



**Fraunhofer**

**FHR**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZPHYSIK UND RADARTECHNIK FHR



**JAHRESBERICHT**  
**2011**

*Reales Triebwerk und simulierte Verteilung von Oberflächenströmen auf einem Triebwerksmodell.*

**JAHRESBERICHT**  
**2011**

# WIR SIND DIE EXPERTEN FÜR RADAR...

...in der Fraunhofer-Gesellschaft. „Radar vom Wachtberg“ ist in der Community ein geflügeltes Wort. Auch und gerade unter schwierigen Umweltbedingungen hat sich Radar als ein unverzichtbares Mittel zur Informationsgewinnung aus großen Entfernungen, aber auch im Nahbereich, bewiesen. Das FHR trägt mit seinen Forschungsarbeiten zur Sicherheit der Bevölkerung bei. Dies gilt für den Bereich „äußere Sicherheit“ zur Unterstützung der Streitkräfte genauso wie für den Bereich „innere Sicherheit“ (*Security*), d.h. den Schutz von Menschen und Einrichtungen gegenüber beabsichtigten Angriffen, und den Bereich der Abwehr unbeabsichtigter Gefahren für Menschen und Objekte (*Safety*).

Liebe Freunde und Partner des Fraunhofer FHR,

im Jahr 2011 hat das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR gemeinsam mit seinen Partnern in der Forschung innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft, der Industrie und der öffentlichen Hand erfolgreich fortsetzen können. Mit weltweit bekannten Systemen wie dem *Tracking and Imaging Radar* TIRA zur Weltraumbeobachtung oder dem flugzeuggetragenen *Phased Array Multifunctional Imaging Radar* PAMIR zur weitreichenden Erkundung der Bodenszene ist es Anlaufpunkt für viele Interessenten aus dem zivilen und militärischen Bereich.

Mit dem Empfangssystem für den *Space-Surveillance*-Radardemonstrator der ESA konnte das FHR einen großen Schritt in Richtung einer vollständigen Weltraumüberwachung machen, die das Zusammenspiel eines *Phased-Array*-Systems zur Überwachung mit einem hochauflösenden System mit Reflektorantenne für die Analyse voraussetzt. Während letztere Aufgabe das Fraunhofer-Radar TIRA erfüllen kann, besteht für das schnelle Absuchen des erdnahen Weltraums noch eine Lücke, deren Füllung man durch den FHR-Demonstrator mit realzeitlicher digitaler Keulenbildung einen Schritt näher gekommen ist.

Die Fortschritte in der Miniaturisierung von SAR-Systemen konnten besonders augenfällig in der Live-Vorführung des Millimeterwellen-SARs SUMATRA beim ersten Wachtberg-Forum im Juni 2011 demonstriert werden. Eine Direktübertragung der Daten zum Boden, verbunden mit einer schnellen SAR-Prozessierung ließen die SAR-Bilder realzeitlich auf den Bildschirmen im Zuschauerbereich erscheinen.

Dies sind nur zwei Beispiele für die innovativen Arbeiten des FHR, viele weitere finden Sie in diesem Berichtsheft.



Das FHR befindet sich mitten in der fünfjährigen Übergangsperiode, die generell für Institute, die in die Fraunhofer-Gesellschaft integriert werden, angesetzt wird. Nach zweieinhalb Jahren konnte das Institut zeigen, dass es auch in dem neu hinzugekommenen Bereich der Vertragsforschung erfolgreich ist. Im Jahr 2011 konnten die Erträge auf ca. ein Viertel des Gesamtvolumens gesteigert werden. Die gewährte Anschubfinanzierung wurde dazu genutzt, in Vorlaufforschung Demonstratoren für neue Technologien, wie die Frontendtechnologie mit digitaler Keulenformung, die Nutzung von Hochfrequenzsystemen für die industrielle Qualitätskontrolle, und die *Multi-Input/Multi-Output* (MIMO) Radarverfahren zu entwickeln.

Zusammen mit der Universität Siegen wurde das DFG- finanzierte Verbundprojekt „*Bistatic Exploration*“ erfolgreich zum Abschluss gebracht, in dem in zahlreichen Experimenten nicht nur gezeigt wurde, dass SAR-Bilder mit einem fliegenden Empfänger, der die vom Erdboden reflektierten Wellen eines Erdkundungssatelliten zur Bilderzeugung nutzt, erstellt werden können, sondern auch, dass die theoretischen Analysen durch die Experimente voll verifiziert werden konnten. Die gemeinsamen Arbeiten wurden unter anderem durch die Verleihung des Preises der informationstechnischen Gesellschaft (ITG) im VDE für die herausragende Veröffentlichung *Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR-X – Setup, Processing and Image Results* gewürdigt. Die enge Zusammenarbeit mit der Universität Siegen konnte am Ende des Jahres 2011 durch eine gemeinsame Berufung mit Einrichtung des Lehrstuhls für Hochfrequenzsensoren und Radarverfahren untermauert werden.

Im November 2011 wurde Fraunhofer-weit eine Mitarbeiterbefragung durchgeführt. Die für das FHR aufgeschlüsselten Ergebnisse liegen nun vor und dienen als Basis für eine zukunftsweisende Entwicklung von Mechanismen zur weiteren Steigerung der Effizienz und der Mitarbeiterzufriedenheit.

An dieser Stelle möchte ich allen Partnern und Förderern danken, aber auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im wissenschaftlich-technischen Bereich, die durch ihre Beiträge die eigentliche Substanz des Institutes erarbeiten, dem Verwaltungsbereich des FHR sowie dem Team, das diesen Jahresbericht gestaltet hat.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Joachim Ender, Mai 2012

*Institutsleiter:*

*Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender*

*Tel. +49 228 9435-227*

*Fax +49 228 9435-627*

*joachim.ender@*

*fhr.fraunhofer.de*

# INHALTSVERZEICHNIS

## 2 ÜBERBLICK

- 2 Wir sind die Experten für Radar...
- 4 Inhaltsverzeichnis
- 6 FHR im Profil
- 10 Ansprechpartner im FHR
- 12 Das Kuratorium

## 14 KEYNOTE

- 14 Die Geschichte von STAP

## 18 SICHERHEIT IM WELTRAUM

- 20 Beobachtung und Begleitung des Wiedereintritts von Satelliten mit TIRA
- 22 Komplementäre Sensorik für SSA
- 24 Kombinierte Verfahren zur Aufklärung von Weltraumobjekten
- 26 Europäische Weltraumüberwachung mittels Phased-Array-Sensorik

## 28 LUFT- UND RAUMGESTÜTZTE RADARSYSTEME

- 30 Realzeitliche SAR-Bildrekonstruktion
- 32 Weitreichende und Höchstauflösende Radar-Bildgebung
- 34 Bewegtzientdeckung in heterogenen Szenarien
- 36 SUMATRA – Millimeterwellen-SAR für UAV-gestützte Aufklärung
- 38 Radaraufnahmen im Landeanflug erhöhen die Flugsicherheit

<b>40</b>	<b>LAND- UND SEEGESTÜTZTE AUFKLÄRUNG</b>	<b>70</b>	<b>ELEKTROMAGNETISCHE SIMULATION UND ANTENNENTECHNOLOGIE</b>
42	Vermessung der Zielbewegung nach dem GPS-Prinzip zur ISAR-Abbildung	72	Elektromagnetische Streueffekte an Flugzeugtriebwerken
44	Identifizierung von Bodenzielen im Gefechtsfeld mittels ATR	74	Maritime Ausbreitungsbedingungen
<b>46</b>	<b>SYSTEME FÜR SICHERHEIT UND SCHUTZ</b>	<b>76</b>	<b>AUS DEM INSTITUT</b>
48	Identifikation und Klassifizierung mit dem Radarsystem SIMIC	76	Future Security
50	Sicherheitssysteme an Flughäfen unter dem Gesichtspunkt der Effizienz	78	Aus dem Institut
52	Perimeterüberwachung für zivile Anlagen und zum Feldlagerschutz	<b>80</b>	<b>FRAUNHOFER-VERBÜNDE</b>
54	Ultrabreitband Untersuchungen basierend auf Mehrarm-Spiralantennen	80	Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung
56	Überwachung von Gefahrenberichen mit MIMO-Radar	81	Verbund Mikroelektronik
<b>58</b>	<b>SENSOREN FÜR FAHRZEUGE UND VERKEHR</b>	<b>82</b>	<b>FRAUNHOFER-ALLIANZ</b>
60	Antennen für Automotive Radar	82	Allianz Vision
<b>62</b>	<b>SENSOREN FÜR DIE QUALITÄTS-SICHERUNG</b>	<b>83</b>	<b>FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT</b>
64	SAMMI setzt neue Maßstäbe	83	Überblick
<b>66</b>	<b>ENERGIE UND UMWELT</b>	<b>84</b>	<b>ANHANG</b>
68	Helioscan - Radargestützte Positionsregelung von Heliostatenfeldern	84	Auszeichnungen
		85	Veranstaltungen
		86	Ausbildung und Lehre
		91	Veröffentlichungen
		100	Gremientätigkeiten
		102	Pressespiegel
		<b>104</b>	<b>ANFAHRT</b>
		<b>106</b>	<b>IMPRESSUM</b>

ÜBERBLICK





# FHR IM PROFIL

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

## Ziele und Kompetenzen

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

Radar und verwandte Hochfrequenzsysteme bilden eine Schlüsseltechnologie im Bereich Verteidigung und Sicherheit, insbesondere im Bereich Aufklärung und Überwachung. Das FHR unterstützt das Bundesministerium für Verteidigung in diesem Bereich seit der Institutsgründung im Jahre 1957. Es war in Deutschland in zahlreichen Anwendungen der Vorreiter neuer Technologien: z.B. bei der Weltraumbeobachtung mit Radar, Multifunktionsradaren mit phasengesteuerten Gruppenantennen, adaptiven Störunterdrückung, Millimeterwellentechnik, höchstauflösenden Radar-Bildgebung, Bewegzielenerkennung mit Raum-Zeit-Filterung, Zielklassifizierung und Passiv-Radar.

Die Alleinstellungsmerkmale und Kompetenzen des Instituts fördern unter den neuen Rahmenbedingungen der Fraunhofer-Gesellschaft zusätzlich die Betätigung auf zivilen Märkten. Die Umsetzung in den neuen Geschäftsfeldern Luft- und raumgestützte Radarsysteme, Land- und seegestützte Aufklärung, Systeme für Sicherheit und Schutz, Sensoren für Fahrzeuge und Verkehr, Sensoren für die Qualitätssicherung, Energie und Umwelt sowie Elektromagnetische Simulation und Antennentechnologie liefern jeweils konkrete Beispiele für innovative Anwendungen in vielen Bereichen der Gesellschaft.

*Foto von FHR-Gebäuden  
und Weltraumbeobach-  
tungsradar TIRA in Wacht-  
berg*

## Ausstattung und Hochschul-Kooperationen

Die wichtigsten Kernkompetenzen des FHR – numerische Berechnung elektromagnetischer Felder, Höchstfrequenztechnologie und Sensor-Signalverarbeitung – ermöglichen den Entwurf, den Aufbau und den Betrieb komplexer Hochfrequenzsysteme unter einem Dach. Das ist nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit, vorwiegend von Physikern, Ingenieuren und Mathematikern, möglich.

Das Institut bietet mit der Großanlage des Weltraumbeobachtungsradars TIRA, umfangreichen Einrichtungen für analoge und digitale Leiterplattentechnologie, Messtechnik bis in den Terahertz-Bereich, mehreren echoarmen Messkammern, mit Radarsystemen ausgestatteten Fahrzeugen und einem Ultraleicht-Flugzeug zur Radarbeobachtung aus der Luft hervorragende Möglichkeiten zur Entwicklung moderner elektromagnetischer Sensorsysteme, aber auch zur Ausbildung technisch-wissenschaftlichen Personals.

In der gemeinsam geschaffenen und besetzten Professur für Hochfrequenzsensoren und Radartechnik streben die Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Universität Siegen mit ihrem Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und das Fraunhofer FHR eine weitere Intensivierung ihrer langjährigen und erfolgreichen Zusammenarbeit (u. a. in der NRW-Forschungsschule MOSES) an. Insbesondere wollen sie ihr Know-How und die Forschungsinfrastruktur auf den Gebieten Radarsensorik, Bildgebende Radarverfahren, SAR für die Fernerkundung und Umweltexploration bündeln sowie gemeinsam neue Bild- und Informationsgewinnungsmethoden wie *Compressive Sensing* erforschen und zur Anwendungsreife entwickeln. Weiterhin intensiviert werden auch die langjährigen Kooperationen mit anderen Hochschulen wie der RWTH Aachen, der Ruhr-Universität Bochum sowie mit den Hochschulen Koblenz – Rhein-Ahr-Campus Remagen und Bonn-Rhein Sieg. An den Universitäten und Hochschulen der Umgebung halten Mitarbeiter des FHR Vorlesungen, Absolventen und Doktoranden werden am Institut ausgebildet.

### Arbeitsschwerpunkte

Aufbauend auf den Kernkompetenzen bietet das Institut unter den neuen Gestaltungsmöglichkeiten in den folgenden Geschäftsfeldern wertvolle Lösungen und Ergebnisbeiträge für Kunden aus Bundeswehr und Industrie an.

Im Geschäftsfeld **Sicherheit im Weltraum** werden Radarverfahren zur Beobachtung von Objekten im erdnahen Weltraum und in der Atmosphäre entwickelt. Hauptziel ist, die Kenntnis über einzelne Satelliten und die Situation im Weltraum zu vertiefen, Risiken zu analysieren, Missionen zu begleiten oder Radarsignaturen zu gewinnen.

Das Geschäftsfeld **Luft- und raumgestützte Radarsysteme** unterstützt die militärischen und zivilen Anwender mit Radar zeitnah und bei fast jedem Wetter hoch aufgelöst mit einzigartigen Fähigkeiten bei der weiträumigen Aufklärung und Aufklärung im Einsatzgebiet. Im Vordergrund stehen die Radaraufklärung der Bodenszene mit höchstauflösender Radarbildgebung sowie die Erkennung und Ortung bewegter Fahrzeuge.

Im Geschäftsfeld **Land- und seegestützte Aufklärung** wird durch bodengebundene Radarsysteme ein wesentlicher Beitrag zur „Nachrichtengewinnung und Aufklärung“ in den verschiedensten Bereichen erbracht. Im Fokus der Arbeiten stehen innovative Radarsysteme zur Luftraumüberwachung, wie Passiv-Radar oder vernetzte Radarsysteme, ebenso wie moderne Radarverfahren zur Erkennung und Differenzierung von Fahrzeugen und Luftfahrzeugen.

Intelligente Radarsysteme, die sowohl im militärischen als auch im zivilen Kontext die Sicherheit erhöhen, werden im Geschäftsfeld **Systeme für Sicherheit und Schutz** erforscht. Gemeinsames Ziel ist in allen Anwendungsfeldern die Entwick-

lung kompakter, aktiver und passiver Sicherheitssensoren mit höherer Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig reduzierten Kosten.

Aufgabe des Geschäftsfeldes **Sensoren für Fahrzeuge und Verkehr** ist die Optimierung und Verbesserung der Nutzbarkeit von durch zunehmende Miniaturisierung und den Einsatz hochintegrierter Komponenten preiswert und kompakt gefertigten Radarsystemen, so dass sie in verschiedensten Fahrzeugtypen eingesetzt werden können.

Die Entwicklung innovativer Systeme, die die besonderen Eigenschaften von Radar für industrielle Anwendungen nutzen, ist Aufgabe des Geschäftsfeldes **Sensoren für die Qualitätssicherung**. Dazu gehören die Fähigkeiten zur Durchdringung von optisch nicht transparenten Materialien sowie zur hochauflösenden Bildgebung.

Im Geschäftsfeld **Energie und Umwelt** steht die Erforschung von Hochfrequenzsystemen im Fokus, die in diesen Bereichen zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten erschließen, vorhandene Sensoren ergänzen oder ersetzen können. Dazu gehören hochgenaue Radarmessverfahren zur Entfernungsbestimmung, die Beurteilung des Reifegrades von Biomasse aufgrund ihrer Radarreflektivität aber auch der Einsatz umweltfreundlicher Passiv-Radar-Technologie.

Im Mittelpunkt des Geschäftsfeldes **Elektromagnetische Simulation** und Antennentechnologie stehen Technologien zum Aufbau moderner Antennensysteme für Anwendungen in den Bereichen Radar, Kommunikation und Navigation. Selbstentwickelte numerische Verfahren zur Berechnung elektromagnetischer Felder bilden einerseits die Grundlage für den Antennenentwurf, andererseits dienen sie zur Modellierung des Streuverhaltens komplexer Radarziele.

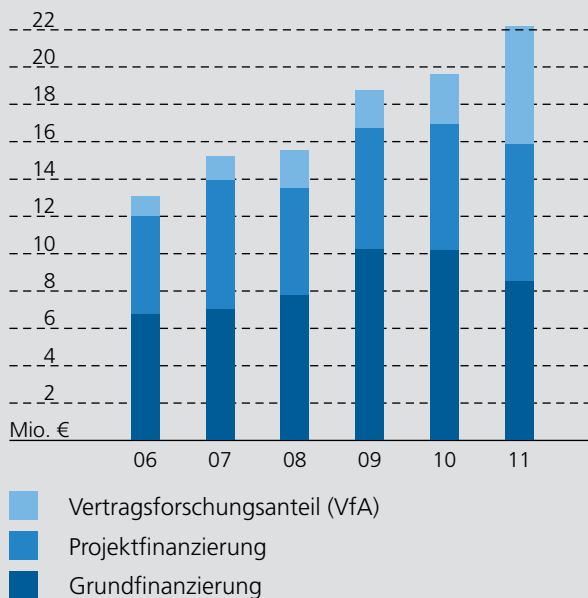
## Personal- und Budgetentwicklung

Die Entwicklung der jährlichen Erträge des FHR als Fraunhofer-Institut übertrifft erneut die Prognose. Die Vorjahreserfolge können erwartungsgemäß weiter gesteigert werden.

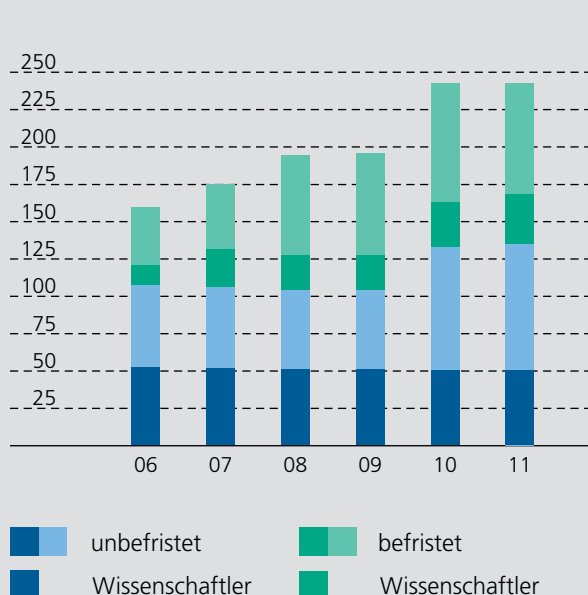
Das Budget des FHR kumuliert sich aus drei Finanzierungsquellen: Der Grundfinanzierung durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), der Projektfinanzierung aus Mitteln des Verteidigungshaushaltes und den Einkünften aus dem Vertragsforschungsbereich (VfA). Im Jahr 2011 erwirtschaftete das FHR im wehrtechnischen und im zivilen Institutsteil einen Gesamtertrag in Höhe von 22,3 Millionen Euro (Grundfinanzierung: 8,8 Mio. €; Projektfinanzierung: 7,4 Mio. €; VfA: 6,1 Mio. €). Damit konnte das Ergebnis des Jahres 2010 erneut um 2,6 Millionen Euro übertroffen werden. Die Prognose für das Jahr 2012 bestätigt die Nachhaltigkeit der Leitungsstrategie.

Zum Jahresende 2011 waren am Fraunhofer FHR insgesamt 243 Mitarbeiter beschäftigt. Nach mehreren Jahren des Aufwuchses konnte durch Konsolidierung in der Mitarbeiterentwicklung die Arbeitsqualität weiter gesteigert werden. Die Personalstruktur des Instituts zeigte einen stetig ansteigenden Anteil an Wissenschaftlern (aktuell 82). Diese wurden von Diplomanden und wissenschaftlichen Hilfskräften bei der Arbeit in den Forschungsprojekten unterstützt.

### Budgetentwicklung 2006-2011



### Mitarbeiterentwicklung 2006-2011



# ANSPRECHPARTNER IM FHR

**Institutsleiter**

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



**Antennentechnologie und elektromagnetische Modellierung (AEM)**

Dr.-Ing. Peter Knott  
 Tel. +49 228 9435-560  
 peter.knott@fhr.fraunhofer.de

**Array-gestützte Radarbildgebung (ARB)**

Dr.-Ing. Andreas Brenner  
 Tel. +49 228 9435-318  
 andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de

**Millimeterwellenradar und Höchstfrequenzsensoren (MHS)**



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

Dr. rer. nat. Stephan Stanko  
 Tel. +49 228 9435-704  
 stephan.stanko@fhr.fraunhofer.de

Elektromagnetische Modellierung

Multifunktionale HF-Sensorik

Antennen und Front-End-Technologie

Sensornah Digitaltechnologie

MIMO-Radar und Multistatik

Mehrkanalige Signalprozessierung



Adaptive Array-Signalverarbeitung

Sensorsysteme für Sicherheitsanwendungen

MIMO-Radar und Multistatik

Millimeterwellen- und Terahertzsensoren

Bildgebende Radar-Verfahren

Radiometrie

Millimeterwellen-Radar

Algorithmik

Signaturen

**Passive Sensorik und  
Klassifizierung (PSK)**

Dr.-Ing. Joachim Schiller  
Tel. +49 228 9435-557  
joachim.schiller@  
fhr.fraunhofer.de



Passive Sensorik und elektroni-  
sche Gegenmaßnahmen

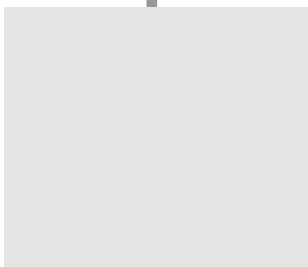
Passiver Sensorverbund

Nicht-kooperative  
Identifizierung

UWB-Radar

**Radar zur Weltraum  
beobachtung (RWB)**

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



Verfahren zur  
Weltraumbeobachtung

TIRA – Radartechnik,  
Weiterentwicklung und Betrieb

TIRA – Antennensystem  
und Infrastruktur

**Verwaltung**

Jürgen Neitzel  
Tel. +49 228 9435-240  
juergen.neitzel@  
fhr.fraunhofer.de



Finanzen

Personal

Technik

**Business Development**

Dr. rer. nat. Frank Lorenz  
Tel. +49 228 9435-399  
frank.lorenz@  
fhr.fraunhofer.de



**Interne und externe  
Kommunikation**

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



ÜBERBLICK



# DAS KURATORIUM

Das Kuratorium begleitet unsere Forschungsarbeit und berät 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. Ralph Speck**

CASSIDIAN

Friedrichshafen

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

RWTH Aachen

Aachen

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

Universität Erlangen-Nürnberg

Erlangen

**Dr. Gerhard Kahl**

CASSIDIAN

Unterschleißheim

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

Universität Duisburg-Essen

Duisburg

**Prof. Dr.-Ing. Heiner Klinkrad**

ESA / ESOC

Darmstadt

**Dr.-Ing. Walter Stammer**

LFK-Lenkflugkörpersysteme GmbH

Unterschleißheim

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

Universität Siegen

Siegen

**MinRat Norbert Michael Weber**

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg)

Bonn

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

Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG

Überlingen

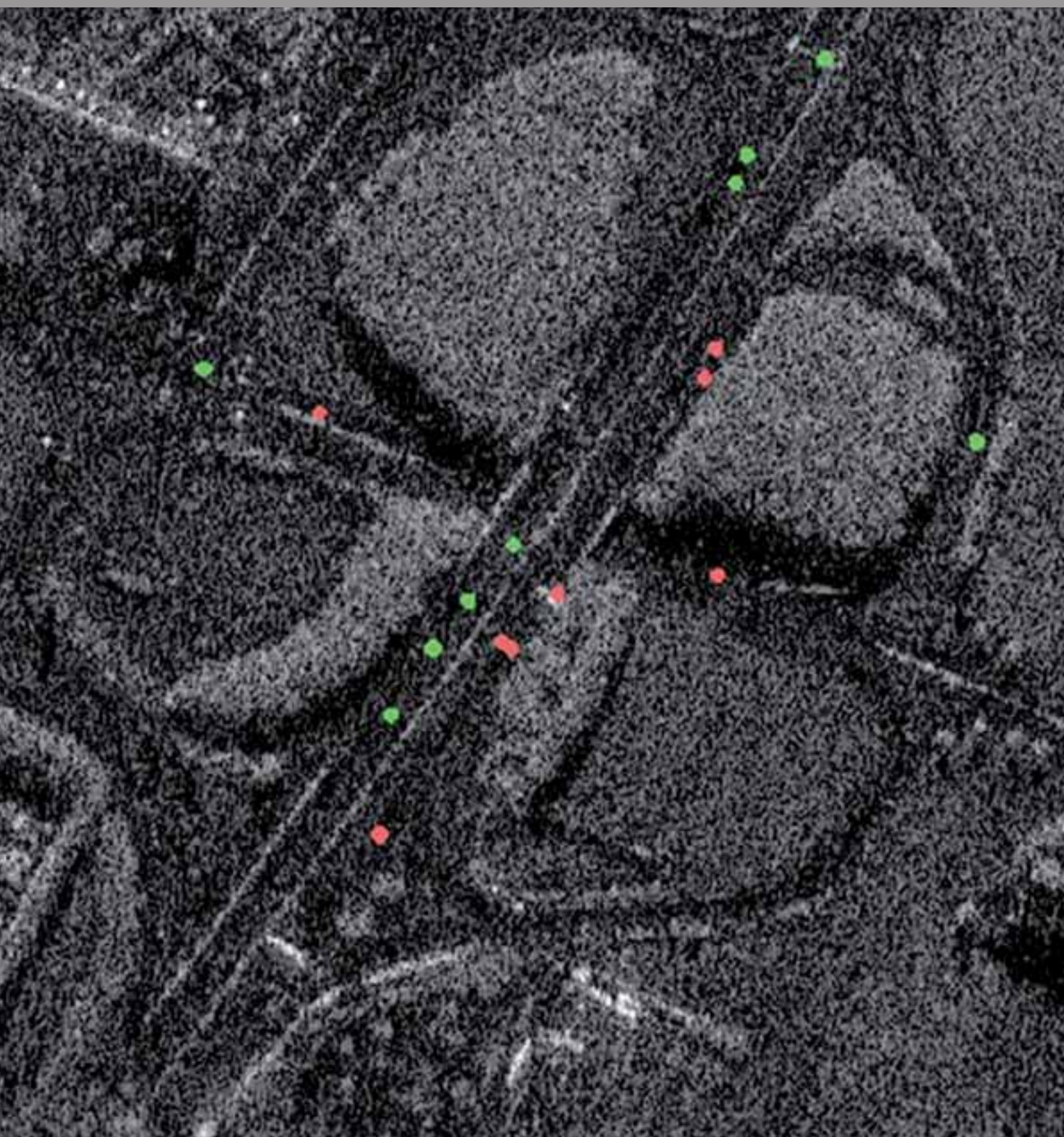
*Die Teilnehmer der Kuratoriumssitzung am 13.05.2011 auf dem Institutsgelände in Wachtberg:*

*Prof. Heberling, Prof. Gossner (Vorstand Fraunhofer), Dr. Kahl, Herr Konrad (BMVg), Dr. Stammer, Prof.*

*Sohlbach, Prof. Schmidt, Dr. Rauscher, Prof. Loffeld, Prof. Klinkrad, Herr Pappert, Prof. Ender (FHR), Prof.*

*Rohling*

KEYNOTE





# DIE GESCHICHTE VON STAP

Die Beobachtung von bewegten Objekten auf der Erdoberfläche ist von hoher militärischer wie ziviler Relevanz. STAP (space-time adaptive processing) ist eine Schlüsseltechnik zur Erdbeobachtung durch Radar. Das Fachgebiet hat im FHR langjährige Tradition.

Sowohl Sicherheitsinteressen als auch zivile Aufgabenstellungen erfordern eine Beobachtung der Erdoberfläche. Dazu können Beobachtungen von Fahrzeugbewegungen und tief fliegenden Objekten zählen, sei es um die Entwicklung in Krisengebieten aufzuklären oder um Abrüstungsabkommen zu verifizieren. Im zivilen Sektor ist die Überwachung des Straßenverkehrs sowie verkehrsreicher Seewege angestrebt. Ein Bild der Gesamtlage kann bestmöglich von einer erhöhten Beobachtungsplattform (Flugzeug oder Satellit) erhalten werden.

## Prinzip der Entdeckung von bewegten Objekten mit bewegtem Radar

Ein Puls-Dopplerradar kann über die Dopplerfrequenz die radiale Geschwindigkeit eines bewegten Objektes messen und damit zwischen bewegten und unbewegten (Clutter) Objekten unterscheiden. Befindet sich das Radar auf einer bewegten Plattform (Flugzeug, Satellit o.a.), so weist die vom Erdboden reflektierte Echoimpulsfolge eine Dopplerfrequenz auf, die proportional zur Plattformgeschwindigkeit und zum Richtungscosinus eines Bodenpunktes zum Radar ist. Bei Clutterechos besteht also eine Äquivalenz von Richtung und Dopplerfrequenz. Die Bewegung des Radars bewirkt eine „Dopplerfärbung“ der Erdoberfläche.

Im Gegensatz zu Clutterechos ist die Dopplerfrequenz eines bewegten Objekts durch die Radar-Plattformbewegung und darüber hinaus durch seine Eigenbewegung bestimmt. Ein Ziel tritt im Isodopendiagramm als Punkt mit derjenigen Dopplerfrequenz (Farbe) auf, die seiner Radialgeschwindigkeit zum Radar entspricht. Ist seine Dopplergeschwindigkeit verschieden von der des Clutterhintergrundes, so kann das

Ziel entdeckt werden. Ein Blick in die Azimut-Doppler-Ebene ist geeignet, das Prinzip der Clutterunterdrückung durch STAP zu verdeutlichen. Infolge der Äquivalenz von Doppler und Richtung verläuft das Clutterspektrum entlang der Diagonalen. Ein eindimensionales zeitliches Filter (grün) im Sinne des herkömmlichen MTI ist durch die Projektion des Spektrums auf die Dopplerachse gegeben; somit ist der Cluttersperrbereich durch die projizierte Breite der Sendekeule bestimmt, und langsame Ziele (blau) werden unterdrückt. Ein rein räumliches Filter (türkis) hat seinen Sperrbereich in Blickrichtung und macht das Radar blind. Das STAP-Filter dagegen arbeitet längs der Diagonalen und profitiert davon, dass das Clutterspektrum in Richtung der Diagonalen schmal ist. Das Filter hat daher eine schmale Clutternotch, so dass auch langsame Ziele entdeckt werden können.

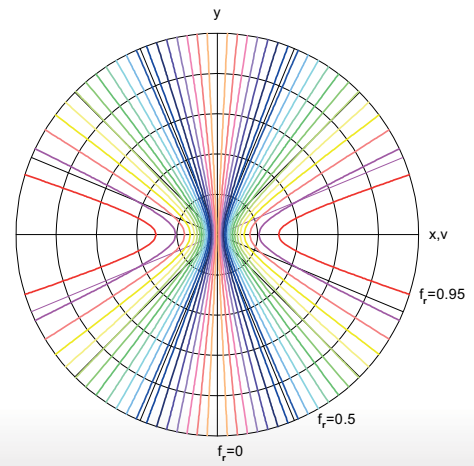
## Historisch: Displaced Phase Center Antenna (DPCA)

Das DPCA-Prinzip besteht darin, die Phasenzentren zweier oder mehrerer in Flugrichtung angeordneter Antennen elektronisch oder physikalisch zur Deckung zu bringen, so dass eine Antenne entsteht, die für die Dauer eines Echopulsintervalls im Raum fixiert ist. Man erhält zwei Echosignale, die von einer Antenne an der gleichen Position im Raum herzukommen scheinen. Durch einfache Subtraktion der Echosignale wird der Clutteranteil unterdrückt, während ein bewegtes Ziel auf Grund seiner bewegungsbedingten Phasendifferenz durchgelassen wird.

## Die erste Arbeit über STAP

Wellen sind Funktionen der Parameter Raum und Zeit, die Signalverarbeitung muss in den Dimensionen Raum und Zeit erfolgen. Es bedurfte eines kleinen Gedankensprungs, solche Techniken auf die Clutterunterdrückung im Puls-Dopplerradar zu übertragen. Statt in der schnellen Echolaufzeit arbeitet STAP in der langsamen Radar-Zeit, die durch die Echoimpulsfolge vorgegeben ist. Es ist bemerkenswert, dass in den folgenden 10 Jahren keine weiteren Veröffentlichungen aus den USA zu dem Thema STAP erschienen, vermutlich aus Gründen der Klassifizierung.

*Mit STAP-Radar können bewegte Objekte am Boden entdeckt werden. Das Bild zeigt Detektionsergebnisse von Fahrzeugen auf der Autobahn. Aufnahme mit AER II, 1996*



1

### Optimales STAP

Ein optimaler STAP-Detektor enthält als Kerngröße die inverse Kovarianzmatrix der räumlich-zeitlichen Clutter-Echodaten. In der Praxis muss diese Matrix aus Sekundärdaten geschätzt werden (Adaptation). Bei realistischen Dimensionen des Radars (Anzahl der Antennenelemente, Anzahl der Impulse) wird die Matrix für praktische Anwendung als STAP-Filter zu groß. Eine Betrachtung des Eigenspektrums einer solchen Matrix führte zu der Erkenntnis, dass die Dimension des Clutter-Subspace in der Regel klein gegen die Ordnung der Matrix ist. Hierin drückt sich der physikalische Sachverhalt aus, dass bei Clutter-rechos Richtung und Dopplerfrequenz äquivalent sind.

### STAP im Clutter-Subspace

Nach der Erkenntnis des reduzierten Clutter-Subspace begann eine lebhafte Forschungstätigkeit über STAP-Verfahren, die die Clutterunterdrückung im Unterraum bewirken. Man unterscheidet zwischen Pre-Doppler und Post-Doppler-Verfahren, je nachdem, ob die Clutterunterdrückung vor oder nach der Dopplerfilterung stattfindet. Für beide Klassen gibt es eine Reihe von Varianten, die, abhängig von der Anwendung, ihre Vor- und Nachteile haben. Allen gemeinsam ist, dass der Rechenaufwand im Vergleich zum optimalen Detektor so weit reduziert ist, dass ein Radarbetrieb in Realzeit möglich ist. Eine Sonderform bilden die DDD (direct data domain)-STAP-Verfahren, die unter Umgehung der aufwändigen Statistik aus den Daten eines Entfernungskrements die Clutterunterdrückung bewirken. Alle Subspace-Verfahren sind durch erhöhte Rechengeschwindigkeit und verminderten technischen Aufwand gekennzeichnet. Hierdurch wird Prozessierung in Realzeit möglich.

### Dreidimensionales STAP

Für bestimmte Anwendungen (Radar mit hoher Bandbreite, hot clutter) wurden dreidimensionale STAP-Architekturen untersucht. Solche Verfahren arbeiten in der räumlichen sowie in beiden zeitlichen Dimensionen (Echolaufzeit, Puls-zu-Puls).

### Knowledge-based STAP

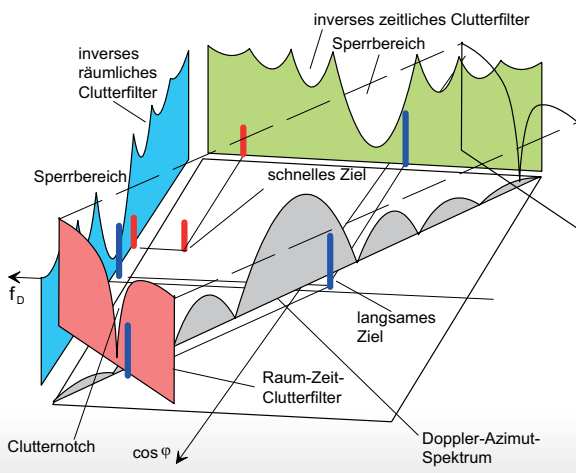
Hierbei handelt es sich um Modifikationen des eigentlichen STAP-Prinzips. Der Grundgedanke ist, dass man über Clutteranteile, die man kennt, keine Statistik (Kovarianzmatrix) zu machen braucht und die Vorkennntnis darüber in den STAP-Algorithmus einarbeitet.

### STAP-fähige Radar-Systeme

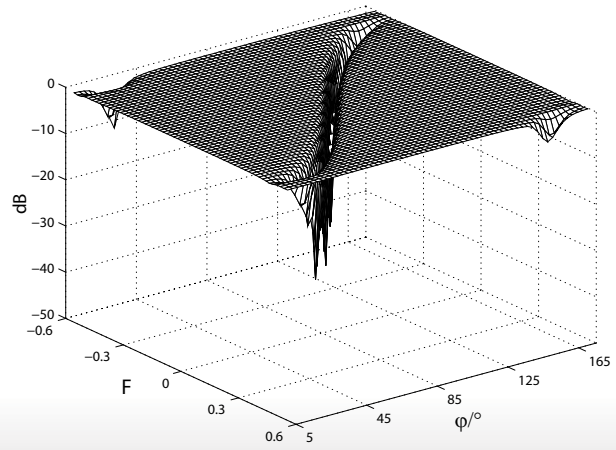
Durch luftgetragene Experimentalsysteme konnte das STAP-Prinzip experimentell verifiziert werden. Die bekannten Systeme sind zumeist SAR-Systeme mit mehrkanaliger Gruppenantenne, die Stör- und Clutterunterdrückung und andere Aufgabenlösungen ermöglicht. Einige operationelle SAR-Satelliten haben STAP-fähige Antennen und sind auf Bewegtzientdeckung eingerichtet. Ergebnisse sind bislang vom kanadischen RADARSAT 2 bekannt.

### Blick in die Zukunft

Wie aus den beiden Übersichtstabellen zu ersehen ist, hat STAP bereits eine stattliche Historie aufzuweisen und hat einen Stand erreicht, der einen Einsatz in operationellen Systemen ermöglicht. Die Arbeiten über STAP des FHR sind zum Teil an neue Radarkonzepte gekoppelt (MIMO-Radar, Compressive Sensing) oder befassen sich mit der Weiterentwicklung von bestehenden STAP-Verfahren, etwa DDD-STAP. Die Algorithmen zur Auswertung von Satellitendaten verdienen weitere



2



3

Beachtung. Verschiedene Anwendungen, z. B. die Entdeckung von kleinen Schiffen auf See, werden untersucht.

### Abschließende Bemerkung

STAP ist ein essentielles Element der Erdbeobachtung im Dienste der militärischen Sicherheit und ziviler Aufgaben. Forschung über die Anwendung und Weiterentwicklung von STAP stellt damit ein Fachgebiet dar, das zu den zentralen Forschungsgebieten des FHR gehört und auch in der Zukunft mit hoher Priorität betrieben wird.

4	1958	über Bewegungskompensiertes MTI, Anderson, USA
	1973	Erstes DPCA-Experiment, Tsandoulas, USA
	1976	Erste Veröffentlichung über slow-time STAP, Brennan, USA
	1980	Beginn Forschungstätigkeit bei FHR
	1983	Entdeckung des Clutter subspace, Klemm, D
	1983	Subspace-STAP für Realzeitbetrieb: Klemm, Ender, D u.v.a.
	1991	Joint STARS: STAP-ähnliches Verfahren im 2. Golfkrieg, USA
	1993	AER I Experiment (SAR und STAP), Ender, D
	1995	Forward looking STAP (Richardson, Hayward (UK), Klemm, D
	1995	MCARM Experiment, weltweite Nutzung der Daten, USA
	1996	AER II Experiment (SAR und STAP), Ender, D
	1996	Hot clutter mitigation, Kogon, USA
	1998	APY-6 Experiment (SAR und STAP), Gross, USA
	1998	Principles of STAP, erstes Fachbuch über STAP, Klemm, D
	1999	Bistatic STAP, Brown et al., (USA)
	2000	Weltweites Interesse an STAP (USA, Deutschland, China)
	2000	UESA-Programm (USA)
	2001	Robuste DDD-STAP-Verfahren, Sarkar, et. al., USA
	2001	Tracking mit STAP-Radar, Koch & Klemm, D
	2002	PAMIR Experiment (SAR und STAP), Ender et. al., D
	2003	Fachbuch über STAP, Guerci (USA)
	2004	Applications of STAP, 45 Autoren, Ed. Klemm (D)
	2007	TerraSAR-X, D, Satellit mit STAP-fähiger Antenne
	2007	RADARSAT 2, kanadischer Satellit mit STAP-Antenne
	2010	ISTAP für Satellitenradar, Cerutti-Maori, D
	2012	EDPCA, STAP für luft-/raumgest. Radar, Cerutti-M., D

1 Dopplerfärbung der Erdoberfläche durch bewegtes Radar. Kurven konstanter Dopplerfrequenz (Isodopen). Radar im Zentrum; Flugrichtung von links nach rechts. Farben bezeichnen qualitativ die Clutter-Dopplerfrequenz.

2 Prinzip der räumlich-zeitlichen Clutterfilterung (STAP). Veranschaulichung in der Doppler-Azimum-Ebene.

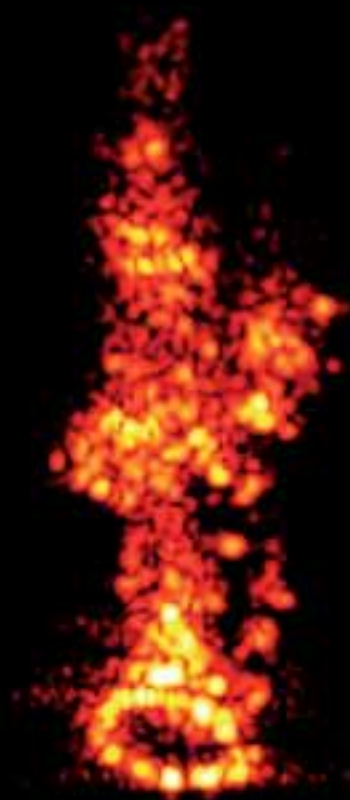
3 Doppler-Azimum-Charakteristik eines STAP-Filters (Seitensicht radar).

4 Die Geschichte von STAP auf einen Blick (grün: Beteiligung FHR).

Dr.-Ing. Richard Klemm  
Tel. +49 228 9435-377  
Fax +49 228 9435-618  
richard.klemm@  
fhr.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender  
Tel. +49 228 9435-227  
Fax +49 228 9435-627  
joachim.ender@  
fhr.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD



# SICHERHEIT IM WELTRAUM

Raumfahrt und Nutzung raumgestützter Systeme und Dienste sind aus unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Eine auch künftig sichere Nutzung des Weltraums verlangt in Deutschland und Europa verstärkte Anstrengungen zur Erfassung der Weltraumlage, um drohenden Gefahren begegnen zu können.

Auch wenn in Politik und Öffentlichkeit eine gewisse gesteigerte Wahrnehmung der Gefahren nicht zuletzt aufgrund mehrerer schwerer Rückschläge der letzten Jahre zu erkennen ist, stehen wir dem drohenden Verkehrsinfarkt im Weltraum mit seinen schwerwiegenden Konsequenzen immer noch hilflos gegenüber. Erst seit etwa Anfang des Jahrtausends sind in Europa erste konkrete Schritte zur Schaffung von Systemen zur Weltraumlageerfassung (SSA) zu verzeichnen. Im Rahmen des ESA SSA Vorbereitungsprogramms werden noch bis Ende 2012 Studien durchgeführt, um die technische Machbarkeit, Kosten und konkrete Konzeption eines europäischen Weltraumlagesystems zu untersuchen.

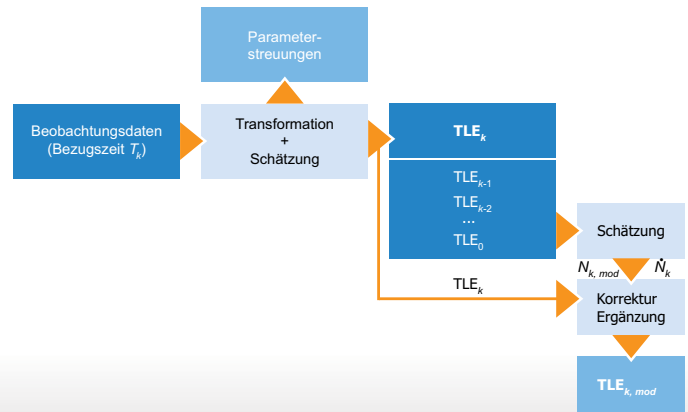
Ende 2006 hat die Bundeswehr begonnen, den Weltraum mit satellitengestützter Bodenaufklärung und Kommunikation strategisch zu nutzen. Damit entstand auch in Deutschland der Bedarf nach einem nationalen Weltraumlagesystem. Seit 2009 arbeiten Bundeswehr und DLR gemeinsam am Aufbau eines nationalen Weltraumlagezentrums (WRLageZ) in Uedem am Niederrhein. Dieses soll bis Ende des Jahrzehnts eine entsprechende nationale Kernkompetenz schaffen. Dem Radarsensor kommt im Gesamtkomplex „Weltraumlage“ eine besondere Bedeutung zu. So erfordert die kontinuierliche Überwachung des Bereiches niedriger Erdumlaufbahnen ein (oder mehrere) bodengestützte *Phased-Array*-Hochleistungsradar(e). Hier übernahm das FHR im Rahmen des europäischen Vorbereitungsprogramms eine wichtige Rolle beim Aufbau eines Demonstrators für ein monostatisches, gepulstes *Phased-Array*-Überwachungsradar. Ein solches Überwachungssystem muss zur Gewinnung der in vielen Fällen notwendigen hochpräzisen Bahninformation durch *Full-Pass-Tracking*-Radare ergänzt werden. Auch hier werden bereits grundlegende Fragestellungen, die im Sensorverbund von Überwachungs- und Verfolgungsradar auftreten, im Rahmen der deutsch-

französischen Weltraumlage-Kooperation untersucht. Aktuelle Studien belegen zwar, dass gewisse Grundfähigkeiten mit den national und in Europa derzeit verfügbaren Einrichtungen bereits vorhanden sind. Andererseits müssen aber für voll funktionsfähige, auch künftigen Anforderungen genügende Weltraumlagesysteme neuartige Verfahren, Technologien und Systemkonzepte untersucht und entwickelt werden. Besondere Herausforderungen bezüglich der Radarsensorik liegen dabei u. a. auf den Gebieten Höchstleistungsradar zur Reichweitensteigerung bei gleichzeitiger Multifunktionalität (Detektion, Verfolgung, Imaging), dreidimensionale Zielabbildung in Echtzeit mit sehr hohen Auflösungen, Verfahren zur hochpräzisen, autonomen Bahnverfolgung und -bestimmung sowie der Vermessung und Analyse der kleinteiligen Trümmerpopulation.

Im Geschäftsfeld „Sicherheit im Weltraum“ werden deshalb die spezifischen Fragestellungen und Anforderungen an Radarsysteme und -verfahren zur Zielentdeckung, -verfolgung und hochauflösenden Zielabbildung von Objekten im erdnahen Weltraum und in der Atmosphäre untersucht. Als Experimentalträger zur Unterstützung und Verifikation der Verfahrensentwicklung und zur Demonstration der operativen Einsatzfähigkeit wird dabei das in Europa einzigartige TIRA-System eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Die Rahmenbedingungen für mögliche Beiträge, mit denen das FHR insbesondere mit dem TIRA-System den Betrieb des WRLageZ unterstützen kann, werden derzeit diskutiert. Darüber hinaus werden aufbauend auf der langjährigen Expertise Aufträge von militärischen und zivilen Auftraggebern vorwiegend zu den Themenbereichen Weltraumlageerfassung und -systemkonzepte, *Space Debris*, Kollisionsvermeidung, Raumfahrtsicherheit, Missionsanalyse und -unterstützung sowie zum Satellitenwiedereintritt bearbeitet.

*Das Weltraumbeobachtungsradar TIRA dient u. a. zur Analyse von Weltraumobjekten (hier abgebildet: Marssonde Phobos-Grunt)*

*Dr.-Ing. Ludger Leushacke  
Tel. +49 228 9435-200  
Fax +49 228 9435-656  
ludger.leushacke@fhr.fraunhofer.de*



1

## BEOBACHTUNG UND BEGLEITUNG DES WIEDEREINTRITTS VON SATELLITEN

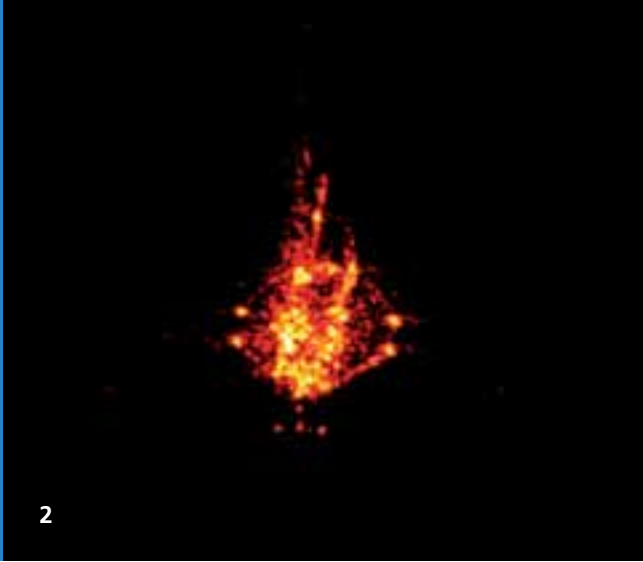
Beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre verglühen größere Satelliten meist nicht vollständig, so dass Teile davon auf die Erdoberfläche treffen. Diese Satelliten werden mit dem Weltraumbeobachtungsradar TIRA betrachtet, um die Wiedereintrittsprognosen zu verbessern und Risiken für Menschen und Güter auszuschließen.

### Hintergrund

Die Umlaufbahnen von Objekten im erdnahen Weltraum werden durch unterschiedliche Störkräfte beeinflusst. In der dicht „bevölkerten“ LEO-Region (*Lower Earth Orbit*) mit einer Bahnhöhe von 200 bis 2000 Kilometern ist das zu einem großen Anteil die atmosphärische Reibung. Diese hängt u. a. von der angeströmten Querschnittsfläche des Objekts ab und führt zu einer allmählichen Verringerung der Bahnhöhe. Aktive Satelliten kompensieren die Absenkung durch regelmäßige Bahnkorrekturmanöver. Bei nicht mehr steuerbaren, d. h. ausgedienten oder defekten Satelliten hingegen führt diese stetige Bahnabsenkung schließlich zum Wiedereintritt und Verglühen in der Erdatmosphäre.

Enthält der abstürzende Satellit Komponenten aus hochschmelzendem Material wie z. B. Titan oder wiegt mehr als eine Tonne, können Trümmerteile bis zur Erdoberfläche gelangen. Da dies eine potenzielle Gefährdung für die gesamte Bevölkerung darstellt, kann der Betreiber den Satelliten als sogenanntes Risikoobjekt einstufen. Dann wird eine internationale Wiedereintrittskampagne initiiert, meist mit Beteiligung des IADC (*Inter-Agency Space Debris Coordination Committee*), einem Gremium aus Vertretern der wichtigsten Raumfahrtagenturen. Die beteiligten Wissenschaftler errechnen während der Kampagne auf Basis aktueller Messdaten regelmäßig Wiedereintrittsprognosen, die mit abnehmender Restlebensdauer des Objekts immer genauer werden. Ziel ist es dabei, mögliche Einschlagsgebiete von Trümmern einzugrenzen und rechtzeitig betroffene Bewohner zu warnen.

Im letzten Jahr unterstützte das Fraunhofer FHR mit TIRA (*Tracking and Imaging Radar*) die Kampagnen für die russische Marssonde Phobos-Grunt, den US-Satelliten UARS und den deutschen Röntgensatelliten ROSAT in wesentlichen Bereichen.



2



3

### Einsatz des TIRA-Zielverfolgungsradars

Etwa 24 Stunden vor dem geschätzten Wiedereintritt nimmt die Gültigkeitsdauer der Bahnparameter aufgrund der zunehmenden Luftreibung rapide ab. Das Objekt muss in dieser finalen Phase nahezu lückenlos bis zum letzten Umlauf beobachtet und dabei seine Bahn möglichst genau geschätzt werden. Für den Bereich Europa kann nur das TIRA-Zielverfolgungsradar dies leisten und hochgenaue Beobachtungsdaten liefern.

Nach der Messung müssen die Daten weiterverarbeitet werden (siehe Abb. 1): Zunächst werden die Beobachtungsvektoren der Radarmessung in das allgemein übliche Format für Bahndaten (TLE: *Two Line Element*) transformiert. Das so bestimmte TLE basiert auf einer Vermessung von etwa 10% der Umlaufbahn und liefert damit nur eine ungenaue Schätzung der Drehzahl  $N$  (Anzahl der Erdumläufe des Objekts pro Tag) und keinerlei Information über deren zeitliche Änderung  $\dot{N}$ , was aber für Wiedereintrittsprognosen zwingend erforderlich ist. Daher wird durch eine zusätzliche Auswertung vorhandener, zeitlich vor dem Bezugs-TLE gewonnener TLEs der aktuelle Wert für  $N$  verbessert sowie ein Schätzwert für  $\dot{N}$  ermittelt. Dieser modifizierte TLE wird in die IADC Reentry-Datenbank eingestellt und steht weltweit für die Prognosenerstellung zur Verfügung. Beim Absturz der Marssonde Phobos-Grunt trug die hohe Qualität der TLE-Daten vom Fraunhofer FHR mit dazu bei, dass die Prognose mit dem tatsächlichen Wiedereintrittszeitpunkt sehr gut übereinstimmte.

### Einsatz des TIRA-Zielabbildungsradars

Neben der Bahngenauigkeit haben insbesondere in der Endphase des Wiedereintritts Lage, Eigenbewegung und eventuelle äußere Veränderungen des Risikoobjekts (wie z. B. der Abriss eines Sonnensegels) wesentlichen Einfluss auf dessen Restlebensdauer. Solche Informationen können durch die Analyse von hochaufgelösten, aus Messdaten des TIRA-Zielabbildungsradars prozessierten ISAR-Bildern (*Inverse Synthetic Aperture Radar*) extrahiert werden. Die bei einer solchen Bildauswertung gewonnenen Erkenntnisse können auch kurzfristig noch zu signifikanten Korrekturen von Wiedereintrittsprognosen führen.

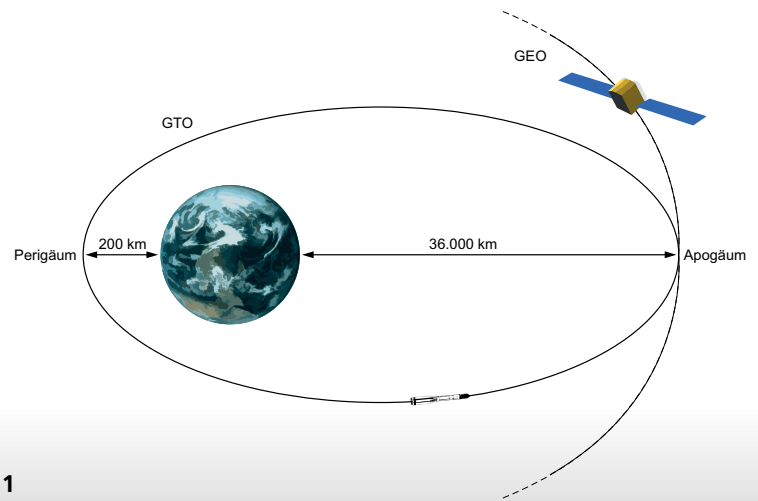
Auf einem ISAR-Bild von ROSAT zehn Stunden vor dem Wiedereintritt (Abb. 2) sind z. B. der vordere Mast und die beiden trapezförmigen Solarpaneele links und rechts noch deutlich erkennbar (vgl. mit Abb. 3), d. h. ROSAT war äußerlich noch intakt. Die angeströmte Fläche hatte sich also nicht signifikant geändert, so dass zu diesem Zeitpunkt die Prognosen für die Restlebensdauer nicht korrigiert werden mussten.

1 Weitere Verarbeitung der TIRA-Beobachtungsdaten.

2 ISAR-Aufnahme von ROSAT ca. 10 Stunden vor dem Wiedereintritt.

3 Grafik des Ende Oktober 2011 abgestürzten Röntgensatelliten ROSAT.

Dr.-Ing. Klemens Letsch  
 Tel. +49 228 9435-343  
 Fax +49 228 9435-656  
 klemens.letsch@fhr.fraunhofer.de



## KOMPLEMENTÄRE SENSORIK FÜR SSA

Das Verlangen, Satelliten auf hochelliptischen Umlaufbahnen zu vermessen, geht einher mit extremen Anforderungen an die dafür überhaupt einsetzbaren Systeme. Durch Zusammenwirken von Systemen mit komplementären Eigenschaften gelingt es, die Anforderungen an die Einzelsysteme deutlich zu reduzieren. Von besonderer praktischer Bedeutung ist die sich gleichzeitig herausbildende Fähigkeitserweiterung.

### Objekte auf hochelliptischen Bahnen – eine Herausforderung an die Systeme

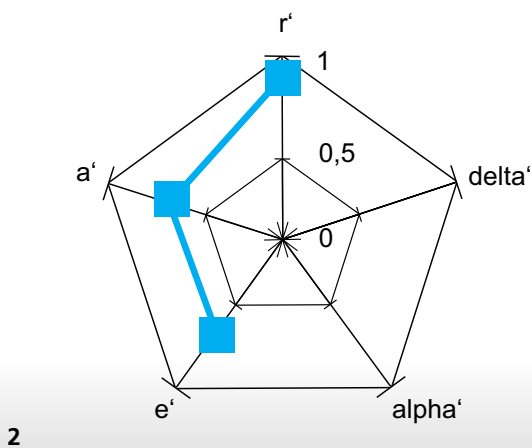
Das Wissen um die Bahn möglichst aller Objekte im Weltraum ist eine elementare Fähigkeitsforderung an jedes Weltraumlage-System (*Space Situation Awareness System, SSA System*). Notwendige Voraussetzung hierfür ist die wiederholte Vermessung der Bahnen von Satelliten und Raumfahrtrückständen (*Space Debris*). Die Vermessung von Objekten auf hochelliptischen Bahnen stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Denn, anders als bei einer Kreisbahn, variiert hier der Abstand des Objekts zur Erde zwischen dem Punkt höchster Annäherung an die Erde (Perigäum) und dem Punkt größter Entfernung von der Erde (Apogäum). Führt man sich vor Augen, dass sich Objekte auf praktisch genutzten hochelliptischen Bahnen, wie dem GTO (*Geostationary Transfer Orbit*) und dem SSTO (*SuperSynchronous Transfer Orbit*), der Erde im Perigäum bis auf einige hundert Kilometer nähern, sich im Apogäum aber bis zu 130.000 km von dieser wieder entfernen können, dann wird klar, dass Vermessungen derartiger Objekte extreme Anforderungen an die dafür überhaupt einsetzbaren Systeme stellen. Dies auch, da hochpräzise Messungen gefordert werden, um bei der Kollisionsvorhersage grundsätzlich zu berücksichtigenden Unsicherheiten verringern zu können. Letztere führten in der Vergangenheit bereits mehrfach zu sehr kurzfristig angesetzten Evakuierungsmaßnahmen auf der Internationalen Raumstation ISS, aufgrund deren LEO-Bahn kreuzender GTO-Objekte.

### Radar – Hochpräzise Entfernungsmessung im 24/7-Betrieb

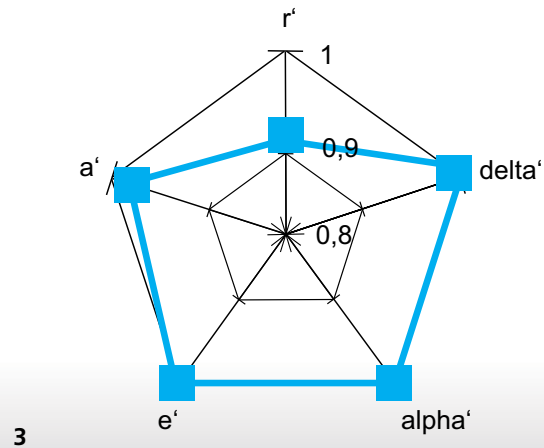
Moderne Pulsradare, wie z. B. das TIRA (*Tracking and Imaging Radar*) des Fraunhofer FHR, liefern mit präzisen Entfernungsmessungen die Grundlage für eine hochgenaue Orbitbestimmung. Aufgrund der von Wetter und Tageszeit praktisch nicht beeinflussten Funkortung im L-Band ist der Einsatz von Radar, insbesondere für die Vermessung von Objekten im LEO (*Low-Earth-Orbit*), also in niedrigen Erdumlaufbahnen, das Mittel der Wahl. Im 24/7-Betrieb können hiermit alle Passagen eines Objekts vermessen werden, solange diese nur im Sicht-



## TIRA



## TIRA & SDT



barkeitsbereich des Systems liegen. Wie alle aktiven Systeme hat natürlich auch Radar eine begrenzte Reichweite. Dies hat zur Folge, dass Objekte ab einer bestimmten Schrägentfernung vom Messsystem nicht mehr mit Radar vermessen werden können.

### Optische Systeme – Hochgenaue Winkelmessung

Tracking-Teleskope erlauben zwar keine Entfernungsmessungen, können dies jedoch durch hochgenaue Winkelvermessung teilweise kompensieren. Gleich aus einer Vielzahl von Gründen werden derartige Teleskope typischerweise aber erst bei Objektentfernungen eingesetzt, die größer als die Reichweite von Tracking-Radaren sind: Optische Teleskope erlauben nur die Vermessung von nicht im Erdschatten befindlichen Objekten und dies auch nur bei klarer Sicht, Dunkelheit am Standort des Teleskops und vorzugsweise niedriger Dynamik des zu verfolgenden Objekts.

### Radar und Optik in Synergie – Fähigkeitserweiterung

Aufgrund der sich ergänzenden Einsatzbereiche von Radar und optischen Teleskopen liegt es nahe, Radar und optische Teleskope als gemeinsame Datenquelle zur Bahnbestimmung von Objekten auf hochelliptischen Orbits zu nutzen: Radar zur Vermessung von Bahnsegmenten um und im Perigäum, optische Teleskope zur Vermessung der Bahnanteile, die außerhalb der Reichweite des Radars liegen. Hierdurch kann auch der Bahnflächenanteil vergrößert werden, für den Messwerte gewonnen werden. Dies wiederum wirkt sich positiv auf die Genauigkeit bei der Orbitbestimmung aus, wie 2011 im Rahmen einer ESA-Studie [1] gezeigt werden konnte. Darüber hinaus gelingt es, durch das Zusammenwirken von Systemen mit den o.g. Eigenschaften, die Anforderungen an die einzelnen Sensoren deutlich zu reduzieren und gleichzeitig eine Aufklärungsfähigkeit zu schaffen, die mit einem System alleine nicht mehr bereitgestellt werden könnte.

### Literatur

[1] Aivar, L., Águeda, A., Utzmann, J., Bartsch, G., et al. [2012]: SSA Radar and Optical Sensor Data Fusion for Orbit Determination of GTO and GEO Objects”, ESA GSTP study, final report

1 Geometrie hochelliptischer orbitaler Bahnen am Beispiel des GTO.  
2 Normierte Residuen bei Bestimmung von Objekt-Entfernung ( $r'$ ), azimuthaler Position ( $a'$ ), Elevation ( $e'$ ), Rektaszension ( $\alpha'$ ) und Deklination ( $\delta'$ ). Die Ergebnisse in Abb. 2 basieren auf alleiniger Bahnvermessung mit dem TIRA-System, die in Abb. 3 auf einer Vermessung im Verbund von TIRA und ESA Space Debris Telekop (SDT). Aufgetragen sind die auf das jeweilige Maximum bezogenen Werte.

Dr.-Ing. Dipl.-Inform.  
Guido Bartsch  
Tel. +49 228 9435-268  
Fax +49 228 9435-656  
guido.bartsch@  
fhr.fraunhofer.de



1

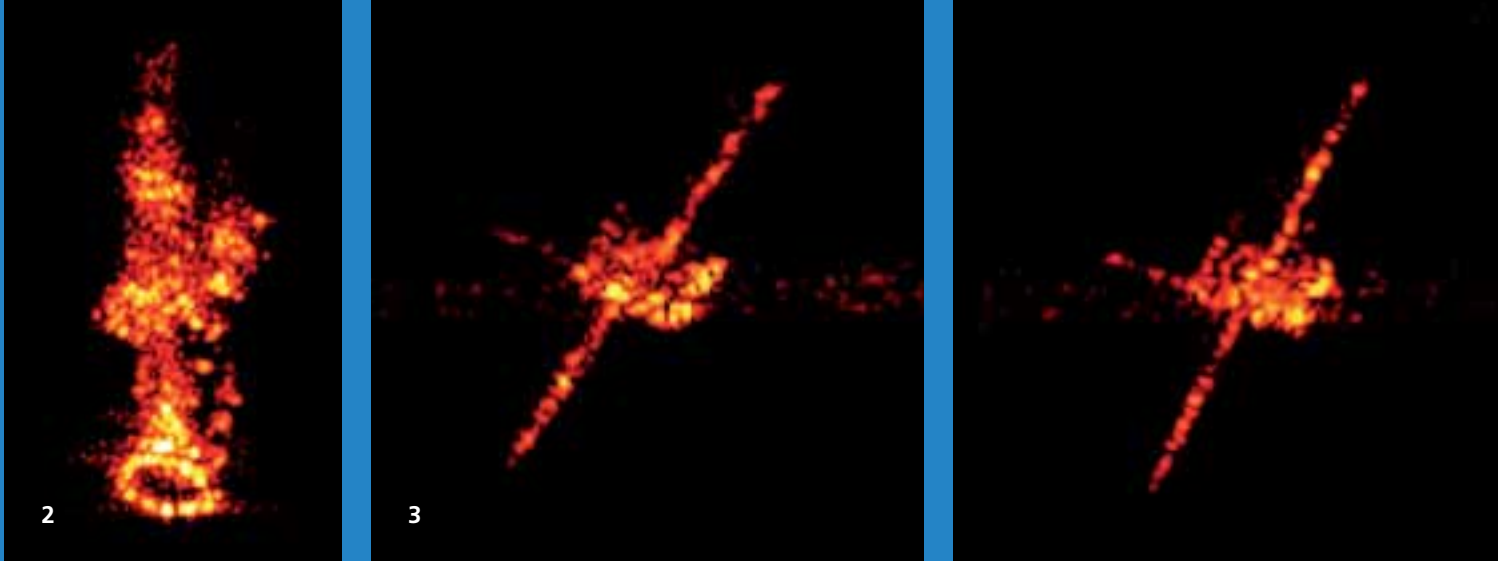
## KOMBINIERTE VERFAHREN ZUR AUFKLÄRUNG VON WELTRAUMOBJEKTEN

Mit dem Weltraumbeobachtungsradar TIRA sind durch hochpräzise Zielverfolgung und höchstauflösende Radarabbildungen vielseitige Werkzeuge zur Aufklärung des erdnahen Weltraums verfügbar. Häufig ermöglicht erst die Kombination verschiedener Verfahren eine erfolgreiche Objektanalyse.

### Aufklärung mit dem TIRA-Zielverfolgungsradar

Mit Hilfe des Zielverfolgungsradars der Großradaranlage TIRA (*Tracking and Imaging Radar*) können durch automatische Nachführung neben Position (Winkel, Entfernung) und Geschwindigkeit (Dopplerverschiebung) eines beobachteten Objekts auch Informationen über dessen Rückstreuverhalten (Echoamplitude) gewonnen werden. Bereits die Beobachtung einer Passage des Objekts genügt, um aus den gemessenen Positionen hochgenaue Bahndaten in Form so genannter Two Line Elements zu berechnen. Eine noch präzisere Beschreibung der Umlaufbahn, wie sie z. B. Kollisionsvorhersagen und die Abschätzung von Wiedereintrittsfenstern erfordern, ist durch die Auswertung der Messwerte für mehrere aufeinander folgende Passagen zu erreichen.

Da die Zeitabhängigkeit der Echoamplitude (Signatur) charakteristisch für das Rückstreuverhalten der beobachteten Objekte ist, können hieraus mittels einer Signaturanalyse wichtige Informationen gewonnen werden. Häufig lässt das Muster der Signatur Rückschlüsse auf die Art der Stabilisation zu. Die Signaturen taumelnder Objekte zeigen zumeist periodische Muster. Aus der Periodizität des Musters lässt sich dann die Rotationsgeschwindigkeit der Taumelbewegung abschätzen. Falls die Objekte eine einfache Geometrie besitzen, kann unter bestimmten Voraussetzungen deren Profil mit Hilfe der inversen Streutheorie rekonstruiert werden. Befinden sich mehrere Objekte gleichzeitig in der Antennenkeule des Zielverfolgungsradars, kann versucht werden, mittels Signaturanalyse deren Relativabstände aus den Schwebungsfrequenzen der Signatur zu bestimmen. Durch die Anwendung kohärenter Pulsserienintegration lässt sich die Palette der Aufklärungsverfahren erheblich erweitern. Bei Objekten in sehr großer Entfernung, wie z. B. der ASTRA-Gruppe im geostationären Orbit (ca. 40.000 km), erlaubt die Doppler-Hochauflösung des *High Doppler Resolution Monopulse* (HDRM) die Unterscheidung von Mehrfachzielen und auch die Querauflösung von rotierenden Objekten.



### Aufklärung mit dem TIRA-Abbildungsradar

Bildgebende Verfahren sind für die Aufklärung von zentraler Bedeutung, da Radarabbildungen wesentliche Informationen über reale Gestalt und Abmessungen der untersuchten Objekte liefern. Sie können unter anderem durch Vergleich mit Modellen zur Identifikation von Objekten oder zur Verifikation der Vollständigkeit und Funktionsfähigkeit herangezogen werden (siehe Beispiel in Abb. 1 und 2). Ebenso eignen sich Radarabbildungen zur Untersuchung des Eigenbewegungs- und Stabilisierungszustands, aber auch zur technischen Analyse unbekannter Objekte, zur Typklassifikation sowie zur Erkennung konstruktiver Änderungen bei Objektfamilien. Weiterhin bietet ein Algorithmus zur Echtzeitabbildung die Möglichkeit zur Objektanalyse schon während der Beobachtung mit dem TIRA-Abbildungsradar.

### Aufklärung durch Kombination verschiedener Verfahren

Bildgebende Verfahren bieten weit reichende Möglichkeiten, Objekte aufgrund ihrer Geometrie zu unterscheiden. Zuweilen besteht jedoch der Wunsch mehrere Objekte mit völlig oder nahezu identischer Geometrie zu diskriminieren. So besitzen Weltraumobjekte mit gleichem Verwendungszweck häufig leicht verwechselbare Strukturen, insbesondere wenn sie vom selben Hersteller produziert wurden. Nicht selten sind Objekte, die zu einer Formation gruppiert sind und einem gemeinsamen Ziel dienen, geometrisch absolut identisch (siehe Abb. 3). In derartigen Situationen liefern Radarabbildungen trotz Höchstauflösung oft nicht genügend Diskriminierungsmerkmale. Einen Ausweg hieraus bietet zumeist die Kombination des Abbildungsradars mit anderen Verfahren. So lässt sich z. B. durch Abstandsbestimmung aus den mit dem TIRA-Zielverfolgungsradar gewonnenen hochgenauen Bahndaten zeigen, dass die Objekte in Abb. 3 nicht identisch sind, sondern eine Doppelformation bilden. Ein weiteres kombinierbares Verfahren ist die Analyse der Historie aller verfügbaren Bahndaten. Sie liefert Informationen über missionstypische Eigenschaften wie Bahntyp, Lebensdauer und Häufigkeit von Manövern, die man schließlich zur näheren Klassifikation der beobachteten Objekte heranziehen kann.

Um die Palette an verfügbaren Analysewerkzeugen zu erweitern und den stetig steigenden Ansprüchen an die Aufklärungsleistung zu genügen, müssen neue Verfahren erforscht und bestehende Verfahren optimiert werden, wie z. B. die Realisierung einer Chirp-Filterbank zwecks Erweiterung des HDRM-Verfahrens auf nichtstationäre Ziele. Im Bereich des TIRA-Abbildungsradars liegt ein Schwerpunkt auf der Entwicklung von Verfahren zur dreidimensionalen Abbildung, wie beispielsweise die sequentielle interferometrische 3D-Abbildung (Multi-Pass-Interferometrie).

- 1 Modell der defekten russischen Marssonde Phobos-Grunt mit ausgeklappten Solarpaneelen.
- 2 Im Vergleich hierzu eine Radarabbildung von Phobos-Grunt, die aus TIRA-Messdaten kurz vor dem Wiedereintritt erstellt wurde. Man erkennt deutlich die ausgeklappten Solarpaneele in der Mitte und den Tankring unten.
- 3 Die Diskriminierung der mit TIRA separat beobachteten Objekte UFO-1 (links) und UFO-2 (rechts) fällt mit Hilfe von Radarabbildungen trotz Höchstauflösung sehr schwer. UFO-1 und UFO-2 könnten identisch sein oder aber auch eine funktionelle Einheit (Zwillingsatellit) bilden.

Dr.-Ing. Thomas Patzelt  
 Tel. +49 228 9435-262  
 Fax +49 228 9435-656  
 Thomas.Patzelt@  
 fhr.fraunhofer.de



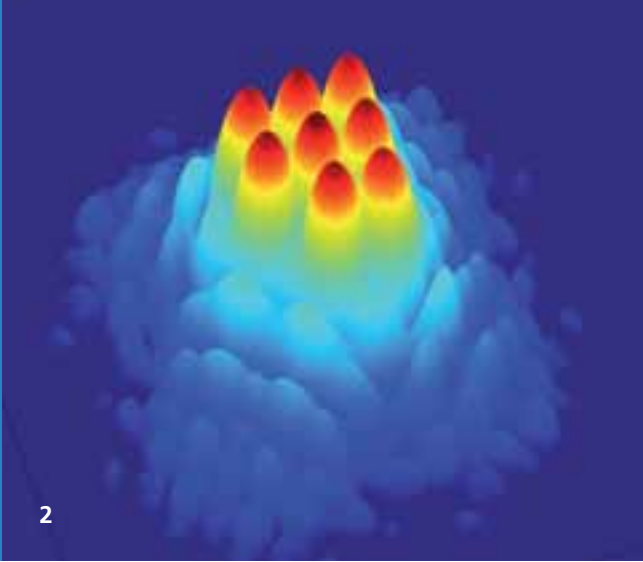
## EUROPÄISCHE WELTRAUMÜBERWACHUNG MITTELS PHASED-ARRAY-SENSORIK

Ein neues, europäisches Weltraumüberwachungssystem soll künftig vor Gefahren im Orbit schützen, indem Kollisionsgefahren frühzeitig detektiert und entsprechende Gegenmaßnahmen spontan eingeleitet werden können. Fraunhofer-Forscher entwickeln zusammen mit der spanischen Firma Indra Espacio, S.A., einen Demonstrator für ein zukünftiges *Phased-Array*-Radar zur Weltraumbeobachtung.

Das geplante System zur Weltraumlageerfassung *European Space Situational Awareness System* (ESSAS) soll eine unabhängige Nutzung des Weltraums durch Europa sicherstellen – insbesondere um die europäische Infrastruktur im Raum (z. B. Galileo) zu sichern. Von 2009 bis Ende 2011 sollten die Grundlagen für das Überwachungssystem geschaffen werden. Anhand eines *Space-Surveillance*-Radardemonstrators sollten alle wesentliche Komponenten eines zukünftigen Überwachungsradars auf *Phased-Array*-Basis entwickelt und operativ demonstriert werden. Hierzu beauftragte die Europäische Weltraumagentur ESA die spanische Radarfirma Indra Espacio, S.A. mit dem Aufbau eines Technologiedemonstrators einschließlich des operativen Radarbetriebssystems. Indra entwickelt das Sendesystem und den Radarprozessor. Das zugehörige Empfangssystem wurde von Indra im Jahr 2010 im Unterauftrag an das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR in Wachtberg vergeben.

### **Konzept des Empfangssystems mit digitalem Beamforming**

Das Empfangssystem des gepulsten Demonstrator-Radars beruht auf einer planaren *Phased-Array*-Antenne mit kreisförmiger Strahlungsapertur bestehend aus 128 Einzelstrahlern. Jeder dieser Einzelstrahler ist direkt mit einem digitalen Empfangsmodul (DRM) verbunden, welches das Empfangssignal mit variabler Verstärkung verstärkt, filtert und auf der Trägerfrequenz abtastet und analog/digital wandelt. Das digitale Abtastsignal wird im DRM einem komplexen wiederprogrammierbaren FPGA zugeführt, welches das Signal mit variabler Mittenfrequenz digital filtert, abwärts mischt und mit beliebig wählbaren *Beamforming*-Gewichten für parallele 8 Empfangskeulenrichtungen bewertet. Über ein optisches Verteilnetzwerk werden die digitalen Empfangssignale den *Beamformer*-FPGAs zugeführt und zu variablen 8 parallelen Antennendiagrammen zusammengefasst. Somit kann man die reflektierten Signale von Zielen aus maximal 8 Richtungen gleichzeitig empfangen.



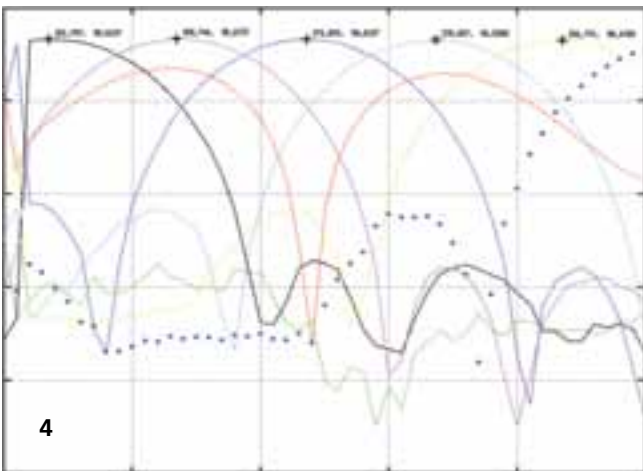
2



3

Das System wurde auf eine sehr hohe Betriebsbandbreite im L-Band ausgelegt, innerhalb derer die operationelle Mittenfrequenz beliebig ausgewählt werden kann. Frei programmierbare Analog- und Digitalfilter erlauben dennoch eine rauschoptimierte Auslegung des Gesamtsystems. Der hohe Systemgewinn, welcher sich aus Pulscompressions-, *Beamforming*-Gewinn und Prozessierungsgewinn zusammensetzt, erlaubt es, empfangene Rückstreusignale, die sich weit unter dem Eingangsräuschniveau befinden, zu detektieren.

### Realisierung des Empfangssystems



4

Die geforderte Mobilität des Systems erforderte den Einbau des Empfangssystems in einen Shelter, kombiniert mit dem Betriebsraum (siehe Abb. 3). Zur mechanischen Grundausrichtung des Blickfeldes und Polarisationsauswahl wurde die Antenne auf einen 3-Achsen-Drehstand montiert. Die Einzelstrahler und die digitalen Empfangsmodulare bilden mechanische

Einheiten (siehe Abb. 1), welche im gleichmäßigen Raster an die Antennenreflektorplatte montiert sind und somit eine regelmäßige Gruppenantenne darstellen. Abb.1 zeigt den inneren Aufbau der digitalen Empfangsmodulare innerhalb eines Beamforming-Testaufbaus. Nach Vorverstärkung und analoger Filterung wird das HF-Signal direkt dem A/D-Wandler auf der angrenzenden 12-lagigen Digitalplatine zugeführt und dort mit hoher Abtastrate digitalisiert. In dem anschließenden FPGA erfolgt die digitale Abwärtsmischung mit programmierbarer synthetisierter Mischfrequenz und steilflankigen digitalen Filtern entsprechend dem Prinzip des Software Defined Radio. Die anschließende parallele Bewertung mit variablen Gewichten für 8 Empfangskeulen führt nach Zusammenfassung aller Empfangssignale über ein 3,2 GB/s optisches Netzwerk zu variablen Empfangsdiagrammen im übergeordneten skalierbaren Beamformer, wie sie in Abb. 2 für 8 simultane Empfangsrichtungen simuliert sind. Abb. 4 zeigt die gemessenen Azimutdiagramme für 6 gleichzeitig erzeugte Summenkeulen und 2 Differenzkeulen beliebig verteilt über den Sichtbereich. Im Dezember 2011 erfolgte die Abnahme des Empfangssystems durch Indra und ESA und anschließend der Transport nach Madrid.

1 *Blick auf den Testaufbau mit 16 digitalen Empfangsmodulen.*

2 *Simulation von 8 simultan gebildeten Empfangsdiagrammen in 8 verschiedene Richtungen.*

3 *Foto des Empfangssystems untergebracht in einem Shelter (Radom demontiert).*

4 *Gemessene simultane Summen- und Differenzdiagramme.*

*Dipl.-Ing. Helmut Wilden  
Tel. +49 228 9435-316  
Fax +49 228 9435-618  
helmut.wilden@  
fhr.fraunhofer.de*

GESCHÄFTSFELD



# LUFT- UND RAUMGESTÜTZTE RADARSYSTEME

Aus der Luft und dem erdnahen Weltraum können zivilen als auch militärischen Anwendern mit Radar zeitnah und bei fast jedem Wetter hoch aufgelöst und teilweise auch weit reichend einzigartige Fähigkeiten in Überwachung und Aufklärung zur Verfügung gestellt werden.

## Scharfer Blick von oben

Künftige Aufklärung, von der weltweiten über die weiträumige Aufklärung bis zur Aufklärung im Einsatzgebiet, wird sich verstärkt der radarbasierten Bildgebung mit Hilfe luft- und raumgestützter Sensoren bedienen. Um dabei sowohl ruhende als auch bewegte Objekte zwei- und dreidimensional mit hoher Auflösung darstellen zu können, ist eine hochgenaue Berücksichtigung der Flugdynamik erforderlich. Diese Fragen werden mit dem Radarsensor PAMIR untersucht. Das System liefert Radarbilder hoher Dynamik und mit einer Auflösung unterhalb von fünf Zentimetern; es ermöglicht dreidimensionale Abbildungen urbaner Szenen mit Höhensensitivitäten bis hinunter in den Zentimeterbereich und die Abbildung bewegter Land- und Seefahrzeuge.

Die Entwicklung von miniaturisierten SAR-Systemen, die sowohl in unbemannten UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), aber auch in kleinen, oft für die spezifische Anwendung bereits verfügbaren, Kleinstflugzeugen integriert werden können, war ausschlaggebend für die Realisierung des Radarsensors SUMATRA. Das System welches im Bereich der Millimeterwellen arbeitet, zeichnet sich durch ein geringes Gewicht und ein kleines Volumen aus und bietet die Möglichkeit, die akquirierten Radardaten in Realzeit auf einer Anzeige in der Bodenstation darstellen zu können.

## Was bewegt sich da?

Die Entdeckung, Ortung und Verfolgung bewegter Objekte am Erdboden, auf See und in der Luft ist eine zentrale Aufgabe der Radaraufklärung. Diese wird jedoch vielfach durch störende Reflexionen von der Erdoberfläche, den so genannten Clutter, erschwert. Sofern das Radargerät über

mehrere parallele Empfangskanäle verfügt, lassen sich diese störenden Radarechos mit Verfahren der mehrkanaligen Signalverarbeitung unterdrücken und somit auch sehr langsam bewegte Objekte entdecken. Je nach betrachtetem Radarsystem und -modus kommen dabei ganz unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Mit PAMIR lassen sich z. B. in mehreren zehn Kilometern Entfernung noch Objekte entdecken, die sich mit Fußgängerschrittgeschwindigkeit bewegen.

Für den raumgestützten Sensor RADARSAT-2 entwickeln Fraunhofer FHR und DRDC Ottawa, Kanada, eine Fähigkeitssteigerung im Bereich Bewegtzielentdeckung. Während der Betriebsphase dieses sehr flexibel konzipierten Satelliten sind bereits erste auf Antennenumschaltung basierende Modi erfolgreich implementiert und eingesetzt worden.

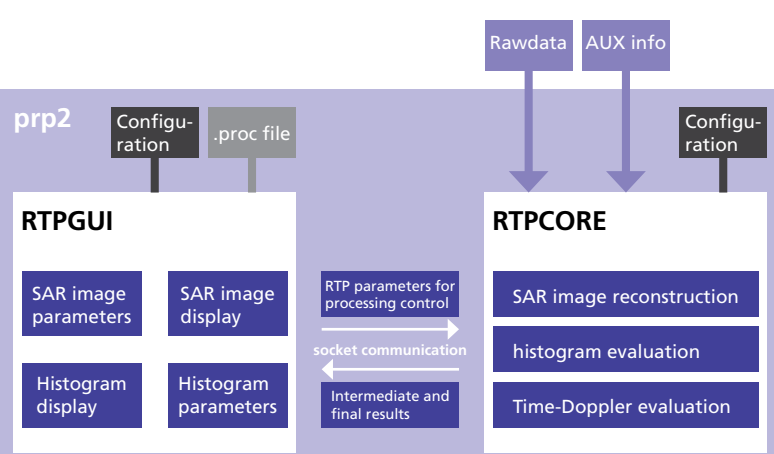
## Teamarbeit am Himmel

Monostatische Radarsensoren, bei denen Sender und Empfänger an einem Ort vereint arbeiten, repräsentieren zurzeit noch die überwältigende Mehrheit der Radarsysteme. Bi- und multistatische Konfigurationen luft- und raumgestützter Systeme mit bis zu mehreren Sendern und Empfängern an räumlich weit verteilten Positionen werden jedoch künftig zu einer immensen Steigerung der Fähigkeiten führen. Zur Lösung verschiedener noch offener technologischer und wissenschaftlicher Probleme wurden in den letzten Jahren am Fraunhofer FHR vielfältige Experimente erfolgreich durchgeführt. In einer Konfiguration mit PAMIR und dem Radarsatelliten TerraSAR-X (Astrium/DLR) konnte erstmals eine bistatische Bildgebung in Flugrichtung nachgewiesen werden, was künftig als ergänzende Landeunterstützung durch bildgebende Radarsensorik Landevorgänge erheblich sicherer gestalten könnte.

*Georeferenzierte SAR-  
Abbildung mit 19 cm Auf-  
lösung des Kreisel Betzholz  
bei Hinwil, Schweiz.*

*Dr.-Ing. Andreas Brenner  
Tel. +49 228 9435-531  
Fax +49 228 9435-618  
andreas.brenner@  
fhr.fraunhofer.de*

*Dr. rer. nat. Stephan Stanko  
Tel. +49 228 9435-704  
Fax +49 228 9435-608  
stephan.stanko@  
fhr.fraunhofer.de*



## REALZEITLICHE SAR-BILDREKONSTRUKTION

Bilder eines luftgetragenen SAR-Systems liefern wertvolle Informationen für unterschiedlichste Anwendungen. Oft ist die Aktualität der aufgenommenen SAR-Bilder von entscheidender Bedeutung. Der Einsatz von Grafikkarten mit einer Vielzahl paralleler Prozessoren ermöglicht eine Bildrekonstruktion in Echtzeit.

### Problematik und Motivation

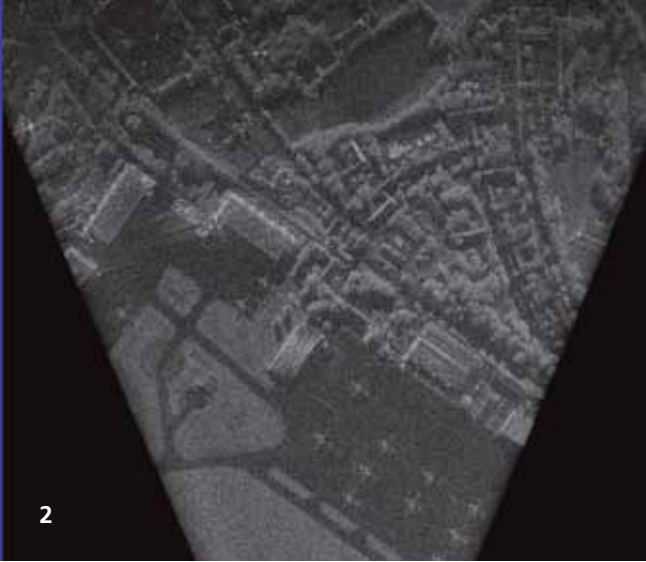
Die Abbildung einer Bodenszene mit Radarwellen durch Anwendung des SAR-Prinzips (Synthetisches Apertur Radar) hat sich zu einer wertvollen Ergänzung optischer Abbildungen entwickelt. Ihr Einsatz erfolgt sowohl im Bereich militärischer Aufklärung als auch in zivilen Bereichen, z. B. der Kartographie, der Landwirtschaft und dem Katastrophenschutz. Dabei erweist sich der Einsatz der Radartechnik insbesondere dann als vorteilhaft, wenn die optische Sicht aufgrund schlechter Lichtverhältnisse, Bewölkung oder Rauch eingeschränkt ist. Aber auch bei uneingeschränkter optischer Sicht liefert die Abbildung mit Radarwellen ergänzende Informationen.

Bei genauerer Betrachtung der Anwendungsbereiche (insbesondere Katastrophenschutz) zeigt sich, dass meistens eine schnelle Verfügbarkeit der Bilder erwünscht ist. Unter anderem können so Aufnahmen, die ein unbefriedigendes Ergebnis liefern, umgehend mit modifizierten Aufnahmeparametern wiederholt werden. Während Abbildungen mit optischen Kameras in der Regel unmittelbar verfügbar sind, muss aus den mit einem SAR-System aufgenommenen Radarechos zunächst ein Bild rekonstruiert werden. Diese Bildrekonstruktion ist mit erheblichem Aufwand verbunden und war in der Vergangenheit nur durch den Einsatz teurer Spezialrechner durchführbar.

### CUDA-Hardware

In der Vergangenheit standen der realzeitlichen Umsetzung der Bildrekonstruktion also ein enormer finanzieller Aufwand, wie auch die Anforderungen an die Abmessungen, das Gewicht und die Energieversorgung eines derartigen Systems entgegen. Daneben erforderte die Implementierung umfangreiches Spezialwissen. Mit der Einführung der CUDA-Technologie (*Compute Unified Device Architecture*) ab Ende 2006 gelang es Nvidia auf Basis von Computer-Grafikkarten eine attraktive Alternative zu derartigen Spezialrechnern zu entwickeln. So





werden CUDA-fähige Grafikkarten inzwischen in vielen Bereichen wie z. B. der Elektrodynamik, der Chemie, der medizinischen Bildgebung und der Klimaforschung eingesetzt. Auch für die Bildrekonstruktion auf Basis von Radarechos sind Grafikkarten, die eigens für wissenschaftliche Berechnungen inzwischen mit Gleitpunktarithmetik erhältlich sind, bestens geeignet. Darüber hinaus benötigen sie verhältnismäßig wenig Energie und sind kostengünstig. Ihr Einsatz ermöglicht den Aufbau marktfähiger abbildender Radarsysteme.

### Algorithmenauswahl

Die Prüfung der verfügbaren Rekonstruktionsalgorithmen zeigt, dass die Rekonstruktion im Zeitbereich die meisten Vorteile bietet. Hierbei wird jeder Radarpuls direkt nach dem Empfang verarbeitet. So können Radarechos unabhängig voneinander prozessiert werden, was von entscheidender Bedeutung ist. Im Gegensatz dazu benötigen Verfahren im Frequenzbereich die gesamten Radarechos, bevor die Prozessierung beginnen kann. Verfolgt man hier die Alternative, die Daten in mehrere Päckchen zu zerlegen und unabhängig voneinander zu prozessieren, so leidet die Bildqualität. Die Rekonstruktion jedes einzelnen Bildpunkts kann im Zeitbereich unabhängig von den anderen Bildpunkten erfolgen. Dadurch ist eine einfache und höchst effiziente Abbildung der Radardatenverarbeitung auf die Struktur der Grafikkarte möglich und es wird eine gute Ausnutzung ihrer enormen Rechenleistung erreicht. Ein weiteres Argument für die Rekonstruktion im Zeitbereich ist die Bildqualität: Ein moderner SAR-Sensor kann in Flug- und Entfernungsrichtung eine Auflösung im Sub-Dezimeterbereich erzielen und stellt damit hohe Anforderungen an den Rekonstruktionsprozess. Die Flugspur des Sensors und Höhenvariationen der Szene müssen im Rahmen der Datenverarbeitung exakt berücksichtigt werden. Verfahren, die die Rekonstruktion im Zeitbereich vornehmen, können sowohl die Flugspur als auch die Topologie am Boden einbeziehen, während Verfahren, die im Frequenzbereich arbeiten, diese Anforderung nur mit erheblichem Zusatzaufwand erfüllen können.

### Verarbeitungsgeschwindigkeit

Die CUDA-Implementierung der Rekonstruktion im Zeitbereich führt zu einem großen Geschwindigkeitsgewinn gegenüber einer C-Implementierung auf herkömmlichen CPUs. So dauert die Berechnung eines Bildes mit 1,5 Millionen Bildpunkten aus einem Datensatz von 31000 Radarechos mit je 16000 Abtastwerten auf einer Nvidia Tesla C2050 Grafikkarte lediglich 21 Sekunden. Im Vergleich dazu benötigt die Bildrekonstruktion derselben Szene auf einem modernen PC mit vier CPU-Kernen 24 Minuten. Untersuchungen mit anderen Datenfeld- und Bildgrößen zeigen ebenfalls eine 60 bis 70 mal schnellere Bildrekonstruktion.

**1** Die Implementation des Realzeitprozessors gliedert sich in die Prozesse RTPGUI und RTPCORE. Während die GUI-Applikation zur Steuerung der Verarbeitung und Ergebnisvisualisierung dient, verarbeitet der CORE-Prozess die Daten unter Nutzung der GPU.

**2** Übersichts-SAR-Bild, einer Aufnahme im Sliding Spot-Modus mit 1 Million Bildpunkten. Die Berechnungsdauer liegt unter der Aufnahmedauer.

**3** Der Pamir-Realzeitprozessor nutzt die hohe Rechenleistung von 1030 GigaFLOPS der Grafikkarte Tesla C2070 für die SAR-Bildrekonstruktion.

Dr. rer. nat.  
 Angel Ribalta  
 Tel. +49 228 9435-504  
 Fax +49 228 9435-618  
 angel.ribalta@  
 fhr.fraunhofer.de



## WEITREICHENDE UND HÖCHSTAUFLÖSENDE RADAR-BILDGEBUNG

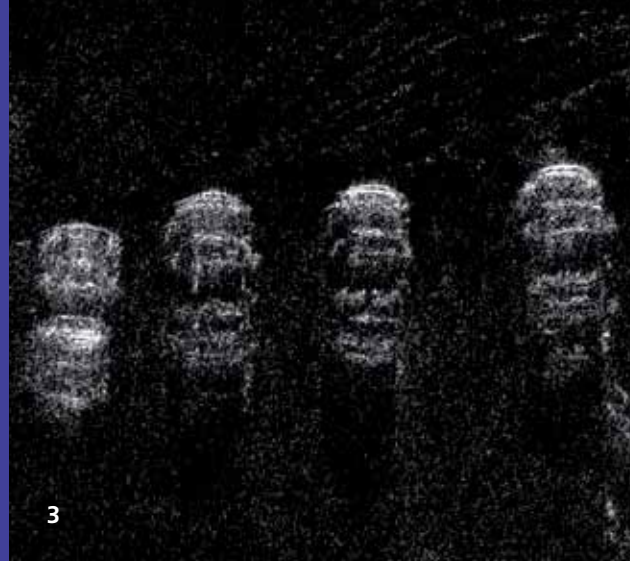
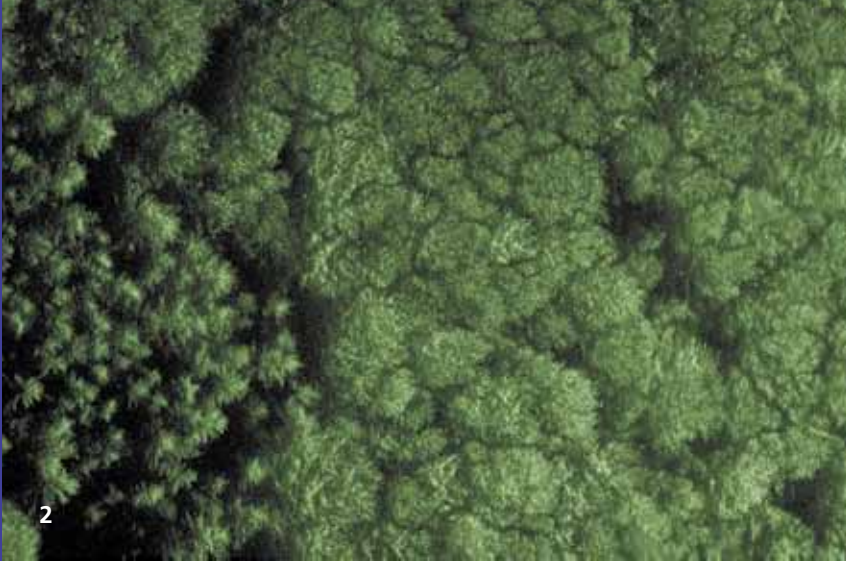
Mit dem Flugzeug getragenen Experimentalsystem PAMIR des Fraunhofer FHR konnte eine bisher unerreichte Bildauflösung von 4 Zentimetern mal 1,5 Zentimetern nachgewiesen werden.

Im Bereich der Zentimeterwellen bietet ein Fenster im elektromagnetischen Spektrum Radarsensoren die Möglichkeit, scharfe Abbildungen von Objekten in weiter Ferne selbst bei ungünstigen atmosphärischen Verhältnissen zu erzeugen. So ist es im X-Band (Wellenlänge 3 cm) z. B. möglich, aus dem erdnahen Orbit in 500 Kilometer Entfernung hoch aufgelöste Radarabbildungen zeitnah aus nahezu jeder Region unseres Planeten zu akquirieren – selbst bei Nacht und regnerischem Wetter. Diese beispiellose Fähigkeit macht einen bildgebenden Radarsensor zu einem hoch interessanten Werkzeug im Bereich der Fernerkundung im Allgemeinen, aber auch für die Überwachung kritischer Infrastrukturen, wie Pipelines oder Atomkraftwerke. Im Katastrophenfall ist er geeignet, trotz blockierter Verkehrswege eine detaillierte und quantitative Schadensanalyse fast unmittelbar zur Verfügung zu stellen.

Auf dem Weg hin zu einer umfassenden operationellen Verfügbarkeit in den verschiedensten Anwendungsfeldern sind allerdings noch einige wesentliche Hürden in den Bereichen *Phased-Array*-Antennen, Hochfrequenz-Technologie, Datenakquisition, Signalverarbeitung, Bildrekonstruktion, Szenenanalyse und Bildverstehen zu überwinden.

Zu diesem Zweck wurde am Fraunhofer FHR ein experimenteller, luftgestützter X-Band-Sensor PAMIR (*Phased Array Multifunctional Imaging Radar*) entwickelt, mit dessen Hilfe spezifische Machbarkeitsnachweise erbracht werden sollen.

Der aktuelle Ausbau ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert: Simultanbandbreite von 3.6 Gigahertz im X-Band und damit einer relativen Bandbreite von 40 Prozent, rekonfigurierbare *Phased-Array*-Antenne mit einem *True-Time-Delay*-Netzwerk und elektronischer Schwenkung über einen Winkelbereich von bis zu  $\pm 45$  Grad, 5 parallele Empfangskanäle für interferometrische Anwendungen bzw. für die Detektion und das Tracking bewegter Objekte sowie multifunktionaler und autonomer Radarbetrieb.



Im Rahmen umfangreicher Messkampagnen während der letzten Jahre wurde PAMIR mit Hilfe des Transportflugzeuges Transall C-160 der WTD in Manching (Abb. 1) zur Akquisition verschiedenster Radardaten eingesetzt und erfolgreich erprobt.

Höchstaflösende, luftgestützte Radarbildgebung der Erdoberfläche mittels einem X-Band-Sensor setzt die Kenntnis der Flugbahn bis auf wenige Millimeter genau voraus, was selbst von modernster Positions- und Lagesensorik noch nicht erreicht werden kann. Für die oben gezeigten Bilder mussten daher die fehlenden Informationen für eine Bewegungsschätzung mit mathematischen Methoden aus den Radarrohdaten selbst extrahiert werden.

Auch der bei höchstaflösender Radarbildgebung auftretenden Datenflut muss begegnet werden: PAMIR akquiriert während der Experimente bis zu einem Gigabyte Daten pro Sekunde, was nur mit modernsten Datenwandlern und Speicherkonzepten realisiert werden kann. Ein prozessiertes Radarbild kann so mehrere hundert Millionen Pixel enthalten.

In einer Messkampagne 2011 wurden über dem Fraunhofer-Gelände in Wachtberg verschiedene Radarexperimente durchgeführt, mit denen die maximal erreichbare Bildauflösung nachgewiesen werden sollte. Eingesetzt wurden so genannte *Sliding-Spotlight-Modi* mit einem Schwenkwinkelintervall von 90 Grad. Im Grenzwert konnte an punktförmig reflektierenden Objekten eine Auflösung von 4 Zentimeter mal 1,5 Zentimeter erreicht werden. Dies stellt für einen im X-Band betriebenen luftgestützten Sensor einen internationalen Spitzenwert dar.

In den oben stehenden Radarbildern sind exemplarisch zwei Arten von Objekten gezeigt: In Abb. 2 ist ein Waldausschnitt mit Laub- und Nadelhölzern mit erstaunlich viel strukturbasierter Information zu erkennen, so dass eine derartige Detaillierung z. B. für eine quantitative Forstinventur genutzt werden könnte. In Abb. 3 sind vier Pkws dargestellt. Die feine Auflösung und die Tatsache, dass pro Fahrzeug ca.  $10^4$  Auflösungszellen bzw. Pixel zur Verfügung stehen, erlauben das Erkennen der aerodynamischen Form, einiger Substrukturen der Fahrzeughülle und sogar der Außenspiegel.

Mit PAMIR konnte die Realisierbarkeit einer extrem feinen Ortsauflösung auf luftgestützten Radar-Plattformen nachgewiesen werden. Dieses Merkmal erleichtert deutlich die Interpretation von bisher eher schwierig zu entschlüsselnden, geringer aufgelösten Radarbildern und wird künftigen Anwendungen der Radarsensorik einen kräftigen Schub nach vorne geben.

**1** Linearantenne von PAMIR unter der Tragfläche der Transall C-160.

**2** Radarabbildung eines Mischwaldes.

**3** Radarabbildung von Personenkraftwagen.

Dr.-Ing. Andreas Brenner  
Tel. +49 228 9435-531  
Fax +49 228 9435-618  
andreas.brenner@fhr.fraunhofer.de



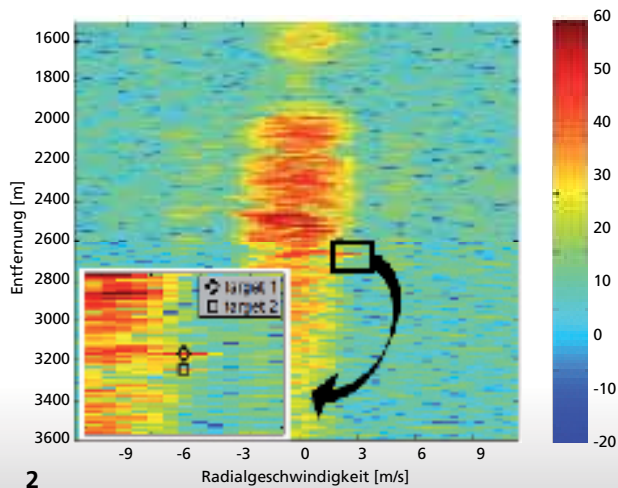
## BEWEGTZIELENTDECKUNG IN HETEROGENEN SZENARIEN

Starke Variationen der Topografie erschweren die Entdeckung bewegter Objekte am Erdboden mittels Radar. Abhilfe schafft ein neuartiges Verfahren des Fraunhofer FHR, das eine zuverlässige Detektion insbesondere im Zielbestätigungs- und Zielverfolgungsmodus erlaubt.

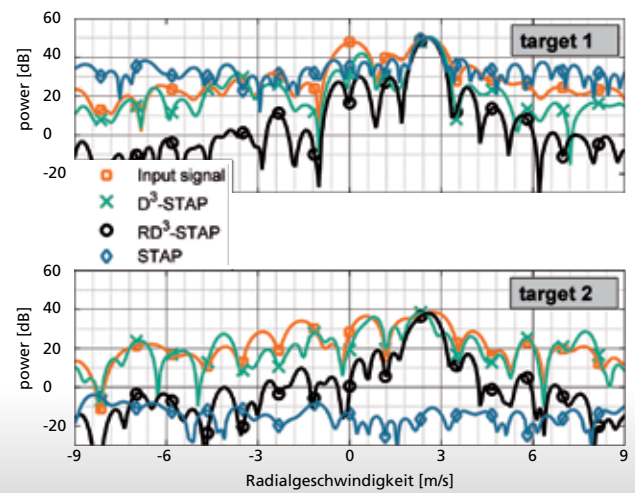
Um bewegte Objekte am Erdboden mittels Radar auch in Gegenwart störender Bodenreflexionen entdecken zu können, ist die gemeinsame Ausnutzung mehrerer Empfangskanäle und mehrerer Sendepulse erforderlich. Dies geschieht in Form einer adaptiven Raum-Zeit-Verarbeitung (*Space-Time Adaptive Processing, STAP*). Die Eigenschaften der störenden Bodenreflexionen werden hierbei aus sogenannten Lerndaten geschätzt: Radarechos, die aus der Umgebung der vermuteten Position des bewegten Objektes stammen und üblicherweise als homogen angenommen werden. Ändern sich die Eigenschaften der Bodenreflexionen in der Umgebung der vermuteten Zielposition jedoch schnell, gibt es nur wenige oder gar keine homogenen Lerndaten. Dieser Fall tritt mit großer Wahrscheinlichkeit ein, wenn sich die bewegten Objekte in der Nähe großer Bauwerke mit starken Radarechos, in Gegenden mit stark variierender Topografie oder in der Nähe anderer bewegter Objekte befinden.

In all diesen Situationen werden die Eigenschaften der störenden Bodenreflexionen meist falsch geschätzt, was die Entdeckung bewegter Objekte erschwert oder sogar unmöglich macht. Die Forderungen nach hoher räumlicher Auflösung des Radars sowie nach der Fähigkeit Bewegtziele auch in Gegenwart starker Störungen zu entdecken, verschärfen das Problem geeignete Lerndaten zu finden zusätzlich. Gleichzeitig gewinnt die Erforschung innovativer STAP-Verfahren, die eine zuverlässige Entdeckung bewegter Objekte mit nur wenigen oder ganz ohne Lerndaten erlauben, für operationelle Radarsysteme zunehmend an Bedeutung.

*Direct Data Domain* STAP ( $D^3$ -STAP) umgeht das Problem fehlender Lerndaten. Dabei schätzen die Wissenschaftler die Eigenschaften der störenden Bodenreflexionen direkt aus den Radardaten, die von der vermuteten Position des bewegten Objektes stammen. Die Störungen werden unterdrückt, indem alle Energie auf Null gesetzt wird, die nicht von dem Bewegtziel herrührt. Allerdings ist hierfür die genaue Kenntnis der Zielparameter (Richtung und Geschwindigkeit) erforderlich, da sonst das Zielecho selbst als Störung angesehen und folglich gelöscht wird.



2



3

Zudem erlaubt D<sup>3</sup>-STAP keinerlei Kontrolle über die Form der Bewegzielantwort nach der Unterdrückung der störenden Bodenreflexionen. Dies führt typischerweise zu unkontrollierten Nebenkeulen der Bewegzielantwort, die eine zuverlässige Bewegzielentdeckung verhindern. Diese beiden Aspekte schränken Anwendbarkeit von D<sup>3</sup>-STAP in realen Szenarien stark ein.

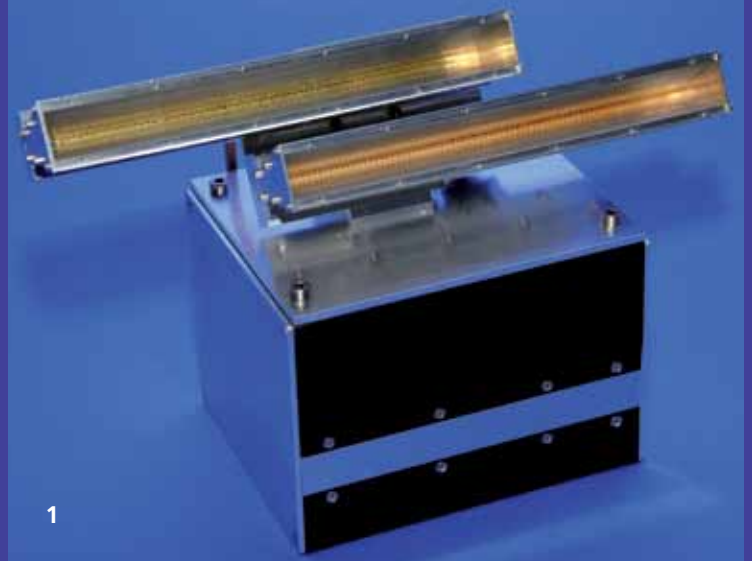
Bei dem am Fraunhofer FHR entwickelten robusten D<sup>3</sup>-STAP (RD<sup>3</sup>-STAP) wird das D<sup>3</sup>-STAP Problem so umformuliert, dass gewisse Ungenauigkeiten bei der Kenntnis der Zielparameter erlaubt sind. Dies macht RD<sup>3</sup>-STAP zu einem attraktiven Verfahren für die Bewegzielentdeckung in Gegenwart starker Störungen. Die Störung wird nunmehr unterdrückt, indem ihre Energie minimiert (und nicht mehr auf Null gesetzt) wird. Diese Vereinfachung beeinflusst die Fähigkeit zur Unterdrückung störender Bodenreflexionen nur unwesentlich, macht das STAP-Verfahren aber wesentlich robuster gegenüber Ungenauigkeiten bei der Kenntnis der Zielparameter. So kann das Problem der Selbstausschöpfung von Bewegzielen bewältigt werden. Zudem stellt RD<sup>3</sup>-STAP sicher, dass die Nebenkeulen der Bewegzielantwort nach der Unterdrückung der störenden Bodenreflexionen niedrig sind, was die nachfolgende Zielentdeckung erleichtert. Aus diesem Grund ist RD<sup>3</sup>-STAP insbesondere für den Zielbestätigungs- und Zielverfolgungsmodus geeignet. In diesen Fällen ist meist A-Priori-Information über die Zielparameter aus vorangegangenen Beobachtungen vorhanden. Die Kenntnis der genauen Zielparameter ist aber aufgrund von Zielmanövern oder der veränderten Beobachtungsgeometrie nicht gegeben.

## Ergebnisse mit PAMIR

Das RD<sup>3</sup>-STAP-Verfahren wurde erfolgreich auf mehrkanalige Radardaten angewandt, die mit dem am Fraunhofer FHR entwickelten Multifunktionsradar PAMIR (Abb. 1) aufgezeichnet wurden. Das Experiment simulierte ein schwieriges Szenario mit mehreren dicht beieinander liegenden Bewegzielen (in Abb. 2 durch Raute bzw. Quadrat markiert). Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der geringen Entfernung zwischen den Bewegzielen die Lerndaten für ein Bewegziel jeweils das Echo des anderen Bewegziels enthalten. Das führt zu einer falschen Schätzung der störenden Bodenreflexionen. Als Folge hiervon wird ein Bewegziel unterdrückt, wenn stochastische STAP-Verfahren verwendet werden (Abb. 3). D<sup>3</sup>-STAP und RD<sup>3</sup>-STAP leiden nicht unter diesem Problem, da sie keine Lerndaten erfordern. Allerdings führt D<sup>3</sup>-STAP auch in größerer Entfernung zur tatsächlichen Zielposition zu unkontrollierten Signalpegeln, was zu Falschalarmen führen kann. RD<sup>3</sup>-STAP ist das einzige Verfahren, das die Bewegzielechos erhalten und gleichzeitig die störenden Bodenreflexionen unterdrücken kann. So ist eine zuverlässige Bewegzielentdeckung möglich.

- 1 Die Trägerplattform Transall mit dem in der Springertür montierten Multifunktionsradar PAMIR.
- 2 Leistung der Radarechos, aufgetragen über Entfernung und Radialgeschwindigkeit [dB].
- 3 Leistung des Ausgangssignals nach Unterdrückung der störenden Bodenreflexionen [dB].

Dr.-Ing. Diego Cristallini  
 Tel. +49 228 9435-585  
 Fax +49 228 9435-618  
 diego.cristallini@  
 fhr.fraunhofer.de



## SUMATRA – MILLIMETERWELLEN-SAR FÜR UAV-GESTÜTZTE AUFKLÄRUNG

Die unbemannte, luftgestützte Aufklärung mit Millimeterwellen-SAR-Sensoren (Synthetisches Apertur Radar) liefert gemeinsam mit der Echtzeitanalyse der Messdaten am Boden einen entscheidenden Beitrag für die multisensorielle Informationsgewinnung bei vielen militärischen und zivilen Anwendungen. Insbesondere für die Aufklärung ist die Möglichkeit der Echtzeitanwendung von entscheidender Bedeutung, da nur so kurzfristig Entscheidungen auf Grund der gemessenen Daten getroffen werden können.

Das Fraunhofer FHR arbeitet derzeit an einem miniaturisierten SAR-System für die Fernüberwachung, das Daten in Echtzeit verarbeitet und so dem Benutzer sofort eine vorläufige Abbildung der Szene präsentieren kann. Für diesen Zweck eignen sich besonders Millimeterwellenkomponenten in den Frequenzbereichen 35 Gigahertz und 94 Gigahertz, da diese Systeme mechanisch sehr kompakt und leicht sind. Somit können sie auf den unterschiedlichsten Trägerplattformen eingesetzt werden. Diese Plattformen umfassen sowohl unbemannte, wie aber auch kleine bemannte Fluggeräte, die auf Grund ihrer Größe verhältnismäßig schnell und unkompliziert im Bedarfsfall eingesetzt werden können.

### **Miniaturisiertes SAR-System mit Echtzeitdatenauswertung am Boden**

Die durch eine Reihe von militärischen und zivilen Anwendungen gestellten Forderungen an unbemannte, multisensorielle Informationsgewinnung aus der Luft machten die Entwicklung eines miniaturisierten SAR-Sensors mit einer Echtzeitdatenauswertung und -analyse am Boden notwendig.

Für die Verwendung auf einem taktischen UAV (*Unmanned Air Vehicle*) musste das Radarsystem miniaturisiert und der Leistungsverbrauch reduziert werden. Dies gelang durch den Einsatz der Millimeterwellenkomponenten. Insbesondere in dem Frequenzbereich von 94 Gigahertz entstanden in der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg hochwertige Hochfrequenzkomponenten mit breitbandigen Eigenschaften, hohem Auflösungsvermögen und völlig autonomer Arbeitsweise. Die entwickelten Antennen ermöglichen es, dass ein sehr großes Gebiet ausgeleuchtet und der notwendige Auswertalgorithmus vergleichsweise einfach implementiert werden kann. Außerdem sind diese Antennen



derart optimiert, dass sie auf Grund der Strömungseigenschaften, Gewicht und Bauform für den Einsatz an kleineren unbemannten Fluggeräten eingesetzt werden können. Für die Übertragung der Radarsignale wird ein analoger Videolink benutzt, welcher bei vielen unbemannten Fluggeräten bereits verfügbar ist. Als Ergebnis erscheint dann am Boden das einem Video ähnliche SAR-Bild, welches sich in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit kontinuierlich ändert.

### **Ausblick**

Obwohl die eingesetzte analoge Datenübertragung den Vorteil bietet, dass die in vielen Fluggeräten bereits verfügbare Datenübertragungsstrecke genutzt werden kann, limitiert diese die Einsatzmöglichkeiten des verwendeten Sensors. Daher wird in der nächsten Generation des Systems das analoge Signal bereits an Bord der Flugplattform mit modernster Technik digitalisiert. Durch den Einsatz moderner digitaler Technologien ist es möglich, die während einer solchen Messung anfallenden Daten an Bord der Plattform für eine spätere Analyse zu speichern.

Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung eines ebenso miniaturisierten Systems bei einer niedrigen Millimeterwellen-Frequenz, namentlich bei 35 Gigahertz. Allerdings können die Mehrwegeausbreitung nicht so gut unterdrückt und filigrane Strukturen nicht mehr so optimal untersucht werden. Dafür kann die Technik in diesem Frequenzbereich ihre Vorteile hinsichtlich Sendeleistung und größerer Flughöhe ausspielen.

**1** 94 GHz Frontend des SUMATRA-UAV-SAR.

**2** SAR-Bild aufgenommen bei 94 GHz mit SUMATRA.

*Dr. rer. nat. Stephan Stanko  
Tel. +49 228 9435-704  
Fax +49 228 9435-608  
stephan.stanko@  
fhr.fraunhofer.de*



## RADARAUFNAHMEN IM LANDEANFLUG ERHÖHEN DIE FLUGSICHERHEIT

Insbesondere unter schlechten Sichtverhältnissen können Echtzeit-Radarbilder den Piloten beim Landeanflug auf einen Flughafen unterstützen und dadurch die Sicherheit erhöhen. Die Abbildung in Flugrichtung mit Hilfe bistatischer Konfigurationen wird am Fraunhofer FHR unter realen Bedingungen derzeit experimentell untersucht. Erste Ergebnisse stimmen die Forscher positiv.

Laut Statistiken von Boeing ereignen sich 34 Prozent der schweren Flugunfälle während des Landeanflugs und der Landung – und das obwohl nur rund 4 Prozent der durchschnittlichen Gesamtflugzeit auf diese Flugphase entfällt. Mit 20,5 Prozent gehört schlechte Sicht zu den gefährlichsten Wetterphänomenen, die in den letzten 15 Jahren Flugzeugabstürze verursacht haben. Dabei ist die allgemeine Unfallrate bei den kleineren Geschäfts- und Reiseflugzeugen ca. zehnmal so hoch wie die der großen Verkehrsflugzeuge.

Eine ergänzende Unterstützung durch bildgebende Radarsensorik könnte Landevorgänge und Landungen erheblich sicherer gestalten und Unfälle durch schlechte Sicht vermeiden, da Radarsysteme bei Tag und Nacht betrieben werden können und Radarwellen zudem Wolken, Nebel, Regen und Rauch durchdringen. Die Radarempfänger an Bord der Flugzeuge können kompakt, leicht und kostengünstig ausgelegt werden, so dass sie auch für kleinere Flugzeuge in Frage kommen.

### **Bistatisches SAR zur Abbildung in Flugrichtung**

Seit Jahrzehnten wird das SAR-Verfahren (Synthetisches Apertur Radar) zur Abbildung der Erdoberfläche mit Hilfe von luft- und raumgestützter Radarsensorik erfolgreich eingesetzt. Dabei schaut die Antenne im Allgemeinen quer zur Flugrichtung auf die Erdoberfläche. Hierdurch können Bilder mit sehr hoher Auflösung gewonnen werden. Diese monostatischen SAR-Systeme sind jedoch nicht in der Lage ein Gebiet in Flugrichtung abzubilden: Die azimutale Auflösung verschlechtert sich dramatisch, wenn die Antenne nach vorne ausgerichtet wird. Ein weiteres Problem besteht in der Abbildung von Objekten, die in gleicher Entfernung symmetrisch zur Flugrichtung angeordnet sind.





Abhilfe schafft hier die räumliche Trennung von Sender und Empfänger, die sich nun mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und in unterschiedliche Richtungen bewegen können (Bistatisches SAR). Mit einer geeigneten Konstellation können hierdurch hochaufgelöste Bilder in Flugrichtung akquiriert werden. Als Plattform für den Sender kommen stationäre Einrichtungen, Fahrzeuge, Flugzeuge und Satelliten in Betracht.

### **Erster Nachweis mit TerraSAR-X und PAMIR**

Im Rahmen eines vierjährigen DFG-Projekts hat das Fraunhofer FHR gemeinsam mit der Universität Siegen unterschiedliche Teilbereiche der bistatischen Radarbildgebung wissenschaftlich und technologisch untersucht. Neben der Entwicklung komplexer Algorithmen zur Fokussierung der Radardaten, wurden auch bistatische Experimente erfolgreich durchgeführt. Dabei diente der vom DLR betriebene Satellit TerraSAR-X als Beleuchter für das flugzeuggetragenen Multifunktionsradar PAMIR. Obwohl standardmäßig die Antenne an Bord des Flugzeugs rechtwinklig zur Flugrichtung ausgerichtet ist, konnte PAMIR bei einem Experiment mit einer Zusatzantenne entgegen der Flugrichtung betrieben werden. Mit Hilfe dieser Konfiguration konnte bereits im Jahr 2009 erstmalig experimentell nachgewiesen werden, dass Radarabbildungen in bzw. entgegen der Flugrichtung mit Hilfe einer bistatischen Sensoranordnung möglich sind. Als Szene wurde hier der Flugplatz Manching und dessen Umgebung gewählt (siehe Abb. 1).

### **Experimenteller Nachweis durch einen kompakten Empfänger an Bord eines Ultraleichtflugzeugs**

Mit Blick auf den operationellen Einsatz wurde ein kompakter Empfänger für den Einsatz im FHR-Ultraleichtflugzeug DELPHIN entwickelt und aufgebaut. Neben dem Radar wurde auch ein Inertialsystem zur Lage- und Positionsbestimmung in das Flugzeug integriert. Die vorwärts schauende Antenne befindet sich dabei unter der rechten Tragfläche (siehe Abb. 2). Wird die Szene am Boden durch einen entsprechenden Sender beleuchtet, können die Radarbilder auf einem Display im Flugzeug angezeigt werden.

Erste bistatische SAR-Aufnahmen in Voraussicht wurden während eines typischen Landeanflugs unter einem Anflugwinkel von 3 Grad durchgeführt. Bei unterschiedlichen Experimenten wurden Flugplätze sowohl aus der Luft (Transall C-160) also auch vom Boden (fahrender Lkw) beleuchtet. Die Daten werden zurzeit ausgewertet und sollen Aufschluss über die Bildqualität bei unterschiedlichen Inzidenzwinkeln und unterschiedlichen Landebahnen (Gras, Asphalt, etc.) geben.

- 1 *Bistatisches SAR-Bild mit TerraSAR-X als Beleuchter und PAMIR als Empfänger.*
- 2 *FHR-Ultraleichtflugzeug im Landeanflug.*

*Dr.-Ing. Ingo Walterscheid  
Tel. +49 228 9435-372  
Fax +49 228 9435-618  
ingo.walterscheid@  
fhr.fraunhofer.de*

GESCHÄFTSFELD



# LAND- UND SEEGESTÜTZTE AUFKLÄRUNG

Bodengebundene Radarsysteme leisten wesentliche Beiträge zur „Nachrichtengewinnung und Aufklärung“ in den verschiedensten Bereichen. Sie bilden das Rückgrat der Landesverteidigung.

Die Erstellung eines Lagebildes für Luft-, Boden- und Seeziele kann von fliegenden Plattformen, raumgestützten Systemen oder auch von bodengestützten Radaren erfolgen. Während die luft- und raumgestützten Systeme eher der weiträumigen Aufklärung dienen, ist die bodengestützte Lage- und Zielaufklärung von Bodenzielen und maritimen Zielen eine Aufgabe für den taktischen Einsatz. Gegenüber hochfliegenden Luftzielen oder gar bei der Aufklärung von Zielen im Weltraum werden jedoch auch von bodengestützten Systemen große Reichweiten betrachtet.

## **Bodengestützte Aufklärung gegenüber Bodenzielen**

Im taktischen Einsatz wird versucht, z. B. von Bord eines Fahrzeuges oder aus einem Feldlager heraus die Umgebung „aufzuklären“, d. h. Informationen über mögliche Ziele zu gewinnen, sie zu detektieren, zu klassifizieren und zu identifizieren, um so eine Analyse der Situation (Bedrohungslage) durchzuführen. Moderne Radarverfahren wie die Mikro-Doppler Analyse zur Erkennung und Differenzierung von Fußgängern, Fahrzeugen und Luftfahrzeugen (wie z. B. Hubschraubern) gewinnen dabei gerade im Feldlagerschutz hohe Bedeutung.

## **Bodengestützte Luftraumaufklärung**

Die Detektion, Klassifizierung und wenn möglich Identifizierung von Flugzielen vom Boden aus ist eine klassische Aufgabe der Luftverteidigung. Es geht auch in diesem Fall um die Erstellung eines Lagebildes (Luftlage) und eine daraus abzuleitenden Bedrohungsanalyse. Zur Zeit verfügbar sind monostatische Radarsysteme, die je nach Aufgabe Ziele über große Entfernungen von bis zu 200 Kilometer entdecken, oder als Nahbereichsradare zum Schutz von hochwertigen Anlagen

Entfernungen von einigen Kilometern bis zu ca. 30 Kilometern abdecken sollen.

## **Boden-/Seegestützte Aufklärung gegenüber maritimen Zielen**

Die Seeaufklärung von Land oder von Bord eines Schiffes aus hat ebenfalls die Erstellung eines verlässlichen Lagebildes zum Ziel. Diese Aufgabe wird erschwert durch das Problem des See-Clutters, der sich aufgrund seiner Variabilität vom Boden-Clutter und durch die seezustandsabhängige komplexe Bewegung der Ziele abhebt, was eine Radarzielabbildung stark erschwert.

Für alle aufgeführten Einsatzbereiche gilt, dass das aufklärende System entweder autark mit eigenem aktiven Radar operiert oder aber passiv arbeitet. Bei Letzterem erfolgt eine Beleuchtung durch andere Radare oder geeignete Beleuchter. Diese Beleuchtung kann kooperativ, d. h. in Absprache mit dem Empfänger, oder nicht-kooperativ erfolgen. Die passiven Verfahren mit dem Vorteil des „unsichtbaren“ Empfängers sind zweifellos die Verfahren der Zukunft. Sie sind von ihrer Anlage her bistatisch ausgelegt, können auch im Netz verschiedener passiver/aktiver Sensoren betrieben werden und zeigen deutliche Vorteile hinsichtlich ihrer Störfestigkeit.

Eine besondere Herausforderung stellen diese innovativen verteilten Radarsysteme für die Aufgabe der Zielklassifizierung oder -identifizierung dar, hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

*Radarsensoren spielen auch bei der Seegestützten Aufklärung eine wichtige Rolle.*

*Dr.-Ing. Joachim Schiller  
Tel. +49 228 9435-212  
Fax +49 228 9435-627  
joachim.schiller@  
fhr.fraunhofer.de*



## VERMESSUNG DER ZIELBEWEGUNG NACH DEM GPS-PRINZIP ZUR ISAR-ABBILDUNG

Durch die Verwendung von im Raum verteilten Radaren kann die Trajektorie eines Ziels präzise vermessen werden. Diese Technik kann eingesetzt werden, um hochauflösende Radarbilder von sich bewegenden Flugzeugen, Schiffen oder Landfahrzeugen zu erstellen.

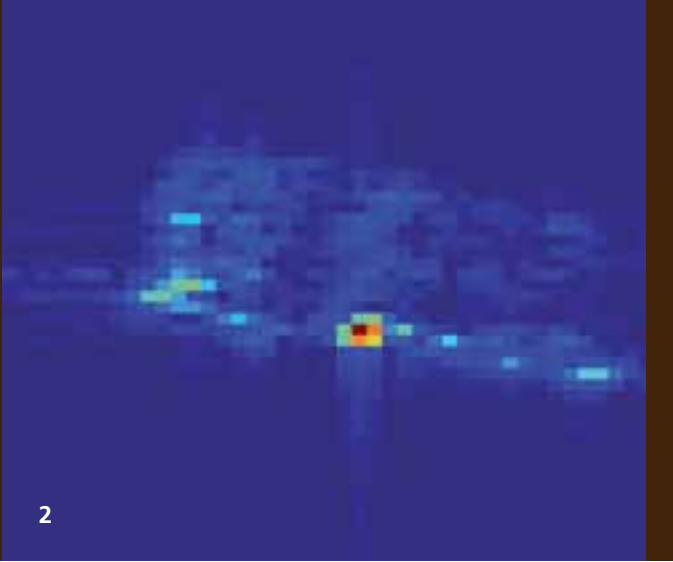
Besonders in Krisengebieten ist die Luftraumüberwachung auf Systeme zur nichtkooperativen Zielidentifizierung angewiesen. Kann sich etwa ein Flugzeug nicht glaubwürdig gegenüber der Luftraumüberwachung identifizieren, führt dies im schlimmsten Fall zum Abschuss, auch wenn gar keine feindlichen Absichten bestanden. Ähnliches gilt für Schiffe in unsicheren Gewässern oder Fahrzeuge in Konfliktgebieten.

Inverses synthetisches Apertur Radar (ISAR) stellt eine Technologie dar, die üblicherweise zweidimensionale Abbildungen eines Ziels erzeugt und somit zur nichtkooperativen Identifizierung eingesetzt werden kann. Da Radarwellen zur Bilderzeugung benutzt werden, ist ISAR wetterunabhängig und kann auch auf große Entfernungen eingesetzt werden. Darin besteht ein großer Vorteil gegenüber optischen Verfahren.

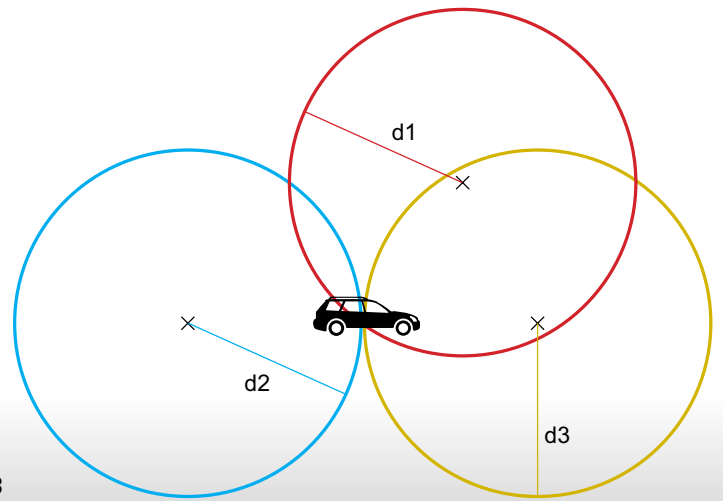
### Die Herausforderung liegt in der Präzision

Die große Schwierigkeit beim ISAR-Verfahren besteht darin, die Bewegung eines Ziels in allen Komponenten mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. In diesem Fall bedeutet ausreichende Genauigkeit, dass für einen wesentlichen Teil der betrachteten Bewegung die experimentell bestimmte Trajektorie nur einen Bruchteil der Wellenlänge von der tatsächlichen Trajektorie abweichen darf. Bei X-Band Radar z. B. wird mit Wellenlängen von ca. drei Zentimetern gearbeitet. Entsprechend genau muss also die Bewegung des Ziels nachvollzogen werden.

Die Zielkoordinaten können mit konventionellen Radaren mit der geforderten Genauigkeit in Entfernungsrichtung bestimmt werden. In azimutaler Richtung ist die Messgenauigkeit allerdings um mehrere Größenordnungen schlechter. Daher ist es naheliegend ein Verfahren zu untersuchen, bei dem mehrere im Raum verteilte Radare zum Einsatz kommen. Diese messen jeweils aus unterschiedlichen Richtungen die Entfernung zum Ziel (Multilateration). Die der



2



3

Multilateration zugrunde liegenden Methoden sind aus dem Bereich der Satellitennavigationssysteme, wie z. B. GPS, bestens bekannt. Dafür können nicht nur herkömmliche, monostatische Radare ausgenutzt werden, sondern auch bistatische, bei denen sich Sender und Empfänger an verschiedenen Orten befinden. Eine solche bistatische Anordnung stellt eine große Herausforderung an die Synchronisation dar, da Sender und Empfänger bis auf Nanosekunden genau gleich getaktet sein müssen. Durch den Empfang des direkten Signals ist eine solche Korrektur möglich. Zu jedem Sender können beliebig viele bistatische Empfänger aufgestellt werden. Da ein Empfänger wesentlich billiger ist als ein komplettes Radar, ist dies ein kostengünstiger Ansatz. Das beleuchtende Radar muss dazu nicht einmal die Fähigkeit besitzen, das Ziel in Azimut-Richtung zu verfolgen.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zu den meisten existierenden Ansätzen zur Bestimmung der Zielbewegung ist, dass kein parametrischer Ansatz verwendet wird. Denn bei parametrischen Ansätzen wird eine bestimmte Form der Bewegung angenommen, z. B. lineare Bewegung oder Rotationsbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Solche Ansätze liefern gute Ergebnisse, wenn die Annahme bezüglich der Bewegungsform auch zutrifft. Ist die Annahme jedoch falsch, schlägt auch die Bildgebung fehl. Dieses schränkt die Anwendbarkeit parametrischer Methoden auf wenige Spezialfälle ein. Wünschenswert ist jedoch eine möglichst allgemein einsetzbare Technologie.

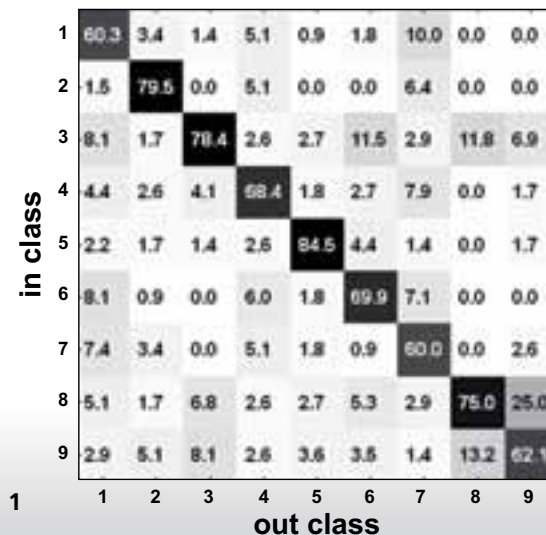
### Erste Ergebnisse

In Simulationen konnte gezeigt werden, dass für die hier vorgestellte Methode die Form der Bewegung unerheblich ist, aber die ungleichmäßige Verteilung von Streuzentren auf dem Ziel zu einem systematischen Fehler führen kann. Der Fehler ist jedoch durch die Ausdehnung des Ziels limitiert und kann leicht berechnet werden. Weiterhin hängt die Messgenauigkeit massiv von der Geometrie ab. Dieses Phänomen ist auch von GPS her bekannt und wird als Geometrical Dilution of Precision bezeichnet. Die erreichbare Präzision ist demnach um so höher, je gleichmäßiger die Radare bzw. Empfänger um das Ziel verteilt sind und je mehr Radare/Empfänger zur Verfügung stehen.

Im Jahr 2011 wurden am Fraunhofer FHR aufwendige Experimente durchgeführt, so dass nun zum ersten Mal ein ausführlicher Satz multistatischer ISAR-Daten zur Verfügung steht. Die prinzipielle Möglichkeit, die nötige Genauigkeit zu erreichen, konnte dabei bereits bestätigt werden. Weitere Nachforschungen werden vor allem dahin gehen, diese Methode zu verbessern, um damit in möglichst vielen Fällen ein gutes Radarbild zu erzielen.

- 1 *Flexibel einsetzbares Software Defined Radar als Beleuchter in einer multistatischen Konfiguration.*
- 2 *ISAR-Bild eines Bundeswehr-Unimogs.*
- 3 *Prinzip der Multilateration: Die Position eines Ziels kann durch Messung der Entfernung zu mindestens drei Sensoren bestimmt werden.*

*Dipl.-Phys. Stefan Brisken  
Tel. +49 228 9435-784  
Fax +49 228 9435-627  
stefan.brisken@  
fhr.fraunhofer.de*



## IDENTIFIZIERUNG VON BODENZIELEN IM GEFECHTSFELD MITTELS ATR

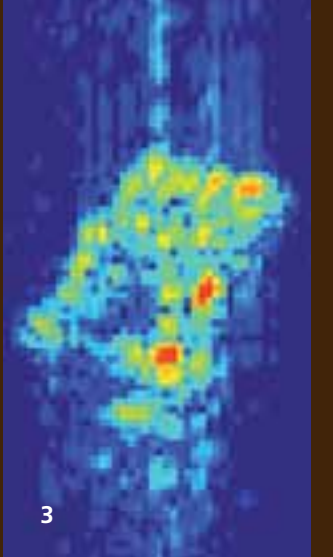
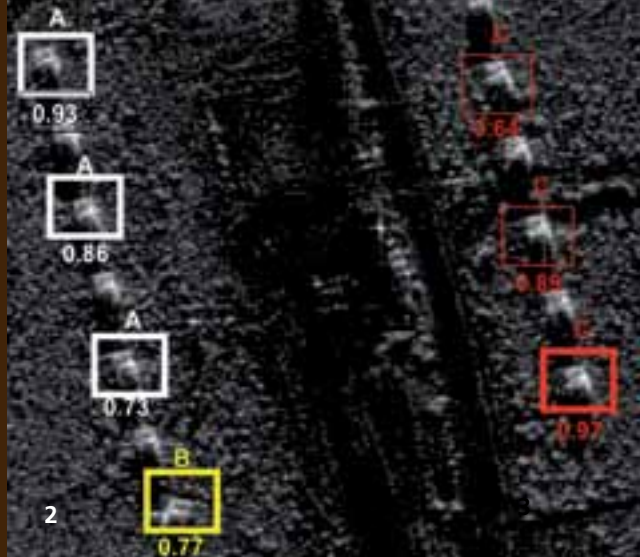
Die automatische Klassifizierung und Identifizierung von Bodenzielen (*Automatic Target Recognition, ATR*) spielt hinsichtlich der boden- und luftgestützten Überwachung und Aufklärung bei militärischen Einsätzen eine entscheidende Rolle. Besonders im Rahmen der nichtkooperativen Zielidentifizierung (NCI) kommt ATR als unterstützendes Mittel zur positiven Feinderkennung eine Schlüsselrolle zu.

### ATR - Bedeutung und Aufgaben im militärischen Kontext

Im Rahmen der Gefechtsfeldaufklärung stellt die sichere Zielidentifizierung eine wesentliche Forderung und Bedingung für aktuelle und zukünftige militärische Operationen im Gefechtsfeld dar. Die Fähigkeit, feindliche Ziele zu identifizieren und von eigenen Kräften sowie neutralen, d. h. unbeteiligten, Zielen zu unterscheiden, hat starken Einfluss auf die Effizienz und den Erfolg des militärischen Einsatzes. Eine besondere Rolle spielt dabei – gerade vor dem Hintergrund äußerst problematischer Erfahrungen während vergangener und aktueller Einsätze (Golf-Krieg, Jugoslawien, Afghanistan) – die Vermeidung der Bekämpfung eigener Kräfte. Im Gegensatz zu kooperativen Methoden zur Zielidentifizierung (meist *Identification Friend or Foe*, kurz IFF-Systeme) können nicht-kooperative Erkennungssysteme eine positive Feind-Identifizierung leisten. Dabei wird eine sichere Identifizierung über Entfernungen, die die Waffeneinsatzreichweite übersteigen, angestrebt. Dies schließt eine nahezu realzeitliche Einsetzbarkeit ein.

### ATR – Systeme: Komplex und speziell

ATR-Systeme sind komplexe, mehrstufige Systeme, die in drei wesentliche Teilprozesse unterteilt werden können. An eine gerade bei Bodenzielen notwendige Vorprozessierung der Sensordaten (Entfernung von Störeinflüssen und Bodenechos), schließt sich die Merkmalsextraktion und -selektion an. In dieser entscheidenden Stufe müssen diejenigen Merkmale aus den Daten herausgearbeitet werden, die die einzelnen Klassen bestmöglich charakterisieren. Eine zuverlässige und robuste Diskriminierung der Klassen bestimmt maßgeblich die Leistungsfähigkeit des ATR-Systems. In der Entscheidungsstufe werden die selektierten Merkmale bewertet, eventuell fusioniert und anschließend klassifiziert. Hierbei bieten sich eine Vielzahl von Klassifizierungsmethoden mit jeweiligen Vor- und Nachteilen an, die angepasst an die Aufgabenstellung



ausgewählt werden müssen (Neuronale Netze, *Support Vector Machines*, *Nearest Neighbour*, etc.). Die Leistungsfähigkeit eines ATR-Systems kann in einer optionalen Evaluierungsstufe mittels sogenannter ROC-Kurven und Konfusionsmatrizen bewertet werden.

Neben der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Klassifizierungsalgorithmen wird die Komplexität der ATR-Systeme auch durch die erforderlichen umfangreichen Referenzdatenbanken deutlich. Diese können grundsätzlich mittels realer Messungen in kontrollierter Umgebung (z. B. auf einer Drehplattform), realer Messungen skalierten Modelle (z. B. in einer Messkammer) oder aber mittels Modellen und Simulationen gewonnen werden. Da die radartypischen Merkmale in hohem Maße vom Aspektwinkel abhängen, ist eine Vermessung für jeden möglichen Azimut- und Elevationswinkel in einem geeigneten Raster notwendig. Je nach Fragestellung müssen die Zieltypen in verschiedenen Konfigurationen und Varianten in die Datenbank aufgenommen werden.

ATR-Systeme sind in gewisser Weise speziell und einzigartig, d. h. sie müssen der jeweiligen Problemstellung immer angepasst werden. Die Planungsphase und Analyse der jeweiligen Einsatzsituation hat dabei wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines ATR-Systems. Insbesondere die Definition der zu unterscheidenden Zielklassen, ein möglicher Ausschluss von Zielen, die Anwendung von Abweisungsalgorithmen, Vorabinformationen aufgrund operativer Planungen und die Anwendung einer Vorklassifizierungsstufe können positiven Einfluss auf die Identifizierungsrate haben.

### **Besonderheiten bei der Erkennung von Bodenzielen**

Im Gegensatz zur Flugzielklassifizierung sind vor allem die Rückstreuungseigenschaften der Ziele, Boden-Echos, die unbekannte Zielorientierung und die hohe Variabilität der Rückstreuleistung sowie die Vielzahl an Fahrzeugvarianten wesentliche Größen, die den Detektions- und Klassifizierungsprozess erschweren. Den Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer FHR zu diesem Thema bilden Untersuchungen zur Entwicklung möglicher Detektions- und Klassifizierungsverfahren von Bodenzielen aus hochaufgelösten 1D-Entfernungsprofilen (HRR) sowie 2D-Zielabbildungen ((I)SAR). Hierzu werden Verfahren zur Zieldetektion und -klassifizierung von Fahrzeugen entworfen und auf gemessene HRR/SAR-Daten angewendet. Momentan können Klassifizierungsraten zwischen 80% und 90% erreicht werden (z. B. für den Referenzdatensatz MSTAR). Diese befinden sich allerdings aufgrund der guten Datenqualität des Datensatzes am oberen Ende der Skala.

- 1 *Evaluation und Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines ATR-Systems mittels Konfusionsmatrizen.*
- 2 *Detektion und Klassifizierungsergebnis als Grundlage für den Operateur.*
- 3 *Extraktion und Selektion von robusten Merkmalen, hier eine ISAR-Abbildung.*
- 4 *Jeep auf der FHR-Drehplattform zur Vermessung der Radar-Signatur für eine Referenzdatenbank.*

*Dr. rer. nat.  
Rolf Schumacher  
Tel. +49 228 9435-487  
Fax +49 228 9435-633  
rolf.schumacher@  
fhr.fraunhofer.de*





# SYSTEME FÜR SICHERHEIT UND SCHUTZ

Radar kann auf vielfältige Weise dazu beitragen, die Sicherheit im zivilen und militärischen Bereich zu erhöhen und den Schutz der Menschen zu verbessern. Es erlaubt z. B. verborgene gefährliche Objekte zu entdecken, Hinweise auf instabile Strukturen zu gewinnen oder Feldlager zu schützen.

Forschungsschwerpunkte am Fraunhofer FHR sind seit langem die Radartechnik vom Meterwellenbereich über die Zentimeterwellen bis zu den Millimeterwellen sowie die nachfolgende Radarsignalverarbeitung. Dieses Know-how wird u. a. auch gezielt für die Entwicklung zukünftiger Sicherheitssysteme und für Systeme zum Schutz der Zivilbevölkerung eingesetzt. Ein Beispiel ist die Detektion und Klassifizierung von unter der Kleidung verborgenen Bedrohungsgegenständen mittels Radar. Dabei wird das Vermögen elektromagnetischer Wellen genutzt, unterschiedliche Materialien zu durchdringen. Darauf aufbauend entwickeln die Forscher am Fraunhofer FHR bildgebende, abtastende Radiometer und Miniaturradare. Um die Entdeckung und Identifizierung von Flüssigkeiten und Sprengstoff zu ermöglichen, werden auch spektroskopische Untersuchungen bis 2,5 Terahertz durchgeführt.

Im Fokus der Forschung steht aktuell die abstandswirksame Kontrolle von Menschen. Von besonderem Interesse sind hier Ansätze, bei denen Menschen sich möglichst frei bewegen können und die Sensorik nicht direkt sichtbar ist. Dadurch kann es langfristig möglich sein, Menschen innerhalb eines Kontrollbereiches so zu charakterisieren, dass nur ein kleinerer Teil einer genaueren Kontrolle zugeführt wird: der Teil, bei dem die Radarsensorik Verdachtskriterien ausgemacht hat.

Gegenwärtig werden technologische Anstrengungen unternommen, um Systemkonzepte und Sensorbauteile im Millimeterwellen-, Submillimeterwellen- und Terahertzbereich für diese Anwendungen nutzbar zu machen. Denn mit zunehmender Frequenz lassen sich Sensoren kompakter aufbauen und verbesserte Auflösungen erzielen.

Auch im Bereich des Feldlagerschutzes, insbesondere im Rahmen militärischer Einsätze, ist die abstandswirksame Kontrolle

wichtig. Hierzu bedarf es zunächst der Erkennung von sich nähernden Personen und deren Unterscheidung von anderen Objekten wie z. B. Tieren oder langsamen Fahrzeugen. Radar bietet die Möglichkeit, über die Vermessung der spezifischen Doppler-Modulation des rückgestrahlten Signals Rückschlüsse auf das betrachtete Objekt zu ziehen.

Um den Bedrohungen durch ferngezündete Sprengsätze, *Improvised Explosive Devices* (IEDs) oder von Selbstmordattentätern zu begegnen, werden für den Schutz militärischer Einrichtungen neue Sensorentwicklungen erarbeitet, bei denen besonders auf einen militärisch/zivilen *Dual-Use* geachtet wird.

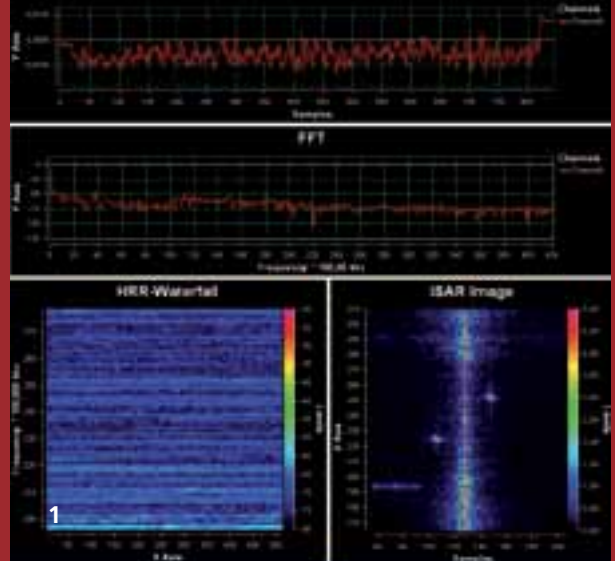
Der Schutz der Bevölkerung steht bei der Überwachung von instabilen Strukturen durch Radar im Vordergrund. Hier bieten sich Einsätze im Bereich des Zivilschutzes an, z. B. zur Vermessung der Bewegung von Gebäuden nach einem Erdbeben, um die Stabilität der Häuser abzuschätzen und Rettungskräfte möglichst frühzeitig vor bevorstehenden Einstürzen zu warnen. Diese Technik kann auch gegenüber Berg- oder Lawinhängen eingesetzt werden, wo ständige, hochpräzise Vermessungen über große Abstände durchgeführt werden können. So kann die Bevölkerung rechtzeitig vor einem Berggrutsch oder einem bevorstehenden Lawinenabgang gewarnt werden.

Neben den hier skizzierten Anwendungen sind die gleichen Technologien auch in vielen anderen Feldern direkt nutzbar. Es sind dabei besonders alle Aufgaben um das Katastrophenmanagement und humanitäre Einsätze zu nennen. Dort spielt u. a. die Erkundung von Katastrophengebieten aus der Luft – auch bei widrigen Umweltbedingungen – und das Aufspüren von Lebenszeichen möglicher Opfer eine wichtige Rolle.

*Radartechnik hilft bei der Sicherung von Feldlagern in Krisengebieten (hier Kundus, Afghanistan).*

*Dipl.-Ing. Dirk Nübler  
Tel. +49 228 9435-550  
Fax +49 228 9435-608  
dirk.nuessler@fhr.fraunhofer.de*

*Dr.-Ing. Joachim Schiller  
Tel. +49 228 9435-212  
Fax +49 228 9435-627  
joachim.schiller@fhr.fraunhofer.de*



## IDENTIFIKATION UND KLASSIFIZIERUNG MIT DEM RADARSYSTEM SIMIC

Kleine, hochauflösende Radarsysteme wie das SIMIC (*Signature Measurement System for Identification and Classification*) besitzen ein breites Anwendungsspektrum. Sie werden im militärischen Bereich zur nichtkooperativen Zielidentifizierung benutzt, können aber mit einer flexibel einstellbaren Wellenform ebenso zum Objektschutz herangezogen werden.

Ein klassischer Anwendungsbereich hochauflösender Radarsysteme ist die nichtkooperative Zielerkennung. Dabei versucht man ein Ziel (z. B. ein Flugzeug) zu identifizieren, ohne dass sich das Ziel selbst zu erkennen gibt. Dies gelingt, indem man die Bandbreite des Radarsignals nutzt, um eine hochaufgelöste Abbildung des Ziels zu generieren und diese mit vorab gespeicherten Abbildungen aller relevanten Ziele vergleicht. Darüber hinaus ergeben sich viele weitere Anwendungsfelder wie der Feldlagerschutz, aber auch die Überwachung von Gebäuden gegen eventuelle Terroranschläge mit immer leichter verfügbaren und aufrüstbaren Mini-Drohnen. Wählt man Signale mit einer geeigneten Wellenform, so lassen sich nicht nur verschiedenartige Fahrzeuge unterscheiden, sondern – anhand ihrer typischen Bewegungen – auch Personen oder harmlose, vorbeilaufende Tiere.

### Erkennung anhand von charakteristischen Bewegungen: Mikro-Doppler

Um dies zu erreichen, analysiert man das Signal auf sogenannte Mikro-Doppler-Modulationen: Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Frequenzverschiebung einer Welle bei der Reflexion an einem Ziel, das sich relativ zur Quelle des ausgesandten Signals bewegt. Diese Verschiebung kann dazu genutzt werden, die Geschwindigkeit bewegter Objekte zu messen. Kleine mechanische Rotationen oder Vibrationen erzeugen bei der Reflexion der Welle schwache, aber charakteristische Modulationen. Dieser Effekt ist bei der Identifizierung unterschiedlicher Objekte von großem Nutzen. Anschauliche Beispiele sind die Rotationsbewegung eines Helikopterrotors, durch den laufenden Motor verursachte Vibrationen eines Fahrzeugs oder das Pendeln der Arme und Beine des menschlichen Körpers beim Gehen.

Um solche Signaleigenschaften zu messen, benötigt man Radarsysteme mit einer ausreichend hohen Auflösung und flexiblen Wellenformgenerierung. Besonders vorteilhaft sind kleine,



mobile Radare, die zudem mit einem oder mehreren vom Sender abgesetzten Empfängern ausgestattet sind. Zum einen machen sie die Identifikation durch mehrere unabhängige Aufnahmen des Objekts verlässlicher und zum anderen schützen sie das System vor Entdeckung.

### Das hochauflösende Radar-System SIMIC

Die Komponenten von SIMIC bestehen im Wesentlichen aus drei funktionalen Baugruppen: der digitalen Signalerzeugung und Zeitmanagementeinheit, dem analogen Hochfrequenzzweig und der digitalen Signalaufzeichnung. Das Herzstück der Signalgenerierung ist ein FPGA (*Field Programmable Gate Array*) in Kombination mit einem DDS (*Direct Digital Synthesizer*), welches geeignete Wellenformen generieren kann. Im Falle der hochauflösenden Vermessung von Zielen werden beispielsweise Chirps (in der Frequenz variierende Impulse) erzeugt, die mit einer Bandbreite von bis zu einem Gigahertz ausgesendet werden können. Pulsbreiten, die eine Mikro-Doppler-Analyse ermöglichen, sind ebenfalls frei wählbar. Das FPGA organisiert dabei völlig parallel zu den anderen Aufgaben die Ausführung der Radarfunktion in einer wiederkehrenden Sequenz. Abhängig von der Zielentfernung startet es die Signalaufzeichnungseinheit nach dem Aussenden eines vorher festgelegten beliebigen Signals. Dabei besteht die Möglichkeit, mehrere Aufzeichnungseinheiten und somit mehrere multistatische Empfänger exakt zeitgleich zu starten.

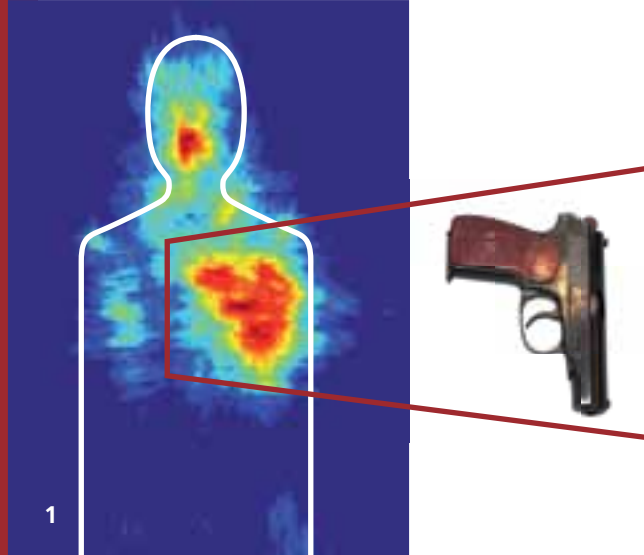
Im Hochfrequenz-Frontend werden die vom DDS erzeugten Signale auf die geforderte Bandbreite in das entsprechende Frequenzband (momentan X-Band, erweiterbar auch auf höhere Frequenzbänder) gemischt.

Die Aufzeichnungseinheit besteht aus einem 14-Bit-Analog-Digital-Konverter, der die empfangenen Signale digitalisiert. Die digitalen Daten werden über eine parallele Schnittstelle an einen weiteren FPGA übertragen, der die Signalvorverarbeitung und die Übertragung über Lichtwellenleiter an die Speichermedien übernimmt. Die aufgezeichneten Signale sowie die daraus erzeugten ein- oder zweidimensionalen Abbildungen können in Echtzeit visualisiert werden.

Das System konnte bereits in einigen Messungen hochauflösende Radarsignaturen (Entfernungsprofile und ISAR-Bilder) von Bodenzielen auf einer Drehplattform im Nahbereich aufzeichnen. Mit den Arbeiten für den Ausbau auf einen Entfernungsbereich bis 25 Kilometer und des multistatischen Netzwerkes wird im Frühjahr 2012 begonnen. Ebenfalls sind Messungen zur Validierung der Mikro-Doppler-Fähigkeit im Sommer 2012 geplant.

- 1 *Echtzeit-Anzeige von SIMIC (ISAR-Bild der Kalibrierkugeln aus Abb. 3).*
- 2 *Das System SIMIC.*
- 3 *Kalibriermessung auf der FHR-Drehplattform.*

*Dipl.-Ing.  
Thomas Rheinhard  
Tel. +49 228 9435-332  
Fax +49 228 9435-633  
thomas.rheinhard@  
fhr.fraunhofer.de*



## SICHERHEITSSYSTEME AN FLUGHÄFEN UNTER DEM GESICHTSPUNKT DER EFFIZIENZ

Der Test von Personenscannern durch die Bundespolizei am Hamburger Flughafen hat gezeigt, wie die Sicherheitstechnik von morgen aussehen muss: Neben der Zuverlässigkeit ist vor allem Schnelligkeit gefragt. Daher forscht das Fraunhofer FHR an effizienten Personen- und Gepäckscannern.

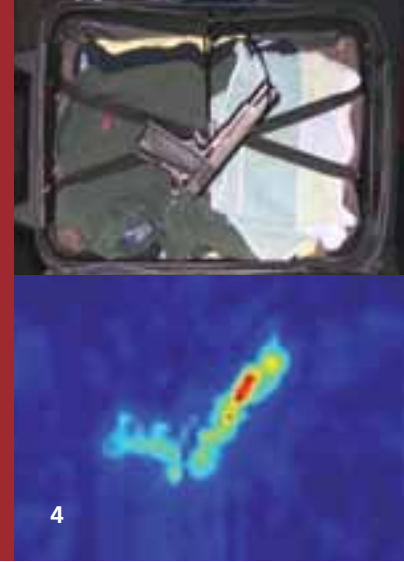
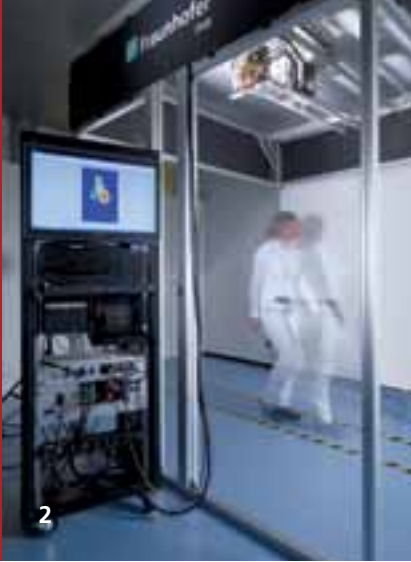
### Sicherheitskontrollen an Flughäfen

Schon heute zählen Flughäfen zu den am besten geschützten Bereichen des öffentlichen Lebens. Das war nur durch große Investitionen in die Sicherheitstechnik zu erreichen. Jedoch wurde dabei oft die Integrierfähigkeit neuer Systeme in den laufenden Passagierabfertigungsprozess außer Acht gelassen. Das Fraunhofer FHR beschreitet daher einen anderen Weg: Es forscht an Sensorlösungen, die sich in die bestehende Infrastruktur so integrieren lassen, dass neben dem technischen Mehrwert vor allem die Effizienz der Sicherheitskontrollen gesteigert wird. In aktuellen Projekten forschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an neuartigen Personenscannern, welche in der Lage sind, potentiell gefährliche Gegenstände an bewegten Personen zu detektieren. Außerdem entwickeln sie mobile Radare zur effizienten Untersuchung von herrenlosen Gepäckstücken.

### Forschung an Personenscannern der nächsten Generation

Millimeterwellen im Frequenzbereich zwischen 30 und 300 Gigahertz werden durch eine Vielzahl von Materialien nur geringfügig gedämpft. Dazu zählen insbesondere Textilien, die in diesem Frequenzbereich nahezu transparent sind. Daher sind sie zur berührungslosen Entdeckung und Identifizierung von am Körper versteckten Gegenständen geeignet, was in der Vergangenheit zur Entwicklung sogenannter Personenscanner führte. Der am Hamburger Flughafen durchgeführte Test hat zwar das technische Funktionsprinzip dieser Scanner bewiesen, diese jedoch als für die Praxis untauglich eingestuft: zu groß, zu teuer, zu viele Fehlalarme, zu geringer Passagierdurchsatz.

Im EU-geförderten Projekt ATOM (*Airport detection and Tracking Of dangerous Materials by passive and active sensor arrays*) forscht das Fraunhofer FHR an Personenscannern,



welche die Reisenden in ihrer Bewegung scannen können. Im Gegensatz zu den aktuell auf dem Markt befindlichen Lösungen, bei denen der zu untersuchende Proband im Scanner einige Sekunden still stehen muss, sollen hierbei die Personen im Gehen gescannt werden (z. B. auf den Laufbändern). Der Besucherstrom wird somit bereits im öffentlichen Bereich kontrolliert, wodurch eine deutlich verbesserte Gefahrenfrüherkennung gewährleistet wird. Ein multistatisches FMCW-Radar, bestehend aus einem Sender und fünf Empfängern, rotiert über der zu untersuchenden Person, während diese sich mit dem Laufband bewegt (Abb. 2). Dabei werden ständig Millimeterwellen emittiert, welche an der Person reflektiert und von dem Radar wieder empfangen werden. Durch eine präzise mechanische Synchronisation können erstmals Radarbilder von bewegten Personen nach dem Prinzip der Apertursynthese berechnet werden. Ein radar-transparenter Sichtschutz sorgt außerdem für ein unbemerktes Scannen, so dass im Vergleich zu derzeitigen Systemen der Passagierfluss nicht beeinträchtigt und damit der Passagierdurchsatz gesteigert wird. Wurde eine Person mit einer unter der Kleidung versteckten Pistole gescannt, ist die Waffe als solche zu erkennen, ohne dass dabei die Privatsphäre verletzt wurde (Abb. 1). Die Intensität der Strahlung ist gesundheitlich unbedenklich: Die maximale Sendeleistung eines Mobiltelefons ist 100 Mal höher.

### Entwicklung kompakter mobiler Radarsensoren zum Scannen von herrenlosem Gepäck

Jeder kennt die Warnungen an Flughäfen, sein Gepäck nicht unbeaufsichtigt stehen zu lassen. Und wenn es doch passiert, wird der Koffer durch das Sicherheitspersonal technisch aufwendig und damit kostenintensiv überprüft. Fast immer handelt es sich dabei um Fehlalarme. Mobile Radarscanner können jedoch bald Abhilfe schaffen (Abb. 3). Wie beim Personenscanner kommt auch hier ein Millimeterwellenradar bei 97 Gigahertz Mittenfrequenz zum Einsatz, welches mit Hilfe von Linearmotoren zweidimensional bewegt wird. Damit lassen sich sowohl hochaufgelöste 2D- als auch 3D-Bilder erzeugen. Im praktischen Einsatz am Flughafen bietet dieses System viele Vorteile: es ist mobil, kostengünstig, im Vergleich zur Röntgentechnologie sind keinerlei Schutzmaßnahmen notwendig und es wird nahezu in Echtzeit ein Radarbild des Koffers erzeugt. So werden nur Gepäckstücke, in denen tatsächlich gefährliche Gegenstände gefunden werden (Abb. 4), näher untersucht. Das entlastet Sicherheitspersonal und Passagier gleichermaßen.

- 1 *Radarbild einer Person mit versteckter Pistole.*
- 2 *Prototyp des Personenscanners zum Scannen bewegter Personen.*
- 3 *Mobiler Kofferscanner*
- 4 *oben: Waffe in einem geöffnetem Koffer, unten: Radarbild des verschlossenen Koffers.*

*Dr. techn.  
Sebastian Hantscher  
Tel. +49 228 9435 885  
Fax. +49 228 9435 608  
sebastian.hantscher@  
fhr.fraunhofer.de*



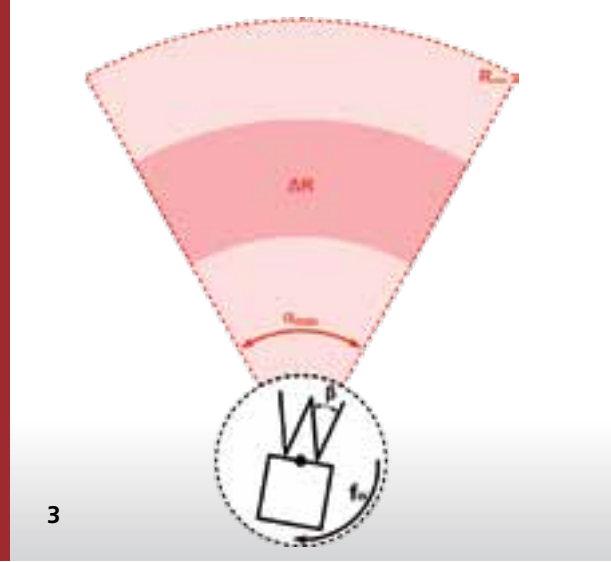
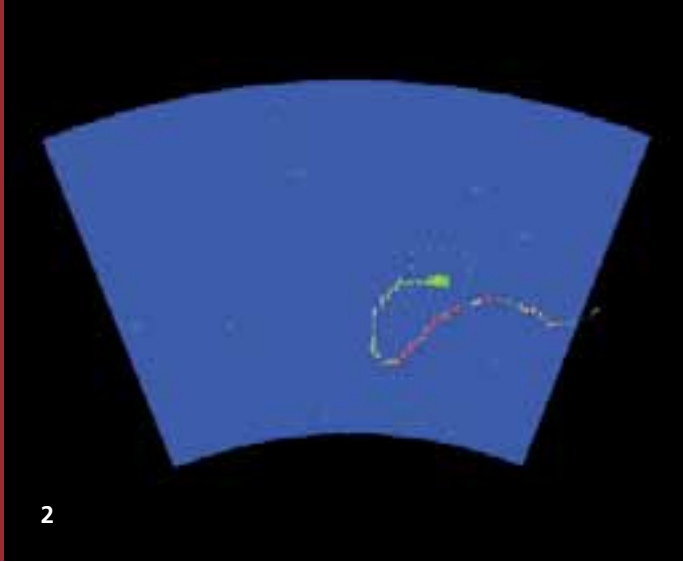
## PERIMETERÜBERWACHUNG FÜR ZIVILE ANLAGEN UND ZUM FELDLAGERSCHUTZ

An allen neuralgischen Punkten des öffentlichen Lebens muss heute mit krimineller oder terroristischer Bedrohung gerechnet werden. Dies gilt auch für militärische Feldlager. Hier sind Sensorsysteme notwendig, die größere Bereiche effektiv überwachen können.

### Millimeterwellen Rundschradar

Für die permanente, allwetterfähige Umfeldüberwachung sind Radarsensoren besonders geeignet. Neben der Fähigkeit, Regen, Schnee, Nebel und auch Staub zu durchdringen, sind sie in der Lage, Bewegungen innerhalb ihres Gesichtsfeldes sicher zu detektieren und diese Bewegung zu verfolgen. Falls nur geringe Entfernungen von ca. 100 Meter bis 1 000 Meter zu überwachen sind, können miniaturisierte Radare im Millimeterwellenbereich dazu herangezogen werden. Dieser Frequenzbereich ermöglicht zum einen eine Miniaturisierung der Sende-Empfangseinheit, da hier grundsätzlich mit monolithisch integrierten Bauteilen hoher Komplexität gearbeitet wird. Zum anderen können auch kleine Antennen verwendet werden, die dennoch eine ausreichende Bündelung aufweisen, so dass auch mit realer Apertur gearbeitet werden kann. Von ganz besonderer Bedeutung für diesen Frequenzbereich ist die Möglichkeit, mit großen Signalbandbreiten zu arbeiten und so eine sehr hohe Entfernungsauflösung zu ermöglichen. Neben diesen und noch weiteren Vorteilen in den Bereichen Technologie und Signalverarbeitung ist der Millimeterwellenbereich besonders dann von Interesse, wenn es um die Sensierung kleinskaliger Effekte des Hintergrundes oder des Zieles geht. Es ist intuitiv verständlich, dass mit kleinen Radarwellenlängen eben auch kleinste Strukturen oder Strukturänderungen nachgewiesen werden können. Ein Beispiel ist die Entdeckung von Waffen unter der Kleidung.

Während gerade für diese Anwendung in der Regel auf bildgebende Systeme zurückgegriffen wird, die eine hohe Systemkomplexität erfordern, geht der hier beschriebene Ansatz einen anderen Weg: Er versucht, mithilfe eines möglichst einfachen Millimeterwellenradars, aber intelligenter multisensorieller Signalverarbeitung immer dann eine Warnmeldung zu generieren, wenn eine verdächtige Person den überwachten Bereich betritt.



Dem Ansatz liegt zugrunde, dass das arbeitende Radar den Zugangsbereich permanent im Rundsuchbetrieb, mit enger Azimut- und weiter Elevationskeule abbildet. Von Scan zu Scan werden die generierten Bilder miteinander verglichen und einem Änderungsdetektionsverfahren unterworfen. Damit ergibt sich, sobald eine Person oder ein Fahrzeug den Bereich betritt, ein Änderungssignal. Bewegt sich die Person, so ergibt sich im Änderungsbild ein Signal, welches in aufeinander folgenden Scans durch Kalman-Filterung eine Spur erzeugt. Gleichzeitig wird der Radarrückstreuquerschnitt (RCS) des Zielobjekts vermessen und in Farbe kodiert dargestellt. Da der RCS größer ist, wenn die Person eine Waffe, Sprengstoffgürtel oder anderen metallischen Gegenstand am Körper trägt, kann aus dieser Information bei Überschreitung eines Schwellwertes ein Alarmkriterium abgeleitet werden. Dazu muss die R4-Abhängigkeit und die Größe der Zielperson zur Normierung herangezogen werden. Die Querschnittsfläche kann durch eine zusätzliche Videokamera bestimmt werden, die mithilfe der Radarspur nachgeführt werden kann.

Das Radar verfügt über folgende Eigenschaften:

- Die Drehbewegung des Radarsystems ermöglicht die Überwachung eines Winkelbereichs von 90 Grad pro Umdrehung. Diese ist aus dem gesamten Winkelbereich von 360 Grad herausgeschnitten.
- Das Radarsystem rotiert mit einer Geschwindigkeit von 2880 Grad pro Sekunde.
- Damit kann eine Überwachung von 360 Grad in einer halben Sekunde erreicht werden.
- Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass bei Bedarf ein detektiertes Ziel bis zu 8 mal in der Sekunde beobachtet werden kann.
- Das rotierende Radarsystem führt Entfernungsmessungen mit einer bestimmten Entfernungsauflösung während der Drehbewegung durch.

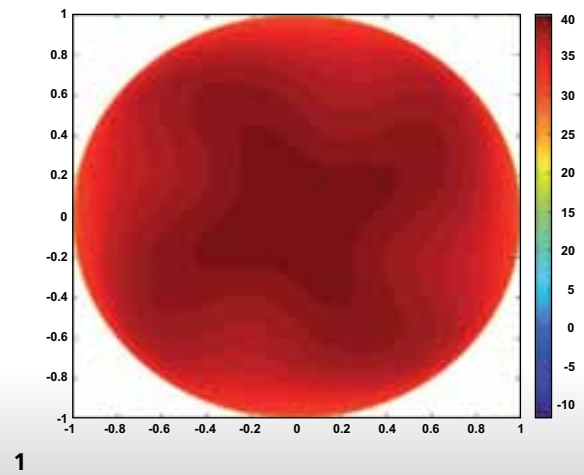
Für den Systemdemonstrator wurde das FM-CW-Radar SUMATRA bei 94 Gigahertz genutzt. Um einen hohen Dynamikbereich zu garantieren, was nur bei geringem Übersprechen zwischen Sender und Empfänger möglich ist, werden getrennte Antennen verwendet. Diese sind Schlitzantennen mit einer Bündelung von 1,8 Grad (Azimut) und 12 Grad (Elevation). Abb. 1 zeigt ein Foto des Experimentalsystems. Abb. 2 gibt eine Spur für eine Person mit vorn getragener Sprengstoffweste. Solange die Person sich dem Radar nähert ist die Spur rot dargestellt (großer RCS). Wenn die Person sich wieder entfernt, wird die Spur grün (niedriger RCS). Um einen größeren, evtl. durch Gebäude abgeschatteten Bereich zu überwachen, oder einen stark gegliederten Geländeabschnitt, ist es denkbar, eine Vielzahl von Radar- und Videosensoren zu vernetzen. In einer kommerzialisierten Ausführung können preiswerte Millimeterwellenradare aus der Automotive-Entwicklung genutzt werden.

1 Foto des Experimentalsystems für Perimeterüberwachung bei 94 Gigahertz.

2 Radarbild mit Änderungsdetektion und Spur einer verfolgten Person. Der RCS der Person ist mit Farben kodiert, wobei Rot einem hohen und grün einem niedrigeren RCS entspricht.

3 Funktionsweise des Experimentalsystems, wobei  $\beta$  dem Azimutöffnungswinkel der Antennen,  $f_w$  der Rotationsgeschwindigkeit,  $R_{max}$  der maximalen Messentfernung,  $\Delta R$  der Messtiefe und  $\alpha_{max}$  dem Winkelbereich entspricht.

M. Sc. Winfried Johannes  
 Tel. +49 228 9435-355  
 Fax +49 228 9435-608  
 winfried.johannes@  
 fhr.fraunhofer.de



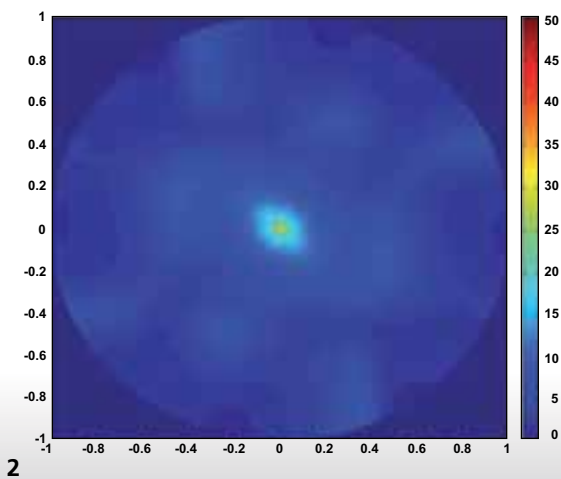
## ULTRABREITBAND UNTERSUCHUNGEN BASIEREND AUF MEHRARM-SPIRALANTENNEN

Frequenzunabhängige Strahlungscharakteristiken und ein festes Phasenzentrum sind gewünschte Eigenschaften einer UWB-Antenne. Mehrarm-Spiralantennen erfüllen diese Anforderungen und ermöglichen darüber hinaus die Anwendung moderner Gruppensignalverarbeitung.

Ultrabreitband Technologien (UWB) stoßen seit der Freigabe durch die US-amerikanische *Federal Communications Commission* im Februar 2002 auf reges Interesse. Vorgegebene Randbedingungen sollen die Beeinflussung anderer Geräte durch die UWB-Nutzung verhindern. Neben UWB-Anwendungen im Kommunikationsbereich sind auch UWB-Radaranwendungen in der Diskussion. Mögliche Einsatzbereiche wären das Bodenradar, das Mauer durchdringende Radar, als auch medizinische Anwendungen wie die kontinuierliche Überwachung von Herz- und Atemfunktion, Tumordiagnostik oder allgemein bildgebende Systeme. Eine Grundvoraussetzung für alle UWB-Anwendungen ist eine den UWB-Anforderungen angepasste Sensorik. Um den Einfluss der Antennen auf die empfangenen Signale zu minimieren, sind Antennen respektive Antennenkonfigurationen erwünscht, die weitgehend frequenzunabhängig über einen sehr großen spektralen Bereich abstrahlen und empfangen können sowie ein konstantes Strahlungszentrum aufweisen.

Eine Antenne, die diesen Anforderungen gerecht wird und somit eine von der Sensorik weitgehend unabhängige Signalauswertung ermöglicht, ist die mehrarmige Spiralantenne. Spiralantennen gestatten den Empfang respektive die Aussendung von Signalen über den gesamten für kommerzielle UWB Anwendungen freigegebenen Frequenzbereich von 3,1 bis 10,6 Gigahertz. Viele moderne Verfahren der Gruppensignalverarbeitung setzen einen mehrkanaligen Aufbau für den Sende- und Empfangsfall voraus. Gruppensignalverarbeitung ermöglicht z. B. sehr genaue Positionsbestimmungen sowie unter gegebenen Randbedingungen die direkte Zuordnung eines Signalanteils zu einem reflektierenden Gegenstand. In bisherigen Anwendungen der „Array-Signalverarbeitung“ wurden hierzu Gruppenantennen und dislozierte Sensoren betrachtet, deren Signale gemeinsam ausgewertet werden. Allerdings werden die empfangenen Signale von Gruppenantennen je nach Raumrichtung frequenzabhängig moduliert. Gruppenantennen eignen sich daher nur bedingt für UWB-Anwendungen.





2



3

Hier sind Spiralantennen eine mögliche Alternative zu Gruppenantennen. Trotz eines sehr geringen Platzbedarfs lässt die Auswertung der Signalmoden einer Mehrarm-Spiralantenne, die über ein an die Antenne angeschlossenes Netzwerk empfangen werden, die Anwendung moderner Gruppensignalverarbeitung zu.

### Untersuchungen zur Gruppensignalverarbeitung mit Spiralantennen

Die in unseren Untersuchungen genutzte Vierarm-Spiralantenne wurde in Zusammenarbeit mit der MBDA Deutschland GmbH entwickelt. Die Strahlungsdiagramme wurden hinsichtlich Amplitude und Phase über ein dichtes Frequenzraster vermessen und ausgewertet. Um die Möglichkeiten der Gruppensignalverarbeitung mit Mehrarm-Spiralantennen zu überprüfen, wurden in einem ersten Ansatz Verfahren zur Richtungsschätzung empfangener Signale betrachtet. Die Algorithmen waren hierzu an die veränderten Randbedingungen, die sich durch Spiralantennen ergeben, anzupassen. Die Verfahren, um Einfallsrichtung und Polarisation empfangener Signale zu schätzen, wurden in Simulationen erprobt und an gemessenen Daten verifiziert.

Die Anwendung von „Array-Signalverarbeitungsverfahren“ stellt hohe Anforderungen an die Phasen- und Amplitudenstabilität sowie ein zu vernachlässigendes Übersprechen zwischen den Empfangskanälen. Um diesen Ansprüchen über große Bandbreiten gerecht zu werden, mussten neue Verfahren zur Anpassung der vier Empfangskanäle entwickelt werden. Dabei wurden die resultierenden Restfehler unterschiedlicher Kalibrationsverfahren an einem geeigneten Gütekriterium verglichen. Das so gefundene Kriterium ermöglicht es ferner, die notwendige Anzahl von Kalibrationskoeffizienten zu minimieren.

### Ausblick

Spiralantennen bieten neue Möglichkeiten und Einsatzbereiche für UWB-Anwendungen. Für den Einsatz von Mehrarm-Spiralantennen in kommerziellen Anwendungen sind allerdings noch weitergehende Untersuchungen notwendig. Der Rolle der Polarisation empfangener respektive ausgesandter UWB-Signale sowie der Auswirkungen der Antenne auf diese Signale wurde bisher wenig Bedeutung beigemessen. Bisherige Arbeiten untersuchten Spiralantennen jedoch nur hinsichtlich ihrer Empfangseigenschaften. Die von den FHR-Wissenschaftlern erzielten Ergebnisse legen allerdings nahe, im Bereich Polarisation weitergehende Analysen durchzuführen. Gerade für den Sendefall könnten sich weitere interessante Einsatzmöglichkeiten anbieten, die es zu erforschen gilt.

1 Schätzung der Einfallsrichtung (konventionelle Strahlformung).

2 Schätzung der Einfallsrichtung bei gleichzeitiger Schätzung der Polarisation der einfallenden Welle mit mehrkanaliger ML-Richtungsschätzung.

3 Vierarm-Spiralantenne

Dipl.-Math. Josef Worms  
Tel. +49 228 9435-216  
Fax +49 228 9435-627  
josef.worms@  
fhr.fraunhofer.de



## ÜBERWACHUNG VON GEFAHRENBEREICHEN MIT MIMO-RADAR

Eine Erhöhung der Sicherheit für unterschiedlichste Gefahrenbereiche kann durch robuste, skalierbare und preiswerte MIMO-Radarsysteme erreicht werden. Am Fraunhofer FHR werden hierzu neue Methoden im Bereich der Signalprozessierung entwickelt und anwendungsnahe MIMO-Radardemonstratoren aufgebaut.

Berghänge und Böschungen sind potenzielle Gefahrenquellen, denn sie bergen das Risiko abzurutschen und Menschen, Gebäude und Infrastruktur unter sich zu begraben. Besonders tückisch sind hierbei sowohl künstlich erzeugte Rand- und Arbeitsböschungen in Minen und im Tagebau als auch natürliche Berghänge in der Nähe von Siedlungen und in Erholungsgebieten. Während erstere, durch den stetigen Abbau von Abraum, eine ständig ändernde Gefahrensituation darstellen, erhöhen bei letzteren vor allem lang anhaltende oder sinnflutartige Regenfälle das Risiko eines Murenabgangs oder einer Gerölllawine. In Gebieten mit hohem Schneefall bergen zudem steile Berghänge die Gefahr von Lawinenabgängen. Abbildende MIMO-Radarsysteme können bei all diesen Szenarien großflächig Böschungen und Berghänge überwachen und realzeitlich Verschiebungen in der Größenordnung von Millimetern detektieren. Ein nachgeschaltetes Warnsystem kann so rechtzeitig vor einem potentiellen Abrutschen des Hangs oder dem Abgang einer Lawine warnen.

Ein weiteres Sicherheitsszenario ergibt sich sowohl in Katastrophengebieten nach Erdbeben, Hurrikans und Überschwemmungen als auch nach Gebäudeeinstürzen beispielweise durch Gasexplosionen oder unterirdische Hohlräume. Bei diesem Szenario steht für die Rettungskräfte die Bergung verschütteter und verletzter Menschen an oberster Stelle. Hierbei begeben sich die Rettungskräfte selbst oftmals in Gefahr, da sie durch nachträglich einstürzende Trümmer (z. B. Reste von Gebäudewänden) erschlagen werden können. Abbildende MIMO-Radarsysteme können hier eingesetzt werden, um ganze Trümmerberge zu überwachen und langsame Bewegungen von Trümmerfragmenten im Millimeterbereich zu detektieren. So kann vor dem Einsturz von Trümmern rechtzeitig gewarnt werden.

Zur Überwachung und zum Schutz von Industrieanlagen und sicherheitskritischen Infrastrukturen können ebenfalls abbildende MIMO-Radarsysteme zum Einsatz kommen. In Kombination



mit Verfahren zur Bewegtzientdeckung (*Moving Target Indikation, MTI*) kann so das potentielle Eindringen unberechtigter Personen großflächig erkannt werden.

Als letzter Anwendungsbereich sei hier noch das Monitoring von Vibrationen an Brücken und Gebäuden genannt. Belastungen durch starken Verkehr und ungünstige Windverhältnisse können zu Schwingungen und Vibrationen führen, die zu gefährlichen Schäden am Material und somit zu einer Gefährdung von Menschenleben führen können. Mit MIMO-Radaren können großflächig selbst kleinste Vibrationen gemessen und Vibrationsprofile über die gesamte Bausubstanz hinweg erstellt werden.

### **MIMO-Radarsysteme für Abbildungen in 2D und 3D**

MIMO-Radarsysteme haben ähnliche Fähigkeiten wie komplexe und teure *Phased-Array*-Radare. Der Clou eines MIMO-Radarsystems besteht darin, dass die Anzahl an Einzelementen im Vergleich zu einem gleich großen *Phased-Array*-Radar drastisch reduziert wird. So lassen sich aus einer relativ kleinen Anzahl an verteilten Send- und Empfangselementen, im Rahmen der Signalprozessierung, virtuelle vollständig besetzte Antennen-Arrays synthetisieren. Durch eine geschickte räumliche Verteilung von z. B. 32 Sende- und 32-Empfangselementen können so 1024 virtuelle Antennen erzeugt werden. Die azimutale Auflösung kann, im Vergleich zu einem gleich großen *Phased-Array*, sogar um fast den Faktor zwei gesteigert werden. Wird solch ein MIMO-Radar auf einer bewegten Plattform (z. B. einem Flugzeug) eingesetzt, kann durch Hinzunahme des SAR-Prinzips eine 3D-Abbildung der Szene erzeugt werden.

### **Die MIMO-Radardemonstratoren MIRA-CLE und ARTINO**

Die Radarsysteme der MIRA-CLE Serie zeichnen sich durch ihre Skalier- und Erweiterbarkeit für den stationären Betrieb aus. Mit MIRA-CLE X wurde ein X-Band Radar aufgebaut, mit dem die Fähigkeit der Überwachung von Berghängen und Böschungen bereits erfolgreich demonstriert wurde. Das sich derzeit im Aufbau befindliche MIRA-CLE Ka arbeitet im Ka-Band und wird sich durch seine Größe von nur 60 Zentimetern hervorragend für den mobilen Einsatz eignen.

Das sich in der Entwicklung befindliche luftgetragene Experimentalsystem ARTINO kombiniert die Vorzüge eines MIMO-Radars mit den Vorteilen eines SAR-Systems. Dies ermöglicht eine dreidimensionale hochauflösende Abbildung des direkt überflogenen Gebietes und schafft somit einen gänzlich neuen Ansatz der großflächigen Überwachung von z. B. Infrastrukturen und Industrieanlagen.

- 1 *MIRA-CLE X im Einsatz.*
- 2 *Aufbau von MIRA-CLE Ka im Labor.*
- 3 *ARTINO bei einem Testflug.*

*Dr. rer. nat. Jens Klare  
Tel. +49 228 9435-311  
Fax +49 228 9435-618  
jens.klare@  
fhr.fraunhofer.de*

GESCHÄFTSFELD



# SENSOREN FÜR FAHRZEUGE UND VERKEHR

Durch zunehmende Miniaturisierung und den Einsatz hochintegrierter Komponenten können Radarsysteme so preiswert und kompakt gefertigt werden, dass sie in verschiedensten Fahrzeugtypen eingesetzt werden können. So tragen die Sensoren zur Sicherheit im Luft-, See-, Schienen- und Straßenverkehr bei.

Radargeräte spielen bereits seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle bei der Verkehrssicherheit – zu Wasser, zu Land und in der Luft. Von der Überwachung der Geschwindigkeit im Straßenverkehr, über Schiffsradar bis hin zum Netz der Flugsicherung gibt es viele Bereiche, in denen Radarsensoren nicht mehr wegzudenken sind. Trotzdem kommen ständig neue Anwendungsbereiche hinzu, denn durch den Einsatz neuer Technologie können kompaktere und preiswertere Geräte aufgebaut werden. Das FHR arbeitet zurzeit aktiv an der Entwicklung einer neuen Generation von 24 Gigahertz-Radarsensoren für Kraftfahrzeuge mit. Der Sensor bestimmt den Abstand zu vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugen sowie Hindernissen und wird z. B. zur Kollisionswarnung, beim Spurwechsel oder beim Einparken eingesetzt. So sollen Fahrerassistenzsysteme und Sicherheitsmerkmale, die bisher der Luxusklasse vorbehalten waren, zu einem erschwinglichen Preis auch für Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse verfügbar werden. Im Bereich der Luftfahrt und Avionik werden Radarsysteme mit hoher räumlicher Auflösung zur Unterstützung des Piloten bei Dunkelheit, schlechter Sicht oder Annäherung an gefährliche Hindernisse (z. B. Hochspannungsleitungen oder Windenergieanlagen) eingesetzt. Solche mit dem Begriff *Enhanced Vision Systems* (EVS) bezeichneten Systeme werden bereits für verschiedene Luftfahrzeuge entwickelt und erhöhen die Sicherheit im Luftverkehr.

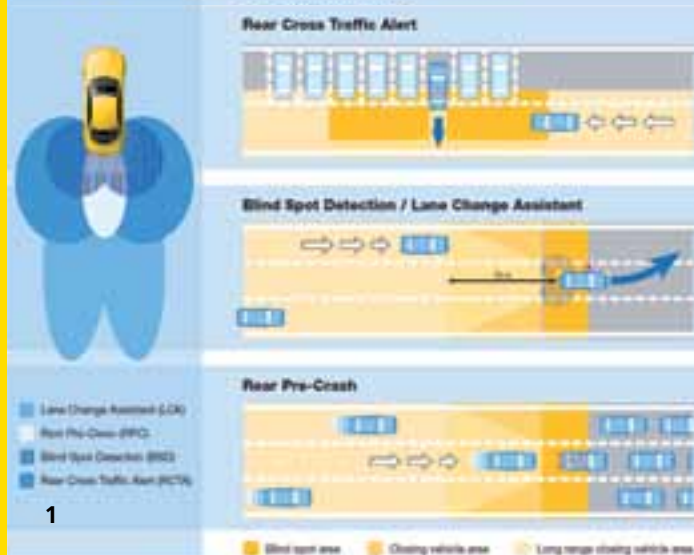
Wegen der zunehmenden Anzahl drahtloser Systeme in modernen Fahrzeugen ist ein weiterer wichtiger Aspekt die Integration von Antennen. Für die Auswahl eines optimalen Einbauorts stehen leistungsfähige Verfahren zur elektromagnetischen Modellierung zur Verfügung, mit denen sich der Einfluss der Trägerplattform auf das Antennendiagramm schon in der Konzeptphase simulieren lässt und eine Beeinträchtigung der Funktion vermieden werden kann. Mit Hilfe langjähriger

Erfahrung bei der Entwicklung konformer und strukturintegrierter Antennen können speziell angepasste Antennen aufgebaut werden, die auf den im Fahrzeugbau verwendeten Materialien, z. B. Glas- oder Kohlefaser-Verbundwerkstoffe, aufbauen und die keine Verschlechterung der mechanischen Stabilität oder Aerodynamik bewirken. Diese Technologie wird heute bereits erfolgreich in Segelflugzeugen eingesetzt, bei denen ein strömungsgünstiger Einbau der Antennen besonders wichtig ist. Die Sensorik kommt aber nicht nur am Fahrzeug selbst zum Einsatz, sondern kann auch außerhalb eingesetzt werden. So sollen zukünftig Radarsysteme aus dem Weltraum oder verteilte Sensoren am Straßenrand den Verkehrsfluss großflächig überwachen. Auch die dauerhafte Überwachung kritischer Verkehrsknotenpunkte, z. B. an stark befahrenen Kreuzungen, ist zukünftig vorgesehen. Dadurch sollen Engpässe rechtzeitig erkannt und Verkehrsleitsysteme bedarfsgerecht gesteuert werden. So können Staus vermieden und wertvolle Ressourcen geschont werden.

Der rasante Fortschritt bei der Entwicklung hochintegrierter Komponenten wird in Zukunft auch den Einsatz abbildender Radarsysteme zu vergleichsweise geringen Kosten ermöglichen. Durch die – heute noch juristisch umstrittene – Kombination mit automatischen Systemen und Robotik im Fahrzeug erschließt sich eine Fülle neuer Anwendungsmöglichkeiten, z. B. automatische Ausweichmanöver bei Kollisionsgefahr und aktive Unterstützung eines Piloten beziehungsweise Fahrers bei ungünstigen Witterungsbedingungen und schlechter Sicht. Welche Anwendungen der neuen Sensoren die größte Akzeptanz und Verbreitung finden werden, ist offen. Die am Fraunhofer FHR entwickelten Technologien, Verfahren und Systeme werden dabei eine wichtige Rolle spielen.

*Mit Hilfe von Radarsensoren können Verkehr und Transportwege überwacht (oder umgelenkt) und Unfälle verhindert werden.*

*Dr.-Ing. Peter Knott  
Tel. +49 228 9435-235  
Fax +49 228 9435-521  
peter.knott@  
fhr.fraunhofer.de*



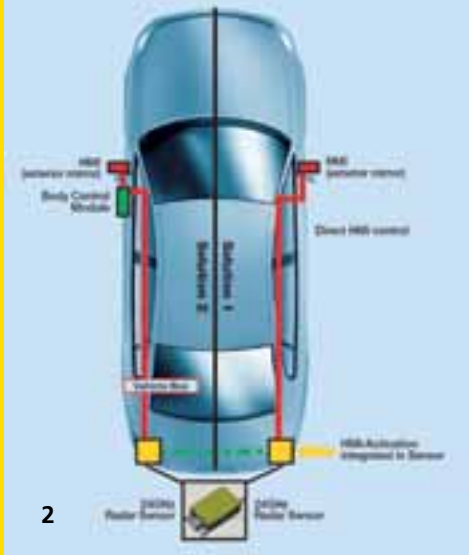
## ANTENNEN FÜR AUTOMOTIVE RADAR

Durch den Einsatz moderner Sensorik machen Hersteller unsere Autos sicherer und unterstützen den Fahrer in kritischen Situationen. Damit die Komponenten von Bordradaren unter allen Umständen zuverlässig arbeiten, unterstützen Wissenschaftler am FHR die Automobilindustrie beim Entwurf von Antennen und der Positionierung der Geräte am Fahrzeug.

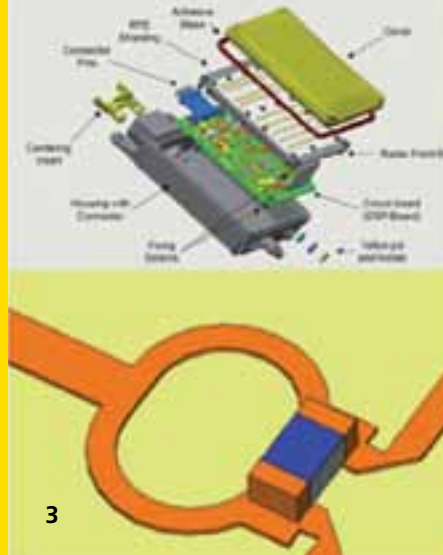
Unfälle im Straßenverkehr mit Personenschäden sind häufig auf nicht angepasste Geschwindigkeit oder auf ungenügenden Sicherheitsabstand zurückzuführen. Abhilfe schaffen Abstandswarnsysteme auf Basis von Radarsensoren. Sie messen kontinuierlich den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und warnen akustisch, optisch oder haptisch beim Unterschreiten des vorher vom Fahrer selbst eingestellten Abstands. Mit Abstandswarnsystemen lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls durch zu dichtes Auffahren deutlich reduzieren.

Wissenschaftler am Fraunhofer FHR arbeiten zurzeit an der Entwicklung einer neuen Antenne für das Bordradar eines namhaften, deutschen Automobilzulieferers. Dieses System basiert auf einem innovativen 24 Gigahertz-Radarsensor und bietet Sicherheitsmerkmale, die bisher Fahrzeugen der Luxusklasse vorbehalten waren, zu einem erschwinglichen Preis – auch für Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse. Das rückwärtige Radar ermöglicht mit nur zwei Sensoren vier unterschiedliche Funktionen:

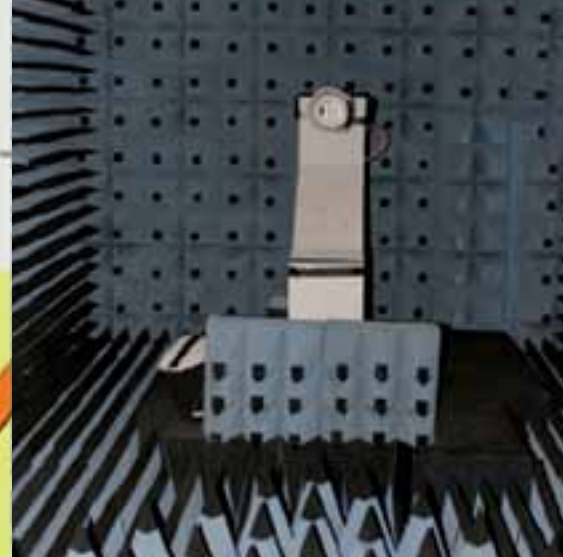
- Schlecht oder gar nicht einsehbare Bereiche hinter dem Fahrzeug werden überwacht und Objekte im „toten Winkel“ erkannt (*Blind Spot Detection, BSD*).
- Der sogenannte Spurwechselassistent warnt den Fahrer vor gefährlichen Situationen beim Spurwechsel und beim Überholen. Die Reichweite von rund 70 Metern gibt dem Fahrer genügend Zeit zur Reaktion, besonders im Autobahnverkehr (*Lane Change Assistant, LCA*).
- Sich von hinten nähernde Fahrzeuge werden permanent überwacht, im Fall einer drohenden Kollision werden Maßnahmen zum Schutz der Insassen ergriffen, z. B. Straffen der Anschnallgurte oder aufladen der Brems hydraulik (*Rear Pre-Crash, RPC*).
- Beim Herausfahren im Rückwärtsgang aus einer Parklücke wird sich nähernder, ansonsten nicht wahrnehmbarer Querverkehr frühzeitig erkannt und der Fahrer gewarnt (*Rear Cross Traffic Alert, RCTA*).



2



3



Die exakte Ermittlung von Abstand, Winkel und Relativgeschwindigkeit der Objekte, korrekte Spurzuordnung sowie das Erkennen und Differenzieren der Straßenrandbebauung eröffnen Potenzial für weitere Applikationen, wie etwa das Geschwindigkeits- und Abstandsregelsystem ACC oder weitere *Pre-Crash*-Funktionen. Inzwischen setzen verschiedene europäische und asiatische Fahrzeughersteller diesen Spurwechselassistenten in der Serie ein. Er findet sich bereits in neun unterschiedlichen Baureihen wieder, weitere werden folgen.

Aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung beim Aufbau konformer Antennengruppen und der Integration von Antennen in Fahrzeuge sind die Mitarbeiter des Fraunhofer FHR maßgeblich am Entwurf des 24 Gigahertz-Antennen-Frontends beteiligt. Die Antenne und das dazu gehörige Speisernetzwerk werden als mehrlagige gedruckte Schaltung aufgebaut und sollen bereits in der kommenden Generation des rückwärts schauenden Radarsystems eingesetzt werden. Zu den Aufgaben des Fraunhofer FHR gehört unter anderem der Schaltungsentwurf mit Vollwellen-Simulationswerkzeugen, die Optimierung des Strahlungsdiagramms anhand einer vorgegebenen Maske, die Charakterisierung der eingesetzten Materialien für die vorgegebene Betriebsfrequenz, die Optimierung von Gehäuse und Radom sowie die Vermessung von Prototypen.

Von besonderer Bedeutung ist die Auswahl eines geeigneten Einbauorts am Fahrzeug, an dem die Charakteristik der Antenne nicht durch Wechselwirkung mit der Karosserie (z. B. Stoßfänger und Halterung) beeinträchtigt wird und die volle Funktion des Sensors gewährleistet ist. Dabei können die im Institut entwickelten Verfahren zur numerischen Modellierung elektromagnetischer Felder einen Beitrag leisten. Schon vor Beginn der Serienproduktion eines neuen Typs soll in kurzer Zeit mit Hilfe von Konstruktionsdaten des Fahrzeugs und der Antenne die Situation simuliert und günstige Einbaupositionen analysiert werden. Bei der – im Vergleich zur betrachteten Wellenlänge – großen Ausdehnung von Fahrzeugen stellt dies auch für leistungsfähige Vollwellen-Simulationswerkzeuge heute noch eine Herausforderung dar.

In Zukunft werden Fahrerassistenzsysteme nicht nur warnen, sondern können – sofern die rechtlichen Voraussetzungen dafür geschaffen sind – im Bedarfsfall auch aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen, z. B. durch Ausweich- oder Bremsmanöver. So werden Kollisionen vermieden und andere Verkehrsteilnehmer geschützt, z. B. Fußgänger oder Radfahrer. Damit wird ein weiterer Schritt auf dem Weg zu mehr Sicherheit im Straßenverkehr genommen.

1 Anwendung und Funktion des rückwärtigen Radarsensors.

2 Spezifikationen und Einsatz des 24 GHz Radarsensors.

3 Aufbau des 24 GHz Radarsensor, Detail der mehrlagigen, gedruckten Schaltung und Charakterisierung von Prototypen im reflexionsarmen Messraum bei Fraunhofer FHR.

Dr.-Ing. Thomas Bertuch  
Tel. +49 228 9435-561  
Fax +49 228 9435-521  
thomas.bertuch@  
fhr.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD





# SENSOREN FÜR DIE QUALITÄTSSICHERUNG

Die Anforderungen an Hochfrequenzsensoren für den industriellen Bereich verlangen neue Konzepte und Ansätze in der Radarentwicklung. Der Transfer klassischer Verfahren und Technologien auf die Wünsche des industriellen Kunden stellt die wesentliche Herausforderung dar.

Die Qualitätssicherung ist eine der wesentlichen Schlüssel für den Unternehmenserfolg. Null-Fehler-Konzepte gehen noch einen Schritt weiter als klassische Qualitätssicherungssysteme: Es geht um eine frühzeitige und vollständige Überwachung aller relevanten Fertigungsschritte. Ziel der Null-Fehler-Konzepte ist dabei der schonende Umgang mit Ressourcen und letztendlich das Senken der Herstellungskosten, indem durch eine Integration der Sensoren in den laufenden Fertigungsprozess Abweichungen detektiert und in Echtzeit korrigiert werden.

Insbesondere bei hohen Fertigungsgeschwindigkeiten stoßen herkömmlichen Sensoren an ihre Grenze, so dass aktuell im wesentlichen Kamerasysteme zum Einsatz kommen, die eine Inspektion auf Basis der geometrischen Abmessungen und der Oberfläche des Prüflings durchführen. Hochfrequenzsensoren ergänzen die bestehenden Hochgeschwindigkeitssysteme ideal, da sie einen Einblick in das Innenleben des Produkts erlauben. Neben der Detektion von Einschlüssen und Fehlern liefern Sie ein breites Spektrum von zusätzlichen Information wie z. B. über den Feuchtigkeitsgehalt, die Permeabilität des Materials oder den Aufbau und die Schichtdicke von mehrlagigen Materialien. Damit sind Hochfrequenzsensoren eine ideale Ergänzung zur Überwachung von Produktionsabläufen und garantieren einen kontinuierlich hohen Qualitätsstandard in der laufenden Fertigung.

Aufgrund des breiten Frequenzspektrums, welches bei den Hochfrequenzsensoren zur Verfügung steht und sich von einigen Megahertz bis in den Terahertz-Bereich erstreckt, eignen sich die Qualitätssicherungssysteme für eine Vielzahl von unterschiedlichen Aufgaben. Das Einsatzspektrum von Hochfrequenzsystemen reicht dabei von einfachen geometrischen Vermessungen, über die Bestimmung von Materialparametern bis zur Überwachung und Kontrolle von Reifungsprozessen bei

Früchten. Beobachtet man dabei gezielt die Absorptionslinien einzelner Inhaltsstoffe, lassen sich Schwankungen im Misch- oder Konzentrationsverhältnissen von Schüttgütern sowohl räumlich wie zeitlich aufgelöst darstellen. Hardware und Softwarekonzepte werden dabei auf den jeweiligen individuellen Anwendungsfall ausgerichtet und optimiert.

Dabei gilt, nicht immer ist die beste technische Lösung auch die beste Kundenlösung. Daher verfolgt das Fraunhofer FHR ganzheitliche, individuelle Lösungen, um die Kosten, die Entwicklungszeit sowie die verwendete Technik optimieren. Dabei steht die Integration der Sensoren in den Produktionsprozess an vorderster Stelle. Durch den Zusammenschluss mit Partnern innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft steht ein breites Spektrum von unterschiedlichen Sensoren und Messverfahren zur Verfügung. Die multispektralen Sensorkonzepte erlauben selbst Lösungen für Aufgabenstellungen an denen die bisherigen klassischen Qualitätssicherungssysteme scheitern.

Radarsysteme werden schon immer eingesetzt, wenn die Umweltbedingung den Einsatz von optischen Sensoren nicht zulassen. Dies gilt selbstverständlich auch für den Einsatz von Hochfrequenzsensoren in der Qualitätssicherung. Die Fähigkeit, Abstände bis in den Mikrometer-Bereich präzise zu vermessen, ist der Schlüssel für eine gleichbleibend hohe Qualität; auch unter kritischen Umweltbedingungen in der Fertigung.

*Der Terahertz-Scanner kann das Innere von Briefsendungen sichtbar machen.*

*Dipl.-Ing. Dirk Nüßler  
Tel. +49 228 9435-550  
Fax +49 228 9435-608  
dirk.nuessler@  
fhr.fraunhofer.de*



## SAMMI SETZT NEUE MASSSTÄBE

Der *Stand Alone MilliMeter Wave Imager* oder kurz SAMMI wurde ursprünglich als Demonstrator gebaut, um das Potential abbildender Hochfrequenzsensoren aufzuzeigen. Das unerwartete hohe Kundenfeedback offenbarte jedoch die große Nachfrage nach kompakten Scannerkonzepten im Niedrigpreissegment, so dass sich SAMMI nach und nach zu einer Produktfamilie entwickelt.

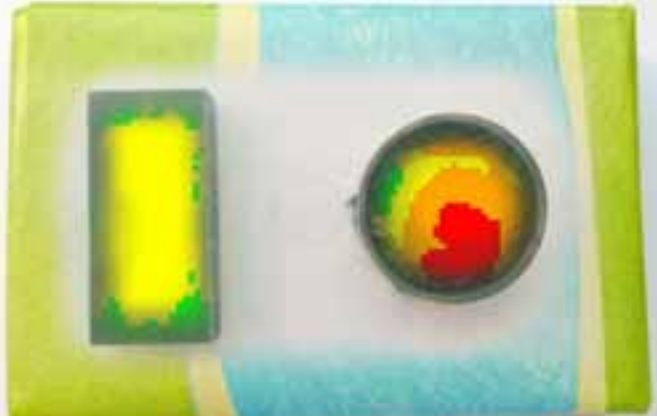
Moderne Millimeterwellensysteme sind klein, schnell und günstig: ideal zum Einsatz in modernen Produktionsstraßen im Bereich der Qualitätssicherung. Um das zu belegen, wurde SAMMI entwickelt. Ziel war es also ein Inspektionssystem aufzubauen, welches nicht nur kompakt, sondern auch günstig hergestellt werden konnte. Mit der Größe eines durchschnittlichen Laserdruckers setzt SAMMI Maßstäbe im Bereich der Hochfrequenztechnik. SAMMI ist nicht nur ein kompaktes Gerät, er ist aufgrund seines geringen Gewichts leicht zu transportieren und in wenigen Minuten einsatzbereit.

Für die erste SAMMI-Generation wurde eine Arbeitsfrequenz von 78 Gigahertz ausgewählt, um einerseits eine möglichst hohe Frequenz zu wählen, gleichzeitig aber beim Aufbau von SAMMI auf Baugruppen aus dem Consumer Bereich zurückgreifen zu können. Um Kosten zu sparen, wurde auf die Verwendung leistungsstarker Arraylösungen verzichtet, sondern stattdessen ein simples mechanisches Konzept umgesetzt. Das Messprinzip von SAMMI beruht dabei auf der Idee einer Transmissionsmessung: Hierbei wird auf der einen Seite des Testobjektes ein Sender und auf der gegenüberliegenden Seite ein Empfänger angeordnet, die nun wie beim Röntgen über die Probe verfahren werden. Im Gegensatz zur Röntgentechnologie erfasst SAMMI dabei nicht nur die Abschwächung der ausgesendeten Leistung durch die Probe, sondern mit der Phase auch die Laufzeit des Signals innerhalb der Probe. Dieses verschafft SAMMI einen wesentlichen Vorteil gegenüber röntgenbasierten Messverfahren, da durch die Phase Materialunterschiede aufgrund der elektrischen Eigenschaften der Objekte sichtbar werden, selbst wenn ihre Abschwächungskoeffizienten sehr ähnlich sind.

Um das mechanische Konzept möglichst einfach zu gestalten, erfolgt die Abtastung durch einen rotierenden Ansatz. Während sich der Sensor auf einem rotierenden Trägersystem befindet, wird zeitgleich der Messprobend über einen Bandantrieb durch SAMMI transportiert. Dabei tastet der Sensor das Messobjekt kreisförmig ab. Die frequenzbestimmenden Hoch-



2



3

frequenzbaugruppen sind dabei auf den rotierenden Tellern angebracht, die den Kern des Trägersystems bilden. Dabei werden für die verschiedenen Anwendungsfälle unterschiedliche Frequenzbereiche aufgebaut. Der modulare Aufbau erlaubt es durch einen einfachen Wechsel der Trägergruppe den Frequenzbereich schnell auszuwechseln. Somit ist der Messbereich jederzeit leicht um- bzw. aufzurüsten.

SAMMI ist alternativ mit einem *embedded PC* oder einem Laptop als Steuerrechner ausgestattet. Die Messdaten können dabei in einem *Quick-Look-Modus* direkt auf dem Bildschirm angezeigt werden. Für die Weiterverarbeitung stehen neben verschiedenen Bildfiltern leistungsstarke Phaseunwrapping- und Clusteralgorithmen zur Verfügung. Alternativ kann der Benutzer direkt auf die Rohdaten zugreifen. Dieses erlaubt die Verwendung eigener Algorithmen, was SAMMI zu einem hervorragenden Forschungsinstrument macht. Mit einer Messzeit, die in Abhängigkeit der Auflösung im Bereich von 20 Sekunden für einen DIN-A4 Umschlag liegt, ermöglicht SAMMI eine hohe Durchlassrate und erlaubt den Einsatz im Bereich von Reihenuntersuchung. Seine Messdynamik liegt dabei bei über 60 dB was für den überwiegenden Anteil der Anwendungen völlig ausreichend ist. Die Daten können dabei über eine USB-Schnittstelle oder über den integrierten Netzwerkanschluss gesendet werden.

Ursprünglich als Technologiedemonstrator entwickelt, erobert SAMMI durch seine Flexibilität weitere Anwendungsfelder. SAMMI eignet sich nicht nur zur Stichprobenuntersuchung im industriellen Umfeld, er ist ein hervorragendes Forschungsinstrument für die Entwicklung neuer Algorithmen im Bereich der Materialanalyse, für Sicherheitsanwendungen sowie für die Ausbildung. Mit SAMMI wurde erstmalig eine kostengünstige und kompakte Version eines abbildenden Messsystems für industrielle Anwendungen geschaffen. Durch seine Frequenzerweiterungen kann SAMMI dazu flexibel an unterschiedliche Messaufgaben angepasst werden.

1 SAMMI erlaubt die schnelle und einfache Analyse der Eingangspost.

2 Bild eines Briefumschlages überlagert mit der Messung von SAMMI. Deutlich sichtbar bildet sich die Kontur der Briefbombenatrappe ab.

3 Durch die Kombination von Phasen und Amplitudeninformationen lassen sich nicht nur die Konturen der verpackten Objekte erfassen, sondern die dielektrischen Eigenschaften der Objekte. So kann beispielsweise Kunststoff von einer Tablette aus Schwarzpulver unterschieden werden. Durch diese Voranalyse wird entschieden, ob eine weitere, gründlichere Untersuchung notwendig ist.

Dipl.-Ing. Dirk Nübler  
Tel. +49 228 9435-550  
Fax +49 228 9435-608  
dirk.nuessler@  
fhr.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD



# ENERGIE UND UMWELT

Der sparsame Umgang mit Ressourcen, effiziente Energienutzung und die Neuausrichtung auf erneuerbare Energien stellen große Herausforderungen für die Zukunft dar. Mit dem Einsatz bereits erprobter, wie auch neu entwickelter Radartechniken nimmt die Wissenschaft diese Herausforderungen an und bietet innovative Lösungen.

Radartechniken finden ihre Anwendung in der wetter-unabhängigen Ortung – also Messung von Entfernung, Richtung und Höhe – von entfernten Objekten, der Untersuchung der elektromagnetischen und physikalischen Eigenschaften von Materialien aufgrund ihrer Radar-reflektivität und – basierend auf der Nutzung des Doppler-Effekts – der Analyse von Bewegungsabläufen reflektierender Objekte.

Eben diese Messverfahren lassen sich auch erfolgreich in der Umwelttechnologie einsetzen, um z. B. den Zustand von Landwirtschaftsflächen und Nutzpflanzen weiträumig zu erfassen. Die Beurteilung des Reifegrades der Biomasse aufgrund ihrer Radarreflektivität kann dazu beitragen, den Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln zu minimieren und den optimalen Erntezeitpunkt zu bestimmen.

Hochgenaue Radarmessverfahren zur Entfernungsbestimmung lassen sich bei der Beobachtung und Überwachung von Geländebewegungen einsetzen und ermöglichen so eine automatisierte Frühwarnung vor Erdbeben oder seismischen Aktivitäten an gefährdeten Geländestrukturen. Ebenso lassen sich hochpräzise Millimeterwellen-Radarmessverfahren bei der Nutzung von Sonnenenergie in solarthermischen Kraftwerken einsetzen. Hierbei hängt die Effizienz des Kraftwerkes entscheidend von der präzisen Nachführung der Solarspiegel (Heliostaten) ab, die durch den Einsatz modernster Radartechnologie erreicht werden kann.

Ebenfalls wird im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien verstärkt auf die Windenergie als alternative, CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle gesetzt. Dabei gilt es, eine umweltfreundliche Technologie zur Energiegewinnung mit den Erfordernissen der Sicherheit in der Luftfahrt zu verknüpfen. Die sicherheitsrelevante Kollisionswarnbefeuerung, mit der Windenergieanlagen

(WEA) ab einer bestimmten Höhe ausgerüstet sind, um sie niedrig fliegenden Flugzeugen kenntlich zu machen, stellen jedoch oft eine nächtliche Lichtbelästigung und zudem eine Gefährdung für Zugvögel dar. Sie werden durch die Befeuerung angelockt und kommen oft durch Kollision mit den WEA-Rotoren zu Tode.

Hier wird eine bedarfsgerechte Einschaltung der Warnbefeuerung nur bei Annäherung eines Flugzeugs gefordert. Im Vergleich zu optischen oder akustischen Sensoren bieten Radarverfahren zur Detektion sich annähernder Flugzeuge Allwettertauglichkeit und Unabhängigkeit von Windeinflüssen und Hintergrundgeräuschen.

Insbesondere der Einsatz umweltfreundlicher Passiv-Radar-Technologie bietet sich in diesem Problemfeld an. Sie verzichtet auf eigene elektromagnetische Emissionen und nutzt stattdessen die ohnehin vorhandene Strahlung von Rundfunk und Fernsehsendern zur Ortung von Flugzeugen.

Ebenso wie in Windenergieparks kann diese umweltfreundliche – weil emissionsfreie – Passiv-Radar-Technologie in vielen Bereichen eingesetzt werden, in denen aktive Radare aufgrund ihrer Emissionen keine Akzeptanz finden. Passiv-Radar kann somit als ein Geschäftsfeld übergreifende Technologie betrachtet werden, die ihren Einsatz ebenso im Bereich Sicherheit und Schutz, wie bei der land- und seegestützten Aufklärung in Ballungsgebieten findet.

*Heliostatenfeld mit Turm  
des solarthermischen Ver-  
suchskraftwerks Jülich (STJ)  
in Jülich*

*Dipl.-Ing. Heiner Kuschel  
Tel. +49 228 9435-389  
Fax +49 228 9435-627  
heiner.kuschel@  
fhr.fraunhofer.de*

*Dr. rer. nat. Stephan Stanko  
Tel. +49 228 9435-704  
Fax +49 228 9435-608  
stephan.stanko@  
fhr.fraunhofer.de*



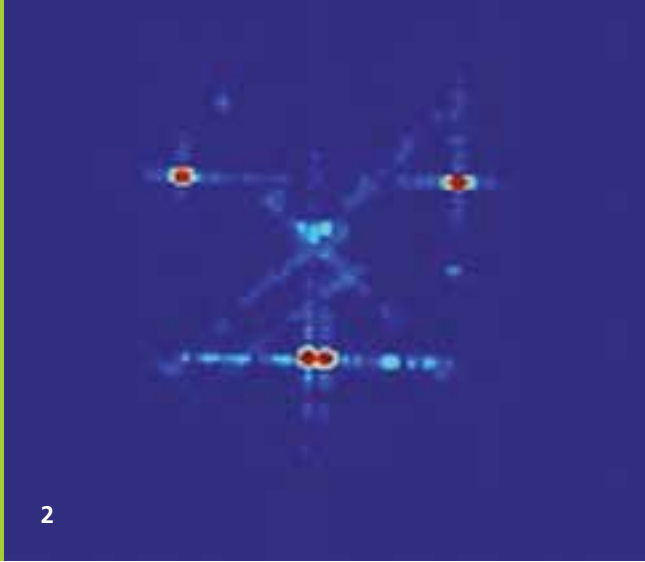
## HELIOSCAN - RADARGESTÜTZTE POSITIONS- REGELUNG VON HELIOSTATENFELDERN

Solarthermische Kraftwerke bieten eine umweltfreundliche und kostengünstige Option zur CO<sub>2</sub>-armen Stromgewinnung aus Sonnenlicht. Dabei ist die exakte Ausrichtung der einzelnen Heliostaten im Feld von zentraler Bedeutung für die Effizienz des Kraftwerkes.

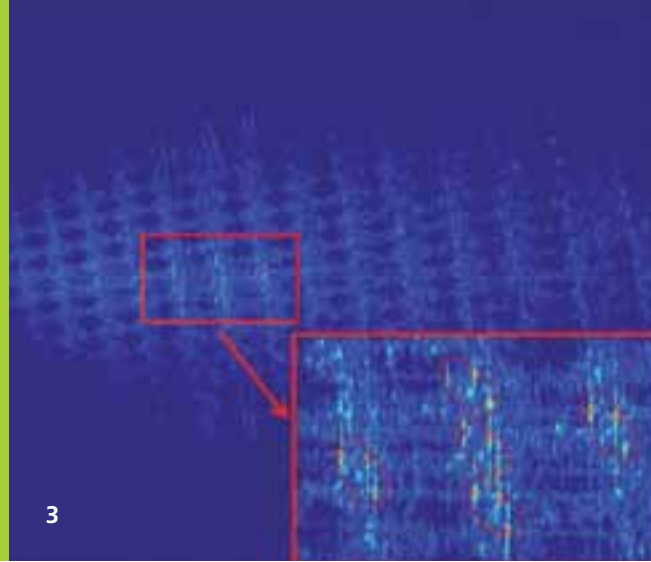
In Zeiten des weltweiten Klimawandels und schwindender Brennstoffreserven rückt die Nutzung erneuerbarer Energien immer weiter in den Vordergrund. In solarthermischen Kraftwerken wird die Sonnenstrahlung mit Hilfe einer Vielzahl von Spiegeln (sog. Heliostate), die der Sonne zweiachsig nachgeführt werden, gebündelt und auf den sich in der Spitze des Solarturms befindlichen Empfänger reflektiert. Auf diese Weise werden Temperaturen von bis zu 1000 °C erreicht, die vom Empfänger an ein Wärmeträgermedium (z. B. Wasser oder Luft) abgegeben werden. Die so erzeugte Wärme wird schließlich mittels Dampfturbinen zur Gewinnung von Strom genutzt.

Für die Effizienz des Kraftwerkes ist die Exaktheit der Spiegelnachführung von zentraler Bedeutung. Im Rahmen einer vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanzierten Studie werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Solar-Institut Jülich (SIJ) der Fachhochschule Aachen erste Untersuchungen zur Optimierung der Positionsbestimmung von Heliostaten im solarthermischen Versuchskraftwerk in Jülich (STJ) durchgeführt (siehe Abb. S. 66).

Aktuell wird die Ausrichtung der Spiegelflächen aufwendig mit zwei Winkelgebern an jedem der 2150 Heliostaten ermittelt, die den aktuellen Azimut- und Elevationswinkel festhalten. Basierend auf den Informationen der Winkelgeber und den Sollwerten, die mit Hilfe eines hochpräzisen astronomischen Sonnenstandkalenders bestimmt werden, erfolgt die Neuausrichtung der Heliostaten. Nachteil der bisher verwendeten Winkelgeber ist, dass die erreichte Genauigkeit und Witterungsbeständigkeit nicht exakt den Vorgaben entsprechen. Dies führt zu zusätzlichem Kalibrier- und Wartungsaufwand. Daher wird ein neuer radargestützter Ansatz verfolgt, der eine Positionsbestimmung der Heliostaten ohne Störung des laufenden Betriebs und unabhängig von der Intensität der Sonnenstrahlung, also auch bei Bewölkung, ermöglicht.



2



3

Im Rahmen der Studie wurden zunächst am Fraunhofer FHR Messungen an einem Heliostaten durchgeführt (Abb. 1). Dabei kam das Experimentalradar KOBRA 94 zum Einsatz. Der Heliostat wurde zusätzlich mit vier Winkelreflektoren ausgestattet, die eine exakte Rekonstruktion der Spiegelfläche im Raum erlauben. Die Vermessung erfolgte nach dem Prinzip der inversen synthetischen Apertur (ISAR) auf der institutseigenen Drehplattform bei einer Frequenz von 94 Gigahertz und einer Bandbreite von 2 Gigahertz. Das Verfahren der synthetischen bzw. inversen synthetischen Apertur bietet gegenüber der realen Apertur den Vorteil, dass eine hohe Auflösung in azimutaler Richtung auch unter Verwendung kleiner Antennen erzielt werden kann. Um mit einer realen Apertur eine ähnlich hohe Auflösung zu erzielen, wäre eine unrealistisch große Antenne erforderlich, die zu Problemen bei der Handhabung des Systems führen würde. Das Messergebnis (Abb. 2) zeigt, dass die vier am Heliostaten angebrachten Markierungen eindeutig in der Signatur erkennbar und deutlich separierbar sind. Basierend auf der zweidimensionalen Streuzentrenverteilung ist es möglich, die Spiegelebene im dreidimensionalen Raum zu rekonstruieren und anschließend den Azimut- und Elevationswinkel der Ebene zu bestimmen.

Im Anschluss an die Voruntersuchungen beim Fraunhofer FHR wurden Messungen auf dem Gelände des STJ durchgeführt. Hierbei kam ebenfalls das Radar KOBRA 94 zum Einsatz, jedoch nach dem Verfahren der synthetischen Apertur (SAR), wobei das Radar auf einer Schiene verfahren wurde. Die Vermessung des Heliostatenfeldes erfolgte von der Forschungsplattform des STJ, die sich im Solarturm auf etwa halber Höhe befindet. Unter anderem wurde eine Gruppe von fünf benachbarten Heliostaten vermessen, die mit je drei Markern ausgestattet wurden. Abbildung 3 zeigt die SAR-Aufnahme eines Feldausschnittes mit der Test-Gruppe im Zentrum. Das Ergebnis verdeutlicht, dass die drei Reflektoren für jeden Heliostaten deutlich in der Signatur erkennbar und eindeutig den einzelnen Heliostaten zuordenbar sind. Mit Hilfe der für die Auswertung des einzelnen vermessenen Heliostaten entwickelten Methode erfolgt im weiteren Verlauf des Projektes die Auswertung der beim STJ durchgeführten Messungen.

Es hat sich gezeigt, dass die Nachführung der Heliostaten eines Solarkraftwerkes mittels Millimeterwellen-Radar möglich ist und dabei eine ausreichend hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Insbesondere besteht der Vorteil des Verfahrens in der Möglichkeit zur einfachen Erweiterung auf größere Heliostatenfelder ohne zusätzliche Infrastruktur.

- 1 *Heliostat ausgestattet mit vier Winkelreflektoren auf der Drehplattform des FHR.*
- 2 *ISAR-Abbildung des Heliostaten mit den vier Winkelreflektoren.*
- 3 *SAR-Abbildung der Gruppe von fünf Heliostaten beim STJ, jeweils ausgestattet mit drei Winkelreflektoren.*

*Dipl.-Ing. Gregor Biegel  
Tel. +49 228 9435-581  
Fax +49 228 9435-608  
gregor.biegel@  
fhr.fraunhofer.de*

GESCHÄFTSFELD





# ELEKTROMAGNETISCHE SIMULATION UND ANTENNENTECHNOLOGIE

Durch die zunehmende drahtlose Vernetzung von Systemen und Sensoren kommt der Antenne als elektromagnetischem Wandler und ihrem Einfluss auf die Umgebung eine wichtige Bedeutung zu.

Die numerische Modellierung elektromagnetischer Felder und Ausbreitungsphänomene sowie die Entwicklung von Antennen sind querschnittliche Forschungsaufgaben, die für die Leistungsfähigkeit moderner Radar- und Kommunikationssysteme von großem Nutzen sind. Für die einwandfreie Funktion sollten zur Vermeidung gegenseitiger Störungen die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums und die Wechselwirkung zwischen System und Umgebung untersucht und berücksichtigt werden. Mit Hilfe der am Fraunhofer FHR entwickelten numerischen Methoden und mit der daraus entstandenen Software können breitbandige Antennen und Antennengruppen – auch strukturiert und auf nicht-ebenen Oberflächen angeordnet – entworfen und analysiert werden.

Die zurzeit genutzten Verfahren sind vielseitig einsetzbar und erschließen interessante Anwendungen in den Bereichen Radar, Kommunikation, Navigation und Logistik. Sie werden speziell für große und – wegen Ihrer Geometrie oder der verwendeten Materialien – komplexe Objekte entwickelt und kombinieren Lösungsverfahren verschiedener Klassen zu sogenannten Hybridverfahren. Die darauf basierenden Programme werden auf leistungsfähigen Rechnernetzen als effiziente, hochgenaue Simulationswerkzeuge u. a. zur Untersuchung des elektromagnetischen Streufelds von Radarzielen eingesetzt, wo Messungen nicht verfügbar oder zu aufwändig sind. Weitere Anwendungsgebiete sind Tarnmaßnahmen zur Minimierung der Entdeckungswahrscheinlichkeit von Radarzielen (*Low Observability*) sowie Untersuchungen zur Störanfälligkeit bzw. gegenseitigen Beeinflussung unterschiedlicher Systeme (Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV) auf Fahrzeugen. Auf dem Gebiet der Antennentechnologie steht ein umfangreiches Portfolio an verschiedenen Antennentypen

für unterschiedliche Einsatzgebiete und Frequenzbänder zur Verfügung. Dazu gehört die Entwicklung besonders breitbandiger Antennenelemente und -gruppen wie mehrarmige Spiralantennen für Aufklärungs- und Peilaufgaben. Das Institut verfügt über umfangreiches Know-How auf dem Gebiet konformer Antennengruppen und bei der Integration von Antennen in Fahrzeuge. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren konnte in verschiedenen militärischen und zivilen Projekten praktisch demonstriert werden, z. B. bei der Entwicklung eines Antennensystems für eine Aufklärungsdrohne oder bei der Ausrüstung von Segelflugzeugen.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung aktiver Antennenfrontends mit elektronischer Strahlschwenkung. Während die heute in vielen Bereichen häufig eingesetzten, mechanisch gesteuerten Antennen relativ preiswert sind, besitzen sie als Nachteile die niedrige Rotationsgeschwindigkeit, fehlende Mehrkanalfähigkeit sowie hohen Wartungsbedarf und Störanfälligkeit. Die bereits seit einiger Zeit – überwiegend im militärischen Bereich – eingesetzten Systeme auf Basis phasengesteuerter Gruppenantennen (*Phased Array*) sind dagegen sehr leistungsfähig, jedoch aufgrund ihres komplexen Aufbaus und der benötigten elektronischen Komponenten erheblich teurer. Die Arbeiten am Fraunhofer FHR konzentrieren sich auf innovative Lösungen, die sich preiswert realisieren lassen und so auch für kommerzielle Anwendungen interessant sind.

*FHR-Technologie im Einsatz: „Unsichtbar“ in Flug- und Fahrzeuge integrierte Antennen bieten aerodynamische Vorteile.*

*Dr.-Ing. Peter Knott  
Tel. +49 228 9435-235  
Fax +49 228 9435-521  
peter.knott@  
fhr.fraunhofer.de*



## ELEKTROMAGNETISCHE STREUEFFEKTE AN FLUGZEUGTRIEBWERKEN

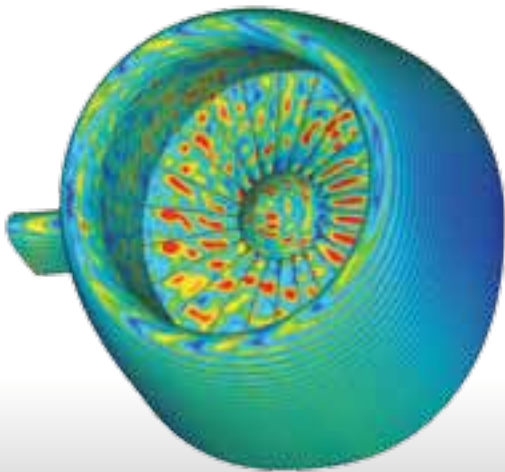
Im Bereich der elektromagnetischen Modellierung stellen Flugzeugtriebwerke aufgrund ihrer komplexen Geometrie und den daraus resultierenden physikalischen Effekten eine besondere Herausforderung dar. Die möglichst genaue Erfassung dieser Effekte in einem Simulationsmodell wird am Fraunhofer FHR mit Hilfe unterschiedlicher Softwarewerkzeuge untersucht.

Die Simulation elektromagnetischer Felder gewinnt als Planungswerkzeug immer mehr an Bedeutung: Bereits in der Entwicklungsphase einer Antenne oder eines Radarsystems sollen möglichst alle verfügbaren Optimierungsmöglichkeiten ausgenutzt werden, um bestmögliche Eigenschaften für das zukünftige System zu erreichen. Zu diesen Optimierungen gehört auch relevante physikalische Effekte in einer Simulationsumgebung exakt abzubilden, damit das zu entwickelnde System möglichst gut an seine Umgebung angepasst ist.

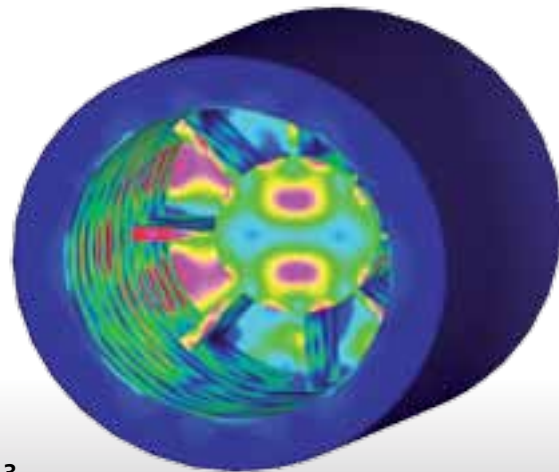
Eine besondere Herausforderung bei solchen Simulationen sind Streueffekte an Flugzeugtriebwerken, die aus elektromagnetischer Sicht extrem komplexe Strukturen darstellen. In den meisten Fällen bestehen diese Objekte aus einem mehr oder weniger langen Triebwerkskanal, in dem sich mehrere Turbinenabschnitte befinden. Jede Turbine besteht wiederum aus einer Vielzahl von einzelnen Schaufelblättern, zwischen denen aufgrund des geringen Abstands vielfältige elektromagnetische Interferenzen auftreten. Zusätzlich entstehen Beugungseffekte an den Kanten der Schaufelblätter sowie an der Öffnung des Triebwerkseinlasses.

All diese Effekte können sich z. B. auf die abgestrahlten elektromagnetischen Felder einer Antenne oder auf die Streuung eines Radarsignals, das auf das Triebwerk einfällt, auswirken. Als Folge können verformte Antennendiagramme oder spezielle Streueffekte beobachtet werden. Während eine Beeinflussung der Abstrahlung von Antennen im Allgemeinen eher unerwünscht ist, können Streueffekte an Triebwerken bei militärischen Anwendungen genutzt werden, beispielsweise zur Identifizierung von unbekanntem Flugzeugen.

Da der möglichst genauen elektromagnetischen Modellierung von Flugzeugtriebwerken somit eine besondere Bedeutung zukommt, war das FHR in den beiden NATO-Arbeitsgruppen SET-085 (RTG-049) „*Radar Signature Prediction of Cavities on Aircrafts, Vehicles and Ships*“



2



3

(Laufzeit 2004-2008) und SET-138 (RTG-075) „*Electromagnetic Scattering Analysis of Jet Engine Inlets for Aircraft NCTI Purposes*“ (Laufzeit 2008-2011) vertreten und leistete wesentliche Beiträge zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen, die in diesen Expertengruppen erarbeitet wurden.

Zum besseren Verständnis der grundlegenden Streueffekte, die im Zusammenhang mit Triebwerken auftreten, wurden zunächst stark vereinfachte Triebwerksstrukturen betrachtet. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem zylindrischen Hohlraum und einer bestimmten Anzahl von Schaufelblättern. Dabei zeigte sich, dass bereits bei extrem vereinfachten Geometrien sehr komplexe Stromverteilungen entstehen (Abb. 3). Insbesondere die genaue Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen an den gekrümmten Innenwänden von Triebwerken sowie die Betrachtung von Beugungseffekten an der Apertur und den Kanten der Schaufelblätter haben wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der berechneten Feldstärken. Das wurde bei einer Simulation mit einem *Ray-Tracing*-Verfahren – entwickelt am Fraunhofer FHR – und dem Vergleich mit einem numerisch exakten Verfahren als Referenzlösung deutlich.

Bei radarrelevanten Frequenzen wird der Simulationsaufwand mit numerisch exakten Verfahren schnell sehr groß. Vor allem realistische Flugzeugmodelle können dann nur noch mit Hochfrequenzverfahren wie z. B. *Ray-Tracing* modelliert werden. Deshalb ist die Validierung solcher Verfahren an vereinfachten Geometrien ein wichtiger Schritt, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse (an realistischen Objekten) beurteilen zu können.

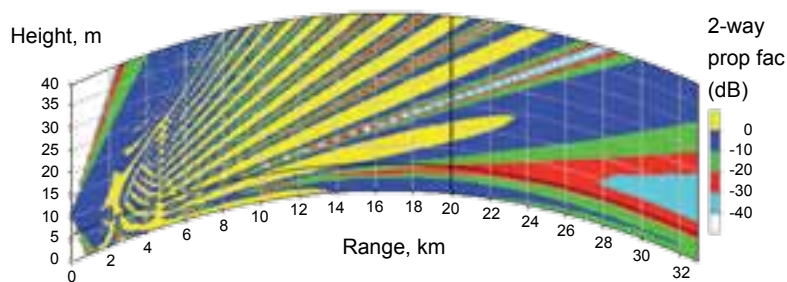
Zu diesem Zweck wurden verschiedene komplexere Testgeometrien untersucht, die große Ähnlichkeit mit realen Triebwerken haben (Abb. 1). An der Verteilung der Oberflächenströme (Abb. 2) ist deutlich zu erkennen, dass im Triebwerkskanal sehr komplexe Effekte auftreten, die zur Verwirbelung der einfallenden Welle führen. Die rückgestreuten elektromagnetischen Felder hängen auch von der Position der Schaufelblätter ab. Zudem treten bei der Rotation der Turbinen Dopplereffekte auf. Wird das rückgestreute Signal jedoch im Zeitbereich ausgewertet, wie z. B. bei einem *High-Resolution-Range-Profil* (HRRP), so ist das Ergebnis bei einem festen Einfallswinkel relativ stabil. Deshalb sind solche sogenannten Entfernungsprofile für die Identifizierung von Flugzeugen gut geeignet. Ziel der weiteren Arbeiten ist es daher unter anderem, die Eignung von simulierten Profilen für Identifizierungszwecke zu untersuchen.

1 *Triebwerk an einem kleineren Verkehrsflugzeug.*

2 *Stromverteilung auf der Oberfläche eines realistischen generischen Triebwerksmodells.*

3 *Stromverteilung auf der Oberfläche eines stark vereinfachten Triebwerksmodells.*

Dr.-Ing. Frank Weinmann  
 Tel. +49 228 9435-223  
 Fax +49 228 9435-521  
 frank.weinmann@  
 fhr.fraunhofer.de



## MARITIME AUSBREITUNGSBEDINGUNGEN

Die korrekte Bestimmung der Detektionsweiten für Küsten- und Schiffsradare erfordert die genaue Kenntnis der Ausbreitungsbedingungen in der untersten Grenzschicht der Atmosphäre. Im Rahmen eines Deutsch-Französischen Abkommens wird dieser Problemstellung eingehend nachgegangen.

Die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen nahe der Meeresoberfläche werden durch die Zusammensetzung der Atmosphäre entlang des Ausbreitungspfades, ihrer Variation mit der Höhe und ihrer zeitlichen Änderung sowie von der Rauigkeit der Seeoberfläche bestimmt. Die Ausbreitung im sogenannten Verdunstungswellenleiter kann bei Radaren unter bestimmten Atmosphärenbedingungen zu wesentlich höheren Reichweiten führen, welche auch über dem Sichthorizont liegen. Bei geänderten Umgebungsbedingungen sind jedoch durchaus Unterreichweiten vor dem Horizont möglich. Mit konventionellen Mitteln wird der Refraktionsindex, der als Maß für die Ausbreitungsbedingungen herangezogen wird, durch Sensoren an Bojen, Ballons oder zum Beispiel mit einem Refraktometer an Bord eines Helikopters oder eines Flugzeugs gewonnen. Da diese Art der Messung mit den operationellen Anforderungen nicht kompatibel ist, entstand die Idee, als Abhilfe den Refraktionsindex aus Clutter-Messungen zu gewinnen, also aus der Messung der rückgestreuten Radarleistung der Meeresoberfläche. Diese indirekte Methode wird auch als „*Refractivity from Clutter*“ (kurz RFC) Methode bezeichnet. Die Erprobung des neuen Verfahrens ist das zentrale Ziel im Rahmen des technischen Abkommens. Somit können die Detektionswahrscheinlichkeiten und Auffassreichweiten der Radare bei gegebenen Atmosphärenbedingungen zuverlässig abgeschätzt werden.

### Technische Aspekte der gemeinsamen Strategie

Für die Durchführung der Messungen kommt eine Reihe von experimentellen Radarsystemen zum Einsatz. Dabei finden bei zwei geplanten Messkampagnen am Mittelmeer und an der Nordsee die mobilen Systeme MARSIG und MEMPHIS Anwendung. Sie decken den Frequenzbereich von 8 bis 18 Gigahertz, 35 Gigahertz und 94 Gigahertz ab. Für die Messkampagne im Mittelmeer kommen zusätzlich stationäre Systeme im Bereich von 1 Gigahertz und 5 Gigahertz hinzu. Zur Erfassung der Umgebungsparameter werden zeitgleich zu den Radarmessungen eine Reihe von meteorologischen und ozeanographischen Sensoren eingesetzt. Zusätzlich wird die Messkampagne von zwei Forschungsschiffen, der „Elisabeth Mann Borgese“ und der „Planet“



begleitet. Beide Schiffe sind dabei auch mit Reflektoren bestückt, um das Ausbreitungsverhalten auf geradlinig definierten Trajektorien vermessen zu können.

### Die Modellierung der Ausbreitung in der maritimen Grenzschicht

Die Unterschiede zwischen Luft- und Meerestemperatur, der Luftdruck, die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und Richtung sowie die Radarparameter und die vorhandene Messgeometrie sind wichtige Eingangsparameter für die Modellierung. Das Modell PIRAM (Eigenentwicklung DGA) nutzt vorhin erwähnte Messparameter und berechnet das Refraktionsprofil in der untersten Schicht bis 100 Meter über der Meeresoberfläche. Dieses Refraktionsprofil findet Eingang in das hybride Programm TERPEM (*Signal Science Limited*), welches an Hand der parabolischen Wellengleichung die Wellenausbreitung in dieser Schicht in zwei Dimensionen bestimmt.

Beide Modelle zeigen, dass sie in der Lage sind, die Ausbreitungsbedingungen in der Grenzschicht in guter Näherung wiederzugeben.

### Zusammenfassung und Ausblick

Der RFC-Ansatz zur Messung und Modellierung der Ausbreitungsbedingungen erlaubt die Vorhersage der Ausbreitungscharakteristika in nahezu Echtzeit. Dabei sind keine weiteren Messungen der Umgebungsparameter notwendig. Das Verfahren basiert auf einer zuvor generierten Datenbasis mit einem selbstlernenden Algorithmus. Das Verfahren wurde bisher erst mit einer sehr limitierten Anzahl an Datensätzen von der Ostsee und der Atlantikküste (Wallops Island, USA) getestet. Nicht zuletzt aus diesem Grund wurde ein Validierungsprogramm mit einer Laufzeit von drei Jahren eingeleitet, um unterschiedliche See- und Umgebungsbedingungen von der Nordsee und dem Mittelmeer bei verschiedenen Radarfrequenzen (L-, C-, Ku-, Ka- und W-Band) abzudecken und zu berücksichtigen. Die aufgenommene Kooperation zwischen Deutschland und Frankreich hilft dabei, Synergien freizusetzen und den Wissensstand auf dem Gebiet der Ausbreitungsforschung zum gemeinsamen Nutzen weiter voranzutreiben.

1 Darstellung des Zweiweg-Ausbreitungsfaktors in Abhängigkeit der Höhe und der Entfernung.

2 Radarsystem MEMPHIS in Konfiguration See-Messung (35 GHz und 94 GHz).

3 Forschungsschiff „Planet“

4 Forschungsschiff „Elisabeth-Mann-Borgese“

Dr.-Ing.

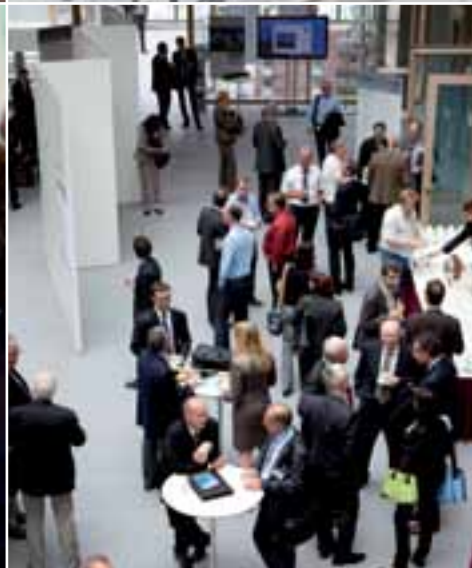
Andreas Danklmayer

Tel. +49 228 9435-350

Fax +49 228 9435-608

andreas.danklmayer@

fhr.fraunhofer.de



# FUTURE SECURITY 2011

Unter der Federführung des Fraunhofer FHR fand in diesem Jahr die internationale Sicherheitsforschungskonferenz Future Security vom 5. bis 7. September in Berlin statt.

Bereits zum sechsten Mal veranstaltete der Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS die internationale Sicherheitsforschungskonferenz. Nach vier Veranstaltungen in Karlsruhe fand die Konferenz 2011 zum zweiten Mal in der Berlin statt. Das Fraunhofer FHR übernahm in diesem Jahr die Federführung dieser wichtigen Konferenz. Als Veranstaltungsort wurde die Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen in Berlin ausgewählt.

## Towards a secure future

Terrorismus, organisierte Kriminalität und Sabotage, aber auch Naturkatastrophen und Unfälle können große Schäden mit langfristigen negativen Konsequenzen für Wirtschaft und Gesellschaft verursachen. Daher sind für die innere Sicherheit die Entwicklung und Einführung neuer Technologien unverzichtbar. Ein wichtiger Schritt in eine sichere Zukunft ist dabei, Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Behörden mit den führenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zusammen zu bringen. Denn nur gemeinsam können die neuesten Konzepte, Lösungen und Systeme zur inneren Sicherheit realisiert werden. Mit der 6. Future Security wurde die ideale Plattform geboten. Mit mehr als 250 Teilnehmern – so vielen wie noch nie – aus 19 Ländern wurde die Aktualität des Themas "innere Sicherheit" und die hohe Bedeutung der Konferenz bestätigt.

Die Konferenz steht traditionell unter der Schirmherrschaft des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Aber auch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) unterstützt die Forschungsarbeiten zur Sicherheit in der Fraunhofer-Gesellschaft, insbesondere im *dual-use*-Bereich.

Die Konferenz deckte mit den wissenschaftlichen Beiträgen das weite Spektrum der Sicherheitsthemen ab: Von neuen

*Einblicke: Die 6. Future Security Konferenz fand in der Vertretung des Landes NRW in Berlin statt.*

Sensoren für die Erkennung von gefährlichem Materialien (z.B. Millimeterwellenradar) über die Sicherheit der Lebensmittelketten und wichtiger Infrastruktur, Cyber-Kriminalität bis hin zu den gesellschaftlichen Auswirkungen präsentierten die Forscherinnen und Forscher ihre Ergebnisse in insgesamt 82 Fachvorträgen und 26 Posterbeiträgen.

Darüber hinaus behandelten die vier Keynote-Vorträge Kernthemen der Sicherheitsforschung: Dr. Christian Ehler (Mitglied im europäischen Parlament, Brüssel) betonte die Wichtigkeit der Sicherheitsforschung und die Unterstützung der EU mit dem 7. und 8. Forschungsförderungsrahmenprogramm. Dr. Stephan Lechner (Joint Research Center, Italien) stellte den Einfluss von Forschungsergebnissen auf die Politik dar. Strategien und Maßnahmen gegen Cyber-Kriminalität wurden von Martin Borrett (IBM, Großbritannien) vorgestellt. Die besonderen Anforderungen des Bundeskriminalamtes an Sicherheitsforschung erläuterte Professor Jürgen Stock (Bundeskriminalamt, Berlin).

Zum Abschluss waren nicht nur die Teilnehmer um neue Informationen und Kontakte reicher, auch die diesjährigen Organisatoren Professor Joachim Ender (wissenschaftliche Leitung) und Jens Fiege (Projektleiter) freuten sich über den erfolgreichen Verlauf dieser Konferenz.

Wissenschaftliche Sitzungen der 6. Future Security	
Sensor Technology for Security	Crisis Management I
Supply Chain Security	Crisis Management II
Detection of Hazardous Material	Video Surveillance
Maritime Security	Social Dimension of Security
Radar Sensors for Security Awareness	Anomaly Detection and Risk Analysis
Terahertz Security Applications	Critical Infrastructure
Response to CBRNE threats	Border Security
Food Chain and Transport Security	Cyber Defense and Information Security
Multiple Sensor Checkpoint Control	Surveillance and Identification of People



1

# AUS DEM INSTITUT

Neben der Future Security Konferenz war das Institutsjahr 2011 durch viele weitere Ereignisse geprägt. Zahlreiche Veranstaltungen wurden organisiert und durchgeführt, zahlreiche Besucher informierten sich vor Ort über die Institutsarbeit.

## Besuche

Am 29. März besuchte der **Bundestagsabgeordnete Michael Groschek** (Mitglied im Verteidigungsausschuss) das FHR, um sich über aktuelle Forschungsarbeiten zu informieren.

Der stellvertretende Inspekteur der Luftwaffe **Generalleutnant Norbert Finster** besuchte das FHR am 10. Mai. Sein Hauptinteresse galt dem Weltraumbeobachtungsradar TIRA und seinen Einsatzmöglichkeiten im Kontext Weltraumlage.

Am 19. Juli gab es hochrangigen Besuch aus dem US-Militär: **Dr. Marilyn Freeman**, verantwortlich für Forschung und Technologie, besuchte gemeinsam mit Vertretern des Bundesministeriums der Verteidigung die Wachtberger Fraunhofer-Institute.

Nachkommen des Erfinders des Radarprinzips besuchten das Institut am 14. Oktober. **Edgar Hülsmeier**, der Enkel von Christian Hülsmeier, ließ sich aktuelle Radarsysteme zeigen.

Darüber hinaus ergaben sich auch 2011 zahlreiche Besuche und Führungen von interessierten Institutionen und Organisationen. Häufig waren auch wieder Studentengruppen aus den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereichen dabei: In diesem Jahr waren es zum Beispiel Studentinnen und Studenten der RWTH Aachen und aus Deutschlands Fachschaften der Physik.

## Veranstaltungen und Messebeteiligungen

Erneut nahm das FHR an der **Hannover Messe Industrie (HMI)** vom 4. bis 8. April auf dem Gemeinschaftsstand der Wissenschaftsregion Bonn teil.

Im Jahr 2011 empfing das FHR am **Girls' Day** zum 8. Mal interessierte Mädchen. Sie erhielten einen kleinen Einblick in die technischen Tätigkeiten im Institut und besuchten natürlich die „Kugel“.

Zum ersten Mal nahm das FHR an der **Control** (Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung) vom 3. bis 6. Mai in Stuttgart teil. Auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Vision wurde der Materialscanner SAMMI vorgestellt.

Am 3. und 4. Mai veranstaltete das FHR den **3<sup>rd</sup> PCL-Focus-Day**. Experten aus Militär, Industrie und Forschung tauschten sich zum Thema Passiv-Radar in Wachtberg aus.

Zum ersten Mal veranstaltete das FHR das **Wachtberg-Forum**. Mit einer großen Open-Air-Ausstellung, Präsentationen und Vorführungen präsentierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts ihre Systeme und Kompetenzen. Besonderes Highlight war die Live-SAR-Vermessung mit dem Millimeterwellenradar SUMATRA, getragen durch das Ultraleichtflugzeug Delphin.





Schon zum dritten Mal veranstaltete das FHR vom 8. bis 15. Juli eine internationale Sommerschule zum Thema Radar in Remagen-Rolandseck. 35 junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt trafen sich zur **3<sup>rd</sup> International Summer School on Radar / SAR** für eine Woche am Rhein, um von international anerkannten Radarexperten zu lernen und natürlich auch einen Eindruck der Kultur des Rheinlandes zu bekommen.

Beim dritten **DWT-Forum Weltraum** am 20. und 21. September in Bonn stellte das FHR seine Forschungen und Fähigkeiten zum Thema Weltraumaufklärung aus.

Das FHR und die fünf Fraunhofer-Institute aus dem Bonner Raum präsentierten gemeinsam vom 1. bis 3. Oktober beim **Deutschlandfest** in Bonn Zukunftsthemen der Informations- und Radartechnik. In den Räumen des Bonn-Aachen International Center for Information Technology (B-IT), erwartete die Besucherinnen und Besucher eine interaktive Ausstellung. Das FHR präsentierte die Themen Qualitätskontrolle und Weltraumbeobachtung.

Gemeinsam mit dem IAF stellte das FHR auf der **European Microwave Week** aus, Europas größter Messe und Konferenz zum Thema Hochfrequenztechnik und Radar. Sie fand vom 9. bis 14. Oktober in Manchester statt.

Zur Anwerbung von qualifiziertem Personal beteiligte sich das Institut erneut bei verschiedenen Jobmessen: der Absolventenmesse „Campus & Praxis“ der Fachhochschule Koblenz am 12. April in Koblenz, dem DGON-Navigationskonvent am 7. bis 8. Juli in Berlin, dem Unternehmenstag der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg am 9. November in St. Augustin und der Bonding-Firmenkontaktmesse am 30. November in Aachen.

- 1 Präsentation des Materials scanners SAMMI auf der Control-Messe vom 3. bis 6. Mai in Stuttgart.
- 2 Open-Air-Veranstaltungsgelände beim Wachtberg-Forum am 5. Juli.
- 3 Präsentation des Themas Weltraumbeobachtung beim Deutschlandfest vom 1. bis 3. Oktober in Bonn.

*Interne und externe Kommunikation*  
 Dipl.-Volksw. Jens Fiege  
 Tel. +49 228 9435-323  
 Fax +49 228 9435-627  
 jens.fiege@fhr.fraunhofer.de

# FRAUNHOFER-VERBÜNDE

## VERBUND VERTEIDIGUNGS- UND SICHERHEITSFORSCHUNG

Seit ihrer Gründung ist die Fraunhofer-Gesellschaft neben dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) auch dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) verpflichtet und deckt durch ihr Leistungsspektrum den weitaus größten Teil der institutionellen Forschung des BMVg ab.

Durch neue Sicherheitsbedrohungen und deren politische Auswirkungen eine neue nationale wie internationale Gefährdungslage entstanden. Heutige Industriegesellschaften, deren hochkomplexe und vernetzte öffentliche wie private Infrastrukturen immer verletzlich erscheinen angesichts der Vielschichtigkeit möglicher Bedrohungen, benötigen in zunehmendem Maße Lösungen, um die Sicherheit ihrer Bürger zu gewährleisten. Heutige Gefährdungsszenarien, die oft weit außerhalb deutscher Grenzen entstehen, haben zu einem neuen Sicherheitsverständnis geführt. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen bilden den Rahmen der heutigen Sicherheitsforschung.

Neben der intensiven Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium der Verteidigung und dessen Unterstützung bei der Entwicklung neuer Technologien zum Schutz der Soldaten sieht der Verbund seine Hauptaufgaben und Ziele in folgenden Bereichen:

- Sicherstellen der Dual-Use-Forschung und des Know-how-Transfers zivil/militärisch
- Ausgezeichnete wissenschaftliche Qualität durch Integration in die internationale Wissenschaftsgemeinschaft
- Unterstützung der wehrtechnischen Industrie durch gemeinsame Forschung
- Forschungsstrategische Ausrichtung hinsichtlich Anwendungen in den Bereichen: Führungsfähigkeit, Nachrichtengewinnung und Aufklärung, Mobilität, Wirksamkeit im Einsatz, Unterstützung und Durchhaltefähigkeit, Überlebensfähigkeit und Schutz

Strategische Ausrichtung der Mitgliedsinstitute des Verbunds vor dem Hintergrund einer zukünftigen europäischen Sicherheits- und Verteidigungspolitik

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute für

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

*Leiter Geschäftsstelle  
Dr. Tobias Leismann  
Tel.: +49 761 2714-402  
tobias.leismann@emi.fraunhofer.de  
www.vvs.fraunhofer.de*

# VERBUND MIKROELEKTRONIK

Der Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik (V $\mu$ E) koordiniert seit 1996 die Aktivitäten der auf den Gebieten Mikroelektronik und Mikrointegration tätigen Fraunhofer-Institute: Das sind 13 Institute (und drei Gastinstitute) mit ca. 2700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Das jährliche Budget beträgt etwa 307 Millionen Euro.

Die Aufgaben des Fraunhofer V $\mu$ E bestehen im frühzeitigen Erkennen neuer Trends und deren Berücksichtigung bei der strategischen Weiterentwicklung der Verbundinstitute. Dazu kommen das gemeinsame Marketing und die Öffentlichkeitsarbeit. Weitere Arbeitsfelder sind die Entwicklung gemeinsamer Themenschwerpunkte und Projekte. So kann der Verbund insbesondere innovativen mittelständischen Unternehmen rechtzeitig zukunftsweisende Forschung und anwendungsorientierte Entwicklungen anbieten und damit entscheidend zu deren Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Die Kernkompetenzen der Mitgliedsinstitute werden gebündelt in den Querschnittsfeldern:

- Halbleitertechnologie
- Technologien der Kommunikationstechnik

und den anwendungsorientierten Geschäftsfeldern:

- Licht
- Sicherheit
- Energieeffiziente Systeme & eMobility
- Ambient Assistent Living AAL
- Unterhaltung

Die Geschäftsstelle des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik ist das zentrale Koordinierungsbüro. In enger Zusammenarbeit mit den Instituten bildet sie das Bindeglied zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

## Mitglieder

Fraunhofer-Einrichtung für

- Systeme der Kommunikationstechnik ESK
- Modulare Festkörper-Technologien EMFT
- Fraunhofer-Center Nanoelektronische Technologien CNT

Fraunhofer-Institut für

- Angewandte Festkörperphysik IAF
- Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
- Elektronische Nanosysteme ENAS
- Integrierte Schaltungen IIS
- Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
- Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS
- Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
- Photonische Mikrosysteme IPMS
- Siliziumtechnologie ISIT
- Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
- Offene Kommunikationssysteme FOKUS (Gast)
- Digitale Medientechnologie IDMT (Gast)
- Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Dresden IZFP-D (Gast)

*Leiter Geschäftsstelle*

*Dr. Joachim Pelka*

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

*joachim.pelka@mikroelektronik.fraunhofer.de*

*www.vue.fraunhofer.de*

# FRAUNHOFER-ALLIANZ

## ALLIANZ VISION

Die Fraunhofer-Allianz Vision bündelt das Know-how der Fraunhofer-Institute im Bereich des maschinellen Sehens, der Bildverarbeitung und der optischen Mess- und Prüftechnik. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, neue Entwicklungen unter industriellen Bedingungen einsetzbar zu machen. Auf Wunsch werden Komplettlösungen einschließlich aller Handhabungskomponenten bereit gestellt.

Die Kooperation im Netzwerk ermöglicht, Markterfordernisse frühzeitig zu erkennen und technologische Herausforderungen gemeinsam anzugehen. Mit der klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung wird die gemeinsame Zielsetzung verfolgt, neue Entwicklungen unter industriellen Bedingungen einsetzbar zu machen. Als bildgebende Sensoren kommen sowohl Standardkameras oder Speziallösungen als auch Infrarotkameras oder Röntgensensoren zum Einsatz. Auf Wunsch werden Komplettlösungen einschließlich aller Handhabungskomponenten bereit gestellt. Ein enges Beziehungsnetz zu Vision Partnern aus Industrie und Wissenschaft ergänzt die Möglichkeiten.

Daneben konzipiert und organisiert Fraunhofer Vision regelmäßig Technologiekongresse und Praxis-Seminare zu aktuellen Themenschwerpunkten sowie verbindende Marketing- und PR-Maßnahmen wie gemeinsame Messeauftritte oder Fachveröffentlichungen.

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

### Mitglieder

Fraunhofer-Institut für

- Angewandte Festkörperphysik IAF
- Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
- Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
- Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
- Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
- Integrierte Schaltungen IIS
- Analyse- und Informationssysteme IAIS
- Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
- Physikalische Messtechnik IPM
- Produktionstechnik und Automatisierung IPA
- Produktionstechnologie IPT
- Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM
- Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren Dresden IZFP-D
- Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT

*Leiter Geschäftsstelle*

*Dipl.-Ing.*

*Michael Sackewitz*

*Tel.: +49 9131 776-5800*

*vision@fraunhofer.de*

*www.vision.fraunhofer.de*

# FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## ÜBERBLICK

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 60 Institute. Mehr als 20 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,8 Milliarden Euro. Davon fallen 1,5 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

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

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

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

*Zentrale*

*Telefon: +49 89 1205-0*

*info@zv.fraunhofer.de*

*www.fraunhofer.de*

# AUSZEICHNUNGEN

## Auszeichnungen

**Walterscheid, I.; Espeter, T.; Brenner, A.; Loffeld, O.:**  
ITG-Preis für herausragende Veröffentlichung für „Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR-X – Setup, processing and image results“ IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 8, August 2010, pp. 3268-3279

**Demming, M.:** Preis für den besten Absolventen des Fachbereiches Informations - und Elektrotechnik im Jahr 2011 von der Fördergesellschaft der Fachhochschule Dortmund

**Nowok, S.:** Beste Masterarbeit 2011 von FH Koblenz, „Entwicklung und Verifikation eines Algorithmus zur Bandbreitenmessung in Kaltwalzwerken“

# VERANSTALTUNGEN

## Tagungs- und Veranstaltungsorganisation

„CCG-Seminar SE 2.40 Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven“, 12. - 14. April 2011, Wachtberg

„Girls´ Day“, 14. April 2011, Wachtberg

„CCG-Seminar SE 2.13 Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen“, 2. - 4. Mai 2011, Wachtberg

„3<sup>rd</sup> FHR PCL-Focus“, 3. - 4. Mai 2011, Wachtberg

„CCG-Seminar FA 1.03 „Weltraumlage / SSA - Systeme und Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation“, 18. - 19. Mai 2011, Wachtberg

„Wachtberg-Forum“, 5. Juli 2011, Wachtberg

„3<sup>rd</sup> International Summer School on Radar / SAR“, 8. - 15. Juli 2011, Remagen

„6<sup>th</sup> Future Security Research Conference“, 5. - 7. September 2011, Berlin

## Beteiligung an Messen und Fachausstellungen

Beteiligung am Gemeinschaftsstand der Wissenschaftsregion Bonn bei der „Hannover Messe Industrie (HMI)“ vom 4. - 8. April 2011, Hannover

Messestand bei der Firmenkontaktmesse „Campus & Praxis“ der Fachhochschule Koblenz, 12. April 2011, Koblenz

Beteiligung am Gemeinschaftsstand von Fraunhofer Vision bei der Messe „Control“, 3. - 6. Mai 2011, Stuttgart

Messestand bei der Absolventenmesse „DGON Navigationskonvent“, 7 - 8. Juli 2011, Berlin

Messestand bei dem 3. DWT-Forum „Weltraum“, 20. - 21. September Bonn

Gemeinsame Ausstellung beim Deutschlandfest mit Fraunhofer aus der Region Bonn, 1. - 3. Oktober 2011, Bonn

Gemeinsamer Messestand mit Fraunhofer IAF bei der „European Microwave Week“, 9. - 14. Oktober 2011, Manchester, Großbritannien

Messestand beim „Unternehmenstag“ der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, 9. November 2011, St. Augustin

Messestand bei der Firmenkontaktmesse „Bonding“, 30. November 2011, Aachen

# AUSBILDUNG UND LEHRE

## Vorlesungen

**Bertuch, T.; Weinmann, F.:** „Antennen und elektromagnetische Modellierung“, Universität Siegen, Siegen, WS 2011/2012

**Ender, J.:** „Aerospace Radar, Vorlesung und Übungen“, Universität Siegen, Siegen, WS 2011/2012

**Ender, J.:** „Radar-Verfahren und -Signalverarbeitung, Vorlesung und Übungen“, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, SS 2011

**Knott, P.:** „Antenna Engineering“, RWTH Aachen, Aachen, WS 2011/2012

**Lorenz, F.:** „Physik“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach, SS 2011

**Lorenz, F.:** „Physikalische Messtechnik“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach, WS 2011/2012

**Maresch, A.:** „Mathematik für Betriebswirte“, Technische Hochschule Mittelhessen, Wetzlar, WS 2011/2012

**Maresch, A.:** „Operations Research“, Technische Hochschule Mittelhessen, Friedberg, WS 2011/2012

**Stanko, S.:** „Principles of Radar Techniques“, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, WS 2011/2012

**Stanko, S.:** „Physikalische Grundlagen“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach, SS 2011



## Promotionen

**Maresch, A.:** „Zur Theorie von Anpassungstests auf K-verteilte Marginalien von zweidimensionalen Zufallsfeldern mit Anwendung auf Radardaten“, Justus-Liebig-Universität, Gießen, Dr. rer. nat.

## Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

**Bokaderov, S.:** „Georeferenzierung von SAR-Aufnahmen mittels digitaler Geländemodelle“, FH Koblenz, Master of Engineering in Systemtechnik

**Demming, M.:** „Entwicklung und Realisierung eines 3D-Millimeterwellen-Abbildungsverfahrens zur Bestimmung der Materialeigenschaften einer mehrschichtigen Struktur“, FH Dortmund, Master of Engineering

**Derouiche, B.:** „Automatisierte Detektion und Segmentierung von Bildsequenzen auf Basis von vektoriellen Frequenzbandmessungen“, FH Koblenz Rhein-Ahr-Campus, Master of Science

**Fritzsche, F.:** „Entwicklung eines Datenverarbeitungsalgorithmus für die Analyse spektraler Signalinformationen“, FH Koblenz, Bachelor of Science in Medizintechnik und Sportmedizinische Technik

**Heinen, C.:** „Entwicklung und Umsetzung spezieller Bildgebungsalgorithmen für Time-Domain THz-Spektrometer in einer graphischen Softwareumgebung“, FH Remagen, Bachelor of Science in Medizintechnik und Sportmedizinische Technik

**Guarin Cardenas, M.:** „Efficient electromagnetic modelling of printed conformal antennas on cylindrical substrates and related software development“, Politecnico di Torino, Italien, Master of Science in Telecommunication Engineering

**Guerrero Guerra, G. G.:** „System design of novel navigation radar demonstrator back-end“, Politecnico di Torino, Italien, Master of Science in Telecommunication Engineering

**Nowok, S.:** „Entwicklung und Verifikation eines Algorithmus zur Bandbreitenmessung in Kaltwalzwerken“, FH Koblenz, Master of Engineering in Systemtechnik

**Schlenther, B.:** „Entwicklung und Umsetzung eines mehrkanaligen und kohärenten Millimeterwellenradars zur Überprüfung von bewegten Personen“, FH Koblenz, Master of Engineering in Systemtechnik

**Shoykhetbrod, A.:** „Entwicklung eines mobilen Radarsystems zur Scharfschützendetektion“, FH Koblenz, Master of Engineering in Systemtechnik

**Dozententätigkeiten bei Fachseminaren und Beratungsveranstaltungen**

**Bartsch, G.:** „SSA Systemdesign“, CCG-Seminar FA 1.03 "Weltraumlage / SSA-Systeme und Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation", Wachtberg, Mai 2011

**Bartsch, G.:** "Weltraumüberwachung I - Systeme zur Erfassung und Bewertung von Weltraumlageinformation", Sonderlehrgang SO 02.02, Führungsakademie der Bundeswehr, Hamburg, November 2011

**Bartsch, G.:** "Weltraumüberwachung II - Kommandos und Systeme", Sonderlehrgang SO 02.02, Führungsakademie der Bundeswehr, Hamburg, November 2011

**Bertuch, T.:** „Dispersion properties of periodically loaded parallelplate waveguides: Analysis and leaky-wave antenna application“, European School of Antennas on Leaky Waves and Periodic Structures for Antenna Applications, Rom (IT), April 2011

**Brenner, A.:** „Luftgestützte Radar-Aufklärung“, CCG-Seminar SE 2.40 Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011

**Ender, J.:** „Aufklärung durch Radar, zukünftige Verfahren und Systeme“, CCG-Seminar FA 1.06 Optische, elektrooptische und radargestützte Aufklärung, Oberpfaffenhofen, Mai 2011

**Ender, J.:** „Einführung in Radarverfahren und Radarsignalverarbeitung“, CCG-Seminar SE 2.40, Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011

**Ender, J.:** „Radar fundamentals II“, 3rd International Summer School on Radar/SAR, Remagen, Juli 2011

**Ender, J.:** „Distributed radar“, 3rd International Summer School on Radar/SAR, Remagen, Juli 2011

**Essen, H.:** „Radargrundlagen“, CCG-Seminar SE 2.14 Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Essen, H.:** „Messung des RCS-Wertes“, CCG-Seminar SE 2.14 Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Essen, H.:** „RCS Messanordnungen“, CCG-Seminar SE 2.14 Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Essen, H.:** „mmW- und THz-Warnsensorik“, CCG-Seminar SE 3.11 Warnsensorik (UV, IR, mmW, Terahertz), Oberpfaffenhofen, November 2011

**Essen, H.:** „Einführung in die Technologie für hochauflösendes Radar“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Essen, H.:** „Physikalische Grundlagen für Radar-Sicherheitsanwendungen“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Essen, H.:** „UAV für CIED Anwendungen“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Essen, H.:** „Bildgebende Verfahren zur Detektion von Gefahrstoffen“, CCG-Seminar VS 10.06: Detektion von Explosivstoffen, Pfinztal, November 2011

**Hägelen, M.:** „Nahbereichs-SAR“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Hägelen, M.:** „Beispiele für Nahbereichsanwendungen, Kofferscanner“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauf-

lösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Hantscher, S.:** „Vernetztes Stand-Off SAR“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Johannes, W.:** „mmW-UAV-SAR“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Klare, J.:** „Fähigkeitssteigerung durch bi- und multi-statische Radarsysteme und MIMO-Radar“, CCG-Seminar SE 2.40: Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011

**Knott, P.:** „Konforme und Strukturintegrierte Antennen“, CCG-Seminar SE 2.04: Intelligente Antennensysteme, Oberpfaffenhofen, November 2011

**Knott, P.:** „Smart antennas and beamforming“, Lecture Series der Politechnischen Universität Cartagena UPCT, Cartagena (ES), Juni 2011

**Kuschel, H.:** „Meterwellenradar zur Detektion RCS-reduzierter Ziele Passives Radar“, CCG-Seminar SE 2.14: Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Kuschel, H.:** „Passive und bistatische Radarsysteme“, CCG-Seminar SE 2.40: Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011

**Letsch, K.:** „Radargestützte Erfassung der kleinteiligen Weltraumtrümmerpopulation“, CCG-Seminar FA 1.03: Weltraumlage - Systeme und Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation, Wachtberg, Mai 2011

**Leushacke, L.:** „Einführung in Weltraumlage/SSA“, CCG-Seminar FA 1.03: Weltraumlage - Systeme und

Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation, Wachtberg, Mai 2011

**Lorenz, F.:** „Reiz einer Gründung - Chancen und Herausforderungen“, CAMPUS of EXCELLENCE, Berlin, Juni 2011

**Nötel, D.:** „mmW-Radiometrie“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Patzelt, T.:** „Radar zur Aufklärung und Überwachung des Weltraums, Weltraumlage-System“, CCG-Seminar SE 2.40: Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011

**Patzelt, T.:** „Radargestützte Aufklärung von Weltraumobjekten I“, CCG-Seminar FA 1.03: Weltraumlage - Systeme und Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation, Wachtberg, Mai 2011

**Patzelt, T.:** „Radargestützte Aufklärung von Weltraumobjekten“, Sonderlehrgang SO 02.02, Führungsakademie der Bundeswehr, Hamburg, November 2011

**Rosebrock, J.:** „Techniken zur Objektaufklärung mittels breitbandigem Radar SOI SAR“, CCG-Seminar FA 1.03: Weltraumlage - Systeme und Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Lageinformation, Wachtberg, Mai 2011

**Rosebrock, J.:** „Radarverfahren zur Abbildung von Weltraumobjekten“, Sonderlehrgang SO 02.02, Führungsakademie der Bundeswehr, Hamburg, November 2011.

**Schiller, J.:** „Classifier efficiency“, NATO SET-172 Lecture Series on Radar Automatic Target Recognition (ATR) and Non-Cooperative Target Recognition (NCI), London (GB), Juli 2011

**Schimpf, H.:** „RCS Statistik“, CCG-Seminar SE 2.14: Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen,

Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Schimpf, H.:** „Radarpolarimetrie“, CCG-Seminar SE 2.14: Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Schimpf, H.:** „Einfluss von Tarnmaßnahmen auf das Detektionsverhalten im mmW-Bereich“, CCG-Seminar SE 2.14: Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Schimpf, H.:** „Radar Überwachung im maritimen Bereich“, CCG-Seminar SE 2.13: Hochauflösendes, abbildendes Radar für Sicherheitsanwendungen, Wachtberg, Mai 2011

**Stanko, S.:** „Höchstfrequenztechnologie für Zielsuchkopf-, Aufklärungs- und Sicherheitsanwendungen“, CCG-Seminar SE 2.14: Radar und Infrarottarnung, Technik und Anwendungen, Oberpfaffenhofen, Oktober 2011

**Uschkerat, U.:** „Radargrundlagen“, Gastvortrag am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Bonn

**Weiß, M.:** „Multi-Sensor Systems: Multiplicity helps“, NATO SET-157 Lecture Series, 6.-7. Juni 2011, Porto (PT); 9.-10. Juni 2011, Châtillon (FR); 20.-21. Juni 2011, Lancaster (UK); 23.-24. Juni 2011, Ankara (TR)

**Weiß, M.:** „Aspects of Sensor Networks“, NATO SET-157 Lecture Series, 6.-7. Juni 2011, Porto (PT); 9.-10. Juni 2011, Châtillon (FR); 20.-21. Juni 2011, Lancaster (UK); 23.-24. Juni 2011, Ankara (TR)

**Wilden, H.:** „Technologie der phasengesteuerten Gruppenantennen“, CCG-Seminar SE 2.40: Überwachung und Aufklärung mit Radar – Methoden, Systeme und Perspektiven, Wachtberg, April 2011



# VERÖFFENTLICHUNGEN

## Veröffentlichungen in referierten wissenschaftlichen Zeitschriften

**Brisken, S.; Matthes, D.; Mathy, T.; Worms, J.:** "Spatially diverse ISAR imaging for classification performance enhancement Volume 57, Number 1 / March 2011, pp.15-21", INTL Journal of Electronics and Telecommunications

**Cristallini, D.; Pastina, D.; Lombardo, P.:** "Exploiting MIMO SAR potentialities with efficient cross-track constellation configurations for improved range resolution", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.49, No. 1, pp. 38-52, Januar 2011

**Ehret, B.; Safenreiter, K.; Lorenz, F.; Biermann, J.:** "A new feature extraction method for odour classification", Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 158, Issue 1, pp. 75-88, November 2011

**Espeter, T.; Walterscheid, I.; Klare, J.; Brenner, A.R.; Ender, J.:** "Bistatic forward-looking SAR: results of a spaceborne-airborne experiment", Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, Vol.8, No. 4, pp. 765-768, Juli 2011

**Gomez-Diaz, J.S.; Alvarez-Melcon, A.; Bertuch, T.:** "Radiation characteristics of mushroom-like PPW LWAs: Analysis and experimental verification", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Vol.10, No., pp. 584-587, 2011

**Gomez-Diaz, J.S.; Álvarez-Melcon, A.; Bertuch, T.:** "A modal-based iterative circuit model for the analysis of CRLH leaky-wave antennas comprising periodically loaded PPW", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.59, No. 4, pp. 1101-1112, April 2011

**Haumtratz, T.; Schiller, J.; Lindenmeier, S.:** "Challenges for non-cooperative target identification in a bistatic radar configuration", International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 52, No. 3, pp. 377-382,

**Rosebrock, J.:** "Absolute attitude from monostatic radar measurements of rotating objects", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.49, No. 10, Part 1, pp. 3737-3744, Oktober 2011

**Schmitt, M.; Magnard, C.; Brehm, T.; Stilla, U.:** "Towards airborne single pass decimeter resolution SAR interferometry over urban areas", Lecture Notes in Computer Science 6952, Photogrammetric Image Analysis, Ed. Stilla, U., Rottensteiner, F., Mayer, H., Jutzi, B., Butenuth, M., LNCS Volume 6952,

ISSN 0302-9743, Springer, Oktober 2011

**Wang, R.; Deng, Y. K.; Lof-feld, O.; Nies, H.; Walterscheid, I.; Espeter, T.; Klare, J.; Ender, J.:** "Processing the azimuth-variant bistatic SAR data by using monostatic imaging algorithms based on two-dimensional principle of stationary phase", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.49, No. 10, pp. 3504-3520, Oktober 2011

**Yang, B.; Yarovoy, A.G.; Valavan, A.; Buisman, K.; Shoykhetbrod, O.:** "A novel LTCC differentially fed UWB antenna for the 60 GHz band", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Vol.3, No. 2, pp. 171-177, 2011

## Konferenzbeiträge

**Algermissen, S.; Monner, H.-P.; Knott, P.; Sekora, R.:** "Closed-loop subspace identification for vibration control of structure integrated antenna arrays", IEEE International Aerospace Conference, Big Sky (USA), März 2011

**Asbach, M.; Evangelidis, G.; Bauckhage, C.; Essen, H.; Biegel, G.; Brehm, T.; Sieger, S.:** "Change detection on millimeterwave SAR images for C-IED applications", Future Security 2011, Berlin, September 2011

**Balasubramanian, M.:** "Considering surface Diffraction in the hybrid FEBI-MLFMM-UTD method", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Bartsch, G.:** „Systeme zur Erfassung und Bewertung von Weltraumlageinformation“, 60. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Bremen, September 2011

**Bertuch, T.; Cardenas, G.M.G.; Galvis Salzburg, C.; Vecchi, G.:** "Improvement of the efficient integral equation modeling of printed antennas on coated cylinders", 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Turin (IT), September 2011

**Bertuch, T.; Knott, P.; Wilden, H.; Peters, O.:** "Wide-band radar front-end calibration for imaging SAR experiments with conformal antenna array", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Bokaderov, S.; Laubach, M.; Schimpf, H.; Wellig, P.:** "EOSAR - A tool for blending of real objects into SAR scenes", German Microwave Conference GeMIC 2011, Darmstadt, März. 2011

**Brisken, S.; Worms, J.:** "ISAR motion parameter estimation via multilateration", MRRSS Microwave Radar and Remote Sensing Symposium, Kiew (UA), August 2011

**Brunner, D.; Schulz, K.; Brehm, T.:** "Building damage assessment in decimeter resolution SAR imagery, a future perspective", Joint Urban Remote Sensing Event JURSE 2011, München, April 2011

**Cristallini, D.; Witter, M.; Kohlleppel, R.:** "On the accuracy of target DOA estimation under varying interference conditions with PAMIR", IEEE Radar Conference 2011, Kansas City (USA), Mai 2011

**Cristallini, D.; Colone, F.; Lombardo, P.:** "Dual adaptive channel STAP: Theory and experimental results", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2011

**Demming, M.; Rubart, J.; Derouiche, B.; Nüßler, D.; Krebs, C.; Weinreich, I.:** "Characterization of critical material based on phase and amplitude information of high frequency measurements", Future Security 2011, Berlin, September 2011

**Ender, J.; Brenner, A.; Klare, J.; Essen, H.:** "Advances in radar imaging at Fraunhofer FHR", APSA Asia Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar APSAR 2011, Seoul (KR), September, 2011

**Ender, J.; Leushacke, L.; Brenner, A.:** "Security in space – Space situational awareness via radar observation", Future Security 2011, Berlin, September 2011

**Ender, J.; Leushacke, L.; Brenner, A.; Wilden, H.:** "Radar techniques for space situational awareness", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2011

**Espeter, T.; Walterscheid, I.; Klare, J.; Brenner, A.; Ender, J.:** "Bistatic forward-looking SAR experiments using an airborne receiver", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2011

**Essen, H.; Fuchs, H.-H.; Biegel, G.; Lidvist, G.:** "NAVRCS - A simulation tool

for maritime targets under realistic conditions", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Essen, H.; Biegel, G.; Brehm, T.; Thoennessen, U.; Schulz, C.:** "Shunting yard management using millimeterwave radar", German Microwave Conference GeMIC 2011, Darmstadt, März. 2011

**Essen, H.; Biegel, G.; Förster J.; Behn, M.; Fabbro V.; Castanet L.; Douvenot, R.; Hurtaud, Y.:** "Determination of the refractive index in the maritime boundary layer by sea clutter measurements", URSI Commission F Triennial Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing, Garmisch, März 2011

**Essen, H.; Hägelen, M.; Hantscher, S.; Wahlen, A.; Sommer, R.; Briese, G.:** "Signature measurements in monostatic and bistatic SAR configuration", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Essen, H.; Hantscher, S.; Nübler, D.; Hommes, A.; Krebs, C.:** "Parcel inspection at millimeter wavelengths", 1st Conference on Detection of Explosives EuCDE 2011, Avignon (FR), März 2011

**Essen, H.; Lorenz, F.; Hantscher, S.; Warok, P.; Zimmermann, R.; Schröder, M.; Koch, W.; Schikora, M.; Luedtke, G.; Wild, K.:** "Millimeterwave radar for runway debris detection", Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV) 2011, Capri (IT), September 2011

**Essen, H.; Stanko, S.; Sommer, R.; Johannes, W.; Wahlen, A.; Wilcke, J.; Hantscher, S.:** "Millimetre wave SAR for UAV operation", Asia Pacific Microwave Conference 2011, Melbourne (AU), Dezember 2011

**Essen, H.; Warok, P.; Schröder, M.; Zimmermann, R.; Koch, W.; Schikora, M.:** "Millimetre wave radar network for foreign object

detection on runways", Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2011, Marrakesch (MA), März 2011

**Essen, H.; Lorenz, F.; Hantscher, S.; Warok, P.; Zimmermann, R.; Schröder, M.; Koch, W.; Schikora, M.; Luedtke, G.; Wild, K.:** "Millimeterwave radar for runway debris detection", Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV 2011), Capri (IT), September 2011

**Fatihi, N.; Hantscher, S.; Lang, S.; Essen, H.:** "Fusion of radar and optical images for person screening in a security sensitive environment", Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2011, Marrakesch (MA), März 2011

**Ferro-Famil, L.; Cristallini, D.; Pastina, D.; Lombardo, P.:** "Improving SAR tomography performance using efficient sensor configurations", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2011, IEEE International,

Vancouver (CA), Juli 2011

**González-Huici, M. A.; Uschkerat, U.; Seidel, V.; Pedlow, C.:** "A preliminary study of the radiation characteristic of an experimental GPR antenna for underground cavity detection", Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems COMCAS 2011, Tel Aviv (IL), Oktober 2011

**Hantscher, S.; Lang, S.; Essen, H.; Wienecke, M.; Koch, W.; Tessmann, A.:** "Security Assistant System Combining Millimetre Wave Radar Sensors and Chemical Sensors" IEEE Symposium on Antennas and Propagation, Spokane, WA, USA, Juli 2011

**Hantscher, S.; Lang, S.; Hägelen, M.; Essen, H.; Tessmann, A.:** "Inspection of Passengers Using a fast Millimetre Wave FMCW Radar" Progress in Electromagnetic Research Symposium, Marrakesch, Marokko, März 2011



- Hantscher, S.; Hägelen, M.; Lang, S.; Schlenther, B.; Essen, H.; Tessmann, A.:** "Localisation of concealed worn items using a millimeter wave FMCW radar", Asia Pacific Microwave Conference 2011, Melbourne (AU), Dezember 2011
- Hantscher, S.; Schlenther, B.; Lang, S.; Hägelen, M.; Essen, H.; Tessmann, A.:** "Multistatic 96 GHz rotating W-band radar for passenger inspection on airports", Future Security 2011, Berlin, September 2011
- Hantscher, S.; Essen, H.; Warok, P.; Zimmermann, R.; Schroder, M.; Sommer, R.; Lang, S.; Schikora, M.; Wild, K.; Koch, W.:** "LAOTSE, an approach for foreign object detection by multimodal netted 2D / 3D sensors", Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV) 2011, Capri (IT), September 2011
- Hantscher, S.; Essen, H.; Wieneke, M.; Koch, W.:** "Stand-off inspection of moving persons using imaging mmW-sensors and chemical sensors", EU Conference on Detection of Explosives, Avignon (FR), März 2011
- Haumtratz, T.; Schiller, J.; Lindenmeier, S.:** "Challenges for non-cooperative target identification in a bistatic radar configuration", IEEE-SPIE/SPS 2011, Jachranka (PL), Juni 2011
- Hommel, A.; Nüßler, D.; Warok, P.; Krebs, C.; Heinen, S.; Essen, H.:** "Inspection of samples using a fast millimetre wave scanner", Sensors and their Applications XVI, IOP Science and Technology Group, Cork (IR), September 2011
- Johannes, W.; Essen, H.; Stanko, S.; Sommer, R.; Wahlen, A.; Wilcke, J.; Schlechtweg, M.; Tessmann, A.:** "Miniaturized high resolution synthetic aperture radar at 94 GHz for microlight aircraft or UAV", IEEE-Sensors Conference, Limerick (IR), Oktober 2011
- Knott, P.; Löcker, C.; Algenmissen, S.:** "Antenna element design for a conformal antenna array demonstrator", IEEE International Aerospace Conference, Big Sky (USA), März 2012
- Knott, P.; Nickel, U. R. O.:** "Design and development of a V-shaped printed dipole antenna array for passive radar", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011
- Knott, P.; Nowicki, T.; Kuschel, H.:** "Design of a disc-cone antenna for passive radar in the DVB-T frequency range", German Microwave Conference (GeMic), Darmstadt, März 2011
- Kohlleppel, R.:** "Ground moving target tracking with PAMIR utilizing a Gaussian mixture PHD filter", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2011
- Krebs, C.; Warok, P.; Heinen, S.; Brauns, R.; Hommes, A.; Kose, S.;**
- Teichrib, W.; Gütgemann, S.; Nüßler, D.:** "The development of a compact millimeter wave scanning system", 36th Conferenz on Infrared, Millimetre Waves and Terahertz, Houston (USA), Oktober 2011
- Kuschel, H.:** "Surveillance of closed water (fjords) and littoral regions by passive bi-static radar (PBR) using digital broadcast illuminations", Maritime Security, Maritime Systems and Maritime Technology Conference MAST Europe 2011, Marseille (FR), Juni 2011
- Kuschel, H.; Walterscheid, I.; Luedkte, G.; Koch, W.:** "Integrated border management - Remarks on a border control roadmap", Future Security 2011, Berlin, September 2011
- Kuschel, H.; Heckenbach, J.; O'Hagan, D. W.; Ummenhofer, M.:** "A hybrid multi frequency passive radar concept for medium range air surveillance", Microwave, Radar and Remote Sensing MRRS 2011, Kiev (UA), August 2011

- Kuschel, H.; Knott, P.; Nowichi, T.:** "Design of a Disc-Cone Antenna for Passive Radar in DVB-T Frequency Range", German Microwave Conference GeMIC 2011, Darmstadt, März 2011
- Lang, S.; Hägelen, M.; Ender, J.; Hantscher, S.; Essen, H.:** "A new approach for fast security scanning with millimetre-waves: SARGATE", SPIE Defense and Security Symposium, Orlando (USA), März 2011
- O'Hagan, D. W.; Kuschel, H.; Heckenbach, J.; Ummenhofer, M.:** "Bistatic radar principles and technique", European Radar Conference, Manchester (GB), Oktober 2011
- Pastina, D.; Buratta, L.; Turin, F.; Cristallini, D.:** "Exploiting COSMO-SkyMed spotlight SAR images for GMTI applications", 2011 CIE International Radar Conference, Chengdu (CN), Oktober 2011
- Prünste, L.:** "Compressed sensing for joint ground imaging and target indication with airborne radar", 4th Workshop on Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations SPARS11, Edinburgh (GB), Juni 2011
- Ribalta, A.:** "High resolution SAR Image reconstruction: the generalized backprojection algorithm", Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2011, IEEE International, Vancouver (CA), Juli 2011
- Schiller, J.:** "Capabilities, developments and challenges in Non Cooperative Target Identification (NC(T)) using radar", MRRSS Microwave Radar and Remote Sensing Symposium, Kiew (UA), August 2011
- Schimpf, H.:** "The influence of multipath on ship ATR performance", SPIE Defense and Security Symposium, Orlando (USA), März 2011
- Schimpf, H.:** "The mitigation of the influence of multipath on the ground-based classification of ships", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2011
- Schmitt, M.; Magnard, C.; Brehm, T.; Stilla, U.:** "Towards airborne single pass decimeter resolution SAR interferometry over urban areas", Photogrammetric Image Analysis PIA 2011, München, Oktober 2011
- Schumacher, R.; Schimpf, H.; Schiller, J.:** "Variability and robustness of scattering centers in HRR/ISAR ground target data and its influence on the ATR performance", SPIE-Defence Security Sensing 2011, Orlando (USA), April 2011
- Schumacher, R.; Schimpf, H.; Schiller, J.:** "Multi view-angle considerations for the next generation of ATR reference database", NATO SET 169, 8th Military Sensing Symposium MSS 2011, Friedrichshafen, Mai 2011
- Stanko, S.; Johannes, W.; Sommer, R.; Wahlen, A.; Wilcke, J.; Essen, H.:** "Millimeterwave radar for SAR on UAVs with realtime image display", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011), Leipzig, September 2012
- Stanko, S.; Johannes, W.; Sommer, R.; Wahlen, A.; Wilcke, J.; Essen, H.; Tesmann, A.; Kallfass, I.:** "SAR with MIRANDA - Millimeterwave radar using analog and new digital approach", European Radar Conference EURAD 2011, Manchester (GB), September 2011
- Stanko, S.; Wahlen, A.:** "Essential requirements of navigation systems for SAR on small or unmanned aerial vehicles", European Navigation Conference ENC, London, November 2011
- Uschkerat, U.; Alteköster, C.; Pedlow, C.:** "A forward looking ground penetrating radar for IED", NATO Specialist Meeting SET175, Kopenhagen (DK), Juni 2011
- Uschkerat, U.; Imbembo, E.:** "A close-range UWB SAR system concept for crop sensing", International Radar Symposium 2011 (IRS 2011),

Leipzig, September 2011

**Vaupel, T.:** "Fast integral equation solver strategies with implicit matrix vector product evaluation for planar-3D structures", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Wagner, C.; Essen, H.; Hommes, A.; Nüßler, D.; Warok, P.; Heinen, S.:** "A versatile millimetre wave scanner for goods inspection", IEEE-Sensors Conference, Limerick (IE), Oktober 2011

**Wagner, C.; Nüßler, D.; Warok, P.; Krebs, C.; Heinen, S.; Essen, H.:** "Fast stand-alone millimeter wave scanner", International THz Conference, Villach, November 2011

**Wagner, C.; Peveling-Overhag, C.; Heinen, S.; Fritsche, F.; Hommes, A.; Nüßler, D.; Essen, H.:** "In vivo chlorophyll monitoring of biological probes with THz-time domain spectroscopy", 36th Conferenz on Infrared,

Millimetre Waves and Terahertz, Houston (USA), Oktober 2011

**Weinmann, F.:** "Stochastic scattering model for the application of SBR to rough surfaces", 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rom (IT), April 2011

**Sonstige Vorträge auf wissenschaftlichen  
Veranstaltungen**

**Bertuch, T.:** "Research on engineered materials at Fraunhofer FHR", 1st Meeting NATO RTG SET-181 "Metamaterials for Defense and Security Applications", Paris (FR), April 2011

**Danklmayer, A.:** "Propagation distortions in SAR applications", URSI Commission-F Tutorial Workshop at the URSI General Assembly, Istanbul (TK), August 2011

**Ender, J.:** "Advances and prospects in bi- and multistatic SAR", GTTI/SIEM: "Hot topics in Radar signal Processing", Taormina, Italien, Juni 2011

**Kuschel, H.:** "Hybrid multi-frequency passive radar concept for medium range AS", 3rd FHR PCL Focus Days, Wachtberg, Mai 2011

**Kuschel, H.:** "The use of innovative passive radar technology for air traffic security", ARGUS 3D workshop Future Security 2011, Berlin,

September 2011

**Leushacke, L.:** „Erfassung und Aufklärung von Objekten im Weltraum“, Symposium Technologien für intelligenten Schutz, BAKWVT, Mannheim, 2011

**Leushacke, L.:** „Weltraumlageerfassung bei Fraunhofer FHR“, DeSSA Workshop, Bonn, April 2011

**O’Hagen, D. W.:** "Passive radar considerations in SET 164", 3rd FHR PCL Focus Days, Wachtberg, Mai 2011

**O’Hagan, D. W.; Kuschel, H.; Heckenbach, J.; Ummenhofer, M.; Schell, J.; Appel, R.:** "PCL illuminator antenna elevation characteristics and its impact on PCR coverage", 3rd FHR PCL Focus Days, Wachtberg, Mai 2011

**O’Hagan, D. W.:** "Passive radar considerations in NATO SET-164", 3rd FHR PCL Focus Days, Wachtberg, Mai 2011

**Ummenhofer, M.:** "Development of a simulation tool for PCR concepts in a SFN", 3rd FHR PCL Focus Days, Wachtberg, Mai 2011

### **Sonstige Veröffentlichungen und Forschungsberichte**

**Cristallini, D.; Bürger, W.:** wissenschaftliche Forschung  
"A robust direct data domain Jahresbericht 2010  
approach for STAP", FHR-  
Bericht Nr. 154, Juli 2011

**Ender, J.; Fiege, J.:** "Future  
Security 2011 – Proceed-  
ings", Fraunhofer-Verlag,  
September 2011

**WeiB, M.; Ender, J.; Girull,  
L.; Lee, J. (Herausgeber):**  
Special Issue zur EUSAR 2010  
in den Transaction on Geosci-  
ence and Remote Sensing,  
EUSAR 2010, Oktober 2011

**Ender, J.:** „Sicherheit im  
Weltraum - Weltraumlageer-  
fassung mit Radar, Satelliten  
als Ziele des internationalen  
Terrorismus“, cpm forum  
Militärische Nutzung des  
Weltraums, November 2011

**Essen, H.:** Countering IEDS  
with mmW-SAR onboard  
tactical UAVs, DGON-Journal  
April 2011

**Essen, H.:** Countering IEDS  
with mmW-SAR onboard  
tactical UAVs, Technik in  
Bayern, April 2011

**Löcker, C.; Knott, P.:**  
„Entwurf und Modellierung  
von Antennen auf fliegenden  
Plattformen, Wehrwis-  
senschaftliche Forschung  
Jahresbericht 2010“, Wehr-

# GREMIENTÄTIGKEITEN

## Bartsch, G.

- European Defence Agency (EDA); Member of EDA's network of experts (CapTechs Network)
- 60. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress: Chairman Weltraumlage / SSA

## Berens, P.

- Program Committee EUSAR 2012

## Cerutti-Maori, D.

- EUSAR 2012: Program Committee

## Danklmayer, A.

- VDE ITG Fachausschuß 7.5: berufenes Mitglied
- IGARSS 2011: Scientific Committee

## Ender, J.

- EUSAR 2012 Program Committee: Vice Chairman
- Future Security 2011: General Chairman
- IRS 2011: Technical Program Committee
- NATO Research and Technology Organisation (RTO) Sensor & Electronics Technology (SET) Panel Member at Large
- Senior Member des IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers)
- Mitglied im Rat der DGON (Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation)
- Mitglied des IMA (Institut für Mikrowellen- und Antennentechnik e. V.)
- Vice Coordinator der Forschungsschule MOSES, ZESS, Universität Siegen

## Essen, H.

- Program Committee Future Security: Mitglied
- Fraunhofer-Max-Planck-Gesellschaft „mHEMT Prozess-Optimierung für niedrigstes Eigenrauschen bei kryogenen Temperaturen“; Fachberater im Auswahlverfahren
- EUSAR 2012: Program Committee

## Fiege, J.

- Future Security 2011: Program Chairman

## Klare, J.

- EUSAR 2012: Program Committee
- EuMW: Technical Member

## Klemm, R.

- EUSAR 2012: Program Committee, Honorary Chairman

## Knott, P.

- Capability Technology Area (CapTech) IAP2 – RF Sensor Systems & Signal Processing Panel, European Defence Agency (EDA); CapTech Governmental Expert (CGE)
- Fachausschuss 7.1 Antennen der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG): Mitglied
- COST Action IC 0603 Antenna Systems & Sensors for Information Society Technologies (ASSIST): National Delegate
- ICT COST Action IC 1102 Versatile, Integrated, and Signal-aware Technologies for Antennas (VISTA): National Delegate
- European Association on Antennas and Propagation (EurAAP): Regional Delegate (Proxy),
- IEEE Microwave Theory and Techniques (MTT) / Antennas and Propagation (AP) Joint Chapter: Vice-Chair Executive Committee (Vorstand)

**Kuschel, H.**

- ARGUS 3D-Workshop on Future Security 2011: Chairman

**Leushacke, L.**

- Interagency Space Debris Coordination Committee:  
Deutsches Mitglied WG 1
- Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt: Mitglied im  
Fachausschuss S4.5
- ESSC 2011: Program Board Member

**Matthes, D.**

- Next Generation EW - Specialist Meeting (SCI 234): Program  
Committee

**Schiller, J.**

- 3rd Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium  
MRRS-Kiew: Program Committee
- International Radar Symposium 2011 (IRS 2011): Program  
Committee

**Walterscheid, I.**

- Program Committee EUSAR 2012: Member

**Weiß, M.**

- European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR  
2012: EUSAR-Executive Board-Mitglied und Technical Chair
- EuMW: Technical Member

# PRESSESPIEGEL

Datum	Titel	Medium
04.01.2011	Radartechnik spürt versteckte Brandherde auf	Handelsblatt
06.01.2011	Staub und Rauch sind kein Hindernis mehr	Kölnische Rundschau
09.01.2011	Sensor lotst Feuerwehr	Pirmasenser Zeitung
10.01.2011	Radiometer spürt Brandherde auf	Salzburger Nachrichten
12.01.2011	Mikrowellensensor leitet Löschflugzeuge	Saarbrücker Zeitung
04.02.2011	Radiometer spürt mit Infrarot-Kameras Brandherde auf	Schwäbisches Tagblatt
04.02.2011	Freie Grundstücke werden knapp	General-Anzeiger
01.03.2011	Luftschiff auf Testfahrt mit neuem Brandsensor	Dresdner neueste Nachrichten
16.03.2011	Zwei weitere Institute bündeln ihre Kompetenzen	elektronikpraxis.de
24.03.2011	Luftschiff auf Testfahrt mit neuem Brand-Sensor	Oschatzer Allgemeine
25.03.2011	Zwei neue Institute verstärken Fraunhofer-Allianz Vision	Markt und Technik
30.03.2011	Aspekte der Luftwaffe zur Nutzung des Weltraums	WT Wehrtechnik
01.04.2011	Für die Praxis	Markt und Mittelstand
02.04.2011	In Kürze	Kölnische Rundschau
02.04.2011	Messeauftritt der Forscher	General-Anzeiger
04.04.2011	Sicherheit aus der Region in Hannover	Kölnische Rundschau
05.04.2011	Sicherheit im Mittelpunkt	Rhein-Zeitung
07.04.2011	Wissenschaftsregion präsentiert sich auf Hannover-Messe	General-Anzeiger-Online
07.04.2011	Sicherheit für Kühlkette und Landebahn	General-Anzeiger
09.04.2011	Weltraummüll	C't 9/2011
14.04.2011	European Space Scout	rfglobalnet.com
21.04.2011	Know-How noch stärker bündeln	KEM Fachmagazin
24.04.2011	Entdeckung der Woche	DIE RHEINPFALZ
26.04.2011	Neue Institute aufgenommen	QUALITY ENGINEERING
01.05.2011	Neue Institute verstärken Fraunhofer-Gesellschaft	MECHATRONIK
16.07.2011	Fraunhofer in der Region Bonn	General-Anzeiger
19.07.2011	Blinde Flecken	Frankfurter Allgemeine
02.08.2011	Neues Radar soll Rollfelder sicherer machen	wiwo.de
02.08.2011	Neues Radar soll Rollfelder sicherer machen	handelsblatt.com
02.08.2011	Radarsensor warnt vor Flugzeugteilen auf der Landebahn	elektronikpraxis.de



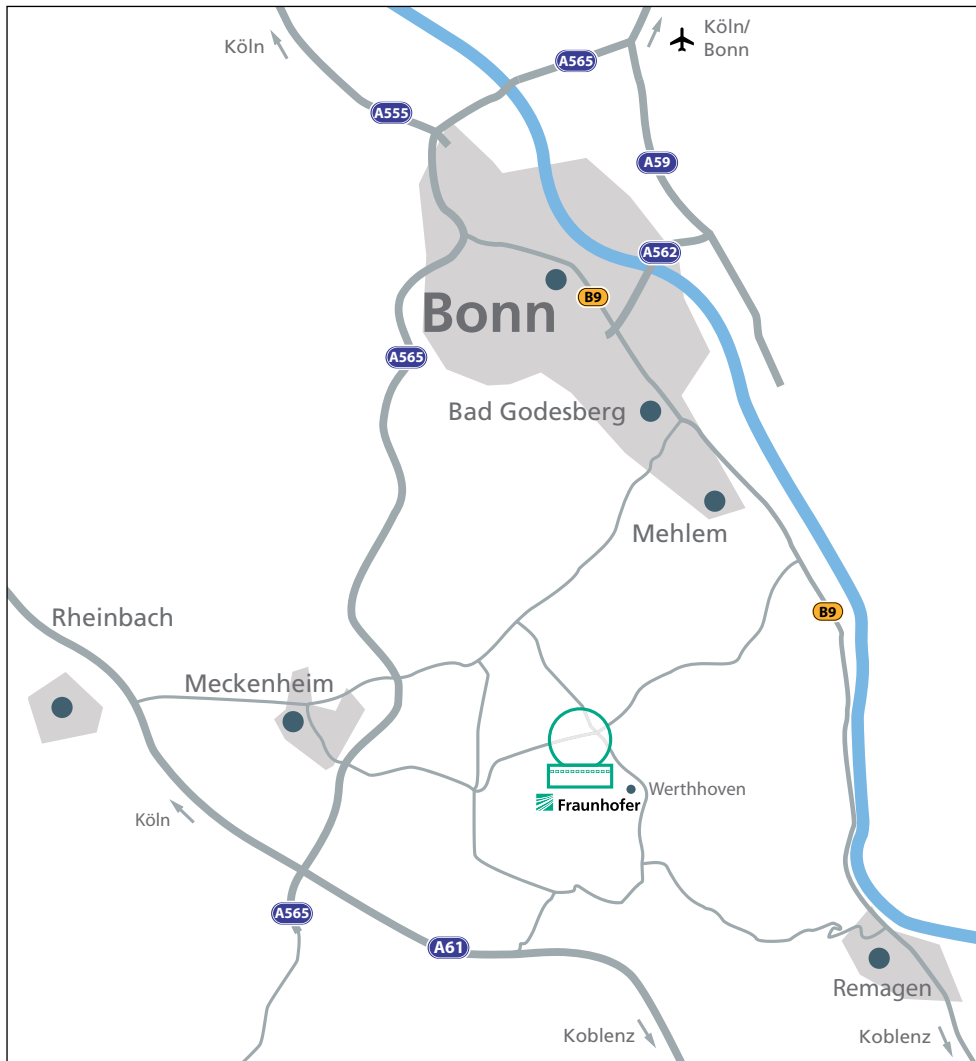
<b>Datum</b>	<b>Titel</b>	<b>Medium</b>
10.08.2011	Using radar to make runways safer	wired.de
15.08.2011	Pistenwächter auf Flughäfen	Der Spiegel
06.09.2011	Interview mit Prof. Ender zum Thema „Sicherheit im Weltraum“	SWR2 Impuls
07.09.2011	Future Security: Sicherheit hat ihren Preis	heise online
07.09.2011	Sprengstoffschnüffler in Wartestellung	Deutschlandfunk
08.09.2011	Future Security: Walk-Through-Szenarien für den Körperscanner	heise online
09.09.2011	Militärtechnik: Löchrige Tarnkappe für Kampfkolosse	Spiegel Online
13.10.2011	Deutscher Satellit ROSAT: Feuerball aus Schrott stürzt auf die Erde	Spiegel Online
14.10.2011	Sichere Start- und Landebahnen	Bayerische Staatszeitung
21.10.2011	16-Tonnen-Geschoss kann morgen Deutschland treffen	bild.de
22.10.2011	Bis zu 30 Trümmerteile erwartet	WDR online
25.10.2011	ROSAT über Golf von Bengalen abgestürzt	Spiegel Online
08.11.2011	Interview mit Dr. Leushacke zum Thema „Weltraumspäher“	WDR5
14.11.2011	Positive Bilanz nach Evaluationen: Wissenschaftsrat stellt deutliche Verbesserungen bei Instituten fest.	idw-online
15.11.2011	Sicherheit im Weltraum	CPM Forum
29.11.2011	Ausgezeichnete Forscher	Westfalenpost
01.12.2011	Millimeterwellensensor durchleuchtet nicht transparente Materialien	uni-online
01.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	juraforum
01.12.2011	Monitoring food with millimeter waves	innovations-report
01.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	idw-online
01.12.2011	Beste Veröffentlichung 2010	Siegener Zeitung
02.12.2011	Monitoring food with millimeter waves	physorg.com
02.12.2011	Fraunhofer develops x-ray alternative for food inspection	packageingmanuf.com
02.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	Lebensmitteltechnik
02.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	laborpraxis
02.12.2011	Monitoring food with millimeter waves	india.diplo
02.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	food-market
02.12.2011	Lebensmittelsicherheit: Die Alternative zu Röntgenstrahlen	alimentaonline
04.12.2011	EU erlaubt Einsatz von Körperscannern	Deutsche Welle
05.12.2011	SAMMI: Millimeter wave imager finds impurities in objects	patexia.com
05.12.2011	Millimeter-wave sensor monitors packing safety	laboratoryequipment
08.12.2011	Digitaltechnik macht Blick durch transparente Materialien frei	nachrichten.de
29.12.2011	Lebensmittelkontrolle mit Millimeterwellen	pro-physik

ANFAHRT



# ANFAHRT

Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR befindet sich im Süden von Nordrhein-Westfalen, auf der Höhe des Wachtbergs nahe Bonn-Bad Godesberg.



## Hausanschrift:

Fraunhofer FHR  
Neuenahrer Str. 20  
53343 Wachtberg

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

GPS-Koordinaten:  
50°37.050' N  
07°07.917' E

## Anreise mit dem Auto

über die Autobahn A565 zur Ausfahrt 11 „Meckenheim-Merl“, danach der Beschilderung folgen, für andere Routen siehe Karte.

## Anreise mit der Bahn

bis Remagen, Bad Godesberg oder Bonn Hbf., dann Taxi (ca. 10 km, 11 km bzw. 25 km) oder Bus (siehe unten)

## Anreise mit dem Flugzeug

bis Flughafen Köln/Bonn, anschließend mit Shuttle-Bus nach Bonn Hbf. und dann mit Bahn oder Taxi (ca. 25 km) oder mit Taxi direkt vom Flughafen (ca. 50 km)

## Anreise mit dem Bus ab Bad Godesberg

Linien 856, 857 von Bad Godesberg (Bahnhof) bis Berkum ZOB, Busse verkehren in der Regel stündlich

# IMPRESSUM

## Herausgeber

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

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

## Bilder

© Fraunhofer FHR, außer:  
Titelbild: © Fraunhofer FHR & istockphoto  
S. 3: © Uwe Bellhäuser  
S. 10,11 außer Nüßler: © Uwe Bellhäuser  
S. 18: © NASA/ESA & Fraunhofer FHR  
S. 21 Abb. 3: © DLR  
S. 22 Abb. 1 Erde: © istockphoto  
S. 24 Abb. 1: © NASA/ESA  
S. 26 Abb. 1: © Uwe Bellhäuser  
S. 28: © Fraunhofer FHR (Daten), ETH Zürich (Prozessierung)  
S. 40: © Bundeswehr, PIZ Marine  
S. 43 Abb. 3 Auto: © istockphoto  
S. 46: © Bundeswehr/Mediendatenbank  
S. 51 Abb. 2: © Uwe Bellhäuser  
S. 57 Abb. 2: © Uwe Bellhäuser  
S. 58: © istockphoto  
S. 62: © Uwe Bellhäuser  
S. 64 Abb. 1: © Uwe Bellhäuser  
S. 66: © Solar-Institut Jülich  
S. 70: © DG Flugzeugbau GmbH, Bruchsal  
S. 72 Abb. 1: © istockphoto  
S. 75 Abb. 3, Abb. 4: © WTD 71-FWG  
S. 107: © Uwe Bellhäuser

Alle Rechte vorbehalten.

Vervielfältigung und Verbreitung nur mit Genehmigung der  
Redaktion.

Wachtberg, Mai 2012

## Redaktion

Dipl.-Volksw. Jens Fiege (Leitung)  
B.Sc. Hanne Bendel  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender  
Annekathrin Saalmann

## Layout und Satz

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

## Social Media



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



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



Google+  
<http://plus.google.com/u/0/b/116751429716317478645/116751429716317478645>







