



Anchors

UAV-Assisted Ad Hoc Networks for Crisis Management and Hostile Environment Sensing

Abschlussbericht

Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-
Technische Trendanalysen INT



Zuwendungsempfänger Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Ausführende Stelle Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) Postfach 1491 53864 Euskirchen	Förderkennzeichen 13N12206
	Laufzeit 01.05.2012 – 31.10.2015
	Autoren Wolfram Berky Sebastian Chmel Olaf Schumann
Vorhabensbezeichnung UAV-Assisted Ad Hoc Networks for Crisis Management and Hostile Environment Sensing	
Teilvorhabensbezeichnung Beratung zur Konstruktion von R/N-Sensoren, Untersuchungen zur Strahlenhärte der Sensoren und UAVs, Durchführung von Testszenarien für das Gesamtsystem aus UAVs und UGVs	

BEFÖRDERT VOM



The ANCHORS – Project is co-financed by BMBF and ANR





Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
4. Ausgangslage des wissenschaftlichen und technischen Stands	9
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
6. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
7. Zahlenmäßiger Nachweis	13
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	13
9. Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse	14
10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	14
11. Veröffentlichungen der Ergebnisse	14
12. Zusammenfassung und Ausblick	15
13. Literaturverzeichnis	15
14. Glossar	16



1. Aufgabenstellung

Für Rettungseinsätze bei Großschadensfällen wie etwa bei einer Naturkatastrophe oder auch einem Terroranschlag sind Lagebilder und stabile Kommunikation im Krisenareal unabdingbar. Eine direkte Inspektion des betroffenen Gebietes kann allerdings aufgrund zerstörter Zugänge erschwert oder unmöglich geworden sein. Darüber hinaus kann sie für Einsatzkräfte auch schlicht zu große Gefahren bergen: Instabile Gebäudestrukturen können einstürzen, freigesetzte Chemikalien, biologische oder radioaktive Materialien können gesundheitsschädlich oder gar lebensbedrohlich wirken. Hier bietet der Einsatz unbemannter Flugsysteme und Bodenfahrzeuge einen Ausweg.

Das deutsch-französische Projekt ANCHORS hatte zum Ziel, ein System aus kleinen, beweglichen unbemannten Flugsystemen (UAV = unmanned aerial vehicle) und Bodenfahrzeugen (UGV = unmanned ground vehicle) zu entwickeln, das autonom als Schwarm agierend folgende wichtige Aufgaben erfüllen sollte:

1. Erstellen eines optischen Lagebildes
2. Messung von Radioaktivität
3. Bereitstellung eines Ad-hoc-Netzwerkes zur Datenübertragung und Kommunikation

Gegenüber der Verwendung eines einzelnen ferngesteuerten Fluggerätes oder Fahrzeuges, wie sie neuerdings bei Katastrophenfällen schon eingesetzt wurden, hat das ANCHORS-System mit dem Einsatz eines Schwarms deutliche Vorteile:

- Die Mitglieder des Schwarms können Knoten eines Kommunikationsnetzes („Hot Spots“) bilden und somit weiter vordringen als bei der Abhängigkeit von einer direkten Verbindung.
- Mit Hilfe eines automatisierten Rollentausches und eines automatischen Wiederaufladens der Geräteakkumulatoren kann die Einsatzzeit des Gesamtsystems erheblich verlängert werden.
- Ein Schwarm bietet durch Redundanz eine wesentlich größere Robustheit im Einsatz als ein einzelnes Gerät.
- Ein hoher Grad an Automatisierung erlaubt, dass der Operator von der Aufgabe der Flugsteuerung entlastet wird und so mehrere UAVs steuern und ggf. weitere Aufgaben wie z.B. die Kommunikation mit der Einsatzleitung übernehmen kann.

Das Konsortium sah sich also vor der Aufgabe, ein System aus unbemannten Fluggeräten und Bodenfahrzeugen zu entwickeln, das obige Anforderungen erfüllen kann, ein geeignetes Einsatzkonzept zu entwerfen und das Ganze mit Hilfe von Testmessungen und mit einem Funktionsmodell in realistischen Übungsszenarios unter Beweis zu stellen.

Die grundsätzlichen Anforderungen an ein solches System waren:

- Interaktion der unbemannten Einzelsysteme untereinander, Rollenmanagement
- Ausstattung mit optischen Kameras
- Ausstattung mit leichtgewichtigen, aber dennoch ausreichend effizienten Sensoren für Radioaktivitätsmessungen
- (Teil-)automatisierte Flugsteuerungsfunktionen zur Entlastung der Operateure
- Ad-hoc-Kommunikations-Infrastruktur
- Link-Management, Auswahl des für eine Datenklasse geeigneten Verbindungstyps
- Autonomes Wiederaufladen der Fluggeräte
- Robustheit der UAVs gegen Radioaktivität
- Robustheit der UAVs gegen elektromagnetische Strahlung
- Möglichkeit zur Dekontamination der UAVs

Aus dieser allgemeinen Aufgabenstellung ergaben sich speziell für das Fraunhofer INT verschiedene Tätigkeitsfelder:



Sowohl bei der Konzeptentwicklung, der Definition der technischen Anforderungen an das Gesamtsystem und an seine einzelnen Komponenten sowie beim Entwurf der Testszenarien und der Durchführung der Tests sollte das Fraunhofer INT seine langjährige, einschlägige Erfahrung im Bereich der in-situ-Gammadetektion einbringen. Bei der Entwicklung des Sensors für Radioaktivität (R/N-Sensor) fiel dem Fraunhofer INT die Aufgabe zu, die Firma Mirion unterstützen.

Im Einsatzfall sollte das System auch in einer Umgebung mit hohen Dosen ionisierender Strahlung operieren können. Ein wichtiger Punkt war daher die Robustheit der R/N-Sensoren gegenüber derartiger Strahlung, die mit im Fraunhofer INT vorhandenen Bestrahlungsanlagen untersucht werden konnte. Ebenso mussten natürlich auch die Fluggeräte – im Rahmen des Projektes von der Firma Ascending weiter entwickelte Oktokopter – so konstruiert sein, dass sie einer erhöhten Strahlenbelastung standhalten können. Sie sollten daher gleichfalls in den Bestrahlungsanlagen des Fraunhofer INT getestet und dann optimiert werden.

Weiterhin war auch die Elektromagnetische Störfestigkeit (EMS) als Teil der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von Sensor und Fluggerät ein wichtiger Punkt. Hier kam dem Fraunhofer INT die Aufgabe zu, mit den Partnern konkrete Anforderungen zu erarbeiten, so dass z.B. auch ein Einsatz in einem Hafen (ein ursprünglich angedachtes Testszenario) mit Schiffsradar, der das ANCHORS-System stören könnte, gewährleistet werden kann. Im Messlabor des Fraunhofer INT sollte die EMS in einem TEM-Wellenleiter dann näher untersucht werden und die Ergebnisse in die Entwicklung der Systemkomponenten einfließen.

2. Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Ein so komplexes System wie das ANCHORS-System zu entwickeln, setzt die Zusammenarbeit vieler Partner mit je eigenen Kompetenzen voraus. Vom Design der Fluggeräte über die Steuerung des Schwarms und die Kommunikationsarchitektur bis zum Einsatzkonzept mussten viele Einzelaufgaben erfüllt werden. Während die TU-Dortmund als Sprecher des Gesamtkonsortiums fungierte, wurde die Koordination der deutschen Partner in einen technischen und einen strategischen Part aufgeteilt und lag in den Händen der Firma Ascending bzw. der Feuerwehr Dortmund. Diese Spezifizierung sollte sicherstellen, dass die Belange der Endanwender eines solchen Systems stets im Fokus blieben.

Die erforderlichen Kompetenzen wurden von einem deutsch-französischen Konsortiums in der folgenden Zusammensetzung abgedeckt:

Frankreich:

- [CEA] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Koordination FR)
- [CAS] Cassidian
- [GRI] Groupe-Intra
- [ON] ONERA
- [TEL] LS telcom SAS

Deutschland:

- [FDDO] Feuerwehr Dortmund – IFR (strategische Koordination DE)
- [ASC] Ascending Technologies (technische Koordination DE)
- [INT] Fraunhofer INT
- [KHG] Kerntechnische Hilfsdienst GmbH
- [MIR] Mirion Health Physics
- [RWTH] RWTH Aachen – Institut für Flugsystemdynamik
- [SGE] SGE GmbH
- [TUDO] TU-Dortmund – Lehrstuhl für Kommunikationsnetze



Assoziierte Partner:

- [BfS] Bundesamt für Strahlenschutz
- [FWF] Feuerwehr Frankfurt a.M.
- [LKA] LKA Berlin

Von Seiten des Fraunhofer INT bildeten sowohl einschlägige Erfahrungen mit der Entwicklung und dem Test von Detektionssystemen; mit der Untersuchung der Wirkung von ionisierender und elektromagnetischer Strahlung auf Bauteile aller Art; mit der zerstörungsfreien Detektion von R/N-Material; als auch diverse technische Einrichtungen des Institutes die Voraussetzung, einen substantiellen Beitrag zur Arbeit des Konsortiums (siehe Kapitel 7) zu leisten.

Die Erfahrung im Fraunhofer INT auf dem Gebiet der Detektion von R/N-Material ermöglichte die Beteiligung des Instituts an der Entwicklung der R/N-Sensoren. Zahlreiche zuvor durchgeführte Übungen zur Detektion solchen Materials vor Ort, unter anderem auch in den EU-Projekten SCINTILLA oder dem TACIS-Projekt „Ukrainian border crossing station“, befähigten uns, bei der Planung der Durchführung von Demonstrationen des Sensors bzw. des gesamten Systems mitzuwirken und einen entsprechenden Beitrag zu leisten.

Folgende technischen Einrichtungen des Fraunhofer INT kamen im Rahmen des Projektes bei Testmessungen zum Einsatz:

TEM Wellenleiter

Ein im Geschäftsfeld EME selbst entwickelter TEM-Wellenleiter (Transverse Electromagnetic Mode) in einer abgeschirmten Halle für den Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 8 GHz. Hier können sowohl lineare Einkopplungsmessungen zur Bestimmung von Transferfunktionen und Untersuchungen zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) als auch Störempfindlichkeitsuntersuchungen mit konstanten und gepulsten Feldern mit Feldstärken bis zu mehreren kV/m an Objekten bis zu mehreren m³ Größe erfolgen. Hierfür steht eine umfangreiche Ausstattung an Hochleistungsquellen für den gesamten Frequenzbereich zur Verfügung.

Co-60-Bestrahlungsanlagen TK-100, TK-1000A und TK-1000B

Das Fraunhofer INT betreibt mehrere Co-60 Bestrahlungsanlagen. Die beiden großen Anlagen TK-1000A und TK-1000B bestehen aus einem Radiographiegerät GammaMat TK-1000, der als Transport- und Abschirmbehälter für eine Co-60 Quelle mit einer Aktivität von bis zu 22 TBq (600Ci) zugelassen ist. Die kleinere TK-100 Anlage nutzt den GammaMat TK-100 mit einer maximalen Aktivität von 3.7 TBq für Co-60. Die eigentliche Quelle hat eine Größe von etwa einem Kubikzentimeter und befindet sich innerhalb einer Abschirmung aus Stahl und depletiertem Uran. Während einer Bestrahlung wird sie aus dem Abschirmbehälter in ein Stahlrohr ausgefahren. Die Bestrahlungsanlagen sind auf die Untersuchung von Strahlungseffekten in Elektronik und Optik hin optimiert.

Dieser Aufbau hat wesentliche Vorteile:

- Dosimetrie:
Durch die geringe Größe der aktiven Co-60 Quelle lässt sich das Strahlenfeld mit hoher Genauigkeit als seine Punktquelle mit einem 1/r² Verhalten beschreiben. Das Dosimetrie-Modell wird regelmäßig mit Ionisationskammern überprüft, deren Ungenauigkeit besser als 3% ist und deren Kalibration auf nationale Standards rückführbar ist.
- Aufbau:
Die Quelle ist bei Nichtgebrauch innerhalb des Abschirmbehälters gelagert und wird erst zur Bestrahlung innerhalb weniger Zehntelsekunden in eine genau definierte Position ausgefahren. Damit ist es möglich, den Prüfling sehr präzise so zu platzieren, dass dieser bei der Bestrahlung der gewünschten Dosisleistung ausgesetzt ist, ohne dass der Bediener einer Strahlenbelastung ausgesetzt ist.



Die beiden Anlagen TK-1000A und TK-100 befinden sich innerhalb einer gemeinsamen Beton-Abschirmung. Die Anlage TK-100 ist innerhalb einer zusätzlichen Abschirmung aufgebaut, so dass während des Betriebs der TK-100 keine Einschränkungen für die TK-1000A bestehen. Die neuere Anlage TK-1000B befindet sich innerhalb eines dedizierten Abschirmraumes, welcher auf $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ temperaturstabilisiert ist. An beiden Anlagen steht eine ebenfalls auf $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ temperaturstabilisierte Klimakammer für empfindliche Messgeräte zur Verfügung.

Isotopenlabor

Das Fraunhofer INT betreibt ein Isotopenlabor; für Messungen stehen eine große Anzahl unterschiedlicher Gamma- und Neutronenquellen verschiedener Stärken zur Verfügung. Im Isotopenlabor selbst fanden keine Messungen im Rahmen des ANCHORS Projekt statt, allerdings konnte bei dem Test des R/N-Sensors im Wellenleiter eine Cs-137 Quelle genutzt werden. Dies war nur möglich, weil sowohl eine entsprechende Quelle vor Ort war, als auch eine temporäre Strahlenschutz-Kontrollzone im Wellenleiter errichtet werden konnte. Diese Möglichkeit, EMS-Messungen mit an einem R/N-Sensor zeitgleich mit einer Gamma-Quelle durchzuführen ist ein starkes Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer INT.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in seiner ursprünglichen Planung auf drei Jahre Laufzeit angelegt, beginnend mit dem 1.5.2012. Im Verlauf des Projekts stellte sich heraus, dass aufgrund einiger Verzögerungen bei der Fertigstellung von Systemkomponenten eine Verlängerung der Laufzeit von 6 Monaten erforderlich wurde, die vom Projektträger auch genehmigt wurde. Das Projekt endete somit offiziell am 31.10.2015.

Die Aufteilung der zu leistenden Arbeiten in verschiedene Arbeitspakete zeigt

Tabelle 3.1 im Einzelnen. Das Arbeitspaket WP 0 bezog sich auf Management-Aufgaben während der gesamten Projektlaufzeit. Im Arbeitspaket WP 1 ging es um grundlegende Fragen wie die Anforderungen an das Gesamtsystem und die Definition möglicher Einsatzszenarien. Im Arbeitspaket WP 2 wurde dann der Sensor zur Messung von Radioaktivität entwickelt. Dies beinhaltete sowohl die Sensorhardware als auch Kommunikationsprotokolle zur Übertragung der Messdaten vom Sensor, über das UAV und das ANCHORS-Netzwerk bis zur Bodenkontrollstation. Im Arbeitspaket WP 3 wurde das Konzept des Gesamtsystems entwickelt, bestehend aus Bodenkontrollstation, MTS und UAVs und UGVs.

In den Arbeitspaketen WP 4 und WP 5 ging es unter anderem um die Entwicklung des Kommunikationssystems innerhalb des Gesamtsystems und um Algorithmen für das Schwarmverhalten der UAVs. Hier war das Fraunhofer INT nicht oder nur in sehr geringem Maße beteiligt. Im letzten Arbeitspaket WP 6 wurden dann die einzelnen Komponenten der Systems zusammengefügt und im Rahmen kleinerer Tests und Demonstrationen auf ihre Funktionstätigkeit im Gesamtsystem überprüft. Die Verteilung der Arbeitsschritte der einzelnen Arbeitspakete auf die Projektlaufzeit zeigt

Tabelle 3.2, wobei hier die Verlängerung der Laufzeit noch nicht berücksichtigt wurde.



Nr.	Task	Titel	PM
WP 0 Management & Dissemination			0
0.1		Management	
0.2		Dissemination	
WP 1 Scenario & Architecture Definition			1
1.1		User Requirements & Scenario Definition	
1.2		Technical Requirements Analysis	0,5
1.3		Architecture Design	0,5
WP 2 Realtime Sensor Data Analysis and Integration			8
2.1		Sensor Design Requirements	1,5
2.2		Sensor Design Concept	0,5
2.3		Sensor Hardware Development	0,5
2.4		Sensor Data Processing	2
2.5		Sensor Subsystem Integration	1
2.6		Sensor Subsystem Performance Assessment	2,5
WP 3 Unmanned System Design			7
3.1		Unmanned Aerial and Ground System Req.	
3.2		Aerial Vehicle Concept and Design	
3.3		Guidance, Navigation and Control Interface for the MUAV	
3.4		Evaluation of Radiation Immunity	7
3.5		Autonomous Landing and Recharging	
3.6		Health Management, Redundancy and Reliability Mechanisms	
WP 4 Vehicular Ad-hoc Communication System			0
4.1		Scenario Refinements and Requirements	
4.2		Multi-hops Relaying for Mobile LTE Cells	
4.3		Enhanced PHY and MAC for UAV Assisted Ad-hoc Network	
4.4		Simulations & Performances Evaluation	
4.5		Concept Validation and Prototyping	
WP 5 Cooperative Swarm Behavior (CSB): Networking and Algorithms			1
5.1		Swarm Control Architecture and Interfaces	0,25
5.2		Swarm-data Transfer Protocols on Heterogeneous Links	
5.3		Distributed Sensor Swarm Algorithms	0,5
5.4		Energy and Health Management Strategies	
5.5		Collaboration between Ground and Aerial Vehicles	0,25
5.6		Cooperative Mission Control Algo. using Dynamic Role Mgnt.	
WP 6 Platform Integration & System Validation			4
6.1		Onboard Integration of Aerial Vehicle and Command Interface	0,25
6.2		User Control Interface and Sensor Data Visualization	0,25
6.3		System Integration	0,75
6.4		Interoperability Testing	0,25
6.5		System Integrity Trials	2
6.6		Validation and Demonstration	0,5
Summe			21

Tabelle 3.1: Thematische Unterteilung des Projekts in verschiedene Arbeitspakete (WP 0 bis WP 6) mit Unterpunkten und Anteil des Fraunhofer INT an jedem Arbeitspaket in Personenmonaten (rechte Spalte).

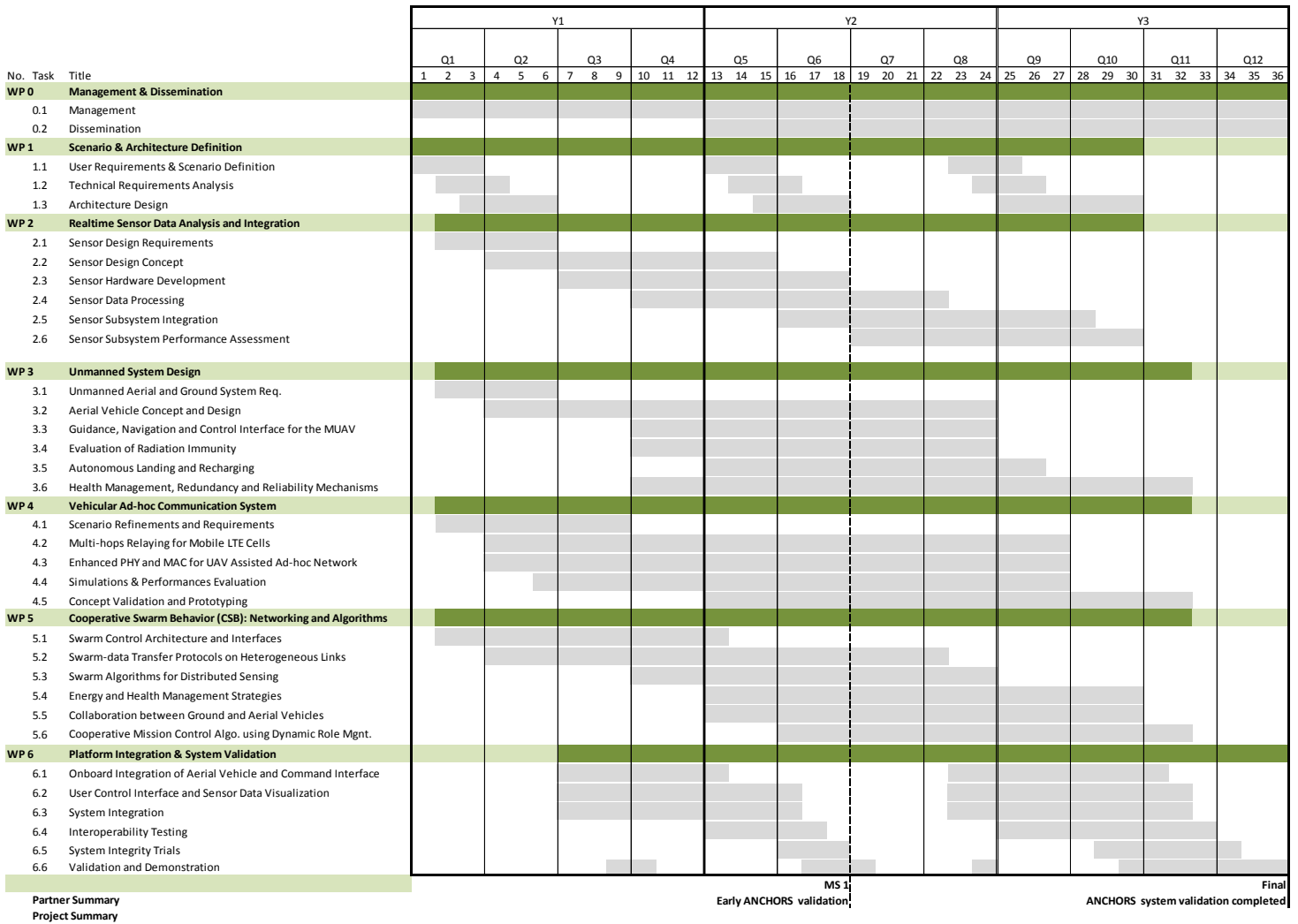


Tabelle 3.2: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs des Projektes (ohne Verlängerung), geteilt auf die drei Jahre der ursprünglich geplanten Laufzeit (Y1-Y3), die jeweils in Quartale aufgeteilt sind (Q1-Q4).

4. Ausgangslage des wissenschaftlichen und technischen Stands

UAVs mit verschiedenen Geräten zur Bilderzeugung sind schon seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Bei der Nutzung eines UAVs zur Messung radioaktiven Materials ergab sich stets die Schwierigkeit, dass die Traglast eines UAVs nicht ausreichte, um einen Detektor zum Nachweis von R/N-Material zu transportieren, der über eine ausreichend hohe Effizienz verfügt. So galt es im Rahmen des Projekts, ein UAV zu konstruieren, das für die Ausrüstung mit einem R/N-Sensor besser strukturiert ist als es die bisherigen Fluggeräte waren, und gleichzeitig einen Sensor zu bauen, der eine für die geplanten Einsatzzwecke des Systems ausreichende Effizienz bietet und mit möglichst geringer Masse auskommt.

Die auf dem Markt käuflich zu erwerbenden UAVs werden in der Regel manuell per Fernsteuerung gelenkt. Die denkbaren Einsatzszenarien für das ANCHORS-System erfordern jedoch einen gewissen Grad an Automatisierung, nicht zuletzt deshalb, weil die UAVs als Schwarm operieren sollten. Auch war ein automatisierter Start- und Landprozess der Fluggeräte auf der Basisstation vorgesehen. Auch weitere Teile des Einsatzes sollten automatisch durchgeführt werden. Die Umsetzung solcher Vorgaben stellte eine deutliche Erweiterung des zuvor vorhandenen technischen Stands dar.



5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des ANCHORS-Konsortiums waren der Sprecher des Konsortiums, Prof. Wietfeld von der TU-Dortmund, und die Konsortialleitung IFR bezüglich allgemeiner und organisatorischer Fragestellungen die wichtigsten Ansprechpartner des Fraunhofer INT. Hier erfolgten viele Absprachen bezüglich Konsortialtreffen und Übungen. Aus fachlicher Sicht war die Zusammenarbeit mit den Firmen Mirion und Ascending für das Fraunhofer INT am wichtigsten. Mirion war verantwortlich für die Konstruktion des R/N-Sensors und Ascending für die UAVs. Hierbei ging es unter anderem darum, Absprachen bezüglich Testmessungen mit dem Sensor und Komponenten des UAVs zu treffen. Fachlicher Austausch mit den anderen Partnern im Konsortium fand im Wesentlichen bei den regelmäßig durchgeführten Telefonkonferenzen und Konsortialtreffen statt, aber auch in loser Folge bilateral mit einzelnen Partnern auf verschiedenen Wegen der Kommunikation.

6. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Der Beitrag des Fraunhofer INT zu den einzelnen Arbeitspaketen konnte weitgehend wie geplant erfolgen:

Arbeitspaket 1: „Scenario und Architecture Definition“

Hier beteiligte sich das Fraunhofer INT an der Definition der technischen Anforderungen (Arbeitspaket 1.2: Technical Requirements Analysis) als auch der Systemarchitektur (Arbeitspaket 1.3: Architecture Design). Die Ergebnisse dieser Arbeit liegen in den Berichten D1.2 und D1.3 vor. Kurz zusammengefasst ließe sich das Gesamtsystem wie folgt beschreiben:

Einsatzkonzept

Das im Laufe des Projektes überarbeitete und konkretisierte Konzept sieht folgenden Ablauf vor:

Ein Einsatzwagen bringt ein mobiles Trägersystem (MTS) so nah wie vertretbar an die Gefahrenzone heran. Das MTS startet von hier aus und fährt ferngesteuert so weit möglich bzw. gewünscht. Mit Hilfe der bleiglasgeschützten Kameras des MTS ist eine Steuerung, aber auch bereits ein Lagebild möglich. Auf dem MTS befinden sich 4 kreuzförmig angeordneten Plattformen, die jeweils einen speziell für dieses System optimierten Oktokopter tragen und sich zum Fahren und zum Transport ferngesteuert einklappen lassen. Auf einem Anhänger können 2 kleine Bodenfahrzeuge mitgeführt werden und über einen Kippmechanismus das MTS verlassen. Gesteuert und überwacht werden das MTS und der Schwarm von einem speziellen Einsatzwagen aus (Mobile Mission Control Centre). Die Oktokopter können starten, nachdem jeweils ihre Plattform in die Start/Landeposition gedreht wurde. Nach dem Landen können sie über einen Greifer elektrischen Kontakt zur Stromversorgung bekommen und automatisch aufgeladen werden. Es ist auch möglich, sie über einem Auffangbecken mit einer Dusche zu dekontaminieren. Die Positionen der Oktokopter in der Luft oder ihre Flugmuster können über eine graphische Benutzerschnittstelle definiert werden. Die Fluggeräte liefern entweder bewegte optische Bilder oder Messergebnisse zur Radioaktivität. Letzteres ist möglich, wenn sie mit einem entsprechenden Sensor ausgerüstet sind, der im Rahmen des Projektes entwickelt wurde. Dabei konnte nicht nur eine Detektion und Lokalisation, sondern sogar eine Isotopen-Identifikation von radioaktiven Quellen erreicht werden. Das gemessene Radioaktivitätsprofil lässt sich auch auf einem Bildschirm kartographisch darstellen. Somit stehen der Einsatzleitung wertvolle Informationen über die Schadenslage zur Verfügung, die für die weitere Planung und für Entscheidungen wichtig sind.

Die grundsätzliche Machbarkeit dieses Konzeptes konnte mit Hilfe verschiedener Testmessungen gezeigt werden – insbesondere aber über die Entwicklung eines Funktionsmodells, das sich in realistischen Übungsszenarien bewährte



Arbeitspaket 2: „Realtime Sensor Data Analysis and Integration“

Ein wichtiger Aspekt bei der Arbeit des Fraunhofer INT im Rahmen dieses Projekts lag in der Unterstützung der Entwicklung des R/N-Sensors durch die Firma Mirion.

Im Arbeitspaket 2.1 (Sensor Design Requirements) wurden zunächst die allgemeinen Anforderungen an die R/N-Sensoren herausgearbeitet und beschrieben – s. Bericht D2.1A. Hierbei ging es vor allem um die Anforderungen aus Sicht eines Anwenders, wozu das Fraunhofer INT aufgrund seiner Erfahrung im Bereich von Messungen an radioaktivem Material einen wichtigen Beitrag leisten konnte. Bei der Entwicklung des Gesamtsystems (Arbeitspaket 2.2) und der Hardware-Komponenten (Arbeitspaket 2.3) war unser Institut für die Firma Mirion in beratender Funktion tätig. Im Arbeitspaket 2.4 fanden Überlegungen statt, wie die Daten verschiedener R/N-Sensoren zweckmäßig zu einem Lagebild zusammengeführt werden können. Hier wurden verschiedene Konzepte getestet; es zeigte sich, dass die Lösung, welche in der Mirion Radiological Base Station implementiert ist, den Anforderungen genügt.

Im Arbeitspaket 2.6 wurde der R/N-Sensor auf seine Funktionsfähigkeit auch bei sehr hohen Gammastrahlungsfeldern und seine elektromagnetische Störfestigkeit (EMS) getestet. Die EMS-Messungen wurden zeitgleich zu den analogen EMS-Messungen für das UAV durchgeführt und sind gemeinsam unter Arbeitspaket 3 beschrieben. Bei diesem Test wurde durch die elektromagnetische Strahlung keine Anomalie im Sensor induziert, eine zusätzliche Härtung des Sensors war daher nicht notwendig.

Die Messungen zur Funktion in starken Gamma-Feldern wurden an den beiden Co-60 Bestrahlungsanlagen TK100 und TK1000A¹ des Fraunhofer INT durchgeführt. Hier konnte der Sensor systematisch in einem weiten Dosisleistungsbereich von 12 mGy/h bis 310 mGy/h bzw von 1.1 Gy/h bis zu einer maximalen Dosisleistung von 34 Gy/h auf seine Funktion geprüft werden. Dies entspricht einem Test des bis zu 3,5fachen der Dosisleistung, die als Anforderung an den ANCHORS-Sensor gestellt wurde. Diese Tests erfolgten in zwei Messkampagnen, nach der ersten wurde von Mirion die Hardware zur Steigerung der Linearität optimiert. Die Verbesserung der Elektronik wurde anschließend mit einer zweiten Messung verifiziert. Diese Tests zeigten, dass der Mirion-Sensor auch extrem hohe Dosisleistungen noch zuverlässig und hinreichend genau bestimmen kann.

Arbeitspaket 3: „Unmanned System Design“

Schließlich musste der Sensor dann noch in das Gesamtsystem integriert werden.

Der aus Sicht des Fraunhofer INT zentrale Punkt dieses Arbeitspakets war die Überprüfung der Systemkomponenten auf ihre Strahlungshärte, denn im Einsatz muss das System auch in einem erhöhten Strahlungsfeld, erzeugt durch Gammastrahlung von radioaktiven Quellen oder elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich durch Funkmasten, operieren können.

Die Immunität der Funktionen wichtiger Komponenten des UAVs gegenüber Gammastrahlung ist daher von hoher Wichtigkeit, weil das ANCHORS-System gerade dafür konzipiert wurde, Strahlungsquellen aufzuspüren und diese zu lokalisieren. Dies hat zur Folge, dass die UAVs in der Nähe solcher Quellen noch funktionstüchtig sein sollten.

Die Störfestigkeit des UAVs und des R/N-Sensors gegenüber elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich (EMS) spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, denn die vom Gesamtsystem verwendeten Frequenzen zur Übertragung von Flug- und Sensordaten liegen in diesem Bereich und dürfen andere Funktionen des Systems im Einsatz nicht beeinflussen. Außerdem ist es denkbar, dass das System in der Nähe eines Funkmastes operieren soll, der Strahlung dieses Frequenzbereichs emittiert. Dies ist vor allem in Stadtgebieten mit höherer Dichte solcher Funkmasten wahrscheinlich.

¹ Mit jeweils einer Aktivität von 86.3 GBq bzw. 9.25 TBq zum Zeitpunkt des zweiten Tests.

Die Tests bezüglich der Strahlungshärte gegenüber Gammastrahlung und EMS wurden an den Bestrahlungsanlagen des Fraunhofer INT durchgeführt.

In der Bestrahlungsanlage TK1000B wurden verschiedene Komponenten eines UAVs (Motor, Kontrolleinheiten für Motor- und Flugsteuerung der Gammastrahlung einer Co-60 Quelle² ausgesetzt. Die Komponenten des UAVs wurden hierbei bis zu einer Dosis von 581 Gy bestrahlt. Der untersuchte Bereich der Dosis wurde zuvor, soweit hier eine Aussage möglich war, als weitgehend realistisch bezüglich des Strahlungshintergrunds beim Einsatz des Systems bei einem Zwischenfall in einer kerntechnischen Anlage ermittelt. Die Funktionstüchtigkeit der getesteten Komponenten wurde von außerhalb der Kammer während der Bestrahlung ständig überwacht. Die Ergebnisse der Tests fielen zufriedenstellend aus; die Komponenten zeigten zwar eine Beeinflussung durch die Strahlung, die Funktionsfähigkeit des UAVs wäre dadurch aber nicht wesentlich in Mitleidenschaft gezogen worden. So gab es eine systematische Drift der Daten der einzelnen Sensoren für die Lagesteuerung (Barometrischer Höhenmesser, Beschleunigungs- und Drehratensensoren) mit steigender Dosis. Diese zeigen allerdings schon im normalen Betrieb einen Offset, welcher durch eine Sensordatenfusion zusammen mit dem GPS-Signal rechnerisch ausgeglichen wird. Diese Sensordatenfusion hätte bei einem realen Flug ebenfalls die Drift der Sensoren kompensiert. Nur ein Sensor, welcher in der aktuellen Lagesteuerungseinheit aber nicht mehr verwendet wurde, fiel bei hoher Dosis aus. Bei der Motor-Kontrolleinheit wurde bei hoher Strahlendosis ein Anstieg der Stromaufnahme festgestellt, der Motor lief trotzdem während der gesamten Messkampagne mit den eingestellten Betriebsparametern.

Die EMS Tests fanden in dem TEM-Wellenleiter am Fraunhofer INT statt. Hierzu wurde ein Prototyp des UAVs mit verschiedenen elektromagnetischen Feldern mit Feldstärken zwischen 1 V/m bis 30 V/m und Frequenzen zwischen 80 MHz und 9.8 GHz ausgesetzt³. Sieben verschiedene Kriterien wurden kontinuierlich überwacht, nur bei wenigen Frequenzen wurde eine Reaktion des Prüflings beobachtet. Diese hätte im Einsatzfall wahrscheinlich nicht zu einem Ausfall des UAVs geführt. Der R/N-Sensor wurde mit den gleichen Feldstärken und Frequenzen beaufschlagt. Überwacht wurde in diesem Fall das Spektrum einer ¹³⁷Cs-Quelle mit 37.4 kBq in unmittelbarer Nähe des Detektors. Hierbei konnten keine Anomalie im Sensor induziert werden. Siehe hierzu die beiden Berichte [6,7].



UAV-Prototyp bei EMS Tests im TEM-Wellenleiter

Auch die angesetzte erforderliche Arbeitszeit für alle Bestrahlungstests erwies sich letztlich als realistisch; diese Messungen wurden innerhalb einer Kalenderwoche durchgeführt.

Arbeitspaket 4: „Vehicular Ad-hoc Communication System“

Hier war für das Fraunhofer INT kein Beitrag vorgesehen.

Arbeitspaket 5: „Cooperative Swarm Behavior (CSB)“

Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich unter anderem mit der Entwicklung von Algorithmen, die der UAV-Schwarm ausführen sollte, um radioaktives Material aufzuspüren. Hier lieferte das Fraunhofer INT mithilfe seiner großen Erfahrung auf dem Gebiet der Detektion von R/N-Material einen Beitrag zur Frage, wie solches Material effektiv nachgewiesen werden kann und war somit

² Mit einer Aktivität von 11.0 TBq zum Zeitpunkt des Tests.

³ In den Bereichen 80 MHz-1000 MHz, 1400 MHz-2700 MHz und bei den Einzelfrequenzen 400 MHz, 810 MHz, 1840 MHz, 2400 MHz, 2660 MHz, 3020 MHz, 5200 MHz, 580 MHz und 9375 MHz



bei der Entwicklung der Algorithmen beratend tätig. Ein solcher Algorithmus kam dann im Arbeitspaket 6 bei einer Demonstration des Gesamtsystems zum Einsatz.

Arbeitspaket 6 „Platform Integration & System Validation“

Die Strahlenhärte und elektromagnetische Verträglichkeit des Demonstrators wurden bereits im Arbeitspaket 3.4 überprüft; diese Eigenschaften konnten gewährleistet werden. Bei der Integration des R/N-Sensors in den Demonstrator war das Fraunhofer INT beratend tätig, ebenso bei der Erarbeitung der Kriterien, die zu einem erfolgreichen Zusammenwirken der Komponenten des Systems führten. Die Funktionalität des Demonstrators wurde schließlich unter Mitwirkung des Fraunhofer INT im Rahmen von Testszenarien belegt. Hier war unser Institut vor allem an Planung und Durchführung beteiligt, beispielsweise bei einer Demonstration des Gesamtsystems zum Ende der Projektlaufzeit. Hierbei wurden mehrere UAVs und UGVs eingesetzt, um ein Lagebild bei einer Situation einer verlassenen radioaktiven Quelle auf einem weitgehend offenen Industriegelände zu erstellen. Die Auswahl des Geländes und die Ausleihe einer geeigneten Quelle oblagen dem Institut der Feuerwehr Dortmund. Zwei der am Gelände eingesetzten vier UAVs waren mit einem R/N-Sensor ausgestattet und überflogen das Gebiet um die Quelle in einem vorgegebenen Suchmuster, während andere UAVs mit optischen Kameras zu Erkennung der dienen. Die radioaktive Quelle konnte lokalisiert und identifiziert werden. Die zu diesem Zeitpunkt noch nicht einsatzfähige Routine zur Automatisierung des Start- und Landeprozesses der UAVs auf der mobilen Bodenstation wurde zu einem späteren Zeitpunkt fertiggestellt und getestet.

7. Zahlenmäßiger Nachweis

Für die vom Fraunhofer INT vorgesehen Testmessungen waren Anlagen und Laborausstattung nötig, die aber bereits im Institut vorhanden waren. Somit ergab sich keine Notwendigkeit größerer Anschaffungen. Die geplanten Reisekosten konnten reduziert werden, weil einige Reisen eingespart werden konnten. Ein genauer zahlenmäßiger Nachweis über sämtliche Ausgaben und Personalkosten wurde von der Fraunhofer Gesellschaft direkt an den Zuwendungsgeber geschickt.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die vom Fraunhofer INT im Vorfeld des Projekts kalkulierten erforderlichen Arbeitszeiten erwiesen sich als grundsätzlich angemessen. Bei der finanziellen Kalkulation zeigte sich, dass die Personalmittel eher knapp berechnet waren, was natürlich vor allem auf die nachträgliche Verlängerung der Projektlaufzeit zurückzuführen war. Der tatsächliche Arbeitsaufwand lag somit etwas oberhalb des kalkulierten, wobei die ausgeführten Arbeitsschritte des Fraunhofer INT allesamt notwendig waren, um einen erfolgreichen Beitrag zur Finalisierung des ANCHORS-Systems leisten zu können. Eine Kürzung der Arbeitsschritte wäre diesem Ziel nicht dienlich gewesen, sei es bei der Unterstützung bei der Konstruktion des R/N-Sensors, bei den Messungen zur Strahlenhärte der den Planungen der Übungen und Demonstrationen. Lediglich das Reisebudget hätte etwas geringer ausfallen können, hier waren nicht ganz so viele bzw. teure Reisen erforderlich wie ursprünglich geplant. Insgesamt kann aber von einer grundsätzlich der Arbeit angemessenen Kalkulation mit jeweils notwendigen Arbeitsschritten gesprochen werden.



9. Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Das ANCHORS-System bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Es kann in der vorliegenden oder in einer modifizierten bzw. erweiterten Version in Krisenszenarien eingesetzt werden, wo der Verdacht der Gefahr durch radioaktives Material vorliegt und eine Aufklärung am Boden nicht oder nur unzureichend durchgeführt werden kann. So könnte eine erste Aufklärung über die Luft erfolgen, ohne dass Einsatzkräfte zu hohen Strahlendosen ausgesetzt werden müssten. Als möglicher Anwender des System kommen vor allem Feuerwehr-Einrichtungen in Betracht, die das System als Ergänzung vorhandener Mittel zur Bewertung einer Gefahrenlage unter Beteiligung von R/N-Material, also beispielsweise zusätzlich zu Fahrzeugen zur ABC-Erkundung, einsetzen könnten. Eine solche Option existierte vor dem Beginn dieses Projektes noch nicht.

Eine ausführlichere Darlegung der möglichen weiteren Verwendung der Ergebnisse findet sich im Abschlussbericht der Feuerwehr Dortmund [8] und im Bericht D6.5 [9].

10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Mitarbeiter des Fraunhofer INT besuchen regelmäßig Konferenzen und prüfen Fachzeitschrift um neuartige Methoden zur zerstörungsfreien Messung von R/N-Material aufzuspüren. In diesem Rahmen sollten folgende Projekte, die einen Bezug zu ANCHORS haben, erwähnt werden

- Ein Projekt des Fusion Technology Labs der Universität Wisconsin-Madison. Hier soll ein Schwarm von UAVs genutzt werden, um konventionellen Sprengstoff durch prompte Neutronenaktivierungsanalyse aufzuspüren. Hierzu trägt ein UAV eine Neutronenquelle, die es knapp über einem zu untersuchenden Objekt aktiviert. Weitere UAVs messen die induzierte Gamma-Strahlung und können durch die Detektion hochenergetischer, charakteristischer Linien die relative Konzentration der Elemente Stickstoff und Sauerstoff ermitteln. Dies erlaubt es, über die charakteristische Signatur von Sprengstoffen, Landminen und IEDs zu erkennen.
- Entwicklungen, verschiedener Firmen, die ein UAV mit einem Strahlungssensor gekoppelt haben. Z.B.: DroneRAD von Technical Associates, hier ist auch eine Aerosol-Probenahme mögliche; Apodaca von Escuadrone, ein Starrflügler mit einer Spannweite von 1.2 m; ein Strahlungssensor von Aretas, der speziell für deren UAVs entwickelt wurde.
- Im Rahmen der Detektion radioaktiver Stoffe ist auch das AeroGamma-System des BfS zu nennen. Dies besteht auf mehreren großvolumigen NaI-Detektoren und einem hochauflösendem HPGe-Detektor und wird durch einen Hubschrauber EC 135 der Bundespolizei eingesetzt. Das BfS plant, dieses System durch einen Aerosol-Sammler zu erweitern, um die luftgetragene Radioaktivität von der bodengebundenen trennen zu können.

11. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Ergebnisse und Zwischenergebnisse des Projekts wurden sowohl einem Fachpublikum als auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das Fraunhofer INT war in dieser Hinsicht bei folgenden Publikationen federführend:

- Statusberichte zum Projekt in den Jahresberichten 2013, 2014 und 2015 des Fraunhofer INT
- Ausstellungsstand zum Projekt bei der Konferenz „7th Future Security“ in Bonn 2012
- Vortrag bei der Konferenz „6th International UAV World Conference“ in Frankfurt/Main 2012
- Artikel zum Projekt im Magazin „WeiterVorn“ der Fraunhofer Gesellschaft 2013



- Poster bei der Internationalen Luft- und Raumfahrttausstellung (ILA) in Berlin 2014
- Vortrag bei der „Kleinheubacher Tagung“ in Miltenberg 2014
- Vortrag bei der Konferenz „9th Future Security“ in Berlin 2014
- Vortrag bei der Konferenz „EMC Europe“ in Dresden 2015

In diesem Zusammenhang sollten auch die vom Fraunhofer INT organisierte Demonstration eines mit dem R/N-Sensor ausgestatteten UAVs auf dem Übungsgelände der Landesfeuerwehrschule in Münster 2014 und die Abschlussdemonstration des Projekts in Dortmund 2015 erwähnt werden.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt ANCHORS wurde ein System bestehend aus UAVs, UGVs und einer zugehörigen mobilen Bodenstation konstruiert, um bei einem Zwischenfall unter Beteiligung von R/N-Material eine Aufklärung aus der Luft zu betreiben und das fragliche Material auf diese Weise lokalisieren und im besten Fall auch identifizieren zu können. Dazu wurde ein Konsortium gebildet, welches aus Vertretern der Industrie, Forschungseinrichtungen, universitären Einrichtungen, zivilen Einsatzkräften (Feuerwehren) und Behörden bestand.

Obwohl nicht alle ursprünglichen Ziele vollständig in die Tat umgesetzt werden konnten - so ist etwa der automatisierte Landevorgang noch nicht völlig ausgereift - , stand am Ende doch ein funktionierendes System, das die gestellte Aufgabe auch unter realistischen Einsatzbedingungen zufriedenstellend erfüllte. Das System ist also grundsätzlich geeignet, den Einsatzkräften am Ort eines Zwischenfalls einen Überblick der Lage sowie Position und Art des R/N-Materials zu verschaffen, um dann entsprechend weitere Maßnahmen zur Sicherung einleiten zu können. So wäre das System beispielsweise für Feuerwehren eine sinnvolle Ergänzung zu bereits vorhandener Ausrüstung für Einsätze unter Beteiligung von R/N-Material, z.B. ABC-Erkunder oder ähnliche Fahrzeuge.

Möglichkeiten zur Erweiterung und Verbesserung des Systems sind sicherlich vorhanden. So könnte die Zahl der mit R/N-Sensoren ausgestatteten UAVs erhöht werden, um größere Gebiete in angemessener Zeit abzusuchen. Ebenso kann der Grad der Automatisierung des Systems noch erheblich erhöht werden, so dass die UAVs verschiedene Suchszenarien durchführen und sich auf die Situation einstellen können. Wurde beispielsweise R/N-Material grob lokalisiert, so kann auch ein engeres Suchmuster gewechselt werden, um die Präzision bezüglich des Ortes noch zu verbessern. Ansätze für potentielle Nachfolgeprojekte sind also durchaus vorhanden.

13. Literaturverzeichnis

- [1] Risse, M. ; Berky, W. ; Köble, T. ; Rosenstock, W.:
Car-borne tracking of fissile material by covert search procedures: Presentation held at the Institute of Nuclear Materials Management, Annual Meeting, 2011, Palm Desert, CA., 2011, 10 pp.
(URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-179543.html>);
- [2] Rosenstock, W. ; Berky, W. ; Chmel, S. ; Friedrich, H. ; Köble, T. ; Risse, M. ; Schumann, O.:
Hand-held devices for the detection of clandestine nuclear material on-site.
In: International Atomic Energy Agency -IAEA-, Wien:
Symposium on International Safeguards 2010. Preparing for future verification challenges. Book of Abstracts : 1-5 November 2010 Vienna, Austria
Wien: IAEA, 2010, pp.61
(URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-145990.html>);



- [3] Risse, M. ; Berky, W. ; Friedrich, H. ; Köble, T. ; Rosenstock, W. ; Rennhofer, H. ; Pedersen, B.:
Identification of nuclear material with hand-held and portable gamma and neutron measuring devices.
In: Institute of Nuclear Materials Management -INMM-:
INMM 51st Annual Meeting 2010. CD-ROM : Proceedings of the Institute of Nuclear Materials Management, Madison: Omnipress, 2010, 10 pp.
(URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-146085.html>);
- [4] Köble, T. ; Rosenstock, W. ; Berky, W. ; Friedrich, H. ; Risse, M.:
New radionuclide measurement systems improving search and detection capabilities for OSI deployment.
In: Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization -CTBTO-, ISS09, International Scientific Studies Conference. Book of abstracts : 10-12 June 2009, Hofburg Palace, Vienna, Austria Vienna, 2009, pp.65;
- [5] Rosenstock, W. ; Köble, T. ; Risse, M.:
Non-destructive measuring techniques for on-site detection and identification of illicit nuclear material.
In: Kerntechnik 74 (2009), No.4, pp.181-187.
- [6] Jöster, M.
EMI Test Report No. TR-EME104957/01 part 01, ANCHORS Optocopter
- [7] Jöster, M.
EMI Test Report No. TR-EME104957/02 part 01, ANCHORS Radiological and Nuclear Multi-Detector Sensor
- [8] Brauer, P., Pratzler-Wanczura, S.
ANCHORS Abschlussbericht des Institutes für Feuerwehr- und Rettungstechnologie
- [9] Berky, W., Chmel, S., Schumann, O.:
ANCHORS D6.1: *System Validation Report*

14. Glossar

- ABC: atomar, biologisch und chemisch
DWT: deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik e.V.
EMS: elektromagnetische Störfestigkeit
EMV: elektromagnetische Verträglichkeit
IND: Improvised Nuclear Device
RDD: Radiological Dispersion Device
R/N: radiologisch und nuklear
SGW: Studiengesellschaft der DWT mbH
UAV: Unmanned Aerial Vehicle
UGV: Unmanned Ground Vehicle