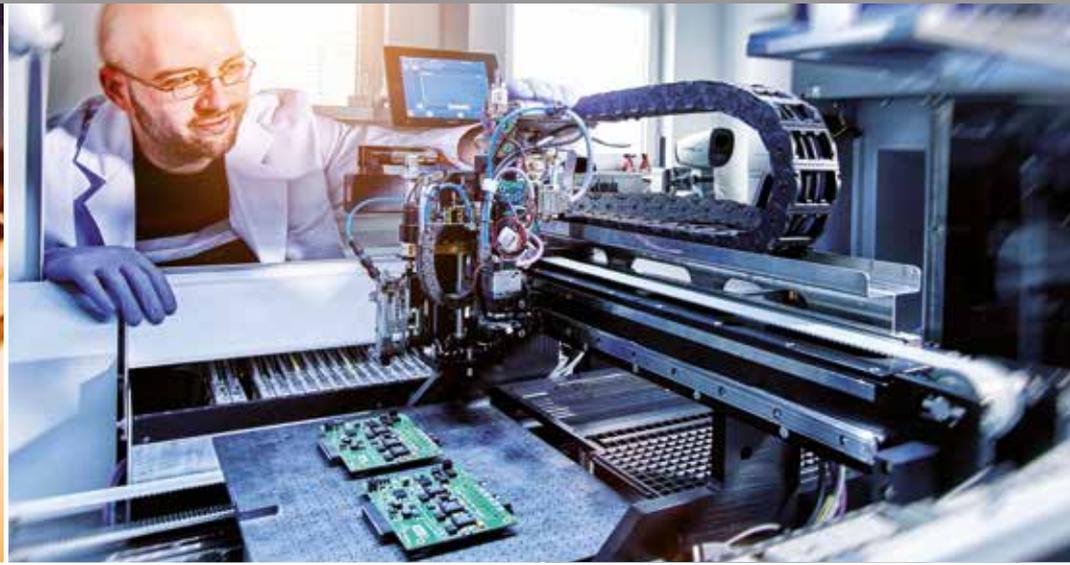
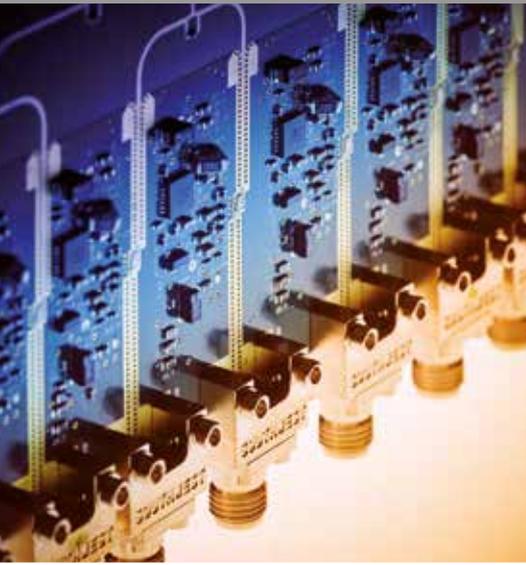
Leiter

Interne und externe Kommunikation:

Dipl.-Volksw. JENS FIEGE

Tel. +49 151 613 653 67

jens.fiege@fhr.fraunhofer.de



STARTSCHUSS FÜR FORSCHUNGSFABRIK MIKROELEKTRONIK (FMD) DEUTSCHLAND AM FRAUNHOFER FHR

Am 6. Juni 2017 hat der Parlamentarische Staatssekretär im BMBF Thomas Rachel MdB am Fraunhofer FHR den Startschuss für die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« in Wachtberg gegeben.

Mit der Fördersumme von 9,3 Millionen Euro aus dem Investitionsprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) baut das Institut unter anderem modernste OnWafer- und Antennenmesstechnik sowie eine 3D-Fertigung für Rapid Prototyping auf. Mit diesem neuen Programm will das BMBF die landesweiten Forschungskapazitäten in der Mikroelektronik vernetzen und erweitern und so die deutsche Halbleiter- und Elektronikindustrie international stärken.

Mikro- und Nanoelektronik stellen im Zeitalter der Digitalisierung entscheidende Wachstumsfaktoren dar. Deshalb fördert das BMBF jetzt den Aufbau einer standortübergreifenden »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« (FMD). So soll eine neue Qualität der Elektronikforschung am Standort Deutschland entstehen, um Forschungsdienstleistungen entlang der kompletten Innovationskette aus einer Hand anzubieten.

Mit rund 350 Millionen Euro – dem größten Investitionsprogramm für die Mikroelektronik-Forschung in Deutschland seit der Wiedervereinigung – fördert das BMBF mit FMD 13 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, davon elf Institute der Fraunhofer-Gesellschaft mit 280 Millionen Euro und zwei Institute der Leibniz-Gesellschaft mit 70 Millionen Euro.

»Mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland stärken wir eine Schlüsselindustrie, die für Hightech-Wachstum und so Hightech-Arbeitsplätze in Deutschland sorgt«, sagte Thomas Rachel MdB, Parlamentarischer Staatssekretär im BMBF. »Das Fraunhofer FHR in Wachtberg wird mit seinen neuen Geräten kleinen, mittleren und großen Unternehmen neue Innovationen aus der Hochfrequenztechnologie anbieten können. Gleichzeitig bietet es dem wissenschaftlichen Nachwuchs an den Hochschulen in der Region neue Möglichkeiten.« Thomas Rachel überbrachte die Zusage über 9,3

Millionen Euro an Fördermitteln der Bundesregierung für die kommenden drei Jahre persönlich.

Das Fraunhofer FHR ist eines von zwei Instituten, die in Nordrhein-Westfalen als Teil der neuen Forschungsfabrik gefördert werden. »Wir sind stolz, Teil dieses einzigartigen Mikroelektroniknetzwerks in Deutschland zu sein. Die Förderung ermöglicht uns Investitionen in modernste Ausstattung. Dadurch können wir zusätzliche Kompetenzen und Ressourcen für exzellente, innovative Forschung schaffen. Unser Institut festigt seine Position als attraktiver Partner für die Wirtschaft in der Region, in Nordrhein-Westfalen und in ganz Deutschland«, so Institutsleiter Prof. Peter Knott.

Am Fraunhofer FHR entstehen Labore für die Herstellung und Prüfung von hochintegrierten und damit kompakten Radarsystemen. Diese basieren u.a. auf Silizium-Germanium-Chips und arbeiten bei Frequenzen bis zu 300 GHz. Zur Vermessung und Qualifizierung fertiger Systeme und Antennen entstehen am Institut zwei moderne Messkammern nach IEEE-Norm, welche den Frequenzbereich von 100 MHz bis 1,1 THz abdecken werden.

Mit den Investitionen in die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, in die Hochschulen (ab 2018) und dem Rahmenprogramm »Mikroelektronik aus Deutschland – Innovations-treiber der Digitalisierung« unterstützt das BMBF Forschung und Innovation in der Mikroelektronik mit insgesamt rund 800 Millionen Euro bis 2020. Dies ist Teil eines Maßnahmenpaketes zur Förderung der Mikroelektronik in Deutschland, das die Bundesregierung auf den Weg gebracht hat und zu dem auch eine Investitionsförderung für Mikroelektronikunternehmen gehört. Moderne Mikroelektronik ist Voraussetzung für Industrie 4.0, intelligente Mobilität und effiziente Technik für die Energiewende.

Der Parlamentarische Staatssekretär im BMBF Thomas Rachel MdB gab im Rahmen eines Festaktes den Startschuss für FMD am Fraunhofer FHR.



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



WACHTBERG-FORUM UND TAG DER OFFENEN TÜR

2017 öffnete das Fraunhofer FHR seine Tore nicht nur zum alljährlichen Wachtberg-Forum für seine Kunden und Partner. Am Tag der offenen Tür überzeugte es auch interessierte Laien vom großen Wert der Radar-Forschung auf dem Gelände rund um die „Kugel“.

Wie jedes Jahr lud das Fraunhofer FHR seine Kunden und Partner zum Wachtberg-Forum ein. Auf etwa 500 m² Ausstellungsfläche stellten die Radar-Experten des FHR am 22. Juni ihre neuesten Radar-Lösungen vor: Von Sensoren für ressourcenschonende Produktion durch berührungslose Qualitätssicherung über Systeme für mehr zivile und militärische Sicherheit bis hin zu neuen Technologien für Verkehr und Weltraumbeobachtung. Ein Schwerpunkt lag dieses Jahr auf der luftgestützten Sensorik, wofür in einem eigenen Zelt auch die fliegenden Plattformen des FHR – Sensorik tragende Drohnen, ein Tragschrauber und das Ultraleichtflugzeug „Delphin“ – ausgestellt wurden. Neben der Ausstellung informierten sich die Gäste auch in Vorträgen und Vorführungen über die Vorteile der FHR-Technologien.

Bei diesem Anlass fand 2017 auch die Kickoff-Veranstaltung zum Projekt ATRIUM, bei dem eine Simulationsumgebung zum Test von Automobilradaren entsteht, einen feierlichen Rahmen. Einen Tag später konnten sich die Kuratoren des Instituts bei der jährlichen Kuratoriumssitzung auf dem Ausstellungsgelände ein exklusives Bild von den Forschungsarbeiten machen und mehr über die Zukunftspläne der seit einem Jahr im Amt befindlichen Doppelspitze des FHR erfahren.

Am Sonntag, den 25. Juni, hieß es dann für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler umschalten: Einen Tag lang standen sie rund 2500 Besuchern aus der Region Rede und Antwort und erklärten ihre komplexe Forschung Groß und Klein. Sehen, auch wenn es dunkel, neblig oder rauchig ist. Erkennen, was sich hinter Wänden oder in Verpackungen versteckt. Was Radar so besonders macht, erfuhren die Gäste im direkten Gespräch mit den Experten sowie in Vorträgen und Vorführungen. Ein Highlight war für viele natürlich der Blick in die große weiße Kugel auf dem sonst nicht zugänglichen Gelände, die eine „Marke“ in der Wachtberger Landschaft ist.

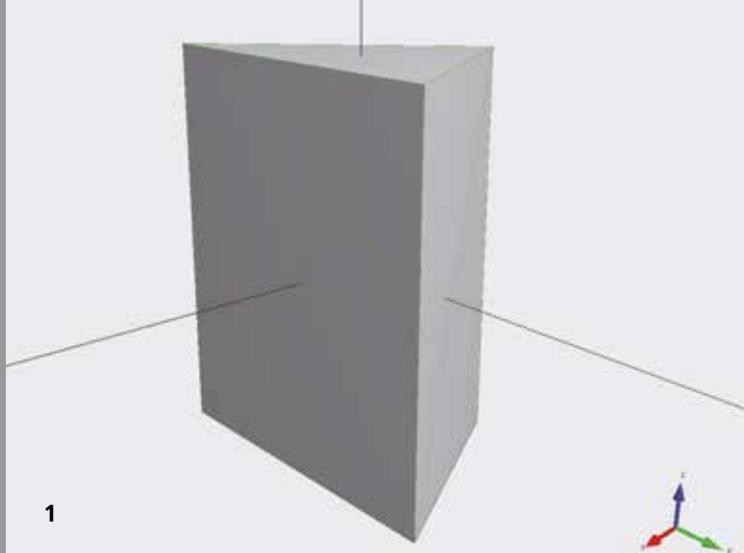
Die Dimensionen der Radaranlage und ihre Demonstration – v.a. die Wind erzeugende Drehgeschwindigkeit der Antenne – beeindruckten die Besucher genauso, wie die Möglichkeiten zur Weltraumbeobachtung, die das System bietet.

Junge Entdecker konnten sich an diesem Tag auf extra Kinderpostern schlau darüber machen, wie wichtig Radar für die Raumfahrt ist, wie es Umweltprojekte unterstützt und in der Produktion für mehr Qualität sorgen kann. Auch davon, wie es schnell hilft, Menschen in einem brennenden Haus zu finden, ohne dass die Einsatzkräfte erst lange in lebensgefährlicher Umgebung suchen müssen, oder wie es Autofahrer sofort warnt, wenn andere Autos, Bäume oder Fußgänger in der Nähe sind. Wer aufmerksam gelesen und zugehört hat, konnte die zehn Fragen der Kinderrallye beantworten und einen kleinen Preis gewinnen.

Nicht zuletzt hat die Institutsleitung den Anlass genutzt, um die Gewinner des kurz zuvor durchgeführten Mal- und Bastelwettbewerbs zu ehren. Die Jury hatte die schwere Aufgabe aus den vielen tollen Einsendungen neun Gewinner in drei Altersklassen auszuwählen, die sich über tolle Preise freuen konnten. Die drei ersten Sieger durften das Institut kurz darauf sogar noch einmal besuchen: Bei einer exklusiven Führung durch die Labore des Instituts konnten sie noch tiefer hinter die Kulissen des Fraunhofer FHR blicken und selbst kleine Radarexperimente durchführen.

*Rund 2500 Besucher machten sich
beim Tag der offenen Tür 2017 ein
Bild von der Forschungsarbeit in
und um die Kugel.*

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



EDA-WORKSHOP »RADAR SIGNATURES & EM BENCHMARKS«

Am 7. November 2017 fand erstmals der Workshop »*Radar Signatures & EM Benchmarks*« bei der EDA in Brüssel statt. Der technische Teil des Workshops wurde größtenteils vom Fraunhofer FHR organisiert, während die EDA freundlicherweise ihre Infrastruktur zur Durchführung des Workshops zur Verfügung stellte.

Software zur elektromagnetischen (EM) Modellierung wird seit vielen Jahren standardmäßig als Werkzeug in der Planung von Radarsystemen oder bei der Entwicklung von Antennen eingesetzt. Bei vielen Anwendungen, z. B. bei Radar und in der Kommunikation, geht der Trend hin zu höheren Frequenzen, d. h. kleineren Wellenlängen, bei gleichzeitig höheren Anforderungen an die Simulationssoftware. Auch in komplexen Szenarien sollen diese immer genauere Ergebnisse berechnen. Während früher aufgrund von beschränkten Rechenkapazitäten oft der RCS eines Streukörpers oder Antennendiagramme im Freiraum in der Simulation untersucht wurden, werden heute beispielsweise Antenneneigenschaften unter Berücksichtigung des Einbauorts simuliert, sowie elektromagnetische Felder, die so genau sein müssen, dass sie für synthetische Tests von Signalverarbeitungsverfahren geeignet sind.

Somit wird es immer wichtiger, Software zur EM-Modellierung bzgl. ihrer Genauigkeit und Leistungsfähigkeit zu beurteilen. Zu diesem Zweck wurde der Workshop »*Radar Signatures & EM Benchmarks*« initiiert, bei dem anhand von verschiedenen Testbeispielen die Ergebnisse unterschiedlicher Simulationstools miteinander verglichen wurden. Die Aufgabenbe-

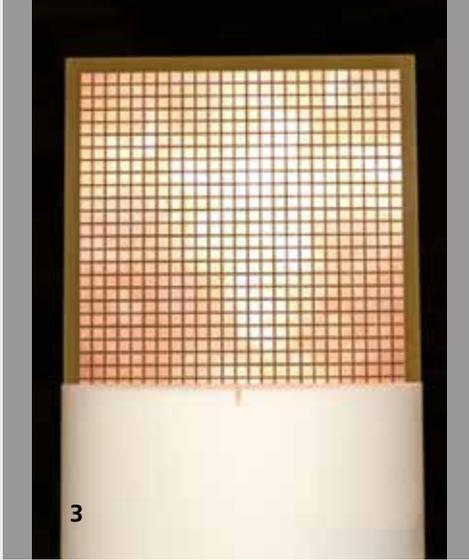
schreibungen wurden bereits einige Monate im Voraus im Internet veröffentlicht, so dass alle Teilnehmer genügend Zeit für ihre Simulationen hatten.

Die Testbeispiele waren von sehr unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad, angefangen von einem dielektrischen Prisma im Freiraum (Abb. 1), über ein Ground Penetrating Radar (GPR) Szenario und eine Windenergieanlage (Abb. 3) bis hin zu einer frequenzselektiven Struktur (FSS). Während beim Prisma und beim GPR-Szenario das dielektrische Material die wesentliche Schwierigkeit darstellte, war die Windenergieanlage sehr groß (1.500 Wellenlängen) und zudem sollten in einer Teilaufgabe drehende Rotorblätter mit einer kleinen Winkelschrittweite simuliert werden. Dagegen bestand beim FSS-Szenario die Schwierigkeit der Simulation im wesentlichen darin, dass die Einzelelemente sehr filigran waren (kleiner als eine Wellenlänge), so dass nur bei einem ausreichend feinen CAD-Modell und damit entsprechendem Rechenaufwand die Frequenzselektivität in den Simulationsdaten zu erkennen war. Für dieses Testbeispiel wurden am Fraunhofer FHR auch Messungen durchgeführt (Abb. 4), bei denen bei $\theta = 0^\circ$ und $f = 30,5$ GHz ein Minimum im RCS zu erkennen ist.

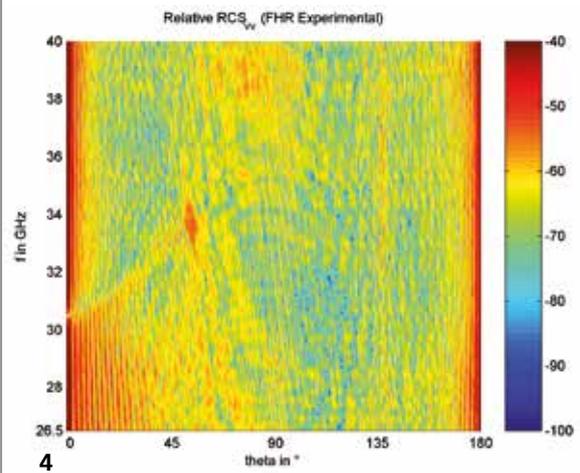
Die meisten Teilnehmer des Workshops versuchten, mehrere Testbeispiele zu lösen und investierten dazu teilweise einen beeindruckenden Aufwand an Rechenkapazität. Dabei waren sowohl kommerzielle als auch nicht-kommerzielle Simulationcodes aus verschiedenen europäischen Ländern vertreten. Genauso vielfältig waren auch die eingesetzten Simulationsverfahren: Obwohl mit aktuellen Rechnersystemen viele Probleme numerisch exakt gelöst werden können, z. B. auf



2



3



4

Basis der Momentenmethode (MoM), wurden auch asymptotische Verfahren, beispielsweise mit Geometrischer Optik (GO) und Physikalischer Optik (PO) eingesetzt, die in ihrer Genauigkeit oft mit den numerisch exakten Verfahren mithalten können.

Im Vergleich der unterschiedlichen Simulationstools zeigte sich, dass die Schwankungsbreite der Ergebnisse nicht mehr so groß ist wie dies noch vor einigen Jahren typischerweise war. Somit ist davon auszugehen, dass viele dieser Tools bereits eine gute Genauigkeit im Rahmen der numerischen Möglichkeiten erreichen. Sehr große Unterschiede gab es dagegen beim Rechen- und Speicheraufwand, der dafür benötigt wurde. So erforderten einige Simulationen mehrere Tage auf großen Multiprozessorsystemen mit 100 Cores oder mehr und belegten dabei mehrere Hundert Gigabyte Speicher.

Der wissenschaftliche Bedarf an gegenseitigem Austausch zeigte sich im Rahmen des Workshops vor allem in den vielen angeregten Diskussionen der teilnehmenden Experten über die erzielten Ergebnisse und Details der verwendeten Simulationsverfahren. Der Workshop bewies sich hierfür als ein sehr gut geeignetes Forum, weshalb von vielen Teilnehmern der Wunsch nach Fortführung dieser Veranstaltung geäußert wurde. Die nächste Ausgabe des Workshops »Radar Signatures & EM Benchmark« wird voraussichtlich im Jahr 2019 stattfinden, wobei die Testbeispiele nicht nur Simulationsaufgaben, sondern evtl. auch eine Messaufgabe enthalten werden.

- 1 Testbeispiel »Dielektrisches Prisma«.
- 2 Testbeispiel »Rotierende Windenergieanlage«.
- 3 Testbeispiel »Frequenzselektive Struktur« (Messobjekt).
- 4 Testbeispiel »Frequenzselektive Struktur« (gemessene Streufelder).



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

ÜBERBLICK



Institutsgelände des Fraunhofer FHR mit Weltraumbeobachtungsradar TIRA und dem Weltraumüberwachungsradar GESTRA in Wachtberg.

FRAUNHOFER FHR IM PROFIL

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



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

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

Die Fähigkeit der berührungslosen Messung und die Durchdringung von Materialien eröffnen viele Möglichkeiten zur Lokalisation von Objekten und Personen. In immer mehr An-

wendungsbereichen sind Hochfrequenzsensoren des Fraunhofer FHR mit ihren besonderen Fähigkeiten durch den Fortschritt der Miniaturisierung und Digitalisierung eine bezahlbare und attraktive Option.

Strategische Ausrichtung

Seine fundierte Expertise bietet das Fraunhofer FHR in den Geschäftsfeldern Verteidigung, Weltraum, Mensch und Umwelt, Verkehr, Sicherheit und Produktion an.

Die Zusammenarbeit mit dem BMVg und dessen nachgeordneten Behörden im Geschäftsfeld Verteidigung stellt eine wesentliche Säule der Aktivitäten des Fraunhofer FHR dar. Durch das Projekt WRIS (Weltraumidentifizierungssensor) wurde im Geschäftsfeld Weltraum ebenfalls die langfristige Zusammenarbeit mit der Bundeswehr gestärkt: Das Fraunhofer FHR liefert regelmäßig Analyse- und Beobachtungsdaten von Weltraumobjekten, die mit Hilfe seines Weltraumbeobachtungsradars TIRA entstanden sind, an das Weltraumlagezentrum der Bundeswehr.

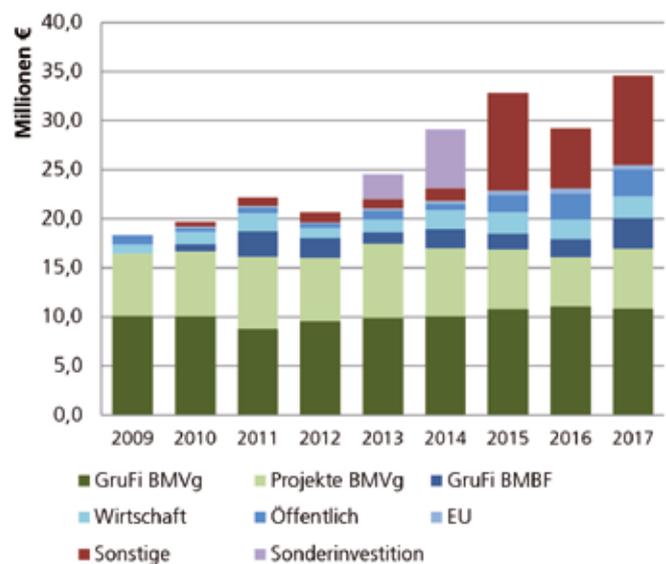
In seinen Geschäftsfeldern Verkehr, Sicherheit und Produktion setzt das Fraunhofer FHR die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Wirtschaft fort. Das Geschäftsfeld Umwelt wurde thematisch erweitert und heißt nun Mensch und Umwelt. Künftig werden neben den Systemen zu Geomonitoring auch Lösungen in den Bereichen Ambient Assistent Living und medizinischer Behandlung entwickelt.

Personal- und Budgetentwicklung

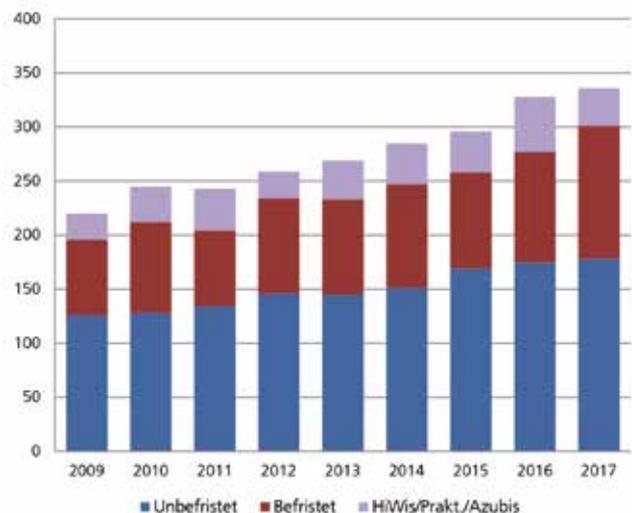
Das Budget des Instituts ergibt sich aus mehreren Finanzierungsquellen: Der Grundfinanzierung durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), der Projektfinanzierung aus Mitteln des Verteidigungshaushaltes und den Einkünften aus dem Vertragsforschungsbereich (VfA), der wiederum unterteilt werden kann in Wirtschaftserträge, öffentliche Erträge, EU-Erträge, Sonstige und Grundfinanzierung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Im Jahr 2017 erwirtschaftete das Fraunhofer FHR im wehrtechnischen und im zivilen Institutsteil einen Gesamtertrag in Höhe von 34,6 Mio. €.

Zum Jahresende 2017 waren am Fraunhofer FHR insgesamt 336 Mitarbeiter beschäftigt, ein Wachstum von 2,4% im Vergleich zum Vorjahr. Davon sind 178 unbefristet und 123 Personen befristet beschäftigt. Hinzu kommen noch 35 Studierende und Auszubildende.

Budgetentwicklung 2009 - 2017



Mitarbeiterentwicklung 2009 - 2017



IHRE ANSPRECHPARTNER

STAND: APRIL 2018

Kuratorium Vorsitzender Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. HERMANN ROHLING TU Hamburg-Harburg		 Geschäftsführender Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. PETER KNOTT Tel. +49 228 9435-227 peter.knott@fhr.fraunhofer.de	
Business Development Dr. rer. nat. FRANK LORENZ  Tel. +49 170 365 8802 frank.lorenz@fhr.fraunhofer.de		Interne und externe Kommunikation Dipl.-Volksw. JENS FIEGE  Tel. +49 151 613 653 67 jens.fiege@fhr.fraunhofer.de	
		Patente / Schutzrechte Dipl.-Ing. (FH) ALEXANDER STUCKERT  Tel. +49 228 9435-278 alexander.stuckert@fhr.fraunhofer.de	
Geschäftsfelder		Antennentechnologie und elektromagnetische Modellierung (AEM)  Dr.-Ing. FRANK WEINMANN Tel. +49 228 9435-223 frank.weinmann@fhr.fraunhofer.de	
Array-gestützte Radarbildung (ARB)  Dr.-Ing. ANDREAS BRENNER Tel. +49 228 9435-531 andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de		Integrierte Schaltungen und Sensorsysteme (ISS)  Dipl.-Ing. DIRK NÜBLER Tel. +49 228 9435-550 dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de	
Höchstfrequenz-Radar und Anwendungen (HRA)  Dr. rer. nat. STEPHAN STANKO Tel. +49 228 9435-704 stephan.stanko@fhr.fraunhofer.de			
Verteidigung Dr.-Ing. UDO USCHKERAT  Tel. +49 151 721 243 27 udo.uschkerat@fhr.fraunhofer.de		Elektromagnetische Modellierung Dr.-Ing. FRANK WEINMANN  Tel. +49 228 9435-223 frank.weinmann@fhr.fraunhofer.de	
Multifunktionale Hochfrequenzsensorik Dipl.-Ing. HELMUT WILDEN  Tel. +49 228 9435-316 helmut.wilden@fhr.fraunhofer.de		Industrialisierte Hochfrequenztechnologie Dipl.-Ing. CHRISTIAN KREBS  Tel. +49 228 9435-775 christian.krebs@fhr.fraunhofer.de	
Millimeterwellen-SAR und Algorithmen Dr. rer. nat. MICHAEL CARIS  Tel. +49 228 9435-353 michael.caris@fhr.fraunhofer.de			
Weltraum Dr.-Ing. DELPHINE CERUTTI-MAORI  Tel. +49 228 9435-290 delphine.cerutti-maori@fhr.fraunhofer.de		Antennen und Front-End-Technologie Dr.-Ing. THOMAS BERTUCH  Tel. +49 228 9435-561 thomas.bertuch@fhr.fraunhofer.de	
Array-Systemtechnologie Dipl.-Ing. OLAF SAALMANN  Tel. +49 228 9435-395 olaf.saalmann@fhr.fraunhofer.de		Eingebettete Systeme und Algorithmen Dipl.-Ing. ANDRIES KÜTER  Tel. +49 228 9435-134 andries.kueter@fhr.fraunhofer.de	
Submillimeterwellen-Radar Dipl.-Ing. DENIS NÖTEL  Tel. +49 228 9435-578 denis.noetel@fhr.fraunhofer.de			
Verkehr Dr.-Ing. ANDREAS DANKLMAYER  Tel. +49 228 9435-350 andreas.danklmayer@fhr.fraunhofer.de		Technik und Sicherheit Dipl.-Ing. (FH) STEFAN VORST  Tel. +49 228 9435-444 stefan.vorst@fhr.fraunhofer.de	
Sensornahe Digitaltechnologie Dipl.-Ing. (FH) CLAUDIUS KIRCHNER  Tel. +49 228 9435-203 claudius.kirchner@fhr.fraunhofer.de		3D Sensorsysteme Dr.-Ing. REINHOLD HERSCHEL  Tel. +49 228 9435-582 reinhold.herschel@fhr.fraunhofer.de	
Signaturen und Aufklärung Dipl.-Ing. GREGOR BIEGEL  Tel. +49 228 9435-581 gregor.biegel@fhr.fraunhofer.de			
Mensch und Umwelt Prof. Dr. rer. nat. JENS BONGARTZ  Tel. +49 2642 932-427 jens.bongartz@fhr.fraunhofer.de		Adaptive Array-Signalverarbeitung Dr. rer. nat. WOLFRAM BÜRGER  Tel. +49 228 9435-220 wolfram.buerger@fhr.fraunhofer.de	
Chip Design Prof. Dr.-Ing. NILS POHL  Tel. +49 228 9435-147 nils.pohl@fhr.fraunhofer.de			
Sicherheit Dr. rer. nat. JENS KLARE  Tel. +49 228 9435-311 jens.klare@fhr.fraunhofer.de		Bildgebende Radar-Verfahren Dr.-Ing. PATRICK BERENS  Tel. +49 228 9435-641 patrick.berens@fhr.fraunhofer.de	
Produktion Dipl.-Ing. DIRK NÜBLER  Tel. +49 228 9435-550 dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de		Signalverarbeitung für Weltraumüberwachung Dr.-Ing. ROBERT KOHLEPPEL  Tel. +49 228 9435-392 robert.kohleppel@fhr.fraunhofer.de	



Institutsleiter

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

Institutsleiter

IHF - Institut für Hochfrequenztechnik
RWTH Aachen

Sicherheit

Ass. jur. GLORIA POST



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

Informationstechnik

MICHAEL BUSSMANN



Tel. +49 228 9435-211
michael.bussmann@fhr.fraunhofer.de

Werkstatt

CHRISTOPH PESCHEL



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

Passives und störfestes Radar (PSR)



Prof. Dr. DANIEL O'HAGAN
Tel. +49 228 9435-389
daniel.ohagan@fhr.fraunhofer.de

Kognitives Radar (KR)



Dr.-Ing. STEFAN BRÜGGEWIRTH
Tel. +49 228 9435-173
stefan.brueggewirth@fhr.fraunhofer.de

Radar zur Weltraumbeobachtung (RWB)



Dr.-Ing. LUDGER LEUSHACKE
Tel. +49 228 9435-200
ludger.leushacke@fhr.fraunhofer.de

Forschungsgruppen



Prof. Dr.-Ing. DIRK HEBERLING
Tel. +49 228 9435-227
dirk.heberling@fhr.fraunhofer.de

Verwaltung



JÜRGEN NEITZEL
Tel. +49 228 9435-215
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 9435-200
ludger.leushacke@fhr.fraunhofer.de

Forschungsgruppe Aachen

Dr.-Ing. THOMAS DALLMANN



Tel. +49 241 80-22271
thomas.dallmann@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. FERNANDO RIAL VILLAR



Tel. +49 228 9435-770
fernando.rial@fhr.fraunhofer.de

TIRA - Radartechnik, Weiterentwicklung und Betrieb

Dipl.-Ing. VITALY CHETIK



Tel. +49 228 9435-261
vitaly.chetik@fhr.fraunhofer.de

Forschungsgruppe Integrierte Radarsensoren

Prof. Dr.-Ing. NILS POHL



Tel. +49 234 32-26495
nils.pohl@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

Forschungsgruppe Hochfrequenzsensoren und Radarverfahren

Prof. Dr.-Ing. JOACHIM ENDER



Tel. +49 228 9435-226
joachim.ender@fhr.fraunhofer.de

Personal

JOHANNES NELLES



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

Passive Coherent Location

Prof. Dr. DANIEL O'HAGAN



Tel. +49 228 9435-389
daniel.ohagan@fhr.fraunhofer.de

Radarchitekturen

Dr.-Ing. STEFAN BRÜGGEWIRTH



Tel. +49 228 9435-173
stefan.brueggewirth@fhr.fraunhofer.de

Weltraumaufklärung

Dr.-Ing. DELPHINE CERUTTI-MAORI



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

Gebäudemanagement

THOMAS SENDER



Tel. +49 228 9435-221
thomas.sender@fhr.fraunhofer.de

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. Stefan Lindenmeier

Universität der Bundeswehr München
München

Dr. Gerhard Elsbacher

MBDA Deutschland GmbH
Schrobenhausen

Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld

Universität Siegen
Siegen

Hans Hommel

Hensoldt
Ulm

Prof. Dr.-Ing. Ilona Rolfes

Ruhr-Universität Bochum
Bochum

Dr. Gerhard Kahl

Dornstadt

MinRat Norbert Michael Weber

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg)
Bonn

Dr. Holger Krag

ESA / ESOC
Darmstadt

Winfried Wetjen

OHB-System AG
Bremen

Die Teilnehmer der Kuratoriumssitzung am 23.6.2017 auf dem Institutsgelände in Wachtberg vor der neuen GESTRA-Empfangseinheit: Dr. Krag, Prof. Rolfes, Prof. Schmidt, Herr Pappert, Prof. Rohling, Herr Hommel, Prof. Knott (Institutsleiter FHR), Prof. Loffeld, Herr Wetjen, Prof. Heberling (Institutsleiter FHR), Dr. Elsbacher, Prof. Bosselmann-Cyran, Herr Weber, Dr. Leiner (Fraunhofer Zentrale).



VON DER THEORIE IN DIE PRAXIS

Durch gemeinsame Forschungsprojekte sowie durch langfristige und enge Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen - in Forschung und Lehre - können die Wissenschaftler des Fraunhofer FHR stets die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse aus Radartechnik und Hochfrequenzphysik in die Entwicklungen einfließen lassen.

Forschungsgruppe Aachen am Institut für Hochfrequenztechnik (IHF), RWTH Aachen

Durch die Professuren beider Institutsleiter des Fraunhofer FHR besteht eine enge Anbindung an das Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) der RWTH Aachen. Dort ist die Forschungsgruppe des Fraunhofer FHR untergebracht. Das Testen und die Weiterentwicklung von radarbasierten Sensoren für Verkehrsträger ist eines der beiden Schwerpunktthemen, die von der Forschungsgruppe untersucht werden. So leitet die Forschungsgruppe Aachen das Projekt ATRIUM, bei dem ein Radarzielsimulator aufgebaut wird, der insbesondere die Validierung von Automotive-Radarsensoren vereinfacht. Daneben beschäftigt sich die Forschungsgruppe auch mit neuen Anwendungsfeldern der Radarpolarimetrie. Hierdurch lassen sich Informationen zu den physikalischen Streumechanismen extrahieren, die am Radarziel auftreten und ohne polarimetrische Datenerfassung verborgen bleiben. Die Forschungsgruppe Aachen hat sich das strategische Ziel gesetzt, die Kooperation zwischen IHF und Fraunhofer FHR auszuweiten und die stärkere Vernetzung zwischen den Instituten der RWTH Aachen und der Fraunhofer-Gesellschaft voranzutreiben. Im eigenen HF-Labor können Radarsensoren auch unter Verwendung komplexer Signalformen vermessen und getestet werden. Darüber hinaus

hat die Forschungsgruppe im Rahmen der Kooperation mit dem IHF einfacheren Zugang zu weiterer Infrastruktur vor Ort.

Integrierte Radarsensoren – Forschungsk Kooperation mit der Ruhr-Universität Bochum

Die Möglichkeit, ganze Radarsensoren auf einem Chip zu integrieren, revolutioniert derzeit die komplette Radartechnik. Integrierte Schaltungen kommen in den Radarsensoren am Fraunhofer FHR bereits seit vielen Jahrzehnten zum Einsatz. Ein eigenes Team am Fraunhofer FHR widmet sich dem Entwurf komplexer Radarchips und ermöglicht so kompaktere und kostengünstige Radarsysteme. Nachdem im Jahr 2016 Professor Pohl einem Ruf auf den Lehrstuhl für Integrierte Systeme an die Ruhr-Universität Bochum gefolgt ist, konnte dies die Kooperation im Bereich der Integrierten Sensorsysteme weiter stärken. Insbesondere der sehr Ressourcen-intensive Schaltungsentwurf profitiert von der universitären Forschung und schließt somit die Brücke zur anwendungsorientierten Forschung eines Fraunhofer-Instituts. Zur Vertiefung der Zusammenarbeit hat das Fraunhofer FHR einen Teil des Teams für Chip-Design, welches weiter von Professor Pohl geleitet wird, an der Ruhr-Universität Bochum angesiedelt. Basierend auf einer gemeinsamen Technologie-Roadmap sind mehrere Forschungsprojekte zusammen gestartet. Erste Radarchips der universitären Forschung konnten bereits vom Fraunhofer FHR erfolgreich in Industrieapplikationen gebracht werden.

Arbeitsgruppe »Hochfrequenzsensoren und Radarverfahren« am ZESS / Universität Siegen

Das Zentrum für Sensorsysteme ZESS der Universität Siegen arbeitet in seinen drei Kompetenzbereichen Sensor Principles



& Development, Sensor Information Processing und High Level Information Extraction an grundlegenden Systementwicklungen mit Anwendungsfeldern in Wissenschaft und Industrie. Das Team setzt sich interdisziplinär aus Wissenschaftlern aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften zusammen. Seit über zehn Jahren wird eine enge Kooperation mit dem Fraunhofer FHR praktiziert, zum Beispiel mit ehrgeizigen Projekten im Bereich der bistatischen SAR-Bildgebung.

Die Forschungsgruppe »Hochfrequenzsensoren und Radarverfahren« arbeitet unter Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender (bis 2016 Leiter des Fraunhofer FHR) an neuartigen Techniken für bildgebendes Radar. Eine besondere Bedeutung kommt hier der Anwendung der Theorie des Compressive Sensing zu, das unter Voraussetzung strukturierter Szenen nicht nur mit weniger Messungen gleichwertige Bildergebnisse erzielen kann, sondern auch mit zusätzlichen Leistungen die Qualität der Darstellung steigern kann.

Im Einzelnen konnten im BMBF-Projekt RAWIS (Radar Warn- und Informationssystem) als Projektpartner des Fraunhofer FHR neue Ergebnisse für bildgebendes MIMO-Radar zur Überwachung von einsturzfähigen Gebäuden erzielt werden. Weitere Themen der Arbeitsgruppe sind im Rahmen der DFG-Förderung ComSAR die Informationssteigerung von ISAR-Bildern durch Einsatz physikalisch motivierter Representationsbasen, 3D-Bildgebung mit einem Ultrabreitband-Sensor, auch für Objekte, die sich unter der Oberfläche befinden (Sub-surface Imaging) und neuartige Terahertz-Techniken mit hybrider pseudo-zufälliger Aperturmodulation.

Im Rahmen der personellen Verzahnung mit dem Fraunhofer FHR wurden und werden zahlreiche Promotionen betreut und abgeschlossen.

- 1 *Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) der RWTH Aachen.*
- 2 *Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Ruhr-Universität Bochum.*
- 3 *Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen.*



Forschungsgruppe Aachen
Dr.-Ing.
THOMAS DALLMANN
 Tel. +49 241 80-22271
 thomas.dallmann@fhr.fraunhofer.de



Forschungsgruppe Bochum
Prof. Dr.-Ing.
NILS POHL
 Tel. +49 234 32-26495
 nils.pohl@fhr.fraunhofer.de

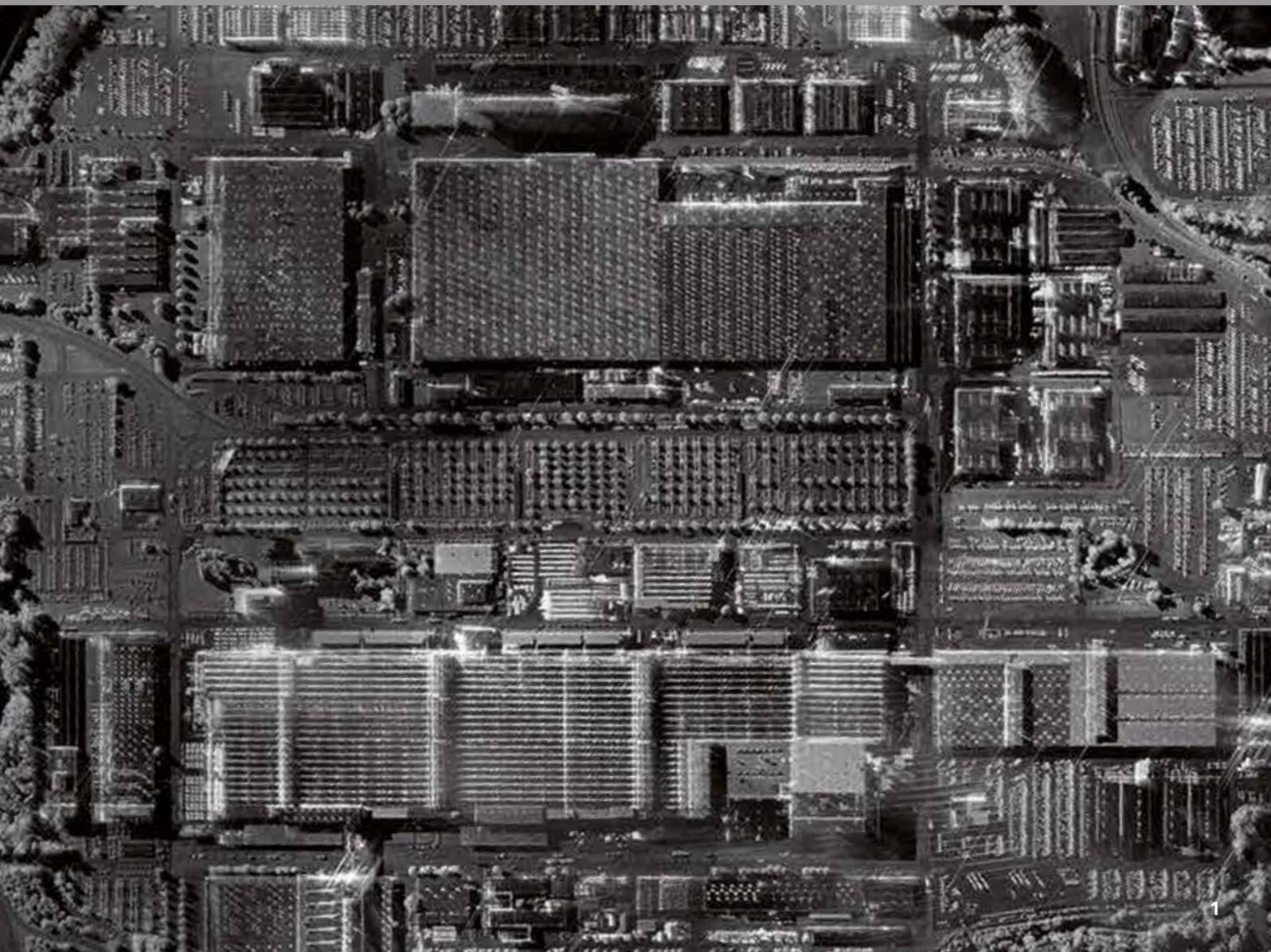


Forschungsgruppe Siegen
Prof. Dr.-Ing.
JOACHIM ENDER
 Tel. +49 228 9435-226
 joachim.ender@fhr.fraunhofer.de

INTERVIEW

»DER FRAUNHOFER-IDEE GERECHT WERDEN«

Im Jahr 2017 hat das Fraunhofer FHR sein größtes Geschäftsfeld weiter gestärkt, um noch besser auf die Kundenbedürfnisse eingehen zu können. Mit Dr. Udo Uschkerat übernimmt ein erfahrener und gut vernetzter Wissenschaftlicher die Funktion des Geschäftsfeldsprechers Verteidigung in Vollzeit.



Dr. Uschkerat, Sie üben die Tätigkeit des Geschäftsfeldsprechers in Vollzeit aus und haben dafür Ihre bisherige Laufbahn als Wissenschaftler verlassen. Wie kam es dazu?

Ich habe jeher auf Themen gearbeitet, die ausdrücklich im Bereich der Verteidigungsforschung angesiedelt waren. In diesem Segment bin ich also seit über 20 Jahren aktiv, entsprechend gut vernetzt. Als bei der Institutsleitung die Entscheidung getroffen wurde, diese Funktion in Vollzeit zu besetzen, wurde ich als mögliche Besetzung vorgeschlagen und angesprochen. Die Aufgabe klang verlockend – also habe ich zugegriffen.

Bedingt durch den Wechsel in eine andere Position mussten Sie auch die Arbeit in Forschungsprojekten einstellen. Vermissen Sie das?

Es war nicht in allen Punkten einfach, die Zelte abzubauen. Es gab doch einige Projekte, wo ich mit viel Herzblut dabei war. Auch hier musste das Staffelholz übergeben werden. Aber das weiß ich alles in guten Händen. Projektakquise und Kundenpflege waren Dinge, die mir auch in der Vergangenheit gut und gerne von der Hand gingen. Mit der neuen Position habe ich einige Pflichten übernommen, trotzdem gibt es auch Freiräume, die ich nach meinem Ermessen ausfüllen darf. Das finde ich natürlich toll!

Wie umfangreich muss man sich Ihr Betätigungsfeld als Geschäftsfeldsprecher vorstellen?

Die Verteidigungsforschung war und ist unser wichtigstes Betätigungsfeld und macht rund 70% unserer Aktivitäten aus. Daher ist es wichtig, das Ohr am Kunden zu haben – auch wenn wir selbst nicht die Produkte liefern. Aber wir müssen wissen, welchen Herausforderungen die Kunden unserer Partner gegenüberstehen, damit wir gemeinsam die richtigen Lösungen entwickeln können. Hier bin ich zentraler Ansprechpartner und verrete das Institut bei Bedarf auch in anderen Gremien und Organisationen. Selbstverständlich gehört die Repräsentanz auf Symposien und Fachtagungen, aber auch auf Messen zu meinen Aufgaben.

Wie wichtig ist es, nicht nur ein Ohr am Kunden, sondern auch an der wissenschaftlichen Community zu haben?

Wir betreiben angewandte Forschung – daher müssen die neusten Entwicklungen im Bereich der Grundlagenforschung beobachtet werden. Dieser *Technology Watch* ist unerlässlich, um Ideen für neue Anwendungen und Techniken zu generieren. Denken Sie nur an Quanten-Radar und Nanotubes. Welche Möglichkeiten uns das eröffnen wird!

Was genau bedeuten neue Technologien denn für das Fraunhofer FHR?

Als Fraunhofer-Institut konzentrieren wir uns auf die angewandte Forschung und Entwicklung. Daneben gibt es die Grundlagenforschung, die an den Universitäten und anderen außeruniversitären Einrichtungen wie z. B. den Instituten der Helmholtz-Gemeinschaft durchgeführt wird. Wir müssen erkennen, wann und wie neue Ergebnisse der Grundlagenforschung zu marktrelevanten Produkten entwickelt werden können.

Ein gutes Beispiel ist der Bereich der Höchstfrequenzsensorik, da sind wir technologieführend durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF und der Ruhr-Universität Bochum. Ein zweites Beispiel ist die Technologie der elektronischen Strahlschwenkung für Radarsysteme. Hier kooperieren wir eng mit deutschen Verteidigungsfirmen und zeigen mit GESTRA wie's geht. Neben neuen Hardware-Technologien bieten neue mathematische Verfahren immer wieder die Möglichkeit, die Funktionalität eines Radarsystems zu verbessern oder zu erweitern.

Welchen Leistungsumfang wird das Fraunhofer FHR künftig seinen Partnern zur Verfügung stellen können?

Das Fraunhofer FHR hat weltweit führende Kompetenzen in der Nutzung elektromagnetischer Wellen für Sensoraufgaben. Dieses Wissen setzen wir für aktuelle Fragestellungen in militärischen und zivilen Aufgaben ein. Unsere Partner können auf dieses Wissen in Form von Beratungsleistungen, Experimenten und F&E-Leistungen zugreifen. Für die Zukunft gilt es im Bereich des Verteidigungsmarktes den Kontakt zu den KMUs zu vertiefen. Hier sehe ich noch Potential, um der Fraunhofer-Idee besser gerecht zu werden; Forschungs- und Entwicklungsleistungen auch für kleine Betriebe anzubieten, welche sich das nicht selber leisten können.

1 SAR-Abbildung des Daimler-Benz-Werks Wörth.



Geschäftsfeldsprecher Verteidigung:
Dr.-Ing.
UDO USCHKERAT
Tel. +49 151 721 243 27
udo.uschkerat@fhr.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELDER



VERTEIDIGUNG

Smart, modular, multi-modal und kompakt – das sind die Anforderungen an künftige Radarsysteme und schon seit vielen Jahren Forschungsschwerpunkte am Fraunhofer FHR. Neben Techniken zur Überwachung und Aufklärung untersuchen die Wissenschaftler auch neuartige Konzepte zum Tarnen und Härten des eigenen Radars sowie zur Täuschung und Störung gegnerischer Systeme. Mit seinem umfassenden Know-how deckt das Fraunhofer FHR die gesamte Bandbreite des Themenbereichs Hochfrequenz- und Radartechnik zur Verteidigung ab.

Geschäftsfeldsprecher: Dr.-Ing. Udo Uschkerat

+49 151 721 243 27, udo.uschkerat@fhr.fraunhofer.de



WELTRAUM

Auf dem Gebiet der Weltraumbeobachtung mit Radar ist das Fraunhofer FHR eines der führenden Forschungsinstitute. Mit TIRA verfügt das Institut über ein nahezu einzigartiges System zur Weltraumaufklärung. Für eine kontinuierliche Überwachung des Weltraums entwickelt das Fraunhofer FHR derzeit GESTRA im Auftrag des DLR-Raumfahrtmanagements. Das Fraunhofer FHR vereint die gesamte Systemkette der Weltraumbeobachtung mit Radar unter einem Dach und kann seinen Partnern alles aus einer Hand liefern.

Geschäftsfeldsprecherin: Dr.-Ing. Delphine Cerutti-Maori

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

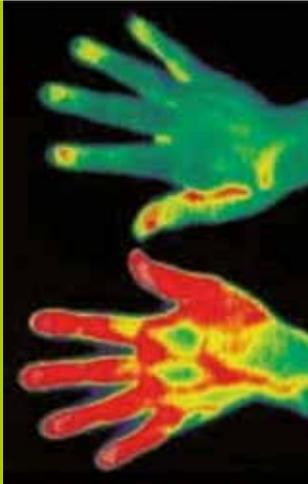


VERKEHR

Für Anwendungen im Luft-, See- und Straßenverkehr bietet Radar vielfältige Möglichkeiten. Das Fraunhofer FHR untersucht in unterschiedlichsten Projekten, wie sich dieses Potenzial erschließen lässt. Den Partnern steht ein umfangreiches Leistungsportfolio zur Verfügung: Von Technologie-Beratung bis zu Entwurf, Konstruktion und Prototypenbau. Die Arbeiten des Fraunhofer FHR sind darauf ausgerichtet, Fragestellungen bei der Entwicklung eines neuen Systems zügig und zeitnah zu lösen.

Geschäftsfeldsprecher: Dr.-Ing. Andreas Danklmayer

+49 228 9435-350, andreas.danklmayer@fhr.fraunhofer.de



MENSCH UND UMWELT

Radar kann durch seine Präzision und sein berührungsloses, durchdringendes Funktionsprinzip ganz neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen. Selbst hochauflösende Bildgebung ist auch aus großen Entfernungen aus möglich. Bei seinen Forschungen untersucht das Institut auch Anwendungsfelder in den Bereichen Gesundheit, Medizintechnik, Umwelt- und Geomonitoring.

Geschäftsfeldsprecher: Prof. Dr. rer. nat Jens Bongartz

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



SICHERHEIT

Die Erforschung zukunftsweisender Sicherheitslösungen ist seit jeher ein Schwerpunkt am Fraunhofer FHR. Den Fokus legt das Institut auf die Entwicklung von kompakten Sensortechnologien, um Einsatzkräfte mit detaillierten Lagebildern und Informationen zu versorgen – in Echtzeit und bei jedem Wetter. Radarsysteme eignen sich besonders für den Einsatz an schwer zugänglichen Unglücksorten und im Bereich der Prävention zur Entdeckung von Sprengvorrichtungen, Waffen und unautorisierten Objekte (z. B. Drohnen).

Geschäftsfeldsprecher: Dr. rer. nat. Jens Klare

+49 228 9435-311, jens.klare@fhr.fraunhofer.de



PRODUKTION

Innovative, maßgeschneiderte Sensorik für Produktion und Industrie ist seit vielen Jahren ein Schwerpunktthema am Fraunhofer FHR. Das Institut forscht an kompakten Sensoren für Qualitätskontrolle in Echtzeit. Neben in-line-Fähigkeit und Zuverlässigkeit ist der Preis ein wesentlicher Faktor bei der Entwicklung. Ziel der Aktivitäten im Geschäftsfeld Produktion ist es, mit modernster Technologie einen wesentlichen Beitrag zur besseren Erfassung von Fertigungsparametern zu leisten und dem Projektpartner so auch in Zukunft einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.

Geschäftsfeldsprecher: Dipl.-Ing. Dirk Nüßler

+49 228 9435-550, dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de



DAS LUFTGESTÜTZTE MULTIFUNKTIONSRADAR DER NÄCHSTEN GENERATION

Eine zuverlässige luftgestützte Überwachung und Aufklärung mit Radar erfordert eine hohe funktionelle Flexibilität der Sensorik und eine bestmögliche Bildqualität. Aktuell verfügbare Radar-Aufklärungssysteme für Flugplattformen bieten schon eine Vielzahl von Betriebsarten und Auflösungen im Dezimeterbereich. Aber sind damit die Grenzen des Machbaren für gepulste Multifunktionssysteme schon erreicht?

Die Arbeiten im Rahmen des Projekts PAMIR-Ka (*Phased Array Multifunctional Imaging Radar in Ka-band*) zeigen Perspektiven für neuartige Methoden und Technologien zur luftgestützten, weiträumigen Überwachung und Aufklärung im Ka-Band Frequenzbereich auf.

In seiner finalen Ausbaustufe ist PAMIR-Ka konzipiert als ein gepulstes mehrkanaliges und multifunktionales Radarsystem mit synthetischer Apertur für ultrahochoflösende Bildgebung und Bewegtzientdeckung im Ka-Band. Es wird als Nachfolger des im X-Band arbeitenden PAMIR-X-Systems entwickelt und eröffnet die technologischen Möglichkeiten des Frequenzbandes zwischen 30 und 38 GHz. Die Entwicklung von luftgestützten Radarsystemen in Ka-Band-Technologie bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber klassischen X-Band Systemen. Zum einen können kompaktere Antennen und Hochfrequenzbaugruppen für die Sensorik zum Einsatz kommen. Weiterhin bewirkt die höhere Bandbreite eine deutliche Steigerung der Auflösung in Entfernungsrichtung für die prozessierten Bildprodukte. Kombiniert man diese Eigenschaften

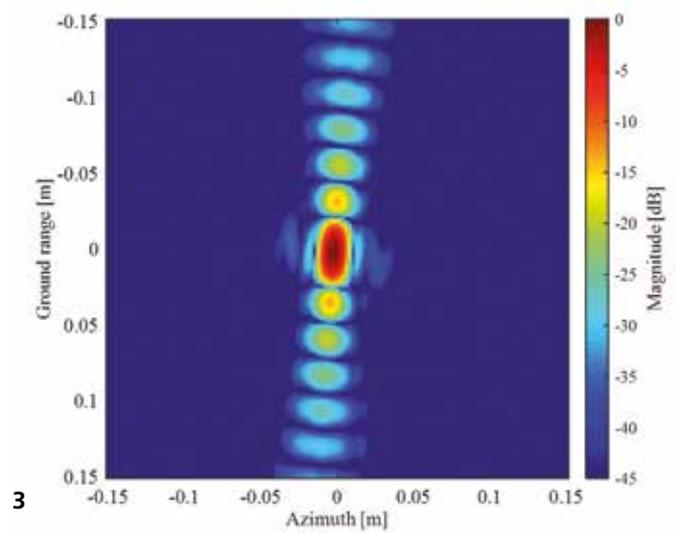
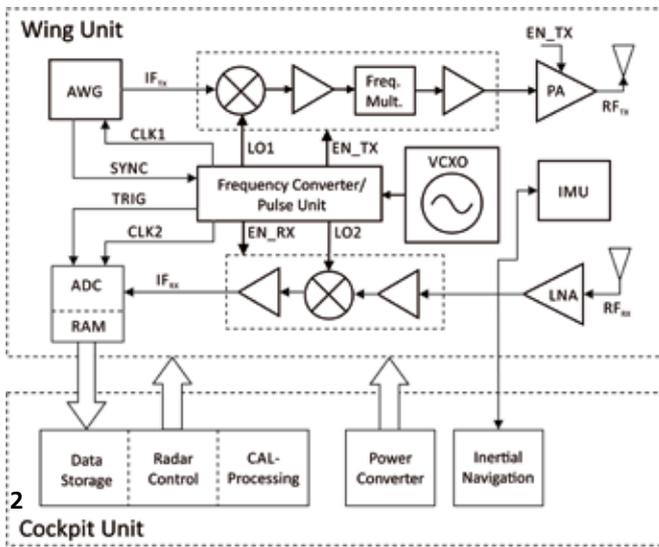
mit einem hochgenauen Pulsbetrieb in Verbindung mit einer aktiv elektronisch steuerbaren 2D-Gruppenantenne für Senden und Empfangen, so lässt sich durch verteilte Sendeleistungserzeugung die Reichweite steigern und durch Nachführen der Antennenkeulen die Auflösung in Flugrichtung erhöhen. In Verbindung mit einem mehrkanaligen Aufbau lassen sich verbesserte Radar-Betriebsarten (Moden) integrieren, beispielsweise zur besseren Entdeckung und Ortung von Bewegtzienten.

2D-Array-Technologie für Ka-Band Radarbetrieb mit synthetischer Apertur

Für den finalen Ausbau werden separate Antennenaperturen für Senden und Empfangen angestrebt. Mit jeweils 48 x 8 Antennenelementen bilden sie vollbesetzte Gruppenantennen mit sehr agiler elektronischer 2D-Strahlschwenkung. Wird diese Eigenschaft mit einer hohen Bandbreite von bis zu 8 GHz kombiniert, lassen sich SAR-Betriebsmodi mit Entfernungsauflösungen von unter 2 cm und Auflösungen in Flugrichtung zwischen 1 und 2 cm erreichen. Durch entsprechende thermische Auslegung wird die Sendeantennengruppe eine hohe gepulste Sendeleistung von ca. 800 Watt abstrahlen, um bestmögliche Reichweite und Bilddynamik trotz einer im Ka-Band ungünstigeren Streckendämpfung gegenüber dem X-Band zu erzielen.

Erste Demonstrationsphase des hochauflösenden SAR-Modus

Das Ziel der Realisierung eines Ka-Band Multifunktionsradars erfordert eine schrittweise methodische und technologische



Entwicklung in Demonstrator-Phasen. In der derzeit realisierten ersten Ausbaustufe verfügt PAMIR-Ka über jeweils einen Sende- und Empfangskanal in einer quasi-monostatischen Antennenanordnung. Für die ersten Flugversuche wurde das System an Bord des FHR-Kleinflugzeugs »Delphin« installiert. Ziel dieser Versuche war es, die Funktion des Systems unter Flugbedingungen nachzuweisen und die relevanten Aspekte der gepulsten SAR-Bildgebung im Ka-Band zu untersuchen.

Der SAR-Demonstrator besteht aus zwei Teilen, einer Tragflächeneinheit und einer Cockpit-einheit. Die Tragflächeneinheit beinhaltet das Frontend des Systems und ist in einem aerodynamischen Pod installiert. Das Frontend besteht aus den Antennen, der Signalerzeugung, den Frequenzumsetzer-Modulen, der Pulsverteilung und einem Analog-Digital-Wandler mit bis zu 20 GS/s Abtastrate. Der Pod ist unter der Tragfläche montiert, wobei die Antennen, mit einem einstellbaren Winkel geneigt, die Bodenszene beleuchten. Die Cockpit-einheit beinhaltet ein Trägheitsnavigationssystem, einen GNSS-Empfänger, Leistungs-Stromrichter, Datenspeicher und die Radarprozesssteuerung.

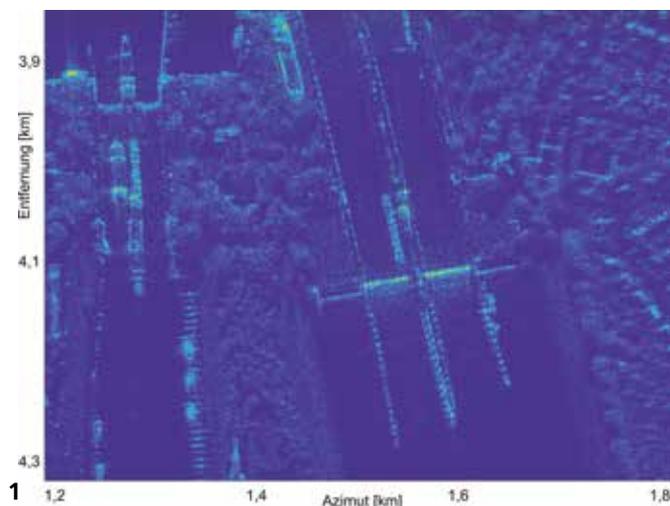
Im Berichtsjahr wurden zahlreiche Flugversuche mit PAMIR-Ka durchgeführt. Die Aufnahmen im Streifenmodus erfolgten aus Höhen bis zu 800 Meter über Grund, jeweils mit einem Antennen-depressionswinkel von 35°. Um die bestmögliche Entfernungsauflösung zu erzielen, wurde die komplette Simultanbandbreite von 8 GHz verwendet, was theoretisch eine Auflösung von 19 mm in Schrägentfernung erlaubt. Die relativ kleine Öffnung der Hornantennen ermöglicht eine lange synthetische Apertur und dementsprechend eine feine Auflösung in Flugrichtung. Die Auswertung der zweidimensionalen Punktabbildungsfunktion im prozessierten Bild zeigt eine Auflösung von 9 mm × 20 mm am Erdboden (Azimut × Entfernung).

In zukünftigen Entwicklungsstufen soll das System zu einem mehrkanaligen, multifunktionalen Phased-Array-System mit deutlich erhöhter Ausgangsleistung und aktiver elektronischer Strahlschwenkung (AESA) ausgebaut werden.

- 1 FHR-Forschungsflugzeug »Delphin« mit PAMIR-Ka Tragflächeneinheit.
- 2 Blockdiagramm des PAMIR-Ka SAR-Demonstrators.
- 3 An einem Referenzziel gemessene Punktzielantwort zur Verifikation der Auflösung.



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



SAR-BILDGEBUNG AUS UNTERBROCHENEN MESSUNGEN

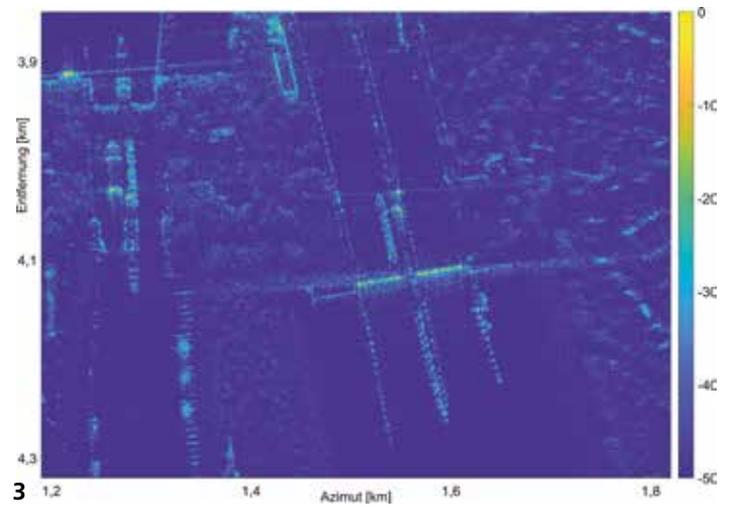
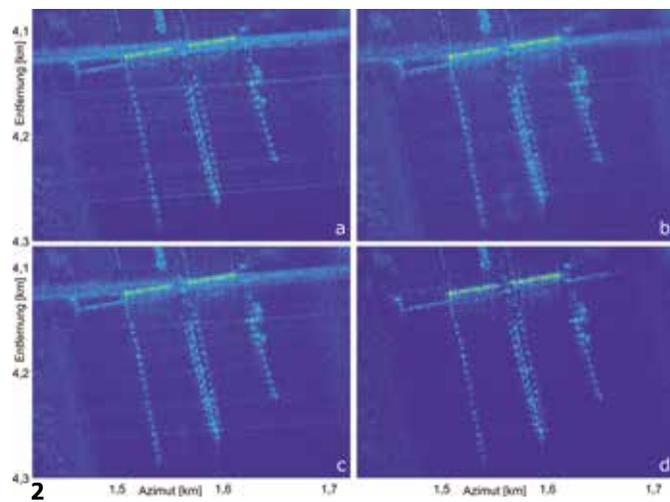
Klassische Verfahren der SAR-Bildgebung reagieren auf unvollständige Messdaten mit starken Artefakten. Eine Regularisierung der Berechnung mit *elastic net* ermöglicht trotzdem eine hohe Bildqualität, auch wenn die Messung durch eine moderne, multifunktionale Radarsteuerung unterbrochen wird.

Die Abbildung des Bodens aus der Luft oder dem Weltraum mittels Radar hat gegenüber optischen Verfahren Vorteile wie die Unabhängigkeit von Wetter und Beleuchtung. Dabei wird die Abbildung mittels Radar mit synthetischer Apertur (SAR) aus den eindimensionalen Messdaten mehrerer tausend Pulse berechnet. Daher nimmt die Aufnahme von Messdaten zur SAR-Bildgebung ein Radarsystem für einen längeren Zeitraum in Anspruch: Zum einen muss die abgebildete Szene über einen genügend großen Winkelbereich, also für eine entsprechende Dauer, beobachtet werden, um eine hinreichend feine Auflösung zu erreichen. Zum anderen ist eine genügend Dichte von Pulsen gleichen Abstands zur fehlerfreien SAR-Bildgebung mit akzeptablem Rauschniveau nötig.

Eine entsprechend lange, ununterbrochene Messung durchzuführen ist insbesondere mit Hinblick auf die aktuell vermehrte Entwicklung von Radaren mit kognitiver Steuerung problematisch. Hierbei wird eine Radarantenne für verschiedene, sich abwechselnde Aufgaben genutzt, so dass es für das Ressourcenmanagement nötig sein kann, eine SAR-Messung zu unterbrechen. Auch sonst treten kleinere Unterbrechungen der Messung auf, da Pulse aus verschiedenen Gründen unbrauchbar sein können.

Im Gegensatz zu optischen Bildern enthalten Radar-Daten zu jedem Puls eine additive Überlagerung von Beiträgen aus einem ausgedehnten Teil der Szene. Klassische Berechnungsmethoden zur SAR-Bildgebung – wie für Abbildung 1 genutzt – addieren für die Berechnung jedes Pixels des Bildes die Messdaten mit komplexen Gewichten so, dass sich die zum hier abgebildeten Ort in der Szene gehörenden Beiträge konstruktiv verstärken, während sie sich in allen anderen Pixeln destruktiv überlagern und beinahe gegenseitig auslöschen. Wenn Pulse wegfallen, fehlen deren Beiträge für alle Pixel, wodurch sich Streifen an einzelnen hellen Objekten bilden wie in Abbildung 2a.

Artefakte durch fehlende Messdaten treten auch in anderen Disziplinen auf. Daher lohnt sich ein Blick über den Tellerrand, wie dort mit diesem Problem umgegangen wird. Trotzdem stellt die Adaption dieser Methoden auf die SAR-Bildgebung einen nicht zu unterschätzenden, wichtigen Teil dieser Arbeit dar und nicht jeder Ansatz führt zum Erfolg. Oft werden Darstellungen, hier die dem SAR-Bild zugrunde liegende Szene, mit iterativen Optimierungsmethoden rekonstruiert. Diese versuchen, die vorhandenen Messdaten zu erklären, wofür der Abstand zwischen aus dieser Darstellung simulierten Daten und den original gemessenen Daten minimiert und als das Empfängerrauschen interpretiert wird. Auf den ersten Blick wird dadurch kein Vorteil erreicht: Die Rechenzeit verlängert sich und auch das Verhalten gegenüber fehlenden Messdaten verändert sich kaum, wie in Abbildung 2b zu sehen. Allerdings ist dieses Verfahren sehr flexibel: So lässt sich sehr einfach eine Nebenbedingung zur Optimierung hinzufügen, ein sogenannter Regularisierer, der gewisse Bildeigenschaften bevorzugt.



Dabei ist natürlich darauf zu achten, dass diese Eigenschaften der Datenstruktur entsprechen, d. h. die Auswahl des richtigen Regularisierers ist entscheidend.

Signalverarbeitung mit Hilfe von Regularisierern ist seit langem bekannt. Bereits in den 1970ern wurde die Tichonow-Regularisierung veröffentlicht, die als Nebenbedingung meist die Energie in der rekonstruierten Darstellung nutzt. Diese Art der Regularisierung hat bei der SAR-Bildgebung aber kaum Einfluss auf das Ergebnis, wie Abbildung 2c zeigt. Eine andere Methode, die bereits im Kontext des Compressed Sensing für SAR-Bilder eingesetzt wurde, ist, die Summe der Amplituden der Rekonstruktion als Nebenbedingung zu benutzen. Dieser Ansatz verhindert die Streifenbildung in Abbildung 2d, fasst aber auch benachbarte Pixel zusammen. Das ist im Fall von Compressed Sensing erwünscht, widerspricht aber hier der gegebenen Szene und lässt das SAR-Bild sehr leer erscheinen.

Da die beiden bisher getesteten Optionen gute wie schlechte Eigenschaften aufweisen, liegt es nahe, was sich auch theoretisch begründen lässt, beide zu kombinieren. Dafür wird eine gewichtete Summe beider Regularisierer als Nebenbedingung gewählt. Dieses Vorgehen – in der Statistik elastic net genannt – ist zwar mathematisch aufwendiger als jedes der Ausgangsverfahren, ergibt aber das SAR-Bild aus Abbildung 3, das nur wenige Streifen enthält. Es erscheint nicht so extrem leer und ist damit für die SAR-Bildgebung bei kognitiver Radarsteuerung geeignet, wobei wir eine weitere Verbesserung durch Vertiefung und aufwendigere Regularisierer planen.

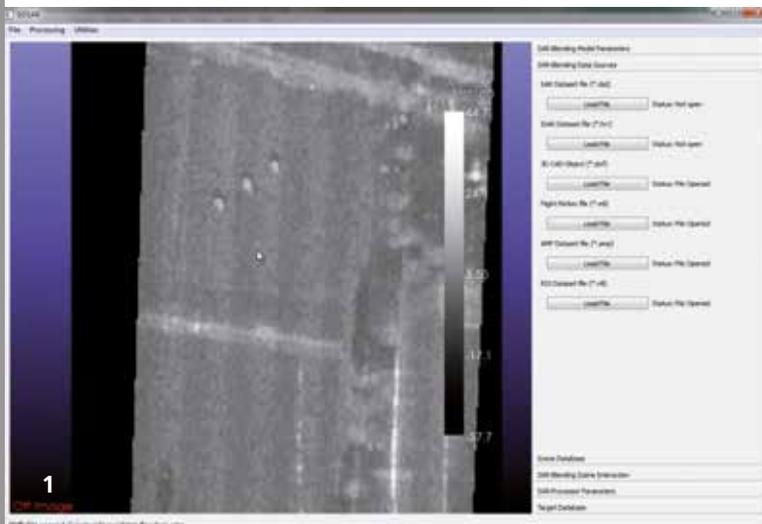
1 Aus dem vollständigen Datensatz klassisch berechnetes SAR Bild der Schleuse Brunsbüttel (Schleswig-Holstein).

2 Bildausschnitte derselben Szene wie in Abb. 1 berechnet aus 64% der Pulse mit verschiedenen Methoden (siehe Text).

3 SAR-Bild berechnet aus 64% der Pulse mit dem auf elastic net basierenden Regularisierer.



Dr. rer. nat.
Ludger Prünte
Tel. +49 228 9435-826
ludger.prunte@
fhr.fraunhofer.de



DEUTSCH-SCHWEIZER KOOPERATION ZWISCHEN FRAUNHOFER FHR UND ARMASUISSE W+T

Die Deutsch-Schweizer Kooperation zwischen dem Fraunhofer FHR und der armasuisse Wissenschaft und Technologie besteht in ihrer intensiven Zusammenarbeit bereits seit über einem Jahrzehnt. Die beiden im Folgenden vorgestellten Projekte, die Simulationssoftware EOSAR sowie das Millimeterwellen-Flug-SAR MIRANDA-35, sind Teil dieser ergiebigen Kooperation.

EOSAR – Anpassung an aktuelle SAR-Systeme

Das Projekt »Einfügen von Objekten in SAR-Szenen« (EOSAR) wird seit 2007 im Auftrag der armasuisse W+T sowie der Wehrtechnischen Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52) am Fraunhofer FHR durchgeführt. Auch wenn unter anderem die Entwicklungen des Fraunhofer FHR im Bereich der Miniaturisierung von Flug-SAR-Systemen es erlauben, die Kosten für die Erfliegung von SAR-Szenen immer weiter zu reduzieren, bleibt ein gewisser Aufwand bestehen. Je nach Zielsetzung der SAR-Messungen müssen Ort und Zeitpunkt nach entsprechenden Kriterien ausgewählt werden, wie zum Beispiel den Reflexionseigenschaften des Messhintergrunds und den vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Oft sind Fahrzeuge als Messobjekte von Interesse, welche zur Messung in den Szenen aufgestellt werden müssen. Das Ziel des EOSAR-Projekts ist es, einen solchen Versuchsaufbau, also die gemessene SAR-Szene, nachträglich um Messobjekte ergänzen zu können. Mobile Messobjekte werden dafür mit

weitaus geringerem Aufwand auf einer Drehplattform mittels inversem SAR (ISAR) vermessen und diese Messdaten werden nachträglich in die Messdaten der SAR-Szene eingebettet. Das Ergebnis sind Radar-Rohdaten, wie man sie nach einem SAR-Überflug erhalten würde. Ein erfolgreiches Einblenden führt zu Rohdaten, bei denen nicht zu unterscheiden ist, ob die Objekte wirklich vom SAR-Sensor überflogen oder von der Software im Nachhinein in die überflogene Szene eingefügt wurden.

Die für das Einblenden notwendigen Verfahren werden in enger Kooperation mit den *Remote Sensing Laboratories* (RSL) der Universität Zürich erarbeitet. Über die Jahre werden sie immer weiter an aktuelle Sensoren wie KOBRA und MIRANDA angepasst. Für die hierfür notwendige Weiterentwicklung der Prozessierungskette arbeiten Wissenschaftler beider Nationen eng zusammen. Da einige Messobjekte sowohl auf schweizerischer wie auch auf deutscher Seite über längere Zeiträume in allen Konfigurationen als SAR- und als ISAR-Ziel verwendet werden, bleibt eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhalten. Regelmäßige bilaterale Messkampagnen dienen der Gewinnung und dem Ausbau einer Messdatenbasis, auf Grund derer EOSAR weiterentwickelt und evaluiert werden kann.

MIRANDA-35 Flug-SAR – Mehrkanalig und polarimetrisch

Bereits im Jahr 2010 entstand von Schweizer Seite der Wunsch, durch das Fraunhofer FHR ein eigenes, für die Bedingungen der Schweizer Topographie optimiertes Flug-



SAR-System entwickeln und erproben zu lassen. Wesentliche Eigenschaft dieses Systems ist die durch die Gegebenheiten der Schweizer Topologie notwendige größere Flughöhe bei steilerem Depressionswinkel. So kann eine Abschattung bei hohen Bergen und tiefen schmalen Tälern minimiert werden. Um das zu erreichen, wurde als Frequenzband das Ka-Band gewählt und das ursprüngliche MIRANDA-System so modifiziert, dass eine kontinuierliche Sendeleistung von 10 W erreicht werden kann. Dazu wurden sowohl das Front-End als auch das Antennenkonzept vollständig überarbeitet. Die Abmessungen der Schweizer Flugplattform CENTAUR lassen die Realisierung mehrerer Empfangskanäle zu, so dass auch polarimetrische und andere Fragestellungen bearbeitet werden können.

In zahlreichen bilateralen Flugmesskampagnen wurde der Sensor erprobt und die Daten von Fraunhofer FHR und RSL bearbeitet. So konnten die beteiligten Signalprozessoren erweitert, optimiert und getestet werden. Zudem wurde eine Echtzeit-Bilderzeugung über eine Datenstrecke vom Boden zum Flugzeug implementiert. Diese ist für die Benutzer des Systems von großem Vorteil, da sie es erlaubt, die aktuelle Einsatzfähigkeit und die ersten Ergebnisse der Messung des Systems zu kontrollieren und zu bewerten. Im Bedarfsfall kann dadurch quasi ohne Zeitverzögerung auf Unwägbarkeiten reagiert und, sofern notwendig, können ohne Zwischenstopp des Flugzeugs Wiederholungen der Messungen durchgeführt werden. Bei einer Demonstration von MIRANDA-35 vor hochrangigen Angehörigen des Schweizer Militärs überzeugte das System auch mit dieser Echtzeit-Bilderzeugung. Das Publikum erhielt sofortige Einblicke in die Ergebnisse des Systems und damit einen ersten Eindruck der Möglichkeiten, welche das System in Einsatzszenarien bietet.

Das Fraunhofer FHR hat in der armasuisse W+T sowie den RSL der Universität Zürich kompetente und zuverlässige Partner gefunden. Durch die erfolgreiche, beständige und synergetische Zusammenarbeit mit diesen Partnern entstanden bewährte Systeme, deren Entwicklung im Schulterschluss weiter vorangetrieben wird.

- 1 SAR-Szene mit drei von EOSAR eingebildeten Fahrzeugen.
- 2+3 MIRANDA-35 an der Schweizer Flugplattform CENTAUR.



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



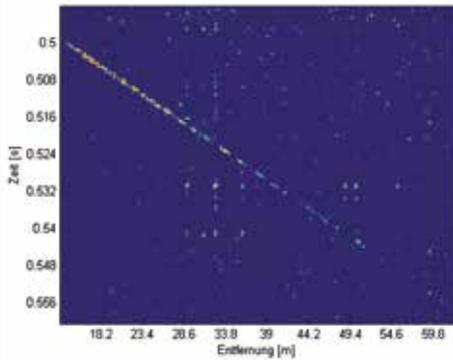
ABSTANDSAKTIVER SCHUTZ MIT MILLIMETERWELLENRADAR

In zahlreichen Einsatzszenarien besteht eine erhöhte Bedrohungslage durch Panzerabwehr-Handwaffen, die auf dem Weltmarkt in großer Zahl verfügbar sind. Ein vielversprechender Ansatz dieser Bedrohung zu begegnen, besteht in der Entwicklung und Realisierung abstandsaktiver Schutzsysteme.

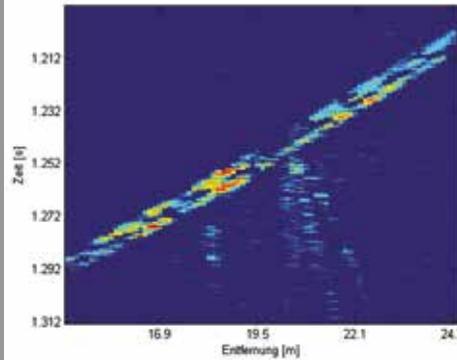
Die hohe Durchschlagkraft panzerbrechender Munition in Kombination mit einer nahezu hemisphärischen Bedrohungslage führen dazu, dass ein angemessener Schutz, insbesondere für leichte, luftverlastbare Fahrzeuge, mit herkömmlichen ballistischen Schutztechnologien kaum realisierbar ist. Vielmehr werden aktive Schutzsysteme benötigt, die ein anfliegendes Geschoss selbstständig erkennen und vor dem Eintreten der regulären Wirkung bekämpfen. Die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems hängt von mehreren Faktoren ab: Zuverlässigkeit der Detektion (niedrige Falschalarmrate), Güte der Klassifikation und der dreidimensionalen Ortung, Verarbeitungszeit der Messdaten sowie Einleitung einer geeigneten Gegenmaßnahme. Eine Schlüsselrolle kommt dabei dem Sensor zu, der die anfliegende Bedrohung detektiert, Rückschlüsse auf deren Beschaffenheit zulässt und Daten liefert, die eine hochgenaue Bestimmung der Flugparameter (Abstand, Flugrichtung, Geschwindigkeit) erlauben. Diese Informationen müssen schließlich der Feuerleitung in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der Allwettertauglichkeit und der Möglichkeit Staub- und Sandwolken zu durchdringen, bietet die Radartechnologie gegenüber anderen möglichen Sensoren (z. B. elektro-optisch oder infrarot) viele Vorteile.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens DUSIM (Dual Use Sensorik im mittleren Entfernungsbereich) wurde ein vierkanaliges Radarsystem für den abstandsaktiven Schutz im Überwachungsbereich zwischen 8 m und 250 m entwickelt. Es arbeitet bei einer Frequenz von 94 GHz und emittiert eine geringe Leistung von 100 mW, welche den Sensor für nicht kooperative Truppen schwer entdeckbar macht und zudem im Nahbereich ungefährlich für Personen ist. Das frequenzmodulierte Dauerstrich-Signal (FMCW) mit einer Bandbreite von 1 GHz sorgt für eine hohe Abstandsauflösung von 15 cm. Herzstück des DUSIM-Radarfrontends ist die hochstabile Signalaufbereitung (*Chirp Generation Board*), die eine lineare Frequenzrampe im Bereich um etwa 15,7 GHz erzeugt, welche im Anschluss versechsfacht und verstärkt wird. Mit dem vierkanaligen Empfangssystem ist der Sensor in der Lage, eine sehr präzise Ortsablage des herannahenden Geschosses zu liefern; dafür wird das Monopulsverfahren eingesetzt. Durch Ausnutzung des Dopplereffekts können ferner Geschwindigkeit und Flugrichtung der Bedrohung ermittelt werden. Die unmittelbare Erstellung eines Flug-Tracks nach erfolgreicher Detektion ist die wesentliche Grundlage für eine gezielte und zeitlich exakte Gegenmaßnahme. Eine möglichst eindeutige Klassifikation sorgt dabei für eine geringe Falschalarmrate, indem zwischen relevanten und nicht relevanten Zielen unterschieden wird. Das in der Abbildung 1 dargestellte Frontend hat eine Größe von 200 x 180 x 230 mm³ und eine Masse von ca. 3 kg.

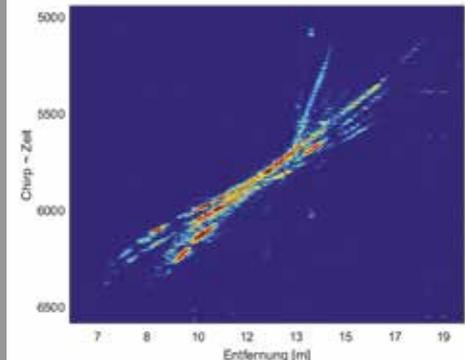
Das System wurde in mehreren Messkampagnen unter realitätsnahen Bedingungen erfolgreich getestet. Dabei wurden sowohl Versuche mit kleinkalibrigen Geschossen als auch mit



2



3



4

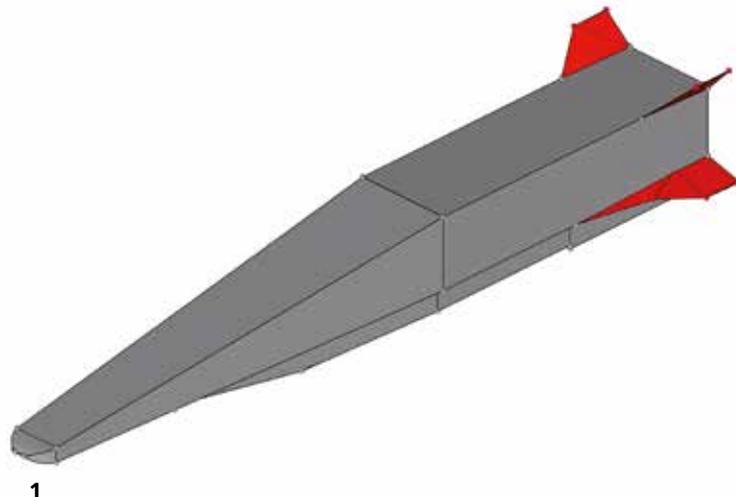
panzerbrechender Munition (z. B. RPG 7) durchgeführt. Die Ergebnisse sind beispielhaft in den Abbildungen 2 und 3 zu sehen. In den Jahren 2016 und 2017 wurden zusätzliche Versuche in der Zentrifugenanlage der WTD 91 in Meppen durchgeführt. Hier wurden verschiedene Bedrohungen reproduzierbar auf einer Kreisbahn bewegt, von der ein Teilabschnitt tangential durch das Radar beleuchtet wurde. Aufgrund der hohen Wiederholrate konnten rund 700 Einzelmessungen verteilt auf die verwendeten Flugkörper (elf verschiedene Bedrohungen) aufgezeichnet werden. Ohne aufwendige Schussversuche können auf diese Weise wiederholt die unterschiedlichen Radarsignaturen der diversen Geschosse sehr kostengünstig und mit geringem Zeitaufwand untersucht werden. Die Vielzahl der Messdaten erlaubt darüber hinaus statistische Aussagen über die betrachteten Objekte. Die Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus einer typischen Zentrifugenmessung.

Die erfolgreichen Messungen und guten Ergebnisse zeigen, dass eine Weiterentwicklung des DUSIM-Radarsensors zum Einsatz in einem abstandsaktiven Schutzsystem 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) könnte außerdem der Abdeckungsbereich des Radars noch erhöht werden.

- 1 *DUSIM – Vierkanaliges Radar-Frontend mit einer Ausgangsleistung von 100 mW bei 94 GHz.*
- 2 *Geschossbahn eines kleinkalibrigen Projektils (MG3 7,62 x 51 mm).*
- 3 *Ausschnitt der Geschossbahn einer RPG. Raketenbug und -heck (Finne) sind unterscheidbar.*
- 4 *Trajektorie eines Flugkörpers in der Zentrifugenanlage auf der WTD 91 in Meppen. Es sind zwei Streuzentren auf dem Zielobjekt sowie weitere Streuzentren mit geringerer Geschwindigkeit von der Zentrifuge selbst zu erkennen.*



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



ABWEHR HYPERSONISCHER FLUGKÖRPER

Ballistische Flugkörper stellen eine weltweite Bedrohung dar, gegen die die NATO und Europäische Militärkräfte Abwehrmaßnahmen ergriffen haben beziehungsweise Abwehrfähigkeiten aufbauen.

Jeder Flugkörper, der mindestens im erdnahen Orbit fliegt, erreicht eine Überschallgeschwindigkeit größer Mach 6 (sechsfache Schallgeschwindigkeit, ca. 2 km pro Sekunde). Ab solchen Geschwindigkeiten wird von hypersonischer Geschwindigkeit gesprochen. Üblicherweise wird diese Geschwindigkeit erst außerhalb der dichten Erdatmosphäre erreicht. Die Entwicklung neuartiger Flugkörper geht jedoch stetig voran und die Fähigkeit, Suborbitalflüge bei diesen Geschwindigkeiten durchzuführen, wird in diversen Staaten derzeit aufgebaut.

Eine Entwicklung zum Bau solcher hypersonischer Flugkörper stellt der sogenannte Scramjet-Antrieb dar. Während diese Antriebsform bislang für Flugabwehrraketen eingesetzt wurde, gab es in jüngerer Zeit Meldungen, dass dieser Antrieb für Hypersonische Cruise Missiles (HCM) weiterentwickelt wurde (Zirkon, Brahmos II, X-51).

Eine weitere Entwicklung kombiniert eine ballistische Rakete mit einer Flugbahnkontrolle durch Anstellflügel, sodass ein solcher Flugkörper zum Ende der sonst ballistischen Flugbahn nicht mehr einer ballistischen Trajektorie gehorchen muss, sondern sogenannte »pull-up Manöver« ausführen kann. Diese Klasse von Flugkörpern wird Hypersonic Glide Vehicle (HGV) genannt. Die Besonderheit, die sich aus diesem abwechselndem Ab- und Aufsteigen ergibt, ist, dass das Ziel unter dem Radarhorizont abtauchen kann, was die Detektion und Verfolgung enorm erschwert.

Beide oben erwähnten Flugkörper-Technologien führen zu neuen Bedrohungen, welche durch Luftraum-Überwachungsradare erkannt werden müssen. Insbesondere die hohe Geschwindigkeit führt zu kurzen Reaktionszeiten für Gegenmaßnahmen. Daher sind vorhandene Radarsysteme bezüglich der Detektions-Geschwindigkeit und der Bahnverfolgungspräzision zu überprüfen.

Die zu untersuchenden Aufgaben zum Radarsensor lassen sich wie folgt einteilen:

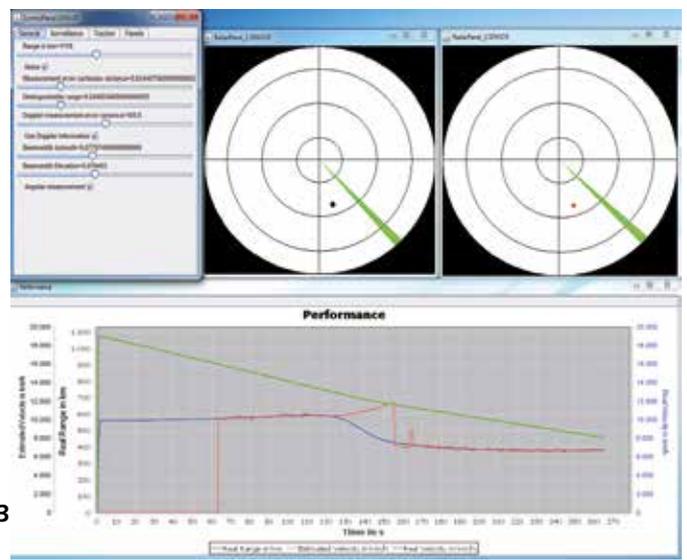
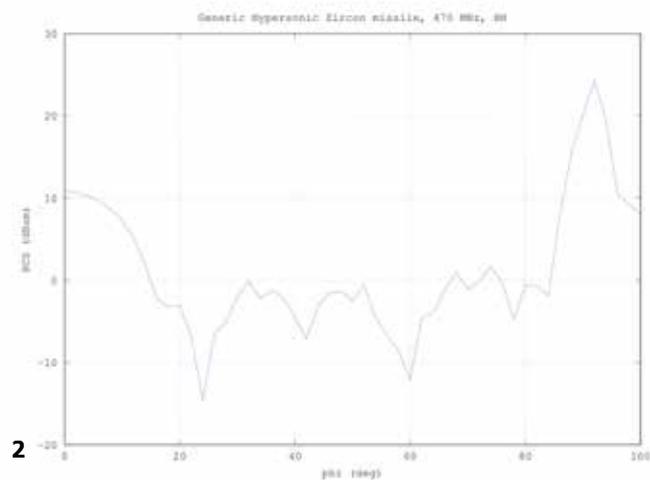
- Radar-Komponenten: Sender, Empfänger, Antennengewinn, Strahlschwenkung
- Annahme von Ziel-Eigenschaften: Radarrückstreuquerschnitt, Manövrierfähigkeit, Geschwindigkeit
- Radar-Algorithmen: Suchverfahren, Detektionsverfahren, Zielverfolgungsverfahren

Während die Radar-Komponenten durch die Fähigkeiten der Wehrindustrie vorgegeben sind, kann ein Forschungsinstitut insbesondere den Radarrückstreuquerschnitt (RCS) des Ziels untersuchen und die Eignung gegebener Radaralgorithmen bezüglich der Zieleigenschaften Geschwindigkeit und Manövrierfähigkeit abschätzen.

Radarkomponenten

Grundsätzlich müssen zur Reichweitensteigerung die Möglichkeiten höherer Sendeleistung und empfindlicherer Detektoren weiter entwickelt werden. Aktuelle Entwicklungen zielen darauf ab, insbesondere die trägheitslose Strahlschwenkung auch für Radarsysteme mit hohen Sendeleistungen verfügbar zu machen. Am Fraunhofer FHR werden wesentliche Arbeiten zur Nutzung der elektronischen Strahlschwenkung für Bodenradarsysteme durchgeführt.

RCS-Simulationen: 470 MHz



Radarrückstreuquerschnitt

Um den RCS eines unbekanntes Ziels zu berechnen, ist eine geometrische Vorgabe (CAD-Modell) erforderlich, die mit Hilfe von gängiger CAD-Software aus Zeichnungen, Fotos o. ä. so erstellt werden kann, dass sie näherungsweise dem Original entspricht. Dieses geometrische Modell dient dann als Eingabe für Simulationsprogramme zur elektromagnetischen Modellierung (Abb. 1).

Im Bereich der elektromagnetischen Modellierung hat das Fraunhofer FHR eine langjährige Expertise, und es wurden verschiedene Simulationstools implementiert, die in vielen Veröffentlichungen beschrieben und in der wissenschaftlichen Community anerkannt sind. Mit diesen Verfahren lässt sich die Rückstreuung einer einfallenden elektromagnetischen Welle durch ein beliebiges Ziel berechnen (Abb. 2). Diese Werte werden benötigt, um die Eignung eines Radarsystems gegenüber dieser Zielklasse abschätzen zu können. Auch können besondere Effekte der elektromagnetischen Felder auf dem Zielobjekt untersucht werden.

Radaralgorithmen

Zur Entwicklung von Radaralgorithmen wird neben der Mathematik eine Radar-Simulation zum Test der Algorithmen benötigt. Diese Simulation kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Hier wird eine Simulationsebene betrachtet, die auf bewährten Formeln aufsetzt und daher nicht z. B. detailliert das Verhalten elektronischer Bauelemente simuliert. Zusätzlich können verschiedene Zielflugbahnen und Ziel-Manövrierfähigkeiten betrachtet werden.

Falls noch kein Radarsystem existiert, so kann mittels eines Radarsimulators eine erste Abschätzung dahingehend erfolgen, welche Leistung die Radar-Komponenten haben müssten, um gegen die hier betrachtete Zielklasse erfolgreich zu sein. Falls die Radar-Komponenten bekannt sind, so kann mit einem Simulator an den Algorithmen zur Zielsuche und zur Zielverfolgung gearbeitet werden. Insbesondere die Genauigkeit der Zielverfolgung kann wesentlich verbessert werden, wenn die Grenzen der Bewegungs- und Manövrierfähigkeit des Ziels bekannt sind. Die Wissenschaftler des Fraunhofer FHR arbeiten an neuen intelligenten Verfahren zur Zielsuche, Zieldetektion und Zielverfolgung. Durch die Vorhersage von Zielmanövern und durch effektives Verteilen von Ressourcen können z. B. unter den Radarhorizont abgetauchte Ziele schnell wieder aufgegriffen werden. Letzteres stellt eine der neuen Herausforderungen dar, um die Fähigkeiten von Abwehrsystemen gegen HGV zu erweitern.

- 1 Generierung eines CAD Modells basierend auf Geometrischen Annahmen des Ziels.
- 2 Ergebnis der Berechnung des RCS, hier über einen Winkelbereich von 100 Grad.
- 3 Simulationsbasierte Prüfung der Eignung eines Radarsystems und der Zielverfolgungsalgorithmen.



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



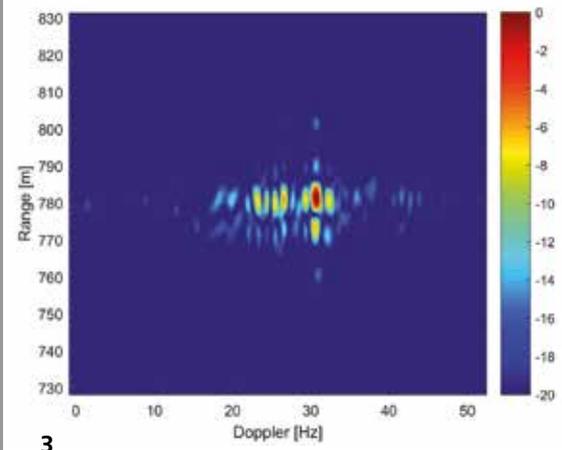
DVB-S2 BASIERTE PASSIV-RADAR-ABBILDUNG

Die Identifizierung von nicht-kooperativen Zielen mit militärischer Relevanz erfordert zunehmend eine zuverlässige sowie hoch aufgelöste Abbildung dieser Ziele. Der passive Radarbetrieb gewährleistet dabei eine unauffällige Überwachung. Das am Fraunhofer FHR entwickelte System SABBIA nutzt die von Satelliten gesendeten Signale (DVB-S2) zur Abbildung nicht kooperativer Ziele. Dabei erzielt SABBIA eine Auflösung von unter 2 m und ermöglicht zudem den Betrieb mit unterschiedlichen orthogonalen Polarisationen.

In der Verteidigungstechnologie gewinnen passive Radarsysteme zunehmend an Bedeutung. Neben den konventionellen Aufklärungssystemen der Luftfahrt wurden in den vergangenen Jahren einige neue Verfahren zur Aufklärung entwickelt. Dazu zählen unter anderem auch die passiven bildgebenden Radarverfahren wie SAR und ISAR, die einen hohen Stellenwert besitzen. Die instantane Bandbreite solcher Radare ist in der Regel von der Rundfunkstation bzw. von der Wellenlänge der Sender abhängig. Sender im VHF- und UKW-Bereich schränken die Bandbreite des Systems stark ein. Im Gegensatz dazu ermöglichen digitale Fernsehsatelliten (DVB-S2), die im Ku-Band betrieben werden, die Verwendung einer höheren Bandbreite. Hierdurch können Entfernungsauflösungen von wenigen Metern erzielt werden, welche eine wichtige Voraussetzung für bildgebende Verfahren darstellen. Darüber hinaus bietet die Verwendung von DVB-S2 für militärische Anwendungen zwei wesentliche Vorteile. Zum einen besitzen DVB-S2-Signale eine hohe Ausleuchtung und stehen somit

länderübergreifend zur Verfügung. Zudem gestaltet sich eine Abschaltung der Satelliten im Fall eines Krieges weitaus schwieriger als bei herkömmlichen Sendern. Ein entscheidender Nachteil von DVB-S2 gestützten Passiv-Radaren ist jedoch die sehr niedrige Leistungsdichte am Empfänger, welche u. a. den Einsatz von Antennen mit hohem Gewinn sowie eine lange Integrationszeit in der Signalverarbeitung erforderlich machen. Für die passive Zielabbildung stellt die lange Integrationszeit jedoch keinen wesentlichen Nachteil dar, da diese für ISAR-Verfahren ohnehin erforderlich ist, um eine hohe Auflösung in der *Cross-Range* zu erreichen.

Das Fraunhofer FHR hat das Experimentalsystem SABBIA entwickelt, um die passive Radarabbildung für nicht kooperative Flugziele sowie maritime Ziele zu ermöglichen. Hierzu werden die von geostationären Satelliten ausgesendeten DVB-S2-Signale, z. B. die des Satelliten ASTRA 19.2°E, verarbeitet. Der Aufbau von SABBIA basiert auf zwei baugleichen Empfangseinheiten, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Es handelt sich hierbei um die sogenannte Referenzeinheit, die zur Akquirierung des direkten Satellitensignals dient, und die Trackingeinheit, die zur Rezeption des Zielechos verwendet wird. Beide Empfangssignale werden nach der Analog-Digital-Wandlung mit Hilfe von *High-Speed*-Datenrekordern aufgezeichnet. Die Empfangseinheit besteht aus einer 85 cm Offset-Antenne, einem am Fraunhofer FHR eigens entwickelten Antennenhorn sowie einem speziellen Quattro-LNB. Dieser weist eine geringe Rauschzahl auf und besitzt zudem einen internen *Low-Phase-Noise-Oszillator* sowie einen externen 10 MHz Referenzeingang. Beide Empfangseinheiten sind mit einer GPS-IMU (*Inertial Measurement Unit*) ausgestattet, um präzise



Lage- und Ausrichtungsinformationen zu erhalten. Der LNB ist in der Lage DVB-S2-Signale gleichzeitig in horizontaler und vertikaler Polarisation sowie in beiden Bändern, *Low- und High-Band*, zu demodulieren. Dies ermöglicht einen vollpolarimetrischen Betrieb des Systems.

Im Rahmen des von der EDA (Kat. B) geförderten Projekts MAPIS (*Multichannel passive ISAR imaging for military applications*) wurden 2017 Feldversuche mit SABBIA durchgeführt. Während der Versuche wurde das Militärschiff Porpora (Abb. 2) vermessen und als ISAR-Image abgebildet (siehe Abb. 3). Die gegebene bistatische Geometrie und die Ausrichtung des Schiffes ermöglichten die Abbildung des Ziels aus der sogenannten *Top-View* (Vogelperspektive). Das Schiff befindet sich hier in einer einzigen Entfernungszelle, da aufgrund der geringen Signalbandbreite keine höhere Entfernungsauflösung erzielt werden konnte. Jedoch kann die sogenannte *Cross-Range*-Richtung (in Abb. 3 als Doppler-Achse dargestellt) gut abgebildet werden. Hieraus kann die Größe des Ziels abgeleitet werden. Diese Information ist für die Detektion und Klassifizierung des Ziels von essenzieller Bedeutung.

- 1 *Das SABBIA System im Einsatz.*
- 2 *Das Militärschiff Porpora.*
- 3 *DVB-S2-basiertes ISAR-Bild von Porpora [dB].*

Dipl.-Ing.
 Iole Pisciotano
 Tel. +49 228 9435-784
 iole.pisciottano@
 fhr.fraunhofer.de



KRYOGENE PHASED-ARRAY RADARE ZUR WELTRAUMÜBERWACHUNG

Durch den Einsatz kryogener Technik soll in Zukunft die Sensitivität von Phased-Array-Radaren erheblich gesteigert werden. Wissenschaftler am Fraunhofer FHR stellen sich der großen Herausforderung einer technischen Realisierung von effizienten Kühlmaßnahmen zur Senkung der System-Rauschtemperatur.

Um die Position von Trümmerteilen sowie Satelliten zu bestimmen, wird es immer wichtiger, den erdnahen Weltraum mit Hilfe von Radartechnologie zu überwachen. Auf dem Gebiet der Radarüberwachung spielen dabei aktive Phased-Array-Radare eine wichtige Rolle. Die elektronisch schwenkbaren Beams ermöglichen die gleichzeitige Überwachung verschiedener Himmelspositionen, sowie eine hohe, trägheitslose Beam-Agilität und gestatten somit die schnelle und genaue Verfolgung beweglicher Ziele.

Für die Detektion von Weltraumtrümmern spielt ein hohes Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) eine entscheidende Rolle. Dieser Parameter hängt von der intrinsischen Rauschtemperatur der Einzelpfängerkanäle ab. Ist diese zu hoch, können schwache Signale nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden und bleiben somit undetektiert. Eine der nächsten Herausforderungen für zukünftige Phased-Array-Projekte zur Weltraumüberwachung liegt daher in der technischen Realisierung von effizienten Kühlmaßnahmen für die einzelnen Empfängerkanäle. Gerade im Bereich der Detektion von Weltraumtrümmern ist die Verbesserung des SNR durch die Senkung der Systemtemperatur bei vorgegebener äquivalenter

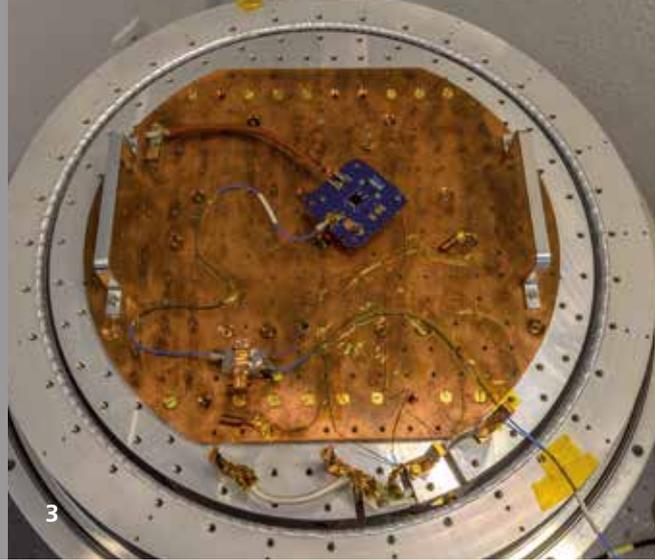
isotroper Strahlungsleistung (EIRP) essentiell für das Auffinden kleinster Teilchen im *Low-Earth Orbit* (LEO).

Das DLR Raumfahrtmanagement hat daher im Jahr 2017 das Fraunhofer FHR mit einer Zuwendung betraut, die sich mit der Empfängertiefkühlung für Phased-Array-Antennen im Allgemeinen und für GESTRA-ähnliche Systeme im Speziellen beschäftigt. Mit dieser Thematik erschließt sich das Fraunhofer FHR ein neues Forschungsfeld.

Stand der Technik

In der Radioastronomie ist die Empfängertiefkühlung zur Senkung der Systemtemperatur bei Single-Pixel-Detektoren wie dem 100-Meter-Parabolspiegel in Effelsberg schon seit Jahrzehnten etabliert. Aufgrund mechanischer und hochfrequenztechnischer Herausforderungen befindet sich die Technik zur Reduzierung des Empfängerrauschens bei Phased-Array Systemen ganz am Anfang der Entwicklung. Das am Fraunhofer FHR durchgeführte Forschungsthema verfolgt nun das Ziel, verschiedene Ansätze zur Tiefkühlung von Phased-Array Systemen zu entwerfen und zu optimieren. Eine Kosten-Nutzen-Analyse beleuchtet außerdem den Aspekt der Wirtschaftlichkeit.

Da der Hauptanteil der System-Rauschtemperatur durch den ersten Verstärker (*Low Noise Amplifier*, LNA) in einer Empfänger-kette generiert wird, liegt das Hauptaugenmerk auf der effektiven Senkung des Eigenrauschens durch das Tiefkühlen der ersten Verstärkerstufe.



Tiefkühlung verbessert Detektionsempfindlichkeit

Im ungekühlten Fall befindet sich der erste Verstärker der Empfängerkette in einer Umgebung mit Raumtemperatur (290 K, entspricht 20°C). Die Zuwendung zielt nun dahin, die erste Verstärkerstufe mit gasförmigem Helium auf unter 20 K (-253°C) zu kühlen und damit Systemtemperaturen von unter 50 K (-223°C) zu erreichen. Die Radargleichung sagt dann ein um etwa 3 dB verbessertes Signal-zu-Rauschverhältnis voraus, was bedeutet, dass Objekte mit halb so kleinem Radarrückstreuquerschnitt im Orbit detektiert werden können.

Experimente bei bis zu -269°C

Ein Teil der ersten Projektaktivitäten bestand in der Schaffung einer geeigneten Infrastruktur, welche aus Institutseigenen Mitteln finanziert wurde. Hierzu wurden Messräume aufgebaut, die den sicheren Umgang mit inerten Gasen (z. B. Helium) und flüssigem Stickstoff erlauben. Mit Hilfe von Testanordnungen soll an diesen Messplätzen unter anderem untersucht werden, welche rauscharmen Verstärker bei Tiefkühlung die beste Performance aufweisen und wie eine Optimierung der Messtechniken zur Temperaturüberwachung realisiert werden kann. Eine große Herausforderung liegt hierbei in der mechanischen Entwicklung vakuumdichter, stabiler und hochfrequenzdurchlässiger Experimentalumgebungen bei gleichzeitig bester thermischer Anbindung der Tiefkühlung an die erste Verstärkerstufe. In Zusammenarbeit mit einem führenden Unternehmen auf dem Gebiet der Tieftemperaturtechnik wurde zu diesem Zweck ein Dewar entwickelt. Dieser ermöglicht es, die herausfordernden Hochfrequenz- und Materialexperimente bei Temperaturen von bis zu 4 K (-269°C) durchzuführen.

Nach dem erfolgreichen Abschluss der ersten Phase des Vorhabens ist vorgesehen, ein höchstempfindliches Phased-Array-basiertes Weltraumüberwachungsradar zu realisieren. Die Umsetzung einer Kryo-Empfängerkühlung zur Radaranwendung wäre ein Meilenstein bei der Verbesserung der Empfängersensitivität. Diese wichtige Technologie hätte auch das Potential viele andere Forschungsfelder entscheidend voran zu bringen.

- 1 Mess-Dewar für die Vermessung der elektronischen Bauteile (Höhe: 840 mm, Durchmesser: 620 mm).
- 2 Vakuumfester Flansch am Mess-Dewar mit montierten vakuumfesten, vielpoligen DC-Durchführungen.
- 3 Auf 4 Kelvin gekühlte Experimentalplattform, die sich innerhalb des Mess-Dewars befindet.



Dr. rer. nat.
Nadya Ben Bekhti
Tel. +49 228 9435-768
nadya.ben.bekhti@
fhr.fraunhofer.de



VERMESSUNG DER KLEINTEILIGEN WELTRAUMTRÜMMERPOPULATION MIT TIRA

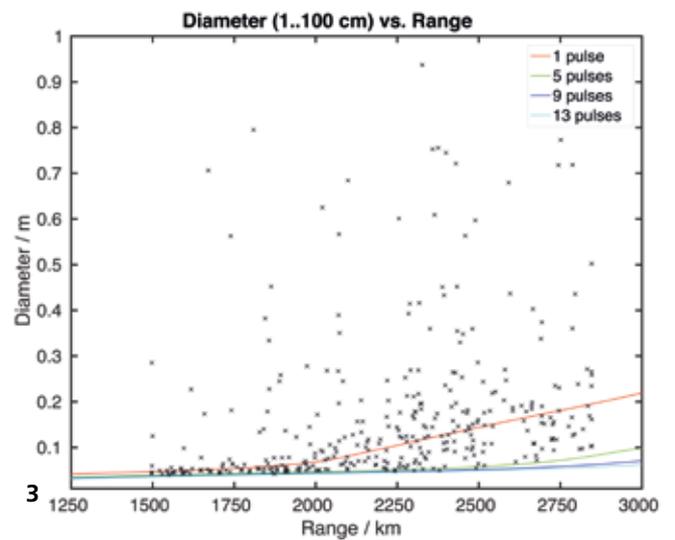
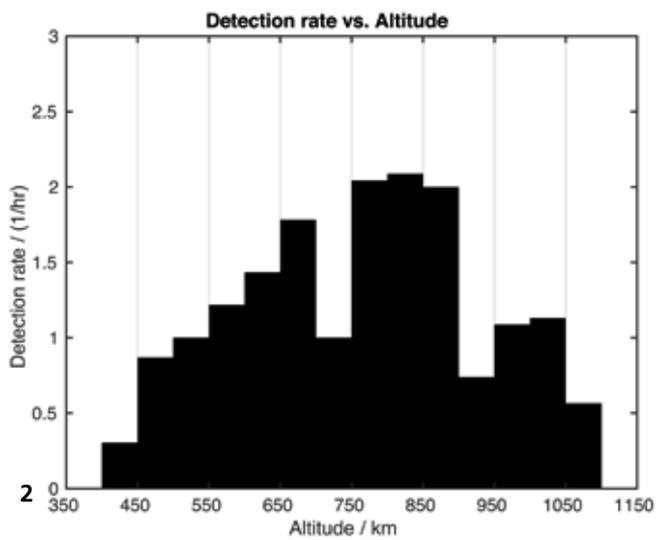
Kleine Objekte von wenigen Zentimetern können Satelliten beschädigen oder sogar komplett zerstören. Das Weltraumbeobachtungsradar TIRA vermisst regelmäßig diese kleinteilige Raumfahrttrümmerpopulation. Die aus den Radardaten gewonnenen Ergebnisse werden verwendet, um Modelle der Weltraummüllumgebung zu kalibrieren und zu validieren.

Seit dem Start der Erkundung des Weltraums im Jahr 1957 hat die Anzahl der Raumfahrttrümmer exponentiell zugenommen. Trümmer von Kollisionen und Explosionen, Bruchteile von Raketen, ausgediente Satelliten und weitere Raumfahrtrückstände umkreisen die Erde und gefährden die aktiven Raumfahrtsysteme. Dabei kann ein Aufprall mit einem 1 cm großen Objekt schon für einen aktiven Satelliten letal sein, aufgrund der möglichen hohen Relativgeschwindigkeit zwischen den Weltraumobjekten.

Derzeit können Objekte größer als ca. 10 cm von der Erde aus mittels Radaren und Teleskopen detektiert, nachverfolgt und katalogisiert werden. Allerdings sind kleinere Objekte und Objekte, die auf hochelliptischen Bahnen die Erde umkreisen, viel schwieriger zu detektieren und nachzuverfolgen. Diese Objekte können derzeit nicht katalogisiert werden, d. h. es ist nicht bekannt, wo diese Objekte, die potentiell hochgradig gefährlich für aktive Satelliten sind, sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im Weltraum aufhalten. Aus diesem Grund ist es äußerst wichtig zumindest zu wissen, wie diese Objekte im Weltraum verteilt sind.

Das Weltraumbeobachtungsradar TIRA ist seit seiner Errichtung das führende System in Europa zur Erfassung und Aufklärung von Weltraumobjekten. Aufgrund seiner äußerst hohen Empfindlichkeit kann TIRA das schwache Rückstreusignal kleinster Raumfahrttrümmer messen. Somit können 2 cm kleine Objekte auf einer Entfernung von 1.000 km entdeckt werden. Diese hohe Empfindlichkeit wird u. a. durch den großen Gewinn der hochdynamischen 34-Meter-Antenne (Abb. 1) erreicht.

Aufgrund dieser Fähigkeit nimmt das Fraunhofer FHR mit TIRA seit 1993 an regelmäßigen internationalen Messkampagnen teil (die so genannten »Beampark-Experimente“ (BPE)), um die kleinteilige Raumfahrttrümmerpopulation zu vermessen und deren statistische Verteilung zu erfassen. Diese Messkampagnen werden vom IADC (*Inter-Agency Space Debris Coordination Committee*) koordiniert und finden etwa alle zwei Jahre statt. Dabei ist es besonders wichtig, dass solche Messkampagnen regelmäßig stattfinden, um die Änderungen der kleinteiligen Raumfahrttrümmerpopulation zu überwachen. Die Weltraumpopulation in niedrigen Umlaufbahnen (LEO, *Low Earth Orbit*) ist nämlich besonders dynamisch: Trümmerstücke entstehen durch Explosionen und Kollisionen, neue Satelliten und Raumfahrtrückstände (z. B. Raketenoberstufen) treten in den Weltraum ein, und Objekte verschwinden aus dem Weltraum durch atmosphärischen Widerstand und Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. Die Ergebnisse aus diesen stichprobenartigen Beobachtungen liefern wichtige Stützstellen für Weltraummüllumgebungsmodelle wie das MASTER-Modell (*Meteoroid and Space-Debris Terrestrial Environment Reference*) der ESA und ermöglichen, diese Modelle zu kalibrieren und zu validieren. Bei einem BPE wird die Antenne eines teilnehmenden



Radarsensors fest in eine ausgewählte Blickrichtung gestellt (oder »geparkt«) und es werden Radardaten für 24 Stunden aufgezeichnet. Nach 24 Stunden hat die Erddrehung dafür gesorgt, dass das Radar ein geschlossenes Volumen beobachtet hat. Abhängig von der eingestellten Blickrichtung der Antenne können unterschiedliche Bahnregionen erfasst werden. Beispielsweise wird die Antenne für ein *East-Staring* BPE Richtung Osten ausgerichtet. Bei einem *South-Staring* BPE schaut die Antenne nach Süden mit einem niedrigen Elevationswinkel. Bei einer solchen Geometrie kann die Trümmerpopulation auf Bahnen mit niedriger Inklination untersucht werden. Aus den Radardaten können viele wichtige Informationen über die detektierten Objekte abgeleitet werden. So ist es möglich die Größe von Objekten aus dem Radarrückstreuquerschnitt zu schätzen. Auch können Bahnhöhe und Bahninklination unter der Annahme einer Kreisbahn abgeschätzt werden.

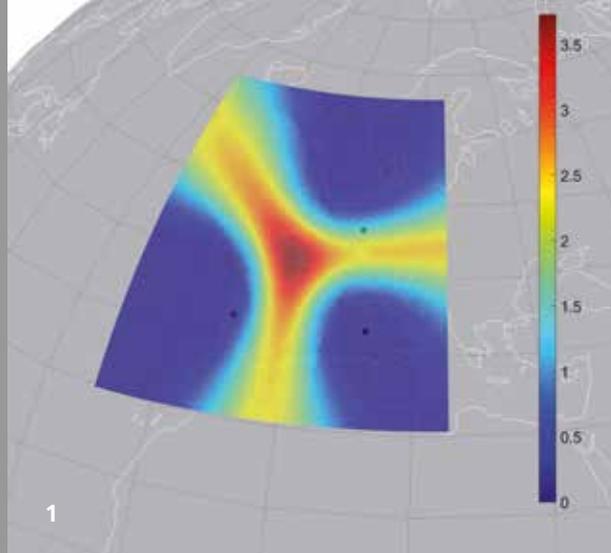
Zum ersten Mal wurde ein *South-Staring* BPE im Dezember 2015 durchgeführt. Weitere an dieser IADC-Messkampagne teilnehmende Sensoren waren drei amerikanische Radare: das HUSIR Radar (*Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar*), das *Cobra Dane Radar* und das *Goldstone Radar*. Ein gemeinsamer Bericht über die erfassten Weltraumteilchen und deren Verteilung über die geschätzten Bahnparameter wurde verfasst, welcher derzeit zur Kalibrierung und Validierung von Modellen der Weltraummüllumgebung ausgewertet wird. Abbildungen 2 und 3 zeigen Ergebnisse, die mit TIRA gewonnen wurden. In Abbildung 2 ist die Detektionsrate über der Bahnhöhe der detektierten Weltraumteilchen aufgetragen. Abbildung 3 zeigt deren geschätzte Größe über der Entfernung. Dieses Projekt wurde durch ESA/ESOC gefördert.

- 1 *Das Herz des TIRA Systems: Die 34-m Parabolantenne.*
- 2 *Detektionsrate über der Bahnhöhe.*
- 3 *Größe der detektierten Weltraumteilchen über der Entfernung.*



Dr.-Ing.
 Delphine Cerutti-Maori
 Tel. +49 228 9435-290
 delphine.cerutti-maori@
 fhr.fraunhofer.de

Dr.-Ing.
 Jens Rosebrock
 Tel. +49 228 9435-656
 jens.rosebrock@
 fhr.fraunhofer.de



ÜBERWACHUNG DES ERDNAHEN WELTRAUMS DURCH EIN RADARNETZWERK

Mit Unterstützung des DLR Raumfahrtmanagements erarbeitet das Fraunhofer FHR Konzepte für die Überwachung des erdnahen Weltraums durch ein Netzwerk von Radarsystemen. Dabei analysieren die Wissenschaftler die Leistungsfähigkeit verschiedener Konzepte und suchen Lösungsansätze für erwartete technische Herausforderungen.

Unsere moderne Gesellschaft verlässt sich immer mehr auf die Nutzung des erdnahen Weltraums, beispielsweise für satellitenbasierte Kommunikationsdienste und Erdbeobachtung. Unter anderem als Folge dieser intensiven Nutzung steigt die Anzahl von sogenannten Weltraumtrümmern - auch als *space debris* bezeichnet - immer weiter an. Zu Weltraumtrümmern gehören ausgediente Oberstufen von Trägerraketen, mittlerweile nicht mehr funktionsfähige Satelliten, Rückstände von Raketentreibstoffen und kleine Teile, die sich von Satelliten gelöst haben. Insbesondere die Kollision zwischen den zwei Satelliten Iridium 33 und Cosmos-2251 im Jahr 2009 und die absichtliche Zerstörung eines Satelliten im Jahr 2007 haben stark zur Population der Weltraumtrümmer beigetragen.

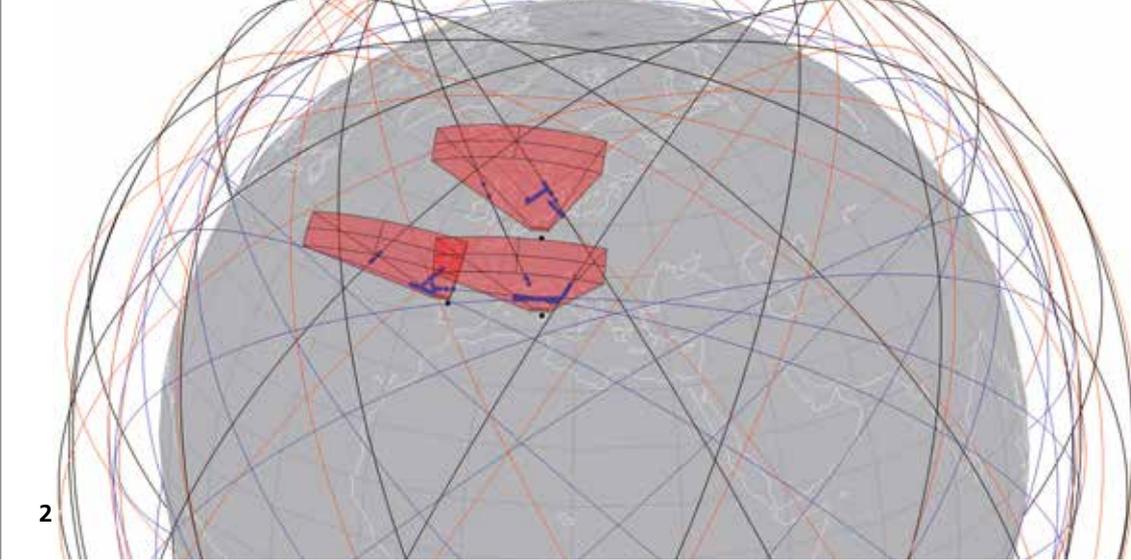
Weltraumtrümmer stellen für die Nutzung des erdnahen Weltraums ein Risiko dar, denn: Eine Kollision eines Trümmerteils mit einem Satelliten kann - aufgrund der hohen Geschwindigkeiten selbst bei relativ kleinen Trümmerteilen - zur Zerstörung des Satelliten führen. Unter anderem wegen dieser Problematik ist in den letzten Jahren klar geworden, wie wichtig Kenntnisse über die Population von Satelliten und Trümmern sind. Dieses Wissen kann genutzt werden,

um Ausweichmanöver von Satelliten zu planen, wodurch das Risiko einer Kollision gesenkt wird.

Vor diesem Hintergrund hat das DLR Raumfahrtmanagement (DLR-RFM) das Fraunhofer FHR damit beauftragt, das System GESTRA zu entwickeln. Durch GESTRA soll in Deutschland erstmals die Fähigkeit geschaffen werden, radarbasiert in großem Maßstab den erdnahen Weltraum (erdnahe Umlaufbahnen) nach Trümmerteilen und Satelliten sowohl abzusuchen als auch die Bahnen entdeckter Objekte zu bestimmen.

Am Fraunhofer FHR denken die Wissenschaftler über das System GESTRA hinaus an eine Zukunft, in der ein Netzwerk von Radarsystemen gemeinsam den erdnahen Weltraum nach Trümmerteilen und Satelliten absucht und die Bahnen dieser Objekte bestimmt. Dies geschieht in dem vom DLR-RFM geförderten und bis in das Jahr 2019 laufenden Vorhaben »Ein Netzwerk von Radaren mit Gruppenantenne für die Weltraumüberwachung«.

Dabei untersuchen die Wissenschaftler verschiedene, übergeordnete Fragestellungen: Ist es sinnvoll, die Radarsysteme des Netzwerks in unmittelbarer Nähe anzuordnen, also in einem Abstand in der Größenordnung von einigen 100 Metern? Solch ein Netzwerk bezeichnen wir als ein »lokales Radarnetzwerk«. Oder ist es vorteilhafter, die Radarsysteme über mehrere 100 km oder gar 1.000 km zu verteilen? Darunter verstehen die Forscher ein »Netzwerk mittlerer Ausdehnung«. Beide Ansätze weisen ihre eigenen Vorteile auf: In einem lokalen Netzwerk können aufgrund der räumlichen Nähe die Daten der Empfänger besonders elegant miteinander kombi-



niert werden, um so auch in Hinblick auf die Rückstreuung von Radarsignalen besonders kleine Objekte entdecken zu können. Ein Netzwerk mittlerer Ausdehnung wird den Vorteil bieten, Daten aus verschiedenen Blickrichtungen zu erlangen. Durch die Kombination dieser Daten ist zu erwarten, dass Positionen und Geschwindigkeiten genauer vermessen werden können.

Um diese unterschiedlichen Stärken miteinander zu vergleichen, führen die Forscher Performanz-Untersuchungen durch. Dabei modellieren sie zum einen die radartypischen Kenngrößen eines Radarnetzwerks, wie Entdeckungswahrscheinlichkeiten und Schätzgenauigkeiten. Letztendlich entscheidend ist aber die Fähigkeit zur Bahnbestimmung. Deswegen ist es Teil des Vorhabens, simulativ für verschiedene Konzepte von Radarnetzwerken die resultierende Genauigkeit der Bahnbestimmung zu ermitteln, um so die vielversprechendsten Ansätze zu identifizieren.

Abbildung 1 zeigt ein Ergebnis dieser Performanz-Untersuchungen. Dargestellt wird, wie viel besser ein Objekt in einer Höhe von 700 km - unter bestimmten Annahmen - durch ein beispielhaftes Radarnetzwerk entdeckt wird, wenn zusätzlich zu den drei monostatischen Signalpfaden auch bistatische Signalpfade ausgewertet werden. Die Standorte der einzelnen Radarsysteme im Netzwerk sind durch schwarze Punkte markiert. Abbildung 2 stellt den Abdeckungsbereich desselben Netzwerks dar und simulierte Zielentdeckungen, die als Eingangsgrößen für eine Bahnbestimmung dienen.

Über die Performanz-Untersuchung hinaus, führen die Wissenschaftler auch erste Untersuchungen bezüglich einer technischen Umsetzung und möglicher dabei auftretenden technischen Herausforderungen durch. Insbesondere betrachten sie die Synchronisation der Teilsysteme, die Gestaltung der Datenverarbeitung im lokalen Netzwerk und die Umsetzung der Auswertung von bistatischen Signalpfaden in einem Netzwerk mittlerer Ausdehnung.

1 *Verkleinerung des Radarrückstreuquerschnitts (in dB), ab dem Objekte detektierbar werden, durch die zusätzliche Verwendung von bistatischen Signalpfaden in dem dargestellten Netzwerk.*

2 *Sende-Sichtfelder, Orbits und Detektionspunkte für drei beispielhaft gewählte Objekte.*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Dr.-Ing.

Robert Kohlleppe

Tel. +49 228 9435-392

robert.kohlleppe@

fhr.fraunhofer.de



DEMONSTRATION EINES HALBLEITER-BASIERTEN NAVIGATIONSRADARS

71% der Erdoberfläche ist von Wasser bedeckt und darüber wird 90% des weltweiten Warenverkehrs abgewickelt. Daraus resultiert die Notwendigkeit verlässlicher Fernerkundungsfähigkeiten als Grundlage für die Sicherheit und Koexistenz vielfältiger maritimer Aktivitäten. Vor diesem Hintergrund wurden am Fraunhofer FHR neue Ansätze in der maritimen Radartechnik untersucht und weiterentwickelt.

In nicht-kooperativen Situationen oder in Notfällen hängt die Kenntnis der maritimen Lage hauptsächlich von Fernerkundungstechnologien ab. Das maritime Navigationsradar ist hier von besonderer Bedeutung, um echtzeitliche Informationen der Schiffsumgebung zu generieren und dadurch die Sicherheit auf hoher See zu verbessern.

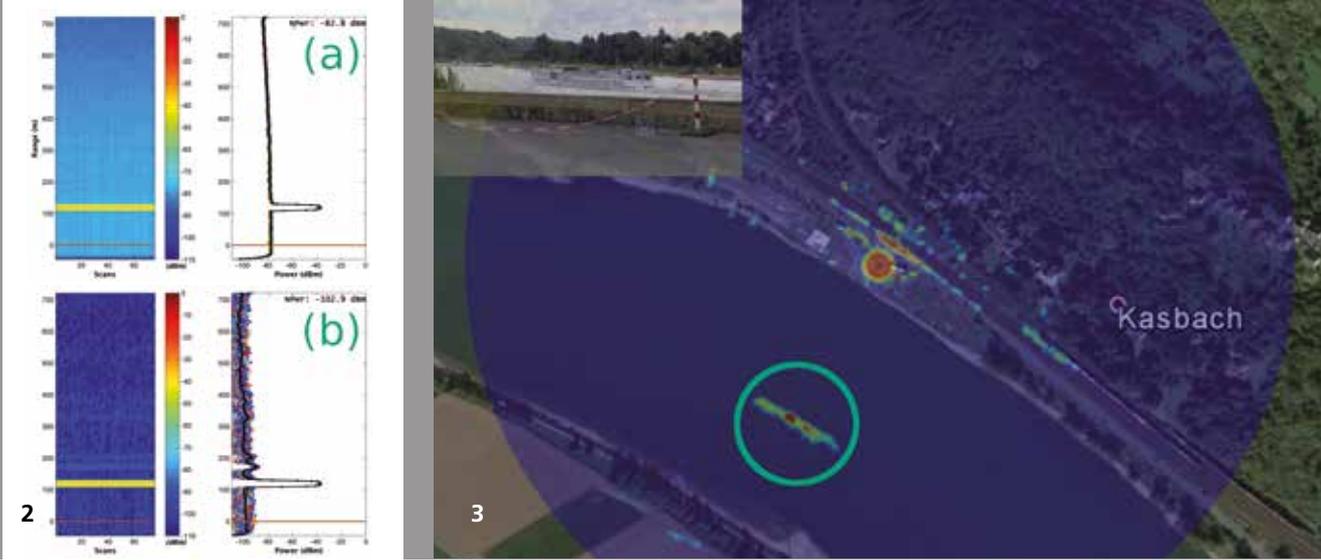
S-Band-Radare mit hoher Reichweite verwenden meistens immer noch Magnetron-basierte Architekturen. Obwohl diese Architekturen über viele Jahrzehnte gereift und daher sehr verlässlich sind, basieren diese Einheiten normalerweise auf der inkohärenten Verarbeitung von Hochfrequenzpulsen mit einer Spitzenleistung von mehreren Kilowatt und benötigen eine jährliche Wartung. Andererseits können mit Halbleiterverstärkern Wellenformen mit kontrollierter Phase erzeugt werden, was eine effektivere Signalverarbeitung ermöglicht und geringere Emissionswerte mit sich bringt.

Um die Tauglichkeit des Halbleiteransatzes nachzuweisen, hat das Fraunhofer FHR einen transportablen S-band Radar-

demonstrator entwickelt. Die Herausforderung liegt dabei im Wesentlichen in der Betriebsfrequenz von ungefähr 3 GHz und der geforderten Winkelauflösung. Diese hat zur Folge, dass eine Antenne mit beachtlichen geometrischen Abmessungen und Gewicht nötig ist, was wiederum aufwendige logistische und sicherheitstechnische Aspekte mit sich bringt. Mit einem Antennengewicht von 260 kg (kommerzielle Antenne mit einer Länge von 12 Fuß plus Getriebeeinheit inklusive Elektromotor) und der Notwendigkeit eines Elektrogenerators (ca. 150 kg) wurde als Installationsbasis die Verwendung eines Anhängers als praktikabelste Lösung identifiziert (Abb. 1).

Das Ziel, Untersuchungen unter realen Betriebsbedingungen durchführen zu können, hat die Wahl zwischen diversen Hardwareoptionen und Datenverarbeitungsstrategien beeinflusst. Der derzeitige Demonstrator des Pulsradars verwendet eine kohärente Architektur mit Basisbandabtastung und modularer und konfigurierbarer Verarbeitungskette. Obwohl spezifische Kalibrationstechniken von Nöten sind, um Empfindlichkeitsverlusten wegen Asymmetrien zwischen den Basisbandkanälen entgegenzuwirken, profitiert die direkte Basisbandverarbeitung von der Möglichkeit einer höheren Überabtastung mit Rauschformung ohne Verwendung eines kostenintensiven und energiehungrigen Analog-zu-Digital-Wandlers mit hoher Abtastrate. Der digitale Kern basiert auf einer neuartigen System-on-Chip-Lösung (Xilinx Zynq SoC), die im selben IC sowohl ein FPGA als auch einen Prozessorkern zur Verfügung stellt.

Auf der Hardware-Ebene wurden spezielle Strategien, mit dem Ziel die Empfängerempfindlichkeit zu erhöhen, angewandt. So



wird die Polarität der emittierten Wellenformen von Puls zu Puls alternierend gewechselt. Da die im Empfänger selbst erzeugten, elektronischen Störungen (in erster Näherung) unabhängig von der Polarität des Empfangssignals sind (im Gegensatz zu Ziel- und Clutter-Echos), werden diese Störungen deutlich durch die digitale Vorzeichenkompensation und Summenbildung zweier aufeinanderfolgender Pulsechos reduziert. Diese Technik ist auch als antipodische Modulation bekannt (Abb. 2).

Im August 2016 fand eine Messkampagne in Kasbach am Rhein statt, um kleine und große Schiffe auf dem fließenden Gewässer zu detektieren. Da nur eine sehr begrenzte Sendeleistung von ungefähr 2 Watt zur Verfügung stand, wurde ein Nahbereichsmodus selektiert, mit dem Radarkarten bis zu einer Entfernung von ca. 500 m generiert werden konnten. Ein Beispiel eines finalen Prozessierungsergebnisses ist in Abbildung 3 zu sehen. Sowohl die Rauschformung als auch die antipodische Modulation haben sich als essentielle Verarbeitungsschritte erwiesen, um die Qualität der Messdaten zu verbessern. Ziele und Umgebungsreflexionen können eindeutig identifiziert werden. Clutter-Reflexionen (z. B. Vegetation und Straßen) wurden nicht maskiert und ihre Positionen korrelieren gut mit entsprechenden Details in geographischen Karten. Dies trifft beispielsweise auch auf die Echos eines abgestellten Güterzugs in westlicher Richtung zu.

Anhand dieser erfolgreichen Messkampagne wurde die Flexibilität und Tauglichkeit des halbleiter-basierten Navigationsradardemonstrators nachgewiesen. In naher Zukunft sind weitere Entwicklungsarbeiten geplant, um Radarperformance und Möglichkeiten der Informationsgewinnung weiterhin zu verbessern.

- 1 *Transportabler S-band Radardemonstrator mit Getriebeeinheit und Elektrogenerator.*
- 2 *Empfängerempfindlichkeit vor (a) und nach (b) antipodischer Modulation.*
- 3 *Luftbild mit überlagerten Prozessierungsergebnissen.*



Dr.
Stefano Turso
Tel. +49 228 9435-136
stefano.turso@
fhr.fraunhofer.de



ANTENNENENTWICKLUNG FÜR EIN NEUARTIGES SEENOTRETTUNGSSYSTEM

Mit herkömmlichen Navigationsradarsystemen ist es in der Regel nicht möglich, kleine Objekte auf einer aufgewühlten Wasseroberfläche zu entdecken. Eine modulare Erweiterung existierender Radarsysteme und die Verwendung kostengünstiger Transponder sollen Abhilfe schaffen.

Kleine, auf der Meeresoberfläche treibende Streuobjekte wie z. B. Wassersportler, Rettungsinseln oder Schiffbrüchige können mit zunehmendem Wellengang immer schlechter bis gar nicht von herkömmlichen Schiffsnavigationsradaren detektiert werden. Die Radarreflexionen dieser Objekte sind geringer oder nur geringfügig stärker als die Reflexionen von der unebenen Wasseroberfläche (See-Clutter). In dem öffentlich geförderten Verbundprojekt SEERAD (Seenotrettungssystem basierend auf einem störungsarmen Radar) wird ein neuartiges Seenotrettungssystem erforscht, das die Radarortung von Menschen und Rettungsmitteln im Wasser erlaubt (s. Abb. 1).

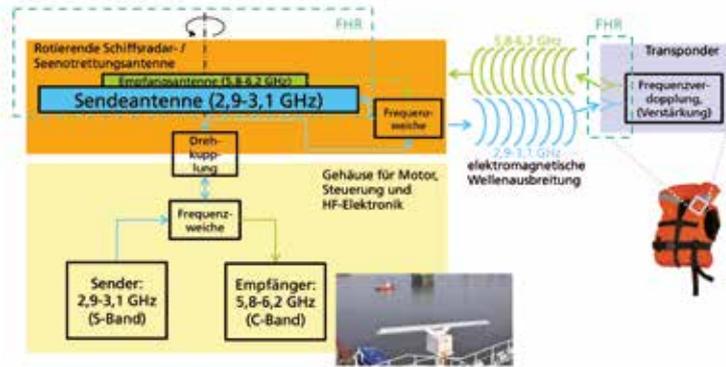
Hierzu werden kompakte und kostengünstige Transponder entwickelt, die ein frequenzverdoppeltes Radarsignal zurücksenden, das von einem ebenfalls zu entwickelnden harmonischen Radarsystem empfangen und ausgewertet wird. Dieses Signal wird nicht von den ansonsten typischen Störungen durch Reflexionen an Wellen überlagert, weshalb sämtliche mit Transpondern ausgestattete Objekte sichtbar sind.

In dem Förderprojekt ist die Möglichkeit der Integration des harmonischen Radarsystems mit vorhandenen S-Band Navigationssystemen des Industriepartners ein wichtiger

Aspekt. So sollen sich das konventionelle Navigationsradar und das harmonische Radar eine gemeinsame Antenne teilen, weshalb der Sendefrequenzbereich beider Systeme innerhalb des S-Bands übereinstimmen muss. Das harmonische Radar soll dann die frequenzverdoppelten Streusignale der Transponder bei der doppelten Frequenz im C-Band empfangen, während das herkömmliche Radar weiterhin die linearen Reflexionssignale im S-Band empfängt. Wegen der Nutzung einer gemeinsamen Radarantenne müssen beide Systeme die gleiche Sendepolarisation nutzen. Typischerweise arbeiten Navigationsradarsysteme mit horizontaler Polarisation. Diese ist allerdings für die Detektion von Objekten, die nur geringfügig aus dem Wasser herausragen, nicht sehr gut geeignet. Daher wurde als Empfangspolarisation des Seenotrettungsradars die vertikale Polarisation festgelegt.

Wie in dem Blockdiagramm in Abbildung 2 dargestellt, bestehen die Aufgaben des Fraunhofer FHR in der Untersuchung neuartiger Antennenstrukturen für die Transponder und das erweiterte Navigationsradar. Die Arbeiten zu den Transponderantennen sind weitestgehend abgeschlossen und haben zu einem Transponder mit Abmessungen ähnlich einer Kreditkarte geführt. Die Integrierbarkeit in herkömmliche Rettungswesten in trockener und feuchter Umgebung wurde simulatorisch und experimentell erfolgreich untersucht. Dabei wurde auch, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, die Detektierbarkeit aus allen Raumrichtungen inklusive möglicher Abschattungen betrachtet.

Schiffsnavigationsradare nutzen in der Regel mechanisch rotierende Balkenantennen, welche auf geschlitzten Rechteck-



2



3

hohlleitern basieren. Im S-Band haben diese Antennen eine Länge von ungefähr vier Metern und müssen den Umweltbedingungen auf hoher See standhalten. Die besondere Herausforderung besteht für das Fraunhofer FHR darin, eine kompakte Antenne zu entwickeln, welche die gleichen hochfrequenztechnischen und mechanischen Anforderungen erfüllt wie eine herkömmliche Schiffsradarantenne, jedoch zusätzlich auch bei der doppelten Sendefrequenz mit einer anderen Polarisation empfängt. Eine erste verkürzte Demonstratorantenne wurde bereits erfolgreich aufgebaut. Messtechnische Untersuchungen in einer der Antennenmesskammern des Fraunhofer FHR und der Betrieb an einem ersten Demonstrator der harmonischen Radarhardware haben die Tauglichkeit des gewählten Ansatzes bestätigt.

Der nächste Schritt besteht nun im Aufbau einer kombinierten Navigations- und Seenotrettungsantenne mit voller Länge, so dass die von den internationalen Schifffahrtvorschriften geforderte geringe Hauptkeulenbreite in der horizontalen Ebene erreicht wird. Diese Antenne soll nach ihrer Fertigstellung und Charakterisierung dem Industriepartner für ausführliche Messkampagnen an der Ostsee zur Verfügung gestellt werden.

Das Projekt wird im Zuge der Bekanntmachung »Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme« des BMBF im Rahmen des Programms »Forschung für die zivile Sicherheit« der Bundesregierung gefördert. Es wird durch die Fachhochschule Aachen geleitet und die Firma Raytheon Anschütz GmbH fungiert als Industriepartner. Der Fachverband Seenot-Rettungsmittel e.V. ist assoziierter Partner.

1 *Vision eines zukünftigen Seenotrettungsszenarios: Der in der Rettungsweste integrierte Transponder ermöglicht die Detektion mit einem harmonischen Radar.*

2 *Blockdiagramm der Komponenten des Seenotrettungssystems. Die Verantwortlichkeiten des Fraunhofer FHR sind gekennzeichnet.*

3 *Experimentelle Untersuchung der Sende- und Empfangseigenschaften der Transponderantennen.*



Dr.-Ing.
Thomas Bertuch
Tel. +49 228 9435-561
thomas.bertuch@
fhr.fraunhofer.de



UWB-RADAR ZUR ERKENNUNG VON PILZBEFALL BEI WEINREBEN

Mit einem neuen UWB-Radarsensor will das Fraunhofer FHR die frühzeitige Erkennung von Stamm-Erkrankungen bei Rebstöcken verbessern. Der Sensor soll zusammen mit weiteren aktuell erhältlichen Sensoren auf der mobilen Multisensor-Plattform von Televitis integriert werden, einer F&E-Gruppe an der Universität von La Rioja und dem *Institute of Grapevine and Wine Sciences* (ICVV) in Spanien. Televitis treibt die Erforschung neuer Technologien für Anwendungen im Präzisions-Weinbau voran und entwickelt die Roboterplattform für das regelmäßige Monitoring von Weinanbaugebieten.

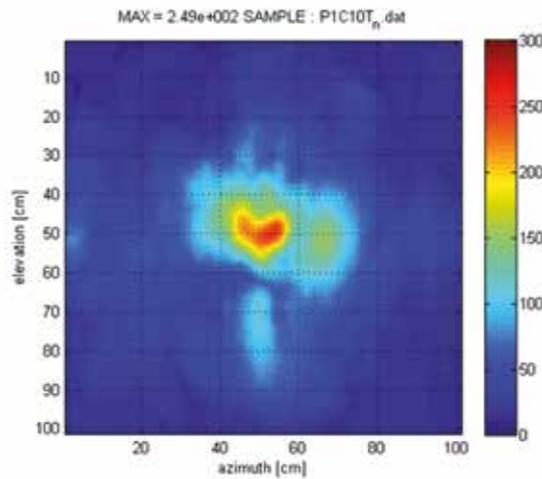
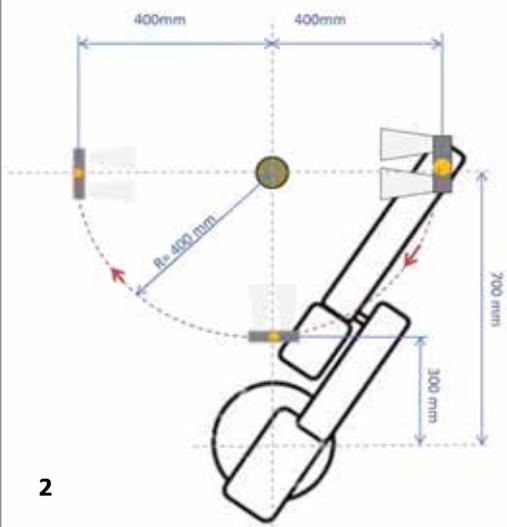
Erkrankungen des Stammes haben sich in den letzten 30 Jahren zu einer der zerstörerischsten Krankheiten von Weinreben entwickelt und sind eine schnell wachsende Bedrohung in Weinanbaugebieten weltweit. Einigen Studien zufolge beträgt der wirtschaftliche Schaden, der jährlich durch den Austausch abgestorbener Weinstöcke verursacht wird, rund 1.5 Milliarden Euro.

Rebstammerkrankungen bedrohen die wirtschaftliche Existenz vieler Weinbauern. Ihre Pathogene greifen die lebensnotwendigen Organe der Pflanzen an und führen so über kurz oder lang zu deren Absterben. Auslöser sind Pilze, die sich in Lebenszyklus und Epidemiologie alle sehr ähnlich sind. Die Erkrankungen verlaufen zunächst versteckt und entwickeln ihre Symptome normalerweise schleichend über mehrere Jahre hinweg, was sie schwer erkennbar macht. Haupteintrittspforten für die Pilzsporen sind Wunden, die beim Rückschnitt der

Reben entstehen. Die Erreger können aber auch über andere mechanisch zugeführte oder durch Frost verursachte Wunden in die Pflanze eindringen. Dort wachsen sie und zersetzen das Holz, so dass die Pflanze langsam eingeht. Die im Totholz wachsenden Fruchtkörper und ihre Sporen werden von Wasser freigesetzt und mit dem Wind verbreitet und können so neue Wunden infizieren. Die Symptome zeichnen sich in der Regel durch abschnittsweise oder zentrale Nekrosen im Holz aus, erkennbar an braunen Zonen und Fäulnis. An den Blättern zeigt sich die Erkrankung durch Verfärbungen und Vertrocknen, was auch schlagartig auftreten kann. Die akute Erkrankung ist nicht behandelbar, so dass den Weinbauern als einzige Maßnahme das Entfernen und Verbrennen infizierter Pflanzen bleibt, um eine Verbreitung im Weinberg hoffentlich zu verhindern.

Frühzeitige Diagnose mit Radar

Radarsensoren können von außen Informationen über den Zustand im Inneren der Pflanzen gewinnen. Sie könnten also helfen, die Krankheit frühzeitig zu detektieren und zwischen gesunden und kranken Pflanzen im Weinberg zu unterscheiden. Das Fraunhofer FHR hat in einem früheren Projekt bereits einen Radarsensor für das Nutzpflanzen-Monitoring, inklusive der Einschätzung von Wassergehalt und Biomasse der Pflanzen, entwickelt. Diesen haben die Wissenschaftler an den Einsatz zur Erkennung der Rebstammerkrankung angepasst und in einer Vorstudie erste Tests durchgeführt. Dazu haben sie von der Universität La Rioja Proben von frisch geschnittenen Weinpflanzen erhalten, die unterschiedliche Stadien der Stammerkrankung aufweisen.



2

Ziel des Projekts ist eine mobile Plattform zum regelmäßigen Monitoring von Weinanbau-gebieten. Diese soll Informationen des Radarsensors, von optischen, multispektralen und hyperspektralen Sensoren sowie aus NDVI-Satelliten-Daten auswerten.

Um die Geometrie der Datenerfassung durch die sich bewegende TELEVITIS-Plattform auch bei den initialen Labortests nachstellen zu können, haben die FHR-Ingenieure einen in sechs Achsen beweglichen Roboterarm genutzt. So konnten sie Stripmap- und Spotlight-Aufnahmemodi in ein- und zweidimensionalen Abtastrastern testen. Mit dem flexiblen Roboterarm konnten auch die Polarisationsvielfalt nachgeahmt und weitere, auf Polarimetrie beruhende Eigenschaften getestet werden.

Nach den vielversprechenden Labortests, haben die Wissenschaftler ihren Radarsensor im November 2017 bei ersten Testmessungen an lebenden Pflanzen in mehreren Weinbergen im spanischen Logroño durchgeführt.

3D-Analysen und Computersimulation optimieren die Sensorperformance

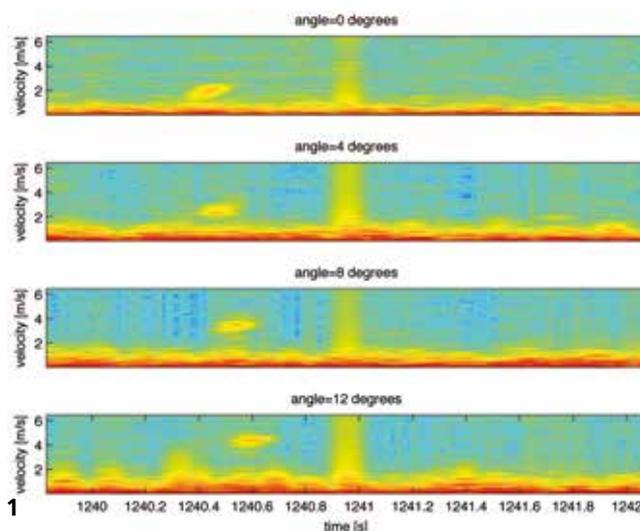
Um die Stammerkrankungen an den Rebstöcken möglichst früh zu erkennen und einer Ausbreitung im Weinberg entgegenzuwirken, verfolgt das Fraunhofer FHR unterschiedliche Forschungsansätze zur Verbesserung des UWB-Radarsensors. Dazu gehören dichtere Aufnahmeraster, die auf zirkulären SAR-Näherungswerten bei unterschiedlichen Höhen beruhen, sowie bildgebende Methoden mittels inverser Modellierung. Der so erzeugte dreidimensionale Blickwinkel soll die konstitutiven Parameter innerhalb der Stämme quantitativ und räumlich rekonstruieren. Zudem können auf diese Weise zusammen mit der photogrammetrischen Rekonstruktion der optischen Kameras auf der Plattform 3D-Modelle jedes Rebstocks erstellt werden. Diese können wiederum in die SAR-Prozessierung einbezogen werden und so die inverse Modellierung weiter verbessern.

Darüber hinaus wollen die Wissenschaftler Computer-Simulationen zum Verlauf der Krankheit innerhalb des Rebstamms erstellen. Dazu sollen möglichst viele Proben mit unterschiedlichen Krankheitsstadien analysiert werden. Dies führt nicht nur zu einem besseren Verständnis des Krankheitsverlaufs. Mit exakten Simulationen kann auch die Empfindlichkeit des Radarsensors erhöht werden, um dieses große Problem im Weinanbau möglichst frühzeitig zu detektieren.

- 1 *Rebstock-Proben aus einem Weinberg mit unterschiedlichen Nekrose-Stadien.*
- 2 *Schematische Darstellung der Datenerhebung mit Hilfe des Roboterarms samt Beispiel für die damit nach der Fokussierung erhaltenen Daten.*



Dr.-Ing.
 Fernando Rial Villar
 Tel. +49 228 9435-770
 fernando.rial@
 fhr.fraunhofer.de



COLORS: AUF DEM WEG ZUM VOGELSCHUTZ IN WINDPARKS

In Zeiten des Klimawandels rücken erneuerbare Energien, insbesondere die Windenergie immer weiter in den Vordergrund. Im Rahmen des Projekts COLORS wurde die Eignung eines Radarsensors als brückenschlagende Technologie zwischen rentabler Nutzung von Windkraft und gesetzlichem Vogelschutz untersucht.

Hintergrund und Ziele der Studie

Ziel der Studie war die Detektion von Vögeln in direkter Umgebung von Windenergieanlagen (WEA) sowie die Analyse ihrer Bewegung, um basierend darauf eine Gefährdungsanalyse durchführen zu können. Bei einer direkten Gefahr für den Vogel könnte ein solches Radar ein entsprechendes Signal an das Steuernetzwerk des Windparks senden, wodurch der Betrieb betroffener Anlagen unterbunden werden kann.

Hintergrund der Arbeiten sind Gerichtsurteile ähnlich dem Beschluss des Verwaltungsgerichts Minden [VG Minden, 08.08.2016 – 1 L 1155/16]. Solche beinhalten die nachträgliche Betriebseinschränkung im Sinne einer zeitweisen Abschaltung einzelner WEA sofern ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko für artgeschützte Vögel besteht. Im zitierten Fall handelt es sich um eine Schwarzstorchpopulation, die sich in unmittelbarer Umgebung von WEA angesiedelt hat. Das Gericht verweist darauf, »dass kein milderes Mittel, welches den Überlebensschutz des Schwarzstorches in gleicher Weise gewährleisten würde, ersichtlich sei«. Das Projekt COLORS stellt einen ersten wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem

solchen Mittel dar.

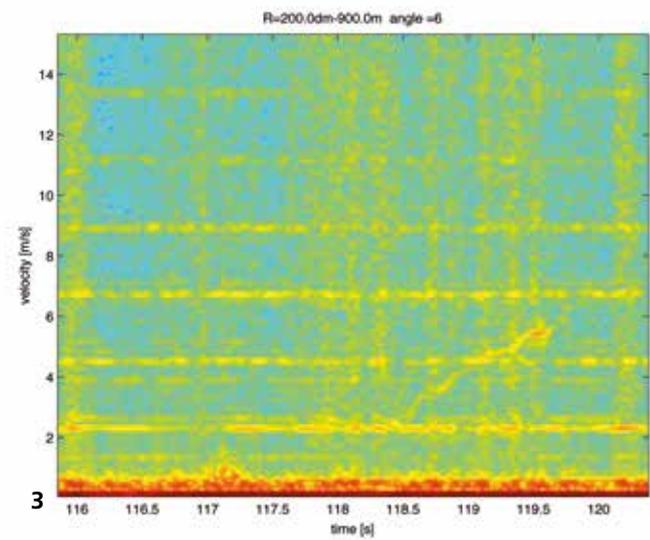
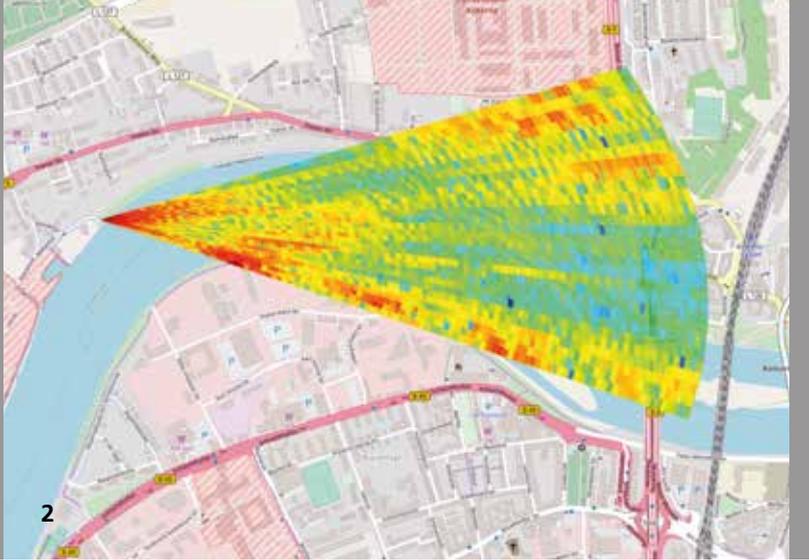
Vorarbeiten

Die zur Umsetzung eines entsprechenden Sensors erforderlichen Systemparameter wurden im Rahmen einer im Vorfeld durchgeführten Machbarkeitsstudie aus 2014 ermittelt. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für die gegebenen Anforderungen ein Radar im Ku-Band mit 20 W Sendeleistung geeignet ist. Dabei wurde auch die Aussicht auf eine spätere Genehmigung des Systems durch die Bundesnetzagentur berücksichtigt. Ein Kernergebnis der Machbarkeitsstudie ist die Erfordernis einer hohen Update-Rate der Antenne, um eine möglichst große räumliche Überwachung des Windparks zu gewährleisten. Im Rahmen der COLORS-Studie lag daher u. a. ein Schwerpunkt auf der detaillierten Untersuchung eines elektronisch schwenkenden Antennenkonzepts.

Experimentelle Untersuchungen

Die Funktionalität des entwickelten Demonstrator-Systems wurde im Rahmen von Experimentalmessungen überprüft. Erste Messungen erfolgten innerhalb eines Windparks, um die Auswirkungen der WEA zu untersuchen. Da während dieser Messungen kein geeigneter Vogel innerhalb des Windparks zur Verfügung stand, diente stattdessen ein Hexacopter als kalibriertes Messobjekt.

Dieser weist, vergleichbar mit einem Vogel, eine über die Zeit variierende Flugbahn auf. Vermessen wurde ein Bereich von 40° Ausdehnung, in welchem sowohl WEA als auch offene



Felder lagen. Trotz der Reflexionen, die durch die WEA-Rotoren im Windpark entstanden, konnte der Hexacopter detektiert und sein Bewegungsverlauf gemessen werden. Abbildung 1 veranschaulicht die Kapazitäten des Radar-Demonstrators. Sie zeigt einen Diagonalfly des Copters im Windpark. Die Bewegung ist gekennzeichnet durch eine radiale Beschleunigung bei gleichzeitiger »Wanderung« durch die Antennenkeulen. Sowohl laterale als auch radiale Bewegungen können somit von diesem Radar registriert werden. Die vertikale Linie in allen Teilgrafiken der Abbildung 3 zeigt die kurzzeitige Störung durch einen WEA-Rotor in unmittelbarer Umgebung des Hexacopters. Diese kann aufgrund der periodischen Bewegung der Rotoren geeignet prädiert werden.

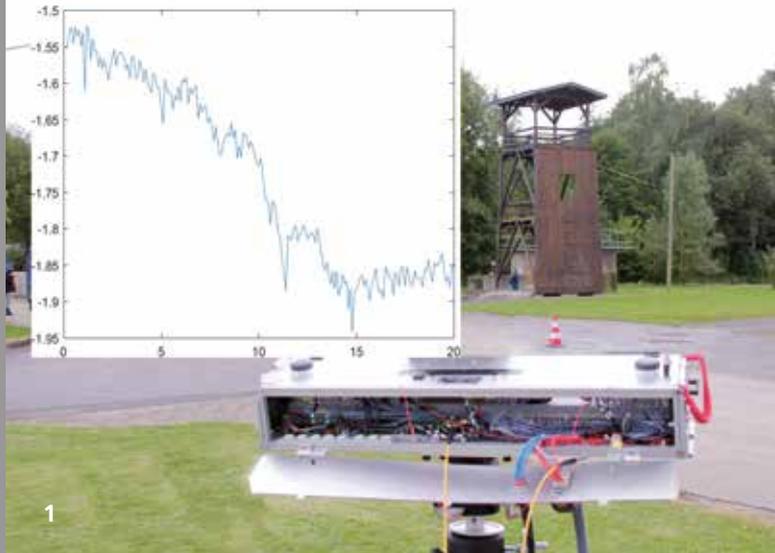
Weitere Messungen an einer Staustufe der Mosel in Koblenz (vgl. Abb. 2) ermöglichten darüber hinaus die Vermessung eines Kormorans, welcher bzgl. seiner Körpergröße mit dem Storch aus [VG Minden, 08.08.2016 – 1 L 1155/16] vergleichbar ist. Während der Messung startete der Vogel in ca. 500 m Entfernung gerade seinen Flug. Die ansteigende Geschwindigkeit ist in Abb. 4, dem Doppler-Spektrogramm einer einzelnen Raumrichtung, deutlich erkennbar.

Ausblick

Für eine zukünftige Weiterentwicklung des Demonstrator-Systems sind Langzeituntersuchungen erforderlich, die eine Bestimmung des Einflusses der Windenergieanlagen bei unterschiedlichen Wetterlagen erlauben. Da sowohl die Geschwindigkeit als auch die Ausrichtung der WEA von äußeren Umwelteinflüssen bestimmt werden, konnte in den ersten Testmessungen nicht jedes mögliche Szenario untersucht werden. Darüber hinaus sind Untersuchungen geplant, die Signalform hinsichtlich einer eventuellen zusätzlichen Microdoppler-Analyse des Flügelschlags zu optimieren.

- 1 *Detektion eines quer fliegenden Hexacopters im Windpark über mehrere nebeneinanderliegende Antennenkeulen.*
- 2 *Experimente an der Mosel in Koblenz.*
- 3 *Detektion eines Kormorans vor dem Hintergrund des durch die Fließbewegung der Mosel erzeugten dynamischen Clutters.*

Dipl.-Ing.
 Christoph Wasserzier
 Tel. +49 228 9435-228
 christoph.wasserzier@
 fhr.fraunhofer.de



RAWIS SCHÜTZT RETTUNGSKRÄFTE BEI KATASTROPHEN

Jede Minute zählt, wenn verschüttete und schwer verletzte Personen bei Katastrophen gesucht und geborgen werden müssen. RAWIS unterstützt bei diesen hochgefährlichen Einsätzen die Rettungskräfte, indem es die Einsatzstelle lückenlos überwacht und sowohl rechtzeitig als auch individuell warnt, bevor es zum Einsturz von Trümmern kommt.

Katastrophenszenario

Bei Katastrophen muss es schnell gehen, denn oftmals sind Menschenleben in Gefahr. Deshalb können in unübersichtlichen, sich ständig ändernden Einsatzlagen Rettungskräfte selbst in große Gefahr geraten. Beschädigte Wände, herunterhängende Dachstühle und Trümmerstücke jeglicher Art können ins Kippen oder Rutschen kommen, so dass im schlimmsten Fall Einsatzkräfte selbst zu Schaden kommen. Durch das Abtragen von Trümmern und bei der Suche nach Verschütteten ändert sich zudem permanent die Gefahrenlage, wodurch innerhalb kürzester Zeit vermeintlich stabile Trümmerteile instabil werden und einstürzen können.

Projekt RAWIS

Zum Schutz der Rettungskräfte bei Katastropheneinsätzen wurde im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt RAWIS (Radar- Warn- und Informationssystem für Anwendungen im Katastrophenschutz) ein Experimentalsystem erforscht und aufgebaut, welches die Einsatzstelle lückenlos überwacht und durch hochgenaue Mes-

sungen und individuelle personenbezogene Warnungen die Rettungskräfte bei der Gefährdungsbeurteilung unterstützt.

RAWIS besteht aus vier Säulen: angefangen vom 3D-MIMO-Hauptradar, welches großflächig die Einsatzstelle dreidimensional überwacht, über kleine akkubetriebene Unterstützungsradare, die punktgenau abgeschattete Trümmerteile überwachen, bis hin zu einem Funkortungssystem, welches jede einzelne Einsatzkraft sicher lokalisiert und dadurch individuell warnt, sowie einer Leitstelle, bei der alle Informationen zusammenfließen und graphisch dargestellt werden.

Radarsysteme

Das bildgebende Hauptradar ist für einen typischen Entfernungsbereich von wenigen Metern bis hin zu mehreren hundert Metern ausgelegt. Bei Testmessungen auf dem THW-Übungsgelände in Handorf konnten Bewegungen mit einer Genauigkeit von 30 μm sicher erkannt werden. Dabei wird die gesamte Einsatzstelle mit einer Messrate von bis zu 1 kHz überwacht. Speziell hierfür am Fraunhofer FHR entwickelte Antennen in SIW-Technologie beleuchten großflächig die Einsatzstelle, um sämtliche Bewegungen zu erfassen. Ausgeklügelte Methoden der Signalprozessierung garantieren, dass sämtliche irrelevante Bewegungen, wie z. B. verursacht durch Bergefahrzeuge, Rettungskräfte, Suchhunde oder sich im Wind bewegende Bäume, sicher erkannt und herausgefiltert werden. Zur Reduktion von Gewicht, Größe und Kosten wurde das MIMO-Prinzip angewandt, welches mittels eines stark ausgedünnten 2D-MIMO-Arrays die Einsatzstelle dreidimensional überwacht. Das MIMO-Array ist dabei aus einzelnen



Sende- und Empfangsmodulen aufgebaut, so dass es beliebig erweiterbar ist, um beispielsweise die räumliche Auflösung für andere Einsatzszenarien zu erhöhen. Implementierte Methoden des »Compressive Sensing« garantieren sogar die Einsatzfähigkeit des MIMO-Systems auch dann, wenn durch die rauen Bedingungen während eines Einsatzes einzelne Antennen oder Module ausfallen sollten.

Die Unterstützungsradare dienen der Überwachung von Trümmerbewegungen, die für das Hauptradar in abgeschatteten und somit nicht einsehbaren Bereichen liegen. Die kameragroßen Sensoren werden durch die Helfer an den Einsatzort verbracht und dort auf potenziell gefährliche Trümmerteile ausgerichtet. Wird eine Bewegung oder auffällige Schwingung im Erfassungsbereich (ca. 30m) erkannt, werden entsprechende Messwerte an die Leitstelle gesandt, so dass der dort eingesetzte Bausachverständige das Risikopotenzial für die Einsatzkräfte einschätzen und ggf. bei Gefahr den Bereich räumen lassen kann. Sind die notwendigen Arbeiten in diesem Einsatzbereich durch die Einsatzkräfte vorgenommen worden, kann der Sensor in andere abgeschattete Bereiche verbracht werden. Auch ist der gleichzeitige Einsatz mehrerer Unterstützungsradare möglich. Das Besondere an den Unterstützungsradaren ist die höchstpräzise Entfernungsmessung durch die Verwendung von akkubetriebenen FMCW-Radarsensoren mit Reproduzierbarkeiten im Mikrometer-Bereich. Die verwendete »state-of-the-art« Hardware, zusammen mit einer im Sensor implementierten Signalverarbeitung, demonstriert das Potenzial einer miniaturisierten radarbasierten Sensorik als Handheld-Gerät für höchst präzise messtechnische Anwendungen.

Eine Besonderheit von Radarsensoren ist dabei, dass sie durch Regen, Nebel, Schnee, Staub und Rauch hindurchschauen und zudem Tag und Nacht eingesetzt werden können, was beim Beherrschen von Katastrophen ein enormer Vorteil gegenüber anderen Technologien ist.

Verbund

Dem aus acht Partnern bestehenden RAWIS-Konsortium gehören neben dem Fraunhofer FHR auch das Technische Hilfswerk (THW), die Universität Siegen, die Ruhr-Universität Bochum, die Firma indurad und als assoziierte Partner die Bundesstadt Bonn und die Firmen Elettronica und unival an.

1 Repräsentativ für ein sich neigendes Gebäude wurde mit einer Seilwinde an einem Turm gezogen. Die Kurve zeigt für einen einzelnen Radarbildpunkt die Bewegung in Millimetern über 20 Sekunden.

2 Das kompakte Unterstützungsradar erfasst Positionsveränderungen von Trümmerteilen die nicht im Erfassungsbereich des Hauptradars liegen mit Genauigkeiten im Mikrometerbereich.

3 Typisches Einsatzszenario für RAWIS.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



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



DROHNENDETEKTION MIT MIKRODOPPLER-ANALYSE

Drohnendetektion ist mittlerweile ein fester Bestandteil von Sicherheitskonzepten. Die Bestimmung zusätzlicher Eigenschaften der Flugobjekte, wie Objektklasse, Größe und Gewichtsklasse, durch eine Mikrodoppler-Analyse erlaubt es, den Grad der Gefährdung durch die Drohne einzuschätzen.

Lufträume können mit Hilfe kompakter Radargeräte lokal auf mögliche Flugobjekte überwacht werden, um Objekte oder Veranstaltung gegen Bedrohungen durch Drohnen zu schützen. Aufgrund der empfangenen Signalstärke lassen sich zwar Rückschlüsse auf die ungefähre Größe eines detektierten Objektes ziehen, allerdings ist eine weitergehende Analyse damit nicht möglich. Wünschenswert wären weitere Informationen über die Art des detektierten Objektes (Vogel, Flächenflugzeug, Helikopter, Quadcopter, Octocopter), der Größe und der möglichen Nutzlast. Hierzu ist eine spezielle Radarbetriebsart notwendig, die mit Hilfe einer Mikrodoppler-Analyse Rückschlüsse auf die Anzahl und Drehzahl der verwendeten Propeller zulässt.

Aufbau eines Mikrodoppler-Demonstrators

Zur Erforschung dieser Mikrodoppler-Signaturen wurde der Demonstrator DroMiAn (Drohnendetektion mit Mikrodoppler-Analyse) aufgebaut, der neben der normalen Radar-Hardware zur Objektdetektion einen zusätzlichen Kanal zur Messung des Mikrodopplers bereitstellt. Dieser Demonstrator arbeitet bei einer festen Frequenz von 94 GHz. Mit Hilfe dieses Demonstrators wurden zunächst rotierende Objekte in der

Messkammer vermessen und anschließend Freifeldmessungen an einer fliegenden Drohne durchgeführt.

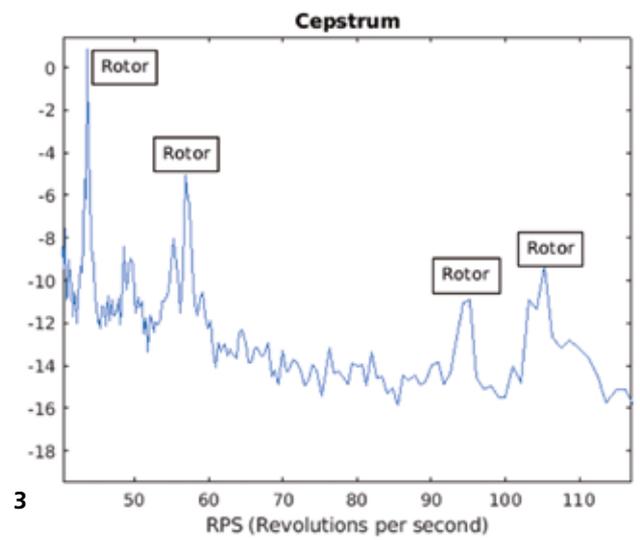
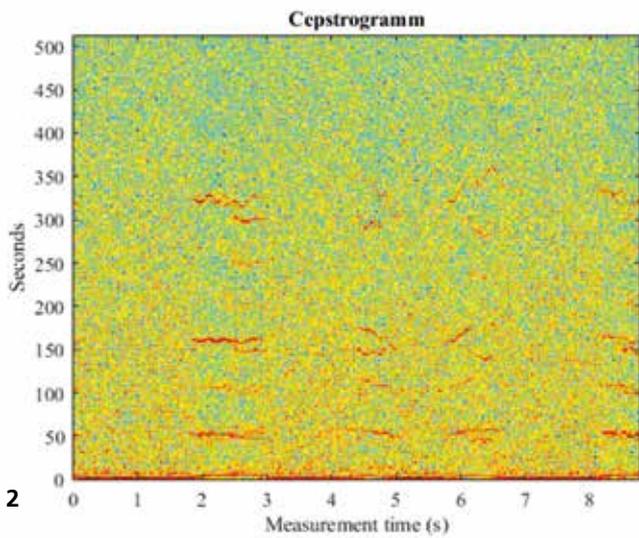
Messungen in der Messkammer

Für erste Testmessungen mit dem Demonstrator wurden rotierende Körper gleicher Länge, darunter ein Rohr und Propeller unterschiedlicher Bauart bei verschiedenen Drehzahlen und Neigungswinkeln vermessen. Aus den aufgezeichneten Daten lassen sich klar die Frequenz sowie die Bahngeschwindigkeit der rotierenden Körper bestimmen. Aus diesen beiden Werten lässt sich wiederum die Größe des Objektes berechnen.

Freifeldmessung

Bei einer ersten Testmessung im Freifeld wurde ein Quadcopter in unterschiedlichen Flugzuständen vermessen. Unter anderem stand dieser in der Luft, befand sich in langsamem Flug von links nach rechts, flog langsam auf das Radargerät zu beziehungsweise von diesem weg oder überflog es. Zusätzlich wurden Vergleichsdaten einzelner Fußgänger wie auch von Fußgängergruppen aufgezeichnet, um Falschziele für die Auswertelgorithmen zur Verfügung zu haben.

Im Vergleich zu den Messungen in der Messkammer gestaltet sich die Auswertung realer Freifeldmessungen erheblich schwieriger, da nun nicht mehr nur die Signatur eines einzelnen Propellers vermessen wird, sondern ein Summensignal, welches sich aus den Reflexionen von mehreren Propellern und dem Drohnenkörper zusammensetzt.



Auswertung

Die Auswertung der Messdaten geschieht in mehreren Schritten. Zuerst wird aus den komplexen Radardaten ein Spektrogramm erzeugt. Dieses besteht aus einer Serie von Fouriertransformationen, welche speziell an die jeweiligen Begebenheiten angepasst werden, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Dieses Spektrogramm wird vor der weiteren Verarbeitung optimiert, indem Festziele unterdrückt und Rauschteile entfernt werden. In einem weiteren Verarbeitungsschritt erfolgt eine Merkmalsextraktion durch die Singulärwertzerlegung. Dieses Verfahren liefert gute Ergebnisse im Falle der Fußgänger beziehungsweise Fußgängergruppen. Im Falle der vermessenen Drohne erwies es sich aber als günstiger, die Merkmalsextraktion aus einem Cepstrogramm durchzuführen. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, das ursprünglich in der Tontechnik zur Frequenzanalyse eingesetzt wird. Auf die Radardaten angewendet, liefert es gute Ergebnisse bei der Bestimmung der Rotordrehzahlen. Aus dem Cepstrogramm beziehungsweise dem Cepstrum, einem Schnitt durch das Cepstrogramm, sind anschließend die einzelnen Rotordrehzahlen ablesbar.

Zielklassifizierung

Die Klassifizierung des Zielobjektes erfolgt durch einen Abgleich der gemessenen Daten mit einer Datenbank bekannter Objekte. Da keine ausreichend große Datenbank mit vermessenen Objekten im untersuchten Frequenzbereich zur Verfügung stand, wurde auf synthetisch erzeugte Daten von Drohnen, Vögeln und weiteren Objekten mit komplexer Dynamik zurückgegriffen. Bei ersten Klassifizierungstests wurde die vermessene Drohne zu 86% korrekt klassifiziert, einzelne Fußgänger und Fußgängergruppen sogar zu 100%.

Ausblick

Zwischenzeitlich wurden mit dem weiterentwickelten Radardemonstrator neue Datensätze von Drohnen unterschiedlicher Typen aufgezeichnet. Diese Daten sollen mit neuen Ansätzen zur Signalprozessierung und Zielklassifikation analysiert werden.

- 1 Freifeldmessung von Drohnen mit dem Mikrodoppler-Demonstrator DroMiAn.
- 2 Cepstrogramm der vermessenen Drohne.
- 3 Cepstrum der vier Rotoren eines Drohnenfluges. Zwei der Motoren drehen aufgrund der Flugbewegung der Drohne schneller.



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

*Dipl.-Ing.
Thorsten Brehm
Tel. +49 228 9435-354
thorsten.brehm@
fhr.fraunhofer.de*



BREITENBESTIMMUNG VON STAHLBÄNDERN IM WALZPROZESS – RADARSYSTEME IM INDUSTRIELLEN EINSATZ

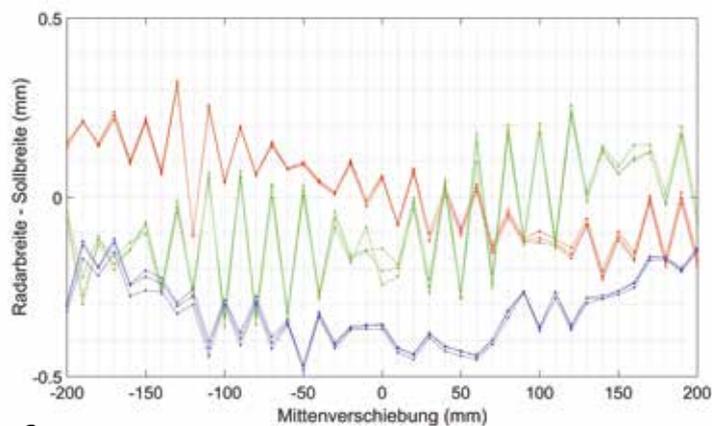
Konventionelle Messsysteme können unter den rauen Umgebungsbedingungen in Warmwalzstraßen häufig nicht eingesetzt werden. Das Fraunhofer FHR hat daher erstmalig mit der Firma IMS Messsysteme GmbH eine präzise Breitenmessung basierend auf Radartechnik entwickelt. Ein großer Vorteil des Systems ist die Einsatzfähigkeit selbst unter widrigsten Bedingungen.

Harsche Umweltbedingungen und hohe Anforderungen

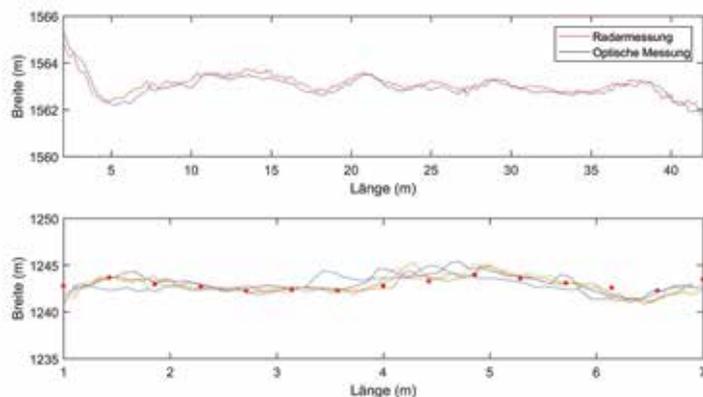
Güte und Effizienz in der Herstellung von Walzgütern sind eng mit der Entwicklung und Einsatzbarkeit von Messtechnik zur Walzprozessverfolgung und -regelung verknüpft. Verbesserungen an verfügbarer Messtechnik steigern gleichermaßen die Produktivität und verringern die Herstellungskosten. Die Breite von Stahlbändern ist ein grundlegender Parameter im Walzprozess. Aufgrund von Schmutz oder Dampf war eine Breitenmessung mit konventionellen Messsystemen nicht oder nur schwer an der essentiellen Prozessstufe zur Breitenregelung, dem Vorgerüst, möglich. Gleichzeitig sind die Anforderungen an Sensoren, auch unter diesen Rahmenbedingungen, sehr hoch. Neben der präzisen Messung sind Faktoren wie hohe Ausfallsicherheit im 24/7-Betrieb, Temperaturstabilität über einen Bereich von -10°C bis 55°C , Robustheit gegen Vibration und eine schnelle und einfache Integration in bestehende Anlagen nur einige Anforderungen an die Sensoren.

Bislang erfolgte die Regelung nur auf Basis von theoretischen Modellen und Erfahrungswerten. Doch Fehler, welche an diesem Punkt auftreten, können im weiteren Walzprozess nicht mehr korrigiert werden, da die Breite in den folgenden Prozessschritten kaum noch beeinflusst werden kann. Um sicherzustellen, dass die geforderte Sollbreite über die gesamte Länge des Bandes erreicht wird, wird das Band breiter gewalzt als notwendig und die überschüssige Breite am Ende des Walzprozesses entfernt. Diese Überbreite verursacht jährlich mehrere tausend Tonnen Stahl, die als sogenannter Saumschrott wieder eingeschmolzen werden. Hierdurch werden zusätzliche Ressourcen wie Energie, Material, Arbeitskraft und Maschinenstunden benötigt und es werden jährlich mehrere Tonnen CO_2 zusätzlich produziert. Des Weiteren geht jeder Millimeter an Überbreite in der Länge des Bandes verloren und reduziert so die Ausbringung.

Um diese Lücke in der Prozessüberwachung zu schließen, hat das Fraunhofer FHR in Kooperation mit der IMS Messsysteme GmbH ein radarbasiertes Breitenmesssystem entwickelt. Zwei frequenzmodulierte Dauerstrichradare messen unabhängig voneinander die Distanz zu dem den Radarbeam passierenden Stahlband. Dazu werden sie seitlich des Rollgangs, sich gegenüberstehend, installiert. Eine Kalibrierung dient dazu, die beiden Distanzmessungen in Beziehung zueinander zu bringen und so die Breite sowie die Mittenposition des Bandes aus den Distanzmessungen bestimmen zu können.



2



3

Vom Labor ins Stahlwerk

Die Radarsysteme wurden im Prüffeld der IMS Messsysteme GmbH getestet. Analog zur späteren Einbausituation stehen sich dort zwei Radarsysteme in einem Abstand von 5 m einander gegenüber. Zwischen diesen befindet sich eine Verfahr-Einheit, die verschiedene Prüf- und Kalibrierkörper entlang der Achse zwischen den beiden Radareinheiten bewegt. Der Weggeber der Verfahr-Einheit, welcher auf $\pm 60 \mu\text{m}$ zertifiziert ist, dient der Kontrolle der einzelnen Distanzmessungen. Drei zertifizierte Prüfkörper mit typischen am Vorgerüst vorkommenden Breiten dienen der Überprüfung der Messgenauigkeit des Breitenmesssystems als Ganzes. Die geforderte Messgenauigkeit am Vorgerüst von $\pm 1 \text{ mm}$ konnte mit unter $\pm 0,5 \text{ mm}$ für alle Breiten mehr als erfüllt werden. Abb. 2 zeigt die Differenz zwischen gemessenem und zertifiziertem Breitenwert.

Das radarbasierte Breitenmesssystem wurde in der Warmbandstraße am Vorgerüst der Salzgitter Flachstahl GmbH installiert und überprüft. Aufgrund der geringen Größe der Sensorik und der Unabhängigkeit der Einzelsensoren kann die Einbaugröße an die jeweiligen Messstellen angepasst werden. Abb. 1 zeigt die eingebaute Breitenmessung am Vorgerüst der Salzgitter Flachstahl GmbH. Dort werden Bänder zwischen ca. 800 und 2050 mm Breite und ca. 50 und 250 mm Dicke gewalzt. Hinter dem Vorgerüst, am Einlauf der Fertigstraße, befindet sich eine optische Breitenmessung der IMS Messsysteme GmbH. Abb. 3 zeigt beispielhaft ein Breitenprofil eines Bandes, das sowohl mit der Radarbreitenmessung als auch mit der optischen Breitenmessung erfasst wurde. Die Breitenprofile beider Systeme stimmen sehr gut überein. Die sehr rauen Umgebungsbedingungen am Vorgerüst beeinflussen die Breitenmessung nicht.

Zur weiteren Überprüfung der Messgenauigkeit wurde aus einem abgekühlten Vorband ein ca. 7 m langes Stück herausgeschnitten, wieder auf den Rollgang gebracht und wiederholt durch die Radarmessung gefahren und überprüft. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Es zeigte sich sowohl eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Radarmessung und der manuellen Messung, als auch eine hohe Wiederholgenauigkeit der Radarmessung.

Mit der Radartechnologie konnten erstmals die Hürden einer präzisen Breitenmessung für Warmbandstraßen überwunden werden. Anfang des Jahres 2017 wurde die vollständig industrialisierte Version der Radarbreitenmessung in Salzgitter installiert und in Betrieb genommen. Die Radarbreitenmessung misst seither zuverlässig, präzise und störungsfrei die Breite der Bänder im 24/7-Betrieb. Neben den genannten Vorteilen bietet das System die Möglichkeit, die Systemparameter individuell anzupassen, so dass die Radarmessung auch für andere Anwendungsbereiche sehr attraktiv ist.

1 *Aufbau der Radarbreitenmessung am Vorgerüst der Salzgitter Flachstahl GmbH.*

2 *Laborergebnisse zur Messgenauigkeit. Dargestellt ist die Differenz zwischen der mittels Radarsystem gemessenen und der zertifizierten Breite der drei Prüfkörper.*

3 *Oben: Beispiel eines Breitenprofils gemessen mit der Radarbreitenmessung und der optischen Messung am Einlauf der Fertigstraße. Unten: Vergleich zwischen Radarmessung (Linien) und manueller Schieblehrenmessung (Punkte).*



Dipl.-Ing.
Christian Krebs
Tel. +49 228 9435-775
christian.krebs@
fhr.fraunhofer.de



1

3D-RADARBILDER ZUR DURCHLEUCHTEN- DEN INSPEKTION VON OBJEKTEN

Basierend auf seiner integrierten Radarsensorik hat das Fraunhofer FHR Technologie und Algorithmen zur dreidimensionalen Abbildung mittels Millimeterwellen-Scan entwickelt. Diese Technologie Objekten in beeindruckender Qualität.

Das Fraunhofer FHR hat sich mit der Entwicklung hochintegrierter Radar-Module auf Basis von Silizium-Germanium (SiGe) den Einstieg in kosteneffiziente und kompakte Systeme für Industrie- und Sicherheitsapplikationen erschlossen.

Gepaart mit den effektiven Abbildungsalgorithmen des Instituts entstehen so sehr leistungsfähige Bildgebungssysteme. Neben einem flexiblen Robotikmodul entstand ein komplettes Labormesssystem. Damit lassen sich nicht nur Gepäckstücke nach illegalen Inhalten durchsuchen, sondern auch Material- und Fehleranalysen für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen betreiben.

Hohe Auflösung durch hohe Frequenz und große Scanfläche

Genau wie bei Kamerasystemen hängt die Auflösung von Radarbildern maßgeblich von der Größe des Objektivs ab. Dieses entsteht bei Radarabbildungen durch eine Zusammenschaltung vieler Antennenelemente über eine Fläche. Die Millimeterwellentechnologie des Fraunhofer FHR erlaubt hierbei mittlerweile Abbildungen bis 300 GHz. Damit sind Bildauflösungen unterhalb eines Millimeters möglich. Innerhalb dichter Materialien kann dies sogar deutlich übertreffen

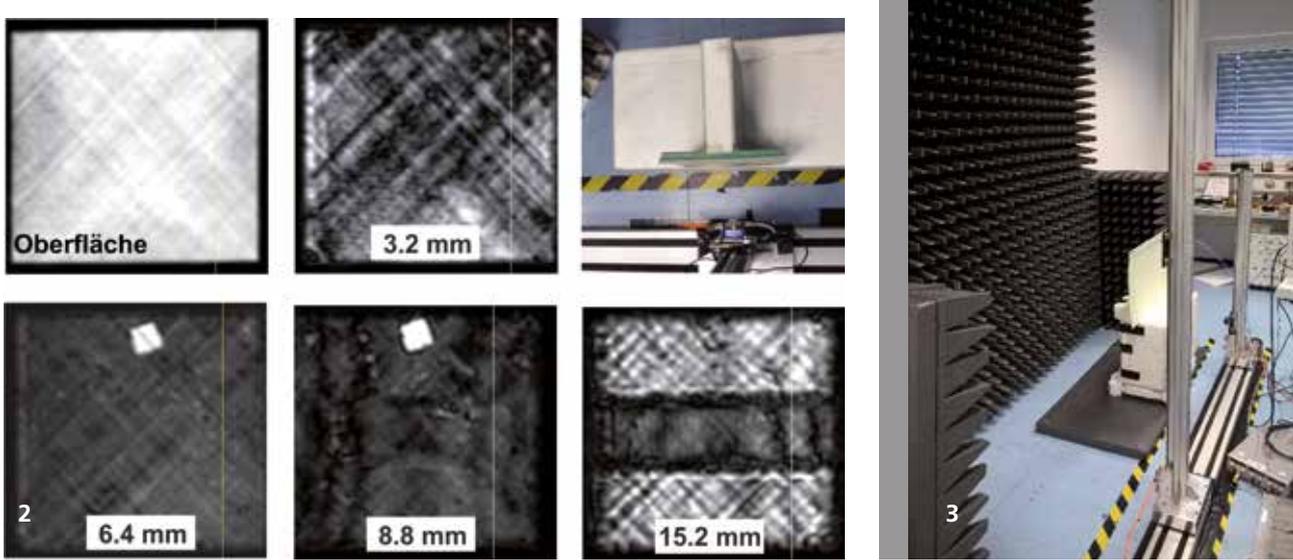
werden. Allerdings ist dazu eine äußerst hohe Anzahl an Messungen notwendig, was bei großen Flächen eine Herausforderung darstellt: Soll eine Fläche von einem Quadratmeter mit einem Millimeter Abstand gescannt werden, ergeben sich eine Million Antennenpositionen. Dies ist mit konventionellen Panels praktisch nicht umsetzbar. Besteht die Möglichkeit Messobjekte einige Minuten zu scannen, bietet die serielle Messung der Einzelpositionen eine realisierbare Alternative.

Scan erlaubt Abbildungen mit geringem technologischen Aufwand

Daher verwenden die Forscher ein Synthetisches Apertur Radar (SAR). Anstatt viele Antennen gleichzeitig einzusetzen, bewegen sie die Antenne über die Apertur. Anschließend werden alle Einzelmessung zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Die in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität entwickelten hochintegrierten Radarmodule bei 80 GHz haben sich dabei als Sensoren von hoher Performanz erwiesen. Das installierte Scansystem ermöglicht nahezu beliebige Scanbereiche bis hin zu einem Meter Kantenlänge. Aber auch abseits des damit erschlossenen Frequenzbandes können durch die Verwendung von Netzwerkanalysatoren oder integrierter Sensoren bei 30, 60, 120 oder 240 GHz Bilder erzeugt werden.

Gepäckscan zur Detektion versteckter Gegenstände

Die Forscher haben die 80 GHz-Scantechnologie bereits erfolgreich zur Durchleuchtung von Gepäck eingesetzt. Eine komplette 3D-Rekonstruktion des Innern gibt nicht nur Auskunft über die Form enthaltener Objekte, sondern kann



auch Informationen über deren Lage im Raum liefern. Dies kann in dieser Form mit klassischen Röntgenscannern nicht gewährleistet werden. Das Scanresultat kann außerdem Schicht für Schicht durchgesehen oder auch dreidimensional visualisiert werden.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis für einen 70 cm breiten Handkoffer. Der Koffer wird in der Summation über alle Schichten sehr deutlich erkennbar. Vor allem ist die starke Reflexion der Außenhülle gut zu erkennen. Entscheidend ist jedoch eine im Innern befindliche Handfeuerwaffe, die mit hoher Detailtreue erkannt werden kann. Noch deutlicher wird dies bei der isolierten Betrachtung einer Schicht im Innern des Koffers. Die Tiefenauflösung des Radars von bis zu 5 mm blendet die Reflexionen der Kofferhülle effektiv aus.

Materialscan und Fehlersuche bei Faserverbundstoffen

Für die Detektion von Produktionsfehlern oder Ermüdungserscheinungen bei der industriellen Qualitätssicherung spielt die durchleuchtende Abbildung ebenfalls eine entscheidende Rolle. Im Rahmen des vom Land Bremen geförderten Projekts »DIARO« untersuchten Wissenschaftler vom Fraunhofer FHR mit dieser Scantechnologie Elemente von Windradblättern auf Fehlstellen. Ziel war es, Einschlüsse, Ondulationen oder Risse im Material zerstörungsfrei detektieren zu können. Abbildung 2 verdeutlicht die Möglichkeit der schichtweisen Untersuchung der Probe. Die starke Reflexion der Oberfläche dominiert zunächst das Bild. 3 mm weiter innerhalb der Probe kommt die Faserstruktur des Glasfaserverbundstoffs bereits sehr gut zur Geltung. Ein zu Testzwecken künstlich eingebrachter Fremdkörper erscheint in circa 6 mm Tiefe. Weiter im Innern ist deutlich die Verklebung der zwei verwendeten Verbundstoffplatten zu erkennen. Der Verlauf des Klebermaterials ist somit berührungslos messbar. Nach 15 mm ist wiederum die Rückseite der beiden verklebten Platten als starke Reflexion sichtbar. In dem dichten Material ist eine Tiefenauflösung von 2 mm erreichbar, was sehr genaue Tests ermöglicht.

Erweiterungspotential zu preisgünstigen Mehrkanalsystemen

Hauptnachteil des Scanverfahrens ist die vergleichsweise lange Messzeit. Bei Messbereichen mit weniger als 25 cm Ausdehnung dauert ein Scan derzeit weniger als 7 Minuten. Integriert man mehrere Messkanäle in einem Modul, ist eine deutliche Beschleunigung zu erwarten. Ziel der Entwicklung ist es auch, größere Flächen in wenigen Minuten abbilden zu können. Gemeinsam mit seinen Kooperationspartnern kann das Fraunhofer FHR die Integration dieser Technologie in Produktionsstraßen realisieren. Damit können sie diese sehr effektive Art der Abbildung für zahlreiche Anwendungen erschließen.

1 Durchleuchtend gescannter Koffer als Gesamtvisualisierung (Summe aller Schichten) mit enthaltener Handfeuerwaffe (separate Tiefenschicht).

2 Durchleuchtung einer Windradblatt-Gurtverklebung bei 80 GHz visualisiert in unterschiedlichen Eindringtiefen.

3 Radar-Nahfeldscanner am Fraunhofer FHR für abbildende Testmessungen bei Frequenzen zwischen 5 und 300 GHz.



Dr.-Ing.
Reinhold Herschel
Tel. +49 228 9435-582
reinhold.herschel@
fhr.fraunhofer.de



IDENTIFIZIERUNG MIT MILLIMETERWELLEN-TAGS

Produktpiraterie ist ein sehr großes Problem, doch RFID-Tags lassen sich meist nur schwerlich in Produkte einbetten. Im Rahmen des Radar-Tag-Projektes soll ein Transpondersystem bei 60 GHz entworfen werden, bei welchem das komplette Tag inklusive Antenne auf einen winzigen Chip (1 mm²) integriert wird.

Schutz vor Produktpiraterie durch miniaturisiertes RFID Tag

Produktpiraterie lässt sich im heutigen weltweiten Handel nur schwerlich eindämmen. Laut Schätzungen des VDMA beläuft sich der Schaden allein in Deutschland auf 7,3 Mrd. Euro jährlich. Zwar existieren vielfältige Schutzmechanismen, doch sind diese für viele Zwecke zu komplex oder lassen sich nur schlecht in Produkte einbetten. Einfache Kennzeichnungen mittels Seriennummer oder QR-Codes müssen aufwendig nachverfolgt werden. Dahingegen versprechen elektronische Kennzeichnungen mittels RFID eine kryptographisch geschützte Authentifizierung, doch diese kommunizieren bisher mittels *Near-Field-Communication* (NFC; 13,56 MHz) oder im UHF-Band (868 MHz) und benötigen daher große Antennen mit einem Ausmaß von mehreren Zentimetern. Um das gesamte RFID-Tag deutlich kompakter realisieren zu können, soll im Rahmen des Radar-Tag Projektes ein Transpondersystem entworfen werden, welches im 60-GHz-Band arbeitet, so dass die Antenne vollständig auf einen winzigen Chip integriert werden kann und dort zusammen mit Digitalteil, Kryptographie-Modul und Energiegleichrichter das gesamte

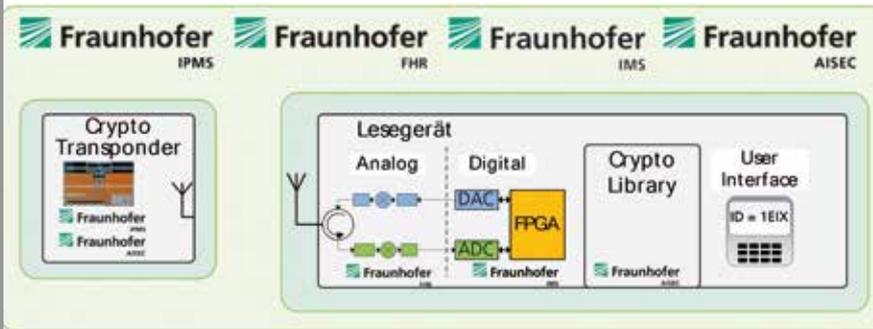
Tag bildet. Somit bildet der Chip (z. B. 1 mm²) das gesamte Tag und kann einfach in Produkte eingebettet werden. Zum Auslesen wird das Tag dann von einem Reader drahtlos bei 60 GHz mit Energie versorgt. Zur Informationsübermittlung werden dann auf dieses Signal Daten aufmoduliert, die mittels Reader ausgelesen werden können.

Optimale Lösung durch Zusammenarbeit

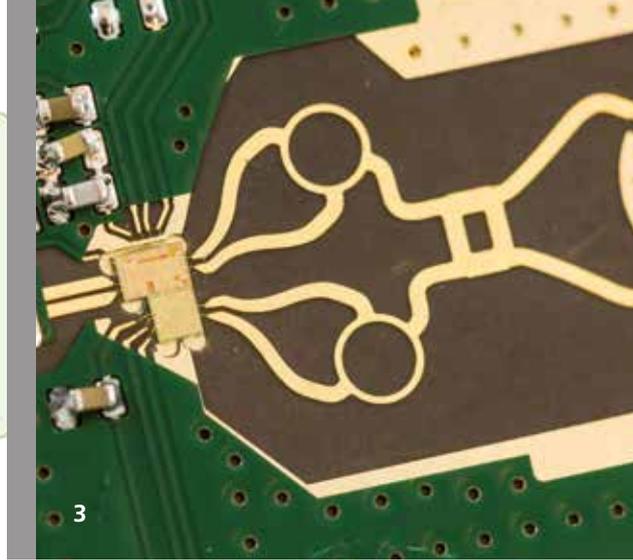
Das angestrebte Transpondersystem ist nicht nur durch die komplexe Millimeterwellentechnik, sondern auch durch die energiesparende Kryptographie und die aufwendige digitale Kommunikationstechnik eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Um diese anspruchsvolle Aufgabe anzugehen, haben sich die vier Fraunhofer-Institute IPMS, IMS, AISEC und FHR zusammengetan. Das IPMS verfügt über das Know-how zur Realisierung des RFID-Tags, das AISEC ist der Experte für die Realisierung der Kryptographie, das IMS übernimmt das Backend des Transpondersystems und das FHR ist zuständig für die Ausleseeinheit und bringt somit seine Erfahrung im Millimeterwellenbereich ein.

Die Herausforderungen des 60-GHz-Readers

Für die Realisierung des Reader-Frontends ergeben sich einige spannende Herausforderungen. Um ein kompaktes Reader-Modul im Format eines Smartphones zu ermöglichen, soll eine sehr kompakte Bauform angestrebt werden. Zur Energieversorgung des Tags muss eine hohe Sendeleistung erzeugt werden, welche die regulatorischen Limits von 20 dBm EIRP im Fernfeld möglichst ausreizt. Hierbei ist selbstverständlich



2



3

eine sehr energieeffiziente Signalerzeugung notwendig, um den notwendigen Bauraum zur Kühlung und Energieversorgung möglichst klein zu halten. Sehr anspruchsvoll sind die Anforderungen an den Empfänger, da dieser stets starkes Übersprechen bzw. Reflexionen des 60 GHz Sendesignals empfängt und dennoch hinreichend linear arbeiten muss, um die Rückstreumodulation des Tags sauber dekodieren zu können. Durch diese Kombination von Anforderungen an die Hochfrequenztechnik zusammen mit der angestrebten kostengünstigen Skalierung für den Massenmarkt, eignet sich das Frontend für hervorragend eine Integration des Frontends auf einen Silizium-Germanium Chip.

Eine weitere Herausforderung liegt in der robusten Funkkommunikation unabhängig von der Ausrichtung von Reader und Tag. Aufgrund der Kompaktheit sind die integrierten Antennen auf dem Tag stets linear polarisierend ausgelegt, dennoch soll die Signal- und Energieübertragung für jede Ausrichtung des Readers funktionieren. Zur dreh-unabhängigen Ansteuerung werden die Sende- und Empfangsantennen auf dem Reader zirkular polarisierend ausgelegt und gemeinsam in einer räumlich konzentrierten Antenne realisiert.

Im Rahmen des Projektes konnte bereits einer ersten Version des Readers samt eigenes entwickelten Transceiver Chips realisiert werden. In Tests konnte bereits die notwendige Sendeleistung verifiziert werden und mit Hilfe eines eigens realisierten Dummy-Tags erfolgreich eine Rückstreumodulation sauber am Empfänger dekodiert werden. Aufgrund der erreichten Ergebnisse und der noch bleibenden Herausforderungen zur Integration des Gesamtsystems blickt das Projekt-Team optimistisch in das letzte Projektjahr und rechnet mit einer erfolgreichen Gesamtsystem-Demonstration 2019.

- 1 *Vision des Radar-Tag-Projektes: Die kompakten 60-GHz-Tags können vollständig in Produkte eingebettet werden.*
- 2 *Schematische Darstellung des Transpondersystems mit den jeweiligen Instituten und ihren Arbeitspaketen.*
- 3 *Erste Version des Reader-Boards. Deutlich zu erkennen sind die Transceiver-Chips sowie die Koppler auf dem Hochfrequenzsubstrat, welche die Sende-Empfangsweiche bilden und die zirkulare Speisung der Antenne übernehmen.*



Prof. Dr.-Ing.
Nils Pohl
Tel. +49 234 32-26495
nils.pohl@
fhr.fraunhofer.de



ZUVERLÄSSIGE QUALIFIZIERUNG VON AUTOMOBILRADAREN MIT ATRIUM

Mit ATRIUM wird am Fraunhofer FHR ein Radarzielsimulator für das E-Band entwickelt, der eine umfassende Kontrolle der Funktionsfähigkeit von Automobil-Radarsensoren der nächsten Generation ermöglicht. Im Gegensatz zu konventionellen Radarzielsimulatoren wird ATRIUM kritische Verkehrsszenarien vollständig simulieren können.

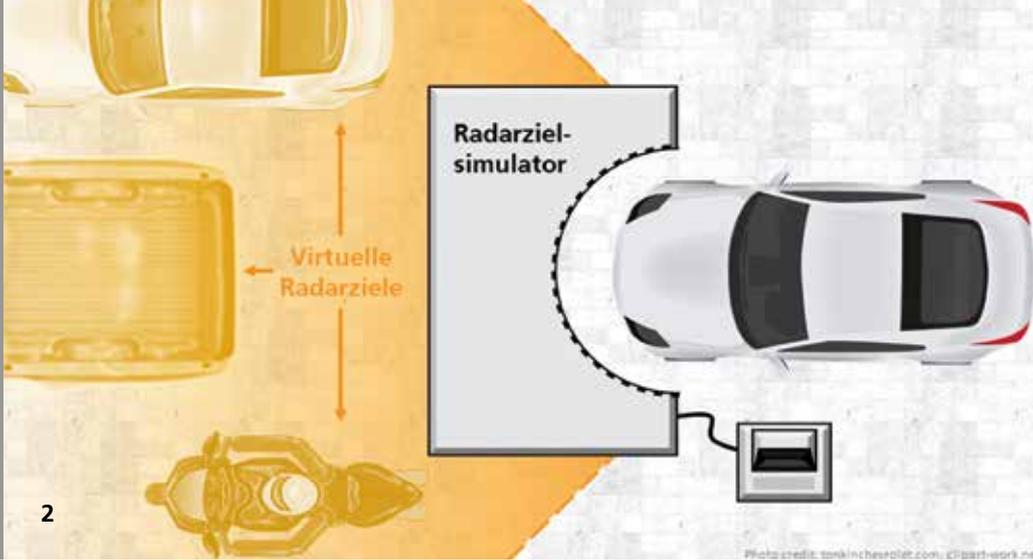
Das autonome Fahren ist aufgrund mannigfaltiger Nutzungsmöglichkeiten (Individualverkehr, Güterverkehr) und zahlreicher Vorteile (Steigerung des Fahrkomforts, hoher ökonomischer Nutzen) eine der vielversprechendsten Zukunftstechnologien. Um Verkehrsteilnehmer nicht unnötig zu gefährden und eine gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie herbeizuführen, muss allerdings der Sicherheit autonomer Fahrzeuge besondere Beachtung geschenkt werden. Dies gilt auch für die Funktionstüchtigkeit derzeit erhältlicher Fahrassistenzsysteme, die bereits jetzt sicherheitsrelevante Funktionen von Fahrzeugen übernehmen. Insbesondere die Zuverlässigkeit von Automobil-Radarsensoren muss dabei gewährleistet werden, da diese ein wichtiger Bestandteil solcher Fahrassistenzsysteme sind und auch in zukünftigen Fahrzeuggenerationen eine wichtige Rolle spielen werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Testumgebung, die eine umfassende Qualifizierung von Automobilradarsensoren ermöglicht.

Mit dem Radarzielsimulator ATRIUM (Automobile Testumgebung für Radar In-the-loop Untersuchungen und Messungen) wird eine solche Testumgebung am Fraunhofer FHR derzeit

für das E-Band umgesetzt. Diese wird eine realitätsnahe Nachbildung von Verkehrsszenarien durch die Synthese eines elektromagnetischen Wellenfelds erlauben. Dadurch wird der Zielsimulator in die Lage versetzt, virtuelle Radarziele an beliebigen Positionen zu platzieren. Durch stetige Änderung der Position sowie durch Dopplerverschiebung kann zudem die Bewegung von Radarzielen simuliert werden. Darüber hinaus wird das System in der Lage sein, komplexe Zielsignaturen nachzuempfinden, wodurch Radarziele vom Radarsensor nicht nur als Punkte, sondern als vielgestaltige, aus mehreren Teilen (z. B. aus Heck, Stoßstange, Rädern) zusammengesetzte Objekte wahrgenommen werden können. Dieser Funktionsumfang ermöglicht die Simulation von Verkehrsszenarien, bei denen die zuverlässige Funktion von Automobilradarsensoren von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit im Straßenverkehr ist.

Der Zielsimulator ist als Prüfstand konzipiert, vor dem ein mit Radarsensorik ausgestattetes Testfahrzeug positioniert werden kann. Folgende Anwendungsfälle lassen sich hiermit abdecken:

1. Der Sensorhersteller muss gegenüber dem Automobilhersteller nachweisen, dass der Radarsensor fehlerfrei funktioniert. Dieser Nachweis erfolgt bisher durch Erprobungsfahrten. Durch den Einsatz des ATRIUM-Radarzielsimulators kann die Anzahl der auf öffentlichen Straßen gefahrenen Testkilometer gering gehalten werden. Dies ermöglicht eine schnellere und kostengünstigere Verifikation von Radarsensoren.



2. Zur Entwicklung neuer oder überarbeiteter Softwarefunktionen und Hardwarekomponenten sind Tests in einer möglichst realitätsgetreuen Umgebung wünschenswert. Auch hierfür kann der Radarzielsimulator durch den Sensorhersteller eingesetzt werden.

3. Möchte der Automobilhersteller überprüfen, ob der Radarsensor des Sensorherstellers die durch ihn geforderten Spezifikationen erfüllt, ist auch der Automobilhersteller ebenfalls auf einen Nachweis durch Erprobungsfahrten angewiesen. Hier bietet sich der Einsatz des Radarzielsimulators ebenfalls an.

Um die virtuelle Positionierung von Radarzielen entlang verschiedener Raumdimensionen zu ermöglichen, werden mit FPGAs ausgerüstete Digitalboards eingesetzt, die mit Sendeeinheiten ausgestattet sind. Der Digitalteil ermöglicht die Generierung von mehr als 100 doppler- und zeitverschobenen, amplituden- und phasenvariieren Kopien des Sendesignals. Durch die Modifikation kann das Signal u. a. zeitlich verzögert werden, wodurch sich die Entfernung der Radarziele verändern lässt. Zudem erlaubt die im Raum verteilte Anordnung der Sendeeinheiten eine winkelabhängige Darstellung der über 100 virtuellen Radarziele.

Durch einen neuartigen Top-Down-Ansatz lassen sich mit dem System selbst umfangreiche Szenarien simulieren: Hierzu wird eine auf den OpenScenario- und OpenDrive-Standards basierende High-Level-Beschreibung des Verkehrsszenarios mit Hilfe eines Punktreuemodells simuliert und das Simulationsergebnis in durch die ATRIUM-Hardware interpretierbare Parameter zerlegt. Dies erspart dem Nutzer des Systems die zeitaufwändige Positionierung einzelner virtueller Radarziele.

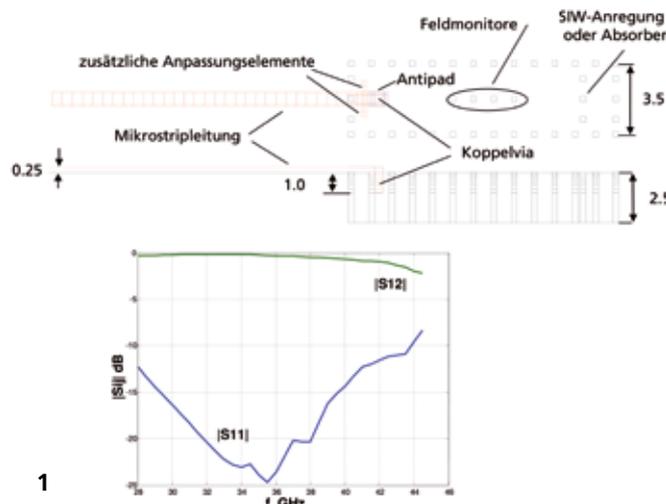
Auf diese Weise wird ATRIUM es ermöglichen, die Qualifizierung radarbasierter Fahrerassistenzsysteme voranzutreiben und zur Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr heute sowie in der Zukunft beizutragen.

1 *Demonstrator zum Nachweis des Hardware-Funktionsprinzips.*

2 *Künstlerische Darstellung des Radarzielsimulators.*



*Dr.-Ing.
Thomas Dallmann
Tel. +49 241 80 22271
thomas.dallmann@
fhr.fraunhofer.de*



CHARAKTERISIERUNG UND DESIGN VON SIW-KOMPONENTEN UND ANTENNEN

Ein erweitertes elektrodynamisches Simulationsverfahren für Komponenten und Antennen mit substanzintegrierten Wellenleitern (SIW) unterstützt durchgehend deren gesamte Entwicklungskette vom Entwurf bis zur Charakterisierung. Mit hoher Genauigkeit lassen sich so die Vorteile von SIW-Komponenten für Hochfrequenzanwendungen im Millimeter-Wellenbereich bei lückenloser Kontrolle des gesamten Lösungsprozesses voll ausschöpfen.

Effiziente Modellierung dank neuartigem Simulationsverfahren

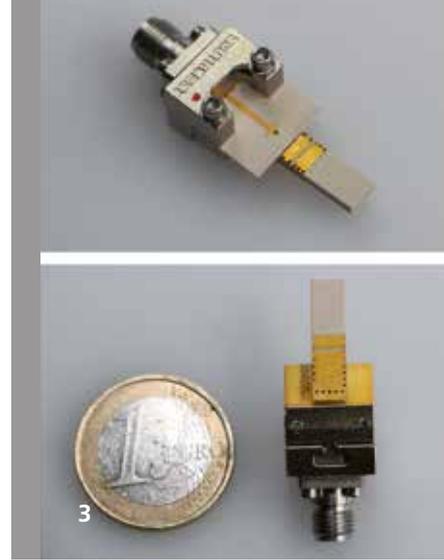
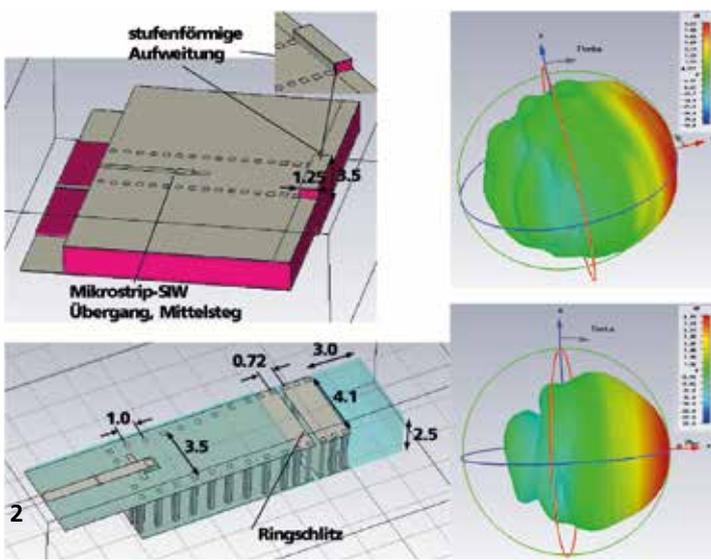
SIW-Komponenten lassen sich zusammen mit Mikrostrip/Koplanarleitungen kostengünstig als gedruckte Schaltungen (PCBs) realisieren, wobei sie ähnlich wie Rechteckhohlleiter geringe Verluste aufweisen und neuartige Schaltungs- und Antennenstrukturen erlauben. Sie entstehen prinzipiell aus einer Streifenleitung, deren seitliche Berandungen mittels Durchkontaktierungen (Vias) mit der Rückmetallisierung verbunden werden.

Für die detaillierte Analyse neuer SIW-Komponenten wurde beim FHR ein bestehendes, selbstentwickeltes Integralgleichungsverfahren für sog. Planar-3D Strukturen erweitert. Damit ist die Modellierung von SIW-Komponenten mit minimalem Rechenaufwand und deutlich weniger datenintensiv als bei kommerziellen Verfahren möglich.

Eine SIW kann dabei vorteilhaft durch ein analytisch erfasstes Parallelplattenmedium modelliert werden, wobei in der Simulationsumgebung beide Metallisierungen durch die ursprüngliche Berandung aus Vias verbunden werden und sich so der Diskretisierungsaufwand auf die Vias reduziert. Zusätzliche Aussparungen wie Schlitze als Antennen- oder Koppelstrukturen können besonders recheneffizient mit Hilfe von magnetischen Strömen modelliert werden. Die Diskretisierung wird mit einem ebenfalls eigenentwickelten Meshgenerator durchgeführt, welcher auf gängige Zeichenprogramme zurückgreift und dem Entwickler so kostengünstig größtmögliche Flexibilität bietet.

Schnelles Vorabdesign und detaillierte Charakterisierung

Mit einer SIW lassen sich u. a. effiziente Leckwellenantennen mit frequenzgesteuerter Strahlschwenkung aufbauen, z. B. als Endfire-Antenne mit Abstrahlung direkt von der Kante einer PCB. Hier erlaubt eine ebenfalls eigenentwickelte Modalanalyse ein schnelles Vorabdesign der Antenne. Durch sehr kompakte Absorber (Vias mit ohmschen Verlusten) als Leitungsabschluss lassen sich Wirkungsgrad und Verlusteffekte direkt berechnen. Anpassung (und Transmission) werden mittels neuer SIW-Tore mit Feldmonitoren zur Extraktion der Torwellen ermittelt. Mit diesen Funktionalitäten lassen sich zusätzlich Verteilnetzwerke, Filter- und Resonatorstrukturen, Koppler und Phasenschieber etc. charakterisieren, wobei, falls erforderlich, eine automatische Meshverfeinerung besonders im Bereich der Vias erfolgen kann.



Entwicklung von SIW-Endfire Antennen für Arrayanwendungen

Mit dem neuen Verfahren wurden am Institut hornähnliche Strukturen als Endfire-Antennen für Arrays spezifiziert, mit einer Elementbreite nicht viel größer als eine halbe Freiraumwellenlänge. Ein akzeptables Abstrahlverhalten kann so nur durch eine entsprechend dicke Apertur erzielt werden, zunächst realisiert durch eine stufenförmige Höhengaufweitung am Ende einer SIW. Diese ist jedoch schwer zu fertigen und bringt immer noch eine relativ große Rückstrahlung mit sich (Abb. 2 oben). Deshalb wurde eine neuartige kompakte Struktur basierend auf einem rechteckförmigen Ringschlitz und einem dielektrischen Stab etabliert. Diese weist eine hohe Bandbreite bei gleichzeitig geringer Rückstrahlung auf und ist günstiger zu fertigen, da sie keine Höhengaufweitung benötigt (Abb. 2 unten).

Für diese Antennenklasse werden Mikrostrip-SIW Übergänge mit etwa der zehnfachen Substratdicke der SIW gegenüber der Mikrostrip- und SIW-Übergänge benötigt, die so noch nicht dokumentiert wurden.

Die momentan favorisierte Struktur beruht auf der Kopplung mit einem Via, welches durch eine Apertur (Antipad) am Ende einer dünnen Streifenleitung von oben in die SIW eingebracht wird. Für Schmalbandanwendungen wird dieses Via bis zur Rückmetallisierung durchkontaktiert, während es für einen Breitbandübergang nur in die obere Hälfte der SIW hineinragt (Abb. 1). Ein alternativer Breitband-Übergang beruht auf einer SIW-Leitung mit mehreren Mittelstegen, der einzeln und zusammen mit einem Antennenelement für das Ka-Band erfolgreich gefertigt und vermessen wurde (30-40 GHz) (Abb. 2 oben).

Einsatz für schmalbandige und breitbandige Anwendungen

Das SIW-Element mit Ringschlitz wurde nach weiteren Modifikationen zur Optimierung der Fertigung für den schmalbandigen Einsatz im Projekt RAWIS – Radar Warn- und Informationssystem – verwendet. Da hier nur etwa 2 GHz Bandbreite um 35 GHz benötigt werden, konnte ein einfach zu fertigender Mikrostrip-SIW Übergang mit durchkontaktiertem Koppelvia eingesetzt werden. Insbesondere die kompakte Größe bietet hier einen großen Vorteil für das dicht belegte Empfangsarray (Abb. 3).

Für breitbandige Anwendungen wie hochauflösende luftgestützte SAR-Systeme wird das Antennenelement aktuell mit der Breitbandversion dieses Mikrostrip-SIW Übergangs gefertigt (Abb. 2 unten).

1 Breitbandiger Mikrostrip-SIW Übergang mit Via-Einkopplung und Antipad; unten Transmission (grün) und Anpassung (blau).

2 Breitbandig einsetzbare SIW-Elemente mit ihrer jeweiligen Strahlungscharakteristik bei 35 GHz. Oben: Element mit mehreren Mittelstegen und endständiger Höhengaufweitung. Unten: Element mit Ringschlitz und Breitbandversion des Übergangs mit Via und Antipad.

3 Eines der ersten für RAWIS gefertigten, sehr kompakten SIW-Elemente mit Ringschlitz.

Dr.-Ing.

Thomas Vaupel

Tel. +49 228 9435-225

thomas.vaupel@

fhr.fraunhofer.de

VERÖFFENTLICHUNGEN

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

Alle Publikationen 2017:

www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2017



Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften

www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2017-journals



Publikationen bei wissenschaftlichen Konferenzen

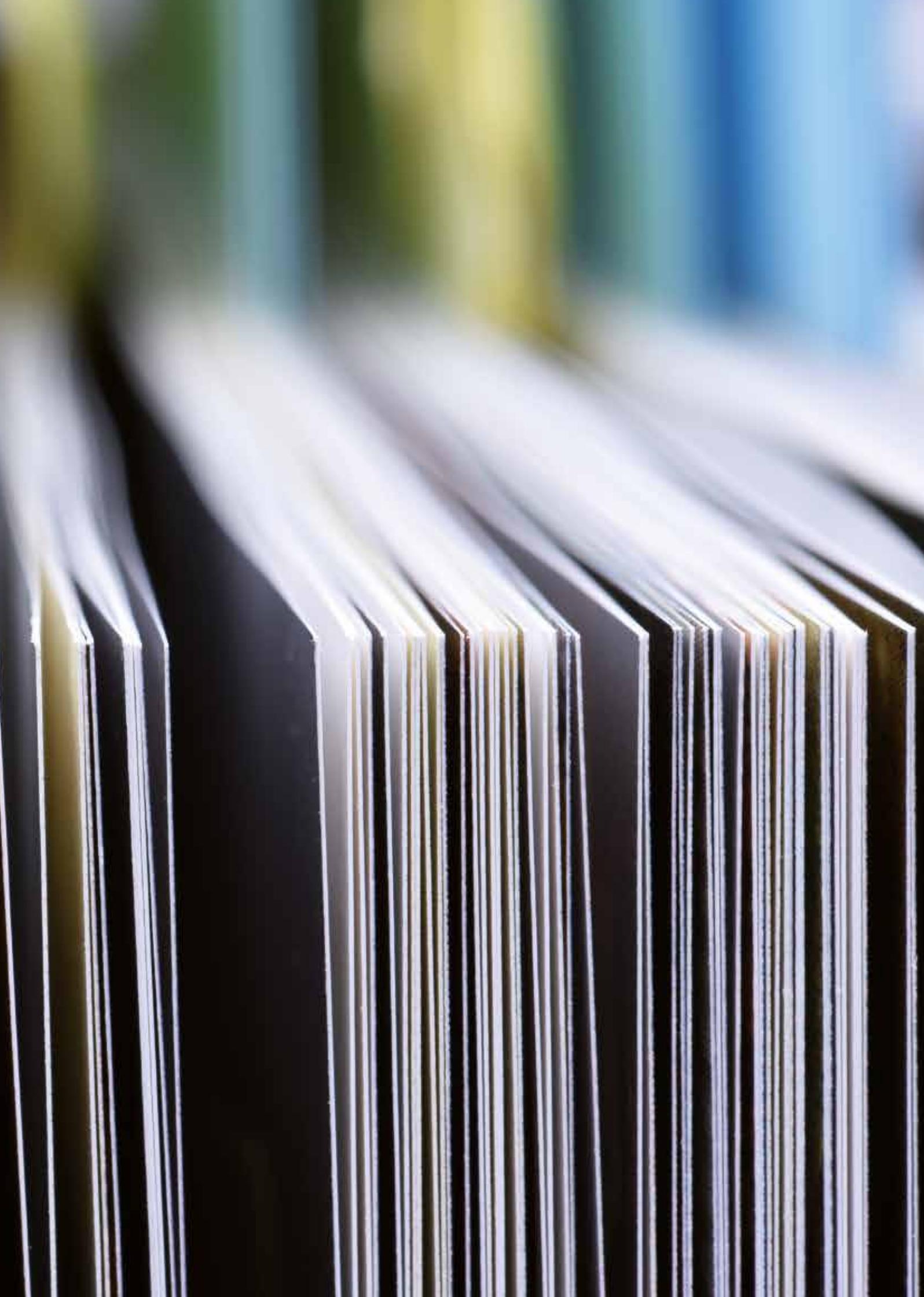
www.fhr.fraunhofer.de/publikationen2017-konferenzen



Fraunhofer-Publikationsdatenbank:

<http://publica.fraunhofer.de>





AUSBILDUNG UND LEHRE

Vorlesungen

WS 2016/2017

Bertuch, T.: „Antennen und Wellenausbreitung“, FH Aachen, Aachen, WS 2016/2017

Bongartz, J.: „Signalverarbeitung“, HS-Koblenz, Standort Remagen, WS 2016/2017

Bongartz, J.: „Medizinischer Gerätetechnik“, HS-Koblenz, Standort Remagen, WS 2016/2017

Cerutti-Maori, D.: „Signal Processing for Radar and Imaging Radar“, Vorlesung und Übungen, RWTH Aachen, Aachen, WS 2016/2017

Ender, J.: „Radar – Techniques and Signal Processing I“, Universität Siegen, Siegen, WS 2016/17

Heberling, D.: „Hochfrequenztechnik 1“, RWTH

Aachen, Aachen, WS 2016/2017

Heberling, D.: „Moderne Kommunikationstechnik – EMV für Mensch und Gerät“, RWTH Aachen, Aachen, WS 2016/2017

Knott, P.: „Antenna Engineering“, RWTH Aachen, Aachen, WS 2016/2017

Lorenz, F.: „Measuring Techniques“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort Rheinbach, WS 2016/2017

Pohl, N.: „Integrierte Hochfrequenzschaltungen für die Mess- und Kommunikationstechnik“, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, WS 2016/2017

SS 2017

Bongartz, J.: „Funktionsdiagnostik und Monitoring“, HS-Koblenz, Standort Remagen, SS 2017

Bongartz, J.: „Lasermethoden und biomedizinische Optik“, HS-Koblenz, Standort Remagen, SS 2017

Bongartz, J.: „Signalverarbeitung“, HS-Koblenz, Standort Remagen, SS 2017

Caris, M.: „Physikalisches Praktikum“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort Rheinbach, SS 2017

Bongartz, J.: „Medizinischer Gerätetechnik“, HS-Koblenz, Standort Remagen, WS 2017/2018

Bongartz, J.: „Signalverarbeitung“, HS-Koblenz, Standort Remagen, WS 2017/2018

Caris, M.: „Physikalisches Praktikum“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort Rheinbach, WS 2017/2018

Heberling, D.: „Elektromagnetische Felder 2 (IK)“, RWTH Aachen, Aachen, SS 2017

Heberling, D.: „Hochfrequenztechnik 2“, RWTH Aachen, Aachen, SS 2017

Knott, P.: „Radar Systems I“, RWTH Aachen, Aachen, SS 2017

Lorenz, F.: „Risikomanagement in der Supply Chain“, EUFH Köln, Köln, SS 2017

Lorenz, F.: „Physics“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort Rheinbach, SS 2017

WS 2017/2018

Pohl, N.: „Integrierte Digitalschaltungen“, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, SS 2017

Cerutti-Maori, D.: „Signal Processing for Radar and Imaging Radar“, Vorlesung und Übungen, RWTH Aachen, Aachen, WS 2017/2018

RWTH Aachen, Aachen, WS 2017/2018

Lorenz, F.: „Measuring Techniques“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort Rheinbach, WS 2017/2018

Cerutti-Maori, D.: „Radar Systems and Measurements“, Vorlesungsmodul innerhalb der Vorlesung „Raumfahrtrückstände“, TU Braunschweig, Braunschweig, WS 2017/2018

Pohl, N.: „Integrierte Hochfrequenzschaltungen für die Mess- und Kommunikationstechnik“, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, WS 2017/2018

Dankmayer, A.: „Aerospace Remote Sensing“, TU Chemnitz, Chemnitz, WS 2017/18

Pohl, N.: „Elektronik 1: Bauelemente“, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, WS 2017/2018

Ender, J.: „Radar – Techniques and Signal Processing I“, Universität Siegen, Siegen, WS 2017/18

Knott, P.: „Antenna Engineering“, RWTH Aachen, Aachen, WS 2017/2018

Knott, P.: „Radar Systems II“,

Promotionen

Brisken, S.: „Motion Estimation and Imaging with Multistatic Inverse Synthetic Aperture Radar“, Naturwissenschaftlich-Technisches Institut der Uni Siegen, Dr.-Ing.

Dallmann, T.: „Polarimetric Radar Cross-Section Imaging“, Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH-Aachen, Dr.-Ing.

Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

Correas Serrano, A.: „Compressed sensing based high-resolution DoA estimation for automotive radar with real measurements“, Technical University of Cartagena, Master of Science

Rodriguez Ferreiro, C.: „Modeling and analysis of micro-doppler signatures for radar target classification“, University of Vigo, Bachelor of Science

Böckler, J.: „Untersuchung dielektrischer Stabantennen zur Anwendung in Bodendurchdringungsradarsystemen“, RWTH Aachen University, Master of Science

Brück, N.: „Verfahren zur Abbildung longitudinal bewegter Objekte für ein MIMO-Radarsystem“, RWTH Aachen, Master of Science

Buckow, S.: „Hochauflösende Umgebungsdarstellung mit schwenkbarem Millimeterwellenradar“, Hochschule Koblenz, Bachelor of Science

Emons, F.: „Entwurf, Optimierung und messtechnische Verifikation eines mehrstufigen gepulsten 300 Watt Verstärkers für Radarapplikationen im S-Band“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Master of Engineering

Grenz, O.: „Verlustoptimierung einer breitbandigen, doppelt polarisierten CBSP-Antenne im L-Band mit Betrachtung der Kreuzpolarisationskopplung, Fertigungsaspekten und Phased-Array Tauglichkeit“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Master of Engineering

Hansen, S.: „Entwicklung eines Ultra-Breitband FMCW Radar Front-End zur Materialcharakterisierung durch Ellipsometrie im W-Band“, Technische Universität Hamburg, Master of Science

Jukanti, R.: „Development and realisation of a MATLAB radar controller for a coherent MIMO based radar with an integrated digital beamforming processor“, RWTH Aachen, Master of Engineering

Kubach, A.: „Entwurf und Analyse einer mittels 3D-Druckverfahren gefertigten Lüneburg-Linse“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Master of Science

Marten, A.: „Movement Trajectory Reconstruction Based on 3D MIMO Radar Data for High Resolution Synthetic Aperture Imaging“, TU Hamburg-Harburg, Master of Science

Müller, P.: „Entwicklung und Implementierung einer CameraLink-Schnittstelle zur Integration eines THz-Sensors in ein inlinefähiges Multisensorsystem“, TH Köln, Bachelor of Science

Nair, S.: „Realization of a coherent low noise receiver modul for the integration in an imaging Ka band MIMO radar“, RWTH Aachen, Master of Engineering

Nulwalla, D.: „Untersuchung Integrierbarer Transponder Antennen für ein Maritimes Such und Rettungssystem basierend auf einem harmonischen Radar“, RWTH Aachen University, Master of Science

Öztürk, O.: „Realisierung eine s2-Achsenpositionierers für luftgestützte Radarsysteme unter Verwendung von 3D-Strukturen“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Bachelor of Engineering

Rama, J.: „Theoretische Synthese der SAR-Trajektorie eines 3D-Radarscanners im Millimeterwellenbereich“, TU Berlin, Master of Science

Rausch, F.: „Entwicklung, Implementierung und Testen einer modularen Multisensorsuite zur generischen Datenfusion“, Hochschule Koblenz, Master of Science

Schmitz, L.: „Konzeption, Simulation und Design eines gepulsten, zentralen Abwärtsmischmoduls für ein luftgestütztes Ka-Band Radarsystem“, Hochschule Koblenz, Bachelor of Engineering

Schorlemer, J.: „CAD-Entwurf eines abstimmbaren Millimeterwellenoszillators bei einer Mittenfrequenz von 50 GHz in einer modernen SiGe-BiCMOS-Technologie“, Fachhochschule Südwestfalen, Bachelor of Science

Singu, K.: „Investigation of selective microwave heating of lossy dielectric materials with the aid of multiphysics simulations“, Universität Kassel, Master of Science

Vorst, D.: „Schaltungskonzepte zur drahtlosen Energieübertragung“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Standort: St. Augustin, Bachelor of Engineering

Weishaupt, F.: „Aufbau und Evaluierung eines MIMO Radarsensornetzwerks sowie signaltheoretische und experimentelle Validierung“, RWTH Aachen, Master of Engineering

Witzler, S.: „Entwurf und Konstruktion des Antennensystems einer MIMO-Radarzeile zur hochauflösenden transmittiven Abbildung von Produktionsgütern auf Bandstraßen“, Hochschule Koblenz, Bachelor of Science

Dozententätigkeiten bei Fachseminaren und Beratungsveranstaltungen

- Bertuch T.:** „Metamaterialien“, Space InnoSenT Technical Meeting (ITM), Elfershausen, 15.11.2017
- Bertuch, T.:** „Dispersion Properties of Periodically Loaded Parallel-Plate Waveguides, Analysis and Leaky-Wave Antenna Application“, European School on Antennas (ESoA) Course on Leaky Waves and Periodic Structures for Antenna Applications, 26.-29.4.2017
- Caris, M.:** „Millimeterwellen und THz-Warnsensorik“, CCG-Seminar SE 3.11, Warnsensorik und Gegenmaßnahmen, 15.11.2017
- Cerutti-Maori, D.; Sommer, S.:** Workshop „SAR“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14-21.7.2017
- Cerutti-Maori, D.:** „Space surveillance and reconnaissance with radar“, Space situational awareness course, Lehrgang Weltraumlagezentrum, October 2017.
- Danklmayer, A.:** „Konforme und Strukturintegrierte Antennen“, Vortrag im Rahmen des Laufbahnausbildungslehrgangs für den höheren technischen Dienst in der Fachrichtung Informationstechnik und Elektronik am Bildungszentrum der Bundeswehr in Mannheim, 12.6.2017
- Danklmayer, A.:** „Radarstreuung und Wellenausbreitung“ plus Tutorial, CCG Seminar SE 2.01, Grundlagen der Radartechnik, 17.5.2017
- Danklmayer, A.:** „Workshop on Polarimetric SAR“, International Summerschool on Radar/SAR, 19.-20. 07.2017
- Ender, J.:** „Cognitive Radar and CS with Radar“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14.-21.7.2017
- Heberling, D.:** „Antennas and Hardware Aspects“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14.-21.7.2017
- Klare, J.; Biallawons, O.; Cerutti-Maori, D.:** „MIMO Radar for UAV Detection“, Workshop SF-02 on Radar Based Detection of Drones, European Microwave Week (EuWM) 2017, 8.-13.10.2017
- Kuschel, H.:** „Passive Radar History and Fundamentals“, und „Passive Radar Applications“, NATO SET 243 Lecture Series on Passive Radar Technology, 6.9.- 10.11.2017, USA , IT, PL
- Matthes, D.; Worms, J.:** „Überblick Fraunhofer FHR und Abteilung PSR“, „Radar-EloKa ‘Heute und in Zukunft‘“, „Radar ECM/ ECCM – Allgemeine Aspekte“, „Radar ECM – Stör- und Täuschverfahren gegen moderne Radarsysteme“, „Radar-EloKa Tutorial“, für Zentrum Luftoperationen Bw, 25.09.2017
- Schumacher, R.:** „Nichtkooperative Ziel-Identifizierung und ATR“, „Passives Radar“, und „Meterwellenradar zur Detektion RCS-reduzierter Ziel“, CCG-Seminar SE 2.14, Radar-, VIS- und IR-Signaturen, Technik und Anwendungen, 30.11.2017
- Turso, S.:** Workshop „Radar system design including antenna front-end aspects“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14-21.07.2017
- Weiß, M.:** „Radar Fundamentals“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14.-21.7.2017
- Wojaczek, P.; Kuschel, H.:** Workshop „Bistatic Radar – A work in progress“, 9th International Summer School on Radar/SAR, Remagen, 14.-21.7.2017

GREMIENTÄTIGKEITEN

Brüggenwirth, S.:

- International Radar Symposium (IRS) 2017, Prag: Chairman- und Reviewer
- IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, Germany Chapter: Secretary
- RADAR-CapTech, European Defense Agency: German Government Expert

Cerutti-Maori, D.:

- International Conference on Radar Systems 2017, Belfast: Technical Programme Committee Mitglied
- International-Agency Space Debris Coordination Committee: Nationale Vertreterin in der Working Group 1 (Measurements)
- International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2017: Technical Review Committee

Cristallini, D.:

- NATO-Set 242 PCL on Mobile Platforms: Co-Chair
- IET International Conference on Radar Systems 2017, Belfast: Technical Programme Committee
- European Radar Conference (EuRAD) 2017: Technical Programme Committee
- IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES) 2017: Technical Programme Committee

Danklmayer, A.:

- International Union of Radio Science Wave Propagation and Remote Sensing: Mitglied der Kommission
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2017: Technical Review Committee

- German Microwave Conference (GeMiC) 2017: Technical Review Committee
- International Radar Symposium 2017: Technical Program Committee
- International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2017: Technical Review Committee
- VDE-ITG – Fachausschuss 7.5 Wellenausbreitung: Mitglied
- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V.: Mitglied im Fachausschuss für Radartechnik

Ender, J.:

- International Radar Symposium 2017: Technical Program Committee
- European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR) 2018: Technical Program Board
- Mitglied im Rat der DGON (Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation)
- Fellow des IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers)
- VDI-ITG Fachbereich 7: Fachbereichsleiter HF-technik

Heberling, D.:

- ITG-Fachausschuss 7.1 „Antennen“: Vorsitzender
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2017, Paris: Mitorganisator, Mitglied des Steering Committees
- Zentrum für Sensordysteme (ZESS) 2017, Siegen: Wissenschaftlicher Beirat
- Antenna Measurement Technique Association (AMTA) 2017, Atlanta: President
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) : Fachkollegiat

Klare, J.:

- International Radar Symposium (IRS) 2017: Mitglied des Technical Program Committee
- IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology(ICARES): Mitglied des Technical Program Committee
- International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), Yogyakarta, Indonesia, 2017: Mitglied des Technical Program Committee

Knott, P.:

- Informationstechnische Gesellschaft (ITG), Fachgruppe 7.1 Antennen: Stellvertretender Vorsitzender
- IEEE Microwave Theory and Techniques (MTT) / Antennas and Propagation (AP) Joint Chapter, Executive Committee: Chair
- Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) e.V.: Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat, Vorsitzender Fachausschuss Radartechnik
- European Radar Conference (EuRAD) im Rahmen der European Microwave Week (EuMW) 2017, Nürnberg: Secretary

Kuschel, H.:

- NATO-Set 195 DMPAR verification of short term solution: Chairman
- NATO-Set 242 PCI on mobile platform : Chairman

Leushacke, L.:

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

Matthes, D.:

- NATO-SCI 281 Solutions Advancing next Generation Radar Electronic Attack: Chairman

Nüßler, D.:

- Optical Characterization of Materials (OCM) 2017: Program-Committee

Nuncio Quiroz, E.A.:

- International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS) 2017, Delft: Program Committee

Pohl, N.:

- European Radar Conference (EuRAD) 2017: Technical Program Committee Chair
- VDI Fachkonferenz "Sensoren für mobile Maschinen": Konferenzleitung

Uschkerat, U.:

- DEA 1670 Counter Mine: Projektmitglied
- EDA-RFST: National Expert
- NATO-SET 208 Signal Processing for Implementation in Hand-Held Multi-Sensor Ground Penetrating System 2017: Co-Chair

Vaupel, T.:

- International Conference on Broadband Communication (BCWSP), Wireless Sensors and Powering 2017, Jakarta: Mitglied Technical Program Committee

Weinmann, F.:

- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2017, Paris: Technical Review Committee

Weiß, M.:

- European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR) 2018: Executive Board-Mitglied, Technical Chair
- 6th PCL Focus Days 2017, Wachtberg: Technical Chair
- NATO-SET 235 Radar and SAR Systems for Airborne and Space-based Surveillance and Reconnaissance: Lecture Series Director and Lecturer
- IET Signal Processing Magazine: Editorial Mitglied
- IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS): Program Committee Member
- IRS 2017, Prag: Program Committee Member
- Radar Conference (RadarConf17) 2017, Westin Seattle: Committee Member
- European Microwave Week (EuMW) 2017, Nürnberg: Program Committee Member
- NATO-Set 236 Design and Analysis of Compressive Sensing Techniques for Radar and ESM Applications: Compressive Sensing Experte

Worms, J.:

- IET International Conference on Radar Systems 2017, Belfast: Technical Program Committee

AUSZEICHNUNGEN

Gracheva, V.: Dissertationspreis 2017 der ITG für ihre Dissertation „Multichannel Analysis of Medium Grazing Angle Sea Clutter for Airborne Microwave Radar Systems“

Lambert, O.: AFCEA Studienpreis 2017, zweiter Platz für seine Masterarbeit „Adaption und Implementierung von systeminhärenten HF-Charakterisierungsmethoden für ein nach dem SDR-Prinzip arbeitendes Empfangsmodul für ein Phased-Array-Radar“

Pohl, N.: International IHP „Wolfgang Mehr“ Fellowship Award 2017

Rahlf, B.: Jahrgangsbester Feinwerkmechaniker-Azubi in der Innung Bonn-Rhein-Sieg

Vaupel, T.: Best Paper Award für „Application of a TSMFM Planar-3D Fast Integral Equation Solver for Surface Wave Characterization of Antenna Arrays“ auf der BCWSP 2017 Conference in Jakarta, Indonesien

VERANSTALTUNGEN

Tagungsorganisation

Workshop „Radartechnologie zur UAV-Detektion“, 14.03.2017, Wachtberg

„PCL-Focus Days“, 21.-23.5.2017, Wachtberg

„Wachtberg-Forum“, 22.6.2017, Wachtberg

„Kuratoriumssitzung“, 23.6.2017, Wachtberg

„Tag der offenen Tür 2017“, 25.6.2017, Wachtberg

„International Summer School on Radar/SAR“, 14.-21.07.2017, Remagen

„EDA-Workshop on Radar Signatures and EM Benchmarks“, 7.11.2017, Brüssel

Beteiligung an Messen und Fachausstellungen

Fraunhofer FHR-Stand bei der 7th „European Conference on Space Debris“, 18.-21.4.2017, Darmstadt

Beteiligung am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Vision bei der „Control“, 9.5.-12.5.2017, Stuttgart

Pressekonferenz mit Ausstellung zum Förderprogramm „Forschung für die zivile Sicherheit“ vor Vertretern des BMBF und BMI mit den Konsortialpartnern: Vorstellung des Projektes: „Radar-Warn- und Informationssystem für Anwendungen im Katastrophenschutz, (RAWIS)“, 5.7.2017, Berlin

Beteiligung am Fraunhofer-TNO Gemeinschaftsstand bei der „European Microwave Week (EUMW)“ 2017, 08.-13.10.2017, Nürnberg

Beteiligung am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Space bei der „Space Tech Expo Europe“, 24.-26.10.2017, Bremen

Beteiligung am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Verkehr bei der „Hypermotion“, 22.11.2017, Frankfurt

Beteiligung am Gemeinschaftsstand des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) auf der „Productronica“, 14.-17.11.2017, München

Beteiligung am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft beim „Absolventenkongress“, 23.-24.11.2017, Köln

Fraunhofer FHR-Stand bei der „Bonding“, 6.12.2017, Aachen

PRESSESPIEGEL

Datum	Titel	Medium
19.01.17	Mobil Gefahrenbereiche erkennen	Rheinische Post
04.03.17	Die unendlichen Weiten der Mathematik	Blick Aktuell
07.03.17	Namen und Notizen	General-Anzeiger
22.03.17	Radarforscher wollen expandieren	General-Anzeiger
29.03.17	Technologische Souveränität schaffen und ausbauen	Behörden Spiegel
04.04.17	Streubomben- international geächtet, in Syrien im Einsatz	Sueddeutsche.de
04.04.17	Besichtigung des Radoms zu gewinnen	Kölnische Rundschau
05.04.17	Einzigartige Führung durch die Labore und die Kugel zu gewinnen	Blick Aktuell
08.04.17	Einblick in die weiße Kugel	General-Anzeiger
21.04.17	Im All wirds eng	General-Anzeiger
22.04.17	Im All wirds eng	Kölnische Rundschau
24.04.17	Bildverarbeitung für das Produktionsmonitoring	Control express
27.04.17	Eingehüllt in eine Schrottwolke	Berliner Zeitung
28.04.17	Wissenschaft und Forschung zum Anfassen	General-Anzeiger
02.05.17	At London SSA conference calls for paradigm in shift in space situational awareness	Space News
09.05.17	Radar-Chip überprüft Produktionsprozesse	pro-physik
11.05.17	Fakten und Sehenswürdigkeiten	General-Anzeiger
12.05.17	Einzigartige Führung durch die Kugel	Kölnische Rundschau
13.05.17	So lassen Sie "Kugeln" schweben	Hanser-Konstruktion
22.05.17	Wachtbergforum	BehördenSpiegel
26.05.17	Die Radaranlage feiert in diesem Jahr ihren 60 Geburtstag	KE-Next.de
02.06.17	Sicherheitsmaßnahmen beim Gipfel	Galileo
03.06.17	Greifer und Laser	Süddeutsche Zeitung
04.06.17	Weltraumschrott - Kehraus im Weltraum	Süddeutsche.de
06.06.17	Fraunhofer-Institut: Bund fördert Mikroelektronik	General-Anzeiger
06.06.17	Wo Zukunft entsteht	General-Anzeiger
07.06.17	Fraunhofer-Institut Wachtberg: Bund fördert Sicherheitsforschung mit 9,3 Millionen Euro	Bonner Rundschau
07.06.17	Startschuss für Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland	Blick Aktuell

Datum	Titel	Medium
08.06.17	Geldsegen für Blick in die Zukunft	Kölnische Rundschau
26.06.17	Weltraumforscher erlauben Blick ins Radom	General Anzeiger
10.07.17	Massive Ausschreitungen in Hamburg	Behörden Spiegel
12.07.17	Projekt Rawis vorgestellt	Blick Aktuell
19.07.17	Forschungsfabrik Mikroelektronik nimmt Gestalt an	Elektroniknet
21.07.17	Terror-Gefahr durch Drohnen	Swr2
15.10.17	Gestra soll Unfälle im Weltraum verhindern	n-tv
16.10.17	Schmidtenhöhe bekommt Weltraumradar: In Koblenz wird bald Weltraum-schrott geortet	SWR Aktuell
16.10.17	Unfallschutz im Weltall	Trierischer Volksfreund
16.10.17	Unfallfrei durch den Weltraum	Märkische Allgemeine
16.10.17	Radar warnt vor Müll	Ruhr Nachrichten
16.10.17	Radar warnt vor Müll	Münstersche Zeitung
16.10.17	Radar warnt vor dem Müll	Recklinghäuser Zeitung
16.10.17	Radar für unfallfreien Weltraum	Kölner Stadt-Anzeiger
16.10.17	Neues Radar soll für einen unfallfreien Weltraum sorgen	Saarbrücker Zeitung
16.10.17	Müll schneller als eine Gewehrkegel	Siegener Zeitung
16.10.17	In Koblenz wird bald Weltraumschrott geortet	Swr
16.10.17	Schrott soll Satelliten nicht schrotten	Elektroniknet
17.10.17	Koblenzer Radar spürt Schrott im Weltall auf	Rheinzeitung
24.11.17	Wie Forscher das Weltall überwachen	Rhein Zeitung
01.12.17	Historisches trifft Modernes vor Bonner Panorama	Rhein Zeitung



STANDORTE

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

Hauptsitz und Postanschrift

Fraunhofer FHR
Fraunhoferstr. 20
53343 Wachtberg

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

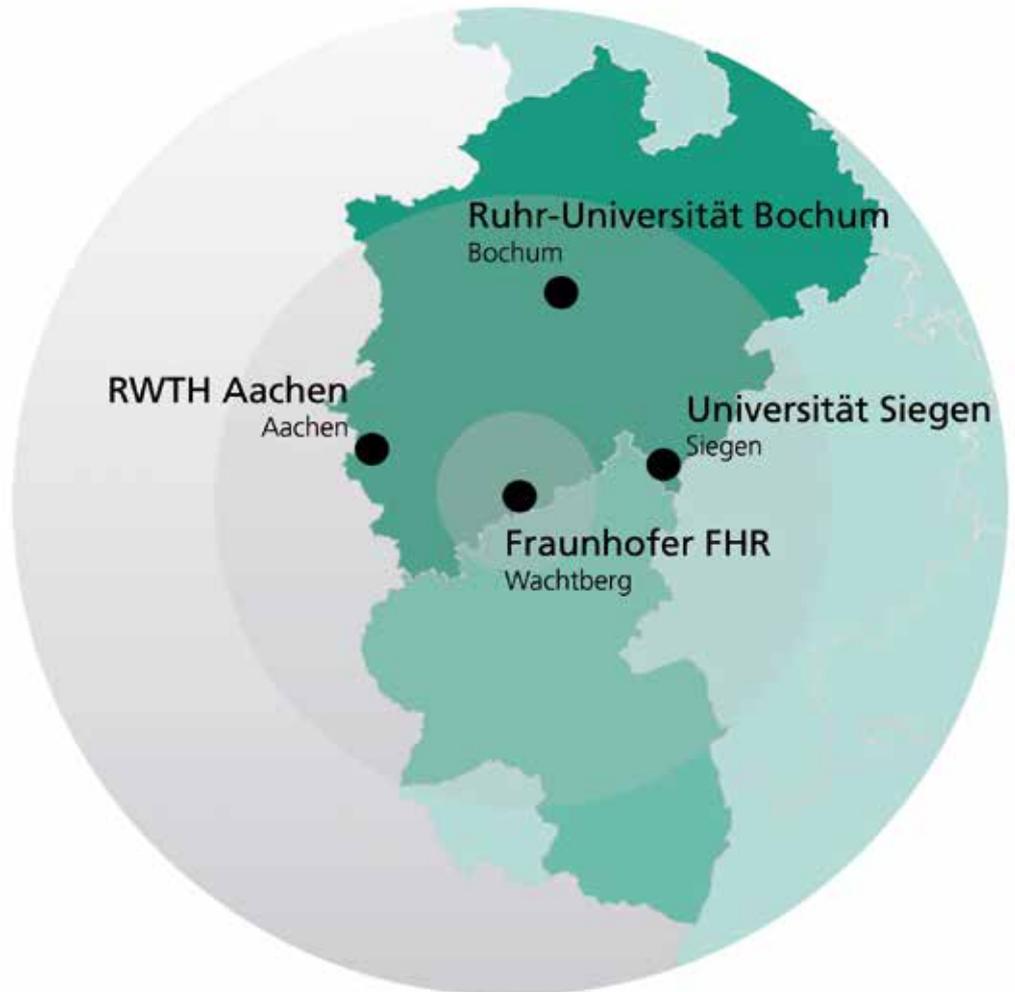
info@fhr.fraunhofer.de
www.fhr.fraunhofer.de

Institutsteil

Wachtberg-Villip

Siebengebirgsblick 22
53343 Wachtberg-Villip

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



Forschungsgruppen an Universitäten

Forschungsgruppe Aachen

Melatener Str. 25
52074 Aachen

Tel.: +49 241 80-27932
Fax: +49 241 80-22641

Forschungsgruppe Bochum

Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Tel.: +49 234 32-26495
Fax: +49 234 32-06495

Forschungsgruppe Siegen

Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen

Tel.: +49 271 740-3400
Fax: +49 271 740-4018

IMPRESSUM

Herausgeber

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

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

Bilder

© Fraunhofer FHR, außer:
S. 6: RWTH Aachen
S. 9, Abb. 2: © Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik
S. 10, Abb. 3, Abb. 5, Abb. 6, S. 12: © Hans-Jürgen Vollrath
S. 24, Abb. 1: © IHF
S. 25, Abb. 2: © Ruhr-Universität Bochum
S. 25, Abb. 3: © ZESS
S. 28, Abb. 3: © Shutterstock
S. 32/33, Text und Abbildungen: © Institution of Engineering
& Technology (IET) / Fraunhofer FHR (Reproduced by permissi-
on of the Institution of Engineering & Technology)
S. 35, Abb. 1, Abb. 2: © armasuisse / Fraunhofer FHR
S. 64, Abb. 1: Fotolia

Redaktion

Dipl.-Volksw. Jens Fiege (Leitung)
M.Sc. Hanne Bendel
Dipl.-Biol. Christiane Weber

Layout und Satz

B.A. Jacqueline Reinders

Social Media



Twitter

http://www.twitter.com/Fraunhofer_FHR



Facebook

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



Youtube

[https://www.youtube.com/channel/
UC0dHBWZqhYaqBE7R37rDnrA](https://www.youtube.com/channel/UC0dHBWZqhYaqBE7R37rDnrA)

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

Wachtberg, April 2018

